발간등록번호
11-1390000-100143-01

대한민국 2035
미래농업 기술전망



농촌진흥청
(사)한국농식품생명과학협회

머리말

농업은 국민의 먹거리를 책임지는 생명산업이자 식량안보와 국가의 지속가능한 미래를 든든하게 받쳐주는 가장 핵심적인 국가기간산업입니다. 우리 농업은 시대마다 새로운 과학기술을 받아들이고 발전시키며 수많은 도전을 극복하고 새로운 가치를 창출해 왔습니다.

2021년 「대한민국 2030 미래농업 기술전망」을 발간한 이후, 불과 5년이라는 짧은 시간 동안 농업을 둘러싼 대내외 환경과 기술 생태계는 우리의 예상을 뛰어넘는 속도로 급변하였습니다. 기후변화와 국제 공급망의 불확실성, 농업인구 감소와 고령화, 탄소중립에 대한 요구가 더욱 커지는 가운데, 생성형 AI의 폭발적인 등장은 산업과 사회 전반의 혁신 속도를 전례 없이 가속화하고 있습니다. 특히 AI는 빅데이터, 위성, 로봇, 유전체 등 다양한 기술과 결합하며 농업의 연구개발과 생산방식에도 새로운 변화를 만들어가고 있습니다.

이제 농업과학기술은 이러한 변화에 대응하는 것을 넘어, 미래 농업의 청사진을 주도적으로 그려나가야 할 결정적 시점에 와 있습니다. 데이터와 AI를 활용해 농업환경과 생산을 보다 정밀하게 예측하고, 기후위기와 자연재해에 선제적으로 대응하며, 첨단 바이오 및 에너지 기술을 접목하여 농업의 지속가능성과 부가가치를 한 차원 높이는 혁신이 그 어느 때보다 중요해졌습니다.

이에 농촌진흥청과 한국농식품생명과학협회는 2035년 다가올 미래 농업의 거대한 변화를 조망하고, 대한민국이 나아가야 할 농업과학기술의 핵심 발전 방향을 제시하고자 「대한민국 2035 미래농업 기술전망」을 발간하였습니다.

급변하는 기술 환경 속에서 본 보고서가 대한민국 농업의 내일을 함께 고민하고, 미래 농업과학기술 연구개발의 새로운 지평을 여는 든든한 나침반이 되기를 진심으로 기대합니다. 아울러 미래 농업에 대한 깊은 통찰과 전문성을 바탕으로 보고서 작성에 참여해 주신 모든 분께 깊이 감사드립니다.

2026년 10월

농촌진흥청장 **이 승 돈**

한국농식품생명과학협회장 **강 병 철**

목 차

Part 1. 총 론 ····· 1

Ⅰ. 미래 농업환경의 변화 ····· 2

Ⅱ. 미래 농업의 전환 방향 ····· 8

Ⅲ. 미래 농업의 핵심기술 ····· 12

Part 2. 기술 분야별 전망 ····· 14

Ⅰ. 지능형 농업 인프라 ····· 16

1. 농업위성 ····· 16
2. 인공지능(AI) · 농업로봇 ····· 65
3. 농업 기반 신재생에너지 ····· 118

Ⅱ. 첨단 그린바이오 ····· 163

4. 디지털육종 ····· 164
5. 마이크로바이옴 ····· 211
6. 푸드테크 ····· 257

Ⅲ. 지속가능 농업생산 ····· 312

7. 농업 기상재해 대응 기술 ····· 313
8. 정밀 병해충 관리 ····· 364
9. 친환경 · 저탄소 축산 ····· 407

Part. 1

총론

Ⅰ. 미래 농업환경의 변화

Ⅱ. 미래 농업의 전환 방향

Ⅲ. 미래 농업의 핵심 기술

Ⅰ. 미래 농업환경의 변화

농업을 둘러싼 환경이 빠르게 변화하고 있다. 기후변화와 국제 식량 공급망의 불확실성, 농업 인구 감소와 고령화, 인공지능(AI)을 중심으로 한 디지털 기술의 발전, 탄소중립과 지속가능성에 대한 요구가 동시에 확대되면서 농업의 생산방식과 기술개발 방향에도 근본적인 변화가 요구되고 있다.

과거 농업기술의 주요 목표가 단위면적당 생산량 증가와 노동생산성 향상에 있었다면, 미래 농업에서는 생산성뿐 아니라 안정성, 회복력, 자원 효율성, 환경성 및 산업 경쟁력을 함께 확보해야 한다. 농업기술 역시 개별 생산공정의 효율을 높이는 수준을 넘어 농업환경을 관측하고, 생산과 위험을 예측하며, 자원과 작업을 정밀하게 관리하는 방향으로 발전할 필요가 있다.



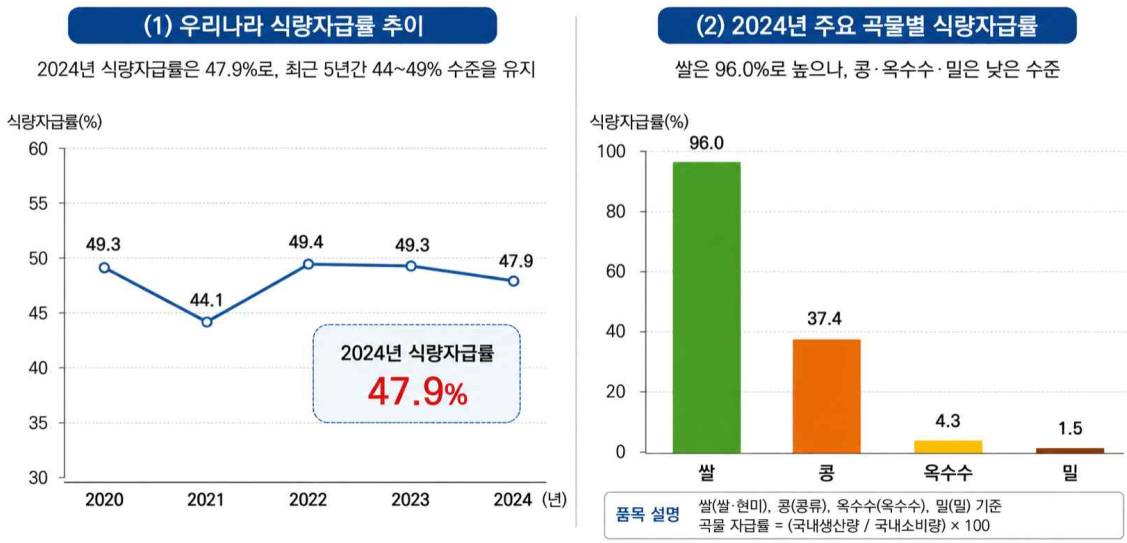
1 기후변화와 식량안보

기후변화는 농업 생산환경을 결정짓는 핵심 요인 중 하나이다. 우리나라의 기후변화도 장기간에 걸쳐 뚜렷하게 나타나고 있다. 기상청과 국립기상과학원의 분석에 따르면 최근 30년(1991~2020년)의 연평균 기온은 13.7℃로 과거 30년(1912~1940년)의 연평균 기온인 12.1℃보다 1.6℃ 상승하였으며, 지난 109년간 10년당 약 0.2℃의 상승 추세를 보였다(출처: 기상청 · 국립기상과학원(2021), 우리나라 109년(1912~2020년) 기후변화 분석 보고서). 이러한 장기적인 기온 상승과 함께 가뭄 · 홍수 · 폭염 · 이상저온 등 극한 기상의 변화는 작물의 생육과 수량, 품질의 불확실성을 높이고 병해충의 발생 시기와 분포에도 영향을 미치고 있다.

농업생산을 둘러싼 기후조건의 변동이 커지면서 농업의 적응 전략 또한 근본적인 변화가 필요

하다. 특히 기후재해가 광역화·복합화되면서 과거의 평균적인 기후조건과 경험을 중심으로 농업을 관리하는 방식의 한계가 커지고 있다. 재해 발생 이후 피해를 조사하고 복구하는 사후 대응만으로는 농업생산의 안정성을 확보하기 어렵다. 농경지와 작물의 상태를 지속적으로 관측하고, 기상과 생육정보를 연계하여 위험을 사전에 파악하며, 실제 농업인의 대응과 생산관리로 연결할 수 있는 능력이 중요해지고 있다.

이러한 기후변화의 영향은 개별 농가와 국내 생산에 머무르지 않고 국제 식량 공급망을 통해 식량안보 문제로 확대되고 있다. 주요 곡물 생산국에서 발생하는 이상기후와 전쟁, 물류 차질, 수출제한 등은 국제 생산량과 가격의 변동성을 높인다. 특히 우리나라는 주요 곡물의 수입 의존도가 높아 해외 생산환경과 공급망 변화에 영향을 받기 쉬운 구조이다. 2024년 기준 식량자급률은 47.9%이며, 품목별로는 쌀이 96.0%인 반면 콩은 37.4%, 옥수수는 4.3%, 밀은 1.5%에 불과하였다(그림 1).



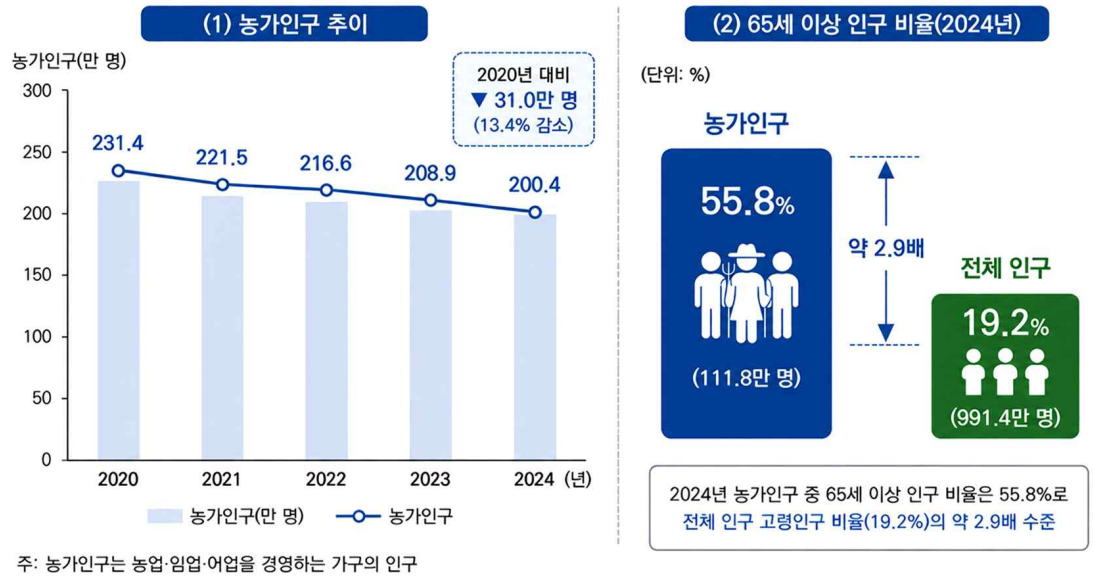
(출처: 농식품부(2025), 2025 농림축산식품 통계연보)

그림 1. 우리나라 식량자급률 추이 및 주요 곡물별 자급률

이처럼 국내 생산환경의 불확실성과 해외 공급망에 대한 높은 의존도가 동시에 존재한다는 점에서 식량안보를 위한 정보·예측 역량의 중요성은 더욱 커지고 있다. 앞으로 식량안보는 단순히 국내 생산량을 확대하는 문제를 넘어 국내외 농업환경과 공급망의 변화를 지속적으로 관측하고, 생산·수급 위험을 예측하여 선제적으로 대응하는 문제로 확대될 전망이다.

2 농업인구 감소와 생산기반 변화

농업인구 감소와 고령화는 우리 농업의 지속가능성을 위협하는 구조적인 문제이다. 2024년 우리나라 농가인구는 200만 4천 명으로 2020년 231만 4천 명에 비해 약 31만 명 감소하였다. 최근 4년간 농가인구가 약 13.4% 감소한 것이다. 동시에 농가인구 가운데 65세 이상 인구 비율은 2024년 55.8%로, 같은 해 우리나라 전체 인구의 고령인구 비율인 19.2%의 약 2.9배 수준이다(그림 2).



(출처: 통계청(2025), 2024년 농림어업조사 결과)

그림 2. 우리나라 농가인구 감소와 고령화 추이

이러한 농업인구의 감소와 고령화는 단순한 인구구조의 변화를 넘어 농작업 수행과 생산관리 방식의 전환을 요구하고 있다. 농업은 파종 · 정식 · 방제 · 수확 등 특정 시기에 노동수요가 집중되고 작업 적기를 놓칠 경우 생산량과 품질에 직접적인 영향을 받는 특성이 있다. 이러한 상황에서 농업 노동력이 지속적으로 감소하고 고령화되면 기존의 전통적인 인력 중심의 생산방식을 유지하기는 점차 어려워질 것이다. 특히 광범위한 농경지를 사람이 직접 관찰하여 상태를 파악하거나 반복적이고 위험한 농작업을 모두 인력에 의존하는 생산방식은 한계에 직면할 수밖에 없다.

노동력 부족에 대응하기 위해서는 농작업의 자동화와 함께 생산관리 방식 자체의 효율화도 필요하다. 우리나라 농업은 상대적으로 소규모 필지가 분산되어 있어 현장조사 중심으로 농업정보를 지속적으로 수집하는 데 많은 시간과 비용이 소요된다. 따라서 미래 농업에서는 노동력을 단순히 기계로 대체하는 것을 넘어 사람이 수행하기 어려운 관측 · 반복 · 위험 작업을 자동화하고, 사람은 생산전략 수립과 경영관리, 의사결정에 집중하는 방향으로 변화해야 한다.

이러한 변화는 농업경영의 규모화와 전문화 방식에도 영향을 미칠 것으로 예상된다. 미래의

규모화는 단순한 농지면적 확대에 그치지 않고 생산관리, 농작업, 데이터 분석, 에너지 사용 최적화 등의 기능이 전문화되고, 농가가 필요한 기술을 전문기업, 농작업 대행조직 및 플랫폼 서비스를 통해 활용하는 형태로 전환될 가능성이 있다.

3 디지털 · 바이오 기술혁신

인구 · 기후 등 농업을 둘러싼 구조적 변화와 함께 디지털 · 바이오 분야의 빠른 기술혁신은 농업의 문제해결 방식 자체를 변화시키고 있다. AI, 빅데이터, 위성, 로봇, 센서, 디지털트윈, 유전체 분석 등 첨단기술이 농업에 빠르게 접목되면서 생산과 관리의 디지털 전환이 가속화되고 있다.

농업의 디지털 전환은 농장에 센서나 자동화 장비를 설치하는 것만을 의미하지 않는다. 농업 환경과 생산과정에서 발생하는 정보를 데이터로 전환하고, 이를 분석하여 의사결정에 활용하며, 그 결과를 다시 현장의 생산과 관리에 반영하여 지속적으로 개선하는 순환 체계를 구축하는 것이 핵심이다.

농업 현장에서는 기상, 토양, 생육, 병해충, 농기계, 농작업에 이르는 방대한 정보가 데이터로 전환되고 있으며, 위성과 드론, 온도 · 토양수분 등을 측정하는 농경지 환경 센서를 활용해 농경지의 상태와 변화를 광역적이면서도 정밀하게 파악할 수 있는 인프라가 확대되고 있다. AI는 이러한 정보들을 종합하여 작물의 생육, 수확량, 재해 및 병해충 위험을 예측하며, 자동화 장비와 로봇은 분석 결과를 실제 현장의 농작업으로 연결할 수 있다. 생명과학 분야에서도 데이터 기반 연구가 빠르게 확대되고 있다. 육종 대상의 유전체, 표현체와 환경정보 등을 활용하여 품종의 특성을 사전에 예측하고 육종전략을 설계하는 방식으로 발전하고 있으며, 토양 · 작물 · 가축에 존재하는 미생물 군집과 그 기능을 분석하여 생산성과 환경적응성을 높이는 기술도 발전하고 있다.

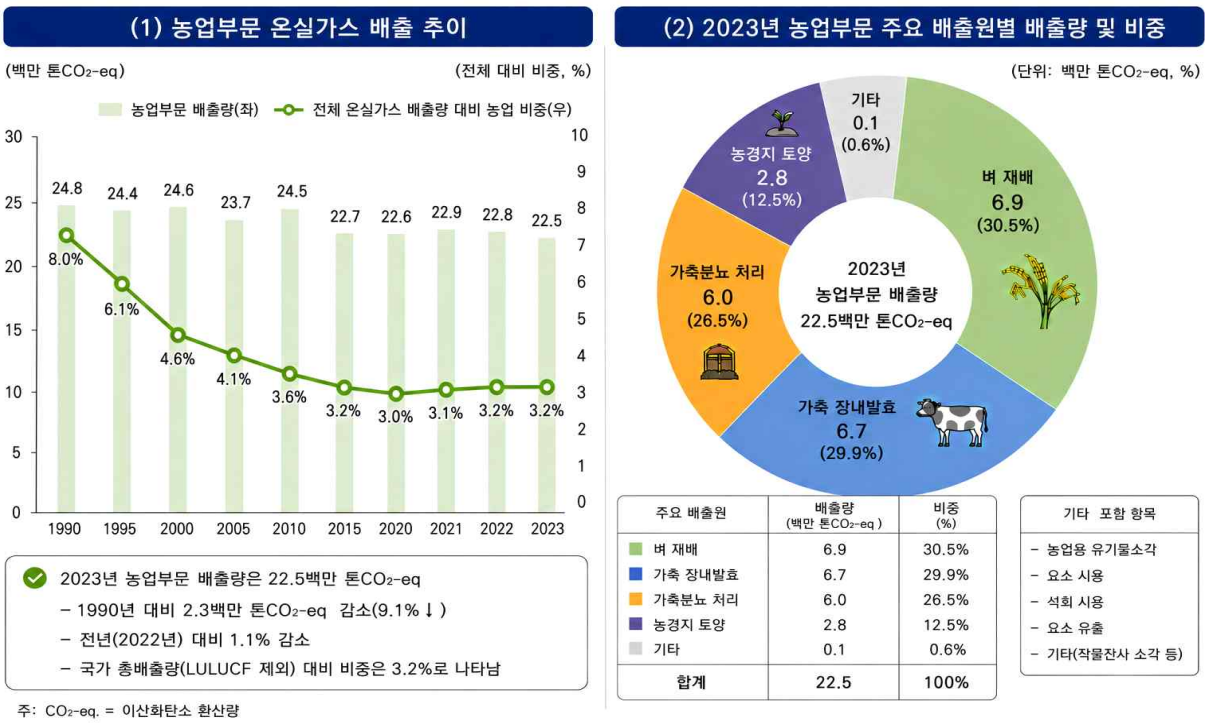
향후 농업의 경쟁력은 개별 장비나 기술의 성능뿐 아니라 다양한 농업정보를 얼마나 안정적으로 확보하고 연결하며, 이를 실제 의사결정과 생산활동에 효과적으로 활용하느냐에 따라 결정될 것이다. 동시에 이러한 기술혁신은 생산성 향상뿐 아니라 자원과 에너지의 효율적 이용, 환경부담 저감 등 지속가능성 문제를 해결하는 수단으로도 활용될 것이다.

4 탄소중립과 지속가능성 요구

농업은 식량을 생산하는 산업인 동시에 토지 · 물 · 에너지와 생물자원을 이용하는 과정에서 환경부하를 발생시키는 산업이기도 하다. 특히 벼 재배, 가축의 장내발효, 가축분뇨 관리 및 농경지 토양 등 다양한 생산과정에서 온실가스가 발생한다. 2023년 국가 온실가스 총배출량은

707.2백만톤 CO_2 −eq이며, 이 가운데 농업 분야 온실가스 배출량은 22.5백만톤으로 전체의 3.2%를 차지하였다. 농업분야의 배출량은 1990년 대비 9.1%, 전년(2022년) 대비 1.1% 감소하였으며, 국가 총배출량에서 차지하는 비중도 1990년 8.0%에서 2023년 3.2%로 낮아졌다. 주요 배출원은 벼 재배 30.5%, 가축 장내발효 29.9%, 가축분뇨 처리 26.5%, 농경지 토양 12.5% 순으로 나타났다(그림 3).

이러한 배출 현황은 농업의 생산성과 함께 자원 · 에너지 이용과 환경영향을 동시에 고려하는 기술적 전환이 필요함을 보여준다. 그동안 농업기술의 성과는 절대적인 생산량 확대와 투입 대비 생산성 향상을 중심으로 평가되어 왔으나, 앞으로는 생산성과 함께 온실가스, 에너지, 물, 농약 · 비료 사용, 자원순환 및 생태환경에 미치는 영향을 종합적으로 평가해야 한다.



(출처: 온실가스종합정보센터(2026), 2025 국가 온실가스 인벤토리 보고서)

그림 3. 우리나라 농업부문 온실가스 배출 추이 및 주요 배출원

또한 지속가능성에 대한 요구는 환경문제를 넘어 농업경영과 산업경쟁력의 문제로 확대되고 있다. 화석연료와 외부 투입재의 가격 변동, 탄소중립 정책과 환경규제의 강화는 농업의 비용과 시장경쟁력에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 이에 따라 농업부문에서도 에너지 사용을 줄이고 재생에너지 활용을 확대하며, 화학적 투입재를 생물 기반 기술로 일부 대체하고, 농업부산물과 축산분뇨를 자원으로 재활용하는 생산체계가 중요해질 것이다.

지속가능성에 대한 요구는 농업생산의 환경부담을 줄이는 것과 함께 생산성과 자원효율을 높이고 새로운 시장과 가치를 창출하는 방향으로 확대되고 있다. 이에 따라 지속가능성은 미래

농업의 핵심 경쟁력이 될 전망이다.

5 미래 농업이 해결해야 할 핵심 과제



앞서 살펴본 농업환경의 변화는 개별적인 현상이 아니라 서로 영향을 주고받으며 농업의 생산과 관리, 경영 전반에 영향을 미치는 구조적 변화이다. 기후변화와 식량안보의 불확실성, 농업인구 감소와 고령화, 디지털 · 바이오 기술혁신, 탄소중립과 지속가능성에 대한 요구를 종합해 볼 때, 미래 농업이 해결해야 할 핵심 과제는 다음 네 가지로 정리할 수 있다.

첫째, 생산 · 의사결정의 불확실성 증가이다. 기후와 생산환경의 변동성이 커지는 가운데 농업인구 감소와 경영규모 확대가 동시에 진행되면서 농업인이 직접 현장을 관찰하고 경험에 의존하여 생산을 관리하는 방식에는 한계가 있다. 보다 적은 인력으로 넓은 농경지와 복잡한 생산과정을 안정적으로 관리할 수 있는 역량 확보가 중요한 과제이다.

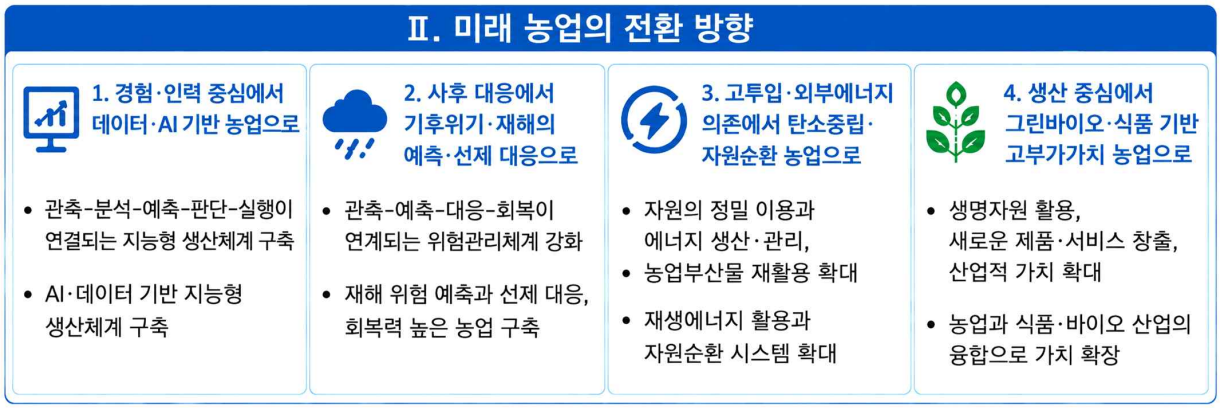
둘째, 기후 · 재해로 인한 생산안정성 약화이다. 기후변화로 기상재해와 병해충 위험이 광역화 · 복합화되고, 국제 식량 공급망의 불확실성까지 확대되면서 농업생산과 식량수급의 변동성이 증가하고 있다. 생산위험을 조기에 파악하고 피해를 최소화하여 안정적인 생산과 수급을 유지할 수 있는 대응역량이 요구된다.

셋째, 자원 · 에너지 의존과 환경부담 증가이다. 농업생산은 에너지와 물, 비료 · 농약 · 사료 등 다양한 외부자원에 의존하고 있으며, 생산과정에서 온실가스 배출과 부산물의 부적절한 처리에 따른 환경부담도 발생한다. 생산성을 유지하면서 자원과 에너지의 이용효율을 높이고 환경부담을 줄이는 것이 미래 농업의 중요한 과제이다.

넷째, 생산 중심 산업구조의 성장 한계이다. 농업의 가치가 농산물 생산과 판매에 집중된 구조에서는 새로운 시장과 부가가치를 창출하는 데 한계가 있다. 디지털 · 바이오 기술의 발전과 건강 및 식품에 대한 소비자의 다양한 수요 변화에 대응하여 농업이 보유한 생명자원과 생산기반의 활용범위를 넓히고 새로운 산업적 가치를 창출할 필요가 있다.

Ⅱ. 미래 농업의 전환 방향

앞서 제시한 네 가지 핵심 과제는 개별적인 문제 해결을 넘어 농업의 생산과 관리, 위험대응 및 가치창출 방식의 전환을 요구하고 있다. 이러한 관점에서 미래 농업의 주요 전환 방향은 ① 데이터 · AI 기반 농업 전환, ② 기후위기 · 재해 대응 강화, ③ 탄소중립 · 에너지 · 자원순환 전환, ④ 그린바이오 · 식품 고부가가치화의 네 가지로 정리할 수 있다.



1 경험 · 인력 중심에서 데이터 · AI 기반 농업으로

농업은 오랫동안 농업인의 경험과 숙련을 기반으로 발전해 왔다. 이러한 경험은 앞으로도 중요한 농업자산이지만, 기후와 생산환경의 변동성이 심화되고 농업인구가 감소하면서 개인의 경험과 인력만으로 농경지와 작물 · 가축의 상태를 지속적으로 파악하고 최적의 의사결정을 내리는 데에는 명백한 한계가 존재한다.

미래 농업에서는 위성 · 드론 · 센서 · 농기계 등을 통해 농업환경과 생산과정에서 생성되는 정보를 지속적으로 수집하고, AI를 활용하여 이를 분석함으로써 생산과 위험을 예측하고 의사결정을 지원하는 방식이 확대될 전망이다. 작황과 수확량, 병해충, 기상재해 등을 사전에 예측하고 그 결과를 생산관리와 농작업에 활용함으로써 농업의 안정성과 생산성을 함께 높일 수 있다.

이러한 데이터 기반 의사결정은 농작업의 자동화 · 자율화와 연결될 것이다. 기존 농업기계가 사람이 직접 조작하여 노동력을 절감하는 수단이었다면, 앞으로는 AI와 센서가 환경과 작물의 상태를 인식하고 필요한 작업을 판단하여 로봇과 농기계가 이를 수행하는 지능형 자동화가 확대될 것이다. 장기적으로는 개별 장비의 자동화를 넘어 농장관리시스템을 중심으로 농기계 · 로봇 · 시설이 연결되는 농장 단위의 자율 운영 체계로 발전할 것이다.

결국 미래 농업의 데이터 · AI 전환은 단순히 농업정보를 디지털화하거나 자동화 장비를 도입하는 것을 넘어 관측-분석-예측-판단-실행이 연결되는 지능형 생산체계로 전환하는 것을 의미한다.

2 사후 대응에서 기후위기 · 재해의 예측 · 선제 대응으로

기후변화로 가뭄 · 홍수 · 폭염 · 이상저온 등 농업기상재해의 불확실성이 증가하고 병해충의 발생 양상도 변화하면서 농업생산의 위험이 높아지고 있다. 특히 재해가 광역화 · 복합화되면서 발생 이후의 대응만으로는 피해를 줄이고 안정적인 생산을 유지하는 데 한계가 있다.

이에 따라 미래 농업의 위험관리는 사후 대응 중심에서 생산환경의 변화를 지속적으로 관측하고 위험을 사전에 예측하여 선제적으로 대응하는 방식으로 전환될 필요가 있다. 기상과 농업환경, 작물의 생육상태 등을 종합적으로 파악하여 재해와 병해충의 발생 가능성과 영향을 조기에 예측하고, 이를 생산관리와 대응에 활용함으로써 피해를 최소화하는 것이 중요하다.

이러한 선제적 위험관리는 개별 농가의 피해를 줄이는 것을 넘어 농업생산 전반의 안정성을 높이는 기반이 된다. 또한 국내외 주요 농산물의 작황과 생산여건 변화를 조기에 파악함으로써 생산 · 수급 위험에 대응하고 식량안보를 강화하는 데에도 기여할 수 있다.

따라서 미래 농업은 재해 발생 이후의 대응 · 복구 중심에서 관측-예측-대응-회복을 연계하는 선제적 위험관리체계로 전환하여 기후위기에 대한 농업의 안정성과 회복력을 높여야 한다.

3 고투입 · 외부자원 의존에서 탄소중립 · 에너지 · 자원순환 농업으로

미래 농업에서는 생산성뿐 아니라 온실가스 배출과 에너지 · 물 · 농자재 이용, 자원순환 등 생산과정의 환경영향을 함께 고려해야 한다. 특히 에너지 가격 변동과 탄소중립 정책의 확대는 농업의 생산비와 경쟁력에도 영향을 미치고 있어 자원과 에너지의 이용방식을 근본적으로 변화시킬 필요가 있다.

첫째, 농업자원의 투입방식이 정밀관리 중심으로 전환될 것이다. 평균적이고 일률적인 방식에서 벗어나 농경지와 작물 · 가축의 상태에 따라 필요한 자원을 필요한 장소와 시점에 적정량 공급하는 방식으로 변화할 것이다. 물 · 비료 · 농약 · 사료 · 에너지 등의 투입을 정밀하게 관리함으로써 생산성을 유지 · 향상시키면서 자원 사용과 환경부담을 동시에 줄일 수 있다.

둘째, 농업의 에너지 이용구조가 외부 공급에 의존하는 방식에서 농촌지역의 자원을 활용하여 에너지를 생산 · 저장 · 활용하는 방향으로 변화할 것이다. 태양에너지, 바이오매스, 지열 · 수열 등 다양한 에너지원을 농업생산과 연계하고 에너지 생산과 소비를 통합적으로 관리함으로써 농가의 에너지 비용과 탄소배출을 함께 줄일 수 있다.

셋째, 농업부산물과 축산분뇨의 자원순환을 확대할 필요가 있다. 농업부산물과 축산분뇨를 단순한 처리 · 폐기의 대상에서 에너지 · 비료 · 소재 등으로 다시 활용할 수 있는 자원으로 전환함으로써 농업 내부와 지역 단위의 자원순환을 확대할 수 있다.

결국 미래 농업은 투입량 확대와 외부 에너지 · 자원 의존을 통해 생산성을 높이는 방식에서 자원을 정밀하게 이용하고 에너지를 생산 · 관리하며 부산물을 다시 활용하는 저탄소 · 순환형 생산체계로 전환될 것이다.

4 생산 중심에서 그린바이오 · 식품 기반 고부가가치 농업으로

미래 농업의 경쟁력은 농산물을 얼마나 많이 생산하는가뿐 아니라 농업이 보유한 생명정보와 생물자원을 활용하여 얼마나 새로운 가치를 만들어내는가에 따라 달라질 것이다. AI와 데이터 기술이 유전체 · 표현체 · 미생물 등 생명과학 분야와 결합하면서 농업생산의 생물학적 잠재력을 보다 정밀하게 분석하고 활용할 수 있는 기반이 확대되고 있다.

첫째, 생명정보와 생물자원을 활용한 생산기반의 혁신이다. 육종에서는 실제 교배와 반복적인 포장시험에 주로 의존하던 방식에서 유전체 · 표현체 · 환경정보를 통합하여 품종의 특성을 예측하고 최적의 육종전략을 설계하는 방식으로 발전할 것이다. 토양 · 작물 · 가축의 미생물 군집과 기능을 분석하여 생산성과 건강성, 환경적응성을 높이는 등 생명정보와 생물자원을 활용하는 생산방식도 확대될 전망이다.

둘째, 농업의 가치창출 영역이 식품 · 바이오 · 건강 · 소재 · 서비스 분야로 확대될 것이다. 농산물과 농생명자원에 바이오 · 식품 · 데이터 기술을 결합하여 개인의 건강과 영양 수요에 대응하는 맞춤형 식품과 새로운 기능성 소재 · 서비스를 개발함으로써 농업의 산업적 영역을 확장할 수 있다.

따라서 미래 농업은 농산물 생산 자체를 최종 가치로 보는 산업에서 생명정보와 생물자원을 활용하고 식품 · 바이오 · 데이터 기술과 융합하여 새로운 제품과 서비스를 창출하는 고부가가치 산업으로 확장될 것으로 전망된다.

표 1. 미래 농업의 주요 전환 방향

전환 방향	기존 농업	미래 농업
데이터 · AI 기반 농업 전환	경험 · 관행 중심 의사결정	데이터 · AI 기반 예측 · 의사결정
	인력 · 기계조작 중심 농작업	지능형 자동화 · 농장 단위 자율운영
기후위기 · 재해 대응 강화	재해 발생 이후 조사 · 복구	관측 · 예측 기반 선제적 위험관리
	개별 · 현장 중심 위험 대응	광역 · 통합 관측 기반 재해 · 병해충 대응
탄소중립 · 에너지 · 자원순환 전환	평균 · 일률적 자원투입	필지 · 개체 단위 정밀관리
	외부 에너지 · 자원 소비 중심	에너지 생산 · 활용 및 지역 자원순환

전환 방향	기존 농업	미래 농업
그린바이오 · 식품 고부가가치화	반복시험 · 생산 중심 기술개발	생명정보 · 생물자원 기반 예측 · 설계
	농산물 생산 중심 가치창출	식품 · 바이오 · 소재 · 서비스로 가치 확장

이러한 네 가지 전환 방향은 서로 독립적으로 이루어지는 것이 아니라 데이터와 AI, 생명정보, 에너지 · 환경기술 등이 상호 연계되면서 동시에 진행될 것으로 전망된다. 데이터 기반 관측과 예측은 농작업의 자동화와 재해 대응을 고도화하고, 정밀한 생산관리는 자원효율과 탄소저감으로 이어지며, 생명정보와 생물자원의 활용은 농업생산의 혁신과 새로운 산업적 가치창출을 가능하게 한다. 따라서 미래 농업기술은 이러한 전환을 실제 농업현장에서 구현하는 방향으로 발전해야 한다.

Ⅲ. 미래 농업의 핵심기술

1 핵심기술 분야 도출

앞서 제시한 네 가지 미래 농업의 전환 방향을 바탕으로, 미래 농업에 필요한 핵심기술을 그 역할과 기능에 따라 분류하였다.

구체적으로 미래 농업을 가능하게 하는 기반 구축, 새로운 성장과 부가가치를 만드는 가치 창출, 안정적인 생산과 환경적 지속가능성을 확보하는 지속가능성의 세 가지 측면에서 핵심기술을 구분하였다.

이에 따라 미래 농업의 핵심기술을 ① 지능형 농업 인프라(기반구축), ② 첨단 그린바이오(가치창출), ③ 지속가능 농업생산(지속가능성)의 3대 영역으로 구분하고, 각 영역을 구성하는 주요 기술을 중심으로 9개 핵심기술 분야를 제시하였다.



2 3대 영역과 9개 핵심기술 분야

2.1 지능형 농업 인프라

지능형 농업 인프라는 농업환경과 생산상태를 관측하여 데이터를 확보하고, 이를 분석 · 판단하여 실제 농작업과 에너지 관리로 연결하는 기술영역이다. **농업위성**은 농업환경과 작황을 광역적으로 관측하는 정보기반을 제공하고, **AI · 농업로봇**은 데이터를 생산관리와 실제 농작업으로 연결하며, **농업 기반 신재생에너지**는 농업에 필요한 에너지의 생산 · 저장 · 운영 기반을 제공한다.

2.2 첨단 그린바이오

첨단 그린바이오는 생명정보와 생물자원에 데이터 · AI 기술을 결합하여 농업생산의 생물학적 잠재력을 높이고 농식품의 부가가치를 확장하는 기술영역이다. **디지털육종**은 데이터 기반의

예측과 설계를 통해 품종개발의 속도와 정밀성을 높이고, **마이크로바이옴**은 미생물의 기능을 활용하여 생산성과 환경성을 향상시키며, **푸드테크**는 농산물과 농생명자원의 가치를 새로운 식품과 서비스로 확장한다.

2.3 지속가능 농업생산

지속가능 농업생산은 기후변화와 병해충, 탄소와 환경부담 등 농업생산을 위협하는 위험을 관리하여 생산의 안정성과 지속가능성을 높이는 기술영역이다. **농업 기상재해 대응**은 기후위험의 예측과 대응 · 회복을 지원하고, **정밀 병해충 관리**는 병해충 위험을 사전에 파악하여 필요한 시기와 지역에 정밀하게 대응하며, **친환경 · 저탄소 축산**은 생산성과 함께 온실가스와 자원흐름을 관리하는 지속가능한 축산체계로의 전환을 뒷받침한다.

표 2. 3대 영역 및 9개 핵심기술 분야의 주요 역할

핵심영역	기술분야	미래 농업에서의 주요 역할
지능형 농업 인프라	농업위성	농업환경과 작황을 광역적으로 관측하는 정보기반
	AI · 농업로봇	데이터를 판단과 실제 농작업으로 연결하는 지능형 실행체계
	신재생에너지	농업 에너지의 생산 · 저장 · 운영 기반
첨단 그린 바이오	디지털육종	품종개발의 속도와 정밀성 혁신
	마이크로바이옴	생물자원을 활용한 생산성과 환경성 제고
	푸드테크	농업의 가치를 식품 · 서비스산업으로 확장
지속가능 농업생산	기상재해 대응	예측-대응-복구를 연결하는 농업 리스크 관리
	정밀 병해충 관리	최소투입 · 정밀방제를 통한 생산안정과 환경부담 저감
	친환경 · 저탄소 축산	생산 · 탄소 · 자원순환을 통합하는 지속가능 축산

3 미래 농업기술의 통합적 발전 방향

미래 농업의 전환은 개별 기술의 발전만으로 이루어지기 어렵다. 농업환경을 관측하여 데이터를 확보하고, 이를 분석하여 생산과 위험을 예측하며, 그 결과가 실제 농작업과 생산관리로 연결되어야 한다. 여기에 품종과 미생물 등 생물학적 생산기반의 혁신과 기후재해 · 병해충 · 에너지 · 탄소 등 생산위험과 환경부담에 대한 관리가 함께 이루어질 필요가 있다.

결국 미래 농업기술의 핵심은 개별 기술의 성능을 높이는 것을 넘어 농업환경의 관측-판단-실행을 생산관리, 위험대응 및 가치창출로 연결하는 데 있다. 즉, 9개 핵심기술 분야 역시 독립적으로 발전하기보다 데이터와 인프라를 공유하고 서로 융합되면서 농업현장에서 활용될 때 그 효과가 더욱 커질 것이다.

이러한 관점에서 Part 2에서는 9개 핵심기술 분야별로 기술의 발전동향과 국내외 연구개발 현황을 살펴보고, 향후 기술의 발전방향과 미래 농업에서의 활용 가능성을 전망하고자 한다.

Part. 2

기술 분야별 전망

Ⅰ. 지능형 농업 인프라

Ⅱ. 첨단 그린바이오

Ⅲ. 지속가능 농업생산

Ⅰ. 지능형 농업 인프라

1. 농업위성
2. 인공지능(AI) · 농업로봇
3. 농업 기반 신재생에너지

1. 농업위성

관측에서 의사결정까지, 농업위성 정보체계의 전환

류영렬(농림기상학회, 서울대학교) / **김형석**(한국영상식물학회, 서울대학교)

Ⅰ. 서론

1 기술분야 개요

○ 농업위성의 개념

– 농업위성은 농업 · 농촌 · 식량 분야의 관측을 목적으로 운용되는 지구관측위성과, 다목적 지구관측자료를 가공 · 분석하여 작황 · 재해 · 환경 정보를 생산 · 활용하는 기술체계를 통칭함.

– 농업위성 기술은 위성과 센서뿐 아니라, 지상 수신 · 처리, 보정 · 검증, 분석 알고리즘과 응용서비스를 포함하는 관측-처리-분석-서비스 통합체계임.

– 초기에는 Landsat과 MODIS 등 다목적 지구관측자료를 농업에 활용하는 방식이 중심이었으나, 최근에는 적색경계, 단파적외선 등 작물 진단에 유용한 분광대역과 관측주기, 공간해상도를 농업 수요에 맞게 설계하는 특화 관측 체계로 발전하고 있음.

– 우리나라는 2026년 차세대중형위성 4호인 농림위성의 성공적인 발사와 초기 교신을 계기로, 농업 · 산림 분야에 특화된 국가 위성정보를 안정적으로 확보할 기반을 마련함.

○ 농업위성의 기술적 특성

– (광역성) 한 번의 관측으로 넓은 농경지를 촬영할 수 있어 전국 단위 작황과 해외 주요 곡물 생산지역을 동일한 기준으로 모니터링할 수 있음.

– (주기성) 일정한 주기로 동일 지역을 반복 관측하여 생육 단계 변화, 재해 발생 전후와 계절

별 작부체계 변동 등을 시계열로 분석할 수 있음.

– (일관성 · 정량성) 동일한 센서와 처리기준을 적용한 정량적 관측자료를 제공하여 현장조사와 행정통계를 보완하고 지역 · 시기 간 비교 가능성을 높일 수 있음.

– (비접촉성) 현장 접근이 어렵거나 위험한 북한, 해외 분쟁지역과 재해 발생지역도 원격으로 관측할 수 있음.

○ 농업 내 역할 및 중요성

– (국가 농업 관측 기반) 농업위성은 광역 농경지의 작황과 환경 변화를 주기적으로 관측하고, 정책 · 산업 · 연구가 공동으로 활용할 수 있는 기초자료를 제공함.

– (식량안보 정보자산) 곡물 수입 의존도가 높은 우리나라에서 국내외 주요 생산지역의 작황을 독자적으로 관측 · 분석하는 역량은 식량 수급 위험에 대응하기 위한 전략적 정보 기반이 됨.

– (정책 의사결정 지원) 작물구분도, 생육지표, 수확량 전망과 재해 영향 산출물은 수급 전망, 농지관리와 재해 대응 등 농업정책의 판단자료로 활용될 수 있음.

– (정밀농업 지원) 필지 단위 생육, 수분과 작부체계 정보는 기상 · 토양 · 영농자료와 결합하여 시비 · 관개 · 방제 등 정밀농업 의사결정을 지원할 수 있음.

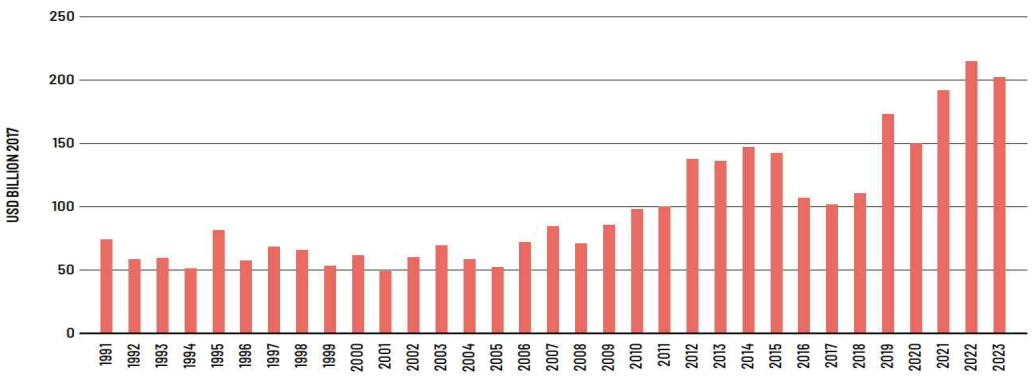
– (환경 · 탄소 관리 지원) 농경지 면적, 작부체계, 식생 활력과 증발산 등 위성 기반 정보는 농업환경 변화와 탄소 · 물순환을 공간적으로 파악하고 관련 통계와 정책 평가를 보완하는 자료가 됨.

2 기술 도입 배경

2.1 농업환경 변화

○ 기후변화와 농업재해 위험의 확대

– 기온 상승, 강수 변동과 일부 극한기상의 빈도 · 강도 변화는 가뭄 · 홍수 · 폭염 · 이상저온에 대한 농업의 노출을 높이고, 작물 생산성과 품질의 불확실성을 확대하고 있음.



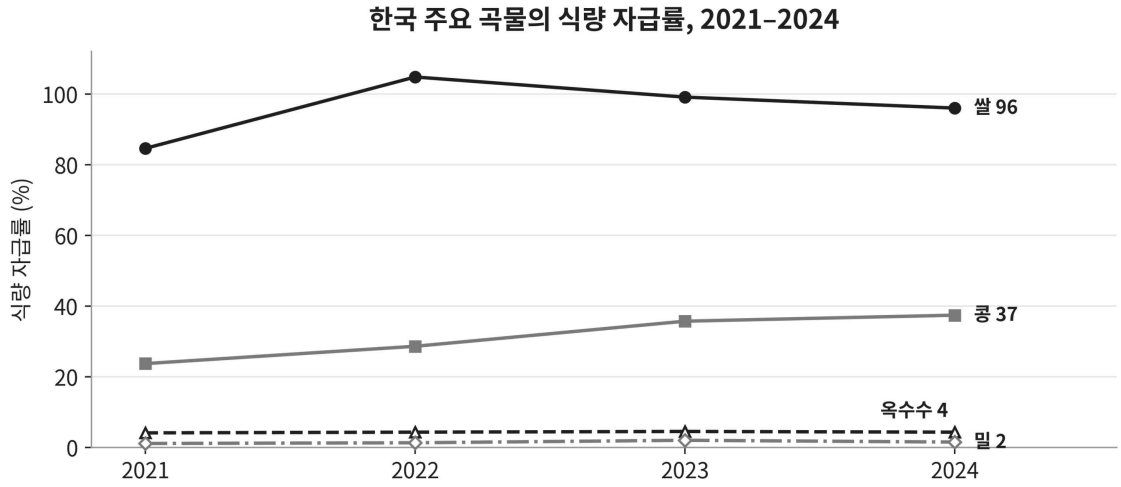
(출처: FAO, The Impact of Disasters on Agriculture and Food Security, 2025)

그림 1. 전 세계 재해로 인한 농업 생산 손실 추이, 1991–2023

- 미국 콘벨트에서는 1999년 이후 옥수수 수량의 토양 수분 저장능력에 대한 민감도가 평균 55% 증가한 것으로 분석되어, 평균 수량 증가와 별개로 가뭄 조건에서의 생산 손실 위험이 커질 수 있음을 보여줌.
- 기후조건의 변화는 병해충의 발생 시기와 분포, 월동과 확산 양상에도 영향을 주어 기존 방제체계의 불확실성을 높일 수 있음.
- 광범위하고 반복적으로 발생하는 농업재해에 대응하려면 재해 전후의 작황 변화를 신속하고 일관되게 파악할 수 있는 광역 관측수단이 필요함.

○ 글로벌 식량안보 위협과 곡물 수급 불안정

- 2024년 기준 우리나라의 식량자급률은 약 47.9%이며, 쌀 자급률은 96.0%로 안정적이나 밀(1.5%)과 옥수수(4.3%) 등 주요 곡물은 수입 의존도가 매우 높음. 특히 사료용을 포함한 곡물 수급까지 고려하면 국제 생산량과 가격 변동에 대한 구조적 취약성이 더욱 커짐.



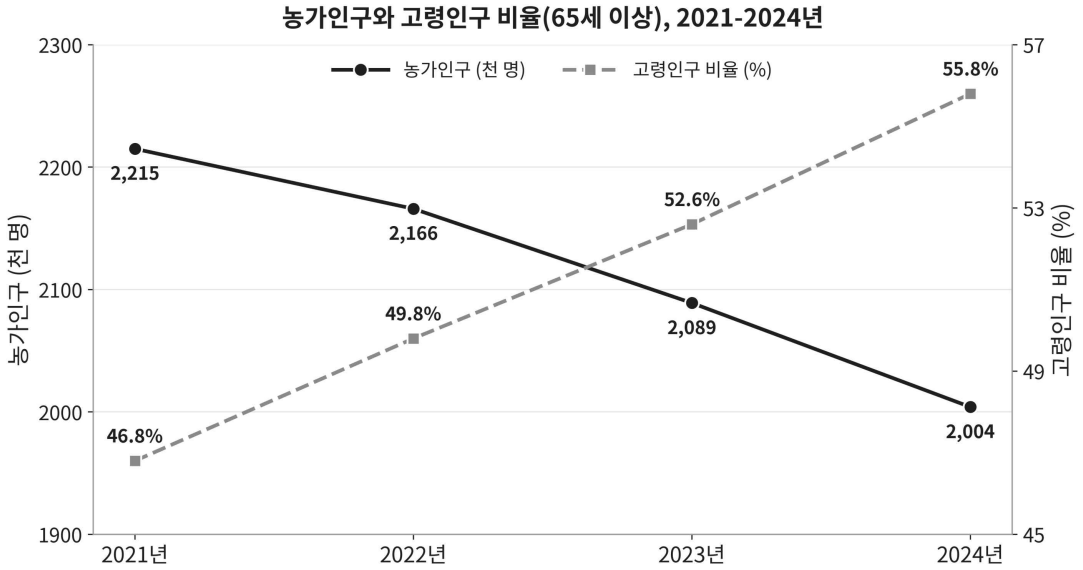
(출처: 농림축산식품부, 식량자급률(사료용 제외) – 서류 건체중 기준, 2026)

그림 2. 한국 주요 곡물의 식량 자급률, 2021–2024

- 전쟁, 물류 차질과 주요 생산국의 수출 제한은 국제 곡물시장의 공급과 가격을 단기간에 크게 변동시킬 수 있어, 해외 작황정보를 독자적으로 확보할 필요성을 높이고 있음.
- 북한은 현장조사와 통계자료의 확보가 제한되어 있어 위성자료가 농업 생산 변화를 파악하는 중요한 보조수단이 될 수 있음.
- 국내 농업과 함께 북한 및 해외 주요 생산지역을 일관된 기준으로 관측하는 역량은 국가 식량안보 정보체계를 보완하는 중요한 요소임.

○ 농업 노동력 감소와 영세 농업 구조

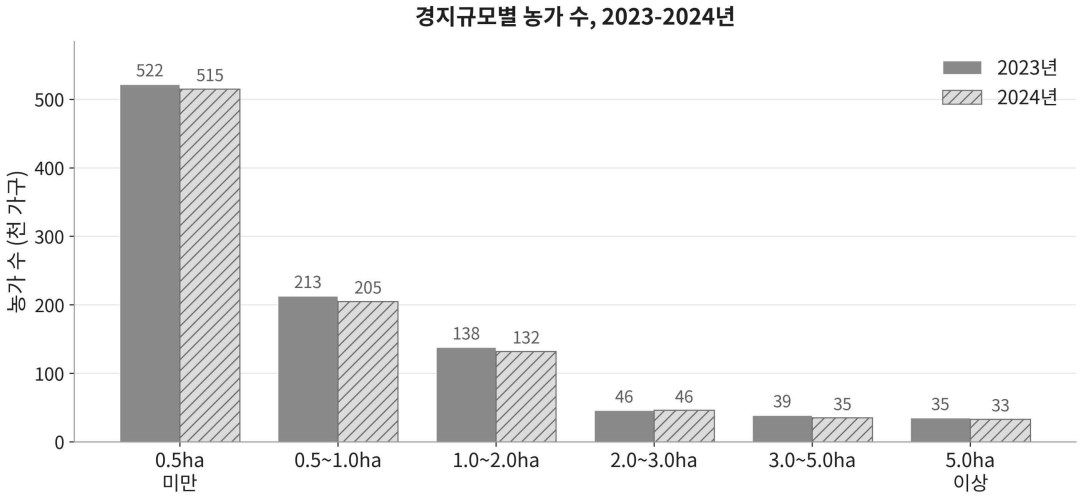
- 농가인구 감소와 고령화는 농업 생산과 현장조사에 투입할 수 있는 인력을 줄이고, 신속한 농업정보 수집의 부담을 높이고 있음.



(출처: 통계청, 2024년 농림어업조사 결과, 2025)

그림 3. 농가인구 및 농가 고령인구 비율(65세 이상)

– 소규모 필지가 넓게 분산된 국내 농업구조에서는 현장조사를 높은 빈도와 세밀한 공간단위로 반복하는 데 비용과 시간이 많이 소요됨.



(출처: 통계청, 2024년 농림어업조사 결과, 2025)

그림 4. 경지규모별 농가 수

– 광역 농경지를 인력 중심의 현장조사로 파악하는 기존 방식은 비용 · 시간 측면에서 대규모 적용에 한계가 있으며, 결정적 영농 시기에 맞춘 신속한 정보 제공이 어려운 구조적 제약을 안고 있음.

– 이에 현장조사를 보완하면서 광역 농경지를 반복적으로 관측할 수 있는 위성 기반 비접촉 관

측수단의 필요성이 커지고 있음.

○ 탄소중립 및 지속가능성 요구 확대

– 농업 부문에서는 논과 축산에서 발생하는 메탄, 비료 사용과 농경지 토양에서 발생하는 아산화질소 등 비이산화탄소 온실가스의 관리가 중요함.

– 국가 온실가스 통계와 탄소중립 정책을 지원하려면 농경지 면적, 작부체계와 토지이용 변화를 공간적으로 파악할 수 있는 일관된 자료가 필요함.

– 위성자료는 식생 활력, 증발산과 토지이용 변화를 광역적으로 제공하여 지속가능한 농업정책의 이행과 환경 변화를 평가하는 보조 관측수단으로 활용될 수 있음.

2.2 기술의 필요성 및 기대효과

○ 기존 농업 정보수집 방식의 한계

– 표본조사와 행정자료는 농업통계 생산의 핵심 수단이지만, 조사주기와 공표시차로 인해 급격한 작황 변화와 재해 영향을 세밀한 공간단위에서 신속하게 파악하는 데 제약이 있음.

– 현장조사는 높은 정확도의 기준정보를 제공하지만, 비용과 인력의 제약으로 전국 농경지를 빈번하게 조사하기 어려움.

○ 농업위성의 주요 활용 영역

– (광역 작황 관측) 전국 농경지의 재배 현황과 생육 변화를 반복적이고 일관된 기준으로 관측하여 현장조사와 농업통계를 보완함.

– (접근 제한지역 관측) 북한과 해외 주요 곡물 생산지역 등 현장자료가 부족한 지역의 작황 변화를 파악하여 식량안보 정보의 공백을 줄일 수 있음.

– (재해 탐지와 영향 평가) 가뭄 · 침수 · 태풍 등 재해 발생 전후의 변화를 분석하여 피해 의심 지역과 영향 범위를 신속하게 추정하고 현장조사를 지원함.

– (필지 수준 분석) 고해상도 위성자료를 활용하여 작물 유형, 생육 변화와 작부체계를 필지 수준에서 분석하고 정밀농업과 농지관리의 기초자료를 제공함.

– (행정업무 지원) 직불제 이행 점검과 농지 이용 실태조사에서 현장 확인이 필요한 대상을 선별하고 행정자료를 보완하는 객관적 근거를 제공할 수 있음.

○ 기술 도입에 따른 기대효과

– (정책적 효과) 작황과 재해 정보를 보다 신속하고 일관되게 확보하여 식량 수급, 재해 대응과 농지관리 등 농업정책의 적시성과 객관성을 높일 수 있음.

– (산업적 효과) 표준화된 위성자료와 농업 산출물의 개방은 정밀농업, 농업정보 서비스와 데이터 분석 분야의 기술개발 및 민간 활용을 촉진할 수 있음.

– (사회적 효과) 식량안보 위험을 조기에 파악하여 농산물 수급 불안에 대한 대응력을 높이고, 농업환경, 탄소 · 증발산 관련 지표의 관측 기반을 확대하여 기후변화 대응과 지속가능한 농업 관리 역량을 강화할 수 있음.

– (과학기술적 효과) 농림위성 운영을 계기로 국산 위성자료의 보정 · 검증, 사용자가 바로 활용할 수 있는 표준 데이터 처리, 시계열 분석과 농업 산출물 생산기술을 고도화하고, 향후 초분광 · 열적외선 · 태양유도 엽록소 형광(solar–induced chlorophyll fluorescence, SIF) 등 차세대 관측기술의 연구 기반을 확장할 수 있음.

Ⅱ. 기술 분야 구조 및 범위

1 기술 분야 정의



그림 5. 농업위성의 센서 · 해상도 · 운용 방식별 분류 체계

○ 농업위성의 기술적 정의

– 농업위성은 농업 · 산림 · 식량 · 환경 분야의 관측을 목적으로 설계 · 운용되는 지구관측위성과, 농업에 활용 가능한 다양한 위성자료를 처리 · 분석하여 농업정보를 생산 · 서비스하는 통합 기술체계를 포괄함.

– 위성 본체 · 센서 · 궤도, 지상국 수신 · 저장, 영상 보정과 품질관리, 농업정보 산출 알고리즘, 응용 서비스와 사용자 인터페이스에 이르는 전 과정을 포함.

– 농업위성은 가시광(Visible, VIS), 적색광과 근적외선 사이의 적색경계(Red edge, RE), 근적외선(Near-infrared, NIR), 단파적외선(Short-wave infrared, SWIR), 열적외선(Thermal infrared, TIR) 영역을 관측하는 다중 분광 · 초분광 · 열 센서와 마이크로파 기반 레이더 센서 등을 활용함. 이들 자료로부터 작물의 반사 특성, 표면온도와 구조적 특성을 분석하여 생육상태, 수분 스트레스, 바이오매스 등 농업 관련 물리량을 정량적으로 추정함.

○ 기술 분야의 범위와 경계

- (좁은 의미의 농업위성) 농업 모니터링을 주 임무로 설계하고 운용하는 농업 특화 지구관측 위성과 그 탑재체를 의미함.
- (넓은 의미의 농업위성) 농업 특화 위성뿐 아니라 농업에 활용 가능한 다목적 공공위성, 상업 지구관측위성, 초분광 · 열 · SIF · 레이더 관측자료와 이들 자료의 전처리, 분석준비데이터 생산, 농업정보 분석 및 서비스 플랫폼을 포함함. 본 보고서에서는 넓은 의미의 농업위성을 기준으로 기술 동향과 전망을 다룸.
- (인접 기술과의 경계) 농업위성은 넓은 지역을 반복적으로 관측하는 광역 모니터링을 담당하며, 드론 · 항공기와 지상센서는 정밀 관측, 현장 진단 및 위성 산출물 검증에 활용됨. 이들 기술은 관측 범위와 정밀도가 달라 상호보완적인 관계를 형성함.

○ 농업위성 분류 체계

- (탑재 센서별 분류) 관측 방식에 따라 반사광 기반 광학 센서, 열복사를 측정하는 열적외선 센서, 광합성 과정의 미세 형광 신호를 측정하는 SIF 센서, 위성이 직접 전파를 송수신하는 레이더 센서 등으로 구분됨.
- (분광해상도별 분류) 다중분광 센서는 비교적 적은 수의 넓은 파장대역을 사용하고, 초분광 센서는 수십~수백 개의 좁고 연속적인 파장대역을 관측함. 초분광 자료는 엽록소 · 수분 · 질소 등 작물 특성의 세밀한 분석에 유리하지만, 신호 품질과 보정 · 검증 수준에 따라 추정 성능이 달라질 수 있음.
- (공간해상도별 분류) 한 픽셀이 표현하는 지표 면적에 따라 저해상도 · 중해상도 · 고해상도 · 초고해상도 위성으로 구분할 수 있으나, 세부 기준은 활용 분야와 센서 유형에 따라 달라짐. 농업 분야에서는 10~30m급 자료가 광역 작황 모니터링과 작물분류에 널리 활용되며, 수 m급 자료는 소규모 필지의 경계와 작물 특성을 보다 세밀하게 분석하는 데 유리함.
- (위성 규모 · 구성 방식별 분류) 단일 또는 소수의 중대형 위성을 운용하는 방식과, 다수의 소형 · 초소형 위성을 군집으로 운용하여 재방문주기와 관측 빈도를 높이는 방식으로 구분할 수 있음.

2 주요 구성 기술

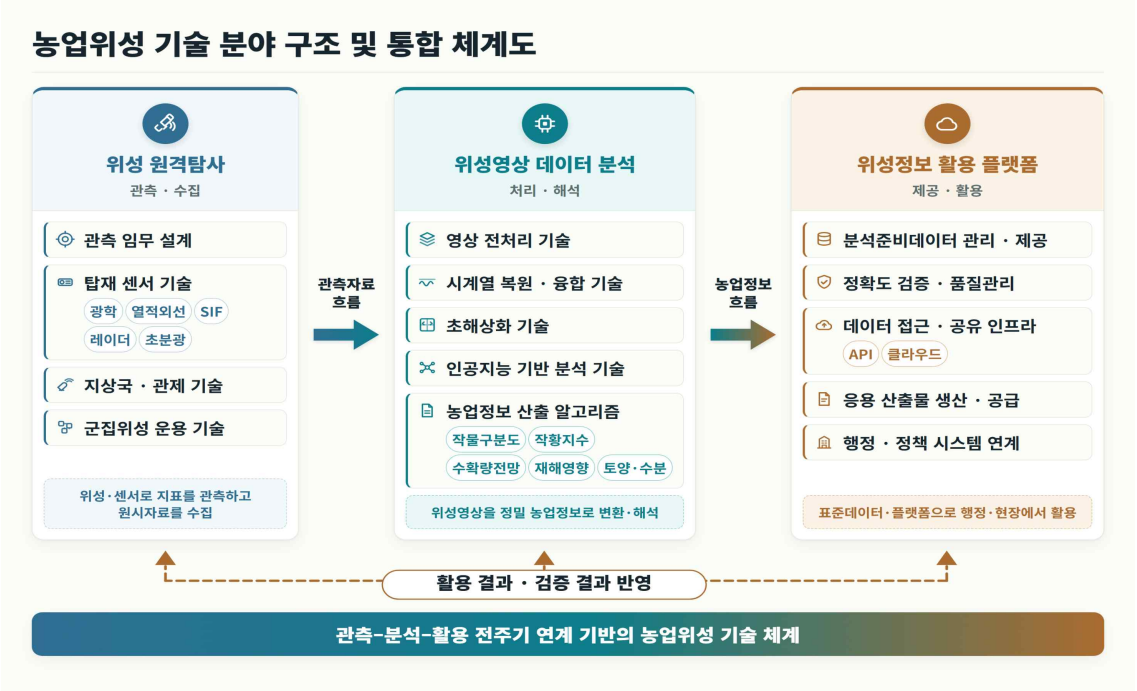


그림 6. 관측-분석-활용 단계로 구성된 농업위성 기술 분야의 구조와 통합 체계

○ 농업위성 기술 체계 개관

– 농업위성 기술체계는 위성 원격탐사, 영상 분석, 활용 플랫폼이 연결된 관측-분석-서비스 구조로 구성됨.

– 위성 원격탐사 기술은 자료를 수집하고, 영상 분석 기술은 이를 보정 · 해석하여 농업정보를 생산하며, 활용 플랫폼은 산출물을 행정 · 연구 · 산업 현장에 제공함.

– 각 단계는 산출물 검증과 사용자 요구를 통해 다시 관측계획과 알고리즘 개선에 반영되는 순환구조를 형성함.

○ 위성 원격탐사 기술

– (위성 운용 · 관측 설계) 농업 관측 임무에 적합한 궤도, 자세제어, 전력, 촬영폭, 재방문주기, 관측 시간대 등을 설계하는 기술임. 관측 대상 지역이 한반도 중심인지 전 지구 대상인지, 파종 · 출수 · 수확 등 주요 생육 · 영농 시기에 필요한 관측주기와 관측 면적이 어느 정도인지 등을 종합적으로 고려하여 설계됨.

– (광학 센서) 가시광선 · 근적외선 · 단파적외선 등 식물의 반사 특성을 측정하는 센서로, 작물 구분, 식생지수 산출, 생육 상태 진단 등에 활용됨. 다중분광 센서는 주요 파장대의 반사율을 이용해 작황을 정량화하고, 초분광 센서는 좁고 연속적인 파장대 정보를 활용하여 엽록소 ·

질소 · 수분 등 작물의 생화학적 특성을 추정하는 데 활용됨.

- (열적외선 센서) 지표면과 작물 군락의 열복사 에너지를 측정하여 표면온도를 산출하고, 증발산 · 수분 스트레스 · 가뭄 영향을 추정하는 데 활용됨.
- (SIF 센서) SIF는 식물이 흡수한 태양에너지 일부를 형광으로 방출하는 신호임. SIF 관측자료는 식생의 광합성 과정과 밀접하게 연관되어 있어, 광합성 변화와 스트레스 반응을 분석하는 데 활용될 수 있음. 기존 식생지수가 주로 녹색도와 피복 상태를 반영하는 반면, SIF는 식물 기능 변화에 대한 추가 정보를 제공한다는 점에서 주목받고 있음.
- (레이더 센서) 구름과 일조 조건의 영향을 상대적으로 적게 받아 주야간 관측이 가능하며, 광학영상 확보가 어려운 시기의 침수, 토양수분과 작물 구조 변화 분석에 활용됨. 주로 합성개구레이더(Synthetic aperture radar, SAR)를 활용해 관측함.
- (지상국 · 운영 기술) 위성영상을 수신 · 저장 · 처리 · 배포하는 지상 인프라와 위성 상태 감시 · 명령 전송을 수행하는 관제 시스템을 포함함. 위성에서 취득한 자료가 사용자에게 전달되기까지의 시간과 안정성을 좌우하므로, 신속한 작황 모니터링과 재해 대응을 위한 핵심 기반 기술에 해당함.
- (군집위성 운용 기술) 다수의 소형 · 초소형 위성을 여러 궤도면 또는 일정한 위상차로 운용하여 재방문주기와 관측 빈도를 높이는 기술임.

○ 위성영상 데이터 분석 기술

- (영상 전처리 기술) 위성영상이 분석에 활용되기 전 단계에서 대기 · 지형 · 관측 각도 등에 따른 영상 왜곡을 줄이고, 서로 다른 시점과 센서에서 취득된 자료를 비교 가능한 상태로 만드는 기술임. 방사보정, 기하보정, 대기보정, 품질 마스킹과 센서 간 교차보정 등이 있음.
- (시계열 복원 · 융합 기술) 구름 등으로 발생한 영상 결측을 다중시기 자료 기반 보간, SAR-광학 결합, 인공지능 기반 복원 등으로 보완하는 기술임. 복원 · 추정된 값은 실제 관측값과 구분하고, 품질과 불확실성을 함께 관리해야 함.
- (초해상화 기술) 저 · 중해상도 영상을 AI 기반 모델로 보완하여 더 세밀한 해상도의 영상처럼 추정하는 기술임. 필지 경계나 공간 패턴의 표현을 개선할 수 있으나, 새롭게 생성된 세부정보는 모델 추정 결과이므로 독립적인 고해상도 자료를 이용한 검증이 필요함.
- (농업정보 산출 알고리즘) 전처리 · 복원된 위성영상으로부터 작물구분도, 생육단계, 수확량 전망, 재해 영향, 토양수분과 작물 수분 스트레스 등 농업 활용 정보를 산출하는 기술임. 작물 생육과 관련된 다양한 분광 신호를 활용하여 작황 변화와 스트레스 징후를 조기에 파악하는 데 활용됨.
- (인공지능 기반 분석 기술) 인공지능은 작물 분류, 시계열 복원, 초해상화, 수확량 추정과 이상 탐지 등에 활용되고 있음. 복잡한 비선형 관계와 대용량 자료를 학습하는 데 장점이 있으

나, 지역 · 연도 · 센서가 달라질 때 성능이 저하될 수 있어 독립 검증과 불확실성 평가가 필요함.

○ 농업위성 활용 플랫폼 기술

– (분석준비데이터 생산 · 표준화) 위성영상을 최소한의 추가 전처리만으로 분석할 수 있도록 방사 · 기하 · 대기 보정, 품질정보와 메타데이터를 일관된 기준으로 적용하는 기술임. 이러한 표준화 자료를 분석준비데이터(Analysis ready data, ARD)라고 함.

– (정확도 검증 · 품질관리 체계) 위성 산출물의 정확도와 시계열 일관성을 현장조사, 지상센서, 드론영상과 기준 관측자료를 이용해 평가하는 체계임. 플럭스타워는 탄소 · 에너지 · 수분 플럭스 관련 산출물 검증에 활용될 수 있음.

– (데이터 접근 · 공유 인프라) 표준화된 분석준비데이터와 산출물에 사용자가 쉽게 접근할 수 있도록 데이터 검색 · 다운로드 시스템, 외부 시스템과의 자동 연동을 지원하는 API, 대용량 영상 처리를 지원하는 클라우드 환경을 제공하는 기술임.

– (응용 산출물 생산 · 공급 기술) 검증된 알고리즘을 운영환경에 적용하여 작물구분도, 생육정보, 수확량 전망과 재해 산출물을 정기적으로 갱신 · 배포하는 기술임. 품질정보와 갱신주기를 함께 제공하여 사용자가 원시영상을 직접 처리하지 않고도 활용할 수 있도록 함.

– (행정 · 정책 시스템 연계) 농지 이용 점검, 직불제 이행 확인과 재해 피해 평가 등 농업행정 업무에 위성 산출물을 연계하는 기술임. 다만 실제 행정판정에는 정확도 기준, 현장 확인과 법 · 제도적 절차가 함께 마련되어야 함.

○ 구성 기술 간 관계 및 통합 체계

– 원격탐사 기술로 수집된 자료는 분석기술을 통해 농업정보로 변환되고, 활용 플랫폼을 통해 행정 · 연구 · 산업 현장에 제공됨.

– 산출물 검증과 사용자 활용 결과는 관측계획, 센서 요구조건과 알고리즘 개선에 다시 반영되므로, 국가 농업위성 체계는 관측 · 분석 · 서비스를 기획 단계부터 통합적으로 설계할 필요가 있음.

3 적용분야 및 활용 영역

○ 적용 대상별 활용 영역

– (작물 분야) 벼 · 콩 등 식량작물과 시설원예 · 과수 · 노지채소 등 원예작물을 대상으로 작물분류, 생육변화와 재해 영향을 분석할 수 있으며, 시설원예에서는 시설 분포와 피복 변화 등을 파악할 수 있어 광역 작황 모니터링과 필지 단위 정밀 진단의 기반 자료로 활용됨.

– (축산 분야) 초지와 사료작물의 면적 · 생육, 축산시설 주변 토지이용과 환경 변화를 관측하여 사료자원과 지역 환경관리의 기초자료로 활용할 수 있음.
– (시장 · 수급 분야) 국내외 작황과 생산량 전망은 농산물 수급, 가격 위험, 비축과 수입 시기 판단에 활용될 수 있음. 위성자료는 생산단계의 정보를 제공하는 보조자료이며, 시장 분석에는 재고 · 소비 · 무역 · 가격 자료와의 결합이 필요함.

○ 적용 단계별 활용 영역
– (생산 단계) 작물 식별, 생육 진단, 수분 스트레스와 재해 징후를 관측하여 영농 의사결정을 지원할 수 있음. 이를 통해 농가와 농업 서비스 기관은 작물 상태 변화를 조기에 파악하고, 관개 · 방제 · 시비 등 영농 판단의 근거를 확보할 수 있음.
– (행정관리 단계) 농지 이용실태, 직불제 이행 여부와 재해 피해 의심지역을 선별하여 농업 행정의 모니터링 수단으로 활용됨. 위성 기반 관측은 넓은 지역을 동일 기준으로 반복 관측할 수 있어 현장조사와 행정자료를 보완함.
– (시장 · 수급 단계) 국내외 주요 생산지의 작황 변화와 수확량 전망을 바탕으로 수급 조절, 비축, 수입 전략 등 농산물 시장 안정화 정책의 근거 자료로 활용됨. 특히 현장 접근이 어려운 해외 곡물 생산지역의 작황 정보를 일관된 기준으로 보완하는 데 유용함.
– (정책 · 연구 단계) 식량안보, 기후변화 영향, 농업환경과 토지이용 변화, 농업 부문 탄소중립 이행 및 농업 R&D에 활용될 수 있음. 장기 시계열 위성자료는 농경지와 작부체계, 식생 및 토지이용 변화를 지속적으로 관측하여 정책 시행 전후의 공간적 변화를 분석하는 기초자료가 됨.

Ⅲ. 기술 발전 동향 및 전망

1 국내외 기술 발전 동향

1.1 주요 위성 현황



그림 7. 주요 농업 활용 위성의 운영 주체별 분류

○ 공공 지구관측위성의 농업 활용 확대

– Sentinel-1 · 2는 무료 개방형 SAR · 다중분광 자료를 제공하며, 작물 분류, 생육 변화, 침수 및 재해 모니터링에 널리 활용되고 있음. Sentinel-2는 13개 분광 밴드와 10 · 20 · 60m 공간해상도를 제공하고, Sentinel-1은 기상과 일조 조건의 영향을 상대적으로 적게 받아 광학영상의 관측 공백을 보완함.

– EnMAP과 PRISMA는 초분광 관측을 통해 토양과 식생의 생화학적 · 생물리적 특성을 분석하며, FLEX는 SIF를 이용해 광합성 활동과 스트레스 상태를 관측할 예정임. SBG와 CHIME도 초분광 · 열적외선 관측을 결합한 차세대 농업 · 환경 관측 임무로 개발되고 있음.

○ 상업 지구관측위성의 고빈도 · 정밀 관측 확대

– 상업 지구관측 분야는 군집 운용을 통한 고빈도 관측과 초분광 탑재체의 소형화를 중심으로 발전하고 있음. PlanetScope는 전 세계 육지를 일 단위로 관측하고, SkySat은 특정 지역의 고해상도 촬영을 보완함.

– EarthDaily는 광학 · 단파적외선 · 열적외선 관측을 결합한 군집체계를 구축하고 있으며, Pixxel Firefly는 약 5m급 공간해상도의 상업 초분광 관측을 제공함.

○ 국내 농업위성 생태계의 확장

– 농림위성은 5m 공간해상도, 5개 다중분광 밴드, 120km 촬영폭을 갖추고 한반도를 3일 주기로 관측하도록 설계되었으며, 2026년 발사를 계기로 국내 농업 · 산림 관측체계 구축이 본격화되고 있음.

– 민간 부문에서는 나라스페이스의 옵저버 시리즈, 쎄트렉아이의 SpaceEye-T, 한컴인스페이스의 초분광 큐브위성 세종 3호 등 다양한 지구관측 자산이 등장하고 있음. 또한 누리호 5차 발사를 통해 초소형 군집위성의 구축과 운용 기반도 확대될 예정임.

표 1. 주요 농업 활용 지구관측위성의 관측 사양 및 특징

위성	기관	분광밴드	공간해상도	재방문주기	특징
Sentinel-2	ESA	13밴드	10~60m	5일	무료 개방형 다중분광 자료
Sentinel-1	ESA	C-밴드 SAR	5~40m	6일	전천후, 광학 보완
EnMAP	DLR/GFZ	224밴드	30m	27일	초분광 공공위성
FLEX	ESA	SIF 전용	300m	27일	2026.9 발사, Sentinel-3 동궤도
PRISMA	ASI	초분광+PAN	30m/5m	29일	운용 중
PlanetScope	Planet Labs	8밴드	3.7m	일 단위	100기+ 군집, 매일 전지구
SkySat	Planet Labs	4밴드+PAN	50cm	일 단위	고해상도, 하루 최대 10회 재촬영
EarthDaily	EarthDaily Analytics	22밴드	5m	–	메탄·TIR 포함, 10기 군집
Pixxel Firefly	Pixxel	135밴드+	5m	–	초분광 상업 소형위성 6기
농림위성 (차세대중형위성-4)	우주항공청·농촌진흥청·산림청	5밴드	5m	3일(한반도)	2026.7 발사 성공, 농업 특화
옵저버-1A	㈜나라스페이스 테크놀로지	7밴드	1.5m	일 단위	초소형 16U급, 84기 군집계획
세종3호	한컴인스페이스	442밴드	5m	–	민간 초분광 큐브위성

1.2 다중위성 데이터 융합 및 품질 고도화 기술 동향

○ 단일 위성은 공간 · 시간 · 분광 해상도와 관측 연속성을 동시에 충족하기 어려우므로, 서로 다른 위성자료를 결합하여 관측 공백을 줄이고 활용성을 높이는 기술이 중요해지고 있음.

○ 갭필링 및 시공간 융합

– 갭필링은 구름 · 그림자와 촬영주기 차이로 발생한 결측을 주변 시점의 영상이나 다른 센서 자료로 보완하는 기술임. 동일 센서 시계열 보간, 광학-광학 융합, SAR-광학 융합 및 인공지능 기반 복원이 활용됨.

– 광학-광학 융합은 고해상도 · 저빈도 자료와 저해상도 · 고빈도 자료를 결합해 공간적 세밀도와 시간적 연속성을 동시에 확보하는 방식임. Landsat-MODIS 융합과 STARFM · FSDAF 계열 모델이 대표적이며, 최근에는 머신러닝과 딥러닝 적용이 확대되고 있음.

– SAR-광학 융합은 SAR 후방산란 정보와 광학 분광정보를 결합하여 구름으로 인한 관측 공백을 보완하고, 작물 분류, 생육단계, 침수 및 재해 영향을 추정하는 기술임. Sentinel-1 · 2 시계열 결합이 대표적으로 활용됨.

표 2. 광학-광학 및 SAR-광학 융합 방식 비교

융합 방식	결합 자료	주요 목적	농업 활용	주요 한계
광학-광학 융합	고해상도·저빈도 광학 영상 + 저해상도·고빈도 광학영상	시공간 해상도 보완	생육 시계열, 식생지수 복원	구름이 두 자료에 모두 존재할 수 있음
SAR-광학 융합	SAR 후방산란 정보 + 광학 분광정보	기상조건에 따른 관측 공백 보완	작물 분류, 생육단계, 침수·재해 분석	관측 원리 차이와 전처리 복잡성

○ 딥러닝 초해상화

– 딥러닝 초해상화는 중 · 저해상도 영상의 공간 패턴을 학습하여 세부 공간정보를 복원 · 추정하는 기술임. GAN, CNN, Transformer 계열 모델이 활용되며, 고해상도 위성 · 항공 · 드론 영상이 학습 및 검증자료로 사용됨.

– Kong et al.(2023)은 CubeSat 군집영상과 GAN을 이용해 Landsat 영상의 공간 표현을 개선하였으며, 국내에서도 옵저버-1A 등 위성영상의 공간 활용도를 높이기 위한 초해상화 기술이 적용되고 있음. 다만 생성된 세부 정보는 모델 추정값이므로 독립적인 고해상도 자료와 현장자료를 이용한 검증이 필요함.

○ 다중 센서 교차보정 및 자료 조화

– 서로 다른 위성은 분광응답함수, 공간해상도, 관측각과 촬영시각이 달라 직접 결합할 경우 센서 간 편차가 발생함. 이를 줄이기 위해 교차보정과 자료 조화를 수행하며, NASA의 Harmonized Landsat and Sentinel-2(HLS)가 대표 사례임.

– 교차보정된 자료를 분석준비데이터로 제공하면 센서별 반복 전처리를 줄일 수 있으며, 관측값과 복원값을 구분하는 품질정보와 불확실성 자료를 함께 제공하는 것이 중요함.

1.3 위성 기반 농업정보 산출 알고리즘 기술

○ 위성 기반 농업 알고리즘은 관측된 분광 · 구조 · 열 신호를 작물 종류, 생육 상태, 수확량 및 스트레스 정보로 변환하는 기술임. 최근에는 단일 영상이나 식생지수 중심의 분석에서 벗어나, 광학 · SAR 시계열과 기상 · 토양 · 현장자료를 머신러닝과 딥러닝으로 통합하는 방향으로 발전하고 있음.

○ 작물 분류 및 작물구분도 생산

– 작물 분류는 농경지 내부의 작물 종류와 재배면적을 지도화하는 기술로, 작물별 생육주기 차이를 반영하기 위해 단일 시점 영상보다 다중시기 광학 · SAR 자료를 함께 활용하는 방식이 확대되고 있음.

– Jin et al.(2019)과 Kussul et al.(2017)은 Sentinel-1 · 2와 Landsat 등의 다중센서 시계열을 머신러닝과 딥러닝으로 분석하여, 구름이 많거나 소규모 필지가 분포하는 지역에서도 광역 작물지도를 생산할 수 있음을 보여줌.

– 최근에는 ESA가 지원하는 WorldCereal과 미국 농무부의 Cropland Data Layer처럼 10m급 작물정보를 정기적으로 제공하는 운영체계가 구축되고 있음. 이는 작물 분류 알고리즘이 연구 지역 단위 분석을 넘어 농업통계와 식량안보를 지원하는 정보생산 체계로 발전하고 있음을 보여줌.

○ 작황 모니터링 및 수확량 전망

– 작황 모니터링은 식생지수, 지표온도, 토양수분 및 기상자료의 시계열을 이용하여 작물 상태가 평년보다 양호하거나 불량한지를 판단하는 기술임. 수확량 전망은 이러한 생육정보를 기상자료, 농업통계 및 작물생육모형과 결합하여 생산량을 조기에 추정하는 단계임.

– Lobell et al.(2020)은 장기 Landsat 자료를 활용해 미국 옥수수 생산의 가뭄 민감도가 증가하고 있음을 분석함. 이는 위성 시계열이 현재 작황뿐 아니라 기후 스트레스에 대한 장기적 생산성 변화와 취약성을 평가하는 데 활용될 수 있음을 보여줌.

– EU의 MARS, GEOGLAM Crop Monitor 및 NASA Harvest는 위성 · 기상 · 현장자료를 통합하여 작황 이상과 생산 위험을 정기적으로 제공하고 있으며, 위성 알고리즘이 식량 수급과 조기경보를 지원하는 정책 도구로 정착하고 있음을 보여줌.

○ 광합성 및 작물 스트레스 진단

– 정규화 식생지수(Normalized difference vegetation index, NDVI)와 같은 기존 식생지수는 녹색도와 피복 상태를 파악하는 데 유용하지만, 실제 광합성 활동이나 초기 생리적 스트레스를 직접적으로 나타내는 데에는 한계가 있음. 이에 SIF, 초분광, 열적외선 자료를 활용하여 광합성, 엽록소, 수분 상태와 병해 · 가뭄 스트레스를 보다 직접적으로 추정하는 연구가 확대되고 있음.

– SIF는 광합성과 관련된 기능적 신호를 제공하지만, 작물 종류와 군락 구조, 일사 조건 및 관측 규모의 영향을 받으므로 기존 식생지수를 대체하기보다 상호보완적으로 활용될 수 있음.

– Kong et al.(2022)은 고해상도 PlanetScope 자료를 플럭스타워의 실제 관측 영향범위와 연계하면 군락 광합성 추정의 공간적 일치성을 높일 수 있음을 제시함. 이는 고해상도 군집 위성이 소규모 농경지의 공간적 이질성과 탄소 교환을 분석하는 데 활용될 가능성을 보여줌.

2 기술발전 흐름

2.1 농업 위성 기술 발전



그림 8. 주요 농업 활용 위성의 발전 타임라인

○ 위성 기반 육상관측의 출발(1970년대)

– 1972년 NASA가 발사하고 미국지질조사국(USGS)이 자료 보관 · 배포에 참여한 ERTS-1은 이후 Landsat-1으로 개칭되었으며, 현대적 위성 기반 육상 · 농업 원격탐사의 출발점이 됨.

– Landsat-1은 오늘날보다 공간해상도와 관측 성능이 제한적이었지만, 동일한 농경지를 광역적으로 반복 관측하고 시계열로 비교할 수 있는 기반을 마련함.

– 1970년대에 정립된 NDVI는 적색광과 근적외선 반사도의 차이를 이용해 식생의 녹색도와 피복 상태를 정량화하며, 이후 농업 모니터링의 대표 지표로 활용되어 왔음.

○ 공간해상도와 광역 관측의 발전(1980~1990년대)

– Landsat 4 · 5에 TM 센서가 탑재되면서 주요 반사광 밴드의 공간해상도가 30m로 향상되어, 농경지와 토지피복 변화를 보다 세밀하게 분석할 수 있게 됨.

- NOAA의 AVHRR는 약 1.1km 공간해상도와 거의 매일 전 지구를 관측할 수 있는 높은 시간해상도를 바탕으로, 지역 단위 분석을 넘어 대륙 · 전 지구 규모의 식생 및 작황 모니터링 기반을 확대함.
- 1990년대에는 ESA의 ERS-1 · 2와 같은 C-밴드 SAR 위성이 등장하여 구름과 일조 조건의 영향을 상대적으로 적게 받는 관측이 가능해졌으며, 광학영상의 관측 공백을 보완하는 기반이 마련됨.

○ 글로벌 작황 시계열의 구축(2000년대)

- Terra와 Aqua 위성의 MODIS 센서는 36개 분광 채널과 250m~1km 공간해상도로 전 지구를 1~2일 주기로 관측하여, 공간적 세밀도보다 높은 관측 빈도가 중요한 글로벌 작황 모니터링의 기반을 제공함.
- MODIS는 식생지수, 지표면온도, 지표피복, 화재 및 적설 등 다양한 산출물을 제공했으며, 농업 분야에서는 광역 식생 상태와 계절별 생육 변화를 연속적으로 파악하는 데 활용됨.
- 장기간 축적된 MODIS NDVI와 향상 식생지수(Enhanced vegetation index, EVI) 시계열은 국제기구와 각국의 작황 · 가뭄 · 식량안보 모니터링을 위한 주요 자료로 활용되고 있음.

○ 개방형 데이터와 클라우드 분석의 확산(2010년대)

- 2010년대에는 Copernicus Sentinel 위성군과 개방형 자료정책을 통해 무료 위성자료의 공간해상도와 관측 빈도가 향상되었으며, 광학 · SAR 자료를 결합한 농업 모니터링이 확대됨.
- Google Earth Engine과 같은 클라우드 분석 플랫폼의 확산으로 Landsat, MODIS, Sentinel 등 대규모 자료를 직접 내려받지 않고도 시계열 분석과 작물 분류, 변화 탐지를 수행할 수 있게 됨.
- 이에 위성자료는 개별 영상을 판독하는 연구자료에서 벗어나, 국가 · 대륙 규모의 농업정보를 반복 생산하는 데이터 분석 인프라로 발전함.

○ 군집위성과 정밀 분광 관측의 확산(2015년~현재)

- 2015년 이후에는 PlanetScope와 같은 상업 군집위성이 전 세계 육지를 일 단위로 관측하면서, 단일 위성의 성능 향상보다 다수 위성의 군집 운용을 통해 시간해상도를 높이는 방식이 본격화됨.
- 동시에 EnMAP, PRISMA 및 Pixxel Firefly 등 공공 · 상업 초분광위성이 등장하고 FLEX와 같은 SIF 관측 임무가 개발되면서, 식생의 녹색도 중심 관측에서 토양 · 수분 · 생화학적 특성과 광합성 활동을 정밀하게 진단하는 방향으로 관측 범위가 확장되고 있음.
- 국내에서도 농림위성, 옵저버 시리즈, 세종 3호와 초소형 군집위성 사업이 추진되면서 공공농업관측, 민간 고해상도 · 초분광 관측 및 군집 운용 기반이 함께 형성되고 있음.

2.2 관측 성능과 센서 기술의 발전

○ 농업위성 기술은 공간해상도, 시간해상도, 분광해상도의 향상과 함께 광학영상의 관측 공백을 보완하는 SAR 활용이 확대되는 방향으로 발전해 왔음. 각 성능은 동시에 극대화하기 어렵기 때문에, 실제 농업 모니터링에서는 관측 목적에 따라 서로 다른 위성과 센서를 조합하여 활용함.

표 3. 농업위성의 관측 성능과 센서 기술 발전 과정

발전 단계	대표 시기	공간 관측 특성	시간 관측 특성	분광 관측 특성	SAR 발전
반복 육상관측의 시작	1970년대	Landsat MSS 약 80m 급	약 18일 주기	4개 다중분광 밴드	농업 활용 이전 단계
지역·광역 관측의 병행	1980~90년대	Landsat TM 30m, AVHRR 약 1.1km	Landsat 16일, AVHRR 고빈도 관측	Landsat TM 7개 밴드	ERS-1·2 등 C-밴드 SAR 도입
글로벌 시계열 구축	2000년대	MODIS 250m·500m·1km	전 지구 1~2일 주기	MODIS 36개 밴드	ALOS/PALSAR 등 L-밴드 SAR 활용 확대
고해상도 개방 관측	2010년대	Sentinel-2 10·20·60m	2기 운용 시 5일	13개 다중분광 밴드	Sentinel-1 기반 전천후 시계열 관측 확대
군집·정밀 분광 관측	2015년~현재	상업위성 수십 cm~수 m, 농림위성 5m	군집위성 기반 일 단위 관측	적색경계·SWIR 및 수십~수백 개 초분광 밴드	광학·SAR 융합 및 농업 응용 고도화

○ 공간해상도는 Landsat-1의 수십 m급 관측에서 현재 상업위성의 수십 cm급까지 향상되었음. 그러나 농업 모니터링에서는 해상도뿐 아니라 촬영폭, 관측 빈도, 자료 비용과 시계열 일관성이 함께 중요하므로, 광역 작황 분석에는 10~30m급 공공자료가, 필지 단위 분석에는 3~5m급 상업자료가 주로 활용됨.

○ 시간해상도는 단일 위성의 재방문주기 단축뿐 아니라 다수 위성을 함께 운용하는 군집체계를 통해 크게 향상되었음. PlanetScope는 다수의 초소형위성을 이용하여 전 세계 육지를 일 단위로 관측함으로써, 작물 생육과 재해 전후 변화를 고빈도로 추적할 수 있는 기반을 제공함.

○ 분광 관측은 초기의 소수 다중분광 밴드에서 적색경계 · 단파적외선 · 열적외선 영역을 포함하는 다중분광 관측으로 확대되었으며, 최근에는 수십~수백 개의 좁고 연속적인 밴드를 제공하는 초분광 관측으로 발전하고 있음. 이에 따라 식생의 녹색도와 피복뿐 아니라 엽록소, 수분상태, 토양 · 식생의 물질 특성과 생육 이상 징후를 보다 세밀하게 분석할 수 있는 기반이 확대됨.

○ SAR는 마이크로파를 이용하여 주야간 관측이 가능하고 구름과 강수의 영향을 상대적으로 적게 받으므로, 광학위성의 기상조건에 따른 관측 공백을 보완함. ERS-1 · 2에서 시작된 농업

분야 SAR 활용은 ALOS · ALOS-2와 Sentinel-1 등으로 확대되었으며, 논 재배지와 생육 단계 분류, 토양수분, 침수 및 재해 영향 분석에 활용되고 있음.

3 핵심 발전축



그림 9. 농업위성 3대 발전축 모식도

3.1 다중센서 관측

○ 농업위성 관측은 개별 위성의 공간 · 시간 · 분광 해상도를 높이는 경쟁에서 벗어나, 서로 다른 관측자산을 목적에 맞게 조합하는 다원 관측체계로 발전하고 있음.

○ 관측 목적별 자산의 역할 분담

– 다중분광 위성은 넓은 지역을 일정한 기준으로 반복 관측하는 데 적합하여 재배면적과 생육 변화의 광역 모니터링을 담당함.

– 고해상도 · 군집위성은 필지 단위의 세부 공간정보와 높은 관측 빈도를 보완하고, 초분광 · 열적외선 및 SIF 관측자료는 작물의 생화학적 특성, 표면온도와 광합성 상태를 정밀하게 분석하는 데 활용될 수 있음.

– SAR는 기상과 일조 조건의 영향을 상대적으로 적게 받아 장마철 광학영상의 관측 공백을 보완하고 침수 · 토양수분 · 작물 구조 정보를 제공함.

○ 관측 성능에서 자료 일관성으로의 전환

– 다원 관측체계에서는 위성 수와 밴드 수의 확대뿐 아니라 센서 간 교차보정, 시계열 연속성, 공간 · 시간 정합 및 품질정보 제공이 중요함.

– 따라서 향후 데이터 경쟁력은 개별 영상의 해상도보다 다양한 위성자료를 안정적으로 결합하고 장기간 일관된 자료로 제공하는 능력에 의해 좌우될 전망임.

3.2 지능형 농업정보 분석

○ 인공지능의 발전 방향은 영상에서 대상을 정확히 식별하는 것을 넘어, 지역과 연도, 센서 및 재배환경이 달라져도 일관된 농업정보를 생산하는 운영형 분석체계를 구축하는 데 있음.

○ 시계열 · 다중자료 학습

– 작물의 분광 · 구조 특성은 생육단계에 따라 변하므로 단일 시점 영상보다 다중시기 자료를 분석하는 시계열 모델이 중요함.

– 최근에는 광학 · SAR · 기상 · 토양자료를 함께 이용하고 CNN, 순환신경망 및 Transformer 계열 모델을 통해 공간적 패턴과 생육 변화를 통합적으로 학습하는 연구가 확대되고 있음.

○ 농업 산출물 중심의 분석체계

– 농업위성 AI는 단순한 영상 분류에 그치지 않고, 필지 경계 추출, 작물 유형 판정, 생육단계 추정, 이상 지역 탐지 및 수확량 전망을 연계하는 방향으로 발전하고 있음.

– 실제 운영체계에서는 이러한 분석 기능을 개별 모델로 분리하기보다, 전처리된 영상에서 작물구분도 · 작황지수 · 재해 영향 등 표준 산출물을 반복 생산하는 자동화된 파이프라인으로 구성할 필요가 있음.

○ 일반화 · 검증 · 불확실성 관리

– 특정 지역과 연도에서 학습한 모델은 품종, 재배환경과 영상 조건이 달라지면 성능이 저하될 수 있으므로 지역 · 연도 간 전이학습과 지속적인 현장 검증이 필요함.

– 행정과 정책에 AI 산출물을 활용하기 위해서는 평균 정확도뿐 아니라 오류가 발생하는 조건, 공간별 신뢰도 및 불확실성을 함께 제공해야 함.

– 향후에는 모델의 판단 근거와 입력자료 이력을 추적할 수 있는 설명가능성 및 재현성이 운영형 농업 AI의 핵심 요건이 될 전망임.

3.3 데이터 · 서비스 플랫폼

○ 농업위성의 활용 가치는 영상과 분석 결과가 농업인과 행정 · 정책 담당자의 업무 과정에 지속적으로 공급될 때 실현됨. 이에 따라 플랫폼은 단순한 자료 검색 · 다운로드 환경에서 관측–처리–검증–서비스를 연결하는 운영체계로 발전하고 있음.

○ 표준 데이터 기반의 자동 처리

– Google Earth Engine, Amazon Web Services의 공개 데이터 환경 및 Copernicus Data Space Ecosystem 등은 대규모 위성자료에 접근하고 클라우드 환경에서 처리 · 분석할 수 있는 기반을 제공함.

– 향후에는 다중위성 분석준비데이터, 표준 API, 처리 이력과 품질정보를 함께 제공하여 기관별 중복 전처리를 줄이고 분석의 재현성과 상호운용성을 확보해야 함.

○ 농업 산출물의 운영형 공급

– 플랫폼은 사용자가 원시 위성영상을 직접 처리하지 않아도 작물구분도, 생육 상태, 수분 스트레스, 재해 영향과 수확량 전망 등의 정보를 정기적으로 이용할 수 있도록 구성되어야 함.

– 이를 위해 원시자료의 수신과 전처리부터 알고리즘 실행, 품질검사, 산출물 갱신과 배포까지 이어지는 데이터 파이프라인의 자동화가 필요함.

○ 행정 · 영농 의사결정과의 연계

– 위성 산출물은 농지 이용 점검, 재배면적 산정, 재해 피해 평가와 지원요건 확인 등 농업 행정체계와 연계되는 방향으로 활용 범위가 확대되고 있음.

– 영농 분야에서는 위성정보를 기상 · 토양 · 영농이력 및 현장센서 자료와 결합하여 관개 · 시비 · 방제 판단과 위험도 정보를 제공하는 의사결정 지원체계로 발전할 필요가 있음.

– 정책과 현장 활용을 위해서는 산출물별 정확도 기준, 현장검증 절차와 사용자 수준에 맞는 정보 표현 방식을 함께 마련해야 함.

4 향후 기술 발전 방향

4.1 단기(5년) 발전 방향

○ 관측체계의 지속성 기반 마련

– 현재 국가 농업 · 산림 특화 관측체계는 농림위성 1기를 중심으로 구축되고 있어, 장기적인 관측 연속성과 위성 장애 · 임무 종료에 대비한 대체 관측 능력 확보가 필요함.

– 농림위성의 5m급 공간해상도와 광역 관측 능력은 국내 재배면적과 생육 변화 파악에 기여할 수 있으나, 장기 시계열 확보, 구름에 따른 유효 관측 감소와 센서 다양성 부족은 단일 위성만으로 해결하기 어려움.

– 단기적으로는 초기 운영을 안정화하고 관측계획, 자료 수신, 품질관리 및 장애 대응을 포함하는 표준 운용 절차를 확립해야 함. 이와 함께 후속 위성의 임무 · 성능 · 운용 방식과 자료 연속성을 검토하는 기본계획이 필요함.

– 후속 위성은 국내 필지 규모와 활용 수요를 고려하여 2~3m급 공간해상도의 도입 가능성, 다중 위성 운용을 통한 관측주기 단축과 촬영폭 유지 · 확대 방안을 비용 및 시계열 연속성 측면에서 종합적으로 검토해야 함.

– 국산 위성을 중심으로 Sentinel-2 · Landsat 등 개방형 공공위성과 고해상도 · 고빈도 상업

위성을 상호보완적으로 활용하여 장기 시계열과 필지 수준 분석 능력을 함께 확보해야 함.

○ 기초 농업 산출물 생산체계 구축

- 농업위성 활용체계는 원시영상 공급을 넘어 농업정책과 영농 의사결정에 활용할 수 있는 표준 농업정보를 지속적으로 생산 · 공급해야 함.
- 작물구분도와 생육단계 지도 등 기초 산출물의 생산 절차를 확립하고, 벼 · 콩 등 주요 작물을 대상으로 반복 적용할 수 있는 알고리즘을 실용화해야 함.
- 여름철 구름과 장마로 인한 광학영상 결측을 보완하기 위해 SAR · 광학 시계열과 기상 · 토양자료를 결합한 다중자료 분석 및 인공지능 기반 갭필링 기술을 고도화할 필요가 있음.
- 냉해 · 가뭄 · 침수 등 농업재해는 유형별 피해 징후와 영향 범위를 추정하고 현장조사와 연계해 검증하는 알고리즘을 마련해야 함.
- 산출물별 정확도, 갱신주기, 공간단위와 품질정보를 표준화하여 행정과 현장에서 반복 활용할 수 있는 운영형 정보생산체계를 구축해야 함.

○ 국가 분석준비데이터 · 검증 인프라 구축

- 방사 · 기하 · 대기 보정, 구름 · 그림자 마스킹, 품질정보와 메타데이터를 일관되게 적용하는 국가 분석준비데이터 규격을 조기에 확립해야 함.
- 농림위성 운영과 연계하여 표준 전처리, 버전관리, 품질 플래그와 처리 이력을 포함하는 분석준비데이터 생산 · 제공체계를 구축할 필요가 있음.
- 센서의 방사 · 기하 보정시설과 함께 작물 생육 · 토양수분 · 바이오매스 등 농업 산출물을 검증하는 현장 관측망을 구축해야 함. 플럭스타워는 탄소 교환과 증발산 산출물의 검증자료로 활용할 수 있음.
- 검증망은 논 · 밭 · 시설재배와 내륙 · 해안 · 고지대 등 다양한 농업 · 환경 조건을 대표하도록 확대하고, 드론 · 지상센서 · 현장조사 자료를 공통 기준으로 축적해야 함.
- 국가 ARD 체계는 기관별 중복 전처리를 줄이고 연구자 · 기업 · 정책기관이 동일한 기준의 자료를 활용하도록 지원해야 함.

4.2 중장기(10년) 발전 방향

○ 다중 관측자산 확보와 차세대 센서 도입

- 후속 위성의 연속적인 발사와 다중 위성 운용을 통해 특정 위성의 고장이나 임무 종료에도 관측이 단절되지 않는 지속적 관측체계를 확보해야 함.
- 초분광 · 열적외선 및 SIF 관측 탑재체의 국내 후속 위성 적용 가능성을 기술실증과 비용 · 효과 분석을 거쳐 구체화할 필요가 있음.

- 하나의 위성에 초고해상도, 초분광, 광역 촬영과 짧은 재방문주기를 모두 요구하기보다 광역 다중분광 위성, 고해상도 · 고빈도 상업위성, 초분광 · 열 · SIF 관측자산을 목적별로 조합하는 다층 관측망을 구축하는 것이 현실적임.
- 국내 관측자산과 Sentinel · Landsat 등 국제 공공위성 및 민간 군집위성을 연계하여 한반도, 북한과 해외 주요 곡물 생산지역을 안정적으로 관측하는 체계를 마련해야 함.

○ 고부가가치 농업 알고리즘 고도화

- SAR · 광학 · 기상 · 토양자료를 결합한 작황 모니터링을 고도화하고, 초분광 · 열 · 형광 자료로 작물의 생리 · 생화학적 특성과 스트레스 상태를 정량적으로 추정하는 기술을 개발해야 함.
- 재배면적과 작물 유형 판정을 넘어 생육단계, 수분 스트레스, 병해 가능성, 재해 영향과 수확량을 연속적으로 분석하는 통합 알고리즘 체계로 발전할 필요가 있음.
- 국내 알고리즘을 북한과 해외 곡물 생산지역에 적용하기 위해서는 작물력, 기후, 품종과 영농방식 차이를 반영한 지역 적응 및 현장 참조자료 확보가 필요함.
- 기초 산출물을 바탕으로 수확량 전망, 재해 위험도, 탄소 · 물관리 지표 등 최종 활용형 산출물을 자동 생산하는 데이터 파이프라인을 구축해야 함.
- 농지 이용 점검과 직불제 이행 확인에는 위성 자동 분석 결과를 현장조사 · 행정자료와 연계하는 의사결정 지원체계를 적용해야 함.

○ 데이터 인프라 자동화와 국제 상호운용성 확보

- 위성자료 수신부터 분석준비데이터 생산, 알고리즘 실행, 품질검사, 산출물 갱신과 배포까지의 처리 절차를 자동화해야 함.
- 다중위성 교차보정을 안정적으로 운영하고 지구관측위성위원회 분석준비데이터 등 국제 자료 규격과 메타데이터 · 품질정보 기준을 반영하여 장기 시계열의 일관성과 상호운용성을 확보해야 함.
- 관측값과 모델 복원값을 구분하는 품질 플래그, 불확실성, 입력자료와 알고리즘 버전 정보를 제공하여 산출물의 추적 가능성과 재현성을 높여야 함.
- 국내 산출물이 국제 작황 모니터링 프로그램과 호환되도록 자료 형식, 분류체계와 검증 절차를 국제 기준과 연계해야 함.

○ 정책 · 국제 협력 기반 강화

- 농지 이용 현황, 재해 피해 면적과 지원요건 이행 여부 등 활용 목적별 산출물의 정확도 기준과 행정 적용 절차를 마련해야 함.
- 분석준비데이터 플랫폼에서 표준 API와 공개 가능한 알고리즘 · 기술문서 및 교육자료를 제공하여 접근성과 분석 재현성을 높여야 함.

– 농업경영체 · 행정자료를 위성 산출물과 연계할 경우 자료 접근권한, 개인정보 보호, 목적 외 이용 방지와 결과 검증을 포함하는 데이터 거버넌스가 필요함.
– 공동 검증거점과 참조자료를 구축하고 GEOGLAM 등 글로벌 작황 모니터링 활동에 참여하여 국내 알고리즘의 지역 간 적용성과 국제적 신뢰도를 높여야 함.

4.3 관측 · 데이터 · 서비스 연계 발전방향

○ 농업위성 기술의 가치는 개별 위성의 성능뿐 아니라 다른 관측수단, 정보체계와 의사결정 플랫폼을 유기적으로 연결하는 능력에 의해 결정됨.

○ 관측 규모 간 연계: 위성-드론-지상센서
– 위성, 드론과 지상센서는 관측 범위, 공간해상도와 측정 정밀도에서 상호보완적이며, 이를 연계하면 필지 단위 정밀 진단과 광역 작황 모니터링을 하나의 분석 흐름으로 연결할 수 있음.
– 플럭스타워의 탄소 · 에너지 · 수분 플럭스, 드론의 고해상도 분광 · 열 영상과 위성 시계열을 공동 검증체계로 연계하면 관측 규모 차이에서 발생하는 불확실성을 줄이고 위성 산출물의 현장 대표성을 높일 수 있음.
– 드론에서 탐지한 국소 이상을 위성자료로 광역 추정하고, 위성이 포착한 이상 지역을 드론과 현장조사로 확인하는 양방향 관측체계로 발전할 수 있음.
– 이를 위해 촬영시각과 공간단위의 정합, 스케일 변환모델, 공통 메타데이터 및 품질관리 기준이 필요함.

○ 센서 정보의 결합: 광학 · SAR · 초분광 · 열 · SIF
– SAR, 다중분광, 초분광, 열적외선과 SIF는 각각 지표 구조 · 수분, 광역 생육 변화, 생화학적 특성, 표면온도와 광합성 관련 정보를 제공함.
– SAR-광학 결합은 장마철 광학영상의 관측 공백을 보완하며, 초분광 · 열 · SIF 자료를 연계하면 작물의 생리 · 환경 상태에 대한 진단 범위를 확대할 수 있음.
– 다중센서 결합모델은 관측 원리와 공간 · 시간해상도의 차이를 고려하여 작물 분류, 생육단계, 수분 스트레스와 재해 영향을 통합적으로 추정하는 방향으로 발전해야 함.
– 농림위성, 국내 민간 관측자료와 Sentinel 자료를 연계한 실증체계는 국내 다중센서 기술을 검증하고 운영단계로 전환하는 기반이 될 수 있음.

○ 데이터 · 서비스 체계의 통합: 위성-농업정보 플랫폼
– 위성자료가 농업 현장에서 활용되기 위해서는 원시영상이나 개별 분석 결과가 아니라, 작물 구분도 · 생육상태 · 재해 영향 등 표준화된 농업 산출물의 형태로 생산 · 공급되어야 함.
– 이러한 산출물은 기상 · 토양 · 영농이력 · 현장관측 자료와 연계하고, 표준 API와 공통 자료

형식을 통해 농업관측 · 재해관리 · 농지관리 등 기존 업무시스템에서 활용할 수 있도록 제공해야 함.

- 플랫폼은 자료 검색과 시각화에 그치지 않고, 산출물의 갱신주기, 정확도, 품질 플래그, 처리 이력과 불확실성 정보를 함께 제공하여 사용자가 결과의 적용 가능성과 한계를 판단할 수 있도록 해야 함.
- 행정자료와 농업경영체 정보를 연계할 경우에는 개인정보와 경영정보 보호를 전제로 접근권한, 이용 목적, 자료 보유기간 및 결과 검증 절차를 명확히 하는 데이터 거버넌스가 필요함.
- 장기적으로는 위성 산출물의 활용 결과와 현장 검증자료를 다시 알고리즘과 산출물 생산체계에 반영하여, 데이터 생산–서비스 제공–사용자 검증이 순환하는 운영체계를 구축해야 함.

표 4. 농업위성 핵심기술의 단기 · 중장기 발전 로드맵

핵심기술	주요 내용	단기 (5년)	중장기 (10년)
지속적 관측 체계 마련	농림위성 초기 운영 안정화 및 표준 운용 절차 확립	■	
	후속 위성 시리즈 기본계획 수립 및 사업·투자 타당성 검토	■	■
	공공·상업 위성의 상호보완 운용 전략 확립	■	■
차세대 센서	초분광·SIF·열적외선 탑재 가능성 및 활용성 검토	■	
	차세대 센서 기술실증 및 성능 검증	■	■
	목적별 다층 관측체계 구축 및 본격 운영		■
기초 농업 산출물	작물구분도·생육단계 지도 생산 알고리즘 구축	■	■
	갭필링·다중자료 융합 기반 장마철 관측 공백 보완	■	■
	북한·해외 주요 곡물 생산지역으로 작황 분석 범위 확대		■

핵심기술	주요 내용	단기 (5년)	중장기 (10년)
고부가가치 알고리즘	냉해·가뭄·침수 등 재해 유형별 영향 추정 알고리즘 실용화		
	초분광·열·형광 기반 작물 스트레스 조기 진단		
	수확량·재해위험·탄소·물관리 등 최종 활용형 산출물 자동 생산		
분석준비 데이터·검증 인프라	국가 분석준비데이터 규격 마련 및 현장 검증망 확대		
	다중위성 교차보정 및 분석준비데이터 자동 생산체계 운영		
	국제 공동 검증거점 및 글로벌 상호운용성 확보		
정책·국제 협력	위성 산출물의 농업행정 활용기준과 법·제도 마련		
	데이터 개방 API와 기술문서·교육자료 제공		
	국제 공동 검증 및 작황 모니터링 협력 확대		

5 주요 이슈 및 한계

5.1 기술적 한계

○ 구름에 따른 광학 관측 공백

– 광학위성은 구름과 짙은 대기의 영향으로 지표 정보를 확보하지 못할 수 있으며, 흐린 날과 강수가 집중되는 여름철에는 안정적인 농경지 시계열 구축이 어려움.

– 재방문주기가 짧더라도 주요 생육단계나 재해 발생 시점에 구름 없는 영상을 항상 확보할 수 있는 것은 아니며, 이러한 결측은 변화 탐지와 시계열 분석의 불확실성을 높임.

– SAR는 구름과 일조 조건의 영향을 상대적으로 적게 받아 광학자료를 보완할 수 있으나, 후방산란 신호가 토양수분, 표면 거칠기, 작물 구조와 관측조건의 영향을 함께 받으므로 전문적인 전처리와 현장 검증이 필요함.

○ 공간해상도 · 촬영폭 · 재방문주기의 상충관계

– 위성 관측체계에서는 공간해상도, 촬영폭, 재방문주기, 신호 품질과 자료 전송량 사이에 설

계상 상충관계가 존재함.

- 높은 공간해상도와 짧은 재방문주기를 함께 확보하려면 위성 기동성 향상이나 다중 위성 운용이 필요하지만, 제작 · 발사 · 운영 비용과 위성 간 교차보정 부담이 증가함.
- 따라서 단일 위성만으로 모든 관측 수요를 충족하기 어렵고, 광역 관측과 필지 수준 정밀관측 간 역할 분담이 필요함.

○ 분석준비데이터의 운영 안정성

- 위성자료를 행정 · 연구 · 산업 분야에서 반복 활용하려면 방사 · 기하 · 대기 보정, 구름 마스킹, 품질정보와 메타데이터가 일관된 분석준비데이터로 제공되어야 함.
- 자료 생산체계 구축 이후에도 처리 알고리즘 검증, 버전관리, 오류 수정과 장기 시계열의 일관성 유지가 요구됨.
- 운영 기준이 불명확하면 기관별 중복 전처리와 상이한 분석 결과가 발생하여 자료의 비교 가능성과 활용 효율이 저하될 수 있음.

5.2 경제성 및 비용 문제

○ 위성 개발 · 운영의 전 생애주기 비용

- 농업위성체계에는 위성 · 탑재체 개발뿐 아니라 발사, 지상국 운영, 자료처리, 검증, 정보서비스와 후속 위성 개발에 이르는 장기 비용이 발생함.
- 지속적인 농업 모니터링을 위해서는 위성의 제한된 임무기간을 고려하여 후속 위성과 지상 인프라를 포함한 중장기 재정계획이 필요함.
- 공공 위성의 경제성은 영상 판매수익보다 농업통계, 재해 대응, 농지관리와 식량안보 등 공공서비스 개선에 따른 사회적 편익을 포함해 평가해야 함.

○ 데이터 처리 · 서비스 운영 비용

- 전국 규모의 위성자료를 반복 처리하려면 저장, 연산, 전송, 배포와 장기 보관을 위한 인프라가 필요하며, 자료량과 갱신주기가 증가할수록 운영비도 확대됨.
- 모델 개발 이후에도 정확도 검증, 재학습, 소프트웨어 갱신, 장애 대응과 사용자 지원이 필요하므로 관련 비용을 상시 운영비로 반영해야 함.

5.3 확산 장애 요인

○ 융합형 전문인력과 협업체계 부족

- 농업위성 정보를 생산 · 활용하려면 원격탐사, 공간정보, 데이터과학, 시스템 운영과 농학적 해석을 연결하는 융합 역량이 필요함.

– 개인이 모든 전문성을 갖추기 어려우므로 분야별 전문가가 공동으로 자료를 해석하고 검증할 수 있는 협업체계와 실무 중심의 인력양성이 요구됨.
– 작물 생육, 현장조사, 품질관리와 정책 활용을 함께 다루는 교육 · 훈련 기반이 부족할 경우 연구성과의 운영 전환이 제한될 수 있음.

○ 기술개발과 수요 현장 간 간극
– 위성 산출물의 정확도가 높더라도 제공 시기, 공간단위와 표현방식이 사용자의 업무와 맞지 않으면 실제 활용이 제한됨.
– 농업인, 행정기관과 연구기관은 요구하는 정보와 활용 방식이 다르므로 사용자별 산출물과 서비스 설계가 필요함.
– 기술 중심으로 서비스를 개발하면 결과를 해석하거나 후속 조치로 연결하기 어려울 수 있으므로, 시범운영 단계부터 사용자 평가와 현장 검증을 반영해야 함.

5.4 제도 및 운영체계의 한계

○ 데이터 개방과 정보보호의 조정
– 공공 위성자료의 개방은 연구와 민간 서비스 개발을 촉진하지만, 고해상도 영상은 안보 · 시설보호, 민간영상은 이용권한과 라이선스의 영향을 받을 수 있음.
– 위성 산출물을 필지별 행정자료나 농업경영체 정보와 결합할 경우에는 개인정보와 경영정보 보호, 접근권한과 이용 목적에 관한 별도 기준이 필요함.
– 공공 자료는 개방을 원칙으로 하되 보안 · 개인정보 · 지식재산권에 해당하는 범위를 명확히 구분해야 함.

○ 자료 · 산출물 표준화 부족
– 기관과 사업별로 전처리 방식, 좌표체계, 분류기준과 정확도 평가방법이 다르면 산출물의 비교와 공동 활용이 제한될 수 있음.
– 품질 플래그, 처리 알고리즘 버전, 입력자료, 갱신주기와 검증 결과를 함께 관리하지 않으면 분석 결과의 재현성과 신뢰성을 확보하기 어려움.
– 국제 위성자료와 연계하려면 국내 자료체계가 국제적으로 활용되는 분석준비데이터 제품 사양과 상호운용 기준을 수용할 수 있어야 함.

○ 장기 프로그램 추진체계의 구체성 부족
– 농업 모니터링의 연속성을 확보하려면 후속 위성, 지상체계와 산출물 서비스를 장기간 유지하는 프로그램 체계가 필요함.
– 후속 위성의 일정, 자료 연속성, 재원조달과 차세대 센서의 역할이 구체화되지 않으면 농림위성 자료의 장기 활용이 제한될 수 있음.

Ⅳ. 산업 및 정책 환경

1 산업 동향

표 5. 글로벌 지구관측 및 농업 연관 시장의 성장 전망

시장 영역	출처	시장 범위	기준연도 시장 규모	전망연도 시장 규모	연평균 성장률
지구관측 전체	Straits Research	Satellite Earth Observation Market	2025년 101억 달러	2034년 184억 달러	2026~2034년 6.92%
위성 기반 지구 관측	GM Insights	Satellite-Based Earth Observation Market	2025년 39억 달러	2034년 66억 달러	2025~2034년 5.9%
지구관측 데이터·서비스	Grand View Research	Earth Observation Market	2024년 51억 달러	2030년 72억 달러	2025~2030년 6.2%
상업 위성영상	Future Market Insights	Commercial Satellite Imaging Market	2025년 59억 달러	2036년 210억 달러	2026~2036년 12.3%
농업용 위성영상	InsightAce Analytic	Satellite Imaging for Agriculture Market	2024년 5.9억 달러	2034년 13.6억 달러	2025~2034년 8.9%
정밀농업	IMARC Group	Precision Agriculture Market	2025년 102억 달러	2034년 225억 달러	2026~2034년 9.18%

1.1 글로벌 산업 동향

○ 글로벌 위성 · 지구관측 산업 시장 규모

- 조사기관마다 위성 운영, 영상 판매, 분석 · 플랫폼 서비스 등 시장에 포함하는 범위가 달라 절대적인 시장 규모에는 차이가 있음. 다만 대부분의 전망에서 지구관측 시장은 연평균 약 6% 내외, 농업용 위성영상과 정밀농업 연관 시장은 약 9% 내외의 성장률이 제시되고 있음.
- 전체 지구관측 시장의 2025년 규모는 약 39억~101억 달러로 추정되며, 상업 위성영상 시장은 분석 · 플랫폼 서비스를 포함하는 범위에 따라 더 높은 성장률이 전망됨.
- 지역별로는 북미가 가장 큰 시장을 형성하고 있으며, 아시아 · 태평양은 빠르게 성장하는 지역으로 평가됨. 중국의 Gaofen과 인도의 Resourcesat · Cartosat 등 국가 위성 프로그램도 지역 내 지구관측 자료 공급과 농업 · 환경 응용 확대를 뒷받침하고 있음.
- 농업용 위성영상 시장은 전체 지구관측 시장의 하위 영역으로 성장하고 있음. 다만 정밀농업 시장은 위성영상 외에도 GPS, 농업센서, 드론, 데이터 분석 및 자동화 장비를 포함하므로

두 시장의 규모를 직접 비교하는 데에는 한계가 있음.

- 위성영상은 다른 농업자료와 결합하여 광역 작황 모니터링, 현장조사 대상 선별 및 농장 단위 의사결정 지원에 활용될 수 있음.

○ 데이터 공급에서 분석 · 의사결정 서비스로의 사업영역 확장

- 글로벌 지구관측 산업에서는 원시 · 전처리 영상 공급과 함께 분석 산출물과 의사결정 지원 정보를 제공하는 서비스형 사업모델이 확대되고 있음.
- 기존에는 사용자나 전문기관이 개별 영상을 직접 전처리 · 분석했으나, 최근에는 표준화된 분석 결과를 자동 생산하여 플랫폼이나 API를 통해 업무시스템에 제공하는 운영형 서비스가 확산되고 있음.
- 농업 분야에서는 생육 변화, 수분 스트레스, 재해 영향 및 수확량 위험도 등의 분석정보가 농장 관리 플랫폼과 농업행정 시스템에 연계되고 있음. 이에 따라 서비스 경쟁력도 영상 해상도뿐 아니라 산출물의 정확도, 갱신주기, 제공 속도 및 시스템 연계성에 의해 좌우되고 있음.
- 초분광 등 정밀 관측자료의 공급 확대는 작물 스트레스와 토양 · 식생 상태 분석 서비스의 시장 기회를 넓히고 있음. 다만 상업화에는 자료 자체보다 현장 검증, 분석 알고리즘 및 활용 가능한 정보로 전환하는 역량이 중요함.
- 이러한 변화는 위성 운영기업뿐 아니라 알고리즘, 데이터 플랫폼, API 및 농업 특화 솔루션 기업의 시장 진입 기회를 확대하고 있음.

표 6. 지구관측 산업의 사업모델 전환과 농업 분야 활용 비교

구분	영상·데이터 공급형 사업	분석·의사결정 지원형 사업
제공 대상	원시 영상 또는 전처리 영상	분석 산출물, 지표, 위험도, 의사결정 정보
활용 방식	사용자 또는 전문기관이 별도로 전처리·분석	자동화된 분석 결과를 플랫폼·API로 제공
주요 가치	영상 품질, 해상도, 촬영 빈도 및 자료 접근성	문제 해결, 운영 효율화, 정책·영농 판단 지원
기술 기반	광학영상 판독, 기본 식생지수 분석	AI 기반 자동화 분석, 다중센서·기상·토양·영농자료 융합
농업 활용	작물 피복, 농경지 변화 확인	수분 스트레스, 작황 변화, 수확량 위험도, 재해 영향 평가
수요자	정부·연구기관·공간정보 전문기업 등	농업 플랫폼 기업, 농가 지원기관, 정책 담당기관, 보험·금융 등 위험관리 분야
산업 기회	위성 운영·영상 판매	알고리즘, 데이터 플랫폼, API 서비스, 정밀농업 솔루션

○ 주요 기업의 경쟁구도와 농업 분야 진출

- 글로벌 지구관측 시장은 미국과 유럽 기업이 주도하고 있으며, GM Insights(2025)는 Maxar Technologies, Airbus Defence and Space, Planet Labs, Spire Global, ImageSat

International 등 상위 5개 기업이 2024년 시장의 56.8%를 차지한 것으로 추정함. 기존 Maxar의 지구관측 · 공간정보 사업은 현재 Vantor라는 명칭으로 운영되고 있음.

표 7. 글로벌 지구관측 기업의 경쟁구도와 농업활용

경쟁 유형	주요 기업	핵심 자산·서비스	주요 경쟁력	농업 분야 활용
초고해상도 광학 영상	Vantor	WorldView, WorldView Legion, 공간정보 분석	초고해상도 영상, 공간정보 분석 서비스	필지·시설 단위 변화 탐지
다중센서 관측	Airbus Defence and Space	Pléiades, SPOT, TerraSAR-X	광학·SAR 포트폴리오	작황·재해 복합 모니터링
고빈도 광학 모니터링	Planet Labs	PlanetScope, SkySat 기반 고빈도·고해상도 관측	광역·반복 관측, 시계열 모니터링	생육·재해 전후 변화 추적
전천후 SAR 모니터링	ICEYE, Capella Space	SAR 군집위성 및 분석 서비스	구름·야간 조건 관측, 재해 대응	침수·토양수분·재해 영향 평가
농업 특화 분석 서비스	EOS Data Analytics	EOS SAT-1, EOSDA Crop Monitoring	농업 분석 알고리즘·플랫폼	작물 생육·스트레스·수확량 관련 분석

- Planet Labs는 고빈도 광학영상과 시계열 모니터링을, ICEYE와 Capella Space는 SAR 위성군을 활용한 전천후 관측을 주요 경쟁력으로 보유하고 있음. Airbus Defence and Space는 광학 · SAR 자료를 함께 공급하며, Vantor는 초고해상도 영상과 공간정보 분석을 결합한 서비스를 확대하고 있음.
- 농업 특화 분야에서는 위성 분석기업과 글로벌 농업기업 간 협력이 확대되고 있음. EOS SAT-1은 계획된 농업 특화 위성군의 첫 위성이며, Syngenta는 Planet의 위성영상과 분석 정보를 Cropwise 플랫폼에 연계하고 있음.
- 이러한 사례는 위성정보가 독립적인 영상 상품을 넘어 디지털 영농 플랫폼과 농업 서비스의 핵심 데이터로 통합되고 있음을 보여줌.

○ 뉴스페이스 확산에 따른 공급구조 변화

- 글로벌 위성 산업에서는 정부 · 대형 기관 중심의 개발 방식과 함께 민간기업이 위성 제작, 발사, 운영 및 데이터 서비스를 수행하는 뉴스페이스 사업모델이 확대되고 있음.
- 재사용 발사체, 발사 서비스 경쟁, 소형위성 표준화 및 민간 투자는 위성 개발 · 발사의 진입 장벽을 낮추고 다양한 사업자의 시장 참여를 촉진하고 있음.
- 이에 따라 상업 지구관측 시장의 경쟁요소는 공간해상도뿐 아니라 관측 빈도, 촬영 소요시간, 자료 제공 속도 및 분석 서비스와의 연계 능력으로 확대되고 있음.
- 농업 분야에서는 생육 변화와 재해 영향을 적시에 파악해야 하므로, 단일 영상의 정밀도뿐

아니라 유효 관측 빈도와 분석 결과의 제공 시점이 중요함.

- 뉴스페이스 확산은 활용 가능한 상업 관측자료를 늘리고 있으나, 안정적인 활용을 위해서는 자료 비용, 이용 라이선스, 센서 간 일관성 및 장기 공급 가능성을 함께 검토해야 함.
- 결국 농업위성 시장의 경쟁력은 위성 보유 여부뿐 아니라 장기간 일관된 자료, 검증된 농업 산출물 및 행정 · 영농 시스템에 정보를 공급하는 서비스 역량에 의해 결정됨.

1.2 국내 산업 동향

○ 국내 농업위성 관련 산업 기반과 주요 참여 주체

- 국내 농업위성 산업 생태계는 공공 부문의 농림위성 관측 · 활용 기반을 중심으로 형성되고 있으며, 민간에서도 초소형 지구관측위성, 초분광 관측, 지상국 · 영상처리 및 인공지능 기반 분석 서비스가 확대되고 있음.
- (농림위성) 농림위성은 농촌진흥청 · 우주항공청 · 산림청이 공동 개발한 국내 최초의 농업 · 산림 관측용 국가 위성임. 5m급 공간해상도와 120km 관측폭으로 전국 농경지를 3일 주기로 관측하며, 초기운영과 품질 검증을 거쳐 농업 · 산림 활용이 확대될 전망임.
- (한컴인스페이스) 한컴인스페이스는 세종 위성 시리즈와 위성영상 처리 · 분석 역량을 기반으로 민간 지구관측 데이터 사업을 확대하고 있음. 초분광 자료는 작물 생육과 스트레스 등 농업 응용 서비스의 기반자료로 활용될 가능성이 있음.
- (나라스페이스) 나라스페이스는 옵저버-1A의 발사 · 운용을 통해 초소형 위성 제작, 임무 운용 및 영상 분석 역량을 축적하고 있으며, 후속 위성과 군집체계 구축을 추진하고 있음.
- (쎄트렉아이) 쎄트렉아이는 위성체 · 지상시스템 개발, 위성영상 공급 및 인공지능 분석 서비스를 포괄하는 사업 기반을 갖추고 있음. 초고해상도 영상은 필지 · 시설 단위 농경지 변화와 재해 피해지역 확인에서 농림위성 자료를 보완할 수 있음.
- (컨텍) 컨텍은 지상국 네트워크, 위성관제, 광학 · SAR 영상처리 및 분석 서비스를 제공함. 이러한 지상 · 데이터 인프라는 위성 운용부터 자료 수신, 처리, 분석 서비스로 이어지는 가치사슬을 지원함.

○ 국내 농업위성 데이터 · 응용 서비스 산업 수준

- 국내 농업위성 데이터 · 응용 서비스는 농림위성 발사와 농업위성센터 운영을 계기로 공공부문 중심의 정보생산 체계를 구축하는 단계에 있음. 농업위성센터는 자료 처리와 품질관리, 농업 산출물 생산 및 사용자 제공을 담당함.
- 활용 수요는 농지 이용 실태조사, 공익직불제 이행 점검, 농산물 수급 전망 및 재해 대응 등 농업행정 분야를 중심으로 구체화되고 있음. 농업생산기반시설 관리와 농작물재해보험 손해

평가에서도 적용 가능성이 검토되고 있음.

- 민간기업도 위성 제작 · 운용을 넘어 영상 수신 · 처리, 인공지능 분석 및 플랫폼 서비스로 사업영역을 확대하고 있음. 한컴인스페이스, 나라스페이스, 쎄트렉아이 그룹 및 컨텍은 각자의 위성 자산과 지상 · 분석 역량을 기반으로 국내 지구관측 데이터 가치사슬을 형성하고 있음.
- 다만 농업 분야에 특화된 정기 산출물 공급, 서비스 성능 검증 및 안정적인 수요처 확보는 아직 초기 단계임. 향후 농림위성의 검 · 보정과 운영이 안정화되고 분석준비데이터, 작물구분도, 작황지수 및 재해 산출물 공급이 본격화되면 공공 행정과 민간 서비스의 연계가 확대될 것으로 전망됨.
- 국내 산업의 성장을 위해서는 공공자료의 개방과 표준화뿐 아니라 민간기업이 서비스를 개발 · 검증할 수 있는 실증환경, 명확한 이용조건 및 지속적인 수요 기반을 마련해야 함.

표 8. 국내 농업위성 산업의 주요 주체별 자산 · 서비스와 농업 분야 연계

구분	주요 주체	주요 위성·자산	주요 사업·서비스	농업 분야 연계
공공 농림 관측	농촌진흥청·우주항공청·산림청	농림위성, 농업위성센터	위성 관측, 자료 처리·품질관리, 농업·산림 산출물 생산 및 제공	재배면적·생육·농경지 변화 관측, 농업행정 지원
초분광·분석 플랫폼	한컴인스페이스	세종 3호, InStation	광학·SAR·적외선 등 위성자료 처리, 분석 및 지리공간정보 서비스	작물·식생 상태 정밀 분석, 농업 모니터링 서비스
초소형 지구관측·분석	나라스페이스	옵저버-1A, 옵저버-1B	초소형 지구관측위성 제작·운용, 위성영상 공급 및 AI 분석	농경지·환경 변화 관측, 재해 전후 변화 탐지
고해상도 영상·분석	쎄트렉아이 그룹	SpaceEye-T, SI Imaging Services, SI Analytics	고해상도 위성체계 개발, 위성영상 공급, AI 기반 지리공간 분석	필지·시설 단위 변화 탐지, 재해 피해지역 확인
지상국·데이터 처리	컨텍	지상국, 위성 운용, 영상 수신·처리 인프라	위성관제, 자료 수신, 광학·SAR 표준영상 생산 및 분석 서비스	농업위성 자료의 안정적 수신·처리와 응용 서비스 기반 지원

2 국내외 정책 동향

2.1 국외 정책 동향

○ 주요국의 장기 관측 및 농업 활용 정책

- 주요국은 장기 지구관측 프로그램을 운영하면서 위성자료를 농업 모니터링, 식량안보, 재해

대응 및 농업행정에 활용하는 정책체계를 확대하고 있음. 미국과 유럽은 공공 위성자료의 장기 축적 · 개방과 농업정보 생산을 연계하고 있으며, 일본과 중국도 국가 지구관측 프로그램을 기반으로 농업 · 환경 관측 역량을 강화하고 있음.

- (미국) 미국은 NASA와 USGS가 공동 운영하는 Landsat 프로그램을 통해 1972년부터 육상 지표 관측자료를 축적 · 공개해 왔음. Landsat Next는 2030년 말 발사를 목표로 3기 위성 체계와 관측 빈도 · 공간해상도 · 분광성능 개선을 추진하고 있음. 또한 NASA Harvest와 NASA Acres를 통해 각각 글로벌 식량안보와 미국 농업 현장에서 위성자료의 활용을 지원하고 있음.
- (유럽) 유럽연합은 Copernicus Sentinel 자료를 공개하고 이를 공동농업정책(CAP)의 농업활동 모니터링과 면적 기반 지원사업 관리에 활용하고 있음. 또한 CHIME와 FLEX 등 차세대 임무를 통해 작물 · 토양 특성과 식생 기능에 대한 관측 역량을 강화하고 있음.
- (일본) 일본은 JAXA의 지구환경변동 관측 프로그램을 통해 장기 환경자료를 생산 · 공개하고 있음. GCOM-C의 식생지수와 지표온도 자료 등은 농업 생산환경과 작물 생육 변화를 분석하는 데 활용될 수 있으며, 농업 전용 위성보다 환경관측자료를 농업 응용에 연계하는 정책 방향을 보임.
- (중국) 중국은 Gaofen 시리즈를 중심으로 국가 고해상도 지구관측체계를 구축 · 운영하고 있음. 관련 자료는 농업자원 조사, 작물 수확량 추정, 환경관리 및 재해 대응 등에 활용되며, 국가 주도의 위성 개발과 공공 응용을 연계하는 체계를 형성하고 있음.

○ 공공데이터 개방과 농업행정 활용

- (공공 위성자료 개방) 미국과 유럽은 Landsat과 Copernicus Sentinel 등 공공 지구관측자료를 개방하여 정부 · 연구기관과 민간기업이 농업 모니터링과 서비스 개발에 활용할 수 있도록 하고 있음. 미국 USDA NASS는 위성영상과 농업 기준자료를 결합한 Cropland Data Layer를 매년 생산 · 공개하고 있으며, 이는 공공 원시자료를 정기적인 농업정보 산출물로 전환한 사례임.
- (위성정보의 농업행정 활용) EU는 2023년부터 공동농업정책의 면적 기반 지원사업에 Area Monitoring System을 의무적으로 운영하고 있음. AMS는 Sentinel 자료 등을 이용해 농업활동과 관리 상태를 정기적으로 관측하고, 지원조건 이행 확인과 오류 예방을 지원함. 이는 현장점검을 대체하기보다 점검 대상을 선별하고 행정 절차를 보완하는 정책 도구로 활용되는 사례임.

○ 국제 농업 모니터링 협력체계

- GEOGLAM은 지구관측자료를 활용해 글로벌 · 지역 · 국가 수준의 농업 모니터링 역량을 강

화하는 국제협력 이니셔티브임. Crop Monitor for AMIS는 주요 곡물 생산국의 작황정보를 종합해 시장 투명성 제고를 지원하고, Crop Monitor for Early Warning은 식량안보 취약 지역의 작황 위험과 조기경보 정보를 제공함. 이를 통해 위성자료, 국가별 정보와 전문가 판단을 결합한 국제 작황 모니터링 체계가 운영되고 있음.

2.2 국내 정책 동향

○ 국가 우주개발과 농업 활용정책의 연계

– 국내 농업위성 정책은 「우주개발진흥법」에 따른 국가 위성개발 정책을 기반으로 하며, 생산된 위성정보는 스마트농업, 농업관측, 농지관리 및 재해 대응 등 농업 디지털 전환 정책과 연계됨. 우주항공청은 국가 우주개발과 위성개발을 담당하고, 농림축산식품부 · 농촌진흥청 · 산림청은 농업 · 산림 분야의 활용 수요 발굴과 산출물 생산 · 정책 적용을 담당함.

– (국가 우주개발계획과의 연계) 정부는 「제4차 우주개발진흥기본계획(2023~2027)」을 통해 위성개발, 우주산업 및 활용기반 강화를 추진하고 있음. 농림위성은 차세대중형위성 4호로 개발된 농업 · 산림 관측용 국가 위성으로, 국가 위성개발 사업을 농업 · 산림 정책 수요와 연계한 사례임.

– (우주항공청 출범과 정책 추진체계) 2024년 5월 우주항공청이 출범하면서 국가 우주항공 정책, 연구개발 및 산업육성을 전담하는 추진체계가 마련됨. 2026년 확정 예산은 1조 1,201억 원으로 전년보다 16.1% 증가하였으나, 이는 우주항공청 전체 예산이므로 농업위성 투자 규모와는 구분해 해석할 필요가 있음.

– (농림위성 국가사업) 농림위성은 농촌진흥청 · 우주항공청 · 산림청이 공동 개발한 국내 최초의 농업 · 산림 관측용 국가 위성으로, 2026년 7월 발사에 성공함. 농촌진흥청은 위성영상과 인공지능, 기상 · 공간 · 현장자료를 결합해 재배면적, 작물 생육 및 농경지 변화 정보를 생산하고, 이를 농업관측과 농지관리 등에 활용하는 체계를 구축하고 있음. 농지 이용 실태조사와 공익직불제 이행 점검 등의 적용 가능성도 검토되고 있음.

○ 공공 활용 및 민간 확산 지원체계

– (공공 활용 전담체계) 국립농업과학원 농업위성센터는 농림위성 발사 전부터 관측계획, 영상처리, 농업 산출물 개발 및 활용기술 연구를 수행해 왔으며, 발사 이후에는 자료 품질관리와 농업위성정보 생산 · 제공을 담당하는 공공 활용 거점 역할을 수행함. 향후 정기 산출물의 종류, 갱신주기, 품질기준 및 제공방식을 구체화할 필요가 있음.

– (기관 간 협력체계) 농림위성의 개발과 활용에는 우주항공청, 농촌진흥청, 산림청과 관련 활용기관이 참여하고 있으며, 자료 품질과 공동 활용을 위한 협력도 추진되고 있음. 2026년에

는 정책 · 공공기관, 위성 전문기관, 산업계, 학계와 농업인이 참여하는 농업위성정보 사용자 그룹이 출범함. 향후 위성 운영, 농업 · 산림 산출물 생산, 공동 검 · 보정 및 정책 적용에 관한 기관별 역할과 자료 공유절차를 명확히 할 필요가 있음.

– (민간 활용 기반 조성) 공공 농업위성정보가 안정적으로 생산 · 개방되면 민간기업은 이를 상업 위성자료와 기상 · 토양 · 영농자료에 결합해 농업 분석 및 의사결정 지원 서비스를 개발할 수 있음. 이를 위해 자료 개방 범위와 이용조건, 표준 산출물 · API 제공방식, 민간 실증 절차 및 성능 검증기준을 마련해야 함. 아울러 사용자 교육과 기술문서를 제공하여 공공 산출물이 연구개발과 민간 서비스로 연계될 수 있는 기반을 조성할 필요가 있음.

Ⅴ. 결론 및 제언

1 주요 동향 및 시사점

○ 농업위성 분야는 개별 위성의 성능 향상을 중심으로 한 관측기술 개발단계에서 벗어나, 다중 위성 관측, 표준화된 데이터 처리, 인공지능 기반 농업정보 생산 및 정책 · 산업 서비스가 연계되는 통합 정보체계로 전환되고 있음.

○ 2026년 농림위성 발사를 계기로 국내에서도 농업 · 산림 분야에 특화된 국가 관측자산을 확보하게 되었으며, 국내 민간 지구관측위성, 국제 공공위성 및 상업위성을 연계할 수 있는 기반도 확대되고 있음. 향후에는 개별 위성의 확보 여부보다 장기간 일관된 관측자료를 생산하고, 이를 검증된 농업정보와 의사결정 지원서비스로 전환하는 역량이 중요해질 전망임.

○ 농업위성의 활용가치는 원시영상 자체보다 작물구분도, 생육상태, 재해 영향, 수분 스트레스 및 수확량 전망 등 사용자가 직접 활용할 수 있는 산출물을 얼마나 안정적으로 생산 · 공급하는지에 의해 결정될 가능성이 높음. 이에 따라 관측체계, 분석준비데이터, 알고리즘, 검증체계 및 활용서비스를 하나의 운영체계로 구축하는 접근이 필요함.

1.1 농업위성 활용 확대의 배경과 전환 조건

○ 식량안보 · 기후위기 · 농업인력 감소에 대응하는 상시 관측체계 구축 필요성

– 우리나라는 밀과 옥수수 등 주요 곡물의 수입 의존도가 높아 해외 주요 생산지역의 작황 변화와 국제 공급망 불안에 영향을 받을 가능성이 높으며, 국내외 농업지역을 일관된 기준으로 관측할 수 있는 독자적인 정보 확보 역량이 중요함.

– 기후변화에 따른 가뭄 · 침수 · 고온 · 이상저온 등 농업재해 위험의 증가와 농가인구 감소 · 고령화는 현장조사만으로 신속하고 반복적인 농업정보를 확보하는 데 구조적인 제약으로 작용함.

– 이에 따라 위성 기반 관측은 기존 농업통계와 현장조사를 대체하는 수단이 아니라, 광역 모니터링과 이상지역 선별을 담당하고 현장조사의 효율성과 적시성을 높이는 보완수단으로 활용할 필요가 있음.

○ 국내 공공 · 민간 관측자산을 연계한 다층 관측체계로의 전환

– 농림위성은 국내 농업 · 산림 분야의 독자적인 관측 기반을 제공한다는 점에서 의미가 있으

나, 단일 광학위성만으로는 장마철 구름, 재방문주기, 센서 다양성 및 장기 관측 연속성 문제를 모두 해결하기 어려움.

- 농림위성을 국가 농업관측의 기준 자산으로 활용하면서 Sentinel · Landsat 등 국제 공공위성, SAR 위성, 국내 민간 고해상도 · 초분광 위성 및 필요한 상업자료를 목적별로 결합하는 다층 관측체계가 요구됨.
- 향후 국가 농업위성 정책은 단일 위성의 개발사업이 아니라 후속 위성, 국제자료, 민간자료 및 지상 검증체계를 포함하는 장기 관측 프로그램으로 발전할 필요가 있음.

○ 데이터 생산 중심에서 농업 의사결정 지원 중심으로의 전환

- 글로벌 지구관측 산업에서는 원시영상의 판매 · 제공보다 분석 산출물, 위험지표 및 의사결정 정보를 플랫폼과 API를 통해 제공하는 서비스형 사업모델이 확대되고 있음.
- 농업 분야에서도 위성정보의 실질적인 활용을 위해서는 영상 자체보다 갱신주기, 정확도, 품질정보 및 행정 · 영농 시스템과의 연계성이 중요해지고 있음.
- 국내에서도 위성 자산 확보와 동시에 표준화, 검증, 자동화된 산출물 생산 및 기존 농업정보 체계와의 연계를 함께 추진해야 농업위성의 정책적 · 산업적 활용가치를 높일 수 있음.

➡ 농업위성 활용 확대를 위해서는 **단일 위성 확보를 넘어 공공 · 민간 · 국제 관측자산과 현장정보를 연계한 상시적 · 다층적 관측체계**를 구축하고, 이를 표준화된 농업정보 생산과 **정책 · 영농 의사결정 지원**으로 연결할 필요가 있음.

1.2 기술 · 산업 · 정책 분야의 핵심 시사점

○ 관측체계는 단일 위성 중심에서 장기 · 다원 관측 프로그램으로 전환할 필요가 있음.

- 농림위성의 5m급 공간해상도와 광역 관측능력은 국내 재배면적, 작물 생육 및 농경지 변화의 정기적인 모니터링 기반을 강화할 수 있음.
- 다만 여름철 구름, 장기자료 연속성 및 다양한 농업환경을 고려할 경우 단일 센서와 단일 위성에 의존하는 체계는 운영상 한계가 있음.
- 후속 위성의 개발 여부뿐 아니라 농림위성, 국제 공공위성, 국내 민간위성과 상업자료의 역할을 구분하고 이를 장기간 운영할 수 있는 국가 농업관측 포트폴리오를 마련할 필요가 있음.
- 후속 위성은 기존 자료와의 시계열 연속성을 유지하면서 국내 필지 규모, 재해 대응 및 농업행정 수요를 고려하여 공간해상도, 촬영폭, 재방문주기 및 분광성능을 설계할 필요가 있음.

○ 데이터 경쟁력의 중심은 원시영상 확보에서 분석준비데이터와 품질관리로 이동하고 있음.

- 농업위성 자료를 연구 · 행정 · 산업에서 반복적으로 활용하려면 기관별 개별 전처리가 아니라 공통 기준에 따라 생산된 분석준비데이터가 필요함.

- 농림위성 ARD에는 방사 · 기하 · 대기 보정, 구름 · 그림자 마스킹, 품질 플래그, 메타데이터, 처리이력 및 버전정보를 함께 포함할 필요가 있음.
- 중장기적으로는 농림위성에 한정된 ARD 체계를 넘어 Sentinel · Landsat 및 국내 민간자료와 연계할 수 있는 다중위성 조화 · 교차보정 체계로 확대할 필요가 있음.
- 국가 ARD 체계는 연구기관과 민간기업이 동일한 기준의 자료를 활용하도록 함으로써 중복 전처리를 줄이고 산출물의 비교 가능성과 재현성을 높이는 공공 데이터 인프라 역할을 수행해야 함.

○ 농업 알고리즘은 개별 연구모델에서 반복 생산 가능한 운영형 체계로 전환할 필요가 있음.
- 기존 연구에서는 작물 분류, 수확량 추정, 이상 탐지 및 초해상화 등 다양한 인공지능 모델의 성능 향상이 이루어지고 있으나, 실제 운영에서는 특정 지역이나 연도에서의 높은 정확도보다 지역 · 연도 · 센서가 달라져도 안정적으로 적용할 수 있는 일반화 성능이 중요함.
- 초기에는 작물구분도, 생육단계, 농경지 변화 및 재해 의심지역 등 활용수요가 명확하고 검증이 가능한 기초 산출물을 우선 운영화할 필요가 있음.
- 이후 초분광 · 열적외선 · SIF 및 SAR 자료를 결합하여 수분 스트레스, 생리상태, 병해 가능성, 재해 영향 및 수확량 전망 등 정밀 진단형 산출물로 단계적으로 확대할 필요가 있음.
- 인공지능 기반 갭필링과 초해상화 결과는 실제 관측값과 구분하여 제공하고, 품질 플래그와 불확실성을 함께 관리하는 체계를 마련해야 함.

○ 정책 활용은 자동 판정보다 현장조사와 행정판단을 지원하는 방식으로 단계적으로 확대할 필요가 있음.
- 해외 사례는 위성정보가 현장점검을 전면 대체하기보다 농업 활동을 상시 모니터링하고 점검이 필요한 대상과 지역을 선별하는 방식으로 활용되고 있음을 보여줌.
- 국내에서도 공익직불제, 농지 이용 실태조사, 농작물재해보험 및 농업재해 대응 등에 농림위성 산출물을 우선 보조정보로 활용하고, 충분한 검증을 거쳐 적용 범위를 확대할 필요가 있음.
- 행정 활용을 위해서는 산출물별 정확도, 갱신주기, 적용 가능지역, 오류 발생조건 및 현장 확인 절차를 사전에 규정해야 함.
- 장기적으로는 위성 활용에 따른 현장조사 비용 절감, 조사기간 단축, 재해 대응 속도 향상 및 농업통계 보완 효과를 정량적으로 평가하여 공공투자의 사회경제적 편익을 제시할 필요가 있음.

◘ 향후 농업위성 경쟁력은 개별 위성의 해상도나 센서 성능보다 장**기 · 다원 관측, 표준 데이터, 운영형 알고리즘 및 검증체계**를 구축하고, 이를 **정책 · 산업 활용까지 유기적으로 연계하는 역량**에 의해 좌우될 전망임.

2 정책 및 R&D 전략

2.1 R&D 투자 방향

○ 후속 위성을 포함하는 국가 농업위성 장기 관측 프로그램을 구축해야 함.

– 농림위성의 임무기간 이후에도 관측이 단절되지 않도록 후속 위성의 개발 · 발사 시점과 기존 위성의 운영기간을 연계하는 장기 로드맵을 수립할 필요가 있음.

– 후속 위성의 성능은 단순한 공간해상도 향상보다 재배면적 산정, 필지 단위 작물구분, 농업재해 탐지 및 작황 모니터링 등 주요 활용수요를 기준으로 설정해야 함.

– 공간해상도, 촬영폭, 재방문주기 및 분광성능 간 상충관계를 고려하여 모든 기능을 하나의 위성에 집중하기보다 임무별 위성과 센서를 조합하는 방안을 검토할 필요가 있음.

– 위성체와 탑재체 개발비뿐 아니라 발사, 지상국, 검 · 보정, 데이터 처리, 알고리즘 유지관리 및 산출물 서비스까지 포함하는 전 생애주기 비용을 기준으로 투자계획을 수립해야 함.

○ 다중센서 융합과 차세대 관측기술의 실증 중심 R&D를 확대해야 함.

– 여름철 구름과 장마에 대응하기 위해 농림위성과 SAR 자료를 결합하는 시계열 분석과 갭필링 기술을 주요 실증과제로 추진할 필요가 있음.

– Sentinel · Landsat, 농림위성, 국내 민간 고해상도 · 초분광 위성 및 드론자료를 활용한 다중센서 융합 실증지역을 운영하여 센서별 기여도와 활용효과를 비교할 필요가 있음.

– 초분광 · 열적외선 · SIF는 작물의 생화학적 특성, 표면온도 및 광합성 관련 정보를 제공할 수 있으므로, 국내 후속 위성 적용 이전에 항공 · 드론 · 상업위성자료를 활용한 기술실증과 비용 · 효과 분석을 수행할 필요가 있음.

– 차세대 센서 도입은 센서 자체의 기술적 우수성보다 기존 농림위성으로 생산하기 어려운 농업정보가 무엇인지, 해당 정보가 정책 · 산업 수요와 연결되는지를 기준으로 판단할 필요가 있음.

○ 운영형 농업 산출물 개발에 R&D의 우선순위를 둘 필요가 있음.

– R&D 성과평가를 개별 알고리즘의 정확도 개선뿐 아니라 정기 생산 가능성, 처리시간, 연도 간 안정성, 현장 검증 수준 및 실제 사용자 활용성까지 포함하는 방식으로 확대할 필요가 있음.

– 단기적으로는 작물구분도, 생육단계, 농경지 변화 및 침수 · 가뭄 등 재해 영향 산출물을 핵심 국가 산출물로 선정하고 생산 · 검증 절차를 표준화할 필요가 있음.

– 중장기적으로는 수분 스트레스, 수확량 전망, 병해 가능성, 증발산, 탄소 · 물관리 지표 등 정책 · 영농 의사결정에 직접 활용할 수 있는 고부가가치 산출물로 확대할 필요가 있음.

– 모든 운영형 산출물에는 정확도, 적용범위, 품질 플래그, 불확실성 및 사용상 주의사항을 함께

제공해야 함.

○ 장기 현장검증 데이터를 국가 연구자산으로 축적할 필요가 있음.

– 위성 알고리즘의 일반화 성능을 확보하기 위해서는 위성자료와 동일 시기의 작물종류, 생육단계, 바이오매스, 토양수분, 수량 및 재해 피해자료를 장기간 축적할 필요가 있음.

– 현장자료는 개별 연구과제 종료와 함께 소실되지 않도록 국가 공통 포맷과 품질기준에 따라 관리하고 후속 연구에서 재사용할 수 있도록 해야 함.

– 논 · 밭 · 시설재배, 내륙 · 해안 · 고지대 등 다양한 농업환경을 포함하는 장기 검증거점을 구축하여 알고리즘의 지역 간 전이성과 연도 간 안정성을 평가해야 함.

◘ 농업위성 R&D는 후속 위성 개발에 한정하지 않고 **다중센서 융합, 차세대 관측기술, 운영형 농업 산출물 및 장기 현장검증 데이터**를 함께 확보하여 연구성과를 실제 활용으로 연결하는 **전주기 연구체계**로 확대할 필요가 있음.

2.2 기술 확산 및 산업화 전략

○ 농업위성센터를 국가 농업위성 데이터 · 서비스 허브로 발전시킬 필요가 있음.

– 농업위성센터는 농림위성 원시자료의 관리에 그치지 않고 ARD 생산, 품질관리, 농업 산출물 생성, 검증 및 사용자 제공을 연결하는 운영기관으로 기능할 필요가 있음.

– 이용자가 원시영상을 직접 처리하지 않아도 작물구분도, 생육상태, 농경지 변화 및 재해 관련 정보를 이용할 수 있도록 표준 산출물 중심의 서비스체계를 구축해야 함.

– 연구기관 · 기업 · 지방자치단체가 자체 시스템에서 농업위성정보를 사용할 수 있도록 표준 API와 기계판독 가능한 자료형식을 제공할 필요가 있음.

– 산출물마다 생산주기, 기준일, 공간해상도, 정확도, 품질상태 및 알고리즘 버전을 함께 제공하여 사용자 스스로 활용 가능성과 한계를 판단할 수 있도록 해야 함.

○ 공공과 민간의 역할을 데이터 기반과 응용서비스로 구분하여 산업 생태계를 조성할 필요가 있음.

– 공공 부문은 장기적이고 안정적인 관측, 기준 ARD, 기초 농업 산출물, 검증자료 및 공통 표준을 제공하는 기반 역할을 담당할 필요가 있음.

– 민간 부문은 공공자료에 고해상도 · 고빈도 상업위성, 기상 · 토양 · 농기계 · 영농이력 자료를 결합하여 농가 · 유통 · 보험 · 금융 등 수요자별 응용서비스를 개발하는 방향으로 역할을 확대할 필요가 있음.

– 공공기관이 민간과 동일한 최종 서비스를 직접 공급하기보다 민간기업이 새로운 서비스를 개발할 수 있는 데이터 · API · 실증환경을 제공하는 방식의 생태계 조성이 필요함.

– 민간기업의 기술검증을 위해 실제 농업지역과 행정업무를 대상으로 한 공공-민간 공동 실증사업을 운영하고, 성능검증 결과를 후속 조달과 서비스 도입에 활용할 필요가 있음.

○ 농업행정 적용은 업무별 실증-검증-제도화 단계를 거쳐 확대해야 함.

– 공익직불제에서는 위성정보를 이용하여 작물 재배와 농지 이용의 변화가 큰 필지를 우선 선별하고 현장확인 대상을 효율적으로 배분하는 방식으로 적용할 수 있음.

– 농지 이용 실태조사에서는 장기간 방치, 비농업적 이용 및 토지피복 변화가 의심되는 지역을 주기적으로 탐지하여 조사 우선순위 설정에 활용할 수 있음.

– 농작물재해보험 및 재해 대응에서는 침수 · 가뭄 · 태풍 등 재해 발생 직후 피해 의심지역의 공간적 범위를 산정하고 현장조사와 손해평가의 우선순위 설정을 지원할 수 있음.

– 행정 적용 초기에는 위성 결과를 자동 판정자료로 사용하기보다 현장조사를 보완하는 증거자료로 활용하고, 정확도와 오류 사례가 충분히 축적된 산출물부터 단계적으로 제도화할 필요가 있음.

○ 식량안보와 해외 작황 모니터링을 국가 서비스 영역으로 확대할 필요가 있음.

– 국내 농업 모니터링에서 축적한 분석체계를 북한과 해외 주요 곡물 생산지역에 단계적으로 확대할 필요가 있음.

– 해외지역 분석에서는 국내 알고리즘을 그대로 적용하기보다 작물력, 품종, 기후 및 영농방식 차이를 고려한 지역 적응형 모델을 개발해야 함.

– 주요 수입곡물 생산지역의 식생상태, 토양수분, 가뭄 및 작황 이상정보를 국제 곡물가격 · 무역 · 기상정보와 연계하여 식량안보 위험 모니터링 체계로 발전시킬 필요가 있음.

– 위성 기반 해외 작황정보는 기존 국제기관 정보의 단순 재가공이 아니라 국내 관측 · 분석 역량에 기반한 독립적인 판단자료로 축적할 필요가 있음.

➡ 농업위성 기술의 확산과 산업화를 위해서는 **공공이 표준 데이터 · 기초 산출물 · 실증 기반을 안정적으로 제공**하고, 민간이 이를 활용하여 **농업행정 · 재해대응 · 식량안보 · 정밀농업 등 수요자 중심 서비스**로 확장할 수 있는 생태계를 조성할 필요가 있음.

2.3 기반 구축 및 제도 개선

○ 국가 농업위성 ARD 표준과 보정 · 검증체계를 제도화할 필요가 있음.

– 농림위성 자료의 방사 · 기하 · 대기 보정, 구름 · 그림자 마스킹, 좌표체계, 품질 플래그, 메타데이터 및 버전관리 기준을 국가 공통규격으로 마련해야 함.

– 향후 국내외 다중위성자료를 결합할 수 있도록 국제적으로 활용되는 ARD 및 메타데이터 기준과의 상호운용성을 확보해야 함.

- 위성 센서의 검 · 보정과 농업 산출물의 검증을 구분하여 운영하고, 각각의 기준자료와 검증 절차를 명확히 할 필요가 있음.
- 플럭스타워, 지상 분광센서, 토양수분센서, 드론 · 항공영상 및 현장조사를 연계한 국가 농업위성 검증네트워크를 구축해야 함.

○ 농업위성 산출물의 행정 적용기준과 책임체계를 마련해야 함.
- 산출물별로 적용 가능한 업무, 요구 정확도, 최소 갱신주기, 현장 확인이 필요한 조건 및 결과 활용범위를 사전에 정의할 필요가 있음.
- 위성 산출물을 농업경영체, 필지 및 행정자료와 결합할 경우 접근권한, 이용목적, 보유기간, 제3자 제공 및 결과 검증절차를 명확히 해야 함.
- 위성정보에 오류나 결측이 발생했을 때 최종 행정판정을 자동화된 분석결과에 의존하지 않도록 현장확인과 담당기관의 최종 판단절차를 유지할 필요가 있음.
- 입력자료, 분석모델, 알고리즘 버전, 처리일자, 품질 플래그 및 불확실성을 기록하여 행정결과의 추적 가능성과 재현성을 확보해야 함.

○ 농업위성 R&D와 정책 활용을 연결하는 사용자 공동설계 체계를 마련할 필요가 있음.
- 연구과제 기획단계부터 농업행정기관, 농촌지도기관, 농업인, 연구기관 및 민간기업이 필요한 정보의 공간단위, 갱신주기 및 정확도 기준을 공동으로 설정할 필요가 있음.
- 기술개발 종료 후 활용처를 찾는 방식보다 실제 업무문제를 먼저 정의하고 이에 필요한 관측자료와 알고리즘을 개발하는 수요기반 R&D 체계로 전환할 필요가 있음.
- 농업위성정보 사용자그룹을 기술 소개 중심의 협의체가 아니라 산출물 요구사항 수렴, 시범서비스 평가 및 개선사항 환류를 담당하는 상시 사용자 협력체계로 운영할 필요가 있음.
- 시범사업에서 확인된 정확도, 업무시간 절감 및 비용효과를 정량적으로 평가하여 후속 연구개발과 제도 개선에 반영해야 함.

○ 융합형 전문인력과 운영인력을 동시에 양성할 필요가 있음.
- 농업위성 활용에는 원격탐사, 공간정보, 인공지능, 농학, 통계 및 정책분석을 연결할 수 있는 융합형 전문인력이 필요함.
- 대학과 연구기관에서는 농업 원격탐사, 위성 데이터과학 및 농업 AI를 연계한 교육과정을 확대하고, 실제 위성 · 드론 · 현장자료를 활용한 실습 중심 교육을 강화할 필요가 있음.
- 농업위성센터와 관련 연구기관에는 연구개발 인력뿐 아니라 데이터 엔지니어링, 검 · 보정, 품질관리 및 서비스 운영을 담당하는 전문인력을 지속적으로 확보할 필요가 있음.
- 농업 담당 공무원과 농촌지도사에게는 위성영상 해석 자체보다 산출물의 의미, 정확도, 한계 및 현장 확인이 필요한 조건을 중심으로 한 활용교육을 제공할 필요가 있음.

○ 국제 공동검증과 농업 모니터링 협력을 실증 중심으로 확대할 필요가 있음.

– GEOGLAM, NASA Harvest 및 WorldCereal 등 국제 농업 모니터링 활동과 연계하여 국내 농업위성 알고리즘과 산출물의 국제 비교 · 검증 기회를 확대해야 함.

– 국제협력은 회의와 정보교류에 그치지 않고 공동 검증지역, 공통 참조자료, 동일 평가기준 및 알고리즘 비교실험을 포함하는 방식으로 추진할 필요가 있음.

– 북한 및 해외 주요 곡물 생산지역을 대상으로 Sentinel · Landsat 등 국제 공공자료와 국내 알고리즘을 함께 적용하여 지역 간 일반화 성능을 평가할 필요가 있음.

– 국제 공동검증을 통해 국내 농업위성 산출물의 신뢰성과 상호운용성을 확보하고, 장기적으로 국내 농업위성 분석기술과 서비스의 해외 적용 기반을 마련할 필요가 있음.

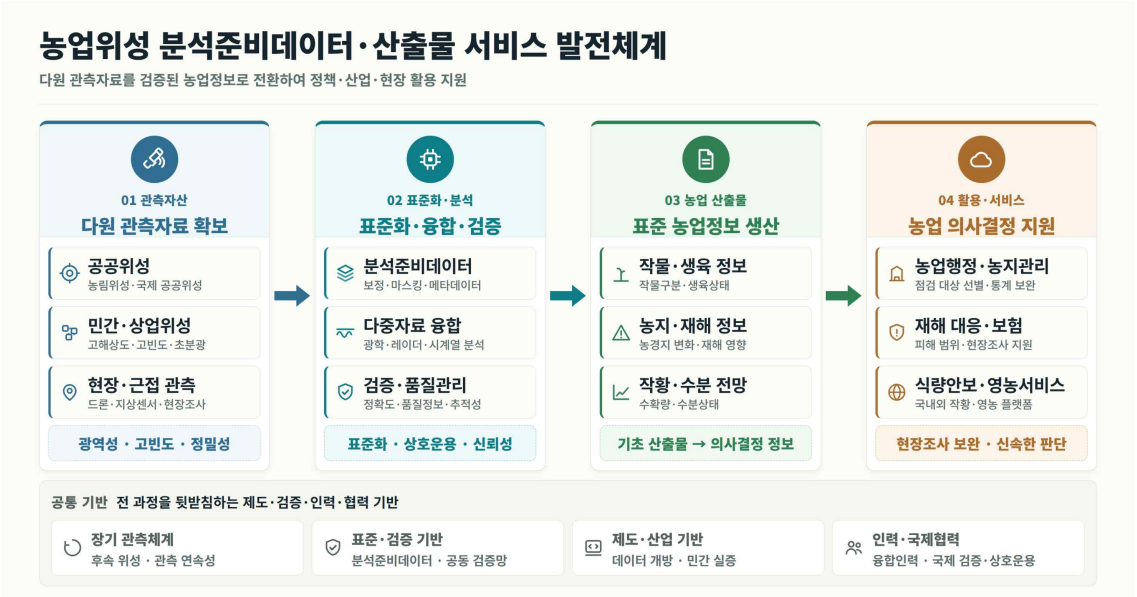


그림 10. 농업위성 분석준비데이터 · 산출물 서비스 발전체계

➡ 농업위성의 안정적이고 지속적인 활용을 위해서는 **국가 ARD 표준과 검증네트워크, 행정 적용 기준 및 데이터 거버넌스**를 확립하고, 이를 **융합 전문인력 양성과 국제 공동검증 · 상호운용 체계**로 뒷받침하는 제도적 기반을 구축해야 함.

참고문헌

○ 나라스페이스테크놀로지. (2023). 회사 소개서. “초소형 광학위성 옵저버(Observer)-1A”.

○ 농림축산식품부. (2024). 농림위성으로 농작물 관측과 기후위기 대응 역량 높인다 [보도자료, 2024.9.24.].

○ 농림축산식품부. (2025). 제1차 스마트농업 육성 기본계획(2025~2029).

○ 농림축산식품부. (2026). 양정자료. “식량자급률(사료용 제외) – 서류 건체중 기준”.
○ 농촌진흥청. (2024). "우주 농업 시대 활짝" 농촌진흥청 농업위성센터 출범 [보도자료].
○ 신선미, “누리호 5차 발사 · 제2우주센터…우주강국 프로젝트 본격화”, 연합뉴스, 2026.7.16., https://www.yna.co.kr/view/AKR20260716011100017(접속일: 2026.7.24.).
○ 유엔식량농업기구(FAO). (2025). The Impact of Disasters on Agriculture and Food Security 2025: Digital solutions for reducing risks and impacts. https://doi.org/10.4060/cd7185en
○ 조승현. (2025). 농업부문 위성영상의 활용 사례와 농협의 활용 전략. CEO FOCUS, 472호. 농협미래전략연구소.
○ 통계청. (2025). 2024년 농림어업조사 결과.
○ 한컴인스페이스. (2026). PRODUCTS, Sejong: Commercial Satellite.
○ Future Market Insights. (last update: 2026.6.13.). Commercial Satellite Imaging Market. https://www.futuremarketinsights.com/reports/commercial-satellite-imaging-market (접속일: 2026.7.21.).
○ Global Market Insights. (last update: 2025.7.). Satellite-Based Earth Observation Market Size & Share 2025-2034. https://www.gminsights.com/industry-analysis/satellite-based- earth-observation-market (접속일: 2026.7.21.).
○ IMARC Group. (last update: 2026.2.17.). Global Precision Agriculture Market to Reach USD 22.5 Billion by 2034. https://www.imarcgroup.com/global-precision-agriculture-market (접속일: 2026.7.21.).
○ InsightAce Analytic. (last update: 2025.4.23.). Satellite Imaging for Agriculture Market. https://www.insightaceanalytic.com/report/satellite-imaging-for-agriculture-market/1851 (접속일: 2026.7.21.).
○ Lucintel. (last update: 2026.5.). Satellite Imaging for the Global Agriculture Market Report: Trends, Forecast and Competitive Analysis to 2030. https://www.lucintel.com/satellite-imaging-for-agriculture-market.aspx (접속일: 2026.7.21.).
○ Straits Research. (last update: 2026.6.3.). Satellite Earth Observation Market. https://straitsresearch.com/report/satellite-earth-observation-market (접속일: 2026.7.21.).
○ Boryan, C., Yang, Z., Mueller, R., & Craig, M. (2011). Monitoring US agriculture: The US Department of Agriculture, National Agricultural Statistics Service, Cropland Data Layer program. Geocarto International, 26(5), 341-358.

○ Cawse-Nicholson, K., Townsend, P. A., Schimel, D., Assiri, A. M., Blake, P. L., Buongiorno, M. F., ... & SBG Algorithms Working Group. (2021). NASA's surface biology and geology designated observable: A perspective on surface imaging algorithms. Remote Sensing of Environment, 257, 112349.

○ Chabrillat, S., Foerster, S., Segl, K., Beamish, A., Brell, M., Asadzadeh, S., ... & Fischer, S. (2024). The EnMAP spaceborne imaging spectroscopy mission: Initial scientific results two years after launch. Remote Sensing of Environment, 315, 114379.

○ Chen, Y., Cao, R., Liu, S., Peng, L., Chen, X., & Chen, J. (2024). A new deep learning-based model for reconstructing high-quality NDVI time-series data in heavily cloudy areas: Fusion of Sentinel 1 and 2 data. International Journal of Digital Earth, 17(1), e2407941.

○ Choi, W., Ryu, Y., Kimm, H., Belwalkar, A., Poblete, T., Yeon, I., ... & Zarco-Tejada, P. J. (2026). Detecting plant physiological changes under stress using sun-induced chlorophyll fluorescence from mid-spectral resolution imagery. Remote Sensing of Environment, 332, 115085.

○ Cogliati, S., Verhoef, W., Kraft, S., Sabater, N., Alonso, L., Vicent, J., Moreno, J., Drusch, M., & Colombo, R. (2015). Retrieval of sun-induced fluorescence using advanced spectral fitting methods. Remote Sensing of Environment, 169, 344-357.

○ Delegido, J., Verrelst, J., Meza, C. M., Rivera, J. P., Alonso, L., & Moreno, J. (2013). A red-edge spectral index for remote sensing estimation of green LAI over agroecosystems. European Journal of Agronomy, 46, 42-52.

○ Jin, Z., Azzari, G., You, C., Di Tommaso, S., Aston, S., Burke, M., & Lobell, D. B. (2019). Smallholder maize area and yield mapping at national scales with Google Earth Engine. Remote Sensing of Environment, 228, 115-128.

○ Kim, J., Ryu, Y., Dechant, B., Lee, H., Kim, H. S., Kornfeld, A., & Berry, J. A. (2021). Solar-induced chlorophyll fluorescence is non-linearly related to canopy photosynthesis in a temperate evergreen needleleaf forest during the fall transition. Remote Sensing of Environment, 258, 112362.

○ Kim, J., Ryu, Y., & Dechant, B. (2022). Development of a filter-based near-surface remote sensing system to retrieve far-red sun-induced chlorophyll fluorescence. Remote Sensing of Environment, 283, 113311.

○ Kong, J., Ryu, Y., Liu, J., Dechant, B., Rey-Sanchez, C., Shortt, R., Szutu, D., Verfaillie,

J., Houborg, R., & Baldocchi, D. D. (2022). Matching high resolution satellite data and flux tower footprints improves their agreement in photosynthesis estimates. Agricultural and Forest Meteorology, 316, 108878.

○ Kong, J., Ryu, Y., Jeong, S., Zhong, Z., Choi, W., Kim, J., Lee, K., Lim, J., Jang, K., Chun, J., Kim, K.-M., & Houborg, R. (2023). Super resolution of historic Landsat imagery using a dual generative adversarial network (GAN) model with CubeSat constellation imagery for spatially enhanced long-term vegetation monitoring. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 200, 1-23.

○ Kussul, N., Lavreniuk, M., Skakun, S., & Shelestov, A. (2017). Deep learning classification of land cover and crop types using remote sensing data. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 14(5), 778-782.

○ Lee, S., Kim, S. W., Hwang, S. O., Choi, J. N., Ahn, K. B., & Kim, J. (2020). Comparative analysis of the cloud behavior over inland and coastal regions within single climate characteristics. Atmosphere, 11(12), 1316.

○ Lim, J., Cha, S., Won, M., Kim, J., Park, J., Ryu, Y., & Lee, W. K. (2022). Design of calibration and validation area for forestry vegetation index from CAS500-4. Korean Journal of Remote Sensing, 38(3), 311-326.

○ Lobell, D. B., Deines, J. M., & Tommaso, S. D. (2020). Changes in the drought sensitivity of US maize yields. Nature Food, 1(11), 729-735.

○ Mohammed, G. H., Colombo, R., Middleton, E. M., Rascher, U., van der Tol, C., Nedbal, L., … & Zarco-Tejada, P. J. (2019). Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) in vegetation: 50 years of progress. Remote Sensing of Environment, 231, 111177.

○ Potapov, P., Turubanova, S., Hansen, M. C., Tyukavina, A., Zalles, V., Khan, A., … & Cortez, J. (2022). Global maps of cropland extent and change show accelerated cropland expansion in the twenty-first century. Nature Food, 3(1), 19-28.

○ Roy, D. P., Wulder, M. A., Gorelick, N., Hansen, M., Healey, S., Hostert, P., … Zhu, Z. (2026). The next Landsat: Mission turning point? Remote Sensing of Environment, 332, 115087.

○ Schneider, M., Schelte, T., Schmitz, F., & Körner, M. (2023). EuroCrops: The largest harmonized open crop dataset across the European Union. Scientific Data, 10(1), 612.

○ Shao, Z., Cai, J., Fu, P., Hu, L., & Liu, T. (2019). Deep learning-based fusion of

Landsat-8 and Sentinel-2 images for a harmonized surface reflectance product. Remote Sensing of Environment, 235, 111425.

○ van der Velde, M., Biavetti, I., El-Aydam, M., Niemeyer, S., Santini, F., & van den Berg, M. (2019). Use and relevance of European Union crop monitoring and yield forecasts. Agricultural Systems, 168, 224-230.

○ Van Tricht, K., Degerickx, J., Gilliams, S., Zanaga, D., Battude, M., Grosu, A., … Szantoi, Z. (2023). WorldCereal: A dynamic open-source system for global-scale, seasonal, and reproducible crop and irrigation mapping. Earth System Science Data, 15(12), 5491-5515.

○ Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. Journal of Sensors, 2017, Article ID 1353691.

○ Yan, Y., & Ryu, Y. (2021). Exploring Google Street View with deep learning for crop type mapping. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 171, 278-296.

○ Ye, B. Y., Jung, E., Shin, S., & Lee, G. (2020). Statistical characteristics of cloud occurrence and vertical structure observed by a ground-based Ka-band cloud radar in South Korea. Remote Sensing, 12(14), 2242.

○ Zaheer, S. A., Ryu, Y., Lee, J., Zhong, Z., & Lee, K. (2023). In-season wall-to-wall crop-type mapping using ensemble of image segmentation models. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 61, 1-11.

○ Zhu, X. X., Tuia, D., Mou, L., Xia, G.-S., Zhang, L., Xu, F., & Fraundorfer, F. (2017). Deep learning in remote sensing: A comprehensive review and list of resources. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 5(4), 8-36.

2. 인공지능(AI)·농업로봇

데이터-인공지능-로봇이 연결하는 농작업 구조 전환 기술

김학진(한국농업기계학회, 서울대학교) / **김태형**(한국농업기계학회, 서울대학교)

Ⅰ. 서론

1 기술분야 개요

○ 인공지능(AI) · 농업로봇의 개념

– 인공지능(AI) · 농업로봇은 작물과 농업환경의 상태를 감지하는 센서 · 비전 기술, 수집된 데이터를 분석하여 농작업을 판단하는 인공지능 기술, 그리고 판단 결과를 실제 작업으로 수행하는 자율주행 · 로봇 · 작업기 제어 기술을 결합하여 농작업의 인지 · 판단 · 실행을 자동화하는 융합 기술임.

– 농업은 제조업과 달리 날씨, 토양, 작물 생육과 작업환경이 지속적으로 변화하는 비정형 환경이므로, 사전에 정해진 동작을 반복하는 단순 자동화를 넘어 이러한 변동성을 인지하고 상황에 따라 작업을 조정할 수 있는 고도화된 자율 지능기술이 요구됨.

– 농업 AI는 기상, 토양, 작물 생육, 영상, 기계 · 장비 등의 데이터를 수집 · 분석하여 “무엇을(what), 언제(when), 어디에(where), 얼마나(how much)” 수행할 것인지를 결정하는 농업 의사결정 기술로서, 수확량 · 품질 · 비용 · 환경부하 등을 종합적으로 고려하여 농작업 계획과 투입조건을 결정하는 방향으로 발전하고 있음.

– 농업로봇은 이러한 인지와 판단 결과를 실제 농작업으로 연결하는 실행수단으로서, 자율주행 농기계와 파종 · 제초 · 방제 · 수확 · 운반 로봇 등 다양한 형태로 적용되고 있으며, 농업

AI와 결합하여 주변 환경과 작업상태에 따라 주행과 작업을 능동적으로 수행하는 지능형 농작업 시스템으로 발전하고 있음.

○ 인공지능(AI) · 농업로봇의 기술적 특성

– (인지 · 판단 · 제어 통합성) 카메라, LiDAR, GNSS와 각종 농업센서를 이용하여 작물 · 환경 · 장비 상태를 인지하고, AI가 작업전략과 조건을 판단한 후 자율주행 플랫폼과 작업기를 제어하는 인지-판단-제어의 통합구조를 가짐.

– (환경 적응성) 날씨, 토양, 생육상태, 지형과 장애물 등 지속적으로 변화하는 농업환경을 실시간으로 인식하고, 작업계획 · 경로 · 속도 · 투입량 등을 상황에 따라 조정할 수 있음.

– (정밀성 · 자율성) 작물과 잡초, 병해 부위와 토양상태 등을 개체 또는 위치 단위로 구분하고 정밀 주행 및 작업기 제어를 수행함으로써 작업자의 지속적인 개입을 줄이면서 농작업의 정확성과 일관성을 높일 수 있음.

– (데이터 순환 · 학습성) AI · 농업로봇은 개별 알고리즘이나 장비에 그치지 않고 데이터 수집-의사결정-로봇 실행-작업결과 기록이 순환하는 폐쇄형(Closed-Loop) 시스템을 형성하며, 작업 과정에서 생성된 데이터는 다시 AI 학습과 운영 최적화에 활용될 수 있음.

○ 농업 내 역할 및 중요성

– (농작업 자동화 · 자율화) 파종 · 이식 · 제초 · 방제 · 수확 · 운반 등 다양한 농작업에서 환경과 작업상태를 인식하고 작업을 스스로 수행함으로써 인력 의존도를 낮추고 농작업의 자율화를 지원함.

– (농업 의사결정 지원) 기상 · 토양 · 생육 · 영상 · 장비 등의 데이터를 종합적으로 분석하여 작업 시기, 위치, 투입량과 작업방법을 결정함으로써 경험 중심의 농작업을 데이터 기반의 의사결정 체계로 전환할 수 있음.

– (정밀농업 지원) 작물과 토양의 위치별 상태를 인식하고 필요한 지점에 필요한 양의 종자 · 비료 · 농약 · 물 등을 투입함으로써 작업 누락과 중복을 줄이고 농자재 이용효율과 작업 정밀도를 높일 수 있음.

– (노동력 · 안전 문제 대응) 반복적이고 노동강도가 높거나 위험한 농작업을 대체 · 보완하고, 사람과 장애물의 인지 및 안전제어를 통해 농업인의 작업 부담과 안전사고 위험을 줄이는 데 기여할 수 있음.

– (농업 데이터 기반 구축) 농업로봇의 작업 과정에서 위치, 시간, 경로, 투입량, 장비상태와 작업결과를 지속적으로 수집 · 기록함으로써 생산이력 관리, 농기계 유지보수, 농장경영 및 AI 학습을 위한 현장 데이터 기반을 구축할 수 있음.

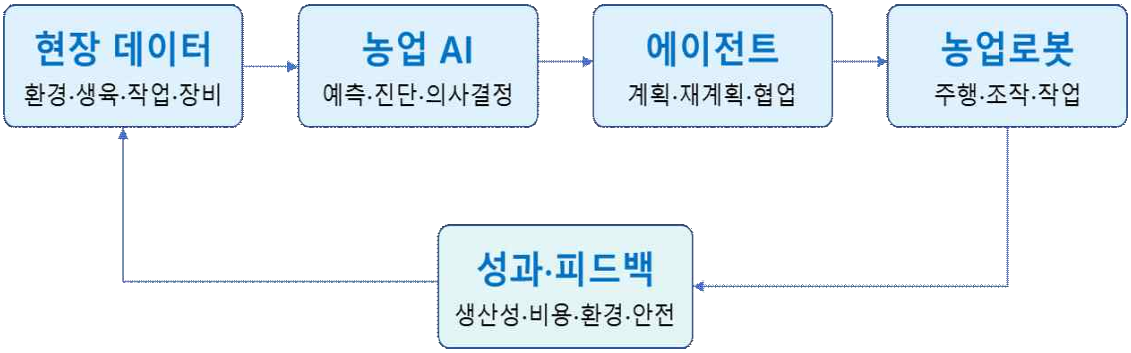


그림 1. 데이터–판단–실행–학습이 순환하는 AI · 농업로봇 기술체계

2 기술 도입 배경

2.1 농업환경 변화

○ 농업 노동력 감소와 고령화

– 농가 인구 감소와 고령화로 농업 생산현장에서 숙련 노동력을 안정적으로 확보하기 어려워지고 있으며, 파종 · 방제 · 수확과 같이 적기에 수행해야 하는 농작업의 인력 의존도를 낮출 필요성이 커지고 있음.

– 농작업은 장시간 반복 작업, 중량물 취급, 농약 노출, 농기계 사고 등 작업자의 안전과 건강에 영향을 줄 수 있는 위험요인을 포함하고 있어, 반복적이고 위험한 작업을 기계와 로봇으로 대체하거나 보조할 필요가 있음.

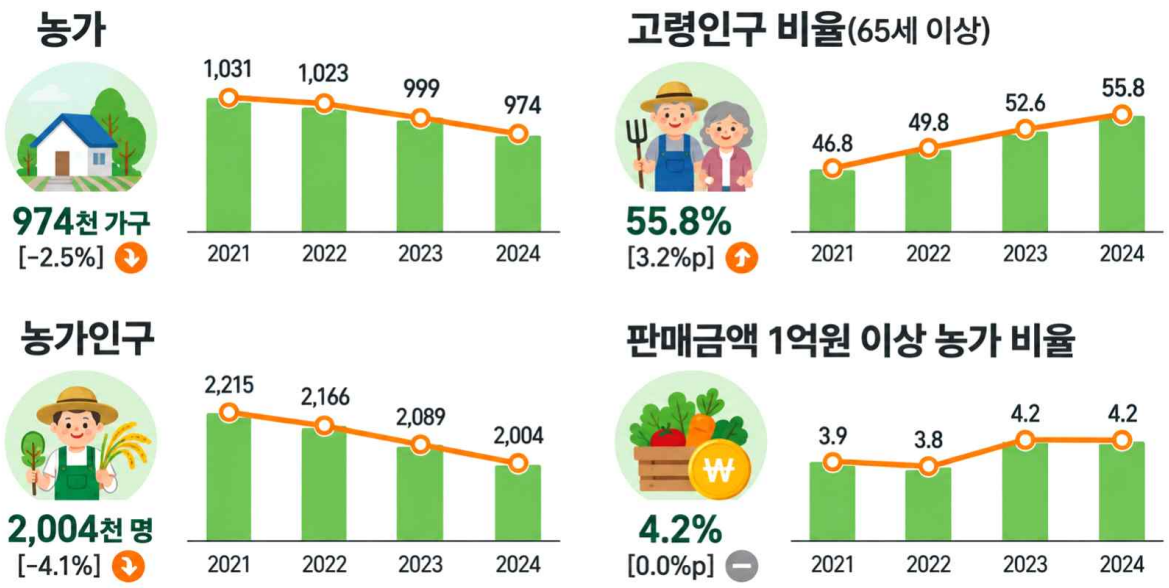


그림 2. 국내 농가 인구감소 및 고령화 추이, 2021–2024

– 기존 농업 기계화가 주로 작업자의 육체적 부담을 줄이는 데 초점을 두었다면, 향후에는 주변 환경과 작물 상태를 인지하고 작업을 판단하여 스스로 수행할 수 있는 지능형 자동화로의 전환이 요구됨.

– 2024년 기준 우리나라의 식량자급률은 약 47.9%이며, 쌀 자급률은 96.0%로 안정적이나 밀(1.5%)과 옥수수(4.3%) 등 주요 곡물은 수입 의존도가 매우 높음. 특히 사료용을 포함한 곡물 수급까지 고려하면 국제 생산량과 가격 변동에 대한 구조적 취약성이 더욱 커짐.

○ 기후변화와 농업 생산 불확실성 확대

– 기온 상승, 강수 변동과 극한기상의 증가는 작부시기, 토양 수분, 작물 생육, 병해충 발생 및 농작업 가능시간의 변동성을 확대하고 있음.

– 동일한 작목과 재배방식에서도 토양 · 기상 · 생육 조건에 따라 필요한 농작업의 시기와 투입량이 달라질 수 있어, 사전에 정해진 일정과 작업조건만을 반복하는 기존 방식으로는 변화하는 농업환경에 효과적으로 대응하기 어려움.

– 특히 돌발 강우, 고온, 토양 수분 변화와 병해충 발생과 같이 단기간에 변화하는 조건에 대응하기 위해서는 현장 데이터를 실시간으로 수집하고, 이를 바탕으로 작업 시기 · 위치 · 방법을 조정할 수 있는 적응형 농작업 체계가 필요함.

– 인공지능(AI)은 기상 · 토양 · 작물생육 · 장비상태 등의 데이터를 분석하여 작업 조건을 판단하고, 농업로봇은 이를 현장에서 수행함으로써 농업 생산환경의 변동성에 대응할 수 있는 수단이 될 수 있음.

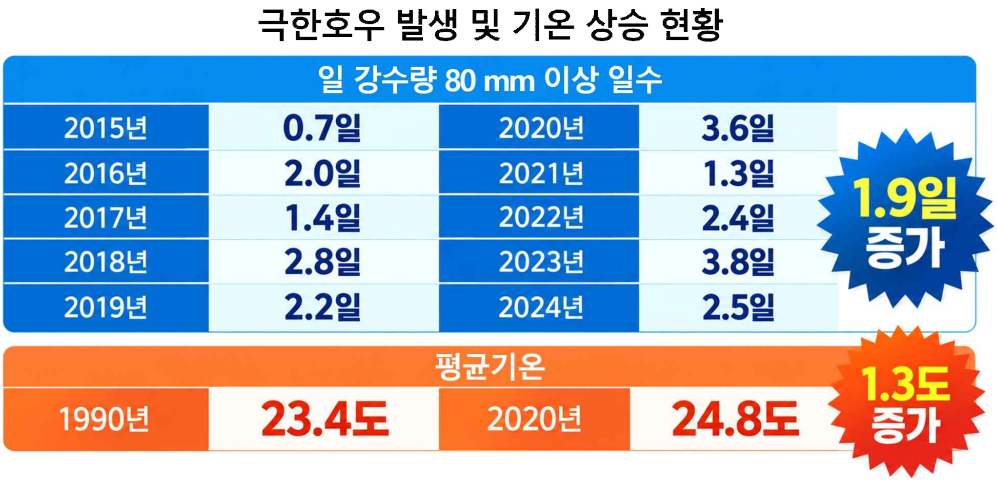


그림 3. 국내 극한호우 발생('15–'24) 및 기온 상승('90, '20) 현황

○ 소규모 · 다필지 농업구조와 농작업 복잡성

– 국내 노지농업은 소규모 필지가 넓게 분산되어 있고, 비정형 경계와 다양한 작목 · 재배양식

이 공존하는 특징을 가지고 있어 대규모 단일 필지를 전제로 한 단순 자동화 기술을 적용하는 데 한계가 있음.

- 필지마다 경계 형상, 농로, 경사, 작물 배열과 작업조건이 다르고, 농작업 과정에서는 사람 · 농기계 · 장애물과 주변 환경을 동시에 고려해야 하므로 정형화된 산업환경보다 높은 수준의 환경 인지와 작업 판단 기술이 요구됨.
- 대형 · 고가 농기계를 개별 농가에 보급하는 방식은 낮은 연간 가동률과 높은 투자비 부담을 발생시킬 수 있으며, 대형 장비의 반복 통행은 토양 압밀 등 농업환경에 추가적인 부담을 줄 수 있음.
- 이에 따라 국내 농업구조에 적합한 소형 · 경량 로봇, 다목적 작업 플랫폼, 다수 로봇의 협업 운영과 농작업 수탁서비스 등 다양한 형태의 농업로봇 활용모델을 검토할 필요가 있음.



그림 4. 국내 0.5 ha 미만 소농 비중 변화 추이, 2005–2024

○ 정밀농업 · 환경관리 및 농업 데이터 활용 요구 확대

- 농약 · 비료 · 물 · 에너지와 같은 농업 투입재의 효율적 이용과 환경부하 저감에 대한 요구가 증가하면서, 농경지 전체에 동일하게 투입하는 방식에서 위치별 작물 · 토양 상태에 따라 필요한 양을 선택적으로 투입하는 정밀농업으로의 전환이 요구되고 있음.
- 작물과 잡초, 병해 부위, 생육상태와 토양조건 등을 개체 또는 위치 단위로 인식하고 작업기를 정밀하게 제어할 경우 농약 · 비료의 과잉 투입과 작업 누락을 줄이고 자원 이용효율을 높일 수 있음.
- 또한 농작업의 위치 · 시간 · 경로 · 투입량 · 장비상태와 작업결과를 디지털 데이터로 기록할 경우 생산이력 관리, 농기계 유지보수, 품질관리와 농작업 서비스 관리 등에 활용할 수 있음.

– 그러나 현재 농업 데이터는 농가, 농기계 제조사와 서비스 플랫폼별로 분산되어 있고 장비와 시스템 간 데이터 연계가 제한적인 경우가 많아, AI · 농업로봇 기술의 확산과 함께 데이터 표준화, 상호운용성 및 유지관리 체계의 구축이 요구됨.

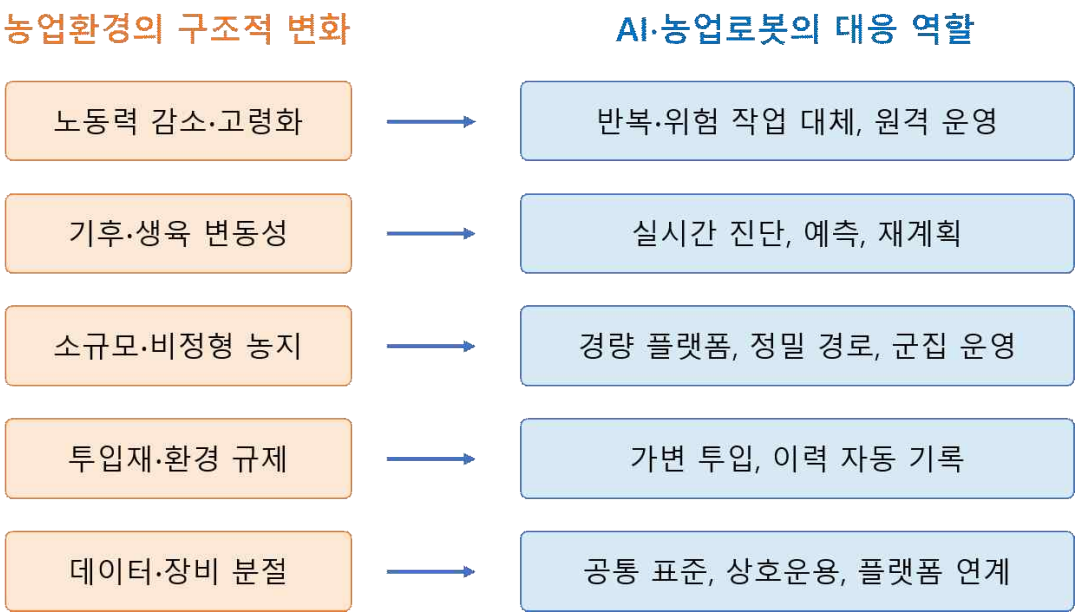


그림 5. 농업환경의 변화에 따른 AI · 농업로봇 기술의 역할

2.2 기술의 필요성 및 기대효과

○ 기존 농작업 및 자동화 방식의 한계

– 기존 농업기계화는 농작업의 동력화와 작업능률 향상에 크게 기여하였으나, 대부분 작업자가 주변 환경과 작물 상태를 직접 인지하고 작업 시기 · 경로 · 작업조건을 판단하여 농기계를 조작하는 구조로 이루어져 있음.

– 농업은 날씨 · 토양 · 작물 생육 · 지형 · 작업 대상 등이 지속적으로 변화하는 비정형 환경이기 때문에 미리 설정된 규칙과 경로만을 반복하는 기존 자동화 방식으로는 다양한 현장조건에 대응하는 데 한계가 있음.

– 특히 노지와 과수원에서는 사람, 농로, 논둑, 작물, 장애물과 작업기 상태 등 다양한 요소가 동시에 변화하므로 주변 환경을 인지하고 상황에 따라 작업계획과 제어조건을 변경할 수 있는 지능형 농작업 기술이 필요함.

– 이에 따라 센서와 비전을 이용한 환경 · 작물 인지, AI 기반 작업계획과 의사결정, 자율주행 플랫폼과 작업기의 정밀 제어, 작업결과의 기록과 학습이 연계되는 폐쇄형(Closed-Loop) 농작업 체계로의 전환이 요구됨.

○ AI · 농업로봇의 주요 활용 영역

– (자율 농작업) 파종 · 이식 · 제초 · 방제 · 수확 · 운반 등 주요 농작업에서 주변 환경과 작업 상태를 인식하고 주행과 작업을 자동으로 수행하여 작업자의 개입을 줄일 수 있음.

– (정밀 작업) 작물 · 잡초 · 병해 부위와 토양 상태 등을 인식하여 필요한 위치에 종자 · 비료 · 농약 · 물 등을 정밀하게 투입하고 작업 누락과 중복을 줄일 수 있음.

– (작업계획 및 운영 최적화) 기상 · 토양 · 생육 · 장비 정보를 종합하여 작업 시기, 순서, 경로와 작업조건을 결정하고 변화하는 현장상황에 따라 작업계획을 조정할 수 있음.

– (농작업 안전 관리) 사람과 장애물을 감지하여 충돌 위험에 대응하고, 원격 감시와 장비 상태 진단을 통해 자율 농작업의 안전성을 지원함.

– (농업 데이터 활용) 작업 과정에서 발생하는 위치 · 경로 · 투입량 · 장비상태와 작업결과를 자동으로 기록하여 생산이력, 농기계 관리와 농장경영의 기초자료로 활용할 수 있음.

○ 기술 도입에 따른 기대효과

– (농작업 안전 · 노동력 대응) 반복적이고 위험한 농작업을 대체 · 보완하여 농업인의 작업 부담과 안전사고 위험을 줄이고 노동력 부족에 대응할 수 있음.

– (생산성 · 환경적 효과) 적기 작업과 정밀 주행 · 작업기 제어를 통해 작업 품질을 높이고, 농약 · 비료 · 물 · 에너지 등의 과잉 투입과 중복주행을 줄여 자원 이용효율과 환경성을 향상할 수 있음.

– (산업적 효과) 자율 농기계, 농업로봇, 농작업 수탁, 원격 운영과 예지정비 등 새로운 농업기계 · 서비스 산업의 기술개발과 시장 확대를 촉진할 수 있음.

– (과학기술적 효과) 농업환경 인지, 농작업 AI, 자율주행 · 작업계획과 로봇 제어 기술을 고도화하고, 다양한 작목과 농작업에 적용 가능한 농업 특화 지능형 로봇 기술의 연구 기반을 확장할 수 있음.

표 1. AI · 농업로봇 기술이 가지는 농업부문의 기대 효과

성과영역	기대효과
안전·노동	위험·반복 작업 대체, 노동력 부족 대응, 1인 다장비 운영, 원격 감시
생산성·품질	적기 작업, 정밀 주행·작업, 작업 누락·중복 저감, 품질 균일화
자원·환경	농약·비료·물의 정밀·선택 투입, 농자재·에너지 사용 및 토양 압밀 저감
경영·서비스	작업수탁, 원격 운영, 장비 공유, 예지정비 및 생산이력 관리
데이터·혁신	현장 농업데이터 축적, AI 모델 학습·고도화, 지역·작목·작업으로의 확장

Ⅱ. 기술 분야 구조 및 범위

1 기술 분야 정의



그림 6. 인공지능(AI) · 농업로봇 분류 체계

○ 인공지능(AI) · 농업로봇의 기술적 정의

– 인공지능(AI) · 농업로봇은 농업환경과 작업대상을 센서와 비전 기술로 인식하고, 농작업 목표와 환경 · 장비의 제약조건을 바탕으로 작업을 계획 · 판단하며, 이동 · 조작 · 작업기 제어를 통해 실제 농작업을 수행하는 지능형 농업생산 기술체계를 포괄함.

– 기술체계는 센서 · 카메라 · LiDAR · GNSS 등을 이용한 인지, AI 기반의 작업계획 · 의사결정, 자율주행 · 매니퓰레이션 · 작업기 제어를 통한 실행, 그리고 작업결과의 기록 · 분석 · 학습이 연계되는 감지-판단-행동-피드백의 폐쇄형(Closed-Loop) 구조를 가짐.

– 농업 AI는 기능에 따라 수량예측 · 분류 · 이상탐지 등을 수행하는 분석형 AI, 텍스트 · 영상 · 지리공간 · 시계열 등의 정보를 결합하여 설명과 작업 시나리오를 생성하는 생성형 AI, 실제 농업환경에서 인지-판단-행동을 연결하는 피지컬 AI(Physical AI)로 구분할 수 있으며, 농업용 로봇과 자율 농기계는 피지컬 AI의 대표적인 현장 구현체에 해당함.

○ 기술 분야의 범위와 경계

– (좁은 의미의 AI · 농업로봇) 농작업을 자동 또는 자율적으로 수행하기 위해 환경을 인식하고 주행 · 조작 · 작업기를 제어하는 자율 농기계와 농업용 로봇 및 관련 인지 · 판단 · 제어 기술을 의미함.

– (넓은 의미의 AI · 농업로봇) 센서와 로봇 하드웨어뿐 아니라 농업 데이터 수집 · 표준화, 농업 AI · 파운데이션 모델, 자율주행 · 로봇 조작 · 작업기 제어, 농장관리정보시스템(FMIS), 농작업 서비스까지 포함하는 전체 기술체계를 의미함. 본 보고서에서는 넓은 의미의 AI · 농업로봇을 기준으로 기술 동향과 전망을 다룸.

– (인접 기술과의 경계) 스마트농업 · 정밀농업 기술은 농업환경과 작물의 상태를 계측 · 분석하고 의사결정을 지원하는 광범위한 기술을 포함하며, AI · 농업로봇은 이러한 정보를 실제 주행 · 조작 · 농작업으로 연결하는 실행 기능을 담당함.

– FMIS, 위성 · 드론 · IoT 센서와 농업 데이터 플랫폼은 직접적인 로봇 기술은 아니지만, 작업계획과 운영 최적화를 지원하는 상위 또는 기반 시스템으로 상호 연계됨.

– 범용 휴머노이드 로봇 역시 장기적으로 농업 피지컬 AI의 구현수단이 될 수 있으나, 현재 농업현장에서는 비용, 내구성, 방수 · 방진, 유지보수와 작업 효율성 등을 고려할 때 기존 농기계의 자율화와 이동형 전용 농업로봇이 주요 적용 형태임.

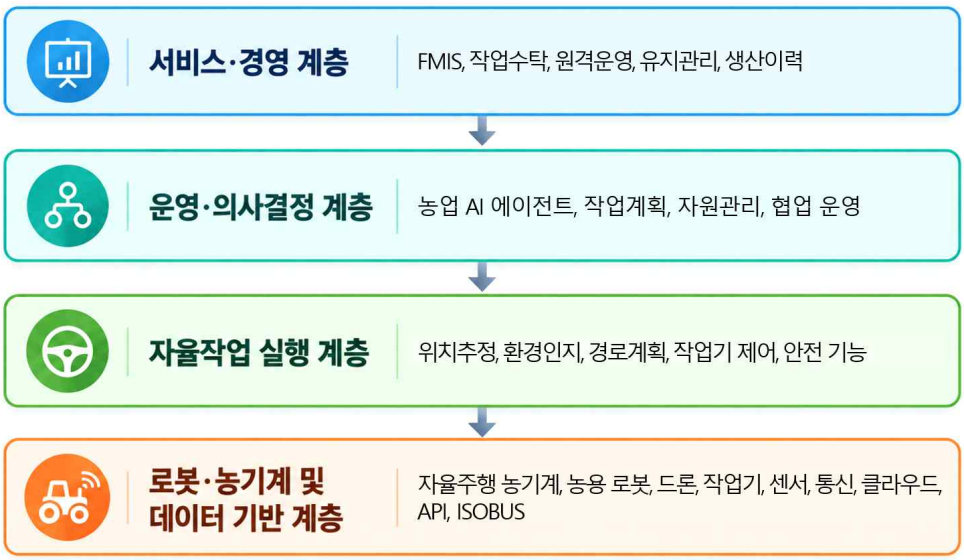


그림 7. AI · 농업로봇 기술 분야의 계층형 구조

○ 인공지능(AI) · 농업로봇 분류 체계

– (AI 기능별 분류) 농작업을 자동 또는 자율적으로 수행하기 위해 환경을 인식하고 주행 · 조작 · 작업기를 제어하는 자율 농기계와 농업용 로봇 및 관련 인지 · 판단 · 제어 기술을 의미함.

– (로봇 플랫폼별 분류) 기존 트랙터 · 콤바인 등 농기계에 자율기능을 부여한 자율 농기계, 운반 · 제초 · 방제 · 수확 등 특정 작업을 수행하는 전용 농업로봇, 로봇팔과 작업기를 이용하여 작물을 직접 조작하는 매니퓰레이션 로봇, 드론 · 무인항공기 및 다수 로봇의 협업 시스템 등으로 구분할 수 있음.
– (농작업별 분류) 경운 · 정지, 파종 · 이식, 생육관리, 제초 · 방제, 수확, 운반 · 물류 등 농업 생산과정의 작업 공정에 따라 구분할 수 있으며, 하나의 플랫폼이 작업기를 교체하여 여러 농작업을 수행하는 다목적 형태도 포함됨.
– (자율운영 범위별 분류) 단일 장비의 주행 · 작업 자동화, 작업 단위의 임무계획과 재계획, 복수 장비의 플릿 운영과 자원배분, 농장 전체의 작업 스케줄링과 FMIS 연계 등 자율운영 범위에 따라 구분할 수 있음.
– (AI 모델 · 에이전트 구조별 분류) 특정 작목 · 작업을 대상으로 학습된 개별 AI 모델과, 다양한 작물 · 지역 · 계절 · 센서 · 작업에 공통적으로 활용할 수 있는 농업 파운데이션 모델로 구분할 수 있음.

2 주요 구성 기술



그림 8. AI · 농업로봇 기술 분야 구조 및 통합 체계도

○ 인공지능(AI) · 농업로봇 기술 체계 개관

– AI · 농업로봇 기술체계는 농업현장의 데이터를 수집 · 분석하는 데이터 · AI 기반 기술, 판단 결과를 실제 농작업으로 연결하는 자율 농작업 실행 기술, 여러 장비와 농장 운영을 통합하는 운영 · 서비스 플랫폼 기술이 연결된 구조로 구성됨.

– 센서와 통신기술을 통해 환경 · 작물 · 장비 상태를 수집하고, 농업 AI가 작업계획과 의사결정을 수행하며, 자율주행 농기계와 농업로봇이 주행 · 조작 · 작업기 제어를 통해 실제 농작업을 수행함.

– 작업 과정에서 생성되는 위치 · 경로 · 투입량 · 장비상태와 작업결과는 다시 농업 AI 학습, 작업계획 개선과 농장 운영에 활용되어 데이터-판단-실행-기록 · 학습이 순환하는 폐쇄형(Closed-Loop) 구조를 형성함.

○ 데이터 · AI 기반 기술

– (농업 데이터 수집 · 융합 기술) 카메라, LiDAR, 레이더, GNSS, 관성센서와 토양 · 기상 · 생육 센서 등을 이용하여 환경 · 작물 · 장비 상태를 수집하고, 위치 · 시간 · 작목 · 작업 · 장비 식별자를 기반으로 서로 다른 데이터를 연계하는 기술임. 원자료뿐 아니라 품질정보, 라벨과 처리이력도 함께 관리할 필요가 있음.

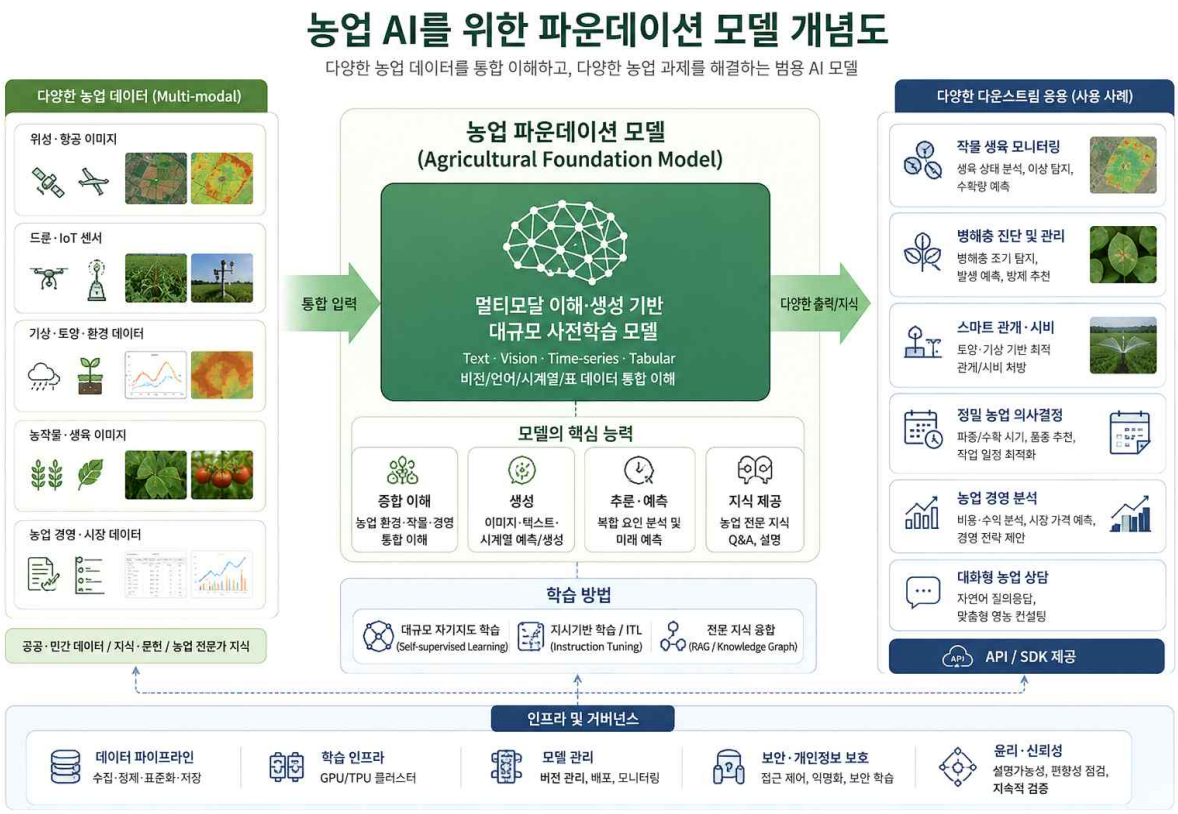


그림 9. 농업 AI 파운데이션 모델 개념도

– (통신 · 엣지 · 클라우드 컴퓨팅 기술) 농기계 텔레매틱스, ISOBUS와 무선통신을 통해 장비와 시스템 간 데이터를 교환하고, 실시간성이 요구되는 장애물 인지와 제어는 엣지(Edge)에서, 대규모 학습 · 장기 분석 · 모델 관리와 배포는 클라우드에서 수행하는 하이브리드 구조로 운영될 수 있음.

– (멀티모달 농업 AI 기술) 영상, 토양 · 기상 시계열, 지리공간정보, 장비상태, 농작업 이력과 자연어 지식 등 서로 다른 형태의 데이터를 통합하여 작물 · 환경 상태를 인식하고 작업조건을 판단하는 기술임. 개별 센서 정보가 불완전한 상황에서도 다른 데이터로 판단을 보완할 수 있음.

– (농업 파운데이션 모델 · 에이전트 기술) 다양한 작물 · 계절 · 지역 · 농작업 데이터를 공통으로 학습하여 여러 작업에 활용할 수 있는 기반모델을 구축하고, 이를 작업계획 · 재계획 · 도구 사용과 결합하여 농업 의사결정을 수행하는 기술임. 국내 적용을 위해서는 소규모 필지, 다품목 재배, 시설 · 노지 혼재와 지역 · 계절 편차를 반영한 데이터 확보가 중요함.

○ 자율농작업 실행 기술

– (위치추정 · 환경 인지 기술) RTK-GNSS, 관성센서, 카메라, LiDAR와 레이더 등을 융합하여 농기계와 로봇의 위치를 추정하고 사람 · 차량 · 작물 · 논둑 · 나무 · 시설물 등 주변 환경을 인식하는 기술임.

– (작업계획 · 자율주행 기술) 농지 형상, 작업기 폭, 최소선회반경, 토양과 작물 제약 등을 고려하여 작업경로와 작업순서를 생성하고, 주행 중 장애물이나 작업조건 변화가 발생하면 경로와 임무를 재계획하는 기술임.

– (안전 · 강건성 기술) 먼지 · 역광 · 비 · 안개 · 진동 등 농업환경에서 발생하는 센서 성능 저하와 고장에 대응하기 위해 센서 융합, 이상 감지, 위험구역 설정, 안전정지와 작업자 개입 요청 등을 포함하는 시스템 안전 기술임.

– (작업기 · 정밀제어 기술) 파종 깊이와 간격, 노즐별 살포량, 제초 도구 위치, 수확 그리퍼의 파지력 등 작업 품질에 직접 영향을 주는 요소를 정밀하게 제어하는 기술임. 작업 누락 · 중복과 작물 손상을 최소화하기 위해 주행제어와 작업기 제어의 연계가 요구됨.

– (로봇 조작 기술) 수확 · 전정 · 선별 등 대상 작물을 직접 다루는 작업에서는 시각 · 촉각 정보와 힘 제어를 결합하여 가림, 형상 · 숙도 변화와 접촉 손상에 대응하는 기술이 필요함. 로봇의 적용성을 높이기 위해 재식거리 · 수형 · 유인방식 등을 기계 작업에 적합하게 설계하는 로봇 친화형 재배체계도 함께 고려할 수 있음.

○ 통합운영 · 서비스 플랫폼 기술

– (임무 · 플릿 운영 기술) 여러 농기계와 농업로봇을 함께 운영하기 위해 작업구역과 임무를

분배하고, 작업 선후관계, 충전 · 보급 · 하역, 작업기 교체와 고장 발생 시 임무 재할당 등을 통합적으로 관리하는 기술임.

- (FMIS 연계 · 농장 운영 기술) 농장관리정보시스템(FMIS)은 농장의 작업계획, 자원, 장비상태와 작업이력을 통합하고 AI의 작업지시와 로봇 실행 결과를 연결하는 운영 플랫폼으로 활용될 수 있음.
- (표준 · 상호운용 기술) ISOBUS(ISO 11783), API와 데이터 표준을 활용하여 제조사가 다른 트랙터 · 작업기 · 로봇 · FMIS · 클라우드 간 작업지시와 작업기록을 교환하는 기술임. 다양한 장비가 동일 농장에서 함께 운용되기 위해서는 데이터 형식과 통신규격의 상호운용성이 중요함.
- (사이버보안 · 안전관리 기술) 장비 제어와 원격관제가 네트워크로 연결됨에 따라 사용자 인증, 접근권한, 암호화, 소프트웨어 업데이트와 작업 로그 관리가 요구됨. 사이버보안은 정보보호뿐 아니라 농기계 오작동과 안전사고를 방지하는 시스템 안전의 일부로 고려할 필요가 있음.
- (농작업 서비스 · 데이터 거버넌스) 작업수탁, 원격운영, 예지정비와 장비 공유 등 서비스에 농작업 데이터를 활용할 수 있으며, 농가 · 작업수탁자 · 장비 제조사와 플랫폼 사업자 간 데이터 접근 · 이용 · 이동과 활용 권한을 명확하게 설정할 필요가 있음.

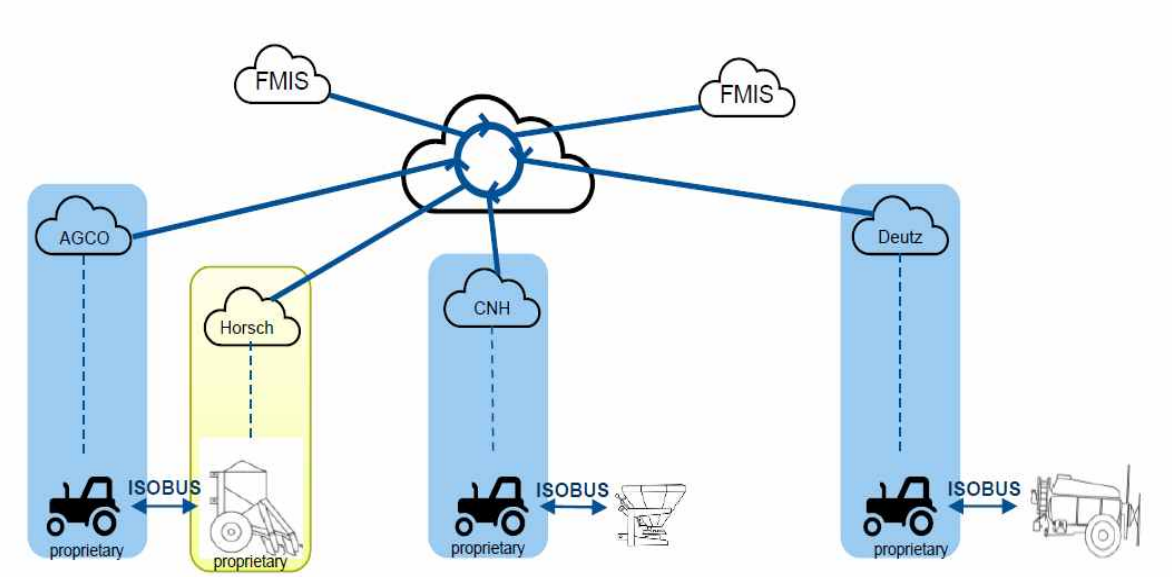


그림 10. 커넥티드팜 대응 농기계 통신 및 데이터 수집 개념도

○ 구성 기술 간 관계 및 통합 체계

- 농업현장에서 수집된 환경 · 생육 · 장비 데이터는 AI 분석과 작업계획을 통해 농기계 · 로봇의 주행 및 작업기 제어로 연결되고, 수행 결과는 FMIS와 운영 플랫폼에 기록됨.
- 작업결과와 장비상태 데이터는 다시 AI 학습, 임무계획과 농장 운영 개선에 활용되므로

AI · 농업로봇 기술은 개별 장비나 알고리즘보다는 데이터 수집-의사결정-농작업 실행-운영 · 학습이 연계된 통합 시스템으로 설계할 필요가 있음.

3 적용분야 및 활용 영역

○ 적용 대상별 활용 영역

– (노지) 트랙터 · 콤바인 등 기존 농기계의 자율주행과 파종 · 시비 · 제초 · 방제 · 수확 · 운반 로봇을 적용할 수 있음. 국내에서는 소규모 · 다필지와 비정형 경계에 대응할 수 있는 경량 플랫폼, 작업경로 최적화와 다장비 운영 기술이 중요함.

– (시설채소 · 화훼) 시설환경 제어, 작물 생육 · 병해 모니터링과 함께 방제 · 운반 · 수확 로봇 등을 적용할 수 있음. 상대적으로 구조화된 환경의 장점을 활용할 수 있으나 좁은 통로, 높은 습도와 작물 가림에 대응할 필요가 있음.

– (과수) 수관 · 과실 인지, 정밀살포, 예초, 운반과 수확 · 전정 작업에 활용할 수 있음. 경사, 불규칙한 수형과 잎에 의한 가림 및 작물 접촉 손상을 고려한 인지 · 조작 기술이 중요함.

– (축산) 착유, 급이, 청소, 분뇨처리와 가축의 건강 · 행동 모니터링 등에 활용할 수 있음. 24시간 반복 운영이 가능하다는 장점이 있으나 위생, 개체 식별과 동물복지를 고려한 운영이 요구됨.

– (유통 · 물류 및 작업자 지원) 농산물의 품질 판정, 선별 · 포장, 창고 운반과 재고관리 등에 AI · 로봇을 적용할 수 있으며, 웨어러블 · 협동운반 장비 등을 이용해 고령 농업인의 작업 부담과 안전 위험을 줄이는 데에도 활용할 수 있음.

○ 적용 단계별 활용 영역

– (농작업 계획 단계) 기상 · 토양 · 생육상태와 장비 · 인력 · 농자재 정보를 분석하여 작업 시기, 작업순서, 투입량과 장비 배치를 계획하고 농장 운영 의사결정을 지원할 수 있음.

– (농작업 실행 단계) 파종 · 이식 · 제초 · 방제 · 수확 · 운반 등 작업에서 환경을 인식하고 주행 · 조작 · 작업기를 정밀하게 제어하여 작업자의 직접 개입을 줄일 수 있음.

– (작업 관리 단계) 다수 장비의 위치와 작업상태를 모니터링하고, 작업 진척도 · 고장 · 농자재 잔량 등을 기반으로 임무를 재할당하거나 작업계획을 조정할 수 있음.

– (경영 · 서비스 단계) 농작업의 위치 · 시간 · 경로 · 투입량과 장비상태를 생산이력, 농기계 유지관리, 작업수탁과 농장경영 시스템에 연계하여 운영 효율성과 데이터 활용성을 높일 수 있음.

표 2. AI · 농업로봇의 적용영역별 주요 작업과 핵심 현장조건

적용영역	주요 작업	핵심 현장조건
노지	경운·파종·시비·제초·방제·수확·운반	비정형 필지, 토양상태, 다필지 이동, 기상변화
시설채소·화훼	환경·생육 모니터링, 방제·운반·수확	좁은 통로, 작물 가림, 고습·방수, 시설 구조
과수	정밀살포, 예초, 과실 인지, 수확·운반·전정	경사, 수형 다양성, 가림, 접촉 손상
축산	착유, 급이, 청소, 분뇨, 건강·행동 모니터링	위생, 개체 식별, 24시간 운영, 동물복지
유통·물류	품질판정, 선별·포장, 창고·자율운반	품질 기준, 추적성, 생산정보 연계
작업자 지원	웨어러블, 협동운반, 작업 자세·안전 보조	경량성, 착용성, 비용, 사용자 수용성

Ⅲ. 기술 발전 동향 및 전망

1 국내외 기술 발전 동향

1.1 글로벌 기술 발전 동향

○ 자율작업 농기계와 전용 농업로봇의 확대

– 글로벌 농업기계 기술은 RTK-GNSS 기반 주행안내와 자동조향을 넘어 주변 환경과 장애물을 인식하고, 작업경로와 작업조건을 스스로 조정하는 자율 농기계로 발전하고 있음.

– John Deere, CNH, AGCO 등 주요 농기계 기업은 자율주행 농기계와 운영 플랫폼을 연계하여 작업계획 · 작업이력 · 장비상태를 통합 관리하고 있으며, AgXeed와 Krone/Lemken 등은 기존 작업기를 활용할 수 있는 무인 동력 플랫폼을 개발하였음.



그림 11. 자율주행 농기계 및 다목적 캐리어형 농업로봇 사례

– 제초 분야에서는 FarmDroid, Robot One, Odd.Bot, Kilter 등과 같이 파종 위치정보와 비전 인식을 이용하여 작물과 잡초를 구분하고, 기계식 제초 · 레이저 · 정밀분무 등을 통해 선택적으로 잡초를 제거하는 로봇이 개발 · 상용화되고 있음.



그림 12. 농업용 제초로봇 사례

○ 과수 · 시설 · 축산 분야의 로봇 적용 확대

– 과수 · 포도 분야에서는 Electric GUSS, Atomatika 등과 같이 수관과 장애물을 인식하면서 자율주행하고, 노즐별 분사량을 제어하는 정밀 방제로봇의 적용이 확대되고 있음.

– 이러한 기술은 단순한 로봇 주행 성능뿐 아니라 제초율, 작물 손상, 약제 절감량, 방제효과와 실제 작업속도 등 농작업 품질을 함께 평가하는 방향으로 발전하고 있음.

– 축산 분야에서는 Lely, DeLaval, GEA 등이 착유 · 급이 · 청소 로봇을 상용화하고 있으며, 로봇 작업과 개체 건강 · 생산정보 분석을 연결하는 데이터 기반 축산관리 시스템으로 발전하고 있음.



그림 13. 과수 및 축산 분야 로봇 사례

○ 농업 AI와 데이터 플랫폼의 결합 확대

– AI 측면에서는 특정 작목이나 개별 임무를 대상으로 하는 모델에서 영상 · 텍스트 · 시계열 · 지리공간 · 로봇 상태정보를 함께 학습하는 멀티모달 AI와 파운데이션 모델로 기술 범위가 확대되고 있음.

– 최근에는 영상과 언어 지시, 로봇 상태를 이용하여 작업계획과 행동을 생성하는 VLA(Vision–Language–Action) 기반 로봇 지능도 연구되고 있으며, 시뮬레이션 · 원격조작 · 실제 작업 로그를 함께 활용하여 로봇 행동을 학습하는 방향으로 발전하고 있음.

– 한편 제조사가 다른 농기계와 서비스 간 연결을 위해 데이터 상호운용성의 중요성이 증가하고 있음. AEF의 AgIN은 서로 다른 기계 · FMIS · 클라우드 간 작업지시와 작업기록을 교환하기 위한 연결체계를 지향하며, 유럽의 농업 데이터 스페이스는 농민 중심의 분산형 데이터 활용체계를 추진하고 있음.

표 3. 글로벌 AI · 농업로봇의 대표 기술 사례

기술영역	대표사례	기술 내용
자율농기계	John Deere, CNH, AGCO, AgXeed	자율주행, 작업계획, 원격관제, 기존 작업기 연계
제초·정밀살포	FarmDroid, Robot One, Odd.Bot, Kilter	파종좌표·비전 기반 선택 제초, 기계·레이저·정밀 분무
과수·시설	Electric GUSS, Atomatika, FARMILY-X, HERMAI	수관·작물 인지, 노즐 제어, 모니터링·방제
수확·운반	FFRobotics, PeK agrobots 등	다중 로봇팔, 경사지 자세보정, 수확-적재-운송 통합
축산	Lely, DeLaval, GEA	착유·급이·청소, 개체 데이터 기반 건강·생산 관리
데이터·표준	AEF AgIN, CEADS, ISOBUS	기계-클라우드 데이터 교환, 데이터 스페이스, 상호운용

1.2 국내 기술 발전 동향

○ 운반 · 제초 등 작업보조 로봇의 상용화

– 국내 농업로봇은 완전 무인 농작업을 목표로 기술개발이 진행되고 있으나, 현재는 운반 · 제초 · 방제 등 특정 농작업을 자동화하거나 작업자를 보조하는 형태를 중심으로 상용화와 현장 실증이 확대되고 있음.

– 대동로보틱스의 RT100은 RTK-GNSS 기반 자율주행과 카메라 기반 장애물 인식 · 비상정지 기능을 갖춘 운반로봇으로, 밭작물뿐 아니라 과수 · 시설환경에서의 활용을 목표로 하고 있음.

– 농촌진흥청에서도 RTK-GNSS와 LiDAR를 이용하여 작업경로를 주행하고 장애물을 감지하면 정지하는 무인 제초로봇을 개발하는 등 노지 · 과수 환경을 대상으로 한 자율 농작업 기술 개발이 진행되고 있음.



그림 14. 국내에서 개발한 운반 로봇 및 제초 로봇 사례

○ 과수 방제로봇의 개발 및 상용화

- 과수에서는 반복적인 농약 살포 작업의 노동부담과 작업자의 농약 노출을 줄이기 위해 자율주행 방제로봇의 개발과 상용화가 진행되고 있음.
- HADA의 PURIDA는 RTK-GNSS와 카메라 기반 자율주행 및 충돌 안전기능을 적용하고 있으며, 노즐별 독립 송풍과 방제량 제어 · 모니터링 기능을 적용하고 있음.
- 아세아텍의 500G 역시 RTK-GNSS를 이용해 설정된 작업경로를 따라 자율적으로 방제 작업을 수행하는 플랫폼으로 개발되고 있음.



그림 15. 국내에서 개발한 과수 방제 로봇 사례

○ 자율 농기계 · 로봇 생태계의 확장

- 국내는 ICT · 센서 · 반도체 · 통신기술과 농기계 제조기반, 다양한 작목과 시설환경 및 공공연구 · 지도체계를 보유하고 있어 자율 농기계와 농업로봇 기술개발을 위한 기반이 형성되어 있음.
- 농기계 제조사를 중심으로 자동조향과 자율주행 기술이 고도화되고 있으며, 로봇기업과 스타트업을 중심으로 방제 · 제초 · 운반 · 모니터링 등 특정 농작업을 대상으로 하는 전용 플랫폼의 개발이 확대되고 있음.
- 반면 소규모 · 다필지 농업구조, 짧은 작기, 농가별 상이한 재배방식, 유지보수 인력 부족, 장비 · 데이터 표준 미흡과 기술도입 효과에 대한 정량적 검증 부족은 산업 확산의 주요 제약요인임.
- 따라서 국내에서는 단일 장비의 성능 향상뿐 아니라 작목별 장기 실증, 농기계-작업기-FMIS 연계, 안전 · 성능 검정, 작업수탁 · 공동이용과 지역 유지보수 체계를 함께 구축할 필요가 있음.

표 4. 국내 AI · 농업로봇 생태계와 보완 방향

국내 생태계	주요 주체	향후 보완 방향
자율농기계·플랫폼	국내 농기계 제조사 및 로봇기업	자율주행 고도화, 작업기·FMIS 연계, Level 4 안전·검정
시설·과수 로봇	방제·모니터링·운반·수확 스타트업	작목별 실증, 내환경성, 서비스망, 작업 품질 검증
AI·데이터	스마트팜·영상·생육·경영 플랫폼	공통 데이터모델, API, 멀티모달 학습, 농민 데이터 권리
공공 실증	농촌진흥청·지자체·테스트베드	공통 시나리오, 장기 실증, 비교평가, 데이터 환류
교육·서비스	농작업 대행조직·영농조합·임대사업소	공동이용, 작업수탁, 유지보수, 원격관제, 전문인력

1.3 분야별 농업 AI 기술의 진화



그림 16. 인공지능 기술을 이용한 농업 적용 분야

○ 수확량 예측에서 작업 의사결정으로의 발전

– 수확량 · 생산성 예측 AI는 기상 · 토양 · 재배이력 · 위성 · 드론과 농기계 작업데이터를 결합하여 필지 단위 수량과 품질을 예측하는 단계에서, 위치별 파종 · 시비 · 관개 · 수확계획을 생성하고 실제 농작업과 연결하는 방향으로 발전하고 있음.

– Climate FieldView와 John Deere Operations Center는 다양한 농업데이터를 분석하여 농장의 상태를 파악하고 파종 · 시비 · 수확 등 실제 작업계획을 지원하는 대표적인 데이터 기반 농장관리 사례임.



그림 17. 농업 AI 기술적용 실용화 해외 사례

○ 병해충 · 토양 · 수분 진단에서 정밀 작업으로의 연계

– 병해충 분야는 단일 영상에 대한 진단에서 시계열 · 기상 · 공간정보를 함께 활용하여 병해 발생 위험을 예측하고, 필요한 위치에만 약제를 살포하는 정밀 방제와 연계하는 방향으로 발전하고 있음.

– CropIn의 Smart Farming App과 같은 서비스는 위성 · 현장 · 기상 데이터를 이용하여 작물 생육과 병해 위험을 모니터링하며, CropX와 AquaSpy 등은 토양 수분과 기상 · 생육정보를 분석하여 관개 시기와 투입량 결정을 지원하고 있음.

– 이러한 AI 기반 판단은 선택적 살포 · 제초 로봇과 연결되면서 분석 결과가 실제 작업기 제어로 이어지는 형태로 발전하고 있음.

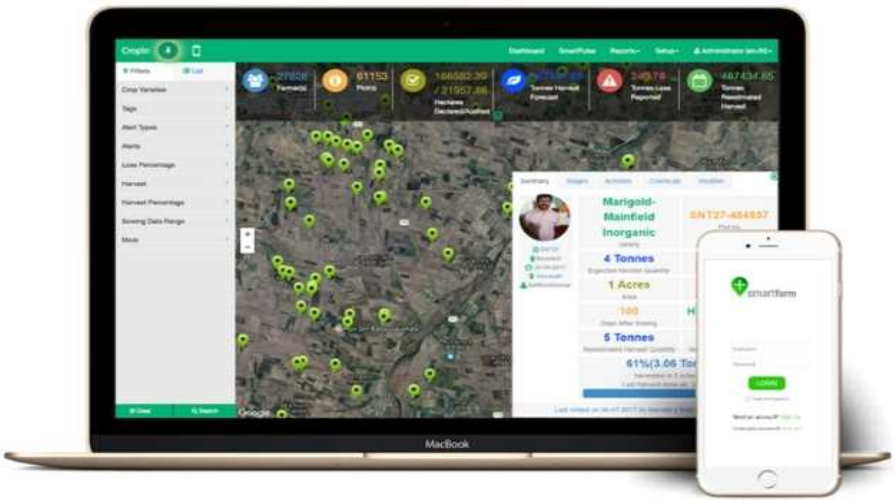


그림 18. 작물 모니터링 · 병해충 진단 AI 해외 사례



그림 19. 토양 수분 모니터링 해외 사례

○ 시설환경 제어와 농장 운영 AI

– 시설농업에서는 고정 설정값 중심의 환경제어에서 작물 생육모델, 머신러닝과 모델예측제어를 이용하여 생산량 · 품질 · 에너지 사용을 함께 최적화하는 방향으로 발전하고 있음.

– 농장 의사결정 AI도 단순한 데이터 대시보드에서 자연어 기반 농장 운영지원과 컨설팅 형태로 확대되고 있으며, Syngenta AgriEdge와 FarmShots 등은 위성 · 드론영상과 농장정보를 이용하여 생육상태와 이상지역을 파악하고 영농 의사결정을 지원함.

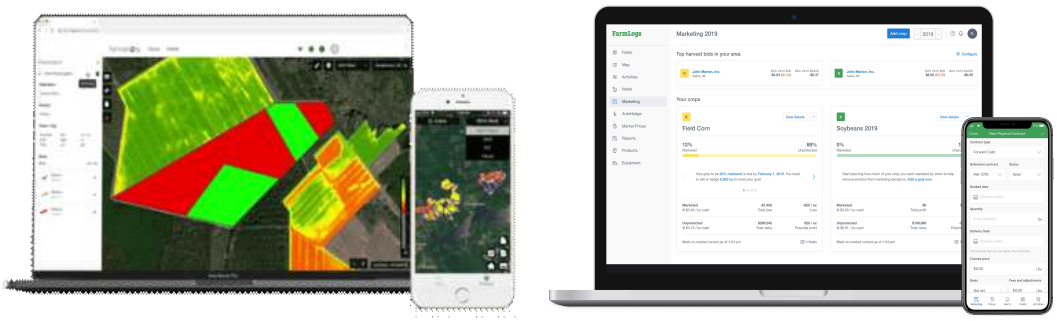


그림 20. 의사결정 및 컨설팅 AI 해외 사례

○ 자율작업 AI와 정밀 농작업 로봇의 결합

– 자율작업 AI는 농지 형상과 작업기 특성을 고려한 작업경로 · 작업순서 생성, 장애물 인식, 안전판단과 작업기 제어를 통합하는 방향으로 발전하고 있음.

– 카메라와 딥러닝을 이용하여 작물열(row), 작물 · 잡초와 작업대상을 인식하고, 이를 자율주행 농기계나 제초 · 방제 로봇의 주행 및 작업기 제어에 활용하는 기술이 확대되고 있음.

– 제초 · 방제는 비전 인식과 기계식 · 레이저 · 선택분무를 결합한 정밀 작업으로 발전하고 있으며, 수확로봇은 다중 카메라와 그리퍼 제어를 통해 과실의 가림과 형상 변화에 대응하는 방향으로 연구되고 있음.



그림 21. 자율작업을 위한 작물 인식 및 잡초 인식 사례

2 기술발전 흐름

2.1 AI · 농업로봇 기술 발전

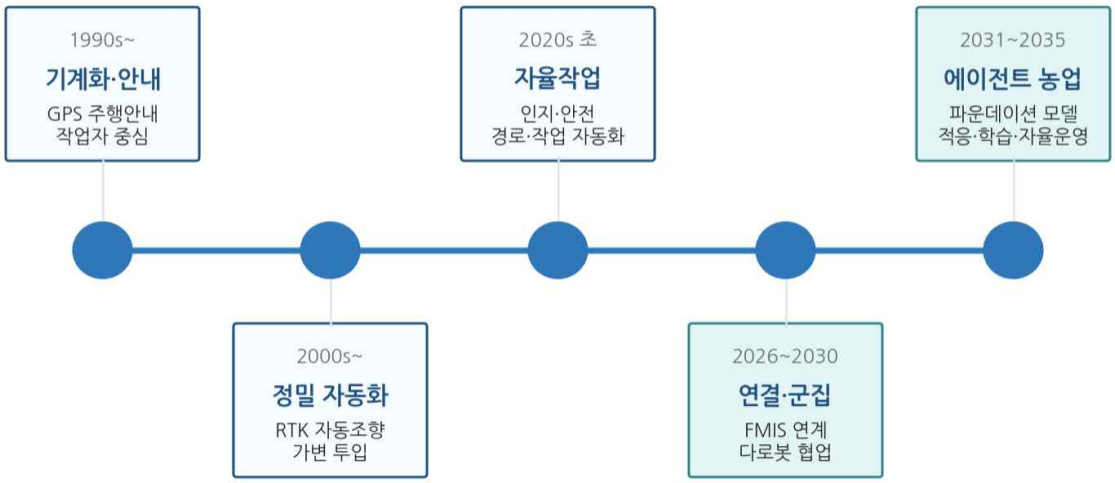


그림 22. AI · 농업로봇 기술의 발전 흐름: 기계화에서 지능화로

○ 기계화와 작업 자동화의 확대

– 농업기계 기술은 인력과 축력을 대체하는 기계화에서 시작하여, 엔진 · 유압 · 전자제어 기술의 발전과 함께 작업능률과 조작 편의성을 높이는 방향으로 발전해 왔음.

– 초기 자동화는 작업자가 경로와 작업조건을 결정하고 농기계가 이를 정확히 수행하도록 보조하는 형태가 중심이었으며, 자동변속 · 작업기 제어와 같은 부분 자동화 기술이 농기계에 적용됨.

○ 정밀농업과 자동조향 기술의 확산

– GNSS와 농기계 전자제어 기술의 발전으로 위치정보를 기반으로 한 주행안내와 자동조향이 보급되었으며, 중복주행과 작업 누락을 줄이고 위치별 투입량을 조절하는 정밀농업 기술이 확대됨.

– RTK-GNSS 기반의 고정밀 위치추정은 직선주행뿐 아니라 자동선회, 작업기 위치제어와 경로 추종으로 발전하면서 자율 농기계 기술의 기반을 형성함.

○ 환경인지 기반 자율 농작업으로의 발전

– 카메라, LiDAR, 레이더와 인공지능 기술이 농기계와 로봇에 적용되면서 단순 경로추종을 넘어 주변 환경과 작업대상을 인식하고 장애물과 작업상황에 따라 주행과 작업조건을 조정하는 자율 농작업 기술로 발전하고 있음.

– 제초 · 방제 · 수확 등에서는 작물과 잡초, 과실과 작업대상을 개체 단위로 인식하고 작업기를 선택적으로 제어하는 정밀 작업기술이 확대되고 있음.

– 이에 따라 농업로봇의 성능도 단순 주행오차뿐 아니라 제초율, 방제효과, 파종간격, 수확 성공률과 작물 손상 등 실제 농작업 품질을 함께 고려하는 방향으로 발전하고 있음.

○ 단일 장비에서 다장비 · 플릿 운영으로의 확장

– 자율 농작업은 개별 농기계의 자동화에서 여러 농기계와 로봇이 위치 · 작업상태 · 자원정보를 공유하고 작업구역과 임무를 분배하는 다장비 협업으로 확대되고 있음.

– 수확기-운반로봇, 트랙터-작업로봇 등의 협업에서는 작업경로뿐 아니라 충전 · 보급 · 하역 · 작업기 교체와 고장 발생 시 임무 재할당을 함께 고려하는 플릿(fleet) 운영기술이 중요해지고 있음.

○ 파운데이션 모델과 자율 에이전트로의 발전

– 최근에는 영상 · 텍스트 · 시계열 · 지리공간 · 로봇 상태와 행동정보를 함께 학습하는 멀티모달 파운데이션 모델과 VLA(Vision-Language-Action) 기반 로봇 지능에 대한 연구가 확대되고 있음.

표 5. 파운데이션 모델 · 로봇 에이전트 · 피지컬 AI의 발전

개발 단계	주요 기술	목표
1단계: 공통 데이터·표현	농업 환경·생육·작업·로봇 로그 표준, 멀티모달 사전학습	재사용 가능한 인지 기반
2단계: 작목·작업 적응	소량 데이터 어댑터, 프롬프트·검색증강, 엣지 경량화	지역·작목 전이
3단계: 에이전트화	목표 이해, 임무분해, 계획·재계획, 도구·로봇 호출	판단-실행 연결
4단계: 지속학습·협업	플릿 데이터 환류, 연합학습, 다기종 협업, 안전 업데이트	농장 운영 자율화

– 향후에는 작업자가 목표를 제시하면 AI가 작업을 분해하고 작업순서와 장비를 결정하며, 현장상황 변화에 따라 계획을 수정하는 농업 에이전트로 발전할 가능성이 있음.
– 다만 물리적 작업을 수행하는 농업로봇에서는 잘못된 행동을 차단하기 위한 안전제약, 인간 확인, 행동검증 및 모델 업데이트 이후의 성능관리 체계가 함께 요구됨.

2.2 자율성 · 지능 · 운영 기술의 발전

○ AI · 농업로봇 기술은 주행 자동화 수준, 환경인지와 AI 판단 능력, 작업기의 정밀제어 수준, 농기계 · 로봇 간 연결성과 운영 범위가 함께 고도화되는 방향으로 발전하고 있음.

표 6. AI · 농업로봇 기술의 단계별 발전 특성

발전 단계	주행·작업 특성	AI·인지 특성	작업기·로봇 특성	운영·데이터 특성
기계화	작업자 직접 조작	제한적 센싱	기계식 작업 중심	개별 장비 운영
정밀 자동화	주행 안내, 자동 조향	GNSS 및 센서 기반 상태 계측	위치 및 투입량 자동 제어	작업정보 기록
환경인지 자동화	자동선회, 경로추종	카메라, LiDAR 기반 인지	선택적 제초 및 살포	텔레매틱스, 원격관제
자율농작업	전역경로 계획, 경로 재생성	멀티모달 인지, 안전판단	정밀 작업기, 로봇 조작	FMIS, 클라우드 연계
에이전트· 플릿 농업	임무 자율화, 다장비 협업	파운데이션 모델, VLA, 에이전트	다기종 로봇 협업	플릿 운영, 지속학습

○ 현재 기술수준과 성숙도 격차
– 정형화된 작업환경에서의 자동조향, 반복적인 착유 · 급이와 시설 내 운반은 상용화가 진행되고 있는 반면, 비정형 노지의 완전자율 농작업, 다양한 작물을 대상으로 하는 범용 수확 · 조작, 소형 군집로봇 및 파운데이션 에이전트는 실증 또는 연구단계가 중심임.
– 자동조향 기술에서는 경계 · 선회 · 작업기 제어의 통합이, 노지 자율작업에서는 비정형 필지 · 장애물 · 작업품질 · 안전검정이 주요 과제로 남아 있음.
– 범용 수확 · 조작은 작물의 가림과 형상변화, 작업속도, 힘제어와 손상률이 주요 기술적 제약이며, 군집로봇은 플릿 최적화, 통신 · 충전과 경제성 검증이 요구됨.
– 따라서 자율성 수준을 단순히 무인 주행 여부로 평가하기보다 한 작기 동안의 가동률, 작업 중단 · 복구, 환경조건 변화에 대한 강건성, 작업품질, 원격개입 빈도와 유지보수성을 함께 평가할 필요가 있음.

3 핵심 발전축

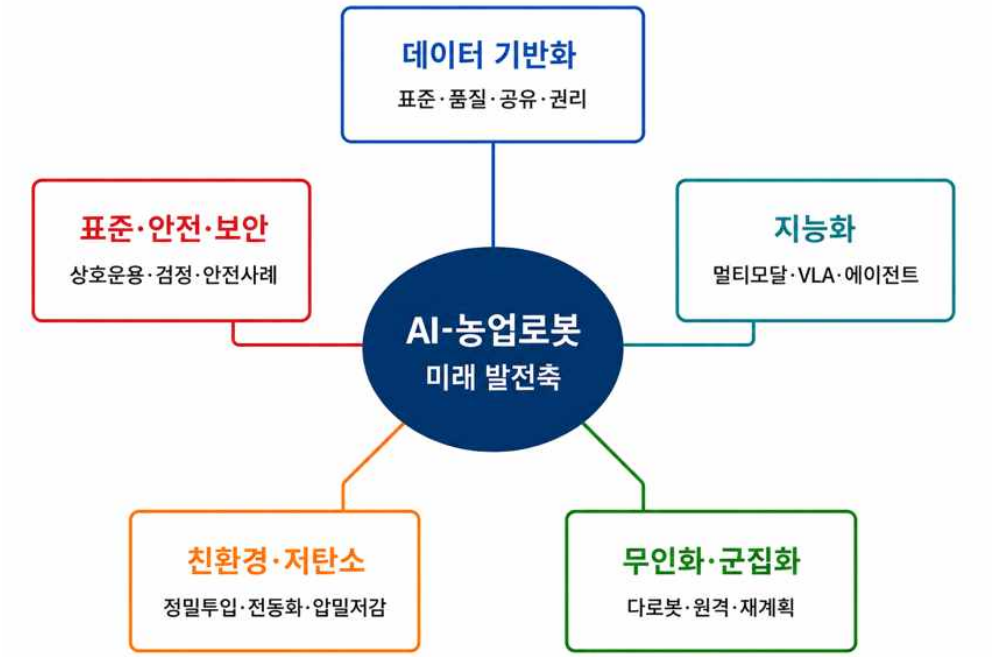


그림 23. AI · 농업로봇의 5대 핵심 발전축

3.1 데이터 기반화

○ AI · 농업로봇의 성능은 센서와 AI 모델 자체의 성능뿐 아니라 현장에서 지속적으로 확보되는 데이터의 품질과 다양성에 의해 크게 좌우됨.

○ 단순 데이터 수집에서 작업 맥락 중심 데이터로의 전환

– 농업 AI 학습에는 단순한 이미지나 센서 데이터의 양보다 작목 · 품종 · 생육단계 · 기상 · 토양 · 장비 · 작업기 · 작업조건과 작업결과가 서로 연결된 데이터가 중요함.

– 특히 자율 농작업에서는 정상적으로 수행된 데이터뿐 아니라 작업 실패, 중단, 장애물 발생, 작업자 개입과 복구과정을 함께 기록하여 AI가 다양한 현장상황과 예외조건을 학습할 수 있도록 해야 함.

○ 지속적인 현장 데이터 수집체계 구축

– 개별 연구과제나 실증사업 단위의 일회성 데이터 수집에서 벗어나 농기계 텔레매틱스, 지역 테스트베드, 농작업 대행조직, 임대사업소와 영농조합 등을 연계하는 지속적인 데이터 수집체계로 발전할 필요가 있음.

– 농업인이 제공한 작업데이터에 대해서는 데이터 접근, 이용통제, 이동과 성과 환류에 대한 기준을 마련하여 지속적인 데이터 제공과 활용이 가능한 구조를 구축해야 함.

3.2 지능화

○ 농업 AI는 작물 · 환경 상태를 단순히 분류 · 예측하는 분석형 AI에서 벗어나, 다양한 정보를 통합하여 농작업을 판단하고 실제 로봇 행동과 연결하는 방향으로 발전하고 있음.

○ 멀티모달 농업 AI의 확대

– 영상, 기상 · 토양 시계열, 지리공간정보, 농작업 이력, 장비상태와 자연어 지식을 함께 학습하여 현장상황을 종합적으로 이해하는 멀티모달 AI 기술이 확대될 전망임.

– 이를 통해 하나의 센서나 데이터가 불완전한 경우 다른 정보를 이용하여 판단을 보완하고, 농업인이나 작업자가 자연어를 이용하여 농장상태를 질의하거나 작업을 지시하는 인터페이스로 발전할 수 있음.

○ 파운데이션 모델과 농업 에이전트로의 발전

– 농업 파운데이션 모델은 작목 · 지역 · 작업별 개별 모델을 모두 대체하기보다 다양한 농업데이터에서 공통적인 특징과 지식을 학습하고, 새로운 작목과 지역에 적은 데이터로 적응하는 기반모델로 활용될 전망임.

– 향후에는 작업목표를 입력하면 AI가 임무를 분해하고 작업순서 · 장비 · 경로를 결정하며, 현장상황에 따라 계획을 수정하는 농업 에이전트로 발전할 가능성이 있음.

○ 현장 적용을 위한 안전한 AI

– 고성능 AI의 농기계 탑재를 위해서는 모델 경량화 · 양자화와 엣지 추론 기술이 중요하며, 안전과 직결되는 인지 · 판단 기능은 통신상태와 관계없이 현장에서 수행할 수 있어야 함.

– AI의 판단 불확실성이 높은 경우에는 작업을 정지하거나 작업자에게 확인을 요청하는 안전한 추론과 판단근거를 확인할 수 있는 설명가능성도 중요함.

3.3 자동화 · 무인화 · 군집화

○ 농업로봇 기술은 단순한 주행 자동화에서 작업대상과 환경을 인식하고 작업기까지 스스로 제어하는 자율 농작업으로 발전하고 있으며, 향후에는 여러 장비가 협업하는 군집 · 플릿 운영으로 확대될 전망임.

○ 주행 자동화에서 자율 농작업으로의 발전

– 기존 자동조향은 사전에 설정된 경로를 정확하게 추종하는 데 초점을 두었으나, 자율 농작업에서는 필지 형상, 장애물, 작물상태와 작업기 조건에 따라 경로와 작업계획을 스스로 변경할 수 있어야 함.

– 자율화의 평가기준도 주행오차뿐 아니라 파종간격, 살포량, 제초율, 수확 성공률과 작물 손

상 등 실제 농작업 품질을 함께 고려하는 방향으로 발전해야 함.

○ 단일 장비에서 다로봇 협업으로의 확대

– 여러 농기계와 로봇이 작업구역, 위치, 작업진행률, 농자재 잔량과 장비상태를 공유하고 작업을 분담하는 협업형 농작업이 확대될 전망임.

– 수확기-운반로봇이나 트랙터-작업로봇과 같이 서로 다른 장비가 협업하기 위해서는 작업순서뿐 아니라 충전 · 보급 · 하역, 작업기 교체와 고장 발생 시 재할당까지 포함한 플릿 운영기술이 요구됨.

○ 소형 · 경량 군집로봇의 활용 확대

– 국내와 같이 소규모 · 다필지 농업구조에서는 대형 장비 한 대의 완전자율화와 함께 소형 · 경량 로봇을 다수 운용하는 방식도 대안으로 활용될 수 있음.

– 다만 군집로봇의 효과는 장비 수 자체보다 작업시간, 가동률, 통신 안정성, 충전 · 관제 비용과 고장 복원성 등을 종합적으로 고려하여 평가할 필요가 있음.

○ 로봇 친화형 농업생산환경의 중요성

– 자율 농기계와 농업로봇의 작업성능은 장비 자체의 인지 · 주행 · 제어 성능뿐 아니라 필지 크기와 형상, 농로와 진입로, 선회공간, 경사, 통신환경 및 용 · 배수시설 등 농업생산기반의 영향을 받음.

– 따라서 모든 비정형 환경을 로봇 기술만으로 극복하기보다, 자율 농기계의 작업효율과 안전성을 높일 수 있도록 농지 · 농로 · 시설과 로봇을 함께 고려하는 생산환경 설계가 중요해질 전망임.

3.4 친환경 · 저탄소화

○ AI · 농업로봇은 노동력 대체뿐 아니라 농약 · 비료 · 물 · 에너지 등 농업 투입재의 사용을 줄이고 환경부하를 낮추는 방향으로 발전하고 있음.

○ 정밀 · 선택 농작업 확대

– 작물과 잡초, 병해 부위, 토양과 생육 상태를 위치 또는 개체 단위로 인식하고 필요한 위치에만 농약 · 비료 · 물을 투입하는 선택적 작업기술이 확대될 전망임.

– 이를 통해 농자재 과잉투입과 중복작업을 줄이고, 작업과 동시에 위치 · 투입량 정보를 기록하여 환경관리와 농업생산 이력을 함께 관리할 수 있음.

○ 비화학적 농작업 기술의 확대

– 제초 분야에서는 화학 제초제를 사용하는 방식뿐 아니라 기계식 · 레이저 · 전기적 제초 등

물리적 제어기술과 AI 기반 작물 · 잡초 인식을 결합하는 방식이 확대되고 있음.

- 이러한 기술은 농약사용량을 줄이는 동시에 선택적 작업의 정확도와 작업속도를 확보하는 것이 중요함.

○ 전동화와 농장 에너지 관리

- 농업로봇의 전동화는 현장 배출가스와 소음을 줄일 수 있으나 배터리 용량, 충전시간과 작기 중 에너지 공급 등의 제약을 가짐.
- 향후에는 로봇의 배터리 상태와 충전 · 교대시간을 농작업 계획에 포함하고, 재생에너지 및 에너지저장장치와 연계한 농장 단위 에너지 관리로 확장될 수 있음.

3.5 표준 · 안전 · 보안

○ AI · 농업로봇이 다양한 농업현장에서 활용되기 위해서는 개별 기술의 성능 향상뿐 아니라 장비 간 상호운용성, 안전성 검증과 사이버보안을 함께 확보해야 함.

○ 농기계 · 작업기 · 플랫폼 간 상호운용성

- ISOBUS(ISO 11783)는 트랙터와 작업기 간 데이터 통신의 핵심 표준으로 활용되고 있으며, 향후에는 제조사가 다른 농기계 · 로봇 · FMIS · 클라우드 간 작업지시와 작업결과를 교환할 수 있는 데이터 상호운용성이 중요해질 전망임.
- 표준 API와 데이터 모델을 기반으로 장비와 서비스가 연결될 경우 특정 제조사나 플랫폼에 종속되지 않고 여러 농기계와 서비스를 통합적으로 운영할 수 있음.

○ 자율 농기계 안전 · 성능 검증

- 자율 농기계는 사람과 장애물 인지, 위험상황에서의 감속 · 정지, 작업자 개입과 시스템 고장 시 안전상태 유지 등이 요구되므로 실제 농업환경을 반영한 안전 · 성능 평가체계가 필요함.
- 표준 준수 여부뿐 아니라 먼지 · 비 · 야간 · 역광, 비정형 필지와 다양한 작물조건에서 장기간 성능을 평가할 수 있는 시험 시나리오와 실증체계를 구축할 필요가 있음.

○ AI · 연결 농기계의 사이버보안

- 원격관제와 무선 업데이트가 확대되면서 사용자 인증, 접근권한, 암호화, 통신 · 소프트웨어 무결성 검증과 작업로그 관리의 중요성이 증가하고 있음.
- 특히 AI 모델 업데이트 이후에는 성능과 행동이 달라질 수 있으므로 모델 · 데이터 버전, 적용범위와 실패조건을 관리하고 문제 발생 시 이전 버전으로 복구할 수 있는 체계를 갖출 필요가 있음.

4 향후 기술 발전 방향

4.1 단기(5년) 발전 방향

○ 농업 AI · 로봇 공통 데이터 기반 구축

– 농업 환경 · 생육 · 작업 · 농기계 상태와 로봇 행동 로그를 연계할 수 있는 최소 공통 데이터 모델과 품질관리 기준을 마련하고, 공공 테스트베드와 상용 농기계 · 로봇에서 동일한 형식으로 데이터를 축적할 수 있는 기반을 구축해야 함.

– 정상적인 작업데이터뿐 아니라 작업 실패, 중단, 장애물 발생, 작업자 개입과 복구과정을 함께 수집하여 AI의 일반화와 안전성 향상에 활용할 필요가 있음.

– 농가 · 기업 · 연구기관 간 데이터 활용을 위해 데이터 접근권한, 이용범위, 모델학습 활용과 성과 환류에 대한 기본적인 데이터 거버넌스 체계를 마련해야 함.

○ 자율 농작업의 현장 실증 및 성능검증 강화

– 기존 자율농기계와 소형 · 경량 농업로봇을 동일 작목 · 면적 · 작업조건에서 비교하여 작업시간, 인력 투입, 에너지 사용, 토양 압밀, 고장 복원성과 총소유비용 등 실제 현장효과를 검증해야 함.

– 작목별 개별 실증에서 벗어나 날씨 · 조도 · 먼지 · 경사 · 필지 경계, 사람 · 장애물, 통신두절, 센서 · 작업기 이상 등을 포함하는 공통 시험 시나리오와 평가항목을 마련할 필요가 있음.

– 자율주행 정확도뿐 아니라 파종간격, 제초율, 방제효과, 수확 성공률과 작물 손상 등 실제 농작업 품질과 안전정지 · 복구 · 원격개입 성능을 함께 평가해야 함.

○ 농업 파운데이션 모델의 기반기술 확보

– 단기적으로는 범용 농업 AI의 완성을 목표로 하기보다 병해충 · 작물열 · 작업대상 · 장비상태 · 작업계획 등 여러 작목과 작업에 재사용할 수 있는 공통 인지 · 표현 모듈을 우선 개발해야 함.

– 영상 · 기상 · 토양 · 지리공간 · 농기계 상태와 작업이력 등 멀티모달 데이터를 통합 학습하고, 작목 · 지역별 소량 데이터로 성능을 보완할 수 있는 어댑터 방식의 적용기술을 검증할 필요가 있음.

– 농기계와 로봇에 AI를 적용하기 위한 모델 경량화, 엣지 추론과 안전한 행동제약 기술도 함께 확보해야 함.

○ 운영 · 서비스 기반의 현장 적용체계 구축

– 농업로봇의 실질적인 현장 확산을 위해서는 장비개발과 함께 원격진단, 예지보전, 부품공급, 사용자 교육 및 소프트웨어 업데이트를 포함하는 서비스체계를 구축해야 함.

– 작업수탁 · 공동이용 · 임대 등 다양한 운영방식을 실증하여 계절성이 높은 농업에서 장비의

연간 가동률과 경제성을 높일 수 있는 사업모델을 마련해야 함.

- FMIS와 자율농기계 · 농업로봇을 연결하여 작업계획-작업지시-실행-작업결과 기록이 하나의 시스템에서 연계되도록 해야 함.

4.2 중장기(10년) 발전 방향

○ 농업 파운데이션 에이전트 기반 자율지능 고도화

- 농업 파운데이션 모델은 농장의 환경 · 생육 · 장비상태와 작업목표를 이해하고, 다기종 농기계 · 로봇의 임무를 생성 · 분배 · 재계획하는 농업 파운데이션 에이전트로 발전할 전망임.
- 작업자는 자연어나 고수준 목표를 제시하고, AI 에이전트가 안전 · 작업품질 · 비용 · 에너지와 자원제약을 고려하여 작업계획을 생성하고 실행하는 구조로 발전할 수 있음.
- AI의 판단과 로봇의 실제 행동을 연결하기 위해 인지-계획-제어 간 공통 인터페이스, 행동검증과 인간 개입체계를 함께 구축해야 함.

○ 지속학습과 다기종 로봇 협업체계 구축

- 농업로봇은 시뮬레이션, 원격조작과 실제 작업데이터를 지속적으로 활용하여 새로운 지역 · 작목 · 작업조건에 적응하는 방향으로 발전할 전망임.
- 모든 데이터를 중앙에 집중하기 어려운 농업환경을 고려하여 연합학습, 분산학습과 데이터스페이스를 활용한 지속적인 모델 개선체계가 중요해질 수 있음.
- 단일 로봇 중심의 자율작업에서 벗어나 자율농기계 · 전용로봇 · 드론 · 운반로봇 등이 작업진행률, 장비상태와 자원정보를 공유하는 다기종 협업체계로 발전해야 함.

○ 데이터-AI-로봇-농장운영의 통합

- 농장 운영은 센서와 위성 · 드론이 상태를 관측하고, AI가 농작업을 판단 · 처방하며, 농기계와 로봇이 실제 작업을 수행하고 작업결과를 다시 데이터로 축적하는 순환구조로 발전할 전망임.
- FMIS를 중심으로 농업 데이터, AI, 농기계 · 로봇, 에너지와 농산물 물류를 연계하여 작업계획부터 생산 · 유통까지 통합 관리할 수 있는 플랫폼이 요구됨.
- 장비의 배터리 · 연료 · 종자 · 비료 · 농약과 수확물 적재량을 작업계획에 함께 반영하여 생산성과 자원효율을 동시에 최적화하는 운영기술이 중요함.

○ 로봇 친화형 농업생산체계 확대

- 수확 · 전정 · 이식과 같이 고난도 조작이 필요한 농작업의 자동화를 위해서는 로봇 자체의 성능 향상뿐 아니라 재배환경과 작물의 구조를 로봇 작업에 적합하도록 설계하는 접근이 필요함.
- 과수의 수형 · 재식거리, 시설의 통로 · 베드 · 레일과 작업 인터페이스를 표준화하여 인지 ·

주행 · 조작 난도를 줄일 수 있음.

– 장기적으로는 농업로봇이 다루기 쉬운 품종과 재배방식을 육종 · 재배기술과 공동으로 개발하는 작물–로봇 공동설계가 확대될 전망임.

표 7. AI · 농업로봇의 핵심기술별 단기 · 중장기 주요 기술 로드맵

핵심기술	주요 내용	단기(5년)	중장기(10년)
데이터·표준	농업 환경·생육·작업·로봇 로그 공통 데이터모델 및 품질기준 구축, 테스트베드·상용장비 데이터 수집망 확보	■	■
	분산형 농업 데이터 스페이스 구축, 연합학습 및 산업 간 데이터 연계 확대	■	■
AI·파운데이션 모델	공통 인지·표현 모듈, 작목별 어댑터, 멀티모달 학습 및 엣지 경량화	■	■
	농업 파운데이션 에이전트, 지속학습, 설명가능·안전 추론 및 임무 자율생성	■	■
자율로봇	비정형 노지 강건성 향상, 작업기 자동화, 소형·경량 군집로봇 현장 실증	■	■
	다기종 로봇 협업, 범용 조작, 작업계획·재계획 기반 농장 자율운영	■	■
표준·안전	ISO 기반 시험 시나리오, 자율농기계 성능·안전검정 및 사이버보안 체계 구축	■	■
	업데이트형 AI·소프트웨어 검증, 국제 상호인정 및 안전사례 데이터베이스 구축	■	■
산업·서비스	작업수탁·RaaS, 원격지원·예지보전 및 TCO·ROI 검증	■	■
	플랫폼 기반 서비스 생태계, 보험·금융·유통 연계 및 수출형 농업로봇 서비스	■	■

4.3 데이터 · AI · 로봇 · 서비스 연계 발전방향

○ 데이터–AI 연계: 관측에서 농작업 판단으로

– 위성 · 드론 · 고정센서 · 농기계와 로봇에서 수집되는 환경 · 생육 · 작업 데이터를 하나의 공통 공간 · 시간 기준으로 연결하여 AI가 농장의 현재상태를 종합적으로 판단할 수 있도록 해야 함.

– 단순한 데이터 모니터링을 넘어 병해 · 생육 · 토양 · 장비상태를 분석하고, 파종 · 시비 · 관개 · 방제 · 수확의 시기와 작업조건을 제시하는 의사결정체계로 발전할 필요가 있음.

– AI의 입력자료, 모델 버전, 판단결과와 불확실성을 함께 기록하여 의사결정의 추적성과 재현성을 확보해야 함.

○ AI-로봇 연계: 판단에서 실제 농작업으로

– AI가 생성한 농작업 계획과 처방은 농기계 · 로봇의 작업경로, 작업속도, 작업기 설정 및 투입량으로 변환되어 실제 농작업으로 연결되어야 함.

– 노지에서는 필지 간 이동, 장애물, 충전 · 종자 · 농약 · 수확물 적재 등 자원제약을 함께 고려하고, 시설 · 과수에서는 통로 · 수형 · 작물 가림과 작업기 접근성을 반영한 자율작업이 요구됨.

– 작업결과와 실패 · 개입 정보를 다시 AI 학습과 계획에 반영하여 데이터-AI-로봇의 폐쇄형 순환체계를 구축할 필요가 있음.

○ 농장 · 지역 서비스 연계: 개별 장비에서 운영체계로

– 농장 단위에서는 FMIS를 중심으로 농기계 · 로봇, 농자재, 에너지와 생산정보를 연결하여 작업계획-실행-기록-분석을 통합 관리하는 구조로 발전할 필요가 있음.

– 지역 단위에서는 농작업 수탁조직이나 임대사업소가 여러 농가의 작업수요를 집계하고, 장비 배정 · 이동 · 충전 · 정비와 작업일정을 최적화하는 서비스 플랫폼으로 확장할 수 있음.

– 기업은 원격관제 · 예지보전 · 부품공급을 제공하고 농가는 작업결과 · 비용 · 품질을 확인할 수 있는 서비스 체계를 구축함으로써 장비 판매 중심에서 운영 · 서비스 중심으로 산업구조를 확장할 필요가 있음.

표 8. AI · 농업로봇 융합기술의 적용 시나리오

시나리오	통합 흐름	핵심 설계과제
노지·다필지	관측 → AI 처방 → 자율농기계·군집로봇 → 물류·자원관리	필지 전환, 농로 이동, 자원제약, 기상·토양 변화
시설·과수	환경·생육 → 정밀방제 → 운반·수확 → 품질관리	가림, 통로·수형, 고습·방수, 작물 손상
축산	개체 모니터링 → 착유·급이·청소 → 건강·생산관리	24시간 가동, 위생, 동물복지, 예지보전
지역 서비스	작업수요 집계 → 장비배정 → 관제 → 정비·정산	가동률, 이동시간, 책임범위, 서비스 수준
통합 플랫폼	데이터 → AI → 로봇 → 에너지·물류 → 생산정보	데이터 권한, 표준·보안, 시스템 상호운용

5 주요 이슈 및 한계

5.1 기술적 한계

○ 농업환경 변화에 대한 강건성 · 일반화

– 농업 AI는 학습지역과 다른 작목 · 품종 · 계절 · 조도 · 토양 · 배경조건에서 성능이 저하될 수 있으며, 실제 농업현장의 먼지 · 비 · 역광 · 진동과 작물의 생육 변화는 인지와 판단의 불확실성을 증가시킴.

– 따라서 평균 정확도뿐 아니라 실패가 발생하는 조건, 불확실성, 장기간 사용에 따른 성능 변화와 오작업이 작물 · 시설에 미치는 영향을 함께 평가해야 함.

○ 자율 농작업의 시스템 안전성

– 농업로봇은 사람 · 동물 · 농기계 · 시설물과 동일한 공간에서 작업하므로 주변 객체 인식뿐 아니라 안전영역, 주행속도, 정지거리와 작업기의 위험까지 포함한 시스템 수준의 안전설계가 필요함.

– 센서 고장, 통신두절과 AI 판단오류 발생 시에도 안전정지와 원격개입이 가능해야 하며, 작업 재개와 복구절차도 검증할 필요가 있음.

○ 고난도 농작업의 기술적 한계

– 수확 · 전정 · 이식 등은 작물의 형태와 위치가 일정하지 않고 가림과 접촉손상이 발생하기 때문에 정형화된 산업로봇 작업보다 기술적 난도가 높음.

– 자율주행 정확도뿐 아니라 작업속도, 힘제어, 성공률, 작물손상과 실제 농작업 품질을 동시에 만족시키는 기술 고도화가 필요함.

○ 농업생산기반과 자율 농작업 조건의 불일치

– 자율 농기계와 농업로봇은 일정 수준 이상의 주행공간, 작업기 회전 · 선회공간, 진입로와 통신환경이 확보될 때 안정적인 성능을 발휘할 수 있으나, 국내 농지는 소규모 · 다필지 · 비정형 구조와 협소한 농로 등으로 인해 장비의 작업효율과 완전자율 운용이 제한될 수 있음.

– 특히 필지 경계가 복잡하거나 선회공간이 부족한 경우 작업경로가 길어지고 비작업 주행과 선회가 증가하며, 대형 자율농기계의 적용성이 낮아질 수 있음. 반대로 지나친 장비 소형화는 작업능률과 경제성을 저하시킬 수 있어 농지조건과 장비규모의 적합성을 함께 고려할 필요가 있음.

– 따라서 자율화 수준을 높이는 기술개발과 함께 필지 형상, 농로 · 진입로, 경사, 통신, 용 · 배수 등 농업생산기반 조건이 로봇의 작업효율 · 안전 · 경제성에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 필요가 있음.

5.2 경제성 및 비용 문제

○ 낮은 가동률과 총소유비용

– 농업로봇은 작목별 작업기간과 농번기가 제한되어 있어 연간 가동률이 낮을 수 있으며, 고가 장비를 개별 농가가 단독으로 활용할 경우 경제성이 확보되기 어려울 수 있음.

– 따라서 다목적 작업기, 지역 간 이동, 작업수탁, 임대 · 리스 및 RaaS(Robot as a Service) 등 장비의 이용시간을 확대할 수 있는 운영방식이 필요함.

○ 농업로봇 경제성 평가체계

– 경제성은 장비가격과 인건비 절감만으로 평가하기보다 초기구입비, 금융비용, 에너지, 작업기, 통신 · 소프트웨어, 정비 · 교육 및 작업중단 비용을 포함한 총소유비용(TCO)을 고려해야 함.

– 이와 함께 적기작업, 작업품질 향상, 농자재 절감과 데이터 활용에 따른 편익을 반영하여 농가 · 작업수탁자 · 기업별 경제적 효과를 구분하여 평가할 필요가 있음.

5.3 확산 장애 요인

○ 현장 데이터 확보와 대표성 부족

– 소규모 · 다필지 농업구조에서는 개별 농가나 연구과제 단위로 충분한 학습데이터를 확보하기 어려우므로 영농조합, 작업수탁조직, 임대사업소, 지역 테스트베드와 상용 농기계 텔레매틱스를 연결하는 데이터 수집체계가 필요함.

– 데이터는 작목 · 지역 · 생육단계와 작업조건의 대표성을 확보하고 정상 사례뿐 아니라 실패 · 복구 · 사람 개입 사례까지 함께 관리해야 함.

○ 융합형 전문인력과 서비스 인프라 부족

– AI · 농업로봇의 개발과 운영에는 농업, 농기계, 로봇, AI, 제어, 안전과 정비를 연결할 수 있는 융합형 전문인력이 필요함.

– 현장에서는 장비 고장 시 농번기 작업 전체가 중단될 수 있으므로 부품공급, 정비, 원격지원, 대체장비와 소프트웨어 업데이트를 포함한 지역 서비스망 구축이 요구됨.

○ 농업인 수용성과 사용성

– 농업인은 복잡한 로봇 프로그램을 직접 설정하기보다 작업목표와 제약조건을 쉽게 입력하고, 장비 상태와 이상상황을 직관적으로 판단할 수 있어야 함.

– 실증단계부터 농업인과 농작업 수탁자의 의견을 반영하여 작업절차, 인터페이스, 교육과 유지보수 체계를 함께 설계할 필요가 있음.

5.4 제도 및 운영체계의 한계

○ 데이터 소유 · 접근 및 활용체계

– 농업인이 제공한 현장 · 농기계 데이터가 특정 사업자나 플랫폼에 종속되지 않도록 데이터 수집 목적, 활용기간, 제3자 제공, 모델학습과 재사용 범위를 명확히 할 필요가 있음.

– 농업인의 데이터 접근성과 이동성을 확보하면서도 기업의 영업비밀, 보안과 서비스 품질을 보호할 수 있는 역할별 · 목적별 접근체계를 마련해야 함.

○ 장비 · 플랫폼 간 상호운용성 부족

– 제조사가 다른 농기계 · 작업기 · 로봇 · FMIS 간 인터페이스가 폐쇄적이면 특정 장비 · 플랫폼에 대한 종속성이 높아지고 중소기업의 기술진입과 서비스 확대가 제한될 수 있음.

– 공통 데이터모델, 표준 API와 ISOBUS 등 기존 농기계 통신표준을 활용하고, 장비 간 호환성 시험과 참조 구현을 확대해야 함.

○ 장기 실증 · 검정체계 부족

– 단기간의 시연이나 제한된 조건에서의 성공만으로 농업로봇의 실제 상용성을 판단하기 어려우므로 한 작기 이상의 장기 실증과 다양한 기상 · 작물 · 지형조건을 포함하는 표준화된 시험체계가 필요함.

– 독립적인 검증을 위해 기준장비와 공통 평가지표를 설정하고, 작업중단 · 고장 · 원격개입 · 정비이력과 안전사고 · 근접사고 데이터를 함께 관리해야 함.

– 실증 결과는 차기 연구개발과 안전 · 성능 검정기준에 지속적으로 환류되어야 함.

○ 스마트농업과 농업생산기반정비의 연계 부족

– 자율 농기계와 농업로봇의 실증 · 보급은 주로 장비와 소프트웨어 성능을 중심으로 추진되고 있으나, 실제 적용성을 좌우하는 필지 형상, 농로, 선회공간, 통신 및 용 · 배수 등 농업생산기반과의 연계는 상대적으로 부족함.

– 모든 농지를 로봇에 맞게 정비하는 방식보다는 작목 · 지역 · 장비 특성을 고려하여 어느 수준의 기반정비가 자율화의 작업효율과 경제성을 높이는지를 분석하고, 스마트농업 실증과 생산기반정비 사업을 연계할 수 있는 기준을 마련할 필요가 있음.

Ⅳ. 산업 및 정책 환경

1 산업 동향

1.1 글로벌 산업 동향

표 9. 글로벌 농업로봇 시장 및 보급 관련 주요 지표

구분	출처	기준연도	시장·보급 규모	전망
농업로봇 시장	Grand View Research	2024	147.4억 달러	2030년 480.6억 달러
농업로봇 시장	IMARC	2025	120억 달러	2034년 413억 달러
농업용 서비스로봇 판매	IFR	2024	약 19,500대	전년 대비 약 6% 감소

○ 글로벌 농업로봇 시장의 성장과 단기 수요 변동

– 글로벌 농업로봇 시장은 노동력 부족, 정밀농업 확대 및 AI · 센서 · 자율주행 기술의 발전에 따라 중장기적으로 성장할 것으로 전망되고 있음. 다만 조사기관별로 무인 트랙터, 드론, 착유로봇, 소프트웨어와 서비스 등의 포함 범위가 달라 시장규모 추정치에는 차이가 있음.

– Grand View Research는 농업로봇 시장을 2024년 약 147억 달러에서 2030년 약 481억 달러로 전망하고 있으며, IMARC는 2025년 약 120억 달러에서 2034년 약 413억 달러로 성장할 것으로 전망하고 있음.

– 한편 IFR에 따르면 2024년 농업용 서비스로봇 판매량은 약 1만 9,500대로 전년 대비 약 6% 감소하였음. 이는 중장기적인 시장 성장 전망과 별개로 농산물 가격, 농가 투자여건, 장비 가동률과 서비스 여건 등에 따라 단기적인 수요 변동이 발생할 수 있음을 보여줌.

○ 장비 판매에서 데이터 · 서비스 결합형 사업으로 확대

– 농업로봇 산업의 가치사슬은 센서 · 반도체 · 구동부품에서 농기계 · 로봇 플랫폼, AI · 운영 소프트웨어, 작업수탁 · 유지보수 및 농장관리 서비스로 확대되고 있음.

– 특히 자율 농기계와 농업로봇에서 발생하는 위치 · 작업 · 장비상태 데이터를 농장관리 플랫폼과 연계하여 작업계획, 원격관제, 예지보전 및 작업이력을 제공하는 서비스의 중요성이 증가하고 있음.

– 농업은 작목별 작업기간이 짧고 계절성이 크기 때문에 장비 판매 외에도 임대 · 리스, 작업면적 기반 요금, 작업수탁과 RaaS(Robot as a Service) 등 장비의 가동률을 높일 수 있는 서

비스형 사업모델의 활용 가능성이 확대되고 있음. IFR 역시 전문 서비스로봇 산업 전반에서 구독 · 임대 방식의 확산을 보고하고 있음.

○ 농기계 · 로봇 · 플랫폼을 중심으로 한 산업 경쟁 확대

– John Deere, CNH, AGCO 등 글로벌 농기계 기업은 농기계와 작업기, 정밀농업 기능 및 데이터 플랫폼을 연계하는 통합 생태계를 강화하고 있음.

– 이와 함께 제초 · 방제 · 수확 · 운반 등 특정 작업에 특화된 로봇기업이 시장에 진입하면서 기존 농기계 기업과 농업로봇 전문기업이 공존하는 산업구조가 형성되고 있음.

– 향후 경쟁력은 개별 장비의 자율주행 성능뿐 아니라 다양한 작업기의 연결성, 데이터 활용, 원격지원 · 정비 및 농장운영 플랫폼과의 통합 수준에 의해 좌우될 가능성이 높음.

○ 개방형 데이터와 상호운용성의 중요성 확대

– 글로벌 대형 농기계 기업이 자사 장비와 플랫폼을 연결한 생태계를 확대하는 한편, 서로 다른 장비와 서비스 간 데이터 이동과 상호운용성을 확보하기 위한 표준과 데이터 공유체계의 중요성도 높아지고 있음.

– 특히 EU는 연결제품에서 생성되는 데이터에 대한 사용자 접근 · 이용 권한을 강화하고 있으며, 농업 분야에서도 신뢰 기반 데이터 공유를 위한 Common European Agricultural Data Space(CEADS)가 구축되고 있음.

1.2 국내 산업 동향

○ 국내 AI · 농업로봇 산업 생태계의 확대

– 국내 AI · 농업로봇 산업은 완성 농기계 기업, 작업기 · 부품기업, 자율주행 · 로봇 전문기업, 스마트팜 · AI 플랫폼, 통신 · 클라우드 기업, 대학 · 연구기관 및 농작업 서비스 조직 등으로 구성되고 있음.

– 기존 농기계 제조 · 정비 기반은 자율 농기계와 농업로봇 확산에 활용할 수 있는 산업적 기반인 반면, 제조사가 다른 농기계 · 작업기 · 플랫폼 간 연결과 소프트웨어 · 데이터 기반 서비스 사업은 상대적으로 확대가 필요한 영역임.

○ 농기계 소유에서 공동이용 · 작업서비스로의 확대

– 국내의 소규모 · 다필지 농업구조에서는 모든 농가가 고가의 자율 농기계와 농업로봇을 개별적으로 보유하기보다 농작업 수탁조직, 영농조합 및 임대사업소 등이 장비를 공동으로 운영하는 방식도 중요한 사업모델이 될 수 있음.

– 농가의 작업수요를 지역 단위로 집계하고 장비의 이동 · 작업 · 충전 · 정비일정을 최적화하면 짧은 작기와 낮은 연간 가동률에 따른 경제성 문제를 보완할 수 있음.

– 장비기업은 농기계 · 로봇 공급과 함께 원격관제 · 정비 · 소프트웨어 서비스를 제공하고, 지역 운영주체가 실제 농작업을 수행하는 장비-서비스 결합형 산업구조의 중요성이 높아질 것으로 예상됨.

○ 국내 산업의 유망 영역

– 국내 농업구조를 고려할 때 소형 · 경량 다목적 플랫폼, 비정형 농지의 경로 · 작업계획, 과수 · 시설 등 작목 특화 로봇, 농기계 탑재형 FMIS, 원격진단 · 예지보전 및 장비 · 데이터 상호운용 기술이 주요 기회영역이 될 수 있음.

– 특히 단일 로봇 제품 개발보다 기존 농기계-작업기-전용로봇-FMIS를 연결하여 농작업 계획과 실행 · 기록을 통합하는 솔루션화가 중요함.

○ 산업 확산을 위한 실증 · 서비스 기반 강화

– 농업로봇의 산업화에는 제품의 기술성능뿐 아니라 농번기의 장비 가동률, 부품수급, 유지보수, 교육, 보험 · 책임과 기술도입 효과에 대한 객관적인 검증이 중요함.

– 현장 실증에서는 주행 정확도나 작업 성공 여부뿐 아니라 노동시간, 농자재 사용량, 작업품질, 고장 · 개입시간과 총소유비용(TCO) 등을 공통 지표로 축적할 필요가 있음.

– 이러한 실증결과를 표준화된 형태로 축적하면 농가뿐 아니라 작업수탁 조직, 금융 · 보험기관 및 장비기업이 기술도입의 경제성과 위험을 판단하는 기반으로 활용할 수 있음.

2 국내외 정책 동향

2.1 국외 정책 동향

○ EU: 농기계 데이터 접근권과 농업 데이터 공유체계 강화

– EU Data Act는 2025년 9월 12일부터 적용되고 있으며, 연결된 장비에서 생성되는 데이터에 사용자가 접근 · 이용하고 제3자와 공유할 수 있는 제도적 기반을 강화하였음. 농업과 같이 연결 농기계가 확대되는 산업에서는 장비 성능 · 작업데이터의 활용과 유지보수 서비스 경쟁에도 영향을 줄 수 있음.

– EU는 Common European Agricultural Data Space(CEADS)를 통해 농업인, 농기계기업, 데이터서비스기업 및 공공기관이 신뢰할 수 있는 환경에서 데이터를 공유 · 활용하는 체계를 구축하고 있으며, 데이터 주권 · 상호운용성과 AI 활용 기반을 주요 요소로 다루고 있음.

– 농약 사용기록은 EU 시행규칙 2023/564에 따라 2026년부터 전자기록 체계가 적용되나, 2025년 개정된 시행규칙 2025/2203은 회원국이 2027년 1월 이전 사용분에 대해서는 정해진 전자형식으로의 전환을 유예할 수 있도록 하였음.

○ 미국: 장기 테스트베드와 AI · 자동화 R&D 확대

– 미국은 USDA NIFA를 중심으로 AI · 자동화 · 로봇 및 데이터 기반 농업기술의 연구와 실증을 추진하고 있으며, 대학 · 기업 · 농업현장을 연계하는 연구체계를 운영하고 있음.

– NIFA의 Farm of the Future는 정밀농업, 스마트 자동화와 데이터 연결을 실제 농업환경에서 시험하는 테스트베드 · 실증 프로그램으로, 자율로봇 · AI · 원격탐사 · IoT 등의 통합적인 현장 검증을 목표로 하고 있음.

– 이러한 정책은 개별 장비의 개발을 넘어 농가 현장에서 기술의 생산성, 지속가능성과 경제성을 장기간 검증하는 실증 인프라의 중요성을 보여줌.

○ 일본: 스마트농업 기술과 생산방식의 동시 혁신

– 일본은 스마트농업 실증사업과 농업데이터 연계기반 WAGRI를 통해 농업데이터 · ICT · 로봇 기술의 현장 적용을 확대해 왔으며, WAGRI는 2019년부터 공공 · 민간 농업데이터의 연계 · 활용 기반으로 운영되고 있음.

– 2024년에는 「스마트농업기술활용촉진법」을 제정 · 시행하여 스마트농업 기술의 도입과 이에 적합한 새로운 생산방식의 도입을 함께 지원하고 있으며, 인증을 받은 농업인과 사업자를 대상으로 금융 등의 지원수단도 운영하고 있음.

– 이는 농업로봇을 기존 재배방식에 단순히 추가하는 데 그치지 않고 재식거리 · 작업절차 · 시설 구조와 같은 생산방식을 기술에 맞게 함께 개선하는 정책방향이라는 점에서 참고할 수 있음.

– 또한, 일본은 스마트농업 기술의 보급과 함께 자율주행 농기계의 성능을 높일 수 있도록 농지 대구획화, 포장 균평화, 경사 완화, 자동급수 및 정보통신환경 등 농업생산기반의 정비를 병행하고 있음.

– 농림수산성은 「자율주행 농기계 등에 대응한 농지정비 지침」을 마련하였으며, 스마트농업 기술활용촉진법의 인정계획에서도 자동조향 농기계와 대구획화 · 균평화를 함께 도입하는 사례가 나타나고 있음.

○ 주요국 정책의 공통 방향

– 주요국의 정책은 AI · 농업로봇 장비 자체의 연구개발뿐 아니라 농업데이터, 실증 테스트베드, 상호운용성, 교육 · 서비스 및 제도적 활용체계를 함께 구축하는 방향으로 확대되고 있음.

– 특히 기술을 실제 농업생산에 적용하기 위해 개별 장비의 성능평가뿐 아니라 농업현장의 작업효율, 경제성, 안전성과 데이터 활용을 함께 검증하는 정책수단이 중요해지고 있음.

2.2 국내 정책 동향

○ 스마트농업 법 · 제도 및 기본계획 구축

- 국내에서는 「스마트농업 육성 및 지원에 관한 법률」을 기반으로 스마트농업 기술개발 · 보급, 전문인력, 기자재 · 서비스 산업, 표준화와 농업데이터 활용을 포함하는 정책체계를 구축하고 있음.
- 정부는 2025년 「제1차 스마트농업 육성 기본계획(2025~2029년)」을 수립하였으며, 이에 따라 2026년 스마트농업 육성 시행계획도 수립 · 공표되어 정책을 연차적으로 추진하고 있음. 은 농업 · 산림 분야의 활용 수요 발굴과 산출물 생산 · 정책 적용을 담당함.

○ 노지 스마트농업과 농업로봇 현장 실증 확대

- 2026년에는 충남 당진, 전북 고창, 전남 고흥 · 진도, 경북 의성 등 5개 지역이 노지 스마트농업 육성지구로 선정되어 작물 생육 · 용수 · 재배환경 관리 등 노지 스마트농업 솔루션의 지역 단위 적용이 추진되고 있음.
- 농림축산식품부와 농촌진흥청은 2026년 6월 민관협력 농업로봇 연구협의체를 출범시켜 파종 · 정식 · 제초 · 방제 · 수확 등 노동집약적 농작업의 자동화 · 무인화를 위한 AI · 로봇 · 드론 R&D 협력체계를 구축하고 있음.
- 이러한 정책은 개별 기술개발 중심에서 실제 작목 · 지역의 생산체계와 AI · 로봇을 연계하는 현장 실증 중심으로 정책 범위가 확대되고 있음을 보여줌.

○ 보급 중심에서 성과 중심의 실증체계로 전환 필요

- 향후 AI · 농업로봇 정책에서는 단순한 장비 보급대수뿐 아니라 작업면적, 실제 가동률, 노동시간 절감, 농자재 사용량, 작업품질, 고장 · 복구와 원격개입 등 현장 성과를 함께 평가하는 체계가 중요함.
- 또한 단기간의 실증사업 종료 후 장비 활용이 중단되지 않도록 지역 운영주체, 유지보수와 부품공급, 사용자 교육 및 후속 서비스까지 포함하는 지속적인 운영모델을 검토할 필요가 있음.

○ 농업 데이터 활용 · 상호운용 체계 구축

- 자율 농기계와 농업로봇에서 생성되는 작업데이터의 활용이 확대됨에 따라 농업인의 데이터 접근성과 활용권, 기업의 데이터 보안과 서비스 경쟁력을 균형 있게 고려하는 데이터 거버넌스 체계가 요구됨.
- 단순한 데이터 공개보다는 농업인 · 기업 · 연구기관과 공공기관이 역할과 권한에 따라 데이터를 안전하게 공유할 수 있는 신뢰 기반 농업 데이터 공유 · 활용체계를 구축하는 것이 중요함.

○ 농업로봇 안전 · 성능 검정체계 고도화

- 자율 농기계의 안전성을 확보하기 위해서는 국제 안전표준과 국내 농업환경을 연계한 시험 · 검정체계를 구축할 필요가 있음.
- 특히 국내의 좁은 농로와 비정형 필지, 사람과 농기계가 혼재하는 작업환경, 시설 · 과수의

제한된 작업공간 등을 반영하여 장애물 인식, 안전정지, 통신두절, 센서고장과 작업기 위험을 평가할 수 있는 시험 시나리오가 필요함.

- 중장기적으로는 AI 모델 · 소프트웨어 업데이트, 원격제어와 다로봇 협업 등 기존 농기계 안전기준에서 충분히 다루기 어려운 새로운 기능에 대한 검증방식도 함께 검토할 필요가 있음.

표 10. 국내외 AI · 농업로봇 주요 정책수단 및 시사점

국가/지역	주요 정책수단	시사점
대한민국	스마트농업법·제1차 기본계획, 노지 스마트농업 육성지구, 민관 농업로봇 R&D 협의체	현장 실증, 데이터·표준, 서비스 운영 및 안전·성능 검정 연계
EU	Data Act, CEADS, 농약 사용 전자기록 제도	농기계 데이터 접근·이동권, 상호운용성, 작업이력·추적성 강화
미국	USDA/NIFA AI·자동화 R&D, Farm of the Future	대학–기업–농가 연계 테스트베드와 장기 현장검증
일본	스마트농업 실증, WAGRI, 스마트농업기술활용촉진법, 스마트농업 대응 농업생산기반정비	소농·고령화 대응, 서비스 사업자 육성, 농업기술과 생산방식·농지기반의 동시 혁신

Ⅴ. 결론 및 제언

1 주요 동향 및 시사점

○ AI · 농업로봇은 센서와 자동조향 중심의 개별 자동화에서 벗어나 농업 데이터의 수집 · 분석, AI 기반 의사결정과 농기계 · 로봇의 물리적 실행이 연결되는 피지컬 AI 기반 농업생산체계로 발전하고 있음. 영상 · 기상 · 토양 · 생육 · 농기계 작업데이터를 바탕으로 AI가 작업을 판단하고, 자율농기계와 농업로봇이 이를 실행하며, 작업결과가 다시 학습과 농장운영에 활용되는 데이터-AI-로봇 순환구조의 중요성이 확대되고 있음.

○ 기술발전의 범위도 단일 농기계의 자율주행에서 상호운용 가능한 농업데이터, 멀티모달 · 파운데이션 AI, 작업기 · 매니퓰레이터 지능, 다로봇 임무관리, 안전 · 보안 · 검정 및 운영서비스로 확대되고 있음. 이에 따라 AI · 농업로봇의 현장 적용은 개별 기술의 성능뿐 아니라 데이터-AI-로봇-생산기반-서비스를 하나의 시스템으로 연결하는 능력과 밀접하게 관련될 것으로 판단됨.

표 11. AI · 농업로봇 주요 동향과 핵심 시사점

영역	주요 동향	핵심 시사점
기술체계	자동조향·개별 자동화에서 데이터-AI-로봇이 연결되는 자율 농작업 체계로 발전	인지-판단-계획-제어-작업결과를 연결하는 통합기술체계 검토
AI·데이터	단일 센서 기반 모델에서 멀티모달 AI, 파운데이션 모델 및 에이전트로 확대	공통 농업데이터와 작업·로봇 로그 축적 및 작목·지역 간 일반화 기반 확보
자율농작업	자동조향에서 환경인지·재계획·정밀 작업기 제어·다로봇 협업으로 발전	주행성능과 함께 작업품질·강건성·복구·원격개입을 포함한 현장성능 검증
농업생산기반	농기계 성능 향상과 함께 포장구조·농로·통신·수관리 등 작업환경의 스마트화 확대	로봇 자체와 농지·시설을 함께 고려하는 로봇 친화형 생산기반 검토
산업·서비스	장비 판매에서 원격운영·예지보전·작업수탁·RaaS·FMIS 서비스로 확대	가동률·ROI와 지역 서비스망을 포함한 사업모델 검증
표준·안전·정책	장비 연결과 AI 업데이트 확대에 따라 상호운용성·안전·보안 중요성 증가	공통 인터페이스, 장기 실증 및 성능·안전 검정체계와 연계

1.1 AI · 농업로봇 활용 확대의 배경과 전환 조건

○ 농업 노동력 감소와 농업환경 변화에 대응하는 자율 농작업 수요

– 농업인구 감소와 고령화, 숙련 농작업 인력 부족은 반복적 · 고위험 농작업의 자동화와 제한

된 인력을 활용한 농장 운영의 필요성을 높이고 있음.

- 기상 · 토양 · 작물 상태가 지속적으로 변하는 농업환경에서는 사전에 설정된 경로와 작업조건을 반복하는 자동화만으로 대응하기 어려우며, 현장상황을 인식하고 경로와 작업조건을 조정하는 적응형 자율 농작업의 중요성이 증가하고 있음.
- 국내의 소규모 · 다필지 · 비정형 농업환경은 대형 자율농기계뿐 아니라 소형 · 경량 플랫폼, 작목 특화 작업기, 다로봇 협업과 지역 단위 공동이용 · 작업수탁 등 다양한 기술 · 운영방식을 검토할 수 있는 조건을 형성하고 있음.

○ 데이터 · AI · 로봇 기술의 융합 기반 형성

- RTK-GNSS, 카메라, LiDAR, 농기계 전자제어와 통신기술의 발전으로 농업현장에서 위치 · 작물 · 환경 · 장비상태 및 작업결과를 지속적으로 수집할 수 있는 기반이 확대되고 있음.
- 농업 AI는 개별 작물의 분류 · 예측에서 영상 · 시계열 · 지리공간 · 자연어와 로봇 상태를 함께 활용하는 멀티모달 AI로 발전하고 있으며, AI의 판단을 실제 로봇 행동과 연결하는 피지컬 AI와 VLA 기술도 연구되고 있음.
- 이에 따라 농업로봇은 무인 이동장비를 넘어 농장 데이터를 이용하여 판단하고 실제 농작업을 수행하며 작업결과를 다시 데이터로 환류하는 농장 운영의 실행수단으로 역할이 확대될 가능성이 있음.

○ 농기계 중심에서 농업생산기반과의 공동 최적화로 전환

- 자율 농기계와 농업로봇의 작업성능은 장비 자체의 인지 · 주행 성능뿐 아니라 필지의 크기와 형상, 선회공간, 농로, 경사, 통신환경 및 용 · 배수시설 등의 영향을 받음.
- 일본은 「자율주행 농기계 등에 대응한 농지정비 지침」을 마련하여 수전 · 밭뿐 아니라 중산간지역과 과수원까지 고려한 농지정비 방향을 제시하고 있으며, 스마트농업 기술 활용을 위한 대구획화, 경사 완화, 정보통신환경 및 자동급수시설 등의 정비를 정책적으로 연계하고 있음.
- 최근 일본의 스마트농업기술활용촉진법 인정 사례에서도 자동조향 트랙터의 효율을 높이기 위해 논두렁 제거를 통한 포장 대구획화 또는 균평화를 생산방식 혁신과 함께 추진하고 있음. 이는 농업로봇 확산에서 ‘로봇을 농지에 적응시키는 접근’과 ‘농지를 로봇에 적합하게 정비하는 접근’을 병행하는 사례로 볼 수 있음.

○ 기술개발에서 현장 운영체계로의 전환

- AI · 농업로봇의 활용성을 판단하기 위해서는 제한된 실증환경에서의 일회성 성공뿐 아니라 작기 전체의 가동률, 작업품질, 고장 · 복구, 원격개입, 유지보수와 경제성을 함께 확인할 필요가 있음.

– 농기계-작업기-FMIS-클라우드 간 연결뿐 아니라 사용자 교육, 부품공급 · 정비와 원격지원이 함께 구성될 때 실제 농업현장에서 지속적인 운영이 가능함.

1.2 기술 · 산업 · 정책 분야 동향 분석과 주요 시사점

○ 기술체계: 개별 자동화에서 자율 농작업 시스템으로

– 기존 자동화는 작업자가 경로와 작업조건을 설정하고 장비가 이를 정확하게 수행하는 방식이 중심이었으나, AI · 농업로봇은 작업목표와 현장상태를 인식하고 경로 · 작업순서와 작업조건을 변경하는 자율 농작업으로 발전하고 있음.

– 기술개발 범위도 주행 정확도에서 환경인지, 작업계획 · 재계획, 안전판단, 작업기 · 매니퓰레이터 제어와 작업결과 확인이 연결된 시스템으로 확대되고 있음.

– 이에 따라 기술수준을 판단할 때 무인주행 가능 여부뿐 아니라 실제 농작업의 완결성, 작업품질과 다양한 농업환경에서의 강건성을 함께 고려하는 것이 중요함.

○ AI · 데이터: 개별 모델에서 파운데이션 모델 · 에이전트로

– 농업 AI는 작물 · 병해충 · 잡초 등을 개별적으로 인식하는 모델에서 영상 · 기상 · 토양 · 지리공간 · 농기계 상태 및 작업이력을 통합하는 멀티모달 AI로 발전하고 있음.

– 파운데이션 모델은 작목 · 지역별 개별모델을 모두 대체하기보다 여러 농업문제에서 재사용 가능한 공통 표현을 제공하고 새로운 지역과 작목에 적은 데이터로 적응하는 기반으로 활용될 가능성이 있음.

– 중장기적으로 농장상태와 작업목표를 이해하고 임무를 생성 · 분해 · 재계획하는 농업 에이전트가 발전할 경우, 데이터 표준과 AI-로봇 간 공통 인터페이스의 중요성도 함께 증가할 것으로 예상됨.

○ 자율농작업: 단일 장비에서 다기종 협업으로

– 농업로봇은 단일 농기계의 주행자동화에서 제초 · 방제 · 수확 · 운반 등 실제 작업기 제어와 여러 종류의 장비가 협업하는 형태로 확대되고 있음.

– 다기종 협업에서는 작업구역 분배뿐 아니라 충전 · 보급 · 하역 · 작업기 교체와 고장 발생 시 임무 재분배를 포함하는 자원 · 플릿 운영기술이 중요해지고 있음.

– 대형 농기계와 소형 · 경량 군집로봇의 적용효과는 작업능률, 에너지, 토양 압밀, 가동률과 경제성 등을 동일한 조건에서 비교하는 방식으로 검토할 수 있음.

○ 농업생산기반: 기계 성능과 작업환경의 공동설계

– 자율주행 · 로봇 기술이 고도화되더라도 지나치게 작은 필지, 협소한 진입로 · 선회공간, 큰 경사와 불안정한 통신환경은 장비의 작업효율과 무인운영 범위를 제한할 수 있음.

– 일본은 농지의 대구획화와 턴 농로, 자동급수시설 등의 기반정비를 스마트농업 도입과 연계해 왔으며, 농림수산성은 과거 스마트농업 구현이 가능한 기반정비 비율을 정책지표로 설정한 바 있음.
– 2026년도 관련 사업에서도 스마트농업에 적합한 대구획화와 농업구조 전환을 위한 기반정비 지원이 이어지고 있음.
– 이러한 사례는 AI · 농업로봇 기술의 실증 · 보급을 검토할 때 기계와 AI뿐 아니라 필지 · 농로 · 통신 · 수관리 등 생산기반 조건을 함께 분석하는 관점을 추가할 수 있음을 보여줌.

○ 산업 · 서비스: 장비 판매에서 운영 서비스로
– 농업로봇은 계절성과 짧은 작업기간으로 장비의 연간 가동률이 제한될 수 있으므로 작업수탁 · 공동이용 · 임대 · 리스와 RaaS 등 다양한 운영모델의 중요성이 증가하고 있음.
– 농기계 · 로봇기업의 경쟁요소도 장비 성능에서 원격진단 · 예지보전, 소프트웨어 업데이트, FMIS 연계와 지역 유지보수체계를 포함하는 서비스 능력으로 확대되고 있음.

○ 정책 · 실증: 개별 기술 실증에서 생산체계 단위 검증으로
– 특정 조건에서의 성공적인 시연만으로 농업로봇의 상용성을 판단하기 어려우므로 작목 · 지역 · 기상과 생산기반 조건을 반영한 장기 실증과 공통 평가체계가 중요함.
– 장비 보급대수나 시제품 수와 함께 실제 작업면적, 가동률, 작업품질, 노동 · 농자재 사용, 고장 · 복구, 농가 · 서비스사업자의 경제적 성과와 데이터 재사용 가능성 등 다양한 지표를 활용할 수 있음.
– 특히 일본의 사례처럼 스마트농업 기술과 포장 대구획화 · 균평화 등 생산방식 및 생산기반의 변화를 동시에 실증하는 접근도 비교대상으로 활용할 수 있음.

2 정책 및 R&D 전략

2.1 R&D 투자 방향

○ 농업 데이터 · AI 공통기반 구축
– 농업 환경 · 생육 · 작업 · 농기계 상태와 로봇 행동 데이터를 연계할 수 있는 공통 데이터모델과 인터페이스를 구축하고, 이를 기반으로 멀티모달 농업 AI와 파운데이션 모델을 단계적으로 개발할 필요가 있음.

○ 현장 강건성과 작업지능 고도화
– 먼지 · 악천후 · 역광 · 통신두절 · 센서고장 등 실제 농업환경에서 안정적으로 작동하는 자율주행 · 안전기술을 확보하고, 파종 · 제초 · 방제 · 수확 등 실제 작업품질을 결정하는 작업

기 · 매니퓰레이터 제어기술을 강화해야 함.

○ 다로봇 협업과 자원운영 기술 확보

– 단일 장비의 자율화에서 벗어나 다수 농기계 · 로봇의 작업구역 배분, 임무 재계획, 충전 · 보급 · 하역 등을 통합하는 플릿 운영기술을 개발하고, 대형 농기계와 소형 군집로봇의 적용효과를 현장에서 비교 · 검증할 필요가 있음.

○ 농업생산기반과 연계한 통합 연구

– 자율농기계의 성능은 필지 형상, 농로, 선회공간, 경사, 통신 및 용 · 배수 조건의 영향을 받으므로 로봇 기술과 함께 로봇 친화형 농업생산기반 및 재배환경의 설계 · 정비 효과를 분석하는 연구도 병행할 필요가 있음.

◘ 개별 AI · 로봇 개발을 넘어 **데이터-AI-로봇-작업기-농업생산기반을 연계한 현장중심 통합 R&D 추진**

– 개별 AI 알고리즘이나 자율주행 · 로봇 플랫폼 개발 중심의 연구에서 벗어나, 농업데이터 수집-AI 기반 영농 의사결정-자율 농작업 실행-작업결과 분석 및 피드백을 연계하는 통합 R&D 체계로 확대.

– 이를 위해 토양 · 기상 · 작물 생육 및 농작업 데이터를 활용한 멀티모달 농업 AI, 농작업 계획 · 재계획 및 정밀처방 기술, 자율주행 농기계와 작업기의 통합제어, 다수 로봇의 협업 · 운영관리 기술을 중점 개발하고, 농장관리정보시스템(FMIS)과 연계하여 실제 영농에 활용할 수 있는 기술체계를 구축해야 함

– 예를 들면, 수도작 자율 경운 · 이앙 · 시비, 밭작물 정밀 파종 · 제초, 과수 정밀방제 · 수확 등 작목 · 농작업별 실용화 과제를 중심으로 농업인, 농기계 · 농자재 기업, AI · 로봇 기업, 대학 및 연구기관이 공동 참여하는 통합 실증형 R&D를 추진함.

2.2 기술 확산 및 산업화 전략

○ 공통 시험기준 기반의 장기 실증 확대

– 지역 · 작목별 테스트베드에 공통 시험 시나리오와 KPI를 적용하고, 작기 단위로 가동률 · 작업품질 · 고장 · 복구 · 안전성과 경제성을 검증하여 실증결과가 후속 R&D와 검정으로 환류되도록 해야 함.

○ 공동이용 · 작업수탁 중심의 보급모델 다양화

– 소규모 농업구조를 고려하여 개별 구매뿐 아니라 작업수탁 · 공동이용 · 임대 · 리스 · RaaS 등의 운영모델을 확대하고, 장비의 실제 작업면적과 가동률을 높일 수 있는 지역 단위 서비스체계를 검토할 필요가 있음.

○ 경제성과 서비스 경쟁력 검증

– 장비가격뿐 아니라 에너지 · 소프트웨어 · 정비 · 교육 · 작업중단 비용을 포함하는 총소유비용(TCO)과 노동 · 농자재 절감, 적기작업과 품질향상 등의 편익을 함께 평가할 필요가 있음.

○ 로봇 친화형 생산기반과의 연계 실증

– 기존 포장과 정비된 포장을 비교하여 필지 규모 · 형상, 농로 · 선회공간, 통신 · 수관리 조건이 자율농기계의 작업효율과 경제성에 미치는 영향을 검증하고, 스마트농업 기술과 생산기반 정비의 연계 가능성을 검토할 필요가 있음.

◘ 농업로봇의 산업화는 실제 농번기의 **가동률 · 경제성 · 서비스성과**를 검증하고, 지역 단위 운영모델을 확보하는 방향으로 추진할 필요가 있음.

– 농업로봇의 산업화는 시제품 개발이나 장비 보급대수 중심에서 벗어나, 실제 농번기의 작업능률 · 가동률 · 경제성 · 안전성 및 유지관리 서비스 성과를 검증하는 방향으로 전환.

– 지역 · 작목별 실증단지에서 한 작기 이상 실제 영농작업을 수행하면서 단위면적당 작업시간, 작업누락 · 중복률, 농자재 및 노동력 절감, 고장 · 복구시간 등을 공통 성과지표로 평가하고, 실증결과를 제품개선과 후속 연구개발에 반영하는 체계를 구축.

– 국내의 소규모 · 다필지 농업구조를 고려하여 농기계 임대사업소, 농작업 대행조직, 영농조합 및 농업법인 등이 참여하는 지역 단위 농업로봇 공동이용 · 작업수탁 서비스 모델을 실증할 필요가 있음. 농기계 · 로봇 제조기업은 원격관제, 예지정비, 부품공급 및 소프트웨어 업데이트를 지원하고, 지역 운영주체는 작업수요 집계, 장비 배정, 이동 · 충전 · 정비를 통합 관리함으로써 장비 가동률을 높이고 지속 가능한 서비스 산업을 육성.

2.3 기반 구축 및 제도 개선

○ 농업 데이터 공유 · 활용체계 구축

– 농가 · 기업 · 연구기관이 역할에 따라 데이터를 활용할 수 있도록 공통 데이터모델과 접근 · 이용 기준을 마련하고, 기존 FMIS · 기업 플랫폼 · 공공 데이터 시스템이 상호 연결될 수 있는 기반을 구축할 필요가 있음.

○ 성능 · 안전 · 상호운용 검정체계 고도화

– 농업로봇의 기계안전과 장애물 보호뿐 아니라 작업기 위험, 통신두절, 원격제어, 다로봇 협업과 AI · 소프트웨어 업데이트까지 고려하는 단계적 검정체계가 필요함.

○ 스마트농업과 농업생산기반정비의 연계

– 자율농기계와 농업로봇의 적용성을 높이기 위해 필지 · 농로 · 용배수 · 통신 등 생산기반 조건을 함께 고려하고, 어느 수준의 기반정비가 자율화의 작업효율과 경제성을 높이는지 실증을 통해 기준을 마련할 필요가 있음.

○ 전문인력과 공공 R&D 성과 활용기반 확충

– AI · 로봇 연구자뿐 아니라 시스템 통합 · 정비 · 운영 인력을 양성하고, 공공 R&D에서 생성되는 데이터, 시험 시나리오, 성능 · 실패사례 등을 후속 연구와 산업에서 재사용할 수 있도

록 체계적으로 축적할 필요가 있음.

◘ **공공 농업데이터 플랫폼, 상호운용 · 안전기준 및 농업생산기반 정비**를 연계한 데이터기반 농업 플랫폼 구축

- AI · 농업로봇의 지속적인 활용과 국내 농산업 기업의 경쟁력 확보를 위해 공공 농업데이터의 개방 · 활용체계, 장비 · 플랫폼 간 연결성, 안전 · 성능 검증 및 로봇 친화형 농업생산기반을 함께 정비할 필요가 있음.
- 농촌진흥청 등 공공기관은 토양 · 기상 · 작물 · 병해충 · 농지 관련 기초데이터의 구축 · 품질관리와 공공데이터 활용 플랫폼 운영에 중점을 두고, 농기계 · 농약 · 비료 · 농업 AI 기업은 이를 활용하여 정밀 파종 · 시비 · 방제 처방, 생육 · 수량 예측, 자율 농작업 관리 등 다양한 영농솔루션과 상용 서비스를 개발하도록 지원하는 체계가 필요함.
- 기업별 고유 데이터 규격을 인정하면서도 공통 API, 데이터 변환 게이트웨이와 최소 교환규격을 통해 공공데이터와 기업 플랫폼을 연결하는 개방형 활용체계를 구축할 필요가 있음.

참고문헌

○ 국가법령정보센터. (2026). 「스마트농업 육성 및 지원에 관한 법률」 [시행 2026.1.23., 법률 제21000호, 2025.7.22. 일부개정]. 국가법령정보센터 원문

○ 농림축산식품부. (2025). 제1차 스마트농업 육성 기본계획(2025~2029). 기본계획 원문

○ 농림축산식품부. (2025). 2026년 스마트농업 육성 시행계획. 시행계획 원문

○ 농림축산식품부. (2026). 지역단위 밭작물(노지) 스마트농업을 이끌어갈 핵심 선도 지구 선정! [보도자료, 2026.3.3.]. 보도자료

○ 농림축산식품부 · 농촌진흥청. (2026). 농작업 부담을 덜어주는 농업로봇 개발을 위한 R&D 협의체 출범 [보도자료, 2026.6.22.]. 보도자료

○ 농촌진흥청. (2023). 과수원 잡초 제거도 '로봇'이 척척 [보도자료, 2023.11.1.]. 농촌진흥청 자료

○ 농촌진흥청. (2024). "로봇이 로봇을 돕다" 과수원 농업 로봇의 진화 [보도자료, 2024.7.18.]. 농촌진흥청 자료

○ 통계청. (2025). 2024년 농림어업조사 결과 [보도자료, 2025.4.17.]. 통계자료

○ 환경부 · 기상청. (2025). 한국 기후위기 평가보고서 2025. 발간자료

○ 한국지능정보사회진흥원(NIA). (2025). 『2045 대한민국 디지털路 혁신전략 보고서』 제7권 「인공지능 기반의 스마트농업 혁신: 국내외 활용사례와 정책방향」 (구자헌 집필). NIA 보고서

○ International Federation of Robotics (IFR). (2025). World Robotics 2025 – Service Robots. IFR 발표자료

○ International Organization for Standardization (ISO). (2024). ISO 18497-1:2024, Agricultural machinery and tractors — Safety of partially automated, semi-autonomous

and autonomous machinery — Part 1: Machine design principles and vocabulary. ISO 18497-1

○ ISO. (2024). ISO 18497-2:2024, Agricultural machinery and tractors — Safety of partially automated, semi-autonomous and autonomous machinery — Part 2: Design principles for obstacle protection systems. ISO 18497-2

○ ISO. (2024). ISO 18497-3:2024, Agricultural machinery and tractors — Safety of partially automated, semi-autonomous and autonomous machinery — Part 3: Autonomous operating zones. ISO 18497-3

○ ISO. (2024). ISO 18497-4:2024, Agricultural machinery and tractors — Safety of partially automated, semi-autonomous and autonomous machinery — Part 4: Verification methods and validation principles. ISO 18497-4

○ ISO. (2015; confirmed 2026). ISO 11783-10:2015, Tractors and machinery for agriculture and forestry — Serial control and communications data network — Part 10: Task controller and management information system data interchange. ISO 11783-10

○ ISO. (2018–2019). ISO 25119 series, Tractors and machinery for agriculture and forestry — Safety-related parts of control systems. ISO 25119 series 안내

○ Agricultural Industry Electronics Foundation (AEF). (2025). AgIN Common Connector - Integration Phase [23 April 2025]. AEF 자료

○ Agricultural Industry Electronics Foundation (AEF). (n.d.). Agricultural Interoperability Network (AgIN). (접속일: 2026.9.21.). AgIN 공식자료

○ European Commission. (2025). Data Act: Regulation on harmonised rules on fair access to and use of data. 적용일 2025.9.12. European Commission Data Act

○ European Commission. (2024). Policy brief - Rolling out the Common European Agricultural Data Space. CEADS Policy Brief

○ European Commission. (2023). Commission Implementing Regulation (EU) 2023/564 of 10 March 2023 as regards the content and format of the records of plant protection products kept by professional users. EUR-Lex 원문

○ European Commission. (2025). Commission Implementing Regulation (EU) 2025/2203 of 31 October 2025 amending Implementing Regulation (EU) 2023/564 as regards the transfer into electronic format of records of plant protection products. EUR-Lex 원문

○ U.S. Department of Agriculture, National Institute of Food and Agriculture (USDA NIFA). (n.d.). Farm of the Future. (접속일: 2026.9.21.). USDA NIFA 자료

○ 일본 농림수산성(MAFF). (2023).「自動走行農機等に対応した農地整備の手引き」(자율주행 농

기계 등에 대응한 농지정비 지침), 2023년 3월 일부개정. 일본 농림수산성 지침
○ 일본 농림수산성(MAFF). (2024).「スマート農業技術活用促進法について」(스마트농업기술활용촉진법 관련 자료). MAFF 정책자료
○ 일본 농림수산성 농림수산기술회의. (2019-).「スマート農業実証プロジェクト」(스마트농업 실증 프로젝트). (접속일: 2026.9.21.). 스마트농업 실증사업
○ 일본 농업・식품산업기술종합연구기구(NARO). (2019).「データ駆動型農業を推進する農業データ連携基盤(WAGRI)の本格運用」. WAGRI 자료
○ 일본 농림수산성(MAFF). (2025).「農業の生産性の向上のためのスマート農業技術の活用の促進に関する法律」に基づく生産方式革新実施計画の認定について [보도자료, 2025.3.28.]. 생산방식 혁신계획 인정 사례
○ 일본 농림수산성(MAFF). (2026).「農地の整備」: 大区画化等加速化支援事業 등 농업생산기반정비 관련 자료. 2026년 농지정비 사업자료
○ Grand View Research. (2024). Agricultural Robots Market Size, Share & Trends Report, 2030. 시장보고서
○ IMARC Group. (last update: 2026.8.25.). Agricultural Robots Market Size, Share, Trends and Forecast by Product Type, Application, Offering, and Region, 2026-2034. 시장보고서
○ John Deere. (n.d.). John Deere Operations Center™ – Features. (접속일: 2026.9.21.). John Deere Operations Center
○ Climate LLC/Bayer. (n.d.). Climate FieldView™ – Digital Farming Solutions. (접속일: 2026.9.21.). Climate FieldView
○ Cropin. (n.d.). Cropin Grow (SmartFarm Plus): Farm ERP & Digitization Platform. (접속일: 2026.9.21.). Cropin Grow
○ CropX Technologies. (n.d.). CropX Agronomic Farm Management System. (접속일: 2026.9.21.). CropX
○ AgXeed. (n.d.). AgXeed Autonomous Farming Solutions and AgBot. (접속일: 2026.9.21.). AgXeed
○ FarmDroid. (n.d.). FarmDroid FD20: Autonomous Farming Robot for Precision Agriculture. (접속일: 2026.9.21.). FarmDroid FD20
○ Lely. (n.d.). Astronaut A5 Next Automatic Milking Robot. (접속일: 2026.9.21.). Lely Astronaut
○ GEA. (n.d.). DairyFeed F4500 Feeding Robot. (접속일: 2026.9.21.). GEA DairyFeed F4500
○ 대동로보틱스. (n.d.). 운반로봇 RT100-TA 제품자료. (접속일: 2026.9.21.). RT100-TA 제품자료

○ HADA. (n.d.). PURIDA 과수 방제로봇 제품자료. (접속일: 2026.9.21.). PURIDA 제품자료
○ Pedersen, S. M., Fountas, S., Have, H., & Blackmore, S. (2006). Agricultural robots—system analysis and economic feasibility. Precision Agriculture, 7(4), 295-308. doi: 10.1007/s11119-006-9014-9.
○ Slaughter, D. C., Giles, D. K., & Downey, D. (2008). Autonomous robotic weed control systems: A review. Computers and Electronics in Agriculture, 61(1), 63-78. doi: 10.1016/j.compag.2007.05.008.
○ Bac, C. W., van Henten, E. J., Hemming, J., & Edan, Y. (2014). Harvesting robots for high-value crops: State-of-the-art review and challenges ahead. Journal of Field Robotics, 31(6), 888-911. doi: 10.1002/rob.21525.
○ Bechar, A., & Vigneault, C. (2016). Agricultural robots for field operations: Concepts and components. Biosystems Engineering, 149, 94-111. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2016.06.014.
○ Shockley, J. M., Dillon, C. R., & Shearer, S. A. (2019). An economic feasibility assessment of autonomous field machinery in grain crop production. Precision Agriculture, 20(5), 1068-1085. doi: 10.1007/s11119-019-09638-w.
○ Liu, B., & Bruch, R. (2020). Weed detection for selective spraying: A review. Current Robotics Reports, 1(1), 19-26. doi: 10.1007/s43154-020-00001-w.
○ Ju, C., Kim, J., Seol, J., & Son, H. I. (2022). A review on multirobot systems in agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 202, 107336. doi: 10.1016/j.compag.2022.107336.
○ Adamides, G., & Edan, Y. (2023). Human-robot collaboration systems in agricultural tasks: A review and roadmap. Computers and Electronics in Agriculture, 204, 107541. doi: 10.1016/j.compag.2022.107541.
○ de Silva, R., Cielniak, G., Wang, G., & Gao, J. (2024). Deep learning-based crop row detection for infield navigation of agri-robots. Journal of Field Robotics, 41(7), 2299-2321. doi: 10.1002/rob.22238.
○ Liu, L., Yang, F., Liu, X., Du, Y., Li, X., Li, G., Chen, D., Zhu, Z., & Song, Z. (2024). A review of the current status and common key technologies for agricultural field robots. Computers and Electronics in Agriculture, 227, 109630. doi: 10.1016/j.compag.2024.109630.
○ Li, J., Xu, M., Xiang, L., Chen, D., Zhuang, W., Yin, X., & Li, Z. (2024). Foundation models in smart agriculture: Basics, opportunities, and challenges. Computers and

Electronics in Agriculture, 222, 109032. doi: 10.1016/j.compag.2024.109032.

○ Ye, J., Yu, Z., Lin, J., Li, H., & Lin, L. (2024). Vision foundation model for agricultural applications with efficient layer aggregation network. Expert Systems with Applications, 257, 124972. doi: 10.1016/j.eswa.2024.124972.

○ Li, J., Lammers, K., Yin, X., Yin, X., He, L., Sheng, J., Lu, R., & Li, Z. (2025). MetaFruit meets foundation models: Leveraging a comprehensive multi-fruit dataset for advancing agricultural foundation models. Computers and Electronics in Agriculture, 231, 109908. doi: 10.1016/j.compag.2025.109908.

○ Zhu, K., Li, J., Zhang, K., Arunachalam, C., Bhattacharya, S., Lu, R., & Li, Z. (2025). Foundation model-based apple ripeness and size estimation for selective harvesting. Computers and Electronics in Agriculture, 236, 110407. doi: 10.1016/j.compag.2025.110407.

○ Espejo-Garcia, B., Güldenring, R., Nalpantidis, L., & Fountas, S. (2025). Foundation vision models in agriculture: DINOv2, LoRA and knowledge distillation for disease and weed identification. Computers and Electronics in Agriculture, 239, 110900. doi: 10.1016/j.compag.2025.110900.

○ Zhu, H., Qin, S., Su, M., Lin, C., Li, A., & Gao, J. (2025). Harnessing large vision and language models in agriculture: A review. Frontiers in Plant Science, 16, 1579355. doi: 10.3389/fpls.2025.1579355.

○ Park, Y., Kim, C., Kim, G., & Son, H. I. (2026). Scene-graph-grounded vision-language reasoning to action for autonomous multipurpose agricultural robots. Computers and Electronics in Agriculture, 255, 112347. doi: 10.1016/j.compag.2026.112347.

3. 농업 기반 신재생에너지

농업 에너지의 프로슈머 전환을 위한 신재생에너지 통합기술

김대현(한국농업학회, 강원대학교) / **오광철**(한국산림바이오에너지학회, 한국기후변화연구원) /
전영광(한국농업기계학회, 강원대학교) / **강경식**(한국농업기계학회, 강원대학교)

Ⅰ. 서론

1 기술분야 개요

○ 농업 기반 신재생에너지의 개념

– 농업 분야에서 신재생에너지는 태양광(Photovoltaics, PV), 태양광열(Photovoltaics and Thermal, PVT), 지열, 수열, 바이오가스, 바이오매스, 풍력, 그린수소 등 분산형 재생에너지원을 농업 현장과 결합하여 생산, 저장, 활용, 제어를 단일 에너지시스템으로 통합하는 융합 기술 체계(그림1).

– 단일 설비의 보급뿐만 아니라 열, 전기, 연료의 저장 및 소비를 연계하여 통합 운영이 가능한 융복합 멀티에너지 · 멀티캐리어(multi-carrier) 시스템.

– 농업을 에너지 소비처로만 다루던 관점에서 벗어나 농업 공간을 에너지의 생산, 저장, 공급 거점으로 활용하는 ‘프로슈머’ 관점으로 재정의함.

– 농업에 투입되는 에너지(Energy to Agriculture)를 최적화하고 농업에서 생산되는 에너지(Energy from Agriculture)를 확장하여 이용하는 기술.

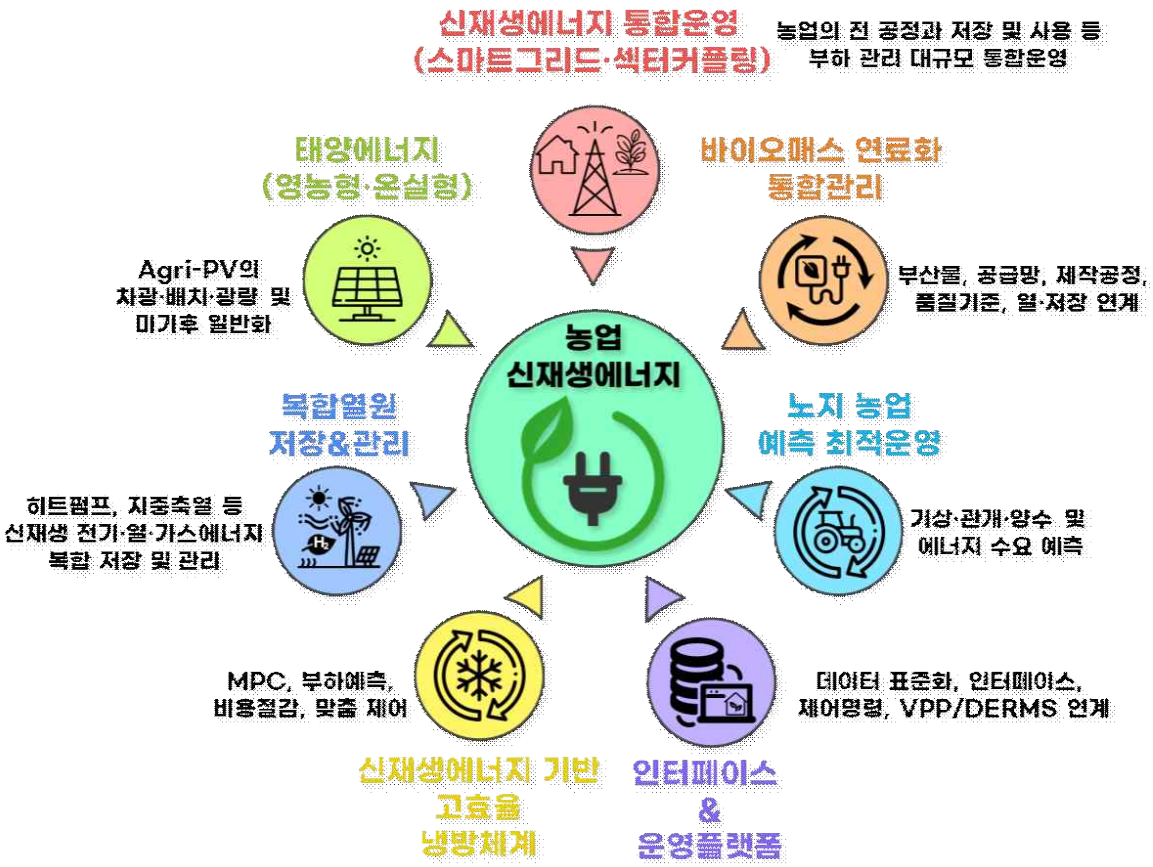


그림 1. 농업 신재생에너지 개념도

○ 농업 기반 신재생에너지 특징

– (분산성 · 현장 결합성) 온실 및 축사의 천장과 유휴부지의 PV · PVT 및 저수지 · 지하수 · 하천수 기반의 수열 및 지열 등 농업시설 · 부지와 지능형 융합이 가능한 분산형 에너지원.

– (부하 다양성) 냉난방, 관개, 양수, 제습, 환기, 저온저장, 건조, 가공 등 성격이 상이한 다수의 부하와 연결되며 계절, 주야간에 따른 전기 및 열 수요 변동이 큰 구조.

– (병행관리 플랫폼성) 재생에너지 비중 확대로 커지는 전력 계통과 농업 수요의 변동성을 동시에 최적 관리하는 운영 플랫폼.

○ 농업 내 신재생에너지의 역할과 중요성

– (기후적응) 기후 변화에 따른 폭염과 한파 심화로 급증하는 냉난방, 제습 부하를 저비용 · 저탄소 에너지로 감당해 농업생산과 농업인 안전을 지키는 기후적응 전략이 필요함.

– (에너지 안보) 수입 화석연료와 전기요금 변동 위험으로부터 농가 경영을 보호하기 위한 분산형 에너지 안보 체계 구축이 요구됨.

– (탄소중립) 국가 온실가스 감축목표와 재생에너지 확대를 뒷받침하는 분산 전원 역할을 하여 수요조정 자원 확보 전략 수립이 가능함.

– (경제성) 농업기술 전망에서 신재생에너지시스템 전환 및 고도화는 부속적 환경과제가 아닌 농업의 미래 경영 구조를 다변화 및 설계하는 데 있어 핵심 구성 요소.

○ 독립적인 신재생에너지 기술이 아니라 지능형 농업 인프라의 한 축으로서 농업 위성 · AI 농업 로봇 분야 연계를 통해 실효성 확대

– 농업 위성이 제공하는 기상 · 재해 정보, AI 농업 로봇이 유발하는 신규 전력 부하, 신재생에너지의 발전 · 저장 자원을 통한 연계가 가능함.

– 스마트농업 육성을 위해 데이터 기반 통합기술, 모델 구축 R&D 및 실증을 통한 경쟁력 제고 필요(농림축산식품부, 2025).

2 기술 도입 배경

2.1 농업환경 변화

○ 농업 위기 상황에서 에너지비용 증가로 생산량–경영비 간 균형 붕괴

– 2024년 연평균기온은 14.5℃로 평년보다 2.0℃ 상승, 열대야 일수 24.5일로 평년(6.6일)의 약 3.7배 관측 이래 가장 더운 해(기상청, 2025).

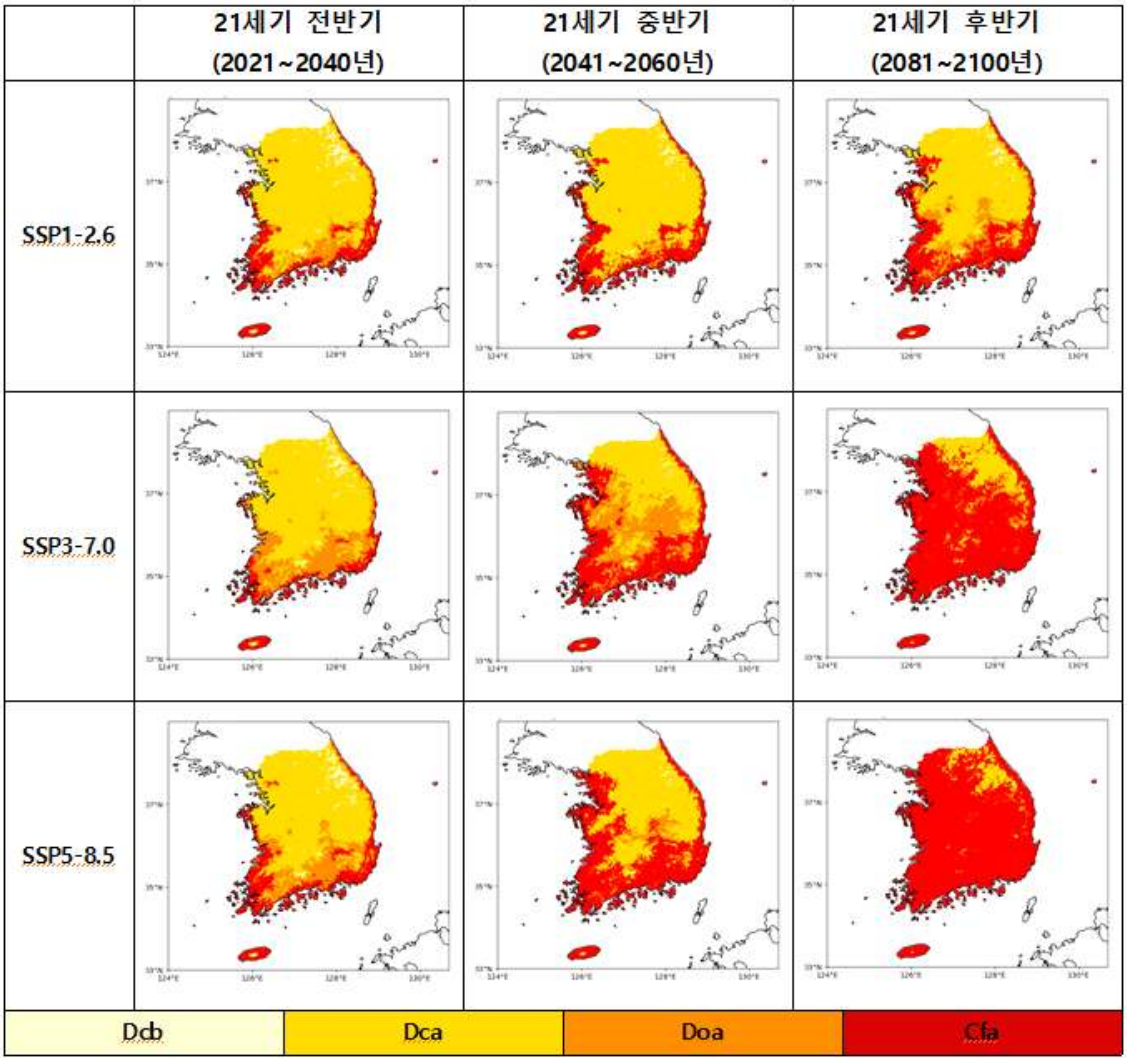
– 폭염 혹은 한파가 잦아질수록 냉난방, 제습, 환기 에너지 수요가 급증하고 이로 인한 유류비와 전기 비용 증가는 농가에 전가되는 악순환 발생함.

○ 에너지 수요 체계는 겨울철 난방과 여름철 냉방 이중체계로 변화

– 과거 겨울철 난방이 수요의 중심이었으나 최근 여름철 고온 · 폭염 대응을 위한 냉방, 차광, 제습 수요가 급증하며 냉난방 이중 피크 구조로 변화.

– 현재 추세로 온실가스가 배출될 시 21세기 후반(2081~2100년) 강원 영서를 제외한 전국 대부분이 아열대 기후로 전환되며 여름철 냉방 · 제습 부하가 구조적으로 더욱 폭증할 것으로 전망(기상청, 2026; 그림2).

– 현대 농업의 에너지 집약구조는 농가 경영의 상시 리스크로 작동, 농림축산식품부는 시설원예와 축산부문에 대해 경영안정 목적의 ‘농업 에너지 이용 효율화 사업’을 시행 중(서대석 외, 2022).



고탄소 시나리오(SSP5-8.5)에서 전국 대부분이 아열대 기후로 전환
(노랑: 온대내륙성(Dcb, Dca), 주황: 온대해양성(Doa), 빨강: 아열대습윤(Cfa))

그림 2. 온실가스 배출 시나리오(SSP)별 기후 전망, (기상청, 2026)

○ 생산량, 가격 변동과 무관한 고정적인 농가 에너지 리스크

– 시설원예의 경우 난방비가 경영비의 약 23%, 2024년 농산물 생산 경영비가 전년 대비 3.7% 증가하고 18개 작목의 소득이 감소하는 등 생산량, 가격 및 투입비 변동에 따라 소득이 변동(농촌진흥청, 2022; 2025).

– 에너지원은 난방용 유류(면세등유 · 경유), 농사용 전력에 집중되어 화석연료 · 전력이 농업부문 에너지 소비의 91.2%를 차지, 신재생에너지 비중은 통계상 구분되지 않을 정도로 미미한 수준(에너지경제연구원, 2026).

– 농림어업 최종에너지 소비는 2024년 약 311.8만 TOE(석유환산톤, Ton of Oil Equivalent)로 국가 전체의 1.5% 수준이나, 석유 38.7% · 전력 52.6%에 편중된 전형적 에너지 다소비 · 고위험 구조(에너지경제연구원, 2026).

○ 에너지비용 및 연료가격의 변동이 생산비로 이어지는 취약성

– 자연재해, 전쟁 등 급변하는 국제동향에 따른 농업 위기 상황에서 에너지비용 상승 및 조정이 곧바로 농가 경영비 상승으로 연결.

– 농사용 전기요금은 2022~2026년 동안 단계적 인상을 통해 농사용 갑 전기요금 인상률 124.7%, 농사용 을은 여름·겨울 64.1% 상승(그림 3).

– 국내 에너지 자립도는 약 19%로 낮아 국제 연료가격과 환율 변동의 영향을 크게 받으며, 연료비 연동제와 전력공급 비용 상승에 따라 농사용 전력도 비용 변동에서 자유롭지 않음(한국전력공사, 2023; 2026; IEA, 2025).

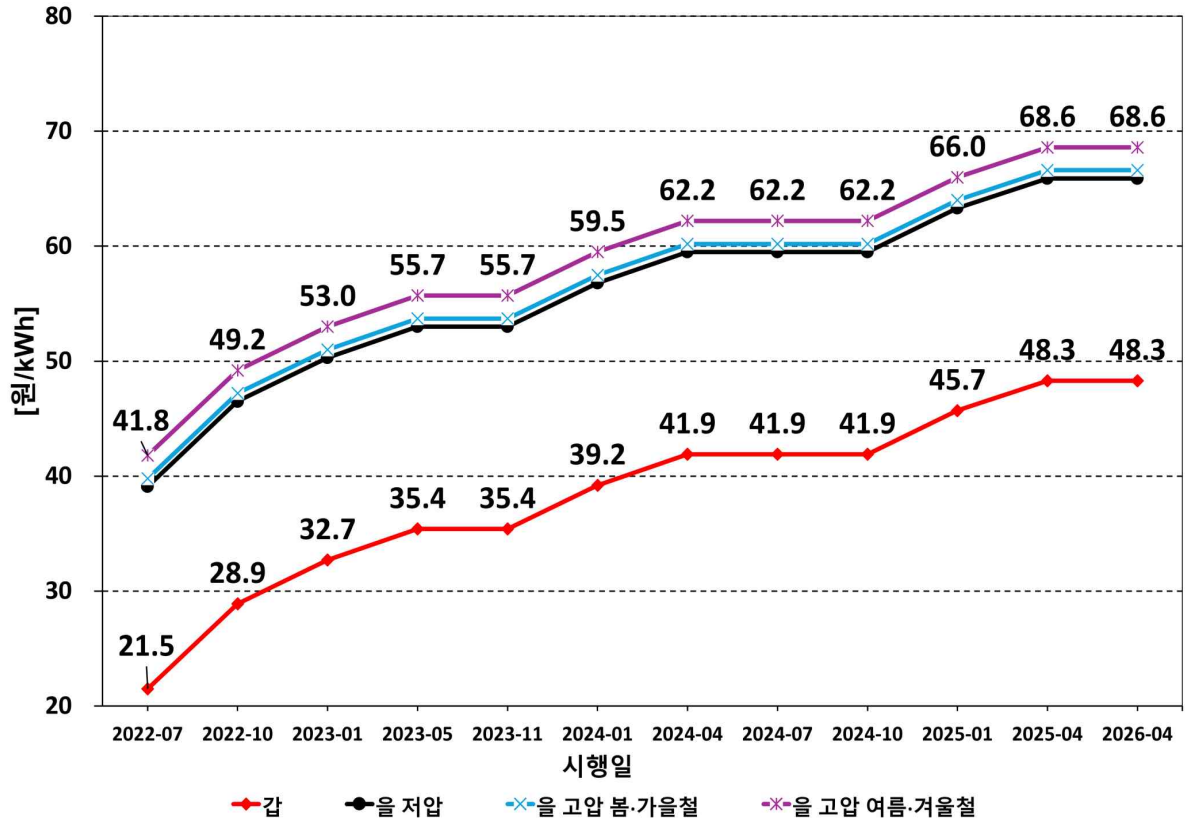


그림 3. 농사용 전기요금의 시행일별 변화

2.2 기술의 필요성 및 기대효과

○ 농업 에너지의 현황을 파악하고 구조적 한계 및 리스크를 정밀 진단하여 개선된 구조를 설계하는 것이 농업 신재생에너지 연구의 출발점

표 1. 농업 에너지 구조적 한계

한계	핵심 요소	주요 지표	현황
화석연료 과의존	난방 유류·LPG + 농사용 전력 편중	화석연료+전력 90% 이상 / 석유 38.7%, 전력 52.6%	국제 에너지비용 변동이 생산비로 직접 전가
농가 경영비 구조	광열비 과중	시설원예 광열비: 경영비의 20~40%	생산량이 소폭만 변동해도 소득이 크게 변동
기후적응·감축의 동시 곤란	난방+냉방의 이중 피크 심화	2024 연평균 14.5℃, 열대야 24.5일(평년 3.7배) / 고탄소 시 전국 대부분 아열대화 전망	냉방수요 급증에도 기술 개발 및 표준화 미비

○ 화석연료 의존은 에너지비용 변동에 따른 경영리스크를 농가에 고정적으로 전가하고 현재 난방비 중심의 지원은 근본적 문제 해결에 한계 존재

– 전 세계적으로 농업 분야의 에너지 소비량 절감과 동시에 에너지원을 신재생에너지 구조로 변경하는 이중 전략을 요구하고 있는 상황임.

○ PV · PVT, 지열 등의 분산된 신재생에너지원을 냉난방, 양수, 저온저장, 제습을 위하여 연계할 수 있는 현장 결합 시스템 도입 필요

○ 농업 기반 신재생에너지 기술의 시스템적 보완을 거쳐 경제, 생산, 환경, 농가 자립성에서 복합적인 효과 달성 요구

표 2. 요소별 기대효과

적용 분야	기대 효과
경제	에너지비용 절감과 발전 및 수요조정을 통한 부가수익 창출로 농가 경영 안정에 기여
생산	기후위기 대응을 위한 광·열환경 최적화로 생산성·품질의 안정적 확보
환경	화석연료 대체와 농업 부산물 순환으로 농업 부문 온실가스 감축과 탄소중립에 기여
농가 자립성	농가·단지·지역 단위 분산 에너지 체계 구축으로 에너지 공급기반 확보 및 에너지 안보·농촌 활력 제고 기반

Ⅱ. 기술 분야 구조 및 범위

1 기술 분야 정의

○ 농업 기반 신재생에너지 기술 정의: 분산형 재생에너지원을 농업 현장에 결합해 에너지의 생산–저장 및 전환–운영–소비 기술의 통합 및 체계화

– 개별 설비의 단순 보급이 아닌 발전, 저장, 부하가 서로 맞물려 작동하는 통합 운영체계 시스템.

– 개별 요소기술의 고도화를 통한 하나의 운영체계로 결합하여 비용 절감 효과 실증.

○ 농업 신재생에너지 시스템 기반 에너지그리드 구축

– 신재생에너지원의 병렬적 나열이 아닌 에너지 형태별 수요–공급 균형을 위한 에너지 순환 내 요소기술 구조화(그림 4)

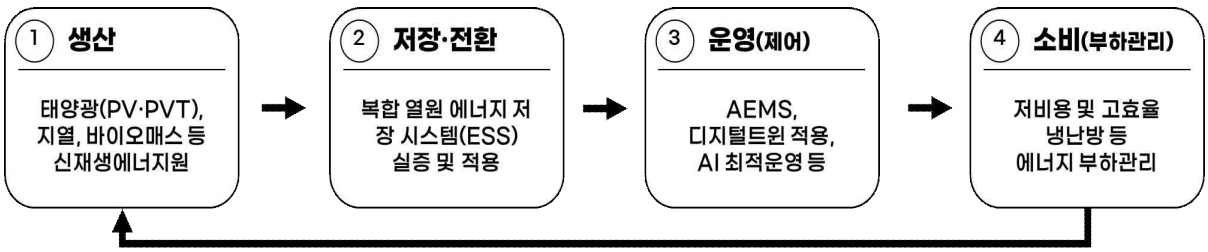


그림 4. 에너지 순환 단계별 요소기술 구성도

– 에너지원별 나열에서 드러나지 않던 자원 간 역할과 상호 관계를 구조 안에서 명확하게 하기 위함.

– 복수의 에너지원 생산 및 저장 형태로 구성되며, 동일 자원이라도 에너지 흐름 단계(생산 · 전환 · 저장 · 소비)에 따라, 시스템 내 역할이 달라지는 구조.

○ 신재생에너지원, 요소기술 선정

– 순환 단계에 따라 작물 생육과의 기술 연계, 에너지 부하 변동, 농가의 규모 등 농업 현장의 주요 특성에 따라 핵심기술을 선정하고, 구성 기술개발 및 실증이 필요함

표 3. 순환 단계별 중점 기술

단계	중점 기술	의의
생산	작물 친화형 신재생에너지 생산 기술	농지·시설 면적을 작물과 공유하므로 생육과의 병행 설계가 관건
	농림업 부산물 바이오매스 연료화 체계	농업 내부에서만 조달할 수 있는 자원으로, 기상환경과 무관하게 에너지원 확보 및 자원순환 동시 충족
저장 및 전환	복합열원·ESS·그린수소 연계 기술	개별 저장 수단이 아닌 이종 자원의 통합 구성이 변동성 대응의 핵심
운영 (제어)	AEMS·디지털트윈·AI 최적 운영 기술	요소기술을 하나로 묶는 통합 운영 및 제어 단계로, 통합 효과 극대화 및 검증
소비 (부하관리)	고효율 냉난방 부하 저감 기술	아열대화로 급증하는 냉방부하가 향후 최대 증가 요인

2 주요 구성 기술

○ 작물 친화형 신재생에너지 생산 기술

– 개념: 온실 및 축사의 천장과 유휴부지의 태양광(PV) · 태양광열(PVT)을 중심으로 지열, 수열, 소형풍력을 결합해 전기와 열을 생산하여 작물 생육과 에너지 생산을 병행.

– 태양에너지는 벽면 부착형 · 스크린형 · 영농형으로 구분되며, PVT는 전기와 열을 동시에 회수해 냉난방과 온수 수요 대응이 가능하고 지열 및 수열은 기상 조건과 무관한 열 공급으로 태양에너지의 변동성을 보완.

– 재배지 상부 구조물 적용 시 광투과, 차광 하부 미기후, 결로 및 병해, 광 분포 균일도가 작물 생산량과 품질을 좌우하며, 이는 일반 발전설비 성능과 농업 특화 성능을 동시에 고려하여 평가하기 위함.

– 이에 하절기 과열 방지, 동절기 난방열 보충, 광 분포 균일도 확보 등의 측정 가능한 농업 특화 성능지표로 관리하며, 영농형 태양광 설계 및 운영기준의 표준화도 에너지 생산 단계에서의 과제(DIN, 2021).

○ 농림업 부산물 바이오매스 연료화 기술

– 개념: 볏짚, 왕겨, 전정지, 축분 등 미이용 농림업 부산물을 건조, 파쇄, 성형, 반탄화 공정을 거쳐 고형연료, 바이오가스로 전환하여 기상과 무관한 안정적 열원 생산 기술.

– 원료 특성(수분, 회분, 발열량 등)에 맞는 공정 조건과 혼합비를 AI 모델을 통해 제시하여 연료 품질을 안정화하고 표면탄화 등을 통한 연료 효율화.

– 태양광과 풍력의 간헐성 보완이 가능하고, 기상환경에 무관하게 저장 및 운송이 편리하여 공급 시점을 조절할 수 있는 것이 강점이며 동절기 난방 등 열 수요가 집중되는 시기에 안정적 공급원으로 역할 가능.

– 소비 단계에서 발생한 부산물이 다시 연료로 재투입되어 수거–전처리–연료화–열 공급–잔재 환원으로 이어지는 지역 단위 순환 구조를 형성하여 수입 연료 의존 저감과 농촌 자원순환에 기여할 수 있음.

○ 복합열원 · ESS · 그린수소 연계 기술

– 개념: 재생에너지 발전 및 농업 부하의 변동성을 완충하기 위한 신재생에너지원과 저장 수단을 통합한 멀티에너지 및 멀티캐리어 기술.

– 복합 에너지원의 구성 자원으로 공기열 · 지열 · 수열 히트펌프, 축열조, 에너지저장시스템(Energy Storage System, ESS), 소형풍력 적용이 가능하며 장기 저장 · 전환 버퍼인 그린수소를 통해 전기 · 열 · 연료의 부하에 따라 유동적인 최적 전환이 가능함.

– 지열 히트펌프는 실증 규모 온실에서 안정적 냉난방과 화석연료 대비 유의한 에너지 절감 잠재력이 확인되어, 복합열원 구성의 안정적 수단으로 활용됨(Anifantis 외, 2016).

– 계절 · 주야간 변동 대응성을 핵심으로 하절기에는 주간의 잉여전력으로 축냉/축열하고 야간에 방출해 최대수요전력을 낮추며, 동절기에는 동일 설비가 난방 · 온수로 전환되는 운영구조.

○ 농업 에너지관리시스템(AEMS) · 디지털트윈 · AI 최적 운영 기술

– 개념: 기상예보, 전력요금, 재생에너지 발전량, 작물 생육 정보를 통합 분석하여 냉난방 · 환기 · 제습 · 양수 등 농업 부하를 예측하고 최적 제어하는 농업용 에너지관리시스템(Agriculture–Energy Management Systems) 기술.

– 농업시설의 구조, 설비 구성, 기상 조건 등을 포함하는 디지털트윈을 구축하여 다양한 에너지 이용과 농업 환경을 모의 재현하고 지능형 모델 학습 데이터로 활용하여 시나리오(종류, 설비, 기상, 생육 단계)별 최적 운전 전략 도출.

– 제어 방식을 MPC(Model Predictive Control, 모델 예측제어) · 강화학습 등으로 고도화하여 여름 및 겨울철 에너지 소비를 유의하게 낮추어 실측치와 예측치 간의 실내 온도 오차를 특정 수준 이하로 관리하는 성과가 보고 됨(Mahmood 외, 2023).

– 농가가 복잡한 시스템을 목표값 입력만으로 운용할 수 있도록 의사결정을 인공지능 자동화하는 것이 본 기술의 지향점.

○ 고효율 냉난방 부하 저감 기술

– 개념: 아열대화로 증가하는 여름철 냉방 · 제습 부하와 겨울철 한파 난방 부하에 대응해 에너지 수요를 절감하고, 최대부하 발생 시간을 분산 · 이동시키는 통합 부하관리 기술.

– 냉방부하 절감 기술: 차광 · 자연환기 · 고반사 피복 등 소극적 냉방으로 열 유입을 저감한 뒤, 농가 투자 여건에 따라 단열 · 쿨링패드 · 포그와 공기열 · 지열 히트펌프, 복사냉방, 고효율 팬&포그 등의 적극적 냉방을 농가의 환경 여건에 따라 단계적으로 결합.

– 난방 부하 절감 기술: 보온커튼 · 다중피복 · 기밀성 향상 · 축열벽 등 소극적 난방으로 열 손실을 최소화하고, 고효율 보일러, 공기열 · 지열 히트펌프, 폐열 회수, 복사난방 등 적극적 난방을 결합해 난방 에너지 사용량 저감.
– 부하 이전 및 제어: 단순 설비용량 확대 대신, 낮 시간대의 재생에너지와 잉여전력을 활용하는 선제적 냉난방 또는 열에너지 저장(축열 · 축냉)을 통해 필요한 시간대로 부하를 분산 및 이동.
– 이를 통해 농업 냉난방 부하가 전력 계통에 부담을 주는 수동적 수요가 아니라 전력수요와 재생에너지 공급 변동에 대응하며 지역 전력 계통 안정화에 기여하는 능동적 에너지자원으로 전환.

○ 에너지 순환 단계별 기술 간 연계를 통해 기술별 효과 증대
– 생산(①)은 저장 · 전환(②)과 결합해야 안정적 운전이 가능하며, 운영(③)은 표준 인터페이스로 전 순환 단계와 연동될 때 실효성이 확보.
– 소비(④) 단계의 부산물이 생산(①)의 연료로 재투입되어 순환이 완성.



그림 5. 에너지 흐름에 따른 신재생에너지 주요 구성 기술

3 적용분야 및 활용 영역

○ 에너지 수요가 높은 농업생산 · 저장 · 유통 전 과정에 적용되며, 시설별로 요구되는 에너지원과 부하가 상이(그림 6)

– (시설원예 · 축산) 냉난방, 제습 · 환기가 집중되는 고에너지 투입구조에 작물 친화형 신재생에너지 생산, 복합열원, 냉방부하 저감 기술 우선 적용.
– (저온저장 · 가공시설) 예냉, 저온 유지, 건조에 전력과 열에너지 사용이 집중되어 ESS 및 복합열원을 연계한 에너지부하 통합 관리 필요.
– (노지농업) 관개펌프, 양수기, 방상팬, 예냉저장고 등 전력 집약 설비를 ESS와 결합, 재생에너지 발전량 예측과 연계해 운전 시점 최적화.
– (농가 · 단지 · 지역) 개별 농가를 넘어 주산 단지 · 권역 단위로 확장 시, 농업 부하가 지역 지능형 에너지망의 분산자원으로 편입.

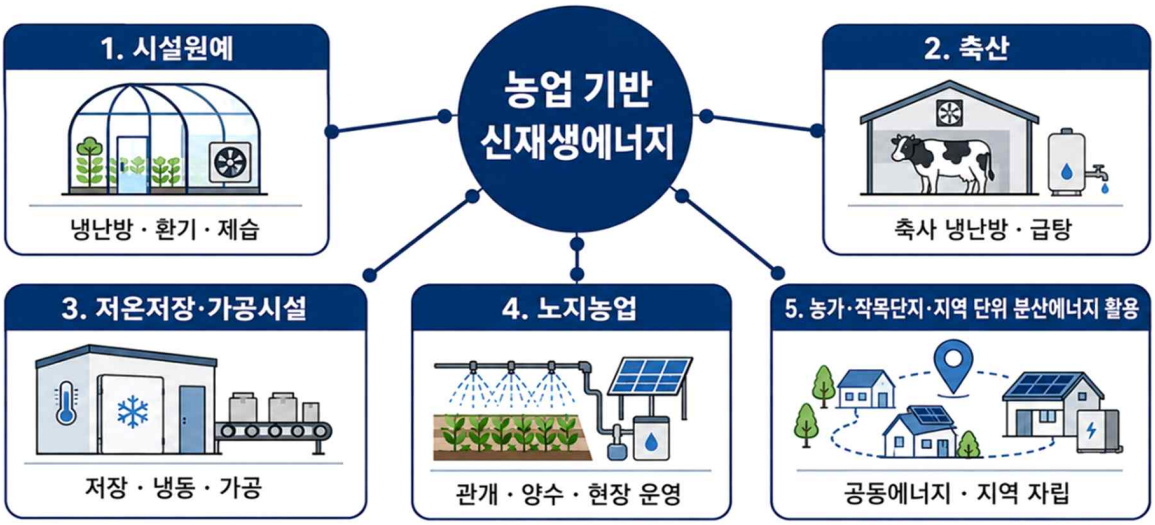


그림 6. 농업 기반 신재생에너지 적용분야 및 활용 영역

○ 활용의 확장 방향: 개별 설비 활용에서 지역 에너지 시스템 참여로 확장
– 관개, 양수, 저온저장, 냉방 등 농업 부하는 시점 조정이 가능한 변동가능 부하로 수요반응(Demand Response, DR), 가상발전소(Virtual Power Plant,VPP), 분산자원관리시스템(Distributed Energy Resource Management System, DERMS) 등 에너지시스템 운영 자원 활용 가능.
– 이를 통해 농업은 에너지의 소비처를 넘어 분산 전원과 수요조정으로 자원의 공급처로 기능이 가능하며, 농업은 에너지 소비처를 넘어 분산전원과 수요조정 자원을 제공하는 프로슈머로 전환할 수 있음

Ⅲ. 기술 발전 동향 및 전망

1 국내외 기술 발전 동향

1.1 국외 기술 동향

○ 국외 농업 기반 신재생에너지 기술은 개별 설비의 성능 경쟁뿐만 아니라 농업 에너지 통합 운영체계 구축에 집중하여, 이를 표준화 및 에너지 시장 연계와 결합하는 방향으로 전개 중

– 유럽은 농업 분야 재생에너지 통합을 위해 발전–저장–전환–소비를 하나의 시스템으로 운영하는 농촌 마이크로그리드와 섹터 커플링 기반 통합 모델 추진이 활발(European Parliament, 2018).

– 독일 및 오스트리아, 네덜란드 등은 재생에너지로 생산된 잉여전력을 전력–가스 전환(Power to Gas, P2G)이나 ESS로 전환하여 농업 부문의 에너지 자립과 전력 계통 유연성 확보를 동시에 달성하는 실증을 지속(RAG Austria AG, 2021).

– 네덜란드는 태양광 · ESS · 수소 전환 · 농기계 충전을 하나의 체계로 묶은 H2arvester 모델을 현장 실증하여 농업 에너지 전환 효율 제고(H2arvester Systems BV, 2024).

– 미국은 에너지부를 중심으로 농업 부하와 분산 자원을 통합한 지역 에너지 운영 기술을 개발하며, 농업을 에너지시스템의 주요 구성요소로 다루는 접근을 강화(Olsen 외, 2015; Aghajanzadeh & Therkelsen, 2019).



그림 7. 국외 농업 기반 신재생에너지 기술 동향

○ 농업 선진국 태양에너지 통합활용: 작물 생산성 보장을 위해 제도와 설계로 뒷받침하는 방향이 공통적

- 영농형 태양광의 설계 · 운영 기준을 표준화(DIN SPEC 91434)하여 농업 1차 생산 기능 보장을 제도적으로 뒷받침(EU).
- 광합성 유효 복사량(Photosynthetically active radiation, PAR), 미기후, 병해 패턴을 정량 평가하여 작물 생산성과 발전 효율을 함께 고려한 최적 영농형 태양광 설계를 실증(Fraunhofer ISE, 2019; 네덜란드 · 프랑스).
- 솔라셰어링 제도화를 통해 차광률 기준, 영농 지속 요건 등을 명문화하였고, 농업 생산성과 발전 수익의 병행모델을 확립(Renewable Energy Institute, 2025; 일본).
- 다양한 작물과 기후 조건에서 영농형 태양광의 영향을 분석하여 확산 기반 구축(Macknick & Hartmann, 2023; 미국).
- 태양광 발전 패널 부착 온실에서 발생하는 미기후 변화(결로, 과열, 습도)를 고려한 농업특화 평가 모델의 필요성을 강조(북미 · EU).

○ 복합열원 · 저장 연계: 시계열 변동에 대한 대응력 강화 초점

- 전력, 열, 가스의 흐름을 하나의 체계로 운영하는 섹터 커플링 전략을 농촌 지역 적용 모델로 확대(EU).
- 장기 지중 열저장(Aquifer Thermal Energy Storage, ATES), P2G, 지역 마이크로그리드 등을 결합한 복합에너지 운영구조를 실증(Bloemendal & Beernink, 2023; 독일 · 오스트리아).
- 농업 난방과 환경제어에 연계할 수 있는 태양광 · 열 복합패널(PVT), 히트펌프, 지중축열 시스템의 열원 통합 모델을 확대 적용(네덜란드).
- 태양광, ESS, 그린수소, 암모니아를 결합한 다중 에너지 실증을 통해 농업 공정의 열 및 전기 수요를 통합적으로 대응하는 모델 개발(Australian Renewable Energy Agency, 2023; 호주).

○ 냉방체계: 유럽과 미국은 온실 냉방비용 상승과 기후변동 심화를 고려하여 모델예측제어(MPC) 기반 냉방 제어 기술로 냉방부하 최적화와 비용 절감을 병행하는 연구 강화

- 기상계측 정보, 작물 생육 단계, 설비 응답 특성을 통합해 계절 · 작물별 맞춤형 냉방 전략을 도출하는 시스템 연구가 확산되고 있음.

○ 시스템 기반 접근: 농림업 부산물 기반 지역 단위 바이오에너지 시스템을 ESS, 열저장 설비와 함께 통합 운영하는 구조

- 바이오가스 · 바이오매스 보일러를 농업 난방 · 건조 공정과 결합해 에너지 자립형 농업시설 구축 모델을 제시(EU).

– 공급망(수거 · 저장 · 수분 관리), 공정(건조 · 성형 · 탄화), 품질 기준(발열량 · 회분 등)을 하나의 운영체계로 통합하는 시스템이 필요함.

○ 부하의 자원화와 표준 인터페이스: 농업 부하를 전력 계통 자원으로 편입하는 방향이 구체화

– 관개, 양수, 저장 공정 부하를 수요반응(DR) 자원으로 활용하여 전력 피크를 저감하고 농업 부문의 전력 계통 기여도를 높이는 실증을 수행하며, 기상 · 부하 · ESS · 전력요금 데이터를 통합예측 및 최적화 기술로 노지농업 에너지 운영 효율 향상 모델을 제시했음(Olsen 외, 2015; Aghajanzadeh & Therkelsen, 2019; 미국).

– 나아가 수요반응, 가상발전소(VPP), 분산자원관리시스템(DERMS)을 통합한 분산 에너지 운영체계를 제시하며, 농업 부문을 에너지 시장과 전력 계통 운영 구조에 포함시키는 프레임워크를 마련함(Wang 외, 2024).

– 영농형 태양광 설계 및 운영기준 표준화를 통해 데이터 구조, 제어 명령, 농업 환경 특성 반영 구조를 규격화함,

– 전반적으로 농업설비와 신재생에너지원을 하나의 운영체계에서 통합하기 위한 데이터 표준화와 인터페이스 구축을 중점 과제로 취급함(EU).

○ 주요 국가 및 지역별 동향: 지역별로 기후 조건, 농업 구조, 전력 시장 여건에 따라 중점 방향이 상이

– 국외 기술 개발의 목적이 설비 효율 향상에서 시스템 운영성과로 이동함에 따라, 연구의 평가 대상도 개별 기기의 정격 성능에서 통합체계의 연간 운영 실적과 전력 계통과의 상호작용으로 전환.

표 4. 국외 농업 기반 신재생에너지 기술동향 및 의의

국가	기술	주요 내용	의의
유럽	농촌 마이크로그리드, 섹터커플링	전력, 열, 가스의 생산 및 저장을 통합 운영하는 지역 단위 에너지 시스템 구성	농업 에너지를 지역 에너지망의 구성 요소로 편입
독일 오스트리아	P2G, ESS, 지중축열, 바이오에너지	잉여 재생 전력의 가스 전환·저장, 바이오가스·바이오매스 난방, 장기 지중 열저장 결합	계절 변동 대응형 복합에너지 체계 구축
네덜란드	태양광·ESS·수소 연계	H2arvester 실증, PVT, 히트펌프, 지중축열 기반 온실 열원 통합	시설원예 중심 고도화 에너지 자립 모델
일본	솔라셰어링	작물별 적정 일조량과 수확량 유지 요건을 적용해 태양광 발전과 영농의 병행을 제도화	영농형 태양광의 제도 기반 확립
미국	수요반응, VPP·DERMS	관개, 양수, 저장, 냉방부하의 수요반응 자원화와 분산 자원 통합 운영체계를 구축	농업 부하를 전력 계통 안정화 자원으로 전환
호주	태양광·ESS·그린수소·암모니아	다중 에너지원 결합 실증을 통한 열·전기 수요 통합 대응	장기 저장 및 에너지 전환 기술 확대

– 이에 따라 설계 기준, 성능평가, 시장참여 규칙이 기술개발과 동시에 정비되는 것이 국가를 불문한 공통된 특징.

1.2 국내 기술 동향

○ 국내 농업 부문 에너지 연구개발은 개별 설비 보급 중심에서 벗어나 통합 운영을 전제로 한 연구 · 실증이 병행되는 구조로 이행

– 시설원예, 축산 등 에너지 고투입 분야를 대상으로 복합 부하를 통합적으로 반영한 현장 실증이 확대되는 추세(농촌진흥청, 2023a).

– 스마트팜, 기상 데이터 기반 에너지 수요 예측과 최적 소비 의사결정 기술이 확산함에 따라, 디지털트윈 기반 시뮬레이션으로 지역, 작목, 규모별 최적 운영 매뉴얼 도출을 위한 연구가 활발(한국산업기술시험원 · 한국산업지능화협회, 2024).

– 재생에너지의 특성인 변동성과 수요 변화 대응을 위해 신재생에너지 자원과 운영제어 기술의 개발이 강화되며, 에너지 비용 부담 완화와 광 및 열환경 안정화를 통한 생산성 확보를 목표로 현장 적용형 기술을 구체화.

– 그러나 실증 종료 이후의 장기 운영과 유지관리, 타 지역 및 타 작목으로의 이전, 표준화된 서비스 형태로의 전환은 여전히 보완이 필요한 단계.

○ 태양에너지 통합활용: 태양광 · 열 복합시스템(PV · PVT)은 단순 전력 생산을 넘어 전기와 열을 동시에 수집 및 활용하는 방향으로 고도화

– 설치구조의 안전성(방수 · 단열 · 유지보수 제약 등)과 미기후 변화에 따른 결로 및 병해 발생 위험, 국부 차광으로 인한 광 조건 불균일성 문제 해소를 농업특화 성과지표를 반영한 설계 및 실증을 통한 해소가 주요 관심사로 대두(Cossu 외, 2017).

– 영농형, 온실부착형 적용은 작물 친화형 설계와 계절별 운영방안이 핵심 키워드로 부각되며, 광투과와 작물의 광 요구 특성을 고려해 농업생산과 발전 성과를 균형 있게 확보하기 위한 배치 및 차광 설계 중심의 연구가 축적(김종익, 2024).

○ 농림업 부산물 바이오매스 연료화: 바이오매스의 연료 활용 테스트를 통해 배출가스 감소 효과와 안전성 및 경제성을 함께 평가하는 현장 적용 연구가 활발

– 지역별, 작목별 미이용 부산물의 원료 특성과 공정 및 연료 특성 평가 데이터를 기반으로 건조 · 파쇄 · 성형 · 탄화 등 공정 조건을 최적화하여 연료 품질을 안정화하고 제조 비용을 절감하는 데이터, AI 기반 연료화 연구가 확대되는 추세(박선용 외, 2026).

○ 복합열원 · 저장 연계: PV · PVT–열원–저장의 연계 적용이 확대됨에 따라 농업 에너지 관리 시스템(AEMS) 기반의 최적 운영 고도화가 본격화(한국정보통신기술협회, 2023)

- 태양광 · 열 활용(열 회수 포함), ESS, 지열 · 히트펌프 등 복합열원을 하나의 운영체계로 통합하여 에너지 자립률 상승 및 전력 피크 부담 완화 운전전략 적용이 확대됨.
- 풍력 등 분산 전원과 그린수소 기반 저장 및 전환 기술까지 포함하는 다중 에너지원 통합 운영 제시.
- 전기–열–연료 간 에너지 흐름과 경제성을 고려해 최적 에너지 조합을 설계 · 선정하는 연구가 확대되는 추세.

○ 예측 기반 운영과 표준 인터페이스: 기상, 에너지비용, 부하 패턴을 반영한 부하 예측 기반의 농가 맞춤형 운전전략 제시가 강화(Chen 외, 2022)

- 태양광 · 열, ESS, 히트펌프 · 지열 등 분산 에너지원과 농업설비의 통합 운영을 위해, 센서 · 제어 데이터를 연계하는 데 필요한 데이터 구조, 제어 명령, 통신 프로토콜을 포괄 규정하는 개방형 표준 인터페이스 구축이 논의되고 있음.
- 실증 결과를 바탕으로 예측–제어–최적화 운영을 고도화하고 운영 매뉴얼과 표준 모델화를 통한 현장 확산 기반을 마련하려는 연구가 활발함.
- 현장에서는 제어 지연을 최소화하기 위해 농가 단위의 엣지 컴퓨팅을 통한 실시간 제어, 지역 단위의 온프레미스 서버 기반의 농가 간 통합 분석, 클라우드의 빅데이터를 통한 장기 예측과 대규모 모델 학습을 분담하는 계층적 · 분산형 운영구조가 제시되며, 이를 통해 적용성과 확산성을 높이는 방향으로 발전.

○ 저비용 · 고효율 냉방체계: 외부 기상과 시설 내부 미기후 예측을 기반으로 패드 · 팬 등 냉방설비의 운전조건을 최적화하고, 모델예측제어를 통해 냉난방 · 환기 부하와 에너지 비용을 통합적으로 절감하는 연구의 중요성이 확대되는 추세(Liu et al., 2025; Lin et al., 2026)

- 기후대, 시설 유형, 생육 작물을 고려한 냉방 열부하 및 온열 환경 특성 분석과 시뮬레이션 기반 설계가 병행되며 현장 적용성을 높이는 방향으로 기술 구성이 구체화되고 있음.
- 실시간 기상 예측과 인공지능 기반 제어를 결합하여 시기 · 작물 · 기후대별 최적 운전전략을 도출함과 동시에 전력 수급 안정성과 전기요금 부담을 함께 완화하려는 운영 기술개발이 논의.
- 대표 기후대 및 주요 작목 단지를 중심으로 에너지 절감 효과와 경제성을 평가하는 현장 적용 사례가 점차 확대됨.

○ 노지농업 데이터 구축, 예측 기반 최적운영: 노지농업 적용 관개펌프, 양수기, 방상팬, 예냉저장고 등 주요 부하를 대상으로 센서 기반 데이터 구축과 예측제어 표준화 요구가 증가함(한국농촌경제연구원, 2020)

- 수심, 유량, 전력, 토양수분, 기상 데이터를 토양–식물–대기 연속체

(Soil–Plant–Atmosphere Continuum, SPAC) 기반 수문 · 에너지 균형 모델에 연동해 증발산량과 필요 관개량을 산정하고, 이를 신재생에너지 발전량 예측과 결합하여 설비의 최적 구동 · 운영 알고리즘을 도출하는 연구가 강화.

- 에너지 사용량, 관수량, 생산성, 탄소배출량을 종합적으로 평가하는 통합 성과 · 경제성 분석 체계의 적용이 확대되고 있으며, 산정된 감축량을 탄소 크레딧과 연계해 농가 부가 수익으로 전환하려는 시도도 병행됨.

○ 요소기술 단위에서 유의한 에너지 절감 및 효율 향상 효과가 확인되며, 특히 복합열원 시스템과 보온 · 단열 등 시설 개선을 연계할 경우 난방부하 저감과 운영비 절감 효과의 확대가 가능(Lee et al., 2021; Rabiu et al., 2023; Guan et al., 2024)

- 그러나 이러한 결과는 특정 지역 및 시설과 작목 조건에서 얻어진 결과로서 전국의 농가에 범용적으로 적용하여 해석하기 어려운 한계 존재.
- 단동형 스마트팜의 생산량 증가는 에너지 기술 단독 효과가 아닌 재배 · 환경관리 개선이 함께 작용한 결과로 보이며 영농형 태양광의 수익은 작물 · 채광 영향을 제외한 값.
- 따라서 조건이 명시된 실증 및 연구 데이터를 빅데이터로 축적하고 이를 비교 가능한 형태로 플랫폼화 및 관리하는 것이 향후 핵심과제.

표 5. 국내 농업 기반 신재생에너지 기술 실증 동향 및 주요성과

구분	실증기술	추진기관	주요성과
전북, 전주	PVT + 지열 복합 열원 냉난방 기술	농촌진흥청 (국립농업과학원)	냉난방비 78% 절감, 온실 열원부하 감소
전국 (57농가)	에어로겔 다겹 보온커튼	농촌진흥청 (국립농업과학원)	난방비 15~20% 절감, 온실 평균온도 0.3~0.8℃ 상승
전국 (딸기)	단동형 스마트팜 생산성 향상 모델	농촌진흥청	생산량 최대 83% 증가, 순이익 3.5배, 노동력 15% 감소
전북	영농형 태양광 발전(경제성 중심)	농림식품기술기획평가원·한국전력공사·지자체	연간 발전량 확보, 농가 부가수익 발생 (작물·채광 영향 제외)
전국	농업부산물 펠릿 표면탄화 공정	국내 연구기관	발열량 4,327 → 4,600~4,900 kcal/kg 향상 (약 7~13% 증가)

○ 국내외 차이는 개별 요소기술의 성능 격차가 아닌 기술 분류 및 운영 형태별 평가가 관건

- 국외는 재생에너지의 생산 · 저장 · 전환 · 소비를 통합설계하고 표준화 · 평가 · 운영체계를 함께 갖춤으로써 지역 단위의 에너지 자립과 생산성 향상을 동시 추구.
- 반면 국내는 영농형 태양광, AEMS, 섹터 커플링 등 요소기술 수준의 연구개발이 활발한 데 비해, 데이터 표준화, 운영 프로토콜, 실증–상용화 연계 체계는 초기 단계에 머무는 상황.

표 6. 국내외 농업 기반 신재생에너지 단계별 기술 비교

구분	국외	국내
설계 단위	시스템(생산-저장-전환-소비 통합 설계)	설비(개별 기기 중심, 통합 실증 단계)
실증 범위	지역 및 단지 단위 장기 운영 실증	농가, 시험포장 단위 단기 실증
표준화 및 평가	설계, 성능, 안전 기준과 평가체계 선행 정비	농업특화 표준화, 인증제도 초기단계, 기기 및 서비스 간 연동에 제약
운영 주체	전문 서비스 사업자 혹은 집합자원 운영자	농가 개별 운영, 운영대행 모델 초기
시장 참여	수요반응, 분산자원 시장 편입	제도적 참여 경로 제한
평가 지표	에너지, 생산성, 탄소배출을 함께 검증하는 통합 지표	설비별 효율, 에너지 및 온실가스 절감률

2 기술발전 흐름

○ 농업 기반 신재생에너지 기술은 4개 단계로 발전하는 추세

– 국내는 3단계인 시스템 통합운영의 초기 진입 단계이며, 선진국은 3단계의 실증 · 검증과 표준화를 체계화하는 동시에 시장 연계를 위한 대규모 연구를 확대하고 있음(그림 8).

– 각 단계는 기존 한계를 해소하는 방식으로 이어져 단계가 올라갈수록 기술의 초점이 설비에서 시스템으로, 다시 운영과 시장으로 이동.



그림 8. 국내외 기술발전 단계 비교

○ (1단계) 화석연료 절감형 설비 도입

– 에너지 사용량 자체를 줄이는 설비 중심으로 보온 · 단열 · 열회수와 같이 투자 대비 효과가 직관적인 기술 우선 보급.

– 그러나 사용하는 에너지원은 여전히 유류 · 전력이며 가격 변동 위험과 탄소배출 구조는 그대로 유지.

○ (2단계) 신재생에너지 요소기술 실증

– 태양광 · 지열 · 바이오매스 등 개별 신재생에너지원을 농업 현장에 적용.
– 신재생에너지원으로 전환하였으나 설비가 각각 독립적으로 운전되어 상호 보완이 불가.
– 에너지시스템의 생산 변동성으로 인하여 수요와 공급의 불균형 발생.

○ (3단계) 생산–저장 · 전환–운영(제어)–소비의 시스템 통합 운영
– 복수의 에너지 생산 및 저장 수단을 관리시스템으로 통합 운영.
– 잉여전력의 저장을 통한 수요 맞춤형 사용방식으로 변동성에 대응하고, 최대수요전력을 낮춰 요금 부담을 완화.
– 3단계부터 설비 성능보다 설비 간 연동과 운영 전략이 성과를 좌우.

○ (4단계) AI 기반 자립형 단지화
– 개별 농가를 넘어 주산 단지 · 권역 단위에서 에너지의 지산지소(地産地消) 개념 도입과 전력계통과 상호 작용.
– 농가 엣지–지역 서버–클라우드가 연계된 다계층 컴퓨팅 위에서 AI가 예측 · 판단 · 제어를 자율 수행하는 운영 구조로 진화.
– 부하 조정이 시장참여로 이어져 농업시설의 에너지는 비용 항목 뿐만 아니라 수익 항목으로 전환.

표 7. 기술 발전 단계별 특징

단계	초점	대표 기술	성과	한계
1. 화석연료 절감형 설비	사용량 저감	다겹보온커튼, 열회수 환기, 고효율 난방기	낮은 투자 부담으로 빠른 확산	에너지원 구조는 화석연료 그대로 유지
2. 신재생에너지 요소기술 실증	에너지원 전환	PV·PVT, 지열 히트펌프, 바이오매스 연료화	농업 현장 적용 가능성 확인	설비 간 연계 부재로 잉여·부족 반복
3. 신재생에너지 시스템 통합운영	시스템 운영	복합열원, ESS·축열, AEMS	변동성 대응, 최대부하 관리 가능	표준 인터페이스·운영 데이터가 전제 조건
4. AI 기반 자립형 단지화	지역·시장 연계	단지 단위 통합운영, 수요반응–분산자원 참여	에너지 자립과 부가수익 동시 확보	제도, 사업모델, 운영의 주체 정립 필요

○ (국내 현주소) 3단계 초기에 머물러 있는 국내 신재생에너지 연구
– 한국형 신재생에너지 요소기술 실증은 상당 부분 축적되었으나 통합 운영은 시범 수준이며 본 전환의 성패는 새로운 발전설비의 추가가 아닌 설비 간 연동 표준과 운영 데이터의 확보

에 좌우.

- 농업 기반 신재생에너지 특성상 개별 기술의 성능지표보다, 서로 다른 설비를 하나로 묶었을 때의 시스템 성능과 장기 운영 안정성을 평가하는 체계가 요구되는 시점.
- 신재생에너지의 농업시장 참여를 논하기 위해 신재생에너지시스템의 실증기반 통합 운영이 필요함.

3 핵심 발전축

3.1 에너지 자립화

○ 수입 화석연료와 전력 계통의 의존을 낮추고 농업 현장에서 생산 및 저장한 에너지로 자체 수요를 충당하기 위한 에너지 자립화

- 신재생에너지를 기반으로 자립도를 높이기 위해 설비용량을 단순 확대하기보다 생산과 소비의 시간대 불일치를 줄이고, 축열 · 축냉 · ESS 등 저장 수단과 수요반응을 통합한 실질 자립도 검증이 필요함.
- 농업 신재생에너지는 작목 · 시설 유형에 따라 에너지 부하가 계절, 주야간 단위로 변동하며 출력 변동성과 낮은 에너지 밀도로 인해 단일 에너지원만으로는 안정적 자립이 어려운 구조.
- 따라서 기상 의존형 자원(예: 태양광, 풍력 등)과 비의존형 자원(예: 지열, 수열, 바이오매스 등)을 동시에 갖춘 최소 공급 보장 구성이 요구됨.
- 특히 난방 수요가 집중되는 동절기에 열에너지 공급을 위한 바이오매스 등의 추가적인 보조 열원의 역할이 확대됨.
- 완전 자립형 모델보다 전력 계통과 상호작용하는 방식으로 외부 의존을 단계적으로 낮추는 형태가 현실적이며 자립을 목적 자체로 두기보다 에너지 비용과 공급 위험을 관리하는 수단으로 이해하는 관점이 필요함.

3.2 농업 – 에너지 융합화

○ 신재생에너지 설비를 단순히 농업시설에 추가하는 방식에서 벗어나, 작물 생산과 에너지 생산이 하나의 설계안에서 병행되도록 결합하는 방향

○ (태양에너지) 동일한 토지 · 시설에서 작물과 발전설비가 태양광을 나누어 이용하므로, 발전량 증대와 작물 생산성 유지 사이의 균형 설계가 핵심

- 재배지 상부 구조물의 광 투과율 변화와 차광 하부 미기후(온 · 습도) 변동이 작물 생산량과 품질 균일성에 영향을 미치므로 구조물의 배치, 높이, 계절별 일사 조건 등 다양한 변수를 종

합적으로 고려하는 설계가 필요함.

- 적용 방식은 스크린형, 부착형, 영농형으로 구분, 스크린형은 개폐 내구성과 광 균일성, 부착형은 작물 생장 유효 파장의 유지와 반투광 배치, 영농형은 차광률과 하부 광량 확보 및 작업 동선과의 간섭 최소화가 관건.

○ (바이오매스) 바이오에너지와 자원순환의 융합이 가능하며 이를 통해 온실가스 감축과 경제성 향상을 동시에 실현 가능

- 농림업 부산물, 작물 잔사, 축산 부산물 등을 바이오가스와 열에너지로 전환하고 생산된 에너지를 온실, 축사, 작물 건조에 활용하는 순환형 구조.
- 핵심 쟁점은 원료의 안정적 확보와 에너지 생산 후 발생하는 잔재 · 재이용 원료의 발생량과 성상, 보관 · 저장 체계를 함께 고려하여 지역 단위 순환 체계 구축이 우선 과제

○ (지열, 수열, 폐열) 재생 열에너지의 열 이용 융합을 통해 동절기 에너지 부하 대응

- 지중열, 하천과 저수지의 수열, 산업시설 폐열을 온실, 축사, 양식장, 저장시설의 냉난방 열원으로 연계하는 방식.
- 핵심 쟁점은 열원의 온도 · 공급량과 농업시설의 계절별 열수요 사이의 적합성, 열원–수요처 간 거리, 열손실, 공급 중단 위험을 고려한 축열조와 보조 열원의 결합.

○ (풍력) 발전설비와 농경지의 공간공유를 통한 융합

- 풍력발전기의 기초부와 진입도로를 제외한 공간에서 경작이나 방목을 지속하며 농업과 에너지 생산을 병행하는 방식.
- 핵심 쟁점은 발전시설과 농기계 작업 동선의 간섭 최소화, 타워 위치 최적화, 송전 시설과의 안전거리, 경작지 분절과 소음, 그림자 영향을 고려한 시스템 배치.

○ 융합의 평가 기준도 에너지 생산량 단독이 아니라 에너지와 작물 생산을 종합 평가하는 통합 지표로 전환되어야 하며, 에너지와 농작물 생산 간 상충관계를 정량화하고 이를 작물, 시설, 기후대별로 평가하는 체계의 정립이 과제

3.3 데이터 · AI 기반 통합운영화

○ 설비별 수동 운전에서 벗어나 기상, 발전량, 부하, 비용, 생육 정보를 통합 분석해 시스템 전체를 예측 기반으로 운영하는 방향

- 통합 운영 성과를 내기 위한 전제로서, 자립화를 위한 저장 수단, 융합화를 위한 복합 설비를 언제, 무엇을, 어떻게 가동할지 결정하는 운영 전략 없이는 성능을 발휘하기 어려운 구조.
- 농업시설 내 열 · 수분 이동, 토양–식물–대기 연속체(SPAC), 작물 생장 반응을 하나의 체계

로 설명하는 디지털 농업 모델링이 요구되며, 이를 재현한 디지털트윈에서 운전전략을 사전에 검토하고 설비 구성과 운전 방식의 조합을 비교함으로써 초기 설계 단계의 시행착오를 줄일 수 있음.

- 이러한 체계 위에 강화학습 · 딥러닝 기반 예측 모델을 결합해, 기상 변화, 생육 단계, 요금 조건을 함께 고려한 장 · 단기 운영전략을 자동 생성하고, 규칙 기반 제어로 다루기 어려운 복합 환경의 의사결정 신뢰도를 제고.

○ 연구기관, 제조사별로 데이터 구조와 명령 형식이 상이하여 상호 운용성이 확보되지 않는 점이 빅데이터 구축의 장애

- 데이터 구조, 제어 명령, 통신 프로토콜을 통합한 개방형 표준 인터페이스의 정립이 선결 과제이며, 통신 불안정으로 클라우드 중심 제어가 항상 보장되지 않는 농가 여건을 고려하여, IoT 게이트웨이 수준에서 실시간 추론이 가능한 엣지 AI를 함께 확보하는 것이 자율 운영의 전제.
- 표준 인터페이스가 정립되면 통합 운영의 범위는 농가 내부를 넘어 농업 부하를 지역 전력망의 조정 자원으로 활용하는 단계로 확장.
- 관개, 양수, 저온저장, 냉방처럼 시점 조정이 가능한 부하는 수요반응과 가상발전소를 적용하여 비용 항목에서 수익 자원으로 전환 가능성 확보.

○ 농가에서 목표값 입력만으로 복잡한 시스템을 운용할 수 있는 수준의 지능형 자동화 및 운영 대행 구조로 전환

- AI가 농업 환경을 실시간으로 인지하고 미래 변화를 예측하여 에너지, 수분, 생육 관리 전반의 행동을 스스로 결정하는 자율 운영체계로 발전이 가능.



그림 9. 3대 핵심 발전축 전망

4 향후 기술 발전 방향

○ 단/중/장기 기술 발전 방향 제시, 개발 및 통합, 실증 및 확산 고도화

– 각 기술은 기능과 적용범위가 구별되나, 실질적인 농업 현장에서 서로 연계될 때 경제적, 환경적 성과와 안정성 증대가 가능함.

4.1 단기 기술

○ 탄소중립형 농업 에너지 이용 전환을 위한 태양에너지 통합활용 전략

– 단순 시스템 설치 및 운용이 아닌 생육, 에너지 통합활용 관점 실증기술.

○ 기후 위기 대응 저비용 · 고효율 냉방체계 구축

– 화석연료 편중의 에너지 다소비 · 고위험 구조에 기상 위기로 인해 증폭되는 냉방수요 해결이 가능한 고도화된 냉방체계 구축 기술.

○ AI 기반 농림업 부산물 활용 바이오매스 연료 최적 제조 기술

– 다원료 및 다변수 공정을 전제로 원료 특성, 공정 조건, 연료 성능 데이터 기반 공정 최적화 체계 구축을 통해 환경친화적, 경제성 확보.

○ PV · PVT · 풍력 · 지열 · 그린수소 융합 ESS 통합 운영 기술

– 통합 에너지시스템 운영을 통해 발전량 · 부하 예측, 실시간 제어, 잉여전력 활용과 피크 대응을 수행함으로써 전력 안정성, 운영 효율성 동시 확보.

핵심기술	주요 내용	추진 단계					
		신규	보완	개발	통합	실증	확산
탄소중립형 농업 에너지 이용 전환을 위한 태양에너지 통합활용 전략	지붕형·스크린형·영농형 태양광·열 복합시스템(PV·PVT) 적용유형과 농업특화 성능지표 정립	■	■				
	구조물 설치, 광 투과율에 따른 작물 생육 및 미기후 영향평가 및 설계 기준 도출		■	■	■		
	농업 생산성, 에너지 생산성과 농가 에너지 부하를 함께 평가하는 유형별 현장 실증			■	■	■	■
	지능형 태양에너지 관리시스템 개발과 설계, 운영, 경제성 평가 표준 패키지 구축			■	■	■	■

핵심기술	주요 내용	추진 단계					
		신규	보완	개발	통합	실증	확산
기후위기 대응 저비용·고효율 냉방체계 구축	기후, 시설, 품목별 부하 계측 및 모델링을 통해 기준 부하곡선, 최대부하, 비용 상한을 설정	■	■				
	소극적 냉방(차광, 고반사 피복, 단열, 자연환기, 쿨링패드, 포그 등) 최적화 패키지 설계		■	■	■		
	적극적 냉방(히트펌프, 축열, 팬 등)을 결합한 냉방 패키지 개발 및 생애주기비용 평가			■	■	■	
	목표값 기반 농업형 냉방 에너지관리시스템과 선냉방·축열·부하이전 통합운영 실증				■	■	■
AI 기반 농림업 부산물 활용 바이오매스 연료 최적 제조 기술	지역/작목별 부산물 원료 성상과 건조·분쇄·혼합·반탄화 공정과 연료성능 데이터셋 구축	■	■	■	■	■	■
	원료 특성, 목표 연료성능 기반 공정조건·혼합비 최적화 AI 모델 개발 및 일반화 성능 검증		■	■	■		
	일반화된 연료화 공정의 시험생산과 연소효율, 운전 안정성, 슬래깅, 배출가스 성능평가			■	■	■	
	지역/작목별 권장 공정조건, 연료사양, 경제성 평가 등 농가 보급형 시스템 가이드라인 정립					■	■
PVT·풍력·지열·그린수소 융합 ESS 통합 운영 기술	각 신재생에너지시스템의 발전 및 전환 특성과 ESS 저장특성, 농가 부하 대응 성능 진단	■	■				
	발전 변동성, 저장기간, 부하구조를 통합 반영한 최적 에너지원 조합과 설비용량 산정		■	■	■		
	발전 및 부하 예측, 상태기반 실시간 제어, 잉여 및 피크 대응 에너지관리시스템 개발			■	■	■	
	농가 단위 융합에너지-ESS 통합 실증과 출력 변동성 완충, 피크 저감, 자립운전 지속성 검증					■	■
	저장시스템의 통합운영 평가 기준 확립 및 농업형 스마트그리드(장기기술) 연계 기반 마련					■	■

4.2 중기 기술

○ 노지농업 대상 신재생에너지와 AI 적용 농업생산 · 관리 기술

– 노지농업에서 발생하는 주요 에너지 부하를 신재생에너지 기반으로 전환하고 AI 제어와 연계하여 에너지 최적화, 탄소배출 저감을 목표로 함.

○ AI 에너지 통합관리 서버 및 표준 인터페이스를 통한 지능형 생태계 구축

– 스마트온실과 노지농업에서 발생하는 이기종 센서 · 제어 데이터를 하나의 생태계 수준에서 통합 · 표준화하고, 다계층 컴퓨팅 위에서 자율 운영을 수행하는 기술.

○ AI 기반 스마트팜 에너지 최적소비 결정 시스템

– 스마트팜 데이터를 수집 · 분석하여 작물 생육을 유지하는 범위에서 에너지 투입을 최소화하는 제어 전략을 AI 기반으로 제시하는 시스템.

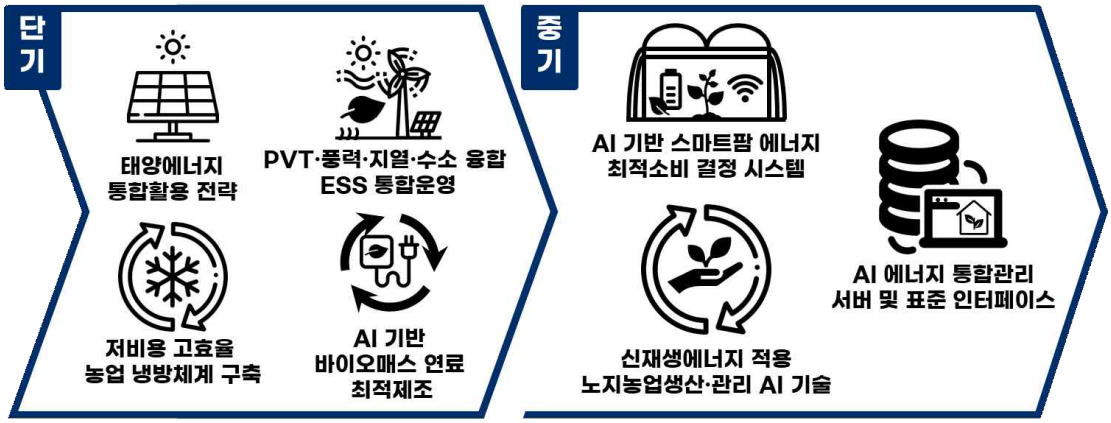


그림 10. 단 · 중기 농업 기반 신재생에너지 기술 연구개발 발전 방향

핵심기술	주요 내용	추진 단계					
		신규	보완	개발	통합	실증	확산
노지농업 대상 신재생에너지 적용 농업생산·관리 AI 기술	토양, 수문, 기상, 생육, 농업설비 부하의 현장 빅데이터 수집체계 구축	■	■	■	■		
	토양-식물-대기 물과 에너지 이동 연속체 모델(SPAC) 및 관개량 예측 기술 개발			■	■		
	신재생에너지 발전량과 설비부하의 통합예측 및 최적 운전기술 개발			■	■	■	
	엣지 컴퓨팅, 디지털트윈 기반 설비제어 실증과 에너지, 물, 탄소 절감 효과 검증				■	■	■
지능형 농업 생태계 구축을 위한 AI 에너지 통합관리 서버 및 표준 인터페이스	환경, 생육, 토양, 에너지, 설비상태와 제어신호의 공통 데이터 구조 정의	■	■				
	제조사별 통신규격, 제어명령, 데이터 품질, 권한, 보안 기준을 포함한 표준 인터페이스 개발		■	■	■	■	■
	농가 엣지-지역 통합서버-대규모 클라우드가 연계되는 계층 및 분산형 통합관리 구조 구축			■	■	■	■
	통합 디지털 농업 모델과 AI 운영전략을 개발하고 다중 제조사 장비 상호운용 검증			■	■	■	■

핵심기술	주요 내용	추진 단계					
		신규	보완	개발	통합	실증	확산
AI 기반 스마트팜 에너지 최적소비 결정 시스템	지역, 작물, 온실 구조, 설비별 환경·에너지·생육·기상 통합 데이터셋 구축	■	■				
	온실환경과 냉난방, 환기, CO_2 공급 등 에너지 사용을 재현하는 고정밀 디지털트윈 개발		■	■	■		
	기상예측, 현재상태, 생육정보 데이터 기반 에너지 최적소비 의사결정 지능형 모델 개발			■	■	■	
	대표 농가 실증을 통한 에너지, 비용, 환경, 생육 영향 검증 및 농가별 운영 매뉴얼 구축				■	■	■

4.3 장기 기술

○ 농업부산물 바이오매스 자원 순환체계 구축

– 지역 단위에서 생산 · 저장 · 소비가 가능한 바이오매스의 자원 흐름을 폐기물 저감 · 에너지 전환 · 열수요 대응과 연계하여 자립형 에너지 생태계를 구현.



그림 11. 농업부산물 바이오매스 자원 순환 기술 체계

○ 신재생에너지 융합 및 AI 기반 제어 시스템을 통한 에너지 자립형 스마트팜 단지 실증

– 기존 외부계통 의존형 스마트팜 전력공급 구조를 다중 신재생에너지원 · ESS · AI 통합제어 기반의 지역 자립형 마이크로그리드로 전환하고, 전력 생산 · 저장 · 수요반응 · 전력 계통연계 및 독립운전을 스마트팜 단지에서 장기 실증.

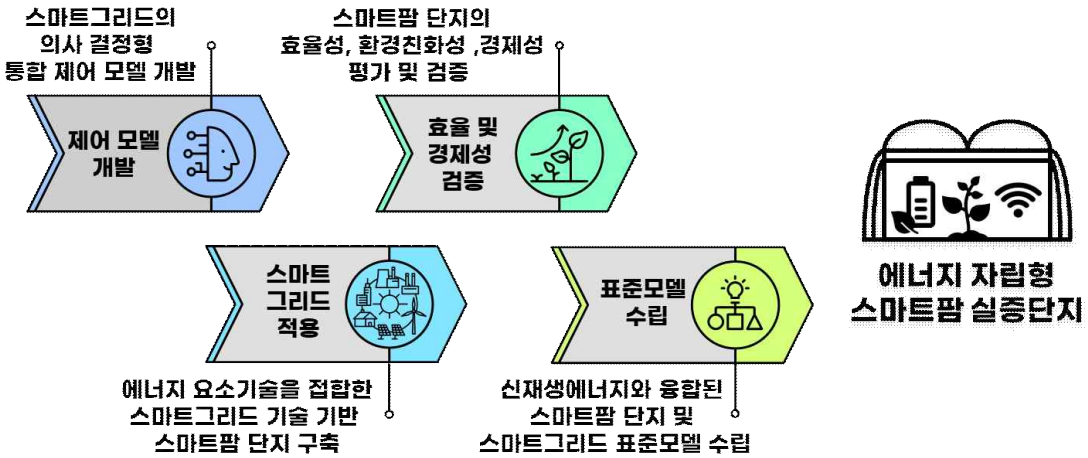


그림 12. 신재생에너지 융합 자립형 스마트팜 단지 및 스마트그리드 체계

핵심기술	주요 내용	추진 단계					
		신규	보완	개발	통합	실증	확산
농업부산물 바이오매스 자원 순환체계 구축	지역/작목별 농업부산물 발생량, 원료 특성, 운송거리, 에너지 수요를 연계한 자원지도 및 데이터베이스 구축	■	■				
	순환과정(수거-집하-저장-운송) 시 바이오매스 자원의 통합관리 기술(수분, 품질, 재고, 불순물, 화재위험 등) 개발	■	■	■	■		
	부산물 전처리, 연료화, 저장·분배, 부하제어를 연결한 지역 단위의 통합운영체계 구축			■	■	■	■
	온실 난방, 농산물 건조, 저장고 등의 지역 열수요를 연계한 실증과 운영기준 및 사업모델 정립				■	■	■
신재생에너지 융합 및 AI 제어 시스템을 통한 에너지 자립형 스마트팜 단지 실증	신재생에너지시스템, 에너지저장시스템(ESS), 고효율 냉난방 에너지 부하관리 시스템 통합단지 구축	■	■	■			
	에너지, 물·양액, 농업 시설 환경 데이터를 연계한 AI 기반의 단지형 수요·공급·저장 통합예측 모델 개발		■	■	■		
	에너지저장, 수요반응, 분산자원관리, 자립운전을 결합한 스마트팜 단지 통합제어화			■	■	■	
	계절별 부하변동과 설비 성능저하, 운영자 개입, 작물 생산성 영향요소를 포함한 장기 현장실증		■	■	■	■	■
	에너지 자립률과 운영 안정성·경제성·생산성을 평가하여 한국형 농업용 스마트그리드 설계 및 운영·성능평가 표준모델 정립					■	■

5 주요 이슈 및 한계

○ 현재의 정책, R&D, 현장 사업 구조는 앞서 제시한 전환(설비 중심 → 시스템 통합운영)을 뒷받침하기에 한계가 분명

– 이 한계는 개별 기술의 성능 문제가 아니라 기술을 둘러싼 정책 구조, 데이터 수집 체계와 기반의 문제로 나타남.

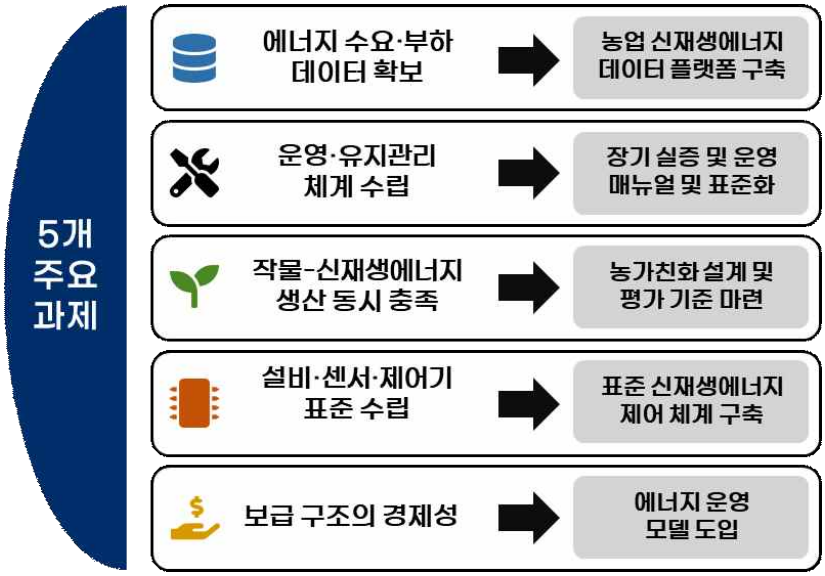


그림 13. 5개 주요 과제

○ 정책 · 사업 구조의 설비 보급 편중

– 다수의 정책 · 사업이 개별 장비의 설치와 성능평가에 초점을 맞춰 설계되면서, 정책 · 사업 구조가 설비 보급과 단기 실증에 편중되는 구조.

– 에너지 열 · 전기 · 연료 · 저장 · 소비를 하나의 시스템으로 설계하고 농가에 적용하여 장기 수익구조 및 지역 전력망과 상호작용을 분석하는 연구는 상대적으로 미흡한 실정.

– 실증단지는 사업 기간에는 원만히 유지되나 사업 종료 후 유지보수, 운영비 부담, 요금과 제도 간 부조화로 "정책 섬"처럼 고립되는 사례가 반복.

○ 통합 및 세분화된 농업 데이터 · 지식 인프라의 빈약

– 농업 부문 에너지 소비 및 탄소배출 통계는 존재하나 품목/시설 유형/지역/기술 수준에 따른 세분화는 정립되지 않은 상황.

– 개별 온실/축사/저장고/양수장 단위의 실시간 에너지 사용 정보와 내부 환경 및 생육 정보, 신재생에너지 생산량, 설비 가동률–유지보수비 등이 통합된 데이터 플랫폼은 초기 단계.

– 따라서 특정 조합의 신재생에너지시스템 기술을 적용할 때 어느 정도의 에너지와 탄소를 줄일 수 있는지 정확히 제시하기 어렵고, 정책과 투자가 경험 및 관행에 의존하는 경향이 발생함.

– 시스템 통합 사례와 요소별 데이터 부족 문제를 해소하기 위한 체계화된 데이터 플랫폼 구축이 시도되고 있으나, 아직 시범 수준에 머물러 정책 · 투자 판단의 근거로 활용되기에 이른 단계.

○ 농촌 사회구조와 전환 비용의 미연결

– 고령화 · 인구 감소 · 소규모 경영이 동시에 진행되는 농촌의 산업구조에서는 에너지 전환에 필요한 비용과 운영 복잡성을 감당하기 어려움.

– 고가의 에너지 설비를 농가별로 보급하고 복잡한 제어와 운영을 각 농가에 맡기는 방식은 상대적으로 시설, 인력, 인프라가 부족한 농가의 경우 지속 가능하지 않으며, 에너지 전환의 비용과 운전 복잡성이 상대적으로 취약한 농가에 집중될 위험을 내포.

– 즉 가장 비용이 높고 운영이 복잡한 신재생에너지시스템을 투자 여력과 운영 인력이 가장 부족한 부문에 적용해야 하는 딜레마가 근본적 제약.

– 그럼에도 이를 완화하기 위한 사회적 보호장치와 지역 단위 공동에너지 시스템, 공공과 민간이 함께 부담하는 사업모델에 대한 논의는 제한적.

– 기술 성능의 개선만으로는 해소되지 않으며 보급 구조 자체의 전환 필요.

표 8. 주요 이슈 및 해결 방향

주요 이슈	현황	해결 방향
에너지 수요, 부하 데이터 확보	품목, 시설, 지역, 기술 수준별 세분화 통계 미흡	농업 신재생에너지 데이터 플랫폼 구축
운영 및 유지관리 체계 수립	실증 종료 후 유지보수, 운영비 부담으로 인한 기술 고립	장기 실증 및 운영 매뉴얼·표준화
작물–신재생에너지 생산 동시 충족	발전량–생산성 간 균형 기준 부재	농가친화 설계 및 평가 기준 마련
설비·센서·제어기 표준 수립	제조사별 데이터, 명령 구조 상이	표준 신재생에너지 제어 체계 구축
보급 구조의 경제성	고가 설비의 농가별 개별 보급 한계	에너지 운영 모델 도입

Ⅳ. 산업 및 정책 환경

1 산업 동향

○ 농업 기반 신재생에너지 산업은 농업시설 에너지 수요에 맞춰 복수의 신재생에너지 시스템을 설계 및 장기 운영하는 융합산업으로 전환

– 기술의 통합 범위가 생산–저장 · 전환–운영–소비로 확대됨에 따라 산업 범위도 설비 제조, 시공 및 통합설계, 데이터, 운영 · 유지관리, 금융, 공동운영 및 에너지 시장 연계로 확장.

– 신재생에너지 시스템의 출력 변동성을 감당하며 농업 생육환경 유지, 생산량을 충족하기 위해 일반 신재생에너지 설비보다 농업생산과 에너지 운영을 함께 고려하는 전문적인 설계와 운영 역량이 중요.

– 산업발전 수준은 상용화 가능성, 반복 사업, 장기 운영계약, 성능보증, 민간금융, 공동 운영 및 시장 정산 여부를 함께 평가 필요.

– 국내 농업 기반 신재생에너지 기술은 요소기술 실증이 상당 부분 축적되어 통합 운영 단계에 진입했으나, 산업 측면에서 장기 운영과 유지관리, 상호운용 표준 및 서비스 형태의 사업화는 국외에 비해 연구 단계거나 미흡한 실정(농림식품기술기획평가원, 2022; EU CAP Network, 2026a).

표 9. 농업 기반 신재생에너지 산업 영역

산업 영역	주요 산업활용 기술	주요 참여 주체	주요 수익·성과
자원·설비 농가 공급	PV·PVT, 히트펌프, 지열·수열, 바이오에너지, ESS·축열, 센서 및 제어기 공급	설비 제조사, 부품기업, 공급업체	제품 판매 및 부품 공급
농업특화 설계, 시공	농가 맞춤 시스템 설계, 에너지 계통–열원 연계	농업 시설 시공사, 엔지니어링사, 시스템통합사업자	설계·시공비, 통합 패키지 판매
저장·전환 통합	에너지 저장, 복합열원 구성, 에너지원 간 변환	에너지 관리 시스템 사업자	통합 설비 판매, 성능개선
데이터 플랫폼	발전량·부하 예측, 최적제어, 원격관제, 데이터 관리	ICT·AI·EMS 기업, 플랫폼사업자	소프트웨어, 운영 수수료
운영 및 유지관리	유지 및 성능관리, 운영대행, 설비교체 및 사후관리	O&M, ESCO, 서비스사업자	장기 운영계약, 성과보수
금융 및 위험 분담	보조·융자, 리스, 대여 서비스, 성능보증, 보험,	금융기관, 공공기관, 투자자, 사업개발자	이자·임대·투자수익
공동 운영, 시장 연계	농가 단지 공동 운영, 에너지공동체, DR·VPP, 전력 시장 거래	농협/영농조합, 지자체, 전력중개사업자	농가 이익 확대

1.1 글로벌 산업 동향

표 10. 글로벌 농업 신재생에너지 사업모델 및 산업 성숙도

산업모델	농가의 역할	주요 수익·편익	글로벌 적용 수준
농가 직접 운영유형	설비 소유·운영	자가 소비, 에너지비용 절감, 판매수익	성장시장
임대형	부지·시설 제공, 에너지 구매	임대료, 저가 에너지 이용	초기~성장
ESCO, 운영 서비스형	에너지사용자	절감성과 공유, 운영부담 완화	분야별 초기
협동조합, 공동체형	공동 출자 및 의사결정	공동 에너지 이용, 판매 및 배분	지역별 초기~성장
바이오에너지 공급망형	원료 공급 또는 시설 참여	처리비, 전기·열·연료 판매	일부 국가 성장
수요 반응형	부하 조정	요금 절감, 감축 인센티브	일부 부하 상용
농업 특화 VPP형	분산 자원 제공	전력 거래	연구 초기

○ 글로벌 농업 신재생에너지 산업은 개별 설비시장이 기존 설비 공급을 기반으로 소유, 금융, 운영, 수익모델 등에서 산업 전개가 다변화되는 방향으로 진행중(HarvRESt, 2026)

– 농가가 설비를 직접 설치하여 생산된 에너지를 자가 소비하거나 판매하는 전통적인 방식과 함께, 에너지 서비스기업과의 협력, 대여 서비스, 농가 · 주민의 공동소유, 에너지공동체 등 다양한 사업구조가 병존.

– 산업의 부가가치가 설비 자체에 국한된 것이 아닌, 설비시장 후단에 금융, 운영, 성과관리 기능이 추가되는 가치사슬 확장으로 해석 가능.

○ 사업성을 발전량이나 설비 효율만으로 결정하지 않고 현장 수요(초기 투자비, 운영비, 자가소비율, 농업시설 에너지 사용구조) 평가에 따라 결정

– EU의 HyPErFarm 사업성 분석에서는 설비 투자비와 운영비, 자가 소비 수준, 현장별 에너지 생산 · 수요구조의 정합성이 경제성에 주요 영향을 미치는 요소로 제시.

– 동일 에너지원이라도 농가의 부하특성과 에너지 소비 시간에 따라 비용 절감과 판매수익의 구성이 달라지므로 현장별 타당성 분석이 필요.

– 이는 표준 설비를 일률적으로 보급하는 방식에서 작물 · 시설 · 기후 · 부하를 반영한 맞춤형 설계와 운영으로 산업 경쟁력의 원천이 이동함을 의미.

○ 장기 운영과 유지관리의 중요성이 확대되면서 에너지원별 전문 운영산업도 점진적으로 형성

– 시스템의 초기 설계뿐 아니라 장기 성능저하, 유지관리비와 교체 주기를 반영한 운영계약의 중요성이 확대되는 추세.

– 농업 시설의 전기 · 열 · 연료를 모두 관리하는 통합 EaaS(Energy as a Service)는 국가와

기술별로 초기 시장이 형성.

○ 농가 단위 신재생에너지 시스템 설비를 지역 단위에서 공동 소유 · 운영하는 산업 모델도 확대

– 농가 · 주민 · 기업 등이 공동으로 설비를 소유 및 운영하고 에너지비용과 수익을 배분하는 사업모델.

– 개별 농가의 투자와 운영부담을 줄이면서 설비 규모와 에너지 수요를 집합해 사업성을 확보하는 구조.

– 에너지공동체가 모두 농업을 기반으로 하는 것은 아니며, 제도와 산업기반이 농업시장이 아닌 농촌 · 지역 단위로 설계되어 있어 농업 부문의 확장에 어려움이 존재.

○ 농업부하를 비용절감과 전력 유연성 자원으로 활용하는 산업모델 등장

– 농업부하는 전력 소비를 즉시 중단하기 어려운 경우가 많지만, 저장조 · 축열조 · 관개 일정과 결합하면 일정 범위에서 운전시간 이동 가능.

– 일반적인 가상발전소–수요반응과 분산 자원 집합 사업은 상용시장에 진입했으나(U.S. Department of Energy, 2023), 농업 특화의 경우는 공공 R&D와 실증 비중이 높은 초기 단계.

– EU의 HarvRESt 사업도 농업용 가상발전소와 의사결정지원시스템을 통해 다양한 농장 구성과 신재생에너지 운영조건을 검토하는 단계(European Commission, 2026; HarvRESt, 2026).

1.2 국내 산업 동향

표 11. 국내 농업 신재생에너지 산업 생태계 및 주요 공백

가치사슬	형성된 산업기반	현재 단계	주요 공백
설비 제조·공급	태양광, 히트펌프, 보온·열회수, 바이오에너지 설비	성장	농업특화 복합제품
설계·시공	설비별 설계·시공과 농업시설 EPC	초기~성장	작물·부하·에너지원 통합설계
저장·전환	ESS·축열·복합열원 연구·실증	연구~초기	장기 운전, 통합 성능보증
데이터·AEMS	스마트팜 관제·제어·데이터 기반	연구~초기	에너지자원·시장정보 통합
O&M·EaaS	제조사 사후관리와 일반 ESCO	초기	전문 운영자, 장기 성과계약
금융·소유	직접 구매·보조·정책융자 중심	초기시장	리스·제3자 소유·보험
공동운영	공동시설·단지형 실증	연구~초기	소유·계측·비용·수익배분
시장연계	일반 DR·분산자원 제도	제도 형성	농업 참여·정산실적

○ 국내 농업 신재생에너지 산업은 개별 설비의 제조 및 시공과 정책지원형 보급을 중심으로 기반이 형성된 구조

– 농업 현장에서는 지열 · 공기열 히트펌프, 보온설비, 태양광 및 바이오에너지 등 개별 설비의

실증사례가 축적, 복합열원 · ESS · AEMS 연계 연구도 확대되고 있으나 상용 설계모델은 제한적.

- 그 결과 기술력, 제조 및 시공 등 가치사슬 전단부에 비해 통합설계, 운영 · 유지관리, 금융과 시장 연계의 후단부가 상대적으로 미성숙한 실정.

○ 시스템의 성능과 장기 운영을 책임지는 전문 사업 주체가 부족한 구조

- 개별 제조사와 시공업체가 담당 설비에 대한 사후관리를 제공하더라도 복수 설비의 연동성, 전체 에너지비용과 작물 생산성을 통합 운영하는 사업자는 제한적.
- 장기 실증 운영실적에 비해 성능보증의 책임 범위가 분산되기 때문에, 운영 및 유지비용, 시스템 성능저하 책임이 농가 또는 실증기관에 발생.
- 이처럼 설계–운영–성과 책임 주체가 되는 전문 사업자의 부재로 기술적 성과가 반복되어도 상용사업으로 연결되기 어려운 구조.

○ 신재생에너지와 스마트팜 환경 및 제어 데이터를 처리하는 기술력은 발전하고 있으나 농업 에너지 전체를 관리하는 AEMS 산업은 초기 수준

- 국내에는 스마트팜 데이터의 상호운용과 데이터 변환을 위한 표준기반이 마련되어 있어 스마트팜 이기종 데이터 연계의 기초조건은 형성.
- 그러나 점차 세분되는 발전량, 히트펌프 성능계수(Coefficient of Performance, COP), 축열량, 에너지 요금 및 수익 변화 등 농업 기반 에너지데이터를 융합하는 공통 데이터 플랫폼 모델은 부족.
- AEMS 산업화에는 통합 인터페이스뿐 아니라 설득력 있는 운영 서비스와 정량적 성과 입증이 필요한 상황(한국정보통신기술협회, 2023).

○ 농업특화 운영 및 유지보수(O&M, Operation & Maintenance) 서비스와 에너지 서비스산업(ESCO, Energy Service Company) 확산이 제한적 (한국에너지공단, 2026)

- 일반적인 에너지 서비스산업은 현장 조사, 사업 제안, 설계, 시공, 시험 운전, 유지관리와 사후관리까지 전 과정의 서비스를 제공하는 형태.
- 농업 신재생에너지 분야의 전문 에너지 서비스산업은 장기 운영계약에 따른 생산량과 신재생에너지의 통합 성과보증이 어려운 상태.
- 국내 농업 에너지 절약 및 O&P 서비스산업은 위와 같은 통합 성과지표를 위해 농업부하 · 생육환경 · 신재생에너지 특성이 고려되어야 함.

○ 공공지원 의존도가 높은 투자 · 소유구조도 해결 필요 과제: 농가의 설비 직접 구매와 공공지원이 주요 도입방식으로 기능

- 타 기술에 비해 농업 기반 신재생에너지 분야에서 공공지원 이외에 민간 · 공동의 표준 사업

모델이 정착되지 않은 상태로 공동시설과 단지형 실증이 등장하고 있으나 수익배분을 담당하는 전문 산업 모델은 미흡.

○ 시장 연계 산업의 제도 선행: 국내에는 일반 수요자원시장이 운영되고 있으나 농업 부하의 참여 수준을 별도로 판단할 수 있는 산업통계는 부족

– 수요자원 거래시 장 운영자료 중 관개 · 양수 · 냉난방 · 저온저장 등의 농업 부하의 참여 용량과 정산액은 별도 분류가 어려운 상태(전력거래소, 2026).

– 농업에너지의 시장연계 산업이 형성되기 위해서 농업용 부하의 운전제약과 생산위험을 고려한 기반 제도, 감축량 검증과 보상구조가 필요한 상황.

2 국내외 정책 동향

2.1 국외 정책 동향

○ EU: 재생전력, 재생열, 바이오메탄에 대해 지역공동체 통합지원 정책구조

– RED III(EU 재생에너지 확대 정책의 법적 기반)와 REPowerEU(러시아산 화석연료 의존 감축 및 에너지 안보 강화 계획)를 통해 냉난방 부문의 재생에너지와 바이오메탄 공급망을 확대하고, HarvRESt 등 공공 R&D를 통해 농장 에너지 통합운영과 사업모델을 실증(European Union, 2023).

– 에너지공동체 활용 농가 · 주민 · 지자체의 공동소유, 에너지 공유 · 판매 지원(European Commission, 2022, 2023, 2026).

○ 미국: 농가 투자위험 완화와 전문 운영지원에 중점을 둔 정책구조

– REAP를 통해 농업생산자의 재생에너지, 효율화 투자, 지원 및 대출보증, 에너지 진단을 지원하고, AgSTAR(축산분뇨 기반 바이오가스 보급 지원 프로그램)를 통해 바이오가스 사업의 개발 · 금융 · O&M 지침을 제공.

–기존 전력시장에 접합하여 참여할 수 있는 분산자원의 제도적 경로를 마련함(U.S. Department of Agriculture, Rural Business–Cooperative Service, 2024; U.S. Environmental Protection Agency, 2020a, 2020b; FERC, 2020).

○ 일본: 태양광 · 풍력 · 소수력 · 지열 · 바이오매스 등 지역의 신재생에너지원을 농림어업 및 지역산업과 연계하는 구조

– 지자체 중심의 지역계획과 바이오매스 산업도시를 통해 자원의 수집과 에너지 생산, 지역 이용을 통합해 공급(일본 농림수산성, 2026a, 2026b).

2.2 국내 정책 동향

○ 분야별 정책 기반의 확대: 국내는 신재생에너지 기반 스마트농업 및 농업병행 발전 분야의 법률과 사업을 운영(농림축산식품부, 2025, 2026a, 2026b; 기후에너지환경부, 2026; 법제처 국가법령정보센터, 2025, 2026a, 2026b; 전력거래소, 2026; 한국정보통신기술협회, 2023)

– 농업 에너지 이용 효율화, 저탄소 에너지 공동이용시설을 통해 농가 및 단지의 냉난방 에너지 절감과 공동에너지 기반 조성.

– 바이오가스 생산목표제와 가축분뇨 고체연료 활성화를 통해 유기성 폐자원의 가스 · 고체연료 전환 확대.

– 분산에너지활성화특별법과 수요자원거래시장을 통해 발전 · 저장 · 농업 부하의 지역 단위 집합과 시장참여 경로를 마련.

– 스마트농업 기본계획과 데이터 표준을 통해 AEMS의 디지털 기반을 마련하고, 영농형 태양광법을 통해 농업생산과 재생전력의 병행 기반 구축.

○ 정책적 한계: 분야별 제도는 확대되고 있으나 복수 에너지원과 저장 및 농업 부하를 하나의 사업으로 연결하는 통합지원은 미흡

– 설비 설치와 생산 목표에 비해 사전 타당성 평가, 전문 운영자, 장기 O&M, 민간금융과 시장정산의 연계 부족.

– 농업 에너지 정책의 평가도 설치량 중심에서 에너지비용 · 생산성 · 탄소 감축 · 장기 운영성과 중심으로 확대할 필요.

2.3 국내외 정책환경 비교

○ 정책 전주기 연결 수준의 차이: 글로벌 선도정책은 설비 도입과 함께 진단, 금융, 운영, 공동체, 시장 참여를 지원하는 반면 국내는 분야별 설비지원과 제도 기반이 분산된 구조

– 국내 정책의 핵심과제는 신규 사업의 추가보다 기존 신재생에너지 및 분산 에너지원 정책을 통합설계, 공통 데이터, 전문 O&M과 장기 성과평가로 연결하는 것.

– R&D와 보급사업도 기술 실증 이후 사업성, 운영 주체, 유지관리와 지역 확산성까지 평가하는 연속적 구조로 전환 필요.

표 12. 국내외 농업 신재생에너지 주요 정책

구분	주요 정책·사업	정책 내용	주요 특징·과제
EU	RED III, REPowerEU	재생열 확대, 바이오메탄 생산, 유통 지원	전력·열·가스의 통합
	HarvRESt, 에너지공동체	농장 통합운영 R&D, 공동소유, 공유, 판매	기술실증과 지역운영 연계
미국	REAP	지원, 대출보증, 에너지진단	농가투자와 민간금융 연계
	AgSTAR, FERC Order 2222	바이오가스 O&M, 분산자원 집합시장	운영지원과 시장참여
일본	농산어촌 재생에너지정책	태양광·풍력·소수력·지열 등 신재생에너지 지역계획	지역자원 맞춤형 도입
	바이오매스 산업도시	원료 수집–생산–지역 소비 지원	지역순환형 공급망
국내	농업 에너지 이용 효율화, 공동이용시설	재생열의 효율설비와 공동에너지 기반	운영주체·비용분담 보완
	바이오 가스법, 고체연료 활성화	생산목표, 실적관리, 연료 수요 확대	수요처·품질·전문 O&M 필요
	분산에너지활성화특별법, 수요자원시장	분산전원, ESS, 부하의 시장참여 기반	농업자원 계량·정산 부족
	스마트농업 정책, 영농형 태양광법	데이터·제어 기반과 농업병행 발전	AEMS·생산성 평가 보완

Ⅴ. 결론 및 제언

1 주요 동향 및 시사점

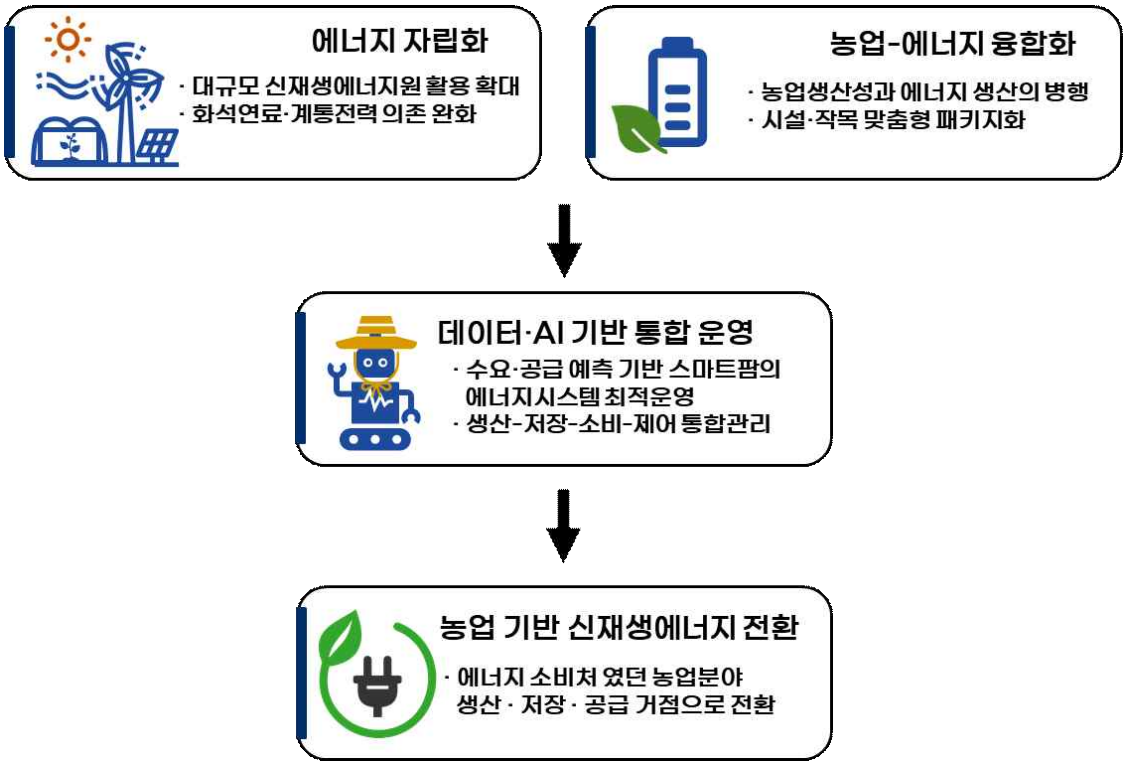


그림 14. 농업 기반 신재생에너지 종합 전망

○ 농업 기반 신재생에너지는 설비 경쟁에서 시스템 통합 및 운영으로 전환되고 있으며, 농업을 에너지 소비처에서 생산 · 저장 · 공급 거점으로 재정의

– 개별 요소기술의 효율을 넘어 기술들을 서로 연동하고 장기간 실증을 통한 운영성과를 핵심 평가 대상으로 전환하는 국면.

– 신재생에너지는 독립 기술이 아니라 지능형 농업 인프라와 연계될 때 실효성이 확보되는 구조.

○ 이 전환은 농가에는 기후 및 에너지 리스크를 관리하는 경영 인프라로, 산업에는 설비 공급에서 운영 · 성과 기반 서비스로의 확장으로 작동

– 폭염 · 한파로 냉난방 이중 피크가 고착되고 아열대화로 인해 냉방부하가 점차 증가함에 따라, 저비용 · 저탄소 에너지 공급이 생산성 확보와 탄소중립 이행을 동시에 뒷받침.

– EaaS, 장기 운영계약, 성능보증, 에너지공동체 등 운영 · 성과 기반 사업모델이 부가가치의

중심으로 이동하며, 사업성이 발전량 · 설비효율 단독이 아니라 초기 투자비 · 운영비 · 자가소비율 등 현장 정합성으로 결정되는 구조.

○ 국내외 격차의 본질은 요소기술 성능이 아니라 무엇으로 묶어 어떻게 운영 및 평가하는가에 있으며 국내는 통합 운영을 위한 기반 확보 단계

○ 따라서 당면 과제는 새 설비의 추가가 아니라 3대 발전축의 동시 추진을 통한 3단계의 안정적 완성

– (자립화) 기상 의존형 · 비의존형 자원과 저장 수단을 함께 갖추되, 완전 자립보다 전력 계통과 주고받는 외부 의존도 감소 형태로 단계적 접근.

– (융합화) 작물 · 에너지 생산을 하나의 설계로 병행하되 발전량–생산성 상충관계의 정량화가 전제.

– (데이터 · AI 통합 운영화) 자립화와 융합화를 실현하고 개방형 표준 인터페이스와 예측 기반 운영을 통해 통합을 실현.

○ 전환의 시급성과 순차성: 냉난방 부하 증가와 농사용 전기요금의 단계적 인상은 이미 현실화, 전환 지연의 비용이 매년 누적되고 있는 상황

– 통합운영 없이는 실증 종료 후 유지관리 및 운영주체 공백으로 고립되는 '정책 섬'을 재생산할 위험이 있어 단계의 순차적 완성이 이행의 전제.

표 13. 농업 기반 신재생에너지 전환의 구조적 변화

구분	기존 구조	전환 방향
에너지시스템	에너지 소비처	에너지 생산·저장·공급 거점
기술 초점	개별 설비 효율	시스템 통합·운영 성과
산업 구조	설비 제조·시공 중심	통합설계·운영·서비스 확장
평가 기준	설비별 효율·절감률	에너지·생산성·탄소 통합 지표
정책 방식	설치량 중심 지원	전주기 통합 연계 지원

2 정책 및 R&D 전략

표 14. 국외 동향과 국내 전략 과제

전략 영역	국외 선도 동향(관찰)	국내 당면 과제
R&D 투자	시스템 통합, 운영성과 평가, 자립형 단지 실증	평가지표, 실증 데이터 축적
기술 확산, 산업화	서비스, 시장 모델(EaaS·VPP 등)	운영 실증 및 시장 다변화
기반 구축, 제도	전주기(진단→금융→운영→시장) 연속 지원	표준 국제 정합·실증–상용 연계

2.1 R&D 투자 방향

○ R&D의 당면 목표는 요소기술 실증(2단계)에서 시스템 통합 운영(3단계)으로의 전환이며, 평가 단위를 개별 기기 성능에서 시스템 성능 · 장기 운영 안정성으로 전환하는 것이 관건

– 단기/중기/장기 연구가 기반을 구축 → 개발 · 통합 → 실증 · 확산으로 단절 없이 이어지는 연속 설계가 전제.

○ (단기) 요소기술의 고도화: PV · PVT 성능지표 정립, 고효율 냉난방 부하 저감, 바이오매스 연료 최적 제조, PVT · 풍력 · 지열 · 그린수소 융합 ESS 운영

○ (중기) 데이터 · 표준 인터페이스 기반의 예측 통합 운영으로 확장: SPAC 기반 노지 신재생 적용 기술, 다계층 AI 에너지 통합관리 서버와 개방형 표준 인터페이스, 스마트팜 에너지 최적소비 결정 기술

○ (장기) 지역 자원순환과 자립 실증: 바이오매스 자원 순환체계, 자립형 스마트팜 단지 및 한국형 농업용 스마트그리드 표준모델

- 기후변화에 대응하고 농업 생산성과 에너지비용 절감을 함께 달성하는 현장 문제 해결형 R&D 투자로 태양광 · 열(PVT), 히트펌프, 바이오매스 · 가스 등 신재생에너지시스템을 통해 농업 에너지 저감을 위한 연중 안정적인 에너지 공급 기술 조합 개발이 필요
- 작물이 필요한 생육환경을 유지하며 에너지를 공급하는 재생에너지 활용기술 개발과 농림업 부산물을 연료로 전환해 생산 에너지를 지역 농업시설에 공급, 외부 에너지 의존도를 낮추는 자원순환 모델 구축
- AI 기반 농업 에너지관리시스템(AEMS)을 활용하여 에너지 생산량과 수요를 예측하고 다양한 설비를 연계하는 통합운영 기술 개발과 장기 실증을 통해 경제성과 작물 생산성에 더해 탄소 감축 효과와 운영 안정성을 검증하고, 농업 현장의 여건에 맞는 설계 및 운영 기준 정립

2.2 기술 확산 및 산업화 전략

○ 국외는 설비시장 후단에 금융, 운영, 성과관리가 더해지며 기술이 산업으로 확장되나, 국내는 운영 · 시장 연계 후단부의 형성이 산업화의 핵심

– 동일 에너지원이라도 부하특성과 소비 시간에 따라 경제성이 달라져 표준 설비의 일률 보급보다 작물 · 시설 · 기후 · 부하를 반영한 맞춤형 설계 및 운영 역량이 산업 경쟁력을 좌우함.

○ 서비스화: 전기 · 열 · 연료를 통합 관리하는 농업특화 EaaS 및 에너지 서비스산업이 정착하려면 농업 부하 · 생육환경 특성을 반영한 성과지표와 설계–운영–성과를 일괄 책임지는 전문 사업 주체가 전제

○ 보급 구조: 고가의 복잡 시스템을 투자 여력이 가장 부족한 부문에 적용해야 하는 딜레마는 기술 성능개선만으로 해소되지 않으며, 농협 · 영농조합 · 지자체 참여형 공동소유 · 공동 운영

등 보급 구조 자체의 전환 요구

○ 소유 · 금융 다변화: 농가 직접 구매와 공공지원 중심에서 투자 · 위험 분담 구조를 넓히는 것이 취약 농가의 진입 장벽을 낮추는 관건

– 서비스 · 시장 연계 산업이 아직 초기시장으로 공공 R&D · 실증이 성과지표와 사업모델을 검증해 민간 시장 형성을 견인하는 단계적 접근이 요구.

○ 시장 연계: 관개 · 양수 · 저온저장 · 냉방 등 유연 부하를 DR · VPP · DERMS 자원으로 활용하여 농업 부하를 비용에서 수익 항목으로 전환하는 것이 생산 · 자립형 농업 이행의 구체적 경로



그림 15. 국내 농업 기반 신재생에너지 산업 형성 수준 및 방향성

- 농가가 적합한 기술을 직접 선택할 수 있도록 작물과 시설 유형에 따른 보급모델을 마련하고 농업생산과 발전을 병행하는 영농형 태양광 포함 여러 열원을 함께 이용하는 냉난방 시스템 검증을 통한 경제성 제시
- 농가의 투자 여력과 운영 역량에 따른 단계적 설비 도입과 임대 방식의 보급체계를 대규모 에너지시설과 전문사업자의 운영대행을 연계해 초기 비용과 관리 부담을 줄이고, 서비스 비용과 설비 성능의 점검 및 유지 책임을 명확히 하는 사업모델 정립이 필요
- 농업생산에 영향을 주지 않는 범위에서 전력 사용을 조절하고 그 실적에 따라 보상받는 수요반응(DR) 사업 실증과 여러 농가의 발전설비와 저장장치를 묶어 관리하는 가상발전소(VPP)의 시장 참여 조건과 수익성을 검증하여 농가의 에너지비용 절감에서 지역 에너지 공급으로 이어지는 산업 영역 확대

2.3 기반 구축 및 제도 개선

○ 국외 선도정책은 진단–금융–운영–공동체–시장 참여를 연속 지원하는 반면 국내는 분야별로 분절되어 있어 신규 사업 추가보다 기존 정책의 전주기 연결이 핵심과제

○ 데이터 · 표준: 품목 · 시설 · 지역 · 기술 수준별로 세분화된 에너지 · 탄소 데이터 플랫폼과

제조사별로 상이한 데이터 · 제어 · 통신을 통합하는 개방형 표준 인터페이스 정립

– 아울러 농가 엣지-지역 서버-클라우드로 이어지는 계층적 운영 인프라를 공공이 선도 구축하여, 개별 농가가 부담하기 어려운 연산 · 저장 자원을 공동으로 이용 가능한 공공 인프라로 제공하는 방안을 검토할 필요가 있음.

○ 전문 주체: 농업 생산과 에너지 운영을 함께 다루는 전문인력, 장기 O&M과 통합 성과보증을 담당하는 전문 사업 주체의 양성

○ 제도: 설비 설치 · 생산 목표 중심의 지원을 사전 타당성–운영–금융–시장 정산까지 연결한 연속 구조로 전환하고 정책 평가 기준을 설치량에서 에너지비용, 생산성, 탄소, 장기 운영성과로 확대

○ 표준화 실증–상용 연계: 영농형 태양광 등 국외에서 선행된 설계 · 평가 기준과 정합하는 국내 표준화를 진행하여 실증을 설계 단계부터 운영 주체, 사업모델과 연결하여 사업 종료 후 고립 방지

– 실증 종료 이후의 장기 운영 및 유지관리, 타 지역 · 작목으로의 이전, 표준 서비스 형태로의 전환까지 포함하는 연속 설계가 확산의 조건.

◘ 신재생에너지 기술을 농가에서 판단하여 도입 여부를 결정할 수 있도록 에너지비용 절감액, 유지관리비와 작물 생산성 변화를 작물 및 시설 유형별로 정리하여 제공하는 빅데이터 기반 정보 포털을 구축하여 농가가 공동 이용하는 데이터 분석 서비스 제공

◘ 농가 에너지 수요와 예상 비용 대비 효과를 확인하는 도입 타당성 검토부터 사업 종료 이후의 운영까지 연결하는 지원체계 정립이 필요하며 운영기관과 유지관리 재원을 사업 기획 단계에서 확보하고 장기 운영성과를 후속 지원과 다른 지역의 기술 도입에 활용하는 평가체계 마련

◘ 검증된 기술의 설계 및 운영 지침을 보급하고 개별 농가의 에너지 절감을 지역의 자원순환과 공동 신재생에너지 이용으로 연결하여 안정적인 농업생산과 에너지 공급에 기여하는 확산 기반 구축

참고문헌

○ 국회예산정책처. (2021). 『농업 부문 최종에너지 소비 현황 및 향후 과제』.

○ 기상청. (2025). 「2024년, 우리나라 113년 관측 이래 가장 더운 해: 역대 최고 연평균기온 경신」. 보도자료, 1월 9일.

○ 기상청. (2026). 「우리나라 아열대 기후 특성의 현황과 전망에 대한 분석 결과」. 보도자료, 6월 16일.

○ 기후에너지환경부. (2026). 「2026년 바이오가스 생산목표율 고시」. 기후에너지환경부고시 제2026-22호.

○ 김종익. (2024).「영농형 태양광 주요 논의 동향과 시사점」.『세계 에너지시장 인사이트』, 24-14. 에너지경제연구원.
○ 농림식품기술기획평가원. (2022).『국내외 농어촌 신재생 융복합 기술개발 동향』. 글로벌인사이트 제2호.
○ 농림축산식품부. (2025).『제1차 스마트농업 육성 기본계획(2025~2029)』.
○ 농림축산식품부. (2026a).「저탄소에너지공동이용시설 2027년 사업자 공모계획」 및『2026년 농업에너지이용효율화 사업시행지침』. 농림축산식품부공고 제2026-238호.
○ 농림축산식품부. (2026b).「가축분뇨 고체연료로 3.8만 가구 전력 공급한다」. 보도자료, 1월 12일.
○ 농촌진흥청. (2025).『2024 농산물소득자료집』. 전주: 농촌진흥청.
○ 농촌진흥청. (2023a).『제8차 농업과학기술 중장기 연구개발계획(2023~2032)』.
○ 농촌진흥청. (2022).「고유가 시기 시설원예 에너지 절감 기술」. 농업기술포털 농사로.
○ 농촌진흥청. (2025. 9. 30.).「농촌진흥청, 2024년도 농산물소득조사 결과 발표」. 농촌진흥청.
○ 농촌진흥청. (2023b).「태양광 · 열과 지열 결합해 온실 냉난방비 78% 줄인다」. 보도자료, 10월 17일.
○ 농촌진흥청. (2025a).「'난방비 뚝' 에어로겔 다겹보온커튼으로 한파 걱정 끝!」. 보도자료, 1월 23일.
○ 농촌진흥청. (2025b).「'필요한 스마트팜 기술만 쏙' 딸기 온실 생산성 높일 융합 모형 주목」. 보도자료, 9월 11일.
○ 법제처 국가법령정보센터. (2025).「유기성 폐자원을 활용한 바이오가스의 생산 및 이용 촉진법」. 법률 제21065호.
○ 법제처 국가법령정보센터. (2026a).「분산에너지 활성화 특별법」. 법률 제21161호.
○ 법제처 국가법령정보센터. (2026b).「영농형 태양광 발전사업의 활성화 및 지원에 관한 법률」. 법률 제21804호.
○ 서대석 · 김연중 · 허정회. (2022).「탄소중립 대응 농업 · 농촌 에너지전환 방향 모색」.『농업전망 2022』 제6장. 한국농촌경제연구원.
○ 일본 농림수산성(農林水産省). (2026a).『農山漁村における再生可能エネルギー発電をめぐる情勢』. 令和8年7月更新.
○ 일본 농림수산성(農林水産省). (2026b).「バイオマス産業都市の取組」. 令和8年5月更新.
○ 에너지경제연구원. (2026).『2025 에너지통계연보: 2024년 자료』. 울산: 에너지경제연구원.
○ 전력거래소. (2026).『2026년 수요자원거래시장 현황』.
○ 한국농촌경제연구원. (2020).『노지 스마트농업 발전방안 연구』.
○ 한국산업기술시험원 · 한국산업지능화협회. (2024).『농식품 분야 디지털 트윈 적용을 위한 참조

아키텍처』. 한국기계산업진흥회.
○ 한국에너지공단. (2026).「에너지절약전문기업(ESCO) 사업지원 및 육성」.
○ 한국전력공사. (2022~2026).『과거 전기요금표』.
○ 한국전력공사. (2023).「연료비 급등 반영 전기요금 조정 시행」. 빛으로 여는 세상, 51.
○ 한국전력공사. (2026).「2026년 2분기 연료비조정단가 산정내역」. 한국전력공사.
○ 한국정보통신기술협회. (2023).『스마트팜 데이터 상호운용 프레임워크－제1부: 스마트 온실』. TTAK.KO-10.1445-Part1.
○ Aghajanzadeh, A., & Therkelsen, P. L. (2019). Agricultural demand response for decarbonizing the electricity grid. Journal of Cleaner Production, 220, 827-835. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.207
○ Anifantis, A. S., Pascuzzi, S., & Scarascia-Mugnozza, G. (2016). Geothermal source heat pump performance for a greenhouse heating system: An experimental study. Journal of Agricultural Engineering, 47(3), 164-170. https://doi.org/10.4081/jae.2016.544
○ Australian Renewable Energy Agency. (2023). Engie – Yuri Renewable Hydrogen to Ammonia – Lessons Learned Report.
○ Bloemendal, M., & Beernink, S. (2023). HT-ATES feasibility for TRIAS Westland. KWR Water Research Institute.
○ Chen, W.-H., Mattson, N. S., & You, F. (2022). Intelligent control and energy optimization in controlled environment agriculture via nonlinear model predictive control of semi-closed greenhouse. Applied Energy, 320, 119334. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119334
○ Cossu, M., Yano, A., Murgia, L., Ledda, L., Deligios, P. A., Sirigu, A., Chessa, F., & Pazzona, A. L. (2017). Effects of the photovoltaic roofs on the greenhouse microclimate. Acta Horticulturae, 1170, 461-468. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1170.57
○ Deutsches Institut für Normung (DIN). (2021). DIN SPEC 91434:2021-05: Agri-Photovoltaik-Anlagen – Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung [Agri-photovoltaic systems – Requirements for primary agricultural use]. https://doi.org/10.31030/3257526
○ European Commission. (2022). REPowerEU Plan. COM(2022) 230 final.
○ European Commission. (2023). Harnessing the vast potential of RES for sustainable farming. CORDIS Fact Sheet, Grant Agreement ID 101136904. https://doi.org/10.3030/101136904
○ European Commission. (2026). Commission Recommendation (EU) 2026/1007 of 30 April

2026 on supporting the development of energy communities and maximising the potential of self-consumption. Official Journal of the European Union, L 2026/1007.
○ European Parliament. (2018). Sector coupling: How can it be enhanced in the EU to foster grid stability and decarbonise? Study IPOL_STU(2018)626091.
○ European Union. (2023). Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652. Official Journal of the European Union.
○ Federal Energy Regulatory Commission (FERC). (2020). FERC Order No. 2222: Fact Sheet—A New Day for Distributed Energy Resources.
○ Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. (2019). Agrophotovoltaics: High Harvesting Yield in Hot Summer of 2018. Press Release No. 10, 12 April 2019.
○ Guan, W., Guo, W., Chen, F., Han, X., Wang, H., Sun, W., Zhao, Q., Jia, D., Wei, X., & Zhu, Q. (2024). Multi-span greenhouse energy saving by external insulation: System design and implementation. Agriculture, 14(2), 281. https://doi.org/10.3390/agriculture14020281
○ H2arvester Systems BV. (2024). Mobile agrivoltaics: Harvesting crops and energy on farmland! [Leaflet].
○ HarvRESt. (2026). D3.4 Business Models Catalogue. Horizon Europe Project No. 101136904.
○ HyPErFarm. (2024). PA34 – Profitable Agrivoltaics Business Models. Horizon 2020 Project No. 101000828.
○ International Energy Agency. (2025a). World Energy Investment 2025. Paris: IEA.
○ International Energy Agency. (2025b). Korea 2025: Energy Policy Review. Paris: IEA.
○ Lee, C.-G., Cho, L.-H., Kim, S.-J., Park, S.-Y., & Kim, D.-H. (2021). Comparative analysis of combined heating systems involving the use of renewable energy for greenhouse heating. Energies, 14(20), 6603. https://doi.org/10.3390/en14206603
○ Lin, D. et al. (2026). "Hierarchical Model Predictive Control of Greenhouse Energy Systems Considering Energy-Water-Carbon-Food Nexus."
○ Liu, W. et al. (2025). "Microclimate Prediction of Solar Greenhouse with Pad-Fan Cooling Systems Using a Machine and Deep Learning Approach."
○ Macknick, J., & Hartmann, H. (2023). Final Technical Report (Abbreviated) for the

InSPIRE 2.0 Project. NREL/TP-6A20-85280. https://doi.org/10.2172/1958728

○ Mahmood, F., Govindan, R., Bermak, A., Yang, D., & Al-Ansari, T. (2023). Data-driven robust model predictive control for greenhouse temperature control and energy utilisation assessment. Applied Energy, 343, 121190. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121190

○ Olsen, D., Aghajanzadeh, A., & McKane, A. T. (2015). Opportunities for Automated Demand Response in California Agricultural Irrigation. Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-1003786.

○ Park, Sunyong, et al. "Comparative emission and energy performance of biochar production versus in-situ burning of Gorean agrobyproducts." PLoS One 21.4 (2026): e0346041.

○ Rabiu, A., Adesanya, M. A., Na, W.-H., Ogunlowo, Q. O., Akpenpuun, T. D., Kim, H. T., & Lee, H.-W. (2023). Thermal performance and energy cost of Korean multispan greenhouse energy-saving screens. Energy, 285, 129514. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129514

○ RAG Austria AG. (2021). "Underground Sun Conversion – Flexible Storage": Sustainable storage for the renewable energy system of the future. Press release, 22 January 2021.

○ Renewable Energy Institute. (2025). Revitalizing Agriculture with Solar Sharing: Agri-PV Contributing to Local Prosperity.

○ U.S. Department of Agriculture, Rural Business-Cooperative Service. (2024). Notice of Funding Opportunity for the Rural Energy for America Program for Fiscal Years 2025, 2026, and 2027. Federal Register, 89, 83449. Document No. 2024-23854.

○ U.S. Department of Energy. (2023). Pathways to Commercial Liftoff: Virtual Power Plants.

○ U.S. Environmental Protection Agency. (2020a). AgSTAR Project Development Handbook (3rd ed.). EPA 430-B-20-001.

○ U.S. Environmental Protection Agency. (2020b). Anaerobic Digester/Biogas System Operator Guidebook: A Guidebook for Operating Anaerobic Digestion/Biogas Systems on Farms in the United States. EPA 430-B-20-003.

○ Wang, J., Comden, J., & Bernstein, A. (2024). Real Time-Optimal Power Flow-Based Distributed Energy Resource Management System (DERMS). National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-5D00-87767. https://doi.org/10.2172/2356774

Ⅱ. 첨단 그린바이오

4. 디지털육종

5. 마이크로바이옴

6. 푸드테크

4. 디지털 육종

통합 오믹스·디지털트윈·양자컴퓨팅 기술 기반 디지털육종 미래전망

양태진(한국약용작물학회, 서울대학교) / **하정민**(한국육종학회, 서울대학교) /
박태섭(한국축산학회, 서울대학교) / **이승환**(한국동물유전육종학회, 충남대학교)

Ⅰ. 서론

○ 디지털육종의 미래와 농업 패러다임의 전환

– 디지털육종(Digital Breeding)은 유전체, 표현체, 환경정보 등 생명데이터와 인공지능(AI), 디지털트윈, 초고성능 컴퓨팅 등을 융합하여 최적의 육종전략을 설계하는 데이터 기반 차세대 육종기술임.

– 경험 중심 육종을 예측 · 설계 중심의 디지털 육종체계로 전환하는 핵심기술이며 기후변화, 식량안보, 농업인구 감소 등에 대응하기 위한 미래 농업 핵심기술로 부상하고 있음.

– 유전자형(Genotype), 표현형(Phenotype), 환경(Environment) 데이터를 통합 분석하여 육종 정확도와 효율성 향상을 통해 품종 개발기간 단축, 육종비용 절감, 기후 적응형 · 고기능성 품종 개발 가능성을 확대함.

– 디지털육종은 작물의 진화와 육종기술 발전 단계에 따라 디지털 기반의 예측육종으로 발전하는 새로운 육종 패러다임이며 작물별 유전자원과 연구 수준에 따라 맞춤형 디지털육종 전략 적용 필요성이 증대함.

– 야생종 → 순화 → 전통육종 → 디지털육종으로 이어지는 기술 진화의 핵심은, 농업적으로 우수한 대립유전자를 한 개체에 효율적으로 축적하는 것임(그림 1).

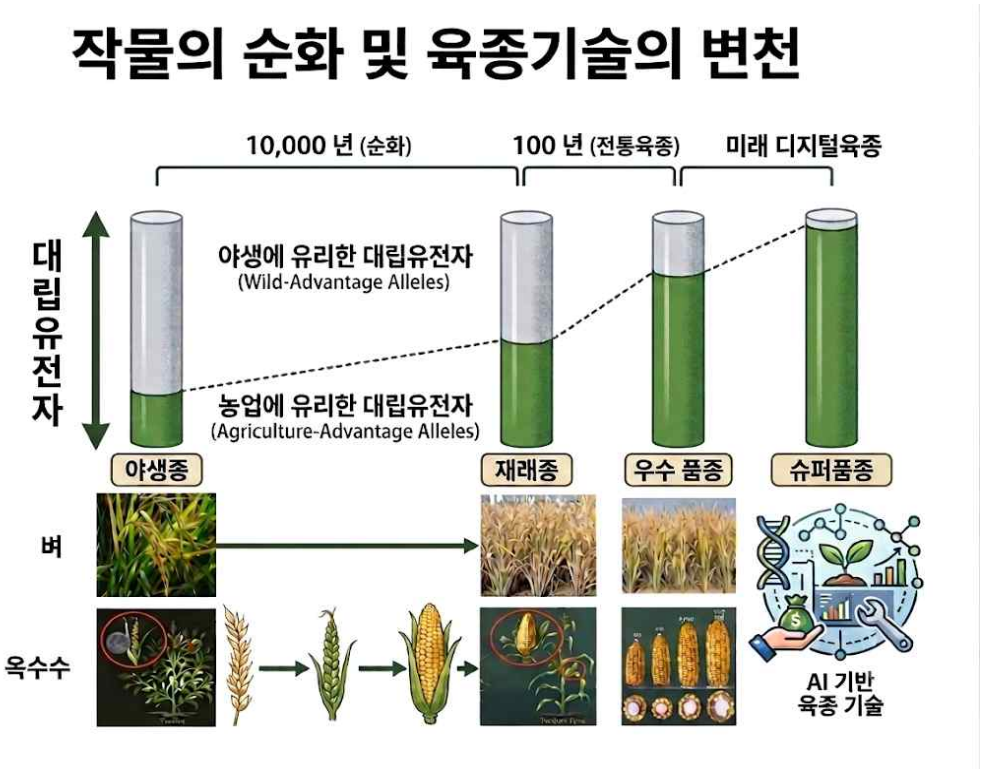


그림 1. 농업의 역사에 따른 작물의 순화, 육종 및 디지털육종 개념도

– 미래 디지털육종은 AI, 디지털트윈, 유전자교정, 양자컴퓨팅 기술이 융합되는 초지능형 육종 플랫폼으로 발전할 것으로 예상되며, 본 장에서는 디지털육종의 미래기술을 다음 세 분야를 중심으로 전망하고자 함.

1) AI · 디지털트윈 기반 작물의 가상육종 플랫폼

2) 통합 오믹스 · AI 기반 가축 디지털육종 및 맞춤형 실증 플랫폼

3) 양자컴퓨팅 기반 디지털육종 기술 구현

1 기술분야 개요

○ AI · 디지털트윈 기반 가상육종 플랫폼

– 유전체(Genotype), 전사체 · 대사체 등 오믹스, 영상 · 센서 기반 표현체(Phenotype), 기상 · 토양 · 재배관리 등 환경정보(Envirotype)를 공통 식별자와 메타데이터로 연결하고, AI가 목표 형질 · 교배 조합 · 후대 분포 · 지역적응성을 예측하여 육종가의 의사결정을 지원하는 데이터 중심의 전주기 기술 체계임.

– 가상육종(Virtual Breeding)은 실제 교배 이전에 다수의 부모 조합과 후대 유전분포를 계산하고, 목표 형질의 유전적 이득 · 균형 · 위험을 비교하는 기능이며, 디지털트윈은 환경 ·

생육과정 · 재배관리의 동적 모사를 결합하여 특정 지역과 기후 시나리오에서 후보 계통의 성능을 시험하는 기능임

– 최종 산출물은 단순 예측값이 아니라 "어떤 부모를 교배할 것인가, 몇 개 조합을 만들 것인가, 어떤 후보를 어느 지역에서 우선 시험할 것인가, 예측의 불확실성은 어느 정도인가"를 제시하는 육종 의사결정 지원 시스템임.

○ 통합 오믹스 · AI 기반 가축 디지털육종 및 맞춤형 실증 플랫폼

– SNP chip 기반 유전체 선발을 범유전체, 기능유전체, 디지털 표현체, AI 예측과 통합하여 가축의 유전능력과 산업가치를 정밀 예측하고, GEBV를 넘어 생산성, 사료효율, 탄소저감, 질병저항성, 번식효율, 품질을 아우르는 국가 단위 가축 디지털 육종 플랫폼 기술임.

– 선발 · 육종과 연계한 유전자교정(NGT)을 통해 타깃 유전체를 정밀 교정하고, 질병저항성 · 기후적응성 · 경제형질 향상 및 동물복지 개선을 위한 맞춤형 계통 개발과 테스트베드 기반 실증 · 검증을 포함하는 데이터 중심 전주기 기술 체계임(그림 2).

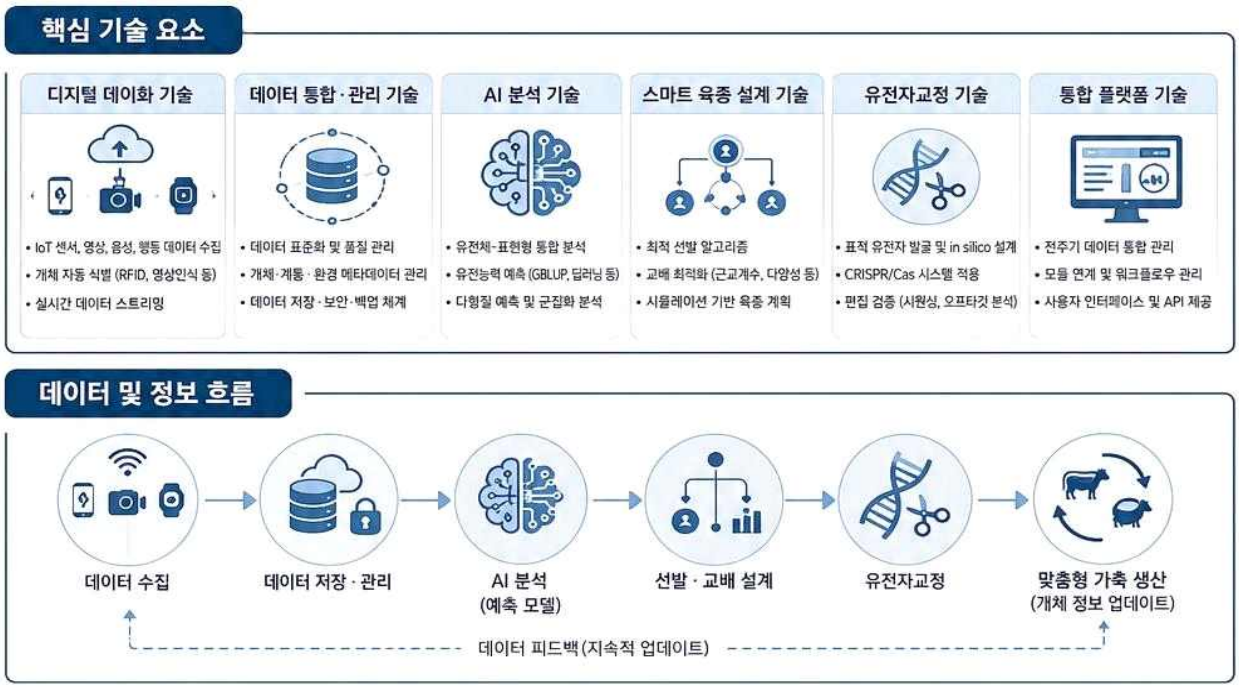


그림 2. 디지털 데이터, AI 분석, 유전자 교정 기술 결합 맞춤형 가축 설계 · 생산 · 검증을 위한 통합 플랫폼

○ 양자컴퓨팅 기반 디지털육종 기술 구현

– 양자컴퓨팅 기반 디지털육종은 양자컴퓨팅의 새로운 연산 원리를 디지털육종 파이프라인의 병목 지점에 결합하여, 고전 컴퓨터로는 처리하기 어려운 대규모 농생명 데이터의 보정 · 통합 · 최적화 속도와 정밀도를 비약적으로 끌어올리는 차세대 융합 기술임(그림 3).

– 양자컴퓨팅은 중첩(superposition)·얽힘(entanglement)의 원리를 활용하여 조합 최적화, 분자 시뮬레이션, 확률적 샘플링 등 특정 문제군에서 고전 컴퓨팅을 능가하는 연산 특성을 보임.
– 디지털육종의 핵심 난제를 해결하기 위해서는 양자컴퓨팅 기술과의 융합이 필연적이며, 기술의 발전 속도를 감안할 때 단일 단계가 아닌 하이브리드(양자–고전) 형태로 발전하면서 시간축에 따라 적용 범위가 확대될 전망임.
– (단기) 고전컴퓨팅과 결합한 하이브리드 형태로 데이터 보정·교배조합 탐색 등 특정 분석을 가속함.
– (장기) 분자 수준 시뮬레이션과 다형질 동시 최적화 등으로 육종 패러다임 자체를 전환함.

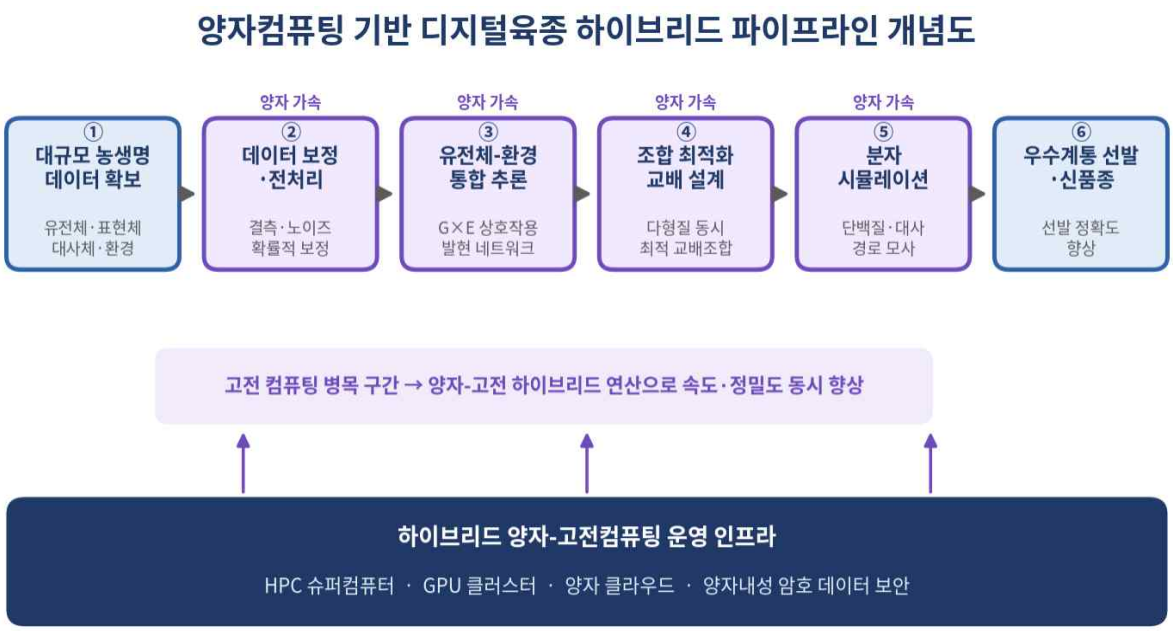


그림 3. 양자컴퓨팅 기반 디지털육종 하이브리드 파이프라인 개념도

2 기술 도입 배경

2.1 농업환경 변화

○ AI·디지털트윈 기반 가상육종 플랫폼
– 인구 증가로 식량 생산 수요가 확대되는 한편, 기후변화로 고온·가뭄·집중호우·저온·신규 병해충 등 복합 스트레스가 빈번해지고 있음. 이에 따라 과거의 전통육종 방식으로 선발된 품종만으로는 지역과 연도에 따른 성능 변동을 관리하기 어려움(그림 4).



그림 4. 인구증가와 기후변화로 인한 농업환경의 변화

- 육종 목표도 단일 수량에서 수량 안정성, 내재해성, 병저항성, 품질 · 기능성, 자원효율을 함께 달성하는 방향으로 확대되고 있음.
- 기후 · 시장 요구에 맞는 품종을 더 빠르게 설계하고 지역별 적응성을 예측하는 능력은 종자산업의 핵심 경쟁력이 됨.

○ 통합 오믹스 · AI 기반 가축 디지털육종 및 맞춤형 실증 플랫폼 구축

- 국내 축산업은 사료비 부담, 탄소중립 요구, 가축질병 확산이라는 복합적인 생산위기에 직면함.
- (사료비 부담) 국제 곡물가격, 환율 및 공급망 교란이 축산농가의 생산비와 경영 안정성에 직접적인 영향을 미치고 있음. 2024년 배합사료 가격은 2020년보다 29.8% 높은 수준이며, 사료용을 포함한 곡물자급률은 21.6%에 불과하여 국제 곡물가격과 환율 변동에 취약함.
- (탄소중립 요구) 저메탄 사료뿐만 아니라 사료효율, 성장기간, 분뇨배출 및 메탄발생량을 함께 개선하는 저탄소 가축개량이 요구됨. 축산부문 온실가스는 현행 생산방식 유지 시 2030년 1,100만 톤CO2eq까지 증가할 전망이나, 정부는 2018년 940만 톤에서 2030년 770만 톤으로 18% 감축하는 목표를 설정함.
- (가축질병 확산) 가축질병 역시 일시적 위험이 아닌 상시적인 생산위험으로 변화하고 있음. 가금농장 고병원성 AI는 23/24년 32건에서 24/25년 49건으로 53.1% 증가하였고, 발생지역도 14개에서 26개 시 · 군으로 확대됨.
- 이에 따라 생산비 · 탄소 · 질병 문제가 동시에 심화되면서, 사료효율 · 메탄저감 · 질병저항성 · 환경적응성을 유전적으로 개선하고 농장환경에 적합한 종축과 사양방법을 제시하는 디지털육종 기술의 필요성이 커지고 있음.
- 2026년 7월, EU는 유전자 교정(NGT) 농산물과 이를 원료로 한 식품에 대한 새로운 법률을

공식 승인함(실제 적용은 2028년 7월부터 개시, Regulation (EU) 2026/1388).

– CRISPR를 이용한 염기 치환, DNA 결실 및 외래 유전자 삽입이 없을 때 GMO 규제 대상에서 대부분 제외하여 일반 품종과 유사한 절차로 별도의 GMO 표시 의무 완화됨(품종 등록 후 시장 출시 가능).

○ 양자컴퓨팅 기반 디지털육종 기술 구현

– (데이터 폭증과 컴퓨팅 한계의 충돌) 디지털육종 데이터는 폭증하는 반면 고전컴퓨터는 활용 한계가 명확하여 차세대 컴퓨팅 자원 확보가 필요. 실제로 고추 849자원의 유전형 분석에만 160시간(6.7일)이 소요되는 등 (농진청 슈퍼컴 2호기, 2.9 PFLOPS 기준) 연산 부하가 급증하고 있음.

– (고전컴퓨팅으로 풀리지 않는 본질적 난제) 수만 마커 × 수십 형질의 동시 최적화, 단백질 구조 예측, 대규모 유전자 상호작용 추론은 알고리즘 개선만으로는 한계가 있는 본질적 난제로, 새로운 연산 패러다임이 요구됨.

2.2 기술의 필요성 및 기대효과

○ AI · 디지털트윈 기반 가상육종 플랫폼

– 가상육종을 통해 실제 시험에 투입할 조합과 계통을 우선순위를 정함으로써, 동일 자원으로 더 많은 가설을 검토하여 전통 육종의 시간 · 비용 · 포장면적 제약 보완함(그림 5).

– AI와 작물생육모형을 결합하면 특정 지역 · 재배조건에서 성능이 안정적인 계통과 특정 스트레스에 강한 계통을 분리해 평가할 수 있으며, 평균값뿐 아니라 성능의 분포와 실패 위험을 제시할 수 있음.

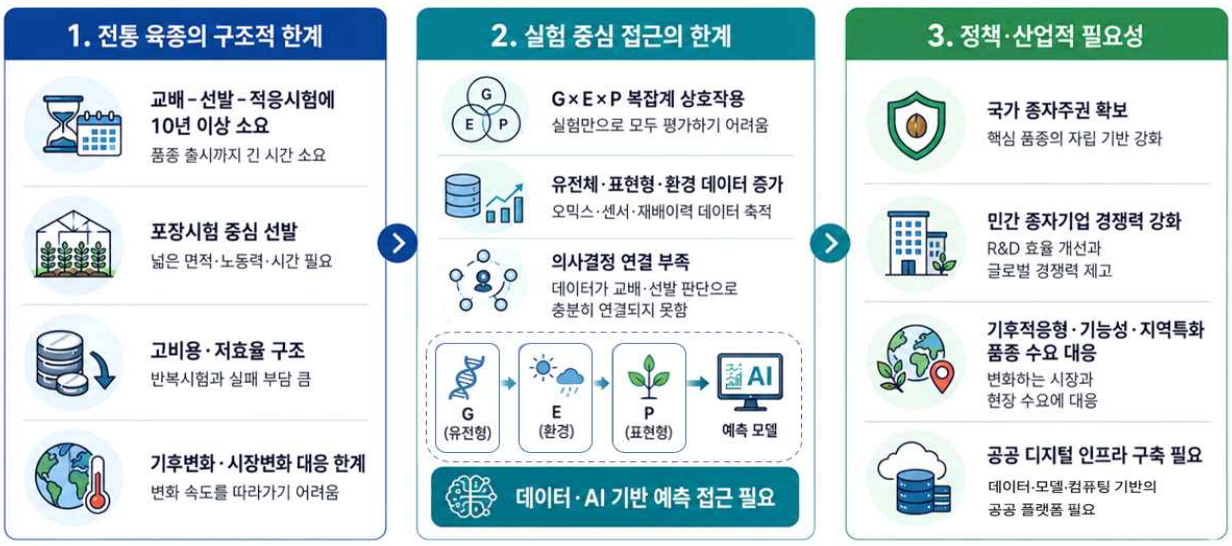


그림 5. AI · 디지털트윈 기반 가상육종 플랫폼의 필요성

- 모델 입력, 데이터 출처, 학습 버전, 예측 근거, 현장 검증 결과를 기록하면 육종가의 경험을 대체하지 않으면서도 결정의 근거와 재현성을 강화할 수 있어 장기 육종 프로그램에서 지식의 축적·승계가 용이해짐.

○ 통합 오믹스·AI 기반 가축 디지털육종 및 맞춤형 실증 플랫폼 구축

- 현행 가축육종은 SNP chip과 제한된 생산형질을 이용하여 집단 평균적인 유전체육종가(GEBV)를 예측하는 방식으로, 개체별 성장곡선과 사료섭취량, 장내·반추위 미생물, 질병이력, 축사환경 및 사양관리 조건을 충분히 반영하지 못함.
- 이에 따라, 실제 증체효율이 낮아진 이후에도 일정한 출하체중이나 좋은 출하성적을 위해서 사료를 계속 급여하는 과도한 비육이 발생하고, 또한 가축질병은 백신·소독·치료 중심으로 관리되고 있으며, 질병저항성 유전자와 숙주-미생물 상호작용을 육종에 활용하는 체계는 미흡한 실정임.
- 미래 가축개량은 도체 성적 중심에서 벗어나 사료효율, 메탄저감, 질병저항성, 번식효율, 맛·영양·소비자 신뢰를 아우르는 다목적 정밀개량으로 전환이 필요하며, 이에 정밀 육종 기반의 지속가능한 축산 생태계는 기후변화와 식량위기 대응은 물론 글로벌 규제와 기술트렌드 선도를 통해 국제 경쟁력 확보 필요함.
- 기존 SNP 기반 유전체선발은 원인변이, 조절기작, 조직·세포 특이성, 환경반응성, 미생물군집, 디지털표현형을 충분히 반영을 못하기 때문에 유전체 선발과 연계한 기술 패러다임 전환과 통합 실증 플랫폼 구축이 필요하며, 이를 통해 안전성과 정확도를 높이는 전주기 기술 파이프라인 완성이 필요함.

○ 양자컴퓨팅 기반 디지털육종 기술 구현

- (데이터 폭증) 차세대 염기서열분석(NGS) 등 오믹스 데이터 생산비용은 급락하고 드론·센서 기반 고처리량 표현형(HTP) 데이터가 폭증하고 있으나, 대용량·다차원 데이터를 육종 의사결정으로 즉시 연결하는 분석 체계는 아직 미흡함.
- (현장 활용 가시화 가능성) 결측 데이터 보정·교배조합 탐색 등 일부 모듈은 5년 내에도 양자-고전 하이브리드 형태로 가시적 효과 창출이 가능하여, 육종가가 연구 결과를 직접 체감할 수 있음.
- (글로벌 선점 골든타임) 농업 양자컴퓨팅은 미국·중국·EU에서도 아직 초기 단계로, 지금이 선도그룹과의 격차가 가장 작은 진입 시점이며, 시기를 놓치면 관련 기술에 종속될 위험이 있음.
- (국가 양자역량 축적과의 선순환) 디지털육종의 기술적 수월성 증대에 그치지 않고, 농생명 분야의 양자 R&D 참여 자체가 전문인력, 알고리즘, 양자 클라우드 인프라 등 국가 양자 생

태계 역량의 축적에 기여하며, 축적된 국가 양자역량이 다시 농업에 파급되는 선순환을 형성함.

* 정부도 범국가적 역량 강화를 추진 중임 (제1차 양자과학기술 · 산업 육성 종합계획).

- (국내 연구역량 · 국제경쟁력 강화) 난제 중심의 농생명 양자 응용은 도메인 특화 문제 정의, 검증 사례 등을 축적하여 국내 연구역량을 고도화하고, 글로벌 양자 및 USDA, CGIAR 등 농업 생태계와의 공동연구를 통해 국제적인 발언권을 확보하는 등 국가 경쟁력 강화로 이어질 수 있음.

Ⅱ. 기술 분야 구조 및 범위

1 기술 분야 정의

○ AI · 디지털트윈 기반 가상육종 플랫폼 (그림 6)



그림 6. AI · 디지털트윈 기반 가상육종 플랫폼 기술 정의

– 목표 형질을 먼저 설정하고, 보유 유전자원 가운데 해당 형질에 유리한 대립유전자를 가진 부모를 선정하여 가상교배를 수행함.

– 가상교배로 생성된 후대 후보군은 유전적 이득과 형질별 예측치를 기준으로 평가하며, 고온 · 가뭄 · 저온 · 강우 등 다양한 환경 시나리오를 적용해 생육 안정성과 지역적응성을 비교함.

– 분석 결과를 바탕으로 후보 계통별 선발 우선순위를 제시하여, 육종가가 실제 교배와 포장시험에 투입할 조합 및 계통을 효율적으로 압축할 수 있도록 지원함.

– 최종 선발 후보는 실제 육종시험에서 검증하고, 예측값과 실측값의 차이를 다시 모델에 반영함으로써 예측 정확도를 지속적으로 높이는 순환구조로 작동됨.

○ 통합 오믹스 · AI 기반 가축 디지털육종 및 맞춤형 실증 플랫폼 구축

– 가축 디지털육종은 SNP chip 기반 유전체선발을 팬지놈, WGS · 구조변이 및 기능유전체

기반 예측으로 고도화하고, 영상 · 음향 · 센서 · 생체신호 등의 디지털표현체와 온 · 습도, 축사환경, 사료, 질병압, 거세, 이유, 번식관리 등의 다차원 데이터를 개체 · 혈통 · 시간 단위로 AI로 자동 연계, 통합하여 유전능력 · 환경 · 관리조건별 기대성능 및 생애 산업가치를 예측하는 정밀 처방형 가축육종(Precision Prescriptive Livestock Breeding) 플랫폼을 구축함.

– 유전자교정 기술을 활용하여 목표 형질을 가진 맞춤형 가축을 생산하고, 분자 · 생리 · 생산성 수준에서 교정 결과의 정확성과 안전성을 검증 · 평가하는 통합 실증 플랫폼을 구축함.

○ 양자컴퓨팅 기반 디지털육종 기술 구현

– (개념 정의) 양자컴퓨팅 기반 디지털육종은 디지털육종의 데이터 · 분석 파이프 라인 중 고전 컴퓨팅이 취약한 병목 구간을 양자 연산으로 보완 · 가속하는 하이브리드 융합 기술로 정의됨.

– 양자 우위 영역) 조합 최적화(다형질 교배조합 탐색), 양자 시뮬레이션 (단백질 · 대사경로 등 분자계 모사), 확률적 샘플링(결측 보정 · 불확실성 추정) 등 세 영역에서 고전 대비 상대적 우위가 기대됨.

– (연산 방식) 게이트형 양자컴퓨터(Gate-based, QAOA 등)와 양자 어닐링 (Annealing, QUBO 정식화)이 병행 발전 중이며, 현재의 NISQ(잡음이 있는 중규모 양자) 단계에서는 양자-고전 하이브리드가 가장 현실적인 접근임.

– (데이터 주권) 양자내성 암호(PQC)를 결합하여 종자 · 유전체 등 국가 핵심 농생명 데이터의 무결성 · 기밀성을 확보하는 것도 기술 범위에 포함됨.

2 주요 구성 기술

○ AI · 디지털트윈 기반 가상육종 플랫폼 (표 1)

표 1. AI · 디지털트윈 기반 가상육종 플랫폼의 주요 구성 기술

모듈	주요 입력	핵심기술	주요 출력
① 데이터 기반	유전체·오믹스, 영상·센서 표현체, 기상·토양·재배관리, 계보·교배·시험 데이터	공통 식별자, 형질 온톨로지, 메타데이터, 품질등급, 데이터 계보(provenance)	AI 학습과 검증이 가능한 재사용 데이터셋
② AI 형질예측	G→P, G×E, 시계열 생육, 이미지·분광·센서 데이터	통계 GS, 딥러닝, 멀티모달 융합, 전이학습, 확률예측, XAI	형질별 예측값·신뢰구간·적용범위
③ 가상교배	부모 유전자형, 계보, 목표 형질, 근교·다양성 제약	후대 유전분포, 유전적 이득, 다형질 지수, 최적 기여도·교배설계	추천 부모·교배수·후대 후보·위험지표
④ 디지털트윈	기상·토양·재배관리·작물생육 파라미터	작물모형+AI 하이브리드, 기후 시나리오, 반응규범, 공간·시간 모델	지역별 성능·안정성·스트레스 반응
⑤ 검증·운영	다지역 적응시험, 반복·연도 시험, 사용자 피드백	벤치마크, 외부검증, 보정, 드리프트 감시, MLOps	현장 적합도, 모델 갱신, 감사 가능한 기록
⑥ 서비스·거버넌스	사용자·기관·기업, 데이터 권리, 보안·IP	DSS UI, API, 권한·등급, 데이터 이용계약, 기여자 보상	공공-민간 공동활용과 산업 확산

○ 통합 오믹스 · AI 기반 가축 디지털육종 및 맞춤형 실증 플랫폼 구축(그림 7, 표 2)

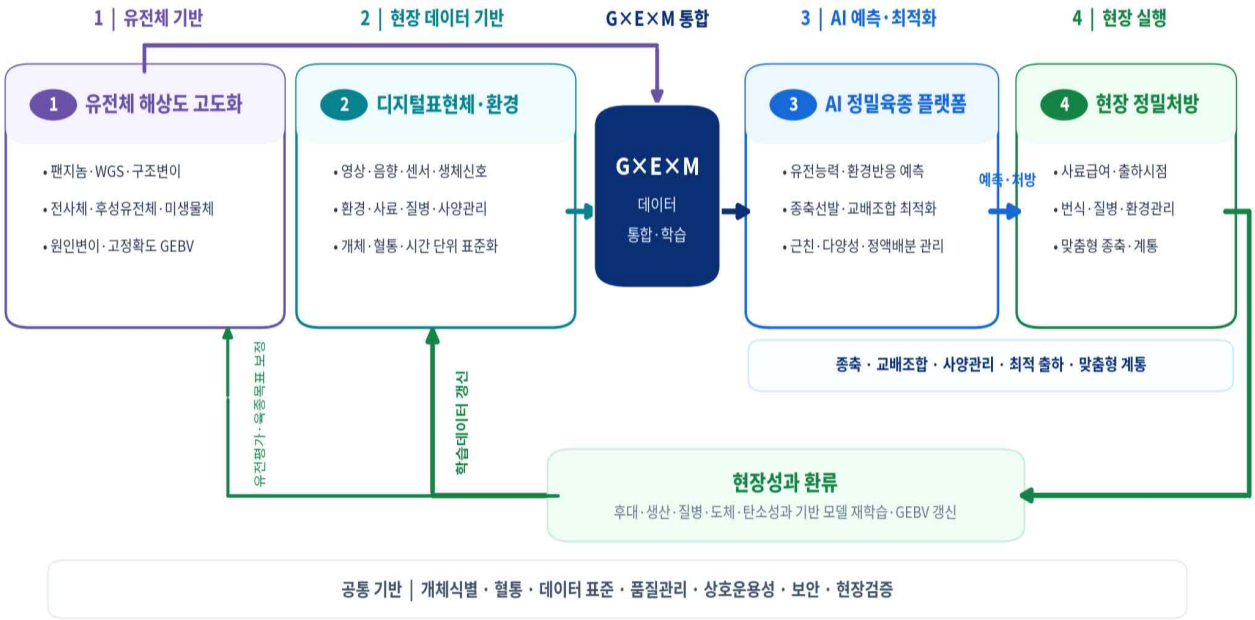


그림 7. 가축 디지털육종의 4대 핵심 구성기술 및 순환형 기술체계

표 2. 오믹스 기반 가축 디지털육종 주요 구성 기술

핵심 구성기술	주요 기술내용
유전체 해상도·예측 고도화	팬지놈, 전사체, 후성유전체, 마이크로바이옴 및 대사체로 확대하고, 생산성·사료효율·질병저항성·번식효율·환경적응성 관련 원인유전변이 발굴·검증
디지털표현체·환경데이터	영상·음향·센서·생체신호를 이용하여 성장, 섭취, 행동, 번식, 건강 및 도체형질을 자동 측정하고, 온·습도, 축사, 사료, 질병압 및 사양관리 정보를 개체·혈통·시간 단위로 표준화
AI 정밀육종 플랫폼	유전체·표현체·환경·관리 데이터를 통합하여 유전능력, 환경반응 및 생애가치를 예측하고 종축선발, 교배조합, 근친도, 유전적 다양성 및 정액 배분 최적화
현장 정밀처방·맞춤형 계통	농장별 환경과 개체별 성장·섭취·건강상태를 반영하여 사료급여, 번식, 질병관리 및 출하시점을 처방하고, 농장환경에 적합한 종축과 계통 구축

- 표적 유전자 발굴, 유전자교정 도구 설계, 세포 · 배아 교정, 교정 세포 선별, 수정란 생산 및 이식, 유전자교정 개체 생산, 온타깃 · 오프타깃 분석, 오믹스 기반 분자특성 분석, 표현형 검증, 후대 유전성 평가 및 실증 데이터 관리 체계임(그림 8).
- 생산된 유전자교정 가축에 대해서는 표적 유전자 교정과 교정 효율, 비표적 변이, 유전체 안정성, 유전자 발현 변화, 단백질 및 대사 수준의 변화, 생리적 특성, 번식능력 및 목표 형질의 발현 여부 등 단계적 검증임.



그림 8. 통합 오믹스 · AI 기반 가축 디지털육종 및 유전자교정 맞춤형 가축 실증 플랫폼

○ 양자컴퓨팅 기반 디지털육종 기술 구현

– 양자컴퓨팅 기반 디지털육종은 데이터 확보부터 보안 · 인프라까지 7대 요소기술로 구성되며, 각 요소기술은 하이브리드 파이프라인 상에서 유기적으로 연계됨(표 3).

표 3. 양자컴퓨팅 기반 디지털육종 7대 요소기술

요소기술	주요 내용
① 데이터 보정·전처리	대규모 결측·노이즈 마커 및 표현형 데이터의 양자 기반 확률적 보정으로 분석 가능 데이터셋 확장
② 유전체-환경 통합 추론	유전자 발현 네트워크·유전형-환경 상호작용(G×E) 분석에서 양자 가속을 통한 추론 속도·정밀도 동시 개선
③ 조합 최적화 교배 설계	양자컴퓨팅 기반 다형질 동시 최적화 및 우수계통 선발조합 탐색(QUBO·QAOA)
④ 분자 시뮬레이션	단백질 구조·대사경로·유전자-환경 분자 상호작용의 양자 기반 모사
⑤ 표현형·선발모델	영상·센서 표현형 데이터의 양자 커널(Quantum Kernel) 기반 머신러닝 학습
⑥ 양자내성 암호 보안	종자·농생명 데이터의 무결성·기밀성 확보를 위한 양자내성 암호(PQC) 체계
⑦ 하이브리드 운영 인프라	HPC 슈퍼컴·GPU 클러스터·양자 클라우드를 연계하는 작업 분산·오케스트레이션 체계

3 적용분야 및 활용 영역

○ AI · 디지털트윈 기반 가상육종 플랫폼(그림 9)

– 수량 · 품질 · 기능성 · 내재해성 · 병저항성 등 목표 형질의 우선순위와 형질 간 상충관계를 분석하여 선발지수와 최소 허용조건을 설정. 보유 유전자원과 계통별 후대 분포, 유전적 이

득 및 근친 위험을 비교하여 우선 교배조합과 적정 교배 규모를 제시함.

- 종자 · 유묘 이미지, 유전체 마커 및 초기 생육정보를 활용하여 성체 단계의 형질을 조기에 예측, 세대진전 후보와 탈락 후보를 구분함. 모델의 불확실성과 시험을 통해 얻을 수 있는 정보량을 고려하여 시험지역 · 시기 · 반복 수를 효율적으로 설계함.
- 지역별 기상 · 토양 · 재배관리 조건에서 후보 계통의 성능과 안정성을 비교하고, 고온 · 가뭄 · 집중호우 등 미래 기후 시나리오에 따른 수량과 품질 위험을 평가함. 이를 통해 시험지역 배치, 지역 맞춤형 후보 및 기후회복력 품종 포트폴리오를 도출함.
- 종자기업과 육종기관이 자체 유전자원과 데이터를 보호하면서 공공 AI 모델, 컴퓨팅 자원 및 성능평가 체계를 활용할 수 있도록 API · 분석 샌드박스 · 공동실증 서비스를 제공하며 이를 통해 플랫폼의 연구성과를 실제 품종개발과 종자산업으로 확산함.



그림 9. AI · 디지털트윈 기반 가상육종 플랫폼 활용 영역

○ 통합 오믹스 · AI 기반 가축 디지털육종 및 맞춤형 실증 플랫폼 구축

- 유전체분석, AI 평가, 디지털표현형, 교배계획이 결합된 디지털육종 서비스는 신시장 창출 가능하며 종축기관 · 인공수정센터 · 농가 · 도축 · 유통 데이터와 연계 및 적용될 때 고부가가치 플랫폼 산업으로 확장 가능함.
- 디지털육종은 종축개량에 한정되지 않고 번식부터 사양, 질병관리, 출하, 유통 및 후대평가까지 가축생산 전주기 적용 가능함.
- 국가 종축개량기관은 유전평가와 국가 개량목표 설정 활용. 종축회사는 종축선발과 정액 배분. 농가는 교배 · 사양 · 질병 · 출하 의사결정에 활용 가능함.
- 현장수용성 측면에서는 테스트베드 실증을 통해 안전성 · 생산성 · 경제성을 검증하면 상용화 병목을 줄이고 정부 R&D 성과의 산업 적용 가능함.

– 유전자가위로 만든 계통 자체보다 그 계통을 빠르게 선발 · 검증 · 확산하는 전주기 플랫폼과 현장 실증이 핵심이며, 토종 유전자원과 첨단기술의 결합은 수입의존 완화와 K-가축 품종 수출 확장에 기여함.
– 사료효율 · 메탄저감 · 질병저항성 개량은 저탄소 축산 전환과 생산비 절감, 안정적 축산물 공급에 기여함.
– 축산의 디지털 전환으로 동물복지와 소비자 신뢰를 높이며, 항생제 사용 저감과 식품안전 강화로 공중보건 · 사회적 수용성에도 긍정적 효과 예상함.
– 글로벌 규제 및 기술 트렌드를 선도함으로써 향후 국제 경쟁력의 선제적 확보가 필요함.

○ 양자컴퓨팅 기반 디지털육종 기술 구현
– (작물) 벼 · 옥수수 · 콩 등 주곡작물은 고급 디지털육종이, 특용 · 약용작물은 자원분류 · 종/품종 식별 등 상황별 분자육종이 요구되어, 작물의 연구수준에 따라 차등 적용되어야 함.
– (축산) 국가 단위 참조집단(Reference Population) 기반 유전체 선발(GS)과 유전능력 평가에 대규모 최적화 연산이 필요하여 양자 가속의 활용 여지가 큼.
– (식품 · 기능성) 플라보노이드 · 안토시아닌 등 2차 대사산물 생합성 경로의 분자 시뮬레이션을 통해 기능성 성분 강화 품종을 선제적으로 설계할 수 있음.
– (적용 단계) 데이터 수집→보정 · 전처리→통합 추론→교배 설계→선발 · 검증의 전주기 중, 고전 컴퓨팅 병목이 큰 단계에 선택적으로 적용하여 비용 대비 효과를 극대화 함.

Ⅲ. 기술 발전 동향 및 전망

1 국내외 기술 발전 동향

○ AI · 디지털트윈 기반 가상육종 플랫폼(그림 10)

– 국외의 디지털 육종 기술은 기존의 통계적 유전체 예측에서 벗어나, 유전체 · 표현체 · 환경 데이터를 AI로 통합하고 가상교배와 디지털트윈을 통해 최적 교배조합과 지역별 성능을 예측하는 플랫폼형 기술로 발전하고 있음.

– Bayer는 정밀육종 플랫폼과 디지털트윈 기술을 활용하여 미세기후 · 토양 · 재배조건을 가상공간에 구현하고, AI로 교배 후대의 유전적 결과와 작물 성능을 예측함으로써 육종의 불확실성을 줄이는 방향으로 기술을 고도화 함.

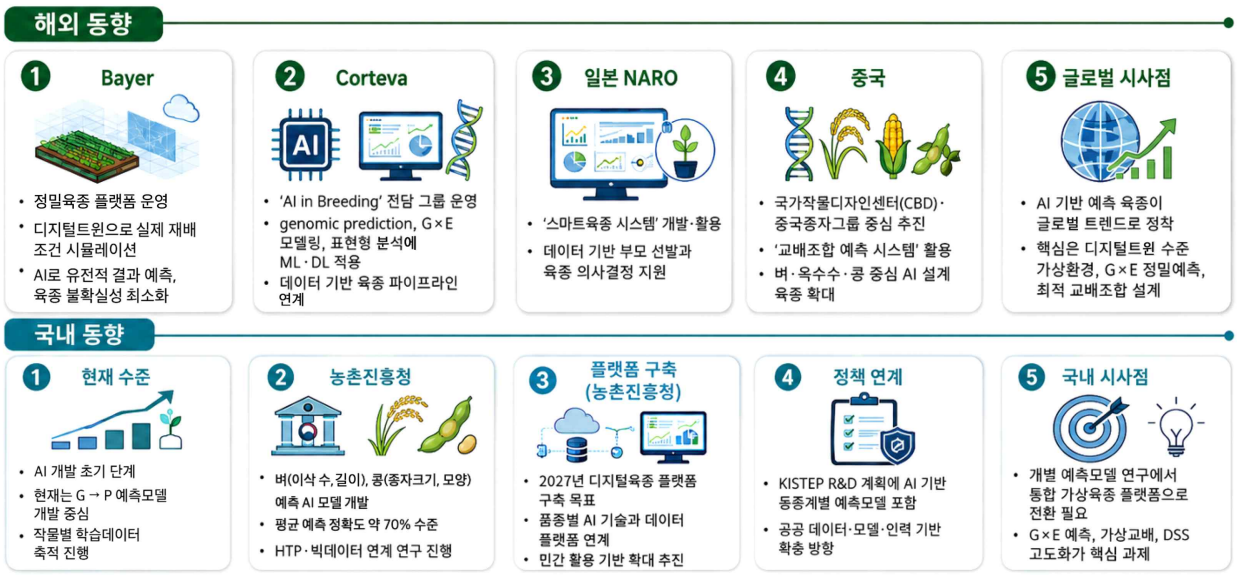


그림 10. AI · 디지털트윈 기반 가상육종 플랫폼 기술 발전 동향

– Corteva는 'AI in Breeding' 전담 조직을 중심으로 머신러닝과 딥러닝을 유전체 예측, 유전형-환경 상호작용(G×E) 모델링, 영상 기반 표현형 분석에 적용하고 있으며, 이를 실제 데이터 기반 육종 파이프라인과 연계함.

– 일본 NARO는 유전체 · 품종 · 계통 정보를 활용하여 적합한 부모를 선정하고 교배조합을 비교하는 '스마트육종 시스템'을 개발 · 활용하고 있으며, 데이터에 근거한 부모 선정과 육종 의사결정을 지원하는 방향으로 발전함.

- 중국은 국가작물디자인센터와 중국종자그룹 등을 중심으로 교배조합 예측 시스템과 AI 기반 작물설계 기술을 개발하고 있으며, 벼 · 옥수수 · 콩 등 주요 식량작물을 대상으로 적용 범위를 확대함.
- 종합하면, 국외 기술은 단순한 형질 예측을 넘어 디지털트윈 수준의 가상 재배환경, 정밀한 G×E 예측, 최적 교배조합 설계 및 육종 의사결정 지원을 통합하는 방향으로 발전하고 있으며, 일부 글로벌 기업에서는 실제 품종개발 과정에 적용되는 단계에 진입함.
- 국내는 AI 기반 디지털 육종의 초기 적용 단계로, 현재는 유전형 정보를 이용해 표현형을 예측하는 G→ P 예측모델 개발과 작물별 학습데이터 축적이 기술개발의 중심을 이루고 있음.
- 농촌진흥청은 벼의 이삭 수 · 길이와 콩의 종자 크기 · 모양 등 주요 형질을 대상으로 유전형 기반 AI 예측모델을 개발하고 있음. 영상 · 센서 기반 고속표현형(HTP) 및 농업 빅데이터와의 연계 연구도 함께 진행함.
- 기술개발 범위도 단일 유전체 자료에 기반한 형질 예측에서 드론 · 영상 · 분광 · 센서 데이터와 환경정보를 함께 활용하는 멀티모달 예측으로 확대. 이에 따라 수확기 형질뿐 아니라 생육속도, 스트레스 반응, 회복력 등 생육과정의 동태적 형질을 정량화하려는 연구가 증가함.
- KISTEP의 농업 R&D 계획에도 AI 기반 품종개발 예측모델 기술이 포함되는 등, 디지털 육종은 개별 작물 연구를 넘어 공공 데이터 · AI 모델 · 전문인력 · 컴퓨팅 인프라를 연계하는 국가 연구개발 분야로 확대함.
- 종합하면, 국내 기술은 작물별 G→P 예측모델을 개발하는 단계에서 유전체 · 표현체 · 환경데이터를 통합하는 가상육종 플랫폼 구축 단계로 이동. 향후 기술개발의 중심도 개별 형질의 예측 정확도 향상에서 G×E 예측, 가상교배, 지역적응성 평가 및 육종 의사결정 지원 시스템의 통합으로 전환될 것으로 전망됨.

○ 통합 오믹스 · AI 기반 가축 디지털육종 및 맞춤형 실증 플랫폼 구축

- (국내 기술 발전 동향) 국내 대표 품종인 한우 개량을 기준으로 육종기술 발전동향을 살펴보면, 2018년 한우 후보씨수소 선발에 유전체 정보를 도입한 뒤, 2026년부터 한우 씨수소를 12개월령에 유전체 기반으로 조기 선발하는 단일 체계로 전환하는 것이 필요함(그림 11).

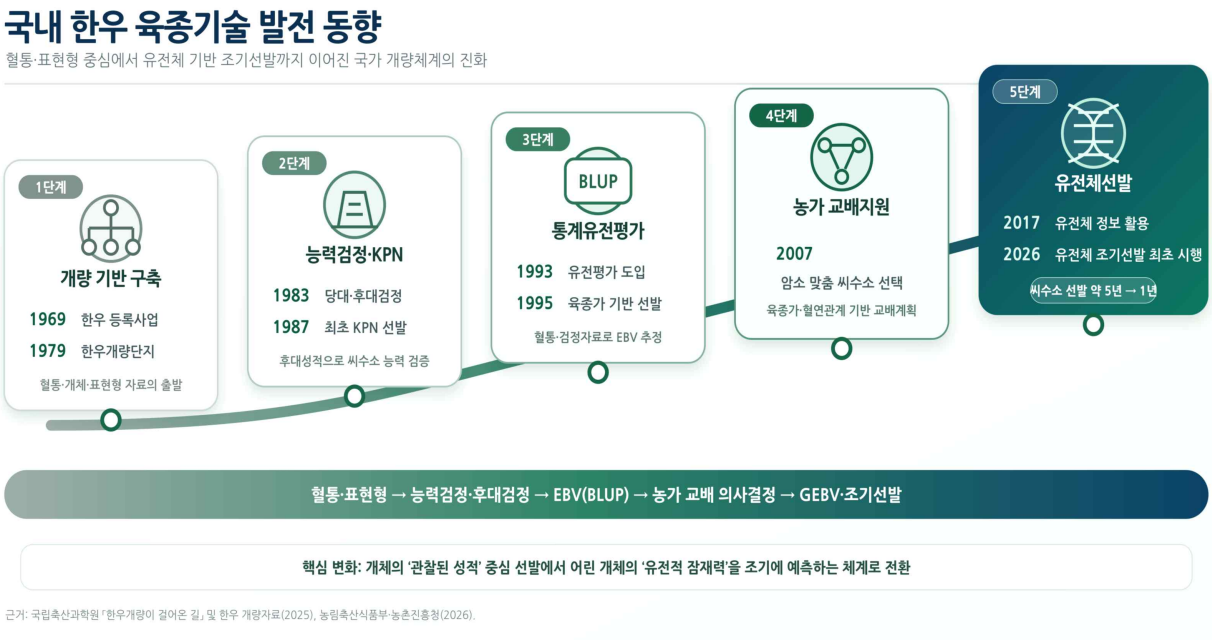


그림 11. 가축(한우) 육종기술 발전 동향

– (국외 기술 발전 동향, 표 4)「유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 법률(LMO법)」개정 추진 중. 유전자 교정 농산물을 기존 GMO와 동일하게 규제함에 따라 연구개발 및 산업화가 지연된다는 지적으로 추진 중이나 개정은 이루어지지 않음.

표 4. 주요 국가 · 권역의 기술수준 비교

국가	인프라·사례	현재 기술수준
미국	CDCB 국가협력DB, USDA 연계 유전체평가, Feed Saved·건강·생애수익 지수	유전체평가·상용서비스 선도: 대규모 유전체–검정자료와 민간 검사·정액산업 연결
EU·네덜란드	EuroGenomics, ICAR 표준, EuroFAANG, Breed4Food, CRV·Topigs Norsvin	공동참조집단·기능유전체·정밀표현형 선도
캐나다	Lactanet 국가 유전평가, 우유 MIR 기반 Methane Efficiency	저탄소 신규형질 상용화 선도: 2023년 메탄효율 공식 평가
호주	DataGene 중앙자료·Ginfo 참조집단, 농장 의사결정 앱	환경적응·현장형 데이터 기반 우수
한국	국가 가축개량체계, 한우·젖소 유전체 기반 씨수소 조기선발	SNP 기반 유전체선발 상용화·전면전환 단계

○ 양자컴퓨팅 기반 디지털육종 기술 구현

– 주요국은 양자 하드웨어 · 알고리즘 생태계를 바탕으로 생명 · 농업 분야 응용을 확대하고 있으며, 국내도 슈퍼컴퓨팅 자원과 연계한 초기 실증에 착수함.

표 5. 양자컴퓨팅 기반 디지털육종 국내외 기술 발전 동향

구분	주요 내용
미국	· IBM·D-Wave·구글·IonQ 등 양자 하드웨어 생태계가 가장 두터움. · DOE 산하 국립연구소(ORNL·Argonne 등)가 단백질 구조·생체분자 시뮬레이션·유전체 분석에 양자 알고리즘을 시범 적용하고, USDA 농업 전용 슈퍼컴 Ceres와의 양자 자원 연계 가능성이 논의됨. · 2026년 5월 IBM·클리블랜드클리닉·RIKEN이 12,635개 원자 규모 단백질을 양자-고전 하이브리드로 시뮬레이션(양자 하드웨어 활용 역대 최대, IBM Quantum 발표)
중국	· 야저우완 국립연구소가 농업 AI 거대언어모델(SeedLLM/Fengdeng, '24~'25)을 개발(※AI 기술로 양자컴퓨팅과는 구분됨). · 허페이·안후이 양자정보 거점을 통해 양자컴퓨팅을 국가 차원에서 육성 중이며, 첨단기술 국가펀드 약 1조 위안('25, 양자 등 신흥기술 포괄)을 조성
유럽	· EU Quantum Flagship(€10억, 2018~2028) 산하에서 생명과학·환경 분야 적용을 별도 트랙으로 운영. · 독일 율리히(FZJ)는 유럽 최고 수준 양자 인프라(D-Wave 5,000+큐빗 등)를, 네덜란드 WUR은 식물유전체·AI 육종 역량을 보유하여 양자-농생명 융합 기반을 갖춤
민간	· Bayer가 후지쯔 디지털 어닐러(양자영감 컴퓨팅)로 종자 생산·자재 계획을 최적화(Fujitsu 사례, 2022). · Syngenta-QuantumBasel이 차세대 작물보호제 개발에 양자컴퓨팅 적용을 추진(2026.3). · Corteva 등은 구글 AI 기반 육종 가속을 도입 중이며, 양자컴퓨팅 활용은 초기 탐색 단계임
국내	· KISTI가 '26년 양자컴퓨터(IonQ) 도입·'27년 서비스를 추진하고 슈퍼컴 연계 하이브리드 환경 구축. · 양자컴퓨팅 기반 결측 유전형 보정 알고리즘(Qulmputer) 특허 출원

☞ 하드웨어 · 인력 · 데이터 표준 전 측면에서 미 · 중 대비 격차가 존재하나, 농업 양자 응용 자체가 글로벌적으로도 초기 단계이므로 부처 협업과 집중 투자 시 단기 추격이 가능

2 기술발전 흐름

○ AI · 디지털트윈 기반 가상육종 플랫폼

– AI · 디지털트윈 기반 가상육종 플랫폼의 기술 발전은 육종 의사결정의 시점이 재배 후 선발에서 교배 전 예측 · 설계로 앞당겨지고, 활용 데이터가 표현형 · 계보에서 유전체 · 오믹스 · 환경정보로 확대되는 흐름.

표 6. AI · 디지털트윈 기반 가상육종 플랫폼 기술 발전 흐름

단계	주요 데이터·기술	대표 기능	핵심 한계
1 세대: 표현형·계보 중심	포장 관찰, 계보, 통계 선발	경험과 반복시험 중심	신뢰도는 높으나 기간·비용 부담
2 세대: 분자마커·GS	SNP·QTL·유전체 선발	유전형 기반 조기 예측	환경·비선형 상호작용 반영 제한
3 세대: AI·고속표현형	영상·센서·오믹스·딥러닝	복합 형질·시계열 예측	데이터 표준·외부검증 부족
4 세대: 가상육종	부모추천·후대분포·다형질 최적화	교배와 선발전략을 가상 비교	모델 신뢰·사용성·거버넌스 필요
5 세대: 디지털트윈 DSS	G×E×P·생육모형·기후 시나리오·폐루프	지역·기후별 in-silico 시험과 지속 학습	다지역 장기데이터와 운영조직 필수

- 초기의 경험적 선발에서 분자마커 · 유전체선발을 통한 조기 예측 단계로 이동하고, 최근에는 AI와 고속표현형을 결합한 복합형질 예측으로 발전 중임.
- 현재는 개별 계통의 형질 예측을 넘어, 부모 추천 · 후대 유전분포 · 다형질 최적화를 통해 교배조합과 선발전략을 가상으로 비교하는 기술로 확장되는 단계임.
- 다만 작물과 형질에 따라 데이터 축적 및 기술 적용 수준에 차이가 있어, 완성된 통합체계라기보다 개별 예측 · 시뮬레이션 기술이 가상육종 플랫폼으로 연계되는 과정임.
- 향후에는 유전형 · 환경 · 재배관리의 상호작용과 작물 생육모형, 기후 시나리오를 결합하여 후보 계통의 지역 · 기후별 성능을 가상으로 시험하는 디지털트윈 기반 육종 의사결정 지원 시스템으로의 고도화 방향임.
- 전체적으로 관찰 중심 선발 → 유전형 기반 예측 → AI 기반 조기선발 → 가상교배 · 선발전략 설계 → 환경을 반영한 전주기 의사결정 지원으로 이어지는 기술 발전 흐름임.

○ 통합 오믹스 · AI 기반 가축 디지털육종 기술 흐름도

표 7. 오믹스 기반 가축 디지털육종 기술 발전 흐름

단계	주요 기술	대표 특징
1세대 (1990~2005)	전통육종 혈통기록(Pedigree)	표현형 및 가계도 기반 선발, 개량 속도 느림 통계학적 기법 (BLUP 등)을 활용한 유전능력 평가 도입
2세대 (2005~2015)	SNP Chip 유전체선발	DNA 마커 기반 육종 (정확도 향상) DNA 마커 (SSR, SNP 등) 발굴 및 제한적 유전자 지도 작성 특정 경제 형질 (육질, 산자수 등)과 연결된 DNA Marker 중심 개량
3세대 (2015~2020)	Whole Genome Sequencing 표현체	대용량 유전체와 표현형 데이터 활용 NGS 기술 보편화 및 대량의 유전체 정보를 활용하여 유전체 분석을 통해 어린 가축 단계에서 조기 유전능력 예측
4세대 (2020~현재)	Multi-omics AI Digital Breeding	유전체·전사체·대사체·표현체 영상 데이터 융합 (통합 오믹스) 딥러닝 및 대형 AI 모델을 통한 복합 양적형질 정밀 예측 및 가상 교배
5세대 (향후)	Digital Twin Livestock Foundation AI	개체별 디지털 트윈 구축 및 실시간 육종 의사결정 자동화

○ 유전자 교정 기술 발전 흐름도

표 8. 유전자교정 기술 발전 흐름

시기	핵심기술	특징
~2010	ZFN	최초의 유전자 절단기술, 설계 복잡, 비용 높음
2010~2013	TALEN	정확도 향상, 설계 용이하지만 제작 비용 부담
2013~현재	CRISPR-Cas9	쉽고 저렴하며 높은 편집효율, 유전자교정 대중화
2016~현재	Base Editing	DNA 이중가닥 절단 없이 단일염기 치환 가능
2019~현재	Prime Editing	삽입·삭제·염기치환의 정밀 수행, Off-target 감소
2023~현재	AI 기반 Gene Editing	AI 설계, Multiplex Editing, Epigenome Editing 등 차세대 정밀육종

○ 양자컴퓨팅 기반 디지털육종 기술 구현

– (진화 과정) 전통육종(경험적 표현형 선발) → 분자육종(분자마커 · 질적형질) → 디지털육종(빅데이터 · AI, G×E 통합) → 양자 디지털육종(양자 가속 최적화 · 분자 시뮬레이션)으로 진화하며, 데이터 규모 · 연산 요구량 · 예측 정밀도가 단계적으로 증대됨.

– (현재 기술수준) NISQ 단계로 큐빗 수 · 오류보정이 미성숙하여 순수 양자보다 양자–고전 하이브리드가 현실적이며, 결측 대치 등 특정 모듈에서 초기 실증이 진행되는 단계임.

– (발전 단계) 국내외 로드맵상 2단계(2031~2035)에 양자 알고리즘 기반 초거대 분자 시뮬레이션 및 복잡 유전체 조합 최적화의 시범 적용 · 실증이 계획되어 있음.

표 9. 디지털육종 연산 · 분석 기술수준 전망

구분	현재 기술수준 (2020s)	미래 기술수준 (2030s)
컴퓨팅 자원	연구실 서버·범용 클라우드, CPU 중심	국가급 농업 전용 HPC·GPU + 양자-고전 하이브리드
분석 대상	단일·소규모 형질 예측	수만 마커 × 수십 형질 동시 최적화
분자 시뮬레이션	근사·제한적 규모	단백질·대사경로의 양자 기반 정밀 모사
데이터 보안	고전 암호 기반	양자내성 암호(PQC) 기반 데이터 주권 확보

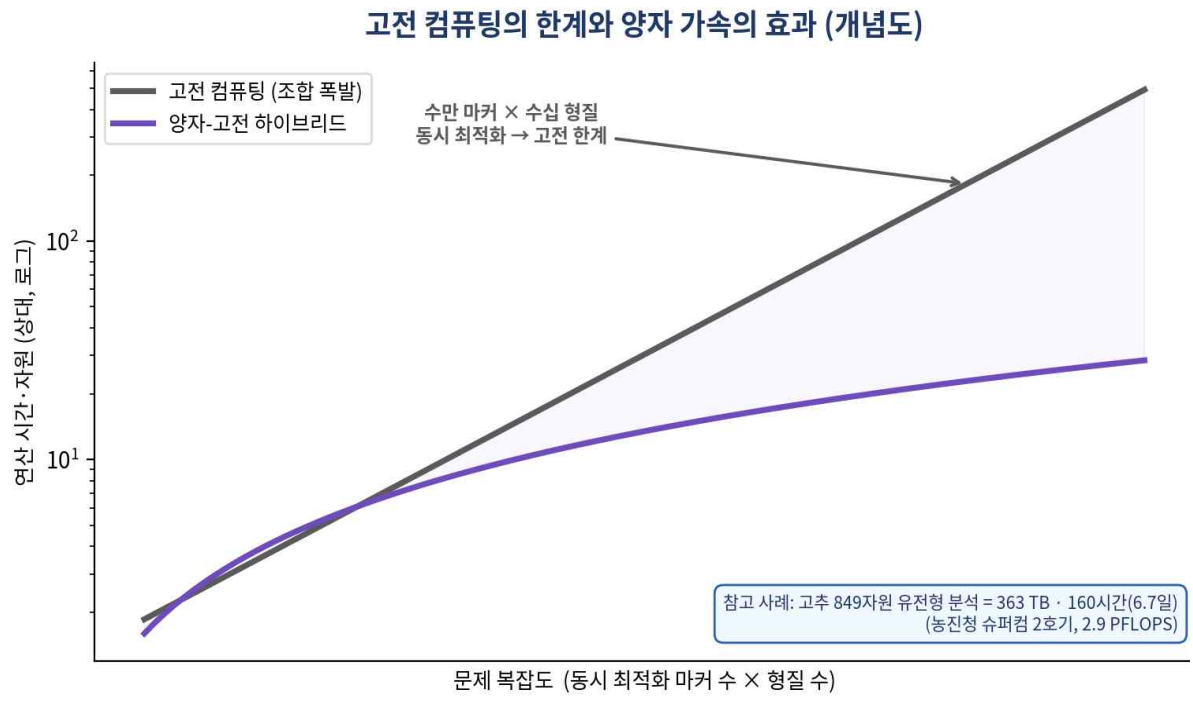


그림 12. 고전 컴퓨팅의 한계와 양자 가속의 효과(개념도)

– 디지털육종에서 최적화 대상(마커 수 × 형질 수)이 늘어날 때 고전 컴퓨팅의 연산 부하가 지수적으로 폭증하는 반면, 양자–고전 하이브리드는 완만하게 증가하여 난제 구간에서 상대적 우위를 갖게 됨(그림 12).

3 핵심 발전축

○ AI · 디지털트윈 기반 가상육종 플랫폼 (그림 13)



그림 13. AI · 디지털트윈 기반 가상육종 플랫폼 핵심 발전축

– 개별 형질의 예측 정확도를 높이는 기술에서, 유전체 · 표현체 · 환경정보를 연결하여 교배 · 선발 · 시험 의사결정을 지원하는 통합체계로 이동함.

– 예측기술의 중심은 단일 유전체 정보에 기반한 선형 분석에서 유전체 · 오믹스 · 영상 · 센서 · 환경정보를 함께 해석하는 멀티모달 · 하이브리드 모델로 확대. 통계적 유전체 선발, 딥러닝, 작물 생육 모형을 상호 보완적으로 결합하는 구조가 핵심임.

– 표현형 분석의 중심은 수확기 수량 · 크기와 같은 종점값에서 생장속도, 스트레스 반응 시점, 회복력 등 생육 전 과정의 변화를 정량화하는 동태적 표현형으로 이동. 고속표현형 기술이 AI 예측을 위한 핵심 데이터 생산수단으로 부상함.

– 예측 단위는 평균적으로 우수한 계통을 찾는 방식에서 특정 지역 · 기후 · 재배관리 조건에서 우수한 계통을 구분하는 G×E×P 분석으로 확대됨. 디지털트윈은 후보 계통의 조건별 성능과 안정성을 비교하는 가상시험 체계임.

– 기술의 경쟁력도 개별 모델의 정확도보다 데이터 수집–예측–선발–현장검증을 반복적으로 연결하는 운영체계에서 결정됨. MLOps · BreedingOps를 통한 데이터 · 모델 · 육종 이력의 통합관리가 지속적으로 활용 가능한 플랫폼의 핵심 기반임.

○ 통합 오믹스 · AI 기반 가축 디지털육종 및 맞춤형 실증 플랫폼

– (디지털 가축 육종 발전축 1: 데이터 기반화) 핵심은 데이터 양이 아니라 육종 가능한 연결성이 높은 자료로 산출되어야 함.

- 국가 참조집단은 소수 핵심 씨수소의 정확도만 높이는 구조에서 벗어나 다양한 암소 · 농장 · 기후 · 사양체계를 대표하는 동적 참조집단으로 확장돼야 함.
- (디지털 가축 육종 발전축 2: 지능화) 영상 · 음향 · 센서 원자료를 성장, 섭취, 행동, 질병징후, 번식 및 도체형질로 변환하는 멀티모달 표현형 AI임.
- (디지털 가축 육종 발전축 3: 자동화 및 무인화) 자동화의 목표는 단순 노동대체가 아니라 반복 가능하고 편향이 적은 표현형을 끊김없이 생산하는 것이 중요한 요소임.
- (디지털 가축 육종 발전축 4: 친환경 · 저탄소화) 저탄소화는 저메탄 사료 하나에 한정되지 않고 유전적으로 효율적인 개체를 더 짧고 안정적으로 생산해 총 사육일수와 불필요한 투입 절감이 목표임.
- (발전축 간 관계) 데이터 기반화가 공통 토대이고, 지능화는 예측 · 최적화 엔진, 자동화는 고품질 자료 생산과 실행 수단, 친환경 · 저탄소화는 생산성 중심 육종을 다목적 산업가치 중심으로 전환하는 중요 목표축. 네 축이 결합될 때 GEBV는 단일 순위가 아니라 농장조건별 성능 · 위험 · 경제 · 탄소가치를 포함한 실행 가능한 정밀처방으로 확장 가능함.
- 유전자교정 가축의 국가 차원의 관리, 평가, 보급 시스템을 구축함.
- 연구 인프라 및 성과는 기초 연구를 넘어 축종별 유전자 교정 계통 생산에 대한 체계적인 검증 · 실증 연구와 전문 관리 시설은 전무함.

○ 양자컴퓨팅 기반 디지털육종 기술 구현(그림 14)

- 양자컴퓨팅 기반 디지털육종은 다음과 같은 5대 축을 중심으로 고도화될 전망임.
  ① 데이터 기반화 : 멀티오믹스 · 표현형 · 환경 빅데이터의 통합 · 표준화로 양자 분석의 입력 기반을 확보함.
  ② 지능화 : AI와 양자 머신러닝(양자 커널 등)을 결합하여 형질 예측 · 선발의 정밀도를 향상함.
  ③ 초고속 · 대규모화 : 양자 가속 연산으로 조합 최적화 · 대규모 추론 등 고전 난제를 처리함.
  ④ 정밀 · 설계화 : 분자 시뮬레이션과 최적 교배설계로 '예측을 넘어 설계하는' 육종으로 전환함.
  ⑤ 주권 · 안전화 : 양자내성 암호 기반 데이터 보호로 국가 종자 · 유전체 데이터 주권을 확보함.

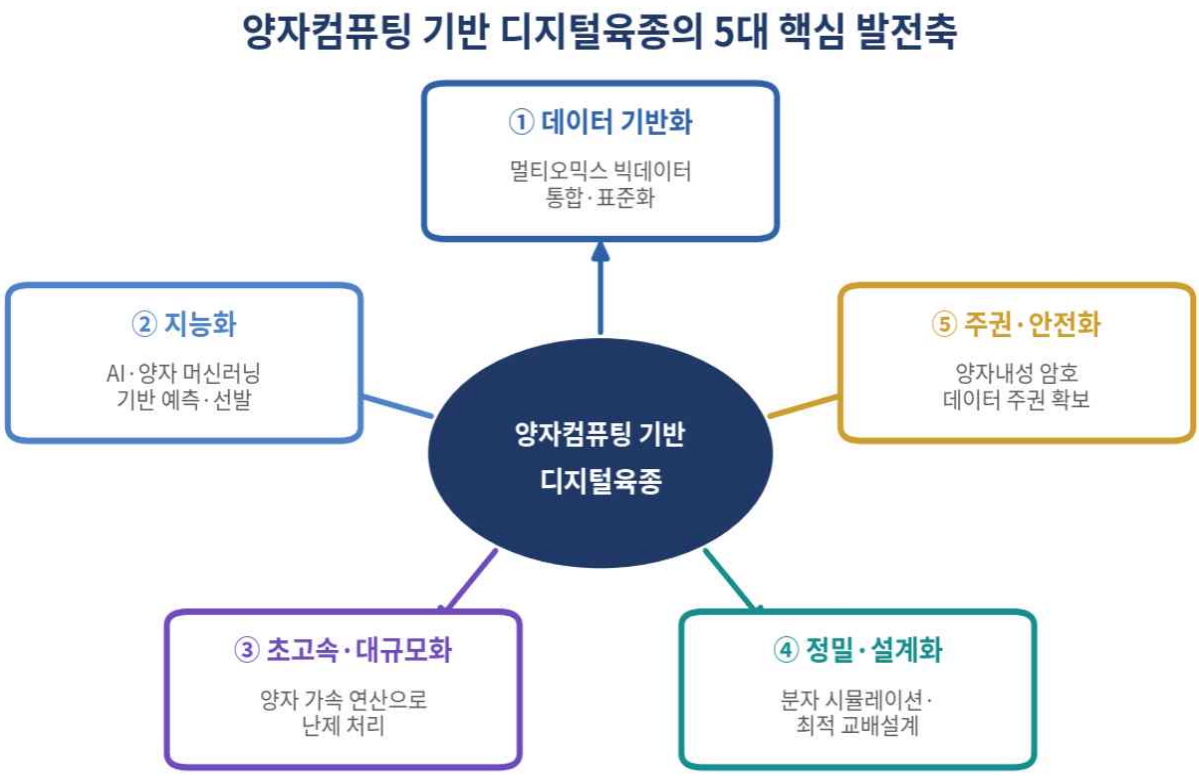


그림 14. 양자컴퓨팅 기반 디지털육종의 5대 핵심 발전축

4 향후 기술 발전 방향



그림 15. AI · 디지털트윈 기반 가상육종 플랫폼 발전 방향

○ AI · 디지털트윈 기반 가상육종 플랫폼

– 향후 발전의 핵심은 현재의 GBLUP · 단일환경 · 일부 형질 중심 분석을 개별적으로 고도화하는 데 그치지 않고, 예측모델-가상교배-환경시험 -현장검증-서비스를 하나의 육종 의사결정 흐름으로 통합하는 데 있음(그림 15).

– 2026~2030년에는 통계모형과 AI 앙상블, 유전체 · 오믹스 · 영상 · 센서 · 환경 정보를 결합한 멀티모달 예측체계 구축이 우선되어야 함. 단일 시험환경과 수량 · 형태 중심 예측에서 다지역 · 다년도 G×E와 품질 · 병저항 · 내재해 · 기능성 예측으로 범위를 확대하고, 독립연도 · 지역 외부검증을 통한 현장 신뢰성 확보가 필요함.

– 가상교배는 육종가의 경험과 단순 조합 비교를 보완하여 후대 분포 · 유전적 이득 · 근친 위험을 함께 계산하는 다형질 교배설계로 고도화 함. 부모 조합, 교배 규모, 선발 후보 및 시험지역을 제안하는 육종가용 DSS와 시각화 기능을 실제 육종과정에 연계함.

– 2031~2035년에는 작물생육모형과 AI, 인과 · 확률 모델을 결합한 G×E×P 디지털트윈으로 확장하고, 과거에 충분히 관측되지 않은 기후 · 재배조건까지 가상시험하는 체계 구축이 가능함.

– 복합 다형질 · 환경안정성 · 자원효율 · 장기 유전다양성을 함께 고려하는 포트폴리오 최적화와 드리프트 감시, 능동시험, 현장 실측 환류, API · 에이전트형 지원을 결합한 지속학습형 DSS 정착이 필요함.

○ 통합 오믹스 · AI 기반 가축 디지털육종 및 맞춤형 실증 플랫폼

– 가축 디지털 육종을 위해 단기적으로는 국가 데이터 기반과 축종별 실증모형을 완성하는 시기임.

표 10. 가축 디지털육종 분야별 핵심 개발 내용

중점과제	핵심 개발내용
국가 데이터 거버넌스	공통 개체ID, 데이터사전·온톨로지, 센서·농장·도축 API, 동의·권리·수익배분, 안전한 분석 공간
유전체 해상도 고도화	한국 고유 품종·계통 롱리드 (long-read) WGS, 그래프 팬지놈, 구조변이·치사하플로타입, 조직별 기능유전체
디지털표현체 테스트베드	영상·음향·섭취·체중·생체신호와 온·습도·사료·축사·질병압 동시수집, 도축자료 환류
AI 정밀육종 플랫폼 실증	통계유전+AI 앙상블, G×E×M, 생애경제·LCA, 가상교배·근친·정액배분 최적화
현장 처방형 서비스	성장·섭취곡선 기반 최적 출하, 개체별 급이, 번식·질병 위험관리 기술 구축
질병·마이크로바이옴 육종	질병저항 원인변이 기능검증, 숙주–미생물 공동예측, 바이오뱅크 구축

– 중장기 목표로는 축종별 실증 플랫폼 국가 가축개량 · 정액유통 · 스마트축산 · 도축유통 체계와 연계하여, 농장환경에 맞는 종축 · 교배 · 사양 · 출하를 지속 최적화하는 국가 디지털 육종 운영체계로 전환되어야 함.
– 핵심적인 변화는 한 번 계산한 GEBV에서 환경과 생애정보에 따라 갱신되는 조건부 산업가치로 범용 고능력 종축에서 기후 · 사료 · 질병환경에 내성이 있는 맞춤형 계통으로의 전환이 필요함.
– 장기적으로 가축 디지털육종은 어떤 암컷을 어떤 종축과 교배할 것인가를 넘어, “그 후대를 어떤 농장 · 사료 · 관리조건에서 언제까지 사육해야 생산성 · 건강 · 품질 · 수익성과 탄소성과를 함께 극대화하는가?”에 답하는 국가 정밀처방형 가축육종체계가 구축되어야 함(그림 16).

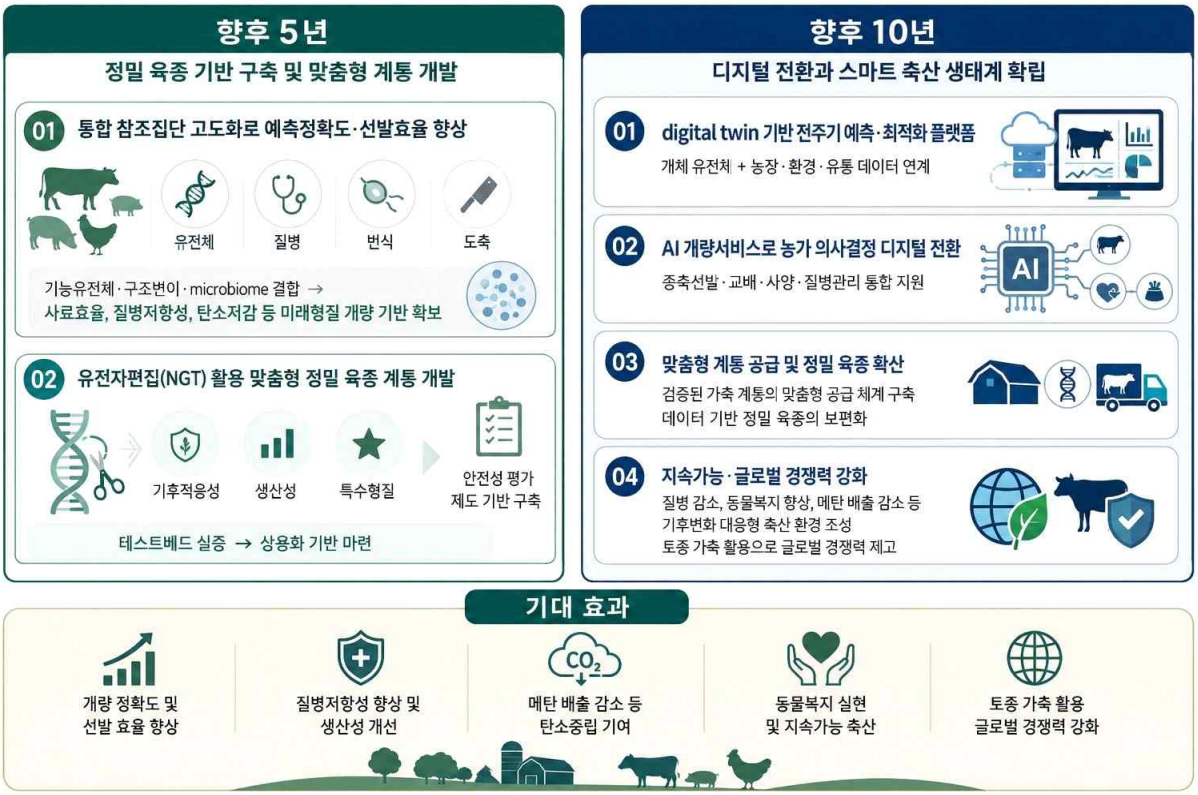


그림 16. 향후 기술 발전 방향 로드맵

– 단기적으로 GE 농산물에 대한 EU 작물 승인 따라서 가축도 승인 예상되며, 중장기적으로는 기존 선발육종 기술에 의한 품종이 현재의 농업 생산에 활용되듯이 유전자 교정 가축 품종이 우점할 것으로 예상됨.
– 또한 AI 기술과 접목을 통한 효율적인 유전자 정밀 타깃 선정, 사양관리 자동화에 따른 디지털 전환 실현 및 생산 증대가 예측됨.
– 검증된 가축 계통의 맞춤형 공급 체계 구축과 데이터 기반 정밀 육종의 확산을 통해 스마트

축산 생태계가 확립되리라 예상됨.

– 질병 발병률 감소와 동물복지 충족 및 가축 메탄 배출 감소 등 기후변화 대응형 축산 환경 조성 및 토종 가축 활용을 통한 글로벌 축산업 경쟁력이 강화되리라 예상됨.

○ 양자컴퓨팅 기반 디지털육종 기술 구현(그림 17, 표 11)

– (향후 5년, ~2031) 하이브리드 기반 농생명 빅데이터 분석 · 활용 알고리즘을 개발하고, 양자컴퓨팅을 분석 파이프라인의 일부 단계에 시범 도입하며, 품종 선발 정확도 향상 등 활용사례 1~2건을 확보. 농진청 슈퍼컴퓨팅과 양자컴퓨팅 자원의 연계 운영체계를 구축함.



그림 17. 양자컴퓨팅 기반 디지털육종 기술개발 로드맵

– (향후 10년, ~2036) 양자컴퓨팅이 디지털육종 전주기 의사결정 시스템의 구성요소로 정착하고, 단백질 · 대사경로 분자 시뮬레이션으로 신기능 유전자 · 단백질 및 물질을 디자인. 실시간 수만 마커 × 수십 형질의 동시 최적교배조합 설계가 가능해지고, 양자내성 암호 표준 적용으로 국가 종자 · 디지털 데이터 주권을 보호함.

표 11. 양자컴퓨팅 향후 전망

향후 5년 (2031)	향후 10년 (2036)
· 하이브리드 기반 농생명 빅데이터 분석·활용 알고리즘 개발 · 양자컴퓨팅을 분석 파이프라인 일부 단계에 시범 도입 · 품종 선발 정확도 향상 등 활용사례 1~2건 확보 · 농진청 슈퍼컴퓨팅과 양자컴퓨팅 자원 연계 운영체계 구축	· 양자컴퓨팅이 디지털육종 전주기 의사결정 시스템의 구성요소로 정착 · 분자 시뮬레이션으로 신기능 유전자·단백질 및 물질 디자인 · 실시간 수만 마커 × 수십 형질 동시 최적 교배조합 설계 · 양자내성 암호 표준 적용으로 국가 종자·데이터 주권 보호

5 주요 이슈 및 한계

○ AI · 디지털트윈 기반 가상육종 플랫폼

– 가장 큰 제약은 AI 학습과 검증에 필요한 다지역 · 다년도 · 스트레스 환경 데이터의 부족과 기관별 데이터 형식 · 용어 · 식별체계의 불일치. 결측과 표본 편향을 줄이기 위한 최소 공통 조사 프로토콜, 데이터 품질등급 및 이력관리와 함께, MIAPPE · BrAPI · 형질 온톨로지를 활용한 상호운용 기반 마련이 필요함.

– 작물마다 생식방식, 세대진전 방법, 주요 형질 및 포장시험 관행이 달라 하나의 모델과 플랫폼을 모든 작물에 동일하게 적용하기 어려운 한계. 공통 데이터 · 분석 기반 위에 작물별 예측모델, 가상교배 모듈 및 성능평가 기준을 별도로 구성하고, 작물 전문가가 개발 · 검증을 담당하는 체계가 필요함.

– 평균 예측 정확도만으로는 신규 연도 · 지역 · 계통과 미관측 환경에서의 성능을 판단하기 어려우며, 모델 결과가 과신될 위험. 예측값과 함께 신뢰구간 · 적용 가능 범위를 제시하고, 시간 · 지역 · 계통을 분리한 외부검증과 실제 현장시험을 통해 성능을 확인하는 구조가 필요함.

– 민간기업과 대학이 보유한 유전자원 · 교배정보 · 표현형 데이터는 핵심 자산이므로, 공개 중심의 데이터 정책만으로는 참여를 유도하기 어려운 문제. 데이터 기여도와 이용이력을 기록하고, 접근권한 등급화, 안전한 분석공간, 성과 · 수익 환류 및 지식재산 보호를 포함한 공동활용 체계가 필요함.

– 모델 결과가 기존 육종업무와 분리되거나 추천 근거가 충분히 제시되지 않으면 현장 활용도가 낮아지는 한계. 육종가가 개발 초기부터 참여하여 사용자 화면과 의사결정 절차를 공동설계하고, 추천 결과의 근거 · 불확실성 · 대안 조합을 함께 제공하는 방식이 필요함.

– 연구과제 종료 후 서버 · 데이터 · 모델의 갱신이 중단될 경우 플랫폼 성능과 활용성이 빠르게 저하될 가능성. 상시 운영기관과 유지관리 예산을 확보하고, 데이터 · 모델 버전관리, 성능감사, 보안정책 및 사용자 지원을 지속하는 운영체계 구축이 필요함.

○ 가축 디지털육종 체계 기술적 한계: 다차원 참조집단의 부재(표 12)

– 가축 디지털육종의 성패는 AI 알고리즘이나 개별 센서의 성능보다, 유전능력과 환경 · 관리효과를 분리하여 학습할 수 있는 양질의 참조집단 확보 중요함.

– (기술적 한계) 다차원 참조집단은 단순히 많은 개체를 수집하는 사업이 아니라, 품종 · 혈통 · 지역 · 기후 · 축사 · 사료 및 관리수준이 다른 농장을 대표하도록 설계해야 하는 고난도 연구임.

– (경제성 및 비용문제) 다차원 참조집단 구축에는 유전체 분석뿐 아니라 영상 · 음향 · 섭취 ·

체중 · 생체센서 설치, 장비 유지 · 교정, 사료 · 환경 · 질병자료 수집, 시료 및 바이오뱅크 관리, 도축자료 연계와 데이터 정제 비용이 지속적으로 발생함.

– (확산 장애요인) 농장 · 검정기관 · 센서기업 · 유전체분석기관 · 도축장에 자료가 분산되어 있고, 기관별 개체식별 체계와 데이터 형식이 달라 연계하기가 어려움.

– (제도 및 규제문제) 유전체 · 질병 · 경영자료의 소유권과 이용동의, 민감정보 보호, 종축평가 결과의 책임주체 및 AI 모델의 검증 · 갱신 기준이 명확하지 않음.

표 12. 가축 유전자교정 연구의 기술적 극복 내용

주요 문제	세부 내용
편집 정확도 한계	Off-target 변이, 예기치 않은 유전자 변화 가능성 존재
복합형질 제어 어려움	생산성, 번식성, 질병저항성 등 다유전자 형질은 편집 효과 예측 어려움
품종별 기술 적용성 차이	축종 및 품종에 따라 수정란 제작, 배아이식, 편집 효율이 상이 가금의 경우 포유류와 다른 생산 시스템 구축 필요
장기 검증 부족	여러 세대에 걸친 유전적 안정성 및 생산성 검증 데이터 부족

○ 양자컴퓨팅 기반 디지털육종 기술 구현

– (기술적 한계) NISQ 단계의 큐빗 수 제약 · 양자 노이즈 · 오류보정 미성숙으로, 대규모 문제에서 완전한 양자 우위 실현에는 상당한 시간이 필요함.

– (경제성 · 비용) 양자 하드웨어 접근 비용과 전문인력 확보 비용이 높고, 초기 투자 대비 단기 성과 입증 부담이 존재함.

– (확산 장애) 농업 도메인 특화 양자 알고리즘 · 데이터 표준이 부족하고, 육종가와 정보과학자 간 융합 역량 격차가 확산의 걸림돌로 작용함.

– (제도 · 규제) 글로벌 양자 클라우드 활용 시 데이터 반출 규제, 양자분석 결과의 신뢰성 · 재현성 검증 표준 부재 등 제도적 정비가 요구됨.

Ⅳ.산업 및 정책 환경

1 산업 동향

1.1 글로벌 산업 동향

○ AI · 디지털트윈 기반 가상육종 플랫폼

- 글로벌 가상육종 산업은 단일 소프트웨어 판매보다 유전자원- 육종데이터-AI 모델-다지역 시험망-종자사업을 결합한 통합 R&D 플랫폼을 중심으로 형성. 2023년 세계 종자시장은 약 900억 달러, 상위 7개 종자기업의 작물개량 R&D 투자는 2021년 65억 달러 이상으로 농업 부문 매출의 약 10% 수준임.
- Bayer는 머신러닝 · 디지털트윈 기반 정밀육종과 20개국 이상, 2억 2천만 에이커 이상의 FieldView 데이터를 연계하고 있으며, 2025년 Crop Science 매출은 216억 유로규모. Corteva도 AI 기반 in-silico 교배, 유전체-환경 예측과 고속표현형을 적용하고 있으며, 2025년 종자 매출 99억 달러, 전사 R&D 투자 14.7억 달러, 농업용 드론 1,000대 이상과 전문 조종 인력 1,200명 이상의 현장 데이터망을 운영함.

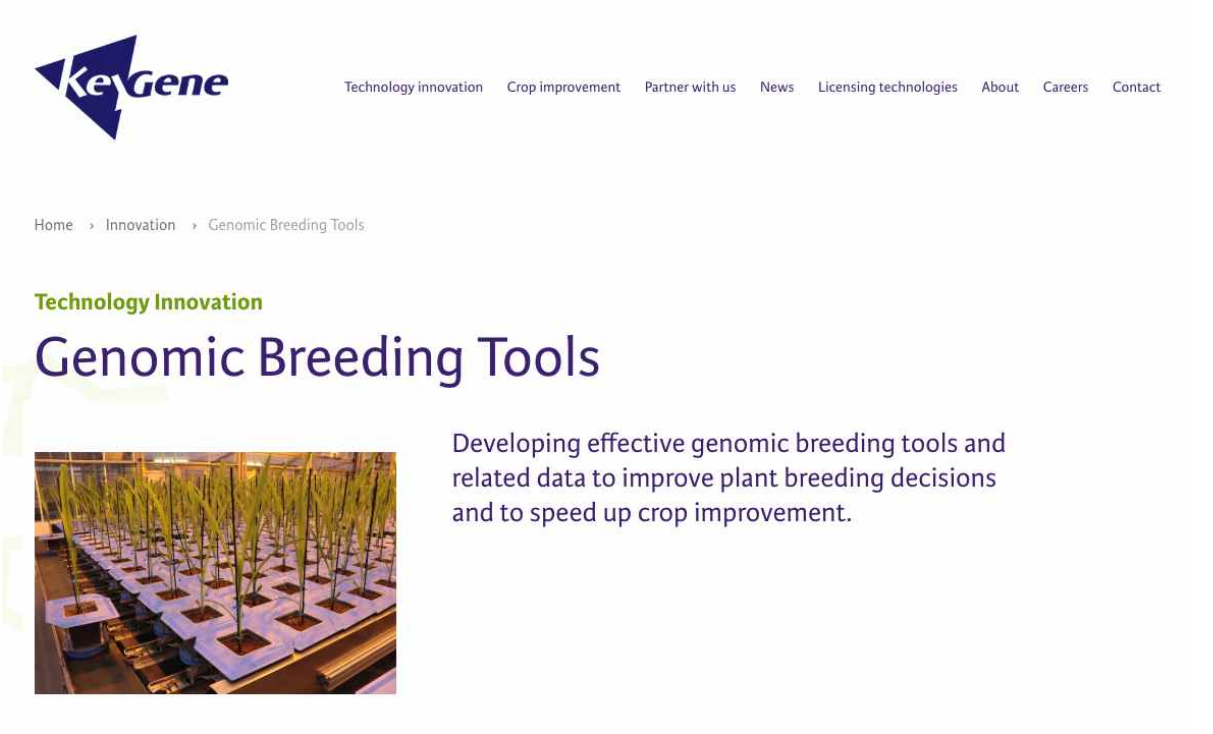


그림 18. KeyGene의 교배설계도구 홈페이지

- 대규모 유전자원과 장기 시험데이터의 축적이 진입장벽으로 작용하면서 산업 집중도도 높은 수준. 2018~2020년 Bayer와 Corteva 품종은 미국 옥수수 재배면적의 72%, 콩의 66%를 차지하여, 알고리즘보다 유전자원 · 현장데이터 · 시험망의 결합이 핵심 경쟁자산으로 부상함.
- 동시에 전문기술기업 시장도 확대. Inari는 AI 예측설계와 다중 유전자교정을 결합한 SEEDesign 플랫폼을 기반으로 2025년 1억 4,400만 달러, 누적 7억 2천만 달러 이상을 조달했으며, KeyGene은 교배설계 시뮬레이터 · 고속표현형 · CropPedia 및 SaaS형 육종 의사결정 도구를 제공함(그림 18).
- 관련 시장은 표현체 · 오믹스 분석, 예측 · 시뮬레이션, 클라우드 · HPC, 시험설계 · 검증, IP · 데이터 컨설팅으로 분업화되는 양상임.

○ 통합 오믹스 · AI 기반 가축 디지털육종 및 맞춤형 실증 플랫폼

- 가축 디지털육종은 아직 독립된 단일 시장으로 분류되지 않으며, 종축 · 정액 · 수정란 · 유전체검사를 포함하는 동물유전시장과 센서 · 자동화 · AI 분석을 포함하는 정밀축산시장이 융합되는 신산업으로 형성되고 있음.
- Grand View Research는 세계 동물유전시장을 2025년 78억 달러에서 2033년 134억 달러로 연평균 7.1% 성장할 것으로 전망. 정밀축산시장은 2024년 75억 달러에서 2033년 199억 달러로 연평균 11.8% 성장할 것으로 전망함.
- 시장 성장은 생산성 향상뿐 아니라 사료비 절감, 노동력 부족, 가축질병, 동물복지 및 온실가스 감축 요구에 의해 촉진되고 있음.
- 이에 따라 유전체검사만 제공하는 사업모델에서 유전체, 표현체, 환경자료를 통합하여 농장별 종축순위, 교배조합과 사양관리 방안을 제공하는 데이터 구독형 서비스로 전환되는 추세임.
- 2025년 미국 FDA가 Genus-PIC의 PRRS 저항성 돼지를 식용 및 번식용으로 승인하면, 유전자교정 기술이 실제 축산 공급망에 진입하는 중요한 전환점을 마련함(종축계통에 교정 형질을 도입하는 초기 단계).
- Genus plc (PRRS 저항성 돼지), Acceligen (무각 · 내열성 소), Roslin (돼지 · 가금 질병 저항성), Revivicor (알러지 저감 돼지) 등의 개발이 예상됨.

○ 양자컴퓨팅 기반 디지털육종 기술 구현(그림 19)

- (양자컴퓨팅 시장) 글로벌 양자컴퓨팅 시장은 2025년 약 35억 달러에서 2030년 약 202억 달러로 연평균 41.8% 급성장할 전망임(Markets and Markets, 2025).
- (디지털농업 시장) 글로벌 디지털농업 시장은 2025년 약 214억 달러에서 2030년 약 359억 달러로 성장할 전망이며(연 10.9%, Research And Markets, 2025), 정밀농업 시장은 2030년 약 240억 달러 규모로 전망됨(Grand View Research, 2025).

– (응용 가치) McKinsey는 양자컴퓨팅이 2035년까지 제약 · 생명과학 분야에서 2,000~5,000억 달러의 가치를 창출할 잠재력을 제시하였으며(McKinsey, 2025), 그 핵심은 분자 시뮬레이션으로 농생명 분야에도 파급이 예상됨.

– (주요 플레이어) 하드웨어(IBM, 구글, IonQ, D-Wave 등), 종자 · 농화학(Bayer, Corteva, Syngenta 등), 그리고 농생명 양자분석 서비스라는 신시장이 형성될 잠재력이 있음.

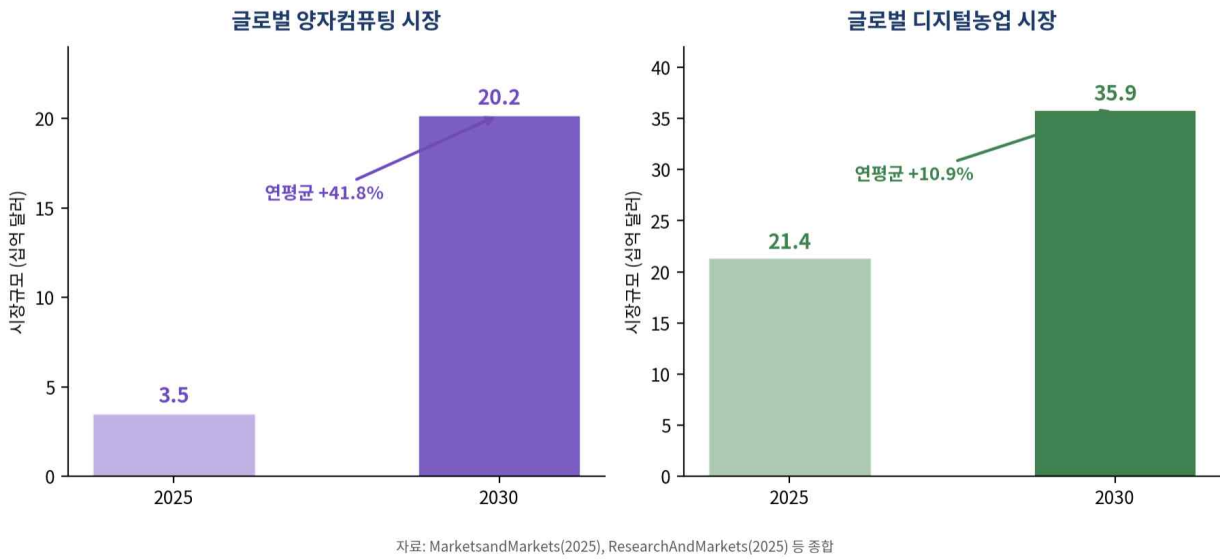


그림 19. 양자컴퓨팅 · 디지털농업 글로벌 시장 전망(2025→2030)

1.2 국내 산업 동향

○ AI · 디지털트윈 기반 가상육종 플랫폼

– 2024년 국내 종자 · 육묘산업 판매액은 9,719억 원으로 2022년 대비 11.0% 증가했으며, 종자 6,901억 원, 육묘 2,818억 원, 종사자 2만 1,805명 규모임. 종자업체 2,561개 중 판매액 5억 원 미만이 92.3%, 40억 원 이상은 26개에 불과하며, 채소종자가 전체 종자 판매액의 58.3%인 4,026억 원을 차지하는 영세 · 채소 중심 구조임(그림 20).

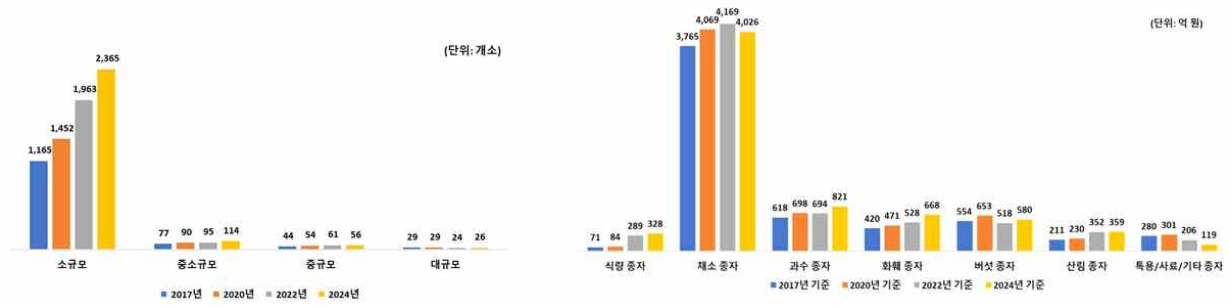


그림 20. 국내 종자 산업 규모

- 품종개발 역량은 소수 기업에 집중. 2022년 종자업체 2,143개 중 육종 실적 보유 업체는 289개, 13.5%, 품종개발 투입액은 약 596억 원이며, 40억 원 이상 24개 기업이 종자 판매액의 약 56.0%, 품종개발 투자의 73.9%를 차지. 2024년 육종인력도 1,257명 중 관행육종 1,134명, 생명공학 123명으로 디지털 · 바이오 전문인력 기반이 제한적인 상황임.
- 산업화는 개별 기업의 독자 플랫폼보다 공공 분석기반과 민간 육종소재를 연계하는 공동활용형 모델이 중심임.
- 한국농업기술진흥원은 GWAS · GS · Breeder's Toolbox · 온톨로지 기반 데이터관리 기능을 제공하고, 2024년 시험운영과 2025년 분석 의뢰 서비스를 개시함(그림 21).
- 2025년 워크숍에는 민간육종연구단지 14개 기업 등 약 50명이 참여했으며, 팜한농도 국립농업과학원과 종자 디지털 이미징 기반 공동연구를 추진함.

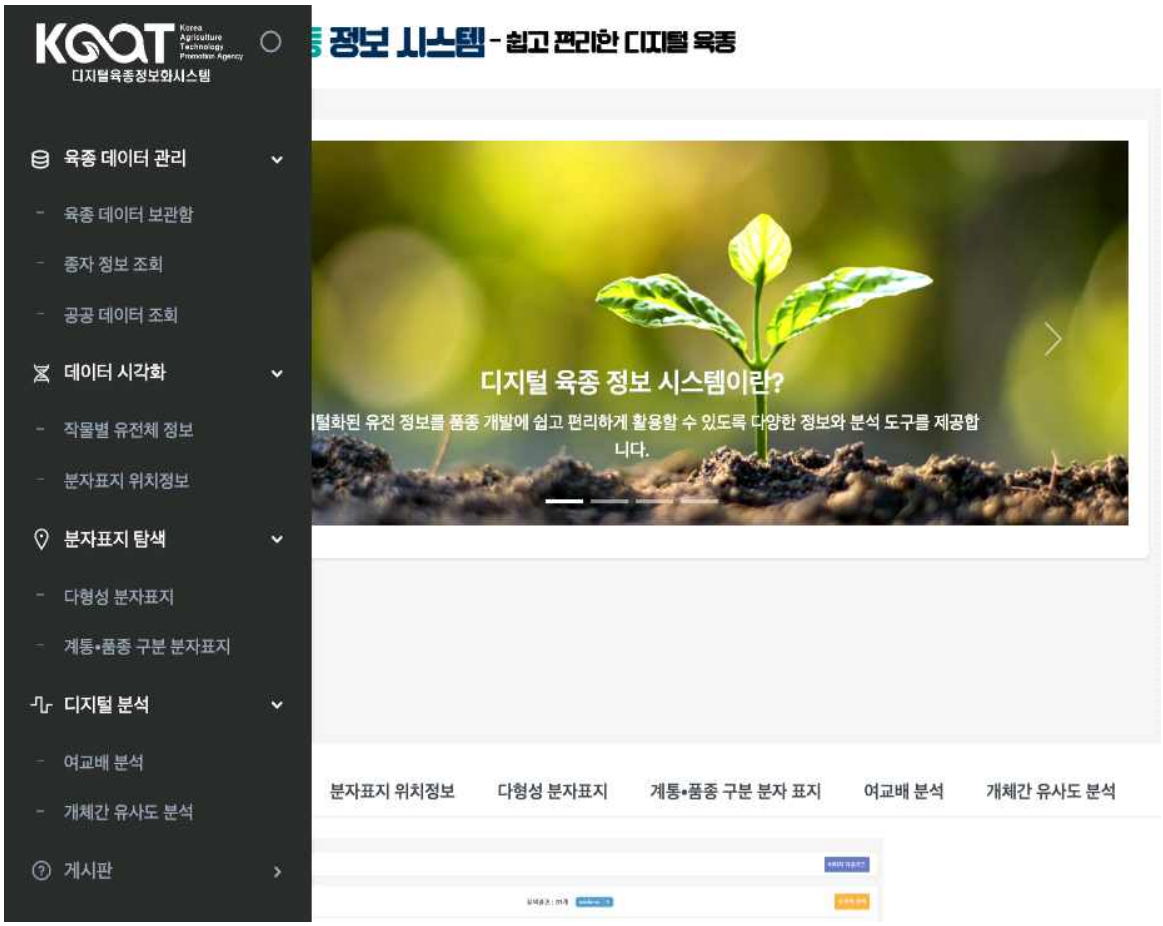


그림 21. KOAT 디지털육종정보화 시스템 홈페이지

- 정부의 첨단정밀육종 R&D 예산은 2025년 64억 원에서 2026년 104억 원으로 확대되고, 기업 대상 분석 · 컨설팅에 14억 원이 별도 편성되었지만 디지털육종 수요는 채소 · 수출기업과 일부 선도기업에 우선 집중되는 구조임.

○ 통합 오믹스 · AI 기반 가축 디지털육종 및 맞춤형 실증 플랫폼

– (시장 형성단계) 국내에는 가축 디지털육종만을 분리한 공식 시장통계가 아직 없으며, 국가가축개량사업, 유전체 분석, 종축 · 정액산업, 축산 ICT 장비 및 데이터 · AI 서비스가 각각의 시장을 형성함.

– (국내 산업의 구조적 한계) 유전체평가와 정액공급은 공공기관 · 농협 중심이고, 센서 · AI 서비스는 다수 중소기업 중심으로 분리되어 있음. 이 때문에 동일 개체의 유전체, 영상 · 생체정보, 사료 · 환경 · 질병 · 사양관리 및 도축자료가 하나의 산업 플랫폼에서 연결되지 못하고 있음.

– (기업 현황) 국내 민간기업은 종축 · 유전소재보다 센서, 환경제어, 자동급이, 생체정보 및 농장관리 솔루션 분야에 집중함.

– 원천기술과 유전자교정 동물 생산역량은 확보했으나 식용 가축의 안전성 평가 · 품종화 · 인허가 · 소비자 수용성 확보로 이어지는 산업화 체계는 아직 연구개발 단계임.

○ 양자컴퓨팅 기반 디지털육종 기술 구현

– (산업 기반) 국내 양자 생태계는 초기 단계이나, 세계적 수준의 종자 및 디지털 농업 수요와 결합할 경우 성장 잠재력이 큼.

– (인프라 현황) 농진청 슈퍼컴 2호기(2.9 PFLOPS, CPU 69,696코어, 372TB)를 기반으로 고추 · 콩 등 대용량 유전형 분석 성과를 창출하고 있음.

– (민간 참여) 국내 종자기업 · 디지털농업 스타트업이 양자 분석 모듈을 활용할 여지가 있으며, 민간 참여를 유도할 창구 마련이 필요함.

2 국내외 정책 동향

2.1 국외 정책 동향

○ AI · 디지털트윈 기반 가상육종 플랫폼

– 국외 정책은 개별 AI 모델 지원보다 공공 데이터 인프라, 개방형 육종도구, 다기관 실증망을 장기 프로그램으로 구축하는 방향임.

– EU는 7년 이상, 총 3억 유로규모의 ‘Agriculture of Data’ 파트너십을 출범하고 EU가 30%를 공동 부담. 별도로 농업데이터공간(CEADS)은 유럽 내 400개 이상 데이터 공유체계를 연결하는 분산형 구조로 설계했으며, 2026년 관련 추가 공모에 2,300만 유로를 배정. 데이터 소유권을 이전하지 않고도 AI 학습과 DSS 개발에 활용하는 데이터 주권형 정책임.

– 미국은 USDA-ARS의 ‘Breeding Insight’를 통해 9개 오픈소스 육종도구를 DeltaBreed

플랫폼으로 통합하고, 현재 31개 공공 작물 · 가축 육종 프로그램을 지원하며 최대 90종으로의 확장을 추진하고 있으며 2026년 AG2PI에도 약 183만 달러를 투입하여 유전체-표현체-환경 연구를 지원하는 등 민간 대기업보다 공공 · 소면적 작물 육종역량 강화에 정책 초점을 두고 있음.

- 일본은 2025년 추경으로 혁신품종 개발에 30억 1천만 엔을 편성하고, 이 중 6억 엔을 작물 공통 스마트육종 기반에 투입. 2026~2029년 동안 3개 이상 작물의 교배예측 도구, 4종 이상의 고속표현형 기술을 개발하고 3개 이상 공공시험장 · 기업에서 실증하여 품종개발 기간과 노동비용을 절반으로 줄이는 정량 목표를 설정함.
- 중국은 「제15차 5개년 농업 · 농촌 현대화 계획」에서 2030년까지 농업 과학기술 기여율 67%를 목표로 설정하고, 농업 대형모델 · AI 의사결정시스템과 분자육종을 미래산업으로 지정하는 국가계획 주도형 접근임.

○ 통합 오믹스 · AI 기반 가축 디지털육종 및 맞춤형 실증 플랫폼

- (미국) 미국은 USDA의 「Animal Genome Research Blueprint 2018-2027」을 중심으로 genome-to-phenome, 정밀육종, 질병저항성 및 환경적응 연구를 지원하고 있음. USDA 동물유전체 정책, FDA IGA 지침, PRRS 저항성 IGA 승인됨.
- (유럽연합) EU는 「Animal Breeding Regulation(EU 2016/1012)」으로 혈통등록, 능력검정, 유전평가, 육종기관 및 정액 · 수정란의 역내 거래기준을 통일함. 연구정책에서는 Horizon 2020 · Horizon Europe을 통해 EuroFAANG을 지원하고, 유전체-기능유전체-표현체를 연결하는 범유럽 연구인프라 구축됨.
- (캐나다) 캐나다는 국가 유전평가와 저탄소 정책을 연결하여 2023년 세계 최초로 젖소 Methane Efficiency 공식 육종가를 제공하기 시작함.
- (미국) FDA는 위험도가 낮은 유전자 교정 동물에 대해 '집행 유예' 조치로 사실상 사전 승인 없이 상업화 가능함.
- (브라질, 아르헨티나) 유전자 교정 가축에 외래 유전자가 남아있지 않다면 GMO 규제 대상에서 제외하고 일반 가축과 동일하게 취급함.
- (일본) 단순 '절단'하거나 자연적 돌연변이 수준으로 교정한 가축은 GMO 심사 대상에서 제외하며, 사전 신고 및 데이터 제출만으로 상업적 유통이 가능함.
- (EU) 염기 치환, DNA deletion 및 외래 유전자 삽입이 없을 때 GMO 규제 대상에서 대부분 제외함(2026년 7월).

○ 양자컴퓨팅 기반 디지털육종 기술 구현

- 주요국은 국가 전략과 대규모 투자를 통해 양자기술 주도권 확보 경쟁을 가속하고 있으며, 생명 · 농업 응용을 전략 분야로 포함하고 있음(표 13).

표 13. 주요국 양자기술 정책 · 투자 동향

국가/지역	정책·투자	특징
미국	국가양자이니셔티브(NQI) 재승인, DOE 양자리더십법(S.579, 2025)으로 FY26~30 25억 달러 규모 투자 추진	국립연구소 중심 생명·소재 응용 선도
중국	첨단기술 국가펀드 약 1조 위안(약 1,380억 달러, 2025, 양자 등 신흥기술 포괄), 양자정보 분야 대규모 투자(약 100억 달러 규모; 언론 추정)	농업 AI·양자 응용 국가 차원 병행 추진
유럽	EU Quantum Flagship €10억(2018~2028) 운영, 후속 양자 전략 추진	생명과학·환경 별도 트랙 운영
한국	제1차 양자과학기술·산업 종합계획(2035): 양자인력 1만 명·양자기업 2,000개·1,000큐빗 개발 목표	'26 IonQ 도입·50큐빗 국산 구축, 슈퍼컴 연계 하이브리드

2.2 국내 정책 동향

○ AI · 디지털트윈 기반 가상육종 플랫폼

– 「제3차 종자산업 육성 5개년 계획(2023~2027)」은 종자산업 전체에 1조 9,410억 원을 투자하고, 5대 전략 · 13개 과제와 58개 제도 · 예산사업을 추진하는 법정을 계획함. 디지털육종 상용화를 첫 번째 전략으로 배치하고, 융합인력 · 육종데이터 · K-Seed Valley를 핵심 인프라로 설정함.

– 농촌진흥청은 2023~2027년 '국가기반 육종 플랫폼 개발사업'을 통해 표현체 · 오믹스 중심 고품질 데이터, AI 예측모델, 데이터 연계 · 공유체계를 구축 중임. 제공 발표자료의 2027년 플랫폼 구축 방향도 이와 같은 공공 기반기술 확충 흐름임.

– 2026년 첨단정밀육종 R&D 예산은 64억 원에서 104억 원으로 증가했으며, 기업 대상 분석서비스 · 컨설팅에도 14억 원을 별도 편성함. 연구모델 개발에 머물던 정책이 기업의 실제 품종개발에 분석도구와 서비스를 제공하는 단계로 이동하는 흐름임.

○ 통합 오믹스 · AI 기반 가축 디지털육종 및 맞춤형 실증 플랫폼

– (국가 가축개량정책) 국내 가축개량은 「축산법」에 따른 국가 가축개량 총괄기관, 축종별 개량기관, 혈통 · 능력검정 및 정액공급체계를 중심으로 추진됨.

– (디지털 · R&D 정책) 「스마트농업 육성 및 지원에 관한 법률」은 스마트농업 기술개발, 데이터 활용, 서비스산업 육성과 인력양성의 법적 기반을 제공함.

– 국내에서는 유전자교정 (NGT) 가축에 대한 별도 규제체계가 마련되지 않아 기존 GMO 규제를 적용받는 경우가 많음.

– 「유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 법률(LMO법)」 개정이 추진되었으나 아직 개정되지 않음. 유전자교정 농축산물을 기존 GMO와 동일하게 규제함에 따라 연구개발과 산업화가 지연되고 있음.

○ 양자컴퓨팅 기반 디지털육종 기술 구현

- (양자 정책) 과기정통부 「제1차 양자과학기술 및 양자산업 육성 종합 계획」(2026.1.29)은 2035년 세계 1위 퀀텀칩 제조국 도약을 목표로 양자인력 1만 명,양자기업 2,000개 육성을 제시하며, 2026년 IonQ 양자컴퓨터 도입, 50큐빗 국산 확보 및 KISTI 슈퍼컴 연계 하이브리드 환경 구축을 추진함.
- (농업 정책 연계) 농진청 「농업 디지털전환 로드맵」, 「제5차 식량·농업 종합발전계획」과 디지털육종·슈퍼컴퓨팅 정책이 연계되어 있어, 양자 융합 R&D의 제도적 기반이 존재함.
- (과제) 다만 부처·기관 간 협업 및 농업 도메인 특화 양자 R&D는 미흡하여, 부처 공동기획을 통한 전략적 추진이 필요함.

Ⅴ. 결론 및 제언

1 주요 동향 및 시사점

○ AI · 디지털트윈 기반 가상육종 플랫폼 (그림 22)



그림 22. AI · 디지털트윈 기반 가상육종 플랫폼 추진 방향

– 개별 형질예측에서 유전체 · 표현체 · 환경정보를 결합한 가상교배 · 지역적응성 평가 · 시험설계 지원체계로 확장되는 흐름임. 모델 정확도보다 교배조합 압축, 조기선발 효율, 시험기간 · 비용 절감 등 실제 육종 의사결정 개선효과 중심의 평가가 필요함.

– 세계 상위 7개 종자기업의 작물개량 R&D 투자는 2021년 65억 달러를 넘어섰으며, 경쟁력이 알고리즘보다 유전자원 · 장기 육종데이터 · 다지역 시험망의 결합에서 형성되는 구조임. 국내도 단기 모델개발보다 작물별 장기 데이터와 현장 검증망 축적이 핵심 경쟁기반임.

– 2024년 종자 · 육묘산업은 9,719억 원 규모로 성장했으나, 종자업체의 92.3%가 판매액 5억 원 미만인 영세구조. 기업별 독자 플랫폼보다 공공 데이터 · 컴퓨팅 · 분석도구와 작물별 서비스를 공동활용하는 산업화 방식이 적합함.

– EU는 7년간 3억 유로 규모의 농업데이터 협력체계를 추진하고 있으며, 국내도 작물별 AI 예측기술을 공공 디지털육종 플랫폼으로 연계하는 단계임. 단발성 R&D를 넘어 데이터 표준화, 권리 · IP 관리, 현장실증 및 상시 운영조직을 포함한 장기 플랫폼 정책이 핵심임.

◘ AI · 디지털트윈 기반 가상육종 시스템 구축을 통해 단순 형질예측 기술이 아닌 **유전체 · 표현체 · 환경정보를 연계한 교배조합 최적화 · 지역적응성 평가 · 시험설계 지원의 공공 디지털육종 플랫폼**으로 고도화하고, 작물별 장기 육종데이터 · 현장 검증망 · 표준화 및 지식재산권 관리체계를 구축하여 소규모 종자기업도 공동 활용할 수 있는 지속가능한 산업 생태계 조성이 필요.

○ 통합 오믹스 · AI 기반 가축 디지털육종 및 맞춤형 실증 플랫폼

– AI · 멀티오믹스 (유전체 · 전사체 · 후성유전체 · 마이크로바이옴 등)와 디지털 표현형을 통합한 정밀 디지털육종 (Precision Digital Breeding)이 차세대 패러다임으로 자리잡고 있으며, 생성형 AI와 디지털트윈을 활용해 육종 기간 단축과 예측 정확도 고도화 필요함.

– 국내는 가축 개량에 필요한 데이터 · AI · 멀티오믹스 통합 플랫폼이 선도국 대비 미흡한 상황으로, 기후변화 · 질병 대응과 종축 경쟁력 확보를 위해 국가 차원의 통합 오믹스 · AI 기반 디지털육종 체계 구축이 시급함.

– 유전자교정 가축 전주기 관리 및 산업연계 체계 구축이 필요함(그림 23).



그림 23. 유전자교정 가축 전주기 관리 및 산업연계 체계

◘ 가축의 유전체 · 전사체 · 후성유전체 · 마이크로바이옴과 디지털 표현형을 통합하는 **AI · 멀티오믹스 기반 정밀 디지털육종 플랫폼**을 국가 단위로 구축하고, 생성형 AI · 디지털트윈을 활용한 기후변화 · 질병 대응형 개량과 유전자교정 가축의 전주기 안전관리 · 산업연계 체계를 함께 마련하여 종축 경쟁력 확보를 추진하여야 함.

○ 양자컴퓨팅 기반 디지털육종 기술 구현

– 양자컴퓨팅 기반 디지털육종은 고전 컴퓨팅의 본질적 난제(대규모 조합 최적화 · 분자 시뮬레이션)를 돌파하는 차세대 연산 패러다임으로, 육종연한 단축과 정밀도 향상을 통해 기후적응형 · 고품질 신품종 개발을 가속함.

– 현 단계는 NISQ · 하이브리드 중심의 초기 실증기이나, 결측 보정 · 교배조합 탐색 등 5년 내 가시적 효과가 가능한 모듈이 존재하여 조기 성과 창출이 가능함.

– 농업 양자 응용은 글로벌적으로도 초기 단계로, 지금이 선도그룹과 격차가 가장 작은 골든타임이며, 부처 협업 · 집중 투자시 단기 추격이 가능함.

– (전략적 의의) 농생명 양자 R&D는 기술적 성과에 그치지 않고, 국가 양자 인력 · 기업 · 인프라 생태계 축적과 국제 공동연구 참여를 통해 국내 연구역량과 국제 경쟁력 강화에 기여하는 전략적 의의를 가짐.

◘ 양자컴퓨팅 기반 디지털육종을 대규모 교배조합 최적화와 분자 시뮬레이션의 한계를 극복할 차세대 핵심기술로 육성하되, 단기적으로는 아직은 부족한 양자컴퓨터의 성능을 고려하여, 양자 · 하이브리드 환경에서 결측 보정 · 교배조합 탐색 등 실증 가능한 모듈부터 적용하고, 부처 협업과 국제 공동연구를 통해 양자 전문인력 · 기업 · 인프라를 갖춘 농생명 양자 생태계 구축을 추진하여야 함.

2 정책 및 R&D 전략

2.1 R&D 투자 방향

○ AI · 디지털 트윈 기반 가상육종 플랫폼

– R&D 목표는 개별 AI 모델이나 플랫폼 구축이 아니라, 양친선정-교배설계 -후대선발-지역적응시험의 의사결정을 실제로 개선하는 전주기 육종체계 확립이 필요함. 데이터 구축, AI 예측, 가상교배, 디지털트윈 및 현장검증을 분절된 과제가 아닌 하나의 장기 프로그램으로 연계되어야 함.

– 초기에는 모든 작물을 동시에 지원하기보다 데이터와 육종 기반이 확보된 3~5개 우선작물을 선정하고, 작물별로 양친 조합 추천, 내재해성 조기선발, 지역적응시험 배치 등 핵심 육종문제에 집중하는 플래그십 R&D를 추진함.

- 공통영역에서는 데이터 식별체계, 메타데이터, API, 계산환경 및 검증 도구를 구축하고, 작물별 영역에서는 생식방식 · 주요 형질 · 세대진전 · 재배환경을 반영한 예측모델과 가상교배 모듈을 개발하여야 함.
- 모든 작물에 단일 모델을 적용하기보다 공통 플랫폼과 작물별 특화모듈을 결합하는 구조가 적합함.
- 2026~2030년에는 기준데이터셋, 통계 · AI 예측모델, 가상교배 기능, 다지역 외부검증 및 육종가용 DSS를 확보하고, 2031~2035년에는 작물생육모형 · AI · 기후 시나리오를 결합한 G×E×P 디지털트윈과 지속학습형 DSS로 고도화 함.
- 투자와 평가는 알고리즘의 평균 정확도보다 다지역 · 다년도 데이터 축적, 신규 연도 · 지역 · 계통의 외부검증, 상위 후보 적중률, 교배 · 시험후보 압축률, 유전적 이득 및 육종기간 · 비용 절감효과를 중심으로 전환됨.

◘ AI · 디지털트윈 기반 가상육종 연구개발(R&D)는 개별형질을 예측하는 AI 모델 개발보다 **부모선정-교배설계-후대선발-지역시험 등 실제 육종 전 과정을 연계하는 의사결정체계 구축**에 집중하고, 우선작물 중심의 공통 플랫폼과 작물별 특화기능을 단계적으로 구축할 필요가 있음. 성과는 모델 예측 정확도보다 유망계통 선발, 품종개발 효율 향상, 육종기간 · 비용 절감 등 실제 육종성과로 평가해야 함.

○ 통합 오믹스 · AI 기반 가축 디지털육종 및 맞춤형 실증 플랫폼

- (투자원칙) 가축 디지털육종 R&D는 단기적인 AI 모델 개발보다 장기간 활용 가능한 국가 다차원 참조집단과 같은 고품질 데이터 생산과 연계하여 축산 디지털육종 대형 연구과제로 우선 투자가 필요함.
- (다차원 참조집단 구축) 참조집단은 시험축사 중심의 소규모 집단이 아니라 품종 · 혈통 · 지역 · 기후 · 축사 · 사료 및 관리수준이 다른 상업농가를 대표하도록 구성이 필요함.
- (단기 5년 투자방향) 2027~2031년에는 공통 개체 ID, 데이터사전, 온톨로지, 센서 교정, 결측 · 이상치 처리 및 농장-도축장 자료연계 기준을 먼저 확립해야 함.
- (후속 5년 투자방향) 2032~2036년에는 축적된 자료를 이용하여 팬지놈, 구조변이 기반 GEBV, 기능유전체 기반 원인변이, 숙주 유전체-마이크로바이옴 예측, 농장별 G×E×M 및 생애 산업가치 모형을 개발함.
- 정밀 육종을 위한 표적 유전체 정밀 교정 기술 (NGT), 스마트 축산과 빅데이터 및 AI 기반의 축산 모니터링 시스템 연계 등 통합적 대형 가축 정밀 육종 연구기획과제를 추진함.
- 테스트베드 (Test-bed) 구축 및 현장 실증 전략 필요함: 유전자교정 계통 유지, 보존, 경제형질 검증, 세대별 안정성 검증 등을 위한 국가 유전자교정 유전자원센터 구축을 통한 국가적 관리 · 보급 체계를 마련함.

– 단기 · 분절형 과제 중심의 한계를 극복하고 유전자교정 가축 구축 · 기술 개발 · AI 모델 확립 · 농가 실증 및 산업화로 이어지는 장기적인 예산지원이 필요함.

○ 양자컴퓨팅 기반 디지털육종 기술 구현

– (부처 협업 R&D 신설) 농진청–과기정통부 공동기획 「농생명 양자컴퓨팅 융합기술개발사업」(가칭) 등을 신설하여, 양자 인프라(과학기술정통부)와 농업 데이터 · 도메인 지식(농촌진흥청)을 결합함.

– (선도 모듈 우선 투자) 5년 내 효과 가시화가 가능한 영역에 우선 집중하여 실증 사례를 조기 확보하고, 후속 예산의 정당성을 강화함.

– (인프라 단계적 확보) ①단기(~2028) 농진청 슈퍼컴 3호기 + 국가 양자 클라우드 연계 ②중기(2029~2031) 농생명 전용 양자–고전 하이브리드 분석 플랫폼 구축 ③장기(2032~) 농업 특화 양자컴퓨터 구축 및 자원 공동활용 체계를 마련함.

농촌진흥청 단독, 또는 과학기술정보통신부와 공동의 **농생명 양자컴퓨팅 융합 R&D 사업**을 신설하여 농업 데이터 · 도메인 지식과 국가 양자 인프라를 결합하고, 단기 실증 가능한 선도 모듈부터 투자할 필요. 초고성능컴퓨팅–양자 클라우드 연계에서 양자 · 고전 하이브리드 플랫폼, 농업 특화 양자컴퓨터로 이어지는 단계적 인프라 구축을 추진해야 함.

2.2 기술 확산 및 산업화 전략

○ AI · 디지털 트윈 기반 가상육종 플랫폼

– 산업화는 공공부문이 데이터 표준, 기준데이터셋, 베이스라인 모델, 계산환경 및 공동시험망을 제공하고, 민간은 자체 유전자원과 시장정보를 활용해 작물별 모델과 육종서비스를 개발하는 공공 공통기반–민간 특화서비스 구조로 추진함.

– 기업과 공공 육종기관의 실제 업무에 플랫폼을 적용하여 모델 추천, 육종가의 선택 및 포장시험 결과를 최소 2~3개 작기 또는 연도에 걸쳐 비교하는 장기 공동실증 추진. 연구자용 분석도구보다 실제 교배계획과 선발업무에 직접 활용되는 서비스 중심의 확산이 필요함.

– 자체 AI 인력과 컴퓨팅 기반이 부족한 중소 종자기업에는 유전체 분석, 표현형 정량화, 가상교배 및 지역적응성 예측을 묶은 공동활용 서비스와 분석바우처 · 공동시험 · 전문가 컨설팅을 제공함.

– 민간 데이터 참여를 확대하기 위해 데이터의 양 · 품질 · 희소성 및 활용실적을 기여도로 기록하고, 고급 분석, 계산자원, 공동시험 및 우선 서비스로 보상. 원자료의 일괄 공개 대신 권한등급, 안전한 분석공간, 연합학습 및 결과반출 통제를 적용하여 영업비밀과 지식재산을 보호함.

– 육종가용 DSS는 추천 부모조합, 예상 후대분포, 후보 계통, 시험지역, 예측 불확실성과 대안 조합을 한 화면에서 비교하도록 구성. 외부 분석도구와 민간 서비스를 연결할 수 있는 모듈 · API 기반 개방형 구조를 통해 전문서비스 생태계와 해외 공동육종으로 확장함.

➡ 가상육종 플랫폼은 공공이 데이터 표준 · 검증용 데이터 · 계산환경 · 공동시험망을 제공하고, 민간이 유전자원과 시장수요를 반영한 **작물별 육종서비스를 개발하는 방식**으로 산업화할 필요가 있음. 중소 종자기업에는 유전체 분석 · 가상교배 · 지역적응성 예측을 통합 지원하고, 민간 데이터는 안전하게 보호하면서 활용에 따른 혜택을 제공하며, 실제 교배 · 선발 업무에 적용하는 장기 공동실증을 추진해야 함.

○ 통합 오믹스 · AI 기반 가축 디지털육종 및 맞춤형 실증 플랫폼

– (산업생태계 조성) R&D 사업에 기술개발뿐 아니라 가축유전육종 전문기업, AI 스타트업, 디지털표현체 기업 및 농장서비스 기업의 창업 · 성장을 지원하는 별도의 산업화 프로그램 포함 필요함.

– (국가개량체계의 단계적 민간 참여 확대) 국가개량체계의 민간 이양은 공식 유전평가 권한이나 국가 유전자원을 매각하는 방식이 아니라, 산업화 가능한 사업수행 · 현장서비스 영역을 경쟁적으로 개방하는 방식으로 추진함.

– 가축의 경우 세대 교체 주기 (번식 및 성장)가 작물보다 훨씬 길어 연구실 단계의 혁신 기술을 실제 농가 보급형 품종으로 전환하는 데 천문학적인 비용과 시간이 소요되어 데스밸리를 극복하기 어려워 이에 대한 국가 차원에서의 생산 · 관리 · 운영 또는 국가적 지원 필요함.

– 특허 및 지식재산권 비용: 크리스퍼(CRISPR) 유전자가위 원천특허를 보유한 글로벌 기업들과의 특허권 분쟁 가능성이나 고액의 라이선스 비용 (로열티) 지불 문제는 중소 육종 기업과 농가의 진입 장벽이 될 수 있어 국가적 차원에서 전략적 정책 필요함.

– 국내 고유 유전자원 가축에 대한 기술 적용 및 신품종 개발로 K-Science 연계 토종 유전자원에 대한 수출 경제력 강화됨.

➡ 가축 디지털육종의 산업화는 유전육종 · AI · 디지털표현체 통합 체계 구축을 농해 농장서비스 기업의 창업과 성장을 지원하고, 국가개량체계는 공공성은 유지하되 현장서비스 · 사업수행 영역을 단계적으로 개방하는 방식으로 추진할 필요. 장기간 · 고비용의 품종화 과정과 유전자교정 특허 · 로열티 장벽은 국가 지원으로 완화하고, 국내 고유 가축유전자원을 활용한 신품종 개발과 수출산업화로 연계해야 함.

○ 양자컴퓨팅 기반 디지털육종 기술 구현

– (실증 · 현장 확산) 육종가가 체감할 수 있는 활용사례를 조기 확보하고, 검증된 모듈을 현장 육종 파이프라인에 단계적으로 이식함.

– (비즈니스 모델) 농생명 양자분석 서비스 형태의 민간 활용 창구를 마련하고, 종자 · 디지털농업 기업 대상 양자 분석 모듈 활용 R&D 매칭펀드를 운영함.

◘ 육종가가 체감할 수 있는 양자컴퓨팅 활용사례를 조기에 실증하고, 검증된 분석 모듈을 현장 육종 파이프라인에 단계적으로 적용할 필요. 민간에서는 **농생명 양자분석 서비스**와 종자 · 디지털농업 기업 대상 R&D 매칭펀드를 통해 기술 활용과 사업화를 촉진해야 함.

2.3 기반 구축 및 제도 개선

○ AI · 디지털 트윈 기반 가상육종 플랫폼

– 기존 데이터베이스를 대체하는 거대 통합시스템보다 유전자원 · 유전체 · 표현체 · 환경 · 교배 · 시험정보를 공통 식별자와 API로 연결하는 국가 디지털육종 데이터 스파인구축. 형질명, 조사방법, 단위, 재배조건, 품질등급 및 데이터 계보를 관리하고 국제표준과 호환되는 국내 공통 프로파일을 마련함.

– 데이터는 공개 · 승인 · 보호 · 공동실증 자료로 등급화하고, 원자료 소유권, 모델 학습권, 파생성과, 공개범위 및 보관조건을 표준계약으로 규정. 공공성과 개방성뿐 아니라 민간 유전자원, 품종보호권 및 영업비밀을 함께 고려하는 이용체계를 정립함.

– 공공 R&D로 개발된 모델에는 학습데이터, 적용 작물 · 형질 · 환경, 외부검증 결과와 한계를 기록한 모델카드를 적용하고, 예측 신뢰구간 · 적용범위 · 성능저하 · 변경이력을 관리. 주요 육종 의사결정은 모델 자동판단이 아닌 육종가의 최종 승인을 거치는 원칙을 적용함.

– 과제 종료 후에도 데이터와 모델을 갱신할 수 있도록 상시 운영기관과 유지관리 예산을 확보하고, 작물별 기술위원회 및 데이터 · 모델 검증체계 운영. 공공시험장 · 대학 · 민간포장을 연결한 다지역 실증망과 데이터 큐레이터, 표현형 전문가, MLOps · BreedingOps 인력의 상시 배치가 필요함.

– 정책성과는 데이터 건수나 개발 모델 수가 아니라 실제 육종프로그램 적용 수, 기업의 반복 이용률, 외부검증 통과율, 교배 · 시험후보 압축률, 품종개발 기간 · 비용 변화 및 민간 확산 실적을 기준으로 평가. 플랫폼 구축 여부보다 육종 의사결정의 정확성 · 속도 · 효율 개선을 최종 성과로 설정함.

◘ 국가 디지털육종 기반은 분산된 유전자원 · 유전체 · 표현체 · 환경 · 시험정보를 표준화하여 서로 연계 · 활용할 수 있도록 구축하고, 국제표준과 호환되는 데이터 관리 및 모델의 권리 · 검증 · 책임체계를 함께 마련해야 함. 상시 운영기관 · 유지관리 예산 · 다지역 실증망 · 전문인력을 확보하여 플랫폼을 지속 고도화하고, 성과는 데이터 · 모델 수보다 실제 육종의 정확성 · 속도 · 비용 개선과 민간 활용도로 평가할 필요가 있음.

○ 통합 오믹스 · AI 기반 가축 디지털육종 및 맞춤형 실증 플랫폼

- (국가 데이터 · 인프라 구축) 국가는 개별 플랫폼 개발보다 모든 민간 · 공공 서비스가 공동 활용할 수 있는 기반 구축이 필요함.
- 핵심 인프라는 국가 다차원 참조집단, 공통 개체 ID, 축종별 데이터 표준, 안전한 분석공간, 바이오뱅크, 센서 교정 · 인증시설, 다지역 실증농장 및 농장-도축-유통자료 환류 체계 구축임.
- (데이터 거버넌스) 농가, 종축기관, 센서기업, 분석기업 및 공공기관 사이의 데이터 소유권 · 이용권 · 수익배분을 표준계약으로 명확히 해야 함.
- (전문인력 양성) 유전육종, 축산, 수의학, 생물정보학, AI 및 경제 · 탄소평가를 함께 이해하는 융합인력이 부족하므로 대학원 교육과 현장교육을 연계하는 것이 필요함.
- 유전자교정 맞춤형 가축 생산 및 검증 · 평가를 위한 실증 플랫폼을 위한 기반 구축이 필요함.
- 장기 검증 체계 부족: 여러 세대에 걸친 유전적 안정성, 식품 안전성 및 생산성 검증 데이터 확보를 위한 국가단위의 “유전자교정 맞춤형 가축 생산 · 검증 · 평가 센터” 구축이 필요함.
- 유전자교정 맞춤형 가축에 대한 제도 개선 절실
- 불명확한 규제체계: 국내에서는 유전자교정 (NGT) 가축에 대한 별도 규제체계가 마련되지 않아 기존 GMO 규제를 적용받는 경우가 많음.
- LMO법 개정 지연: 「유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 법률(LMO법)」 개정이 추진되었으나 아직 개정되지 않음. 유전자교정 농축산물을 기존 GMO와 동일하게 규제함에 따라 연구개발과 산업화가 지연되고 있음.
- 안전성 평가 기준 부족: 유전자교정 가축에 특화된 위해성 평가, 환경영향 평가 및 식품 안전성 기준이 미흡함.
- 사회적 수용성 부족: 소비자 인식 부족과 GMO에 대한 부정적 인식과 GMO와 다른 GE에 대한 사회적 인지가 부족함.

◘ 가축 디지털육종을 위한 기반은 참조집단 구축 · 축종별 데이터 표준화 · 바이오뱅크 · 안전한 분석공간 · 다지역 실증농장을 민관 공동 기반으로 구축하고, 데이터 권리 · 수익배분은 표준계약으로 명확히 하는 데서 출발해야 함. 아울러 유전자교정 가축의 생산 · 능력 검증을 위한 국가 실증센터를 마련하고, 안전성 평가기준 · LMO법 등 규제체계 정비와 사회적 수용성 제고를 병행할 필요가 있음.

○ 양자컴퓨팅 기반 디지털육종 기술 구현

- (데이터 · 표준) 농생명 양자분석 결과의 신뢰성 · 재현성 검증 표준, 양자내성 암호 기반 데이터 보호 가이드라인, 글로벌 양자 클라우드 활용 시 데이터 반출 규제의 농업 분야 특례를 검토함.
- (인력 양성) 정보학(양자컴퓨팅 · HPC)과 육종학 · 식물생리학 · 분자생물학의 융합 교육을 강화하고, 학회 · 연구회 · 워크숍 등 다양한 인력양성 기회를 마련하여 제공함.

– (국제협력) IBM · D-Wave 등 글로벌 양자 생태계와의 협업 채널을 공식화하고, EU Quantum Flagship · USDA · CGIAR 산하 국제농업연구센터와의 양자 농업 공동연구를 추진함.

양자컴퓨팅 기반 디지털육종의 확산을 위해 분석 결과의 **신뢰성 · 재현성 검증 표준**과 양자내성 암호 기반 데이터 보호 · 국외 반출 가이드라인을 마련하고, 양자 · 초고성능컴퓨터와 육종 · 생명과학을 아우르는 융합인력을 양성할 필요. 글로벌 양자기업 및 국제 농업연구기관과의 공식 협력체계를 구축하여 공동연구와 기술표준 선점을 추진해야 함.

참고문헌

○ 과학기술정보통신부. (2026). 제1차 양자과학기술 및 양자산업 육성 종합계획
○ 농림축산식품부. (2023). 제3차 농업생명자원 관리 · 이용 종합계획(2023~2027)
○ 농림축산식품부. (2023). 제3차 종자산업 육성 종합계획(2023~2027)
○ 농림축산식품부. (2026). 농식품부, AX 전환 · 그린바이오 산업 육성을 위해 2026년도 R&D 456억 원 신규 과제 지원. 보도자료
○ 농림축산식품부 · 국립종자원. (2023). 2022년 종자산업 현황조사: 종자업 · 육묘업
○ 농림축산식품부 · 국립종자원. (2025). 2024년 종자산업 현황조사: 종자업 · 육묘업
○ 농촌진흥청. (2023). 농업 디지털전환 로드맵 및 중점 추진계획
○ 농촌진흥청. (2023). 농촌진흥청, '디지털 육종' 기반 기술 개발 나선다. 보도자료
○ 농촌진흥청. (2024). 농업 R&D 중장기 추진 방향
○ 농촌진흥청. (2026). 양자컴퓨팅 기반 결측 유전형 대치기술(QuImputer) 개발 · 특허 출원. 보도자료
○ 한국농업기술진흥원. (2025). 농진원, 디지털육종 활성화를 위한 워크숍 성료. 보도자료
○ KISTEP. (2025). 2025 KISTEP 10대 미래유망기술
○ 팜한농. (2024). 팜한농, 국립농업과학원과 공동 연구 협약. 보도자료
○ Bayer AG. (2026). Annual Report 2025
○ Bayer AG. (2026). How AI is Reshaping Agricultural Innovation
○ Cleveland Clinic, RIKEN & IBM. (2026). Quantum-centric supercomputing simulates a 12,635-atom protein complex (T4-Lysozyme · Trypsin)
○ Corteva Agriscience. (2023). How AI Is Used in Agriculture
○ Corteva, Inc. (2026). Annual Report 2025
○ European Commission. (2024). Blueprint Proposal for the Common European Agricultural Data Space

○ European Commission. (2025). Launching of the European Partnership Agriculture of Data
○ European Commission. Quantum Technologies Flagship (2018-2028)
○ FAO. (2022). The Future of Food and Agriculture
○ FAO. (2024). The State of Food and Agriculture
○ Fujitsu. (2022). Bayer Crop Science Customer Story: Digital Annealer-Based Seed Production and Material Planning Optimization
○ Fuglie, K. (2023). Crop Research and Development Spending Tracks Sales Revenue by Major Seed Companies. USDA Economic Research Service
○ Grand View Research. (2025). Precision Farming Market Size & Share Report to 2030
○ Inari. (2025). Inari Raises $144 Million, Paving Path to Long-Term Growth
○ International Seed Federation. (2026). International Seed Trade: A Pillar of Global Food Security
○ KeyGene. Genomic Breeding Tools; CropPedia Data Visualisation & Management
○ MacDonald, J. M., Dong, X., & Fuglie, K. O. (2023). Concentration and Competition in U.S. Agribusiness. USDA Economic Research Service, Economic Information Bulletin No. 256
○ MarketsandMarkets. (2025). Quantum Computing Market: Global Forecast to 2030
○ McKinsey & Company. (2025). The Quantum Revolution in Pharma: Faster, Smarter, and More Precise
○ Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries of Japan. (2025). 令和7年度農林水産関係補正予算の概要; 生産性の抜本的な向上を加速化する革新的新品種開発
○ National Agriculture and Food Research Organization (NARO). (2026). 新品種開発の交配親選定をデータで効率化する「育種支援システム」
○ People's Republic of China, State Council. (2026). 加快农业农村现代化"十五五"规划
○ ResearchAndMarkets. (2025). Digital Agriculture Market: Forecasts from 2025 to 2030
○ Syngenta. (2026). Syngenta Deepens Research Capabilities with QuantumBasel Partnership
○ The Quantum Insider. (2025). China Launches $138 Billion Government-Backed Venture Fund, Includes Quantum Startups
○ U.S. Congress. (2025). Department of Energy Quantum Leadership Act of 2025 (S.579); National Quantum Initiative Reauthorization
○ U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service. (2025). Breeding Insight

4. Research Project No. 8062-21000-052-020-A

○ USDA-ARS SCINet. Ceres High-Performance Computing System

○ Yazhouwan National Laboratory et al. (2024-2025). Fengdeng (SeedLLM) Agricultural Large Language Model

○ Park, T. S. (2023). Gene-editing Techniques and Their Applications in Livestock and Beyond. Animal Bioscience, 36(2), 333-338

○ Pylianidis, C., Osinga, S., & Athanasiadis, I. N. (2022). Digital Twins in Agriculture: A State-of-the-art Review. Smart Agricultural Technology, 3, 100111

5. 마이크로바이옴

미생물 빅데이터와 AI 활용 맞춤형 농생명 마이크로바이옴 설계 기술

오창식(한국식물병리학회, 서울대학교) / **전준현**(한국식물병리학회, 영남대학교) / **김영훈**(한국축산학회, 서울대학교) / **최기혁**(한국식물병리학회, 동아대학교) / **김준모**(한국동물유전육종학회, 중앙대학교)

Ⅰ. 서론

1 기술분야 개요



그림 1. 마이크로바이옴 기술 개요

○ 농생명 마이크로바이옴 기술은 식물 · 동물 · 토양 · 식품 등 농업 생태계에 서식하는 미생물 군집과 그 유전 · 기능 정보 전체를 멀티오믹스, 인공지능, 정밀발효, 바이오 파운드리 기술과 결합하여 식물과 동물의 생산성 · 건강성 · 환경적응성을 정밀하게 진단 · 설계 · 조절하는 차세대 그린바이오 융합 기술임(그림 1).

○ 2014년 세계경제포럼이 세계 10대 유망기술로 선정한 이래, 보건의료를 넘어 농업 · 축산 · 식품 · 환경 전 영역으로 활용 영역이 급속히 확장되고 있으며, 우리나라도 「제3차 생명공학육성 기본계획(2017)」에서 미래 유망기술 분야로 채택한 국가 전략 기술임.

○ AI 에이전트 기반 맞춤형 인공마이크로바이옴 설계 기술은 AI 에이전트가 멀티오믹스 빅데이터와 환경 변수를 스스로 학습하여 최적의 인공 미생물 군집(SynCom)을 설계하고, 바이오 파운드리와 연동해 인간의 개입 없이 자율적으로 실험과 검증을 반복 수행하는 연구 가속화 플랫폼 기술임(그림 2).



그림 2. AI 활용 맞춤형 마이크로바이옴 설계 기술 구조

2 기술 도입 배경

2.1 농업환경 변화

○ 지속 가능 농업 달성 위협

- 지속가능한 농업과 생태계 보존이 전 지구적 과제로 부상하면서, 기존 화학농약과 비료 중심의 집약농업은 근본적 한계에 직면
- 화학자재의 사용은 단기적 생산성 향상에는 기여하였으나, 장기적으로는 토양 생태계 파괴, 생물다양성 감소, 항생제 내성균 출현, 온실가스 배출 증가 등 심각한 부작용을 초래
- 축산업에서 사료내 항생제 사용 금지에 따라 친환경 항생제 대체소재에 대한 수요가 꾸준히 증가하고 있으며 이들을 활용한 동물용 사료 첨가제 · 생균제 시장이 꾸준히 성장 중
- 기후변화로 인한 폭염 · 가뭄 · 집중호우 · 이상저온 등 극단 기후가 일상화되면서, 단일 작기 내 생물적 · 비생물적 스트레스가 동시 발생하는 '복합 스트레스' 상황이 빈번해지고 있으며, 기존의 사후 대응형 방제 · 관수 · 시비 방식으로는 작물 수확량 손실을 막기 어려운 상황으로 전환
- EU 'Farm to Fork' 전략(2030년까지 화학농약 50% · 비료 20% 감축 의무화) 등 글로벌 규제 강화로 화학 투입재 중심 농업의 시장 진입 장벽이 빠르게 상승하고 있으며, 국내 단위면적당 농약 · 비료 사용량은 OECD 상위권 수준으로 수계 오염 · 비표적 생물 피해 · 토양 미생물 다양성 저하가 누적되어 작물 생산기반 자체가 위협받는 상황

○ 저탄소 농축산 전환 필요성

- 국내 농축산업은 탄소중립, 환경규제 강화, 항생제 사용 저감, 악취 민원, 분뇨처리 부담, 생산비 상승 등 복합적인 전환 압력에 직면하고 있어, 생산성을 유지하면서 환경부하를 낮출 수 있는 생물학적 기반 기술 확보가 필요함
- 우리나라는 2050 탄소중립 시나리오에서 농업 부문의 온실가스 감축 목표를 설정하였으며, 이를 위해서는 화학비료 사용 감축, 토양 탄소 저장 능력 향상, 축산 부문 메탄 배출 저감이 핵심 전략으로 요구
- 농업 부문은 전 세계 아산화질소 배출의 약 60%를 차지하며, 이는 이산화탄소보다 300배 이상 강력한 온실효과 유발. 또한, 메탄가스는 이산화탄소와 비교하여 28배 이상의 높은 지구온난화지수(GWP, global warming potential)를 가지고 있어 가축 유래의 메탄생성은 중요한 환경부담물질로 인식
- 축산 분야에서는 항생제 대체 사료첨가제, 생균제 및 postbiotic 소재에 대한 산업적 수요가 확대되고 있으며, 가축의 장내 발효와 분뇨처리 과정에서 발생하는 온실가스 저감이 저탄소 축산 전환의 핵심 과제로 부상함

– 마이크로바이옴 기반 기술은 토양 건강성 회복, 화학 비료 · 농약 사용 저감, 가축 장건강 개선, 항생제 대체 소재 개발, 반추위 메탄 저감, 분뇨 및 악취 저감과 연결될 수 있어 저탄소 농축산 전환을 지원하는 핵심 기반 기술로 주목됨

2.2 기술의 필요성 및 기대효과

○ 마이크로바이옴 연구 필요성

– 마이크로바이옴 활용 기술은 환경 보전, 탄소중립 실현, 식량안보 강화, 농가 소득 증대라는 다층적 목표를 동시에 달성할 수 있는 핵심 전략이고, 특히 고부가가치 활성물질의 증대는 농산물의 기능성을 높여 국내 농업의 경쟁력을 강화하고, 바이오산업과의 융합을 통한 신산업 창출에도 기여할 것으로 기대(그림 3)

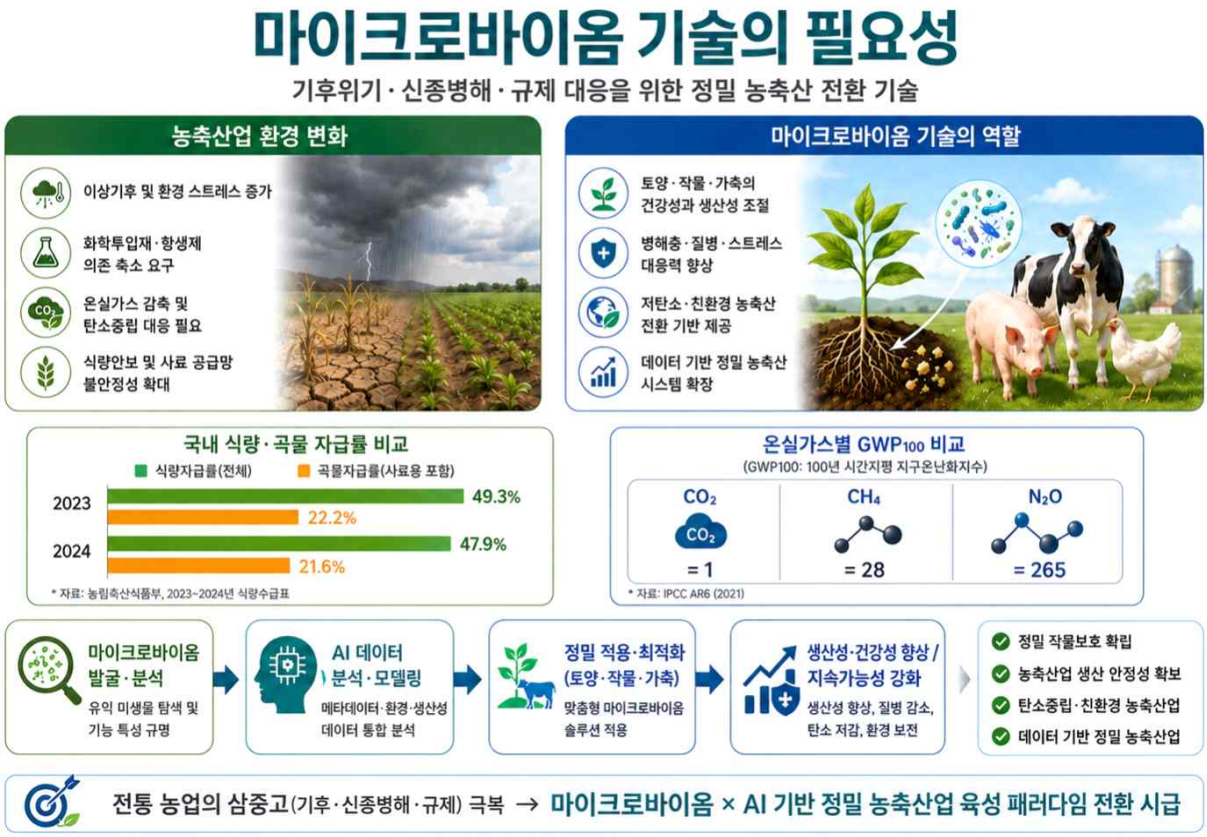


그림 3. 농축산업 환경변화와 마이크로바이옴 기술의 필요성과 역할

– 종자를 매개로 한 마이크로바이옴 수직 전이는 '제2의 유전체' 개념으로 인식되면서, 종자 코팅 · 바이오프라이밍 제형화를 통해 파종 시점부터 작물 스트레스 내성 형질을 안정적으로 부여하는 사전 예방형 농업 기술로 부상하고 있으며, 드론 · 자율 로봇 살포와 연계 시 농가 노동력 부담 경감 및 처방 정밀도의 지속 고도화 가능

- 토양 속 불용성 인산 가용화 및 셀레늄(Se) · 아연(Zn) · 철(Fe) 등 미량원소의 작물 흡수 · 축적을 촉진하는 기능성 미생물 군집의 활용을 통해, 단순 스트레스 저감을 넘어 미량원소 강화 농산물(biofortified crops)의 생산이 가능해지며, 이는 국민 영양 불균형 해소와 메디푸드 · 기능성식품 산업과의 융합을 통한 농가 소득 다각화 및 고부가가치 신시장 창출 기반 제공
- 국제적으로도 지속가능한 토양 관리는 유엔 지속가능발전목표의 핵심 과제로 설정되어 있으며, 선진국들은 토양 마이크로바이옴 연구에 대규모 투자를 진행
- 축산 분야에서는 사료비 부담, 온실가스 배출, 악취 · 미세먼지 문제, 동물복지 요구 증가 등 생산성 ·환경성 · 복지성을 함께 고려해야 하는 전환 압력이 확대되고 있음. 이에 따라 마이크로바이옴 기반 대체사료원료, 생균제, postbiotic 소재 등을 활용한 사료효율 개선과 생산비 절감, 장내발효 및 분뇨처리 과정의 메탄 · 아산화질소 저감, 장–뇌 축 기반 스트레스 완화 등 저탄소 · 고복지 축산 기술 개발이 필요함

○ 국내 마이크로바이옴 연구 필요성

- 다양한 현안 해결 · 대응을 위한 농생명 마이크로바이옴 기술의 중요성은 확대되고 있으나, 마이크로바이옴 관련 체계적 · 장기적인 연구는 미흡. 또한, 국내 화학 비료 · 농약 등의 절대 사용량이 많아 환경오염, 안전성, 항생제 내성 등의 농업의 지속성이 저해
- 해외 주요국들은 지속 가능한 농업을 위한 화학 농자재 사용을 감축하고자 미생물 등을 활용한 친환경제제 개발에 집중 투자. 또한, 글로벌 농업 강국들이 자국 농토 환경에 최적화된 마이크로바이옴 데이터를 독점하고 있는 상황에서, 한국의 기후와 토양 특성을 반영한 고유 데이터 확보와 AI 기반의 정밀 처방 알고리즘 독자 개발이 필수적
- 국내 연구 현장은 여전히 인간의 숙련도와 수동 스크리닝에 의존하고 있어, 복잡한 다중 오믹스 분석과 미생물 상호작용을 처리하는 데 속도와 효율성의 한계가 명확하며, 이를 극복하기 위해 바이오 파운드리와 연동된 AI 에이전트 기반 자율 연구 시스템의 도입이 시급
- 국내 주요 작물(벼 · 콩 · 고추 · 토마토 · 과수 등) 별 스트레스 진단 마커와 종자전이 핵심 미생물 라이브러리가 표준화 · DB화되어 있지 않아, 작물 품종 · 생육 단계별 맞춤형 처방을 위한 한국형 작물 마이크로바이옴 표준 모델 확립이 시급
- 마이크로바이옴 기반 미생물 공생화 축산 시스템은 가축과 유용 미생물 간 상호작용을 활용하여 항생제 사용 저감, 생산성 · 강건성 향상, 동물복지 증진, 환경부담 저감을 동시에 지원할 수 있는 지속가능한 축산 전략임
- EU의 엄격한 기능 중심 규제 프레임워크 도입에 선제적으로 대응하여, 우리나라도 '살아있는 미생물 복합 군집'에 대한 신속한 인허가 및 등록 체계를 마련하고, 탄소 격리 능력을 객관적으로 증명하는 MRV 기술을 내재화하여 국내 그린바이오 기업의 글로벌 시장 진출 가속화 지원이 필요

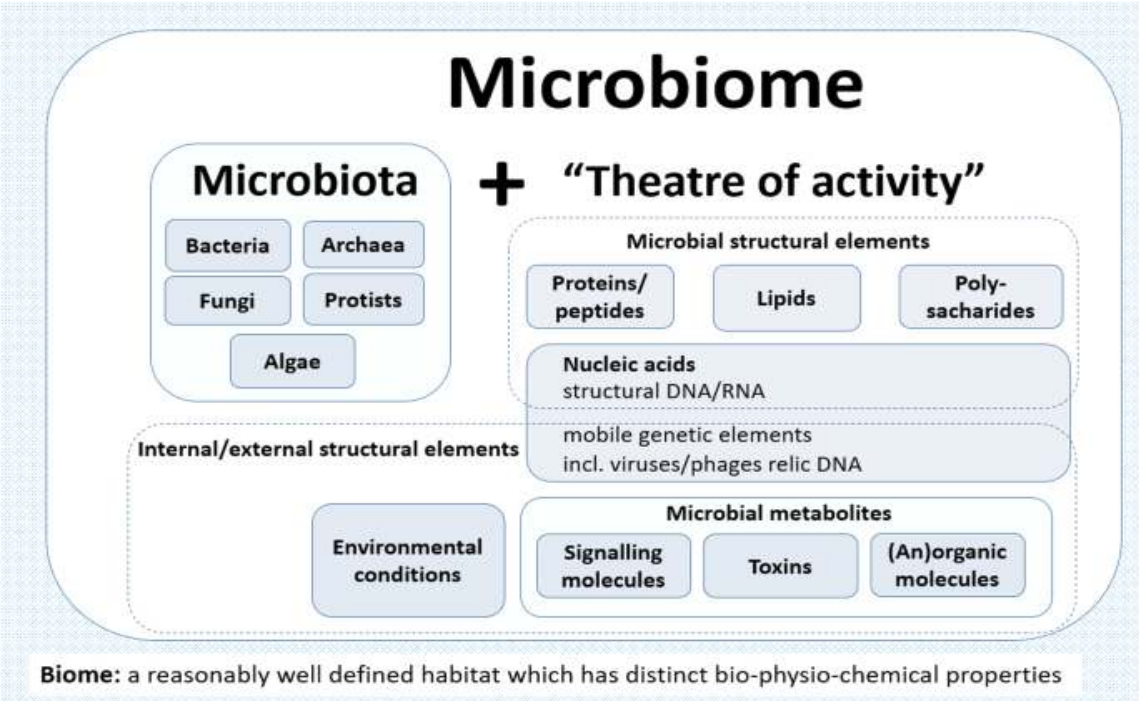
○ AI 기반 설계기술 도입 필요성

- 마이크로바이옴은 수많은 미생물, 기능유전자, 대사산물, 숙주 반응, 환경조건이 동시에 작용하는 고차원 생물학적 시스템이므로, 기존의 단일 균주 선발 또는 단순 상관분석만으로는 기능 예측과 현장 적용에 한계가 있음
- 작물–미생물–토양 간의 방대한 멀티오믹스 상호작용 데이터를 인간 과학자의 직관만으로 분석하여 최적의 솔루션을 설계하는 것의 물리적 한계
- AI 기반 예측 및 시뮬레이션 기술은 다양한 미생물 조합의 기능성, 안정성, 상호작용을 사전에 평가하여 후보군 선별과 검증 효율을 높일 수 있으며, 산업동물의 생산성 · 강건성 향상 및 반려동물 맞춤 관리 서비스로 확장 가능함
- AI 기반 분석은 수백~수천 개의 후보 미생물 조합과 개입조건을 가상으로 탐색하고, 기능성, 안정성, 대사 보완성, 숙주 반응, 환경 적합성을 함께 고려하여 우선순위가 높은 후보군을 제안할 수 있음
- 이를 통해 후보 미생물군 선별, SynCom 설계, 사료 · 토양 개입조건 제안, 실험 우선순위 설정, 결과 재학습이 가능해지며, 기존의 시행착오 중심 미생물제 개발 과정을 데이터 기반 설계 방식으로 전환할 수 있음

Ⅱ. 기술 분야 구조 및 범위

1 기술 분야 정의

○ 마이크로바이옴은 인간, 동 · 식물, 토양, 바다, 호수, 암벽, 대기 등 모든 환경에서 서식하거나 공존하는 미생물과 그 유전정보 전체를 포함하는 미생물 군집(그림 4)



※ 마이크로바이옴(Microbiome)은 미생물군집(microbiota)과 유전체(genome)의 합성어
출처: 서울대학교 2023년도 농생명 마이크로바이옴 혁신기술개발사업 공동기획 연구보고서

그림 4. 마이크로바이옴 정의

– 주어진 환경에 서식하거나 또는 다른 생물과 공존하는 모든 미생물의 총체적인 유전정보 또는 '미생물군 자체'를 의미

– 마이크로바이옴은 기존의 개별 미생물 분석 연구에서 벗어나 기주 생물(인체, 동·식물 등)과 미생물 간의 상호작용을 유전체학에 기반한 연구 및 기술을 의미

○ 농생명 마이크로바이옴은 식물과 동물, 토양에 서식하는 미생물 군집으로, 식물의 생장 · 면역 · 환경 적응성과 동물의 생산성 · 질병 저항성 · 복지에 영향을 미치는 농축산 생태계의 핵심 구성요소임(그림 5).



출처: 서울대학교 2023년도 농생명 마이크로바이옴 혁신기술개발사업 공동기획 연구보고서] .

그림 5. 농생명 마이크로바이옴 정의,

○ AI 에이전트 기반 맞춤형 인공마이크로바이옴 설계 기술은 AI 에이전트가 멀티오믹스 빅데이터와 환경 변수를 스스로 학습하여 최적의 인공 미생물 군집(SynCom)을 설계하고, 바이오 파운드리와 연동해 인간의 개입 없이 자율적으로 실험과 검증을 반복 수행하는 연구 가속화 플랫폼 기술임(그림 6)

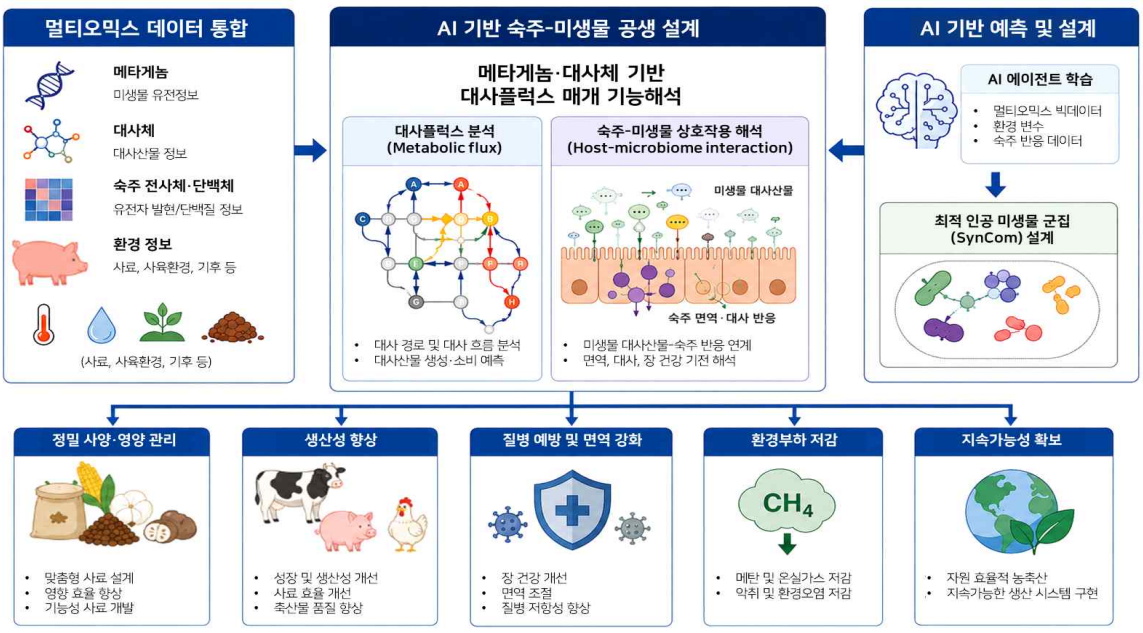


그림 6. AI 기반 숙주–미생물 공생 설계 모식도

2 주요 구성 기술

○ 농생명 마이크로바이옴 중 식물 · 동물마이크로바이옴 기술 정의 및 요소기술은 아래 표 1과 같음.

표 1. 농생명 마이크로바이옴 기술 분류

대분류	중분류	기술 정의	요소 기술
농생명 마이크로 바이옴	동물 마이크로 바이옴	축산분야에서 산업동물 및 반려동물을 주요 대상으로 대용량 멀티오믹스 미생물 분석기술과 난배양성 미생물 분리동정 기술이 접목된 지속가능한 미래 동물산업 기술	• 건강한 가축의 마이크로바이옴을 활용한 생산성 향상 기술 • 동물 유래 마이크로바이옴을 활용한 고기능성 바이오신소재 기술 • 가축 생산환경의 지속가능성 제고를 위한 마이크로바이옴 제어기술
	식물 마이크로 바이옴	식물과 환경(토양, 공기, 물, 기후 등) 그리고 식물과 연관되어 있는 모든 생물 군집(미생물, 동물, 기생식물 등)의 총합	• 작물 병해 방제 및 생육촉진 마이크로바이옴 제재 개발 • 기능성 유용성분 증진 및 활용기술 • 작물 생산환경의 지속가능성 제고를 위한 마이크로바이옴 제어기술

○ 마이크로바이옴 활용 작물 스트레스 정밀 진단 및 처방 기술

– 본 기술은 휴대용 NGS · 바이오센서 · 멀티오믹스 분석을 기반으로 작물에 발생하는 생물적 · 비생물적 스트레스를 현장에서 실시간 진단하고, 작물–토양–미생물 상호작용 데이터에 인공지능(AI) 알고리즘을 결합하여 스트레스 유형과 강도에 최적화된 인공 미생물 군집(SynCom)을 자동 설계 · 처방하는 정밀 작물보호 플랫폼 기술임

– **현장 정밀 진단 및 멀티오믹스 기반 스트레스 조기 감지**: 메타전사체 · 메타대사체 분석을 통해 작물 면역 · 스트레스 반응을 분자 수준에서 추적하고, 토양 · 근권 미생물 군집의 균형 붕괴(dysbiosis) 신호를 정량 지표화하여 조기 경보 체계 구축

– **스트레스 저항성 미생물 뱅크 및 인공 군집(SynCom) 설계**: 내건성 · 내염성 · 고온내성 균주, 내생균(Endophyte), 병원균 길항 · 식물 면역 유도 균주 등 기능별 핵심 미생물 자원을 확보 · 표준화. AI 기반 대사 네트워크 모델링(FBA)을 통해 단일 균주의 낮은 현장 재현성을 극복하고, 스트레스 환경에서도 안정적으로 정착 · 기능하는 다종 인공 미생물 군집을 사전 설계

– **종자 마이크로바이옴 기반 세대 간 수직 전이 처방**: 종자를 매개로 세대 간 수직 전이되는 핵심 마이크로바이옴(seed–borne core microbiome)을 발굴 · 표준화하고, 종자 코팅 · 바이오프라이밍 제형화를 통해 파종 시점부터 작물의 스트레스 내성 형질을 안정적으로 보장하는 '제2의 유전체' 기반 처방 체계 구현

– **AI 실시간 처방 알고리즘 및 정밀 변량 살포**: 작물 생육 단계 · 기후 · 토양 조건별 빅데이터를 AI가 학습하여 스트레스 유형에 적합한 미생물 처방을 실시간 제안

– 본 기술은 현장 데이터 수집(Sensing) → AI 진단(Diagnostic) → 맞춤 처방 설계(Prescription) → 현장 적용 · 검증(Application & Validation)의 4단계 순환 구조(Closed-loop)로 운영. 수집된 미생물 · 환경 데이터를 기반으로 AI가 스트레스를 진단하고, 작물 · 토양 · 기후 조건에 최적화된 처방을 도출한 후 현장 적용 및 효능 검증을 수행. 검증 결과는 다시 데이터와 AI 모델에 반영되어 진단과 처방의 정확도를 지속적으로 향상시키는 자율 운용 루프(Autonomous Operation Loop)를 구현(그림 7)

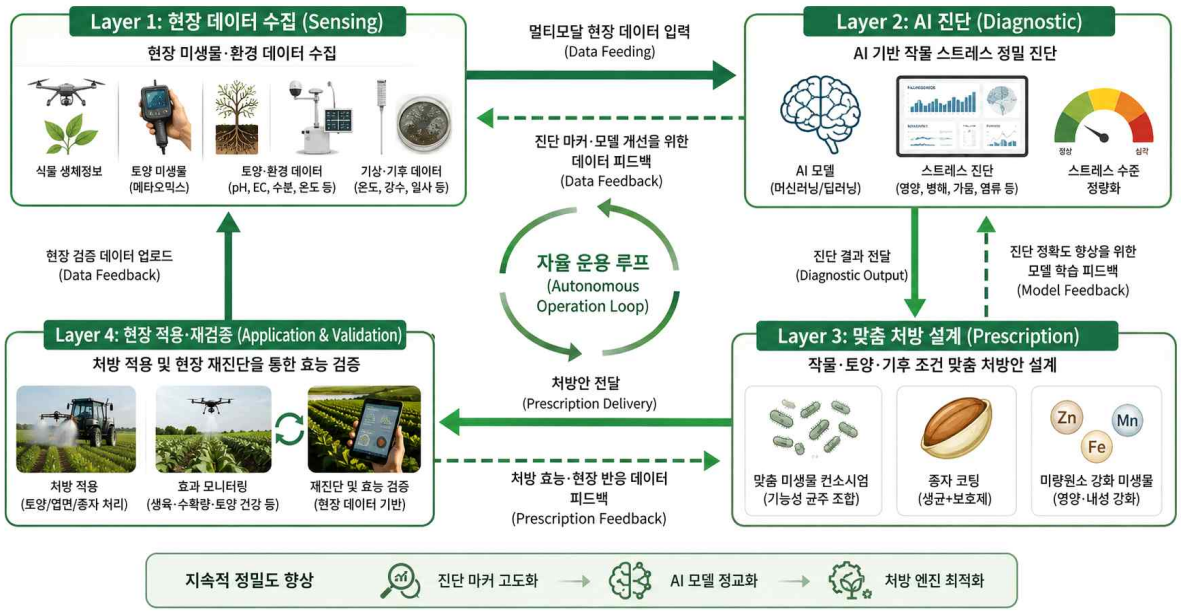


그림 7. 마이크로바이옴 활용 작물 스트레스 정밀 진단 및 처방 기술 순환 구조

○ AI 에이전트 기반 맞춤형 인공마이크로바이옴 설계 구성 기술(표 2)

표 2. AI 에이전트 기반 맞춤형 인공마이크로바이옴 설계 구성 기술 및 주요 내용

구성기술	주요 내용
에이전틱 AI 아키텍처	자율 실험 가설 수립, LLM 기반 학술 데이터 자동 추출, 멀티 에이전트 협업 알고리즘, 완전 자율 Closed-loop 연구 루프
멀티오믹스 및 대사 네트워크 모델링	멀티오믹스 데이터 표준화, G2E 프레임워크 적용, 미생물 생태적 지위 분석, 대사 플럭스(FBA) 기반 군집 보완성 및 상호작용 예측
고처리량(HTS) 자동화 인프라	디지털 트윈 기반 가상 실험, 로봇 기반 고속 균주 배양, 표현형(Phenotyping) 고속 분석, 자율 검증 및 데이터 피드백 시스템
현장 정밀 진단 센서 및 멀티오믹스 분석	휴대용 NGS·LAMP·화학-생물 융합 바이오센서, 잠복 감염·비생물적 스트레스 조기 탐지, 메타전사체·메타대사체 기반 면역·스트레스 반응 정량화, 근권 dysbiosis 조기 경보
스트레스 저항성 미생물 자원화 및 SynCom 설계	내건성·내염성·고온내성 균주, 내생균(Endophyte), 병원균 길항·면역 유도 균주의 분리·은행화, AI·대사 플럭스(FBA) 기반 인공 미생물 군집(SynCom) 안정성 사전 예측

구성기술	주요 내용
종자 마이크로바이옴 수직 전이 처방	세대 간 수직 전이 핵심 미생물 발굴, 종자 코팅·바이오프라이밍 제형화, 파종 단계부터 작물 스트레스 내성 형질의 안정적 부여, 종자–내생–근권 마이크로바이옴 연계 관리
AI 실시간 처방 알고리즘 및 정밀 변량 살포	작물 생육·기후·토양 데이터 통합 학습 기반 SynCom 자동 추천, 드론·자율 로봇 연동 변량(variable-rate) 정밀 살포, 적용 후 정착성·효과 다세대 추적 및 피드백 환류
생태계 안전성 및 효과 검증	병원성·항생제 내성·생태계 교란성 평가, 포장 현장 효과 실증, 화학농약·비료와의 혼용 적합성 표준 평가법, 환경영향·미생물 제형 정착성 검증 체계

- **에이전틱 AI 아키텍처 및 자율 연구 플랫폼**: 단순한 데이터 분석 도구를 넘어, LLM 기반의 학술 데이터 자동 추출 및 멀티 에이전트 협업 알고리즘을 통해 가설 수립부터 실험 설계까지 주도하는 'AI 과학자(AI Scientist)' 모델.
- **멀티오믹스 통합 분석 및 대사 네트워크 모델링**: 작물–미생물–토양 간의 복잡한 상호작용을 규명하기 위해 메타전사체 및 유전체 데이터를 표준화하고, G2E(Genomes-to-Ecosystem) 프레임워크를 적용. 대사 플럭스 분석(FBA)을 통해 미생물 간의 생태적 지위와 보완성을 예측하여, 실제 현장 환경에서도 안정적으로 작동하는 정밀한 인공 미생물 군집(SynCom)을 설계
- **홀로바이온트(Holobiont) 제어 기반 정밀 농업 기술**: 작물과 미생물을 하나의 통합 유기체로 간주하여, 기후 변동성(가뭄, 염류 스트레스) 대응이나 병해 방제를 위한 필드 맞춤형 처방 가이드라인을 제공

○ AI 에이전트 기반 맞춤형 동물마이크로바이옴 설계 주요 기술

① 인프라 및 데이터 레이어: 동물 멀티오믹스 통합 데이터 기반

- 축종, 사육환경, 건강 및 생산성 정보를 통합한 동물 마이크로바이옴 데이터 기반 및 축종별 데이터베이스 구축

② 두뇌 레이어: 에이전틱 AI 기반 정밀축산 설계 엔진

- AI 에이전트 활용 문헌 정보 추출과 지식 그래프를 활용하여 건강성과 생산성 관련 핵심 미생물군과 검증 실험 조건정보 도출

③ 모델링 레이어: 장내 · 반추위 대사 네트워크 예측 모델링

- GEM, FBA, community metabolic model을 활용하여 미생물군의 기능적 상호작용과 대사적 특성 예측. 특히 반추위에서는 대사 경로 분석을 통해 후보 미생물군의 기능성과 활용 가능성을 평가함

④ 팩토리 레이어: 고처리량 동물마이크로바이옴 검증 플랫폼

- AI가 설계한 후보군은 장내 발효모델, 세포모델 및 대사체 분석을 통해 단계적으로 검증. 검

증 결과는 다시 AI 모델에 환류되어 후보 설계, 예측 정확도, 현장 적용성을 지속적으로 개선하는 DBTL 기반 자율 연구 루프 형성(그림 8)

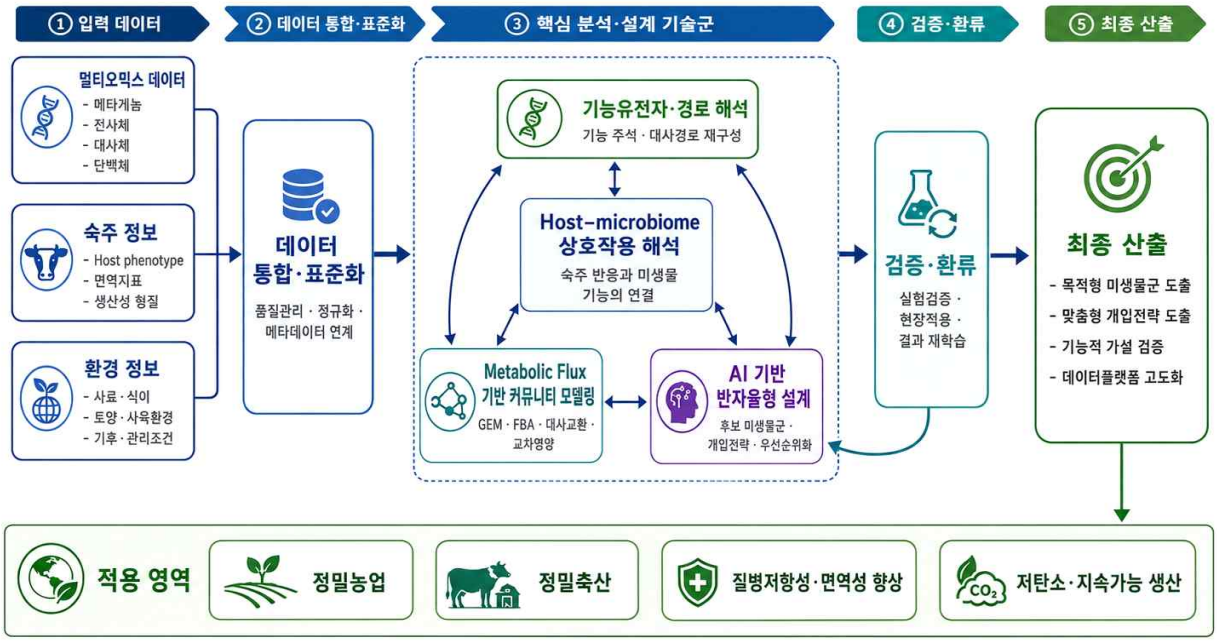


그림 8. 농축산 마이크로바이옴 기반 숙주–미생물–환경 통합 해석 체계 모식도

○ AI 기반 자율형 마이크로바이옴 설계 및 대사플럭스 매개 기능해석 기술

– AI 기반 자율형 마이크로바이옴 설계기술은 메타게놈, 대사체, 숙주 전사체 등 멀티오믹스 데이터와 사육환경 변수를 활용하여, 가축 생산성 · 질병 저항성 · 환경 적응성과 관련된 유망 미생물군 및 개입 전략을 도출하는 기술

– 대사플럭스 매개 기능해석 기술은 미생물 군집 내 대사물질 생성 · 소비 흐름과 숙주 간 대사 교환을 정량적으로 분석하여, 후보 미생물군의 생물학적 작동기작과 현장 적용 가능성을 검증하는 핵심 기술(표 3)

표 3. AI 기반 대사 흐름 및 기주–마이크로바이옴 상호작용 핵심 구성 기술

구성기술	주요 내용
멀티오믹스 통합 분석	메타게놈 · 대사체 · 숙주 전사체 기반 통합 분석
숙주–미생물 상호작용 분석	숙주–미생물 간 면역 · 대사 상호작용 분석
대사플럭스/FBA 모델링	대사 흐름 및 미생물 군집 기능 예측
AI 기반 예측 및 설계	생산성 · 질병 · 환경부하 예측 및 SynCom 설계
디지털 트윈 플랫폼	농축산 환경 기반 미생물 반응 시뮬레이션

– AI 기반 예측 모델은 미생물 간 상호작용과 숙주 반응을 학습하여 생산성, 질병 저항성, 메탄 저감 및 환경 적응성에 최적화된 인공적인 합성 미생물 군집 (Synthetic Community, SynCom) 설계 가능
– 디지털 트윈 기반 시뮬레이션 기술은 사육환경 변화에 따른 미생물 반응과 숙주 변화를 예측하여 데이터 기반 정밀 농축산 의사결정 가능
– 향후 바이오파운드리 및 자동화 검증 플랫폼과 연계하여 후보 미생물군의 설계 · 검증 · 개선 과정 고도화

○ 동물마이크로바이옴 활용 가축 건강 · 생산성 정밀 진단 및 처방 주요 기술

① 축산 현장형 마이크로바이옴 진단 플랫폼
– 분변, 반추위액, 구강, 피부 등 현장 채취 가능한 시료를 활용하여 가축의 장내 · 반추위 마이크로바이옴 상태를 신속하게 진단 하고 분자진단 및 바이오센서 기술을 활용하여 건강성, 생산성 및 환경 관련 핵심 마커를 분석함

② 동물마이크로바이옴 바이오마커 및 AI 진단 모델
– 주요 축종별로 질환, 생산성, 메탄배출 증가와 연관된 ASV, MAG, 기능유전자, 대사산물 기반 진단 마커를 구축하고 AI 진단모델을 통해 마이크로바이옴 및 개체정보를 통합 학습하여 질병위험, 생산성 저하, 사료효율, 메탄배출 가능성을 예측함

③ 가축 맞춤형 마이크로바이옴 처방 엔진
– 진단 결과에 따라 목적 형질에 적합한 마이크로바이옴 기반 소재와 관리 전략을 제안함

④ 정밀축산 연계 closed-loop 운용
– 농장 관리 시스템과 연계하여 진단-처방-적용-재진단 과정을 통합함
– 적용 결과를 재평가하고, 이를 AI 진단모델과 처방 엔진에 환류하여 지속적으로 개선함

3 적용분야 및 활용 영역

○ AI 기반 농축산 마이크로바이옴 기술의 적용분야 및 활용 영역은 아래 표와 같이 총 5개 영역으로 나눠 볼 수 있음.

표 4. AI 기반 농축산 마이크로바이옴 기술 5대 적용분야 및 활용 영역

활용 영역	식물분야	동물분야	기대효과
생산성 향상	생육촉진, 양분 이용효율, 종자코팅	사료효율, 성장률, 생산성 개선	농가 생산비 절감
질병, 스트레스 관리	병해 조기진단, 내건성, 내염성, 화상병 생물방제	장질환, 호흡기질환 위험 예측, 항생제 회복 평가	사전 예방형 농축산
기후변화 대응	토양 탄소격리, 질소고정, 비료 절감	반추위 메탄 저감, 분뇨, 악취 저감	저탄소 농축산
고부가 소재, 기능성	미량원소 강화 농산물, 기능성 유용성분 증진	사료첨가제, postbiotics, 바이오신소재	그린바이오 산업화
데이터, 정책 인프라	작물별 표준 DB, 진단키트, DSS	축종별 마이크로바이옴 DB, 정밀축산 DSS	표준화, 인증, 서비스 산업

Ⅲ. 기술 발전 동향 및 전망

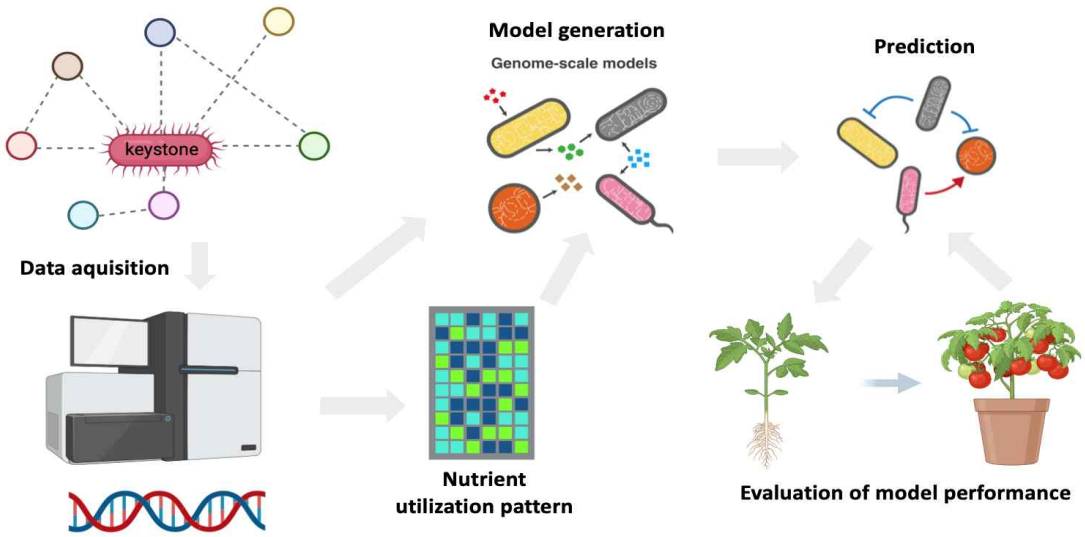
1 국내외 기술 발전 동향

1.1 국외 마이크로바이옴 연구개발 현황

○ 식물 마이크로바이옴

– 미국은 2016년 국가 마이크로바이옴 이니셔티브를 출범시켜 범부처 차원에서 마이크로바이옴 연구에 대규모 투자를 진행. 농무부와 에너지부를 중심으로 토양 마이크로바이옴의 탄소 저장 기능과 온실가스 순환 조절 메커니즘 연구가 활발히 진행되고 있으며, 기후변화 시나리오에 따른 토양 미생물 군집의 변화 예측 연구가 수행 중. 하버드 의대와 암웨이가 공동 개발한 'Minerva' 플랫폼은 GPT 기반 대규모 언어 모델을 활용하여 마이크로바이옴 데이터를 심층 분석하고, 지식 그래프 기술을 활용하여 미생물–숙주–환경 간의 복잡한 인과 관계를 모델링

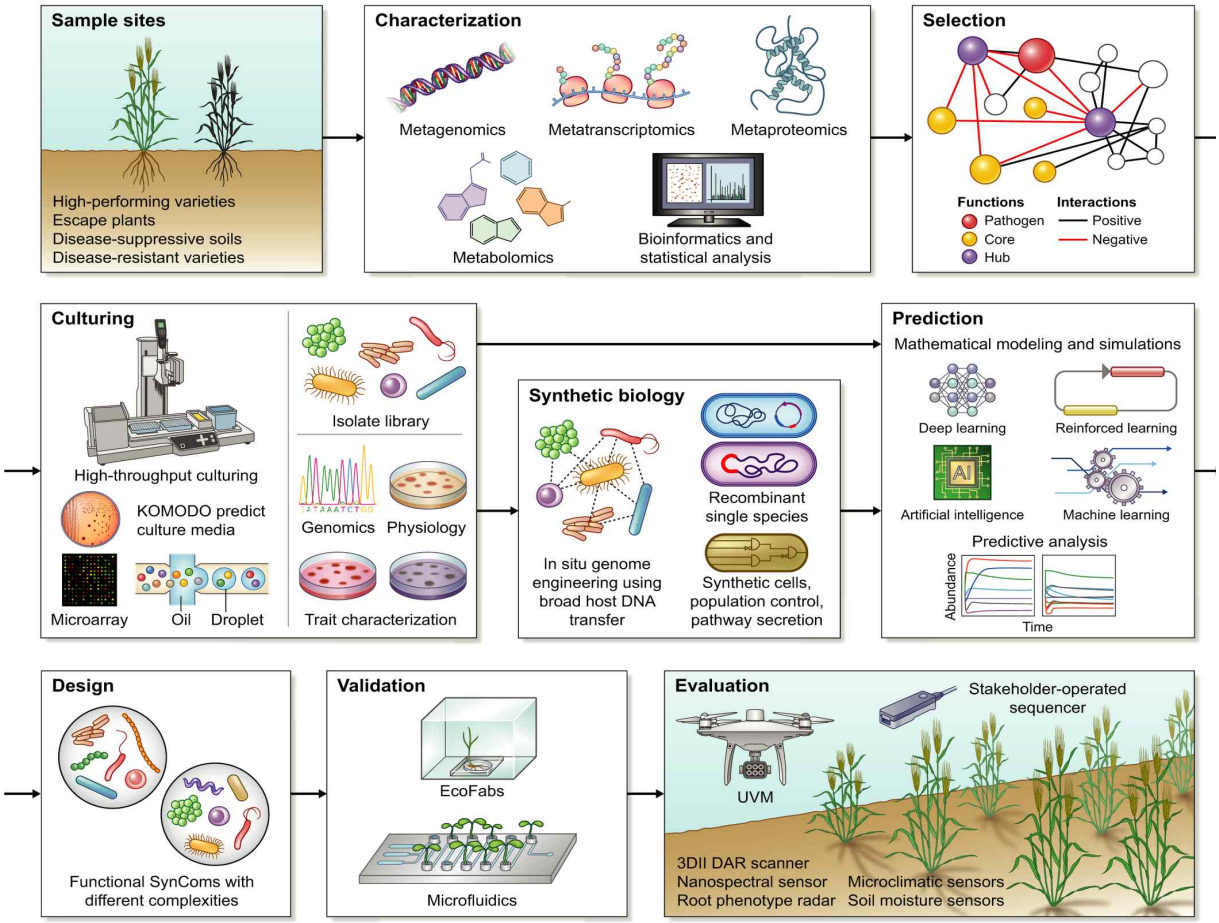
– 유럽연합은 호라이즌 프로그램을 통해 대규모 환경미생물 진단 연구를 수행하고 있으며, 메타지놈과 대사경로 분석 기반의 기능성 미생물 군집 설계 기술 선도. 특히 정밀농업과 연계하여 토양 건강 모니터링 센서 개발, 실시간 마이크로바이옴 분석 기술, 그리고 이를 기반으로 한 의사결정 지원 시스템 구축이 진행 중. 유럽바이오인포매틱스 연구소를 중심으로 MGnify 데이터베이스가 구축되어 전 세계의 마이크로바이옴 데이터를 통합 관리



출처: Trivedi et al. 2021, New Phytologist

그림 9. Genome–scale metabolic modeling에 기반한 작물별 맞춤형 마이크로바이옴 군집 설계 모식도,

– 글로벌 농업 마이크로바이옴 시장은 2023년부터 2032년까지 연평균 10% 이상의 고성장이 예측되며, 북미와 유럽을 중심으로 기술 개발과 상업화가 급속히 진행 중. 차세대 염기서열 분석, 메타지놈 분석, 합성생물학 기술을 융합하여 식물–미생물상호작용 네트워크를 정밀하게 분석하고, 이를 바탕으로 작물별 맞춤형 마이크로바이옴 설계 기술을 개발 중(그림9, 10)



출처: Trivedi et al. 2021, New Phytologist

그림 10. 작물별 맞춤형 마이크로바이옴 미생물 군집 프로파일링부터 합성 군집 제작 및 현장 검증까지의 파이프라인.

○ 동물 마이크로바이옴

– 아시아–태평양 지역에서는 중국과 일본을 중심으로 대규모 필드 실증 연구와 함께 정부 주도의 친환경 농업 정책 지원을 강화 중

– 중국은 국가 차원에서 마이크로바이옴 연구에 막대한 투자를 하고 있으며, 딥러닝을 활용한 병해 예측 모델과 최적 미생물 군집 설계 알고리즘 개발. 최근에는 인공지능과 빅데이터 분석 기술을 활용하여 미생물 군집의 구조와 기능을 예측하고, 최적의 미생물 조합을 설계하는 디지털 농업 기술로의 진화가 진행 중

○ 농생명 마이크로바이옴 인프라 구축

- 최근 세계적으로 농생명 관련 마이크로바이옴의 정보구축은 3 가지 핵심인프라를 중심으로 유기적인 네트워크를 구축되고 있는 실정
  ① 디지털 데이터 인프라: 메타게놈/메타전사체 시퀀스, 샘플 메타데이터, 프로젝트 정보 (NCBI의 SRA/BioProject/BioSample).
  ② 실물 자원 인프라: 동결보존 · 실물자원뱅크 · 배양균주은행 (ATCC, UK-CMC B, CGMCC, CAAS 농업 미생물 자원은행 등).
  ③ 응용 및 서비스 인프라: 동물 · 작물 대상 마이크로바이옴 진단, 미생물 제제(Microbial Consortia 포함), Fecal Microbiota Transplants(FMT; 분변 미생물 이식)/Fecal Virome Transplants
  (FVT; 분변 바이롬 이식) 관련 제품
- 미국의 NCBI의 경우 농생명 마이크로바이옴의 글로벌 데이터 허브로 GenBank, RefSeq, SRA, BioProject, BioSample 등의 메타게놈 정보가 유기적이며 체계적으로 deposit되어 전세계 수요자들에게 글로벌 핵심 마이크로바이옴 데이터를 제공하고 있어 실제적으로 농생명 마이크로바이옴 데이터의 전 세계 표준 인프라 역할을 수행하고 있음.
- ATCC(American Type Culture Collection)는 미국의 대표적인 미생물 · 세포주 자원은행으로, 농업 · 환경 · 인체 · 식품 등 다양한 생태계에서 유래한 균주를 장기 보존 · 분양하고 있음. 최근 ATCC는 NGS Microbiome Standards라는 이름으로, 미리 조성된 DNA 혼합물 및 균주 혼합물을 제공하는데, 토양 · 분변 · 환경 등 여러 환경에서 발견되는 균주를 조합한 mock community 제품군 제공을 통해 실험실간의 재현성과 시퀀싱간의 정확도를 높이는 시도도 진행 중에 있음. 이러한 시도는 한국 환경에 맞는 국가형 농생명 마이크로바이옴 네트워크 구축에 중요한 단서를 제공함.
- 민간부문도 농생명 마이크로바이옴 도입이 활발하게 이루어지고 있음. 기술벤처인 미국의 AnimalBiome은 장내미생물 분석을 통한 반려동물 건강 진단 및 맞춤형 식이 처방, 장내 미생물 이식 등의 특징적인 서비스를 상용화하고 있음.
- 영국의 경우 CABI(Centre for Agriculture and Bioscience International)와 연계하여 2020년도에 UK Crop Microbiome Cryobank(UK-CMCB)를 구축하였는데, 영국 내 6개의 주요 작물과 연관된 마이크로바이옴 메타게놈과 실물자원 뱅크임.
- 유럽의 경우 CABI를 중심으로 유럽 내 24개국의 참여하는 European Culture Collections' Organization(ECCO)를 구축하여 다양한 미생물 및 마이크로바이옴 뱅크를 구축하고 있음.
- 중국은 "종자 · 유전자 자원"에 대한 국가 전략 안에서 농생명 미생물 자원 · 마이크로바이옴 인프라를 전략적으로 확장하고 있음.

– 중국의 China General Microbiological Culture Collection Center(CGMCC) 는 중국과학원 미생물연구소(IMCAS) 산하의 국가 미생물 자원센터로, 11만 5천 균주 이상을 보존하고 특허 관련 미생물, 메타게놈 클론 라이브러리 등을 운영중에 있음. 최근 중국 농업농촌부 발표에 따르면, 최근 농작물 · 가축 · 수산 자원 대규모 종자은행을 운영하면서, 국가 농업 미생물 종자자원 저장소를 구축 중에 있음.

– 또한 2024년 “Agricultural Microbiome Atlas Project @ Single-cell(Agri-MAPS; https://www.ecytebio.com/news/info/9)”가 공식 출범함으로써 in situ 대사 기능 기반 미생물 스크리닝부터 유망 미생물 분리/배양, 기능성 농생명 미생물 자원 발굴로 이어지는 유기적이며 효율적인 파이프라인을 구축 중에 있음.

1.2 국내 마이크로바이옴 연구개발 현황

○ 식물 마이크로바이옴

– 국내 마이크로바이옴 연구는 정부의 적극적인 지원하에 최근 5년간 급속히 성장 중. 주로 식물건강, 작물재배환경 개선, 작물생산성 향상과 관련되어 과학기술정보통신부, 농림축산식품부, 농촌진흥청 등의 정부 부 · 청의 지원으로 마이크로바이옴 연구가 진행 중(표 5)

표 5. 국내 식물 마이크로바이옴 관련 주요 연구 내용

대상 형질	지원기관	주요 내용
식물건강	농촌진흥청	과수 세균구멍병(천공병) 방제를 위한 마이크로바이옴 분석 및 작용기작 연구
		작물 병저항성 양적형질 조절 홀로바이옴 구명 및 운용
		AI 기반 작물 스트레스 제어 마이크로바이옴 조절 기술 개발
	과기부	화상병 감염과 관련된 근권·내생 미생물 군집 분석을 통한 발병억제 마이크로바이옴 특성 구명
	농림축산식품부	메타전사체와 네트워크 분석을 통한 시스템 수준의 마이크로바이옴 기능 연구
		마이크로바이옴 정보 기반 작물재배 관리 복합 미생물제 개발 및 현장 실증
재배환경 개선	농촌진흥청	밭 전환지 질적 특성 평가 및 마이크로바이옴 변동 양상 구명
		질소시비에 의한 벼도열병 감수성 증가에 대한 식물마이크로바이옴의 역할 규명
		토양 양분 이용효율 증진을 위한 마이크로바이옴 활용 기술 개발
	농림축산식품부	벼 마이크로바이옴 분석 및 상호작용 기능 연구
	과기부	작물 마이크로바이옴 다양성 구명 및 유용 기능 이용 연구
작물생산성	농촌진흥청	작물 홀로바이옴 의존적 식물 기억 기전 연구
		홀로바이옴에 의한 작물 지상부 생장발달 조절 연구
		작물 홀로바이옴 환경에서 작물의 뿌리발달 조절 네트워크 분석
		종자 세대 전이 마이크로바이옴 건전성 증대 기술 개발
	농림축산식품부	토마토 종자의 내생 마이크로바이옴 분석 및 활용

대상 형질	지원기관	주요 내용
		마이크로바이옴 재설계를 통한 작물생산성 증대 기술 개발
	과기부	정밀농업 구현을 위한 마이크로바이옴 맞춤형 작물생산 기반 구축

- 정부 주도의 연구개발 사업으로는 토양 마이크로바이옴 개선을 통한 온실가스 배출량 억제 및 질소비료 효율 증진 과제가 추진되고 있으며, 작물별 맞춤형 미생물자원화 정책이 가속화 되면서 산학연 협력 체계가 강화
- 근권 미생물 군집 분석과 토양 개량, 식물생육 촉진, 병해충 제어를 위한 미생물 자원 적용 연구가 활발히 진행되고 있으며, 난배양성 미생물의 생장과 에너지 대사를 지원하는 도우미-수혜자 (helper-recipient)모델에 대한 연구도 발표
- 또한 CRISPR/Cas9 유전자가위 기술을 활용한 기능성 공생 미생물의 유전체 편집 연구가 시작되었으며, 스마트팜 기반의 환경 제어 시스템과 마이크로바이옴 활용 기술을 연계한 통합 재배관리 기술 개발 추진 중

○ 축산 마이크로바이옴

- 국내 축산 마이크로바이옴 연구는 미생물 기반 대체사료, 사료첨가제, 메탄저감 소재 개발로 확대 중임.
- 국내 축산 마이크로바이옴 연구는 항생제 의존을 줄이고 스트레스를 완화해 동물복지를 높이는 방향으로 발전. 초기에는 단일 균주의 성장 촉진과 병원균 억제에 초점이 맞춰졌으나, 최근에는 환경 스트레스 조건에서의 면역, 대사를 통합적으로 분석하는 연구로 확장 (표 6)

표 6. 축종 별 주요 스트레스 원인과 마이크로바이옴 급여 효과

축종	주요 스트레스	프리, 프로바이오틱스 급여 효과
가금	고온, 고밀도, 수송 및 환경 스트레스	지질 산화 억제, 근육 산화 안정성 향상, 육질 저하 완화
		난중 증가, 항산화 향상, 면역 활성화, 장내 미생물 조절
		성장률 개선, 병원균 억제, 면역글로불린 증가
양돈	이유 스트레스, 장내 염증, 면역 저하	성장률 개선, 설사 빈도 완화, 코르티솔 및 TNF-α 억제, 면역 개선
		대장균 감소, 장내 미생물 균형 회복, 사료 효율 증가
축우	열 스트레스, 반추위 발효 불균형	부티르산, 이소발레르산 증가, 메탄 감소, 반추위 발효 효율 개선, 지방 두께 감소 및 육색 개선
		지방산 대사 관련 유전자 발현 조절, 생리 활성 효과
		소화율 및 성장률 증가, 젖산균 유지, 악취 저감, 면역 지표 개선

○ 농생명 마이크로바이옴 인프라 구축

- 농촌진흥청을 중심으로 농생명 마이크로바이옴 분양자원 뱅크(국립농업생명공학정보센터, NABIC, National Agricultural Biotechnology Information Center와 농업미생물은행, KACC, Korean Agricultural Culture Collection)가 구축되어 체계적인 미생물 자원 관리

기반이 마련되었으며, 고추, 콩, 배추 등 주요 작물별 맞춤형 마이크로바이옴 분석과 표준모델 구축이 진행(표 7)

표 7. 농생명 식물마이크로바이옴 기반 구축 관련 연구 현황

구분	지원기관	주요 내용
기반 구축	농촌진흥청	농생명 마이크로바이옴 데이터베이스 공공 서비스 개발
		농생명 마이크로바이옴 분양 자원 뱅크 구축

출처: 국가과학기술지식정보 서비스, NTIS

- 특히 배양이 어려운 난배양성 핵심 미생물의 확보 기술 개발과 실물자원의 장기보존 체계 구축에 상당한 진전
- 보건복지부, 산업통상자원부, 과학기술정보통신부 등 여러 정부 부처가 협력하여 마이크로바이옴 연구개발, 데이터베이스 구축, 신약 및 신제품 개발을 지원하는 대형 국가 사업을 추진 중
- 산업계에서도 CJ바이오사이언스는 식물 생장 촉진 미생물과 인간 장 건강 개선 프로바이오틱스 개발에 투자하고 있으며, 고바이오랩은 특정 질환 치료를 위한 마이크로바이옴 기반 치료제 개발을 추진 중. 서울대학교, KAIST 등 주요 대학에서는 머신러닝을 활용한 마이크로바이옴 데이터 분석 연구를 수행 중

2 기술발전 흐름

○ 현재의 미생물 종류 및 군집 분석 등의 분석 단계에서 향후 AI 기반 군집 예측 및 설계 단계로 발전할 것으로 예측(그림 11)

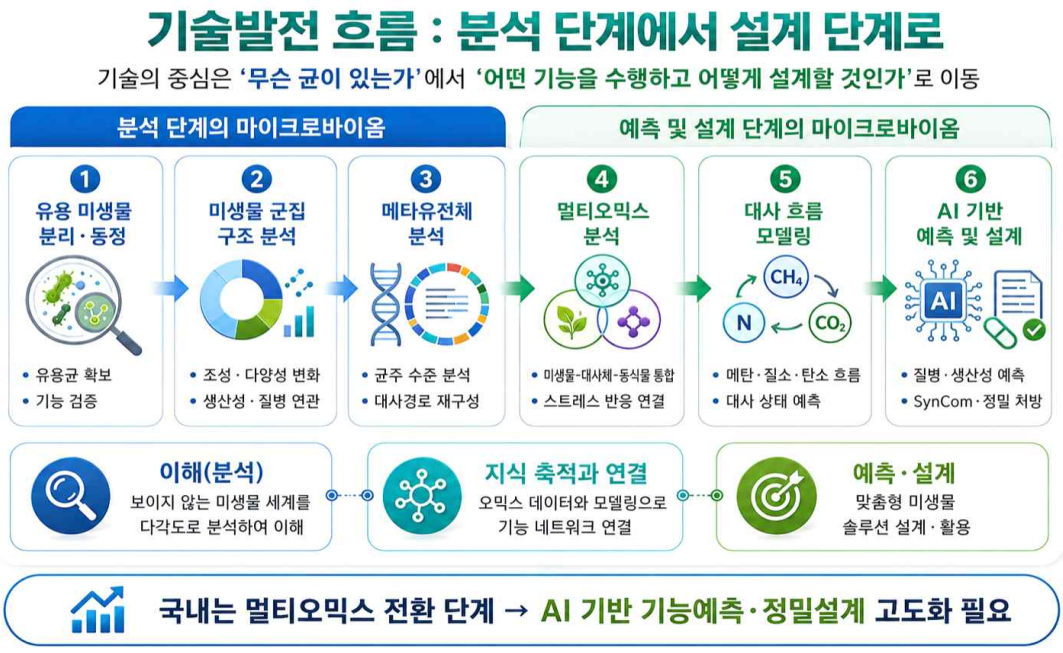


그림 11. 마이크로바이옴 기술 발전 흐름

○ AI 에이전트 기반 맞춤형 인공 마이크로바이옴 설계 기술

– 연구의 패러다임 전환: 단순 '분석 도구'에서 'AI 과학자'로 (그림 12)

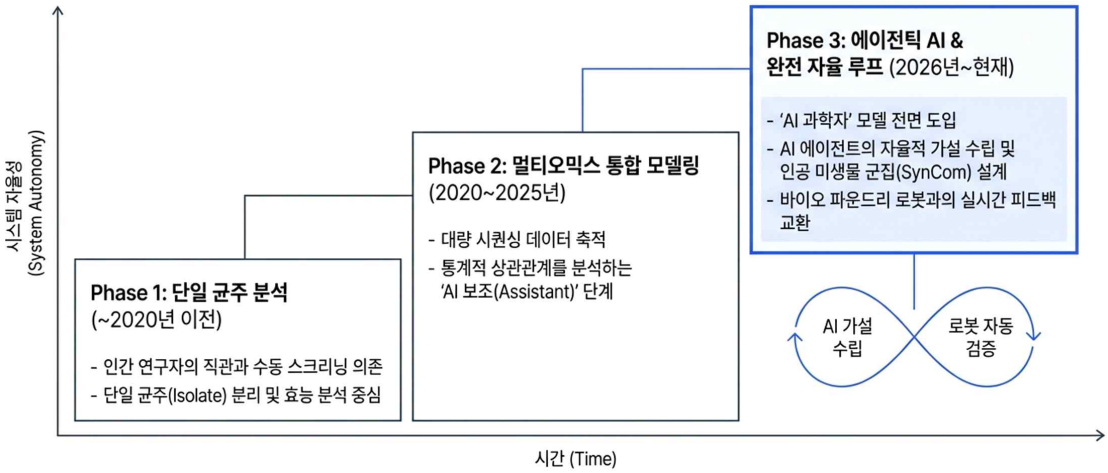


그림 12. 연구의 패러다임 전환: 단순 '분석 도구'에서 'AI 과학자'로

– **Phase 1. 단일 균주 분석 (~2020년 이전)**: 인간 연구자의 직관과 수동 스크리닝 의존, 단일 균주(Isolate) 분리 및 효능 분석 중심

– **Phase 2. 멀티오믹스 통합 데이터 모델링 (2020~2025년)**: 대량의 시퀀싱 데이터 축적. 데이터 간의 상관관계를 통계적으로 분석하는 'AI 보조(Assistant)' 모델 단계

– **Phase 3. 에이전틱 AI & 완전 자율 Closed-loop (2026년~현재)**: AI 에이전트가 가설을 스스로 수립하고, 복잡한 인공 미생물 군집(SynCom)을 설계한 뒤, 바이오 파운드리 로봇과 실시간 피드백을 주고받으며 자율 반복 연구 수행

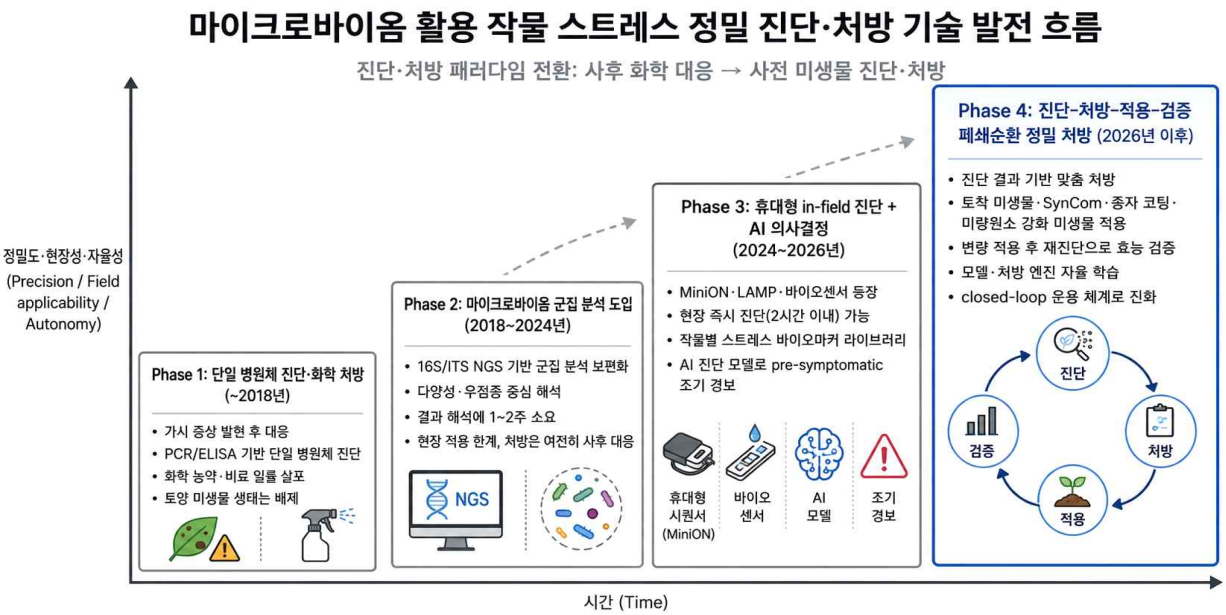


그림 13. 마이크로바이옴 활용 작물 스트레스 정밀 진단 · 처방 기술의 발전 흐름

○ 마이크로바이옴 활용 작물 스트레스 정밀 진단 · 처방 기술 발전 흐름

– 진단 · 처방 패러다임 전환: '사후 화학 대응'에서 '사전 미생물 진단 · 처방'으로(그림 13)

– **Phase 1.** 단일 병원체 진단 · 화학 처방 (~2018년): 가시 증상 발현 후 PCR/ELISA로 단일 병원체 동정, 화학 농약 · 비료 일률 살포. 토양 미생물 생태는 진단 · 처방 대상에서 배제

– **Phase 2.** 마이크로바이옴 군집 분석 도입 (2018~2024년): 16S/ITS NGS 기반 군집 다양성 · 우점종 분석이 연구 수준에서 보편화. 다만 결과 해석에 1~2주 소요되어 현장 적용 한계, 처방은 여전히 사후 대응

– **Phase 3.** 휴대형 in-field 진단 + AI 의사결정 (2024~2026년): MinION 등 휴대형 NGS · LAMP · 바이오센서 등장으로 현장 즉시(2시간 이내) 진단 가능. 작물별 스트레스 바이오마커 라이브러리 · AI 진단 모델로 pre-symptomatic 조기 경보 시작

– **Phase 4.** 진단-처방-적용-검증 폐쇄순환 정밀 처방 (2026년 이후): 진단 결과에 따라 토착 · SynCom · 종자 코팅 · 미량원소 강화 미생물을 변량 적용하고 재진단으로 효능 검증 → 모델 · 처방 엔진을 자율 학습시키는 closed-loop 운용 체계로 진화

○ AI 에이전트 기반 맞춤형 동물마이크로바이옴 설계 기술

– 연구의 패러다임 전환: 단일 균주 분석에서 자율형 정밀축산 AI로

– **Phase 1.** 단일 균주 및 프로바이오틱스 중심 연구(~2010년대 중반): 유용 미생물 분리 · 동정, probiotic 기반 장건강 개선, 생산성 향상 및 항생제 대체 가능성 평가 중심으로 연구가 진행됨.

– **Phase 2.** 장내 · 반추위 군집 및 기능유전자 분석(2010년대 중반~2020년대 초반): 16S rRNA sequencing과 shotgun metagenomics를 활용하여 methanogenesis pathway 관련 미생물군과 기능유전자를 탐색함.

– **Phase 3.** Multi-omics 기반 host-microbiome interaction 해석(2020~2025년): metagenomics, metabolomics, host transcriptomics, 면역지표 및 생산성 형질을 통합하여 microbiome 변화가 숙주 대사, 면역, 생산성 및 메탄배출에 미치는 영향을 해석함.

– **Phase 4.** 통합 예측 기반 맞춤형 마이크로바이옴 설계(2026년 이후): FBA, 기능예측 모델을 활용하여 장내 · 반추위 SynCom, 사료첨가제, 메탄저감 소재 및 사육관리 조건을 목적 형질별로 설계하는 방향으로 발전할 것으로 예상됨.

3 핵심 발전축

○ AI 에이전트 기반 맞춤형 인공 마이크로바이옴 설계기술 핵심 발전 축 (그림 14)

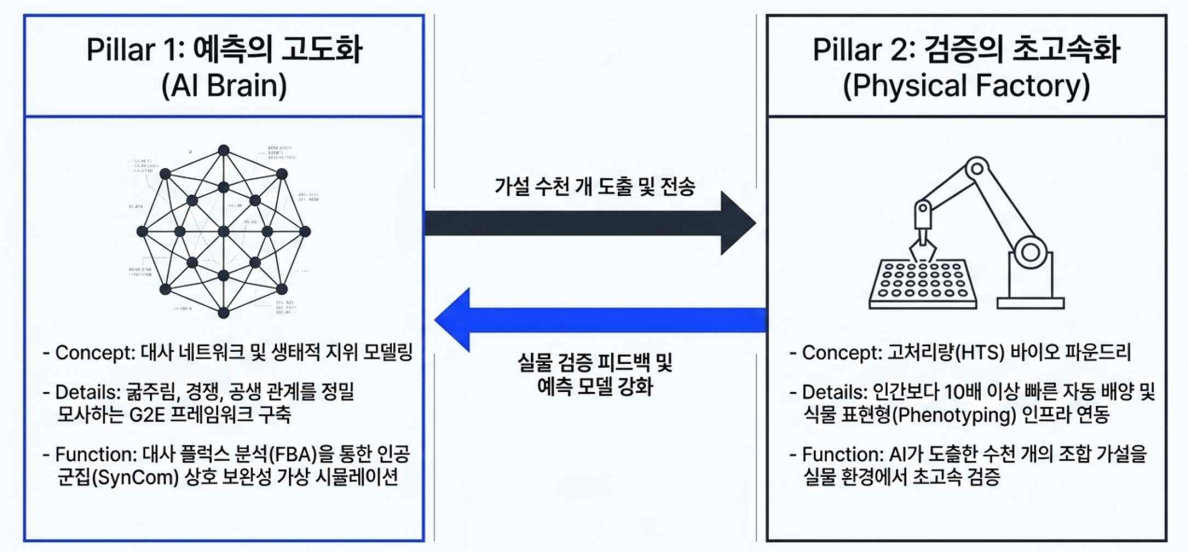


그림 14. AI 에이전트 기반 맞춤형 인공 마이크로바이옴 설계기술 핵심 발전 축

① 예측의 고도화(Brain): 대사 네크워크 및 생태적 지위 모델링

- 미생물 간의 경쟁, 공생, 영양 관계를 정밀하게 모사하는 G2E(Genomes-to-Ecosystem) 프레임워크의 개발 및 도입
- 대사 플럭스 분석(FBA) 모델을 통해 인공적으로 조합된 군집 (SynCom)이 실제 토양에서 무너지지 않고 서로 보완성을 유지할 수 있는지에 대한 시뮬레이션 기반의 예측
- 장내 · 반추위 생태계에서 미생물 간 경쟁, 공생, 영양 교환, 숙주 대사반응을 함께 고려하는 생태 · 대사 네트워크 모델링을 통해 후보 SynCom 또는 기능성 미생물 조합의 정착 가능성, 기능 안정성, 숙주 반응 조절 가능성을 사전에 예측
- 특히 사료 이용성, 단쇄지방산 생성, 병원체 억제, 염증 완화, 면역 항상성, 메탄생성 저감 등 목적 형질별로 미생물 조합이 장내 · 반추위 환경에서 실제 기능을 유지할 수 있는지를 FBA 및 커뮤니티 대사모델 기반으로 시뮬레이션

② 검증의 초고속화: 고처리량(HTS) 바이오 파운드리

- AI가 도출한 수천 개의 조합 가설을 인간 과학자보다 최대 10배 이상 빠른 속도로 자동 배양하고 식물 표현형 분석과 사료첨가제, prebiotic, probiotic, postbiotic 후보 예측을 위한 파운드리 및 자동화 시설과의 연동
- 검증 결과의 AI 모델 환류를 통한 동물마이크로바이옴 목적 형질 최적화 작물 · 동물마이크로바이옴 설계-검증 순환체계 구축

○ 마이크로바이옴 활용 작물 스트레스 정밀 진단 · 처방 기술 핵심 발전 축

① 진단의 현장화(In-field Diagnostics): 휴대형 시퀀싱 · 등온증폭 · 바이오센서

- Oxford Nanopore MinION/Flongle 등 휴대형 NGS의 read 정확도 · beadless 라이브러리 기술 고도화로 포장 현장에서 24시간 이내 메타지놈 결과 산출
- LAMP · RPA 등온증폭과 전기화학-광학 융합 바이오센서(SPR · 페이퍼-마이크로플루이딕)로 핵심 진단 마커 30분 이내 정성 · 반정량 검출, 농가 수준 보급형 키트화

② 진단의 지능화(AI Decision Support) : 스트레스 바이오마커 라이브러리 + 진단 모델

- 작물 · 스트레스 조합별로 ASV(Amplicon Sequence Variant) 수준의 진단 마커 패널과 기능 유전자(예: NifH, AOA 등) 마커 라이브러리 구축
- 멀티오믹스 + 환경 변수 통합 학습 모델(Random Forest · Transformer · GNN)을 통해 스트레스 유형 · 진행 단계 동시 진단 및 가시 증상 7~14일 이전 조기 경보

③ 처방의 정밀화(Precision Prescription) : DSS 기반 맞춤형 미생물 처방 엔진

- 토착 미생물 보강형 컨소시엄, 종자 코팅용 미생물, 미량원소(Se · Zn · Fe) 강화 미생물, 생물제제(biostimulant) 등 처방 옵션을 모듈화하여 진단 결과 기반 자동 매칭
- 작물 · 토양 · 기후 조건별 효능 예측 · 잔류 안전성 평가까지 포함한 의사결정 지원 시스템(DSS) 구현

④ 적용의 자동화(Automated Field Deployment) : 스마트팜 연계 폐쇄순환 운용

- 변량 시비 · 관수 시스템, 종자 코팅 자동화 라인, 드론 · 로봇 살포 장비와의 표준 인터페이스(예: ISOBUS, MQTT) 정립
- 적용 후 재진단 데이터를 진단 모델 · 처방 엔진으로 자동 피드백하여 작물별 · 지역별 정밀도가 누적 · 향상되는 자율 운용 루프(Autonomous Operation Loop) 완성

○ 동물마이크로바이옴 활용 가축 건강 · 생산성 정밀 진단 · 처방 기술 핵심 발전 축(그림 15)

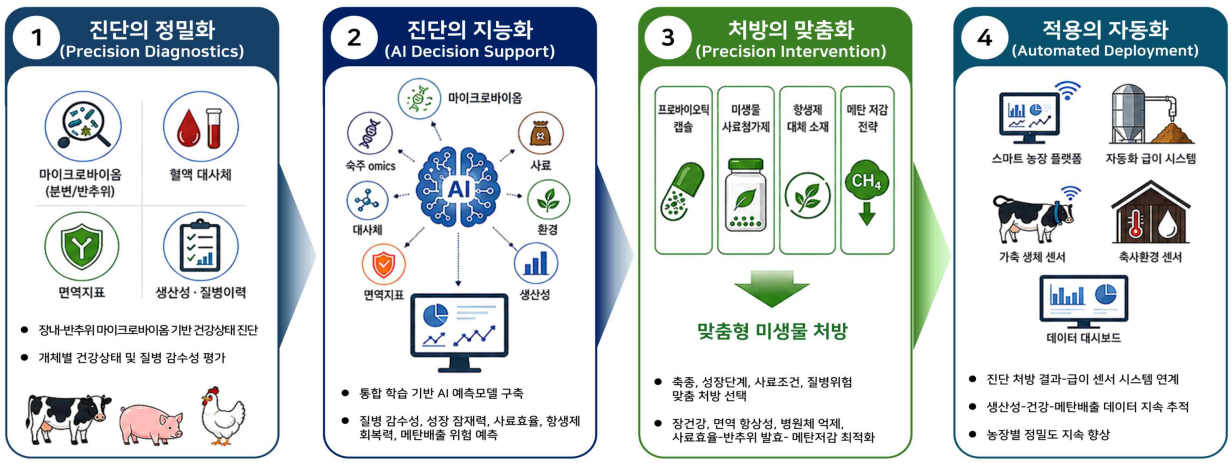


그림 15. 동물마이크로바이옴 활용 가축 건강 · 생산성 정밀 진단 · 처방 기술 핵심 발전 축

① 진단의 정밀화(Precision Diagnostics): 장내 · 반추위 마이크로바이옴 기반 건강상태 진단

– 분변 · 반추위 마이크로바이옴과 혈액 대사체, 면역지표, 생산성, 질병 이력을 통합해 개체별 건강상태와 질병 감수성을 진단함

② 진단의 지능화(AI Decision Support): 동물마이크로바이옴 기반 예측모델

– 마이크로바이옴, 숙주 omics, 혈액 대사체, 면역지표, 사료조성, 사육환경, 생산성을 통합 학습하는 AI 모델을 통해 질병 감수성, 성장 잠재력, 사료효율, 항생제 회복력, 메탄배출 위험을 사전 예측

③ 처방의 맞춤화(Precision Intervention): 가축 맞춤형 미생물 처방 엔진

– 진단 결과를 기반으로 축종, 성장단계, 사료조건, 질병위험, 생산성 등 다양한 목표에 적합한 미생물 기반 사료첨가제, 항생제 대체 소재, 메탄저감소재를 맞춤 선정함.

– 개체 또는 농장 단위의 마이크로바이옴 상태에 따라 장건강 개선, 면역 항상성 회복, 병원체 억제, 사료효율 향상, 반추위 발효 최적화, 메탄생성 저감을 목표로 하는 맞춤형 관리전략 제시

④ 적용의 자동화(Automated Livestock Deployment): 정밀축산 연계 순환 운용

– 진단 · 처방 결과를 사료급이, 생체 · 축사환경 센서와 연계하고 적용 후 생산성 · 건강 · 메탄 배출 데이터를 환류해 농장별 정밀도 증가

4 향후 기술 발전 방향

○ 맞춤형 처방을 넘어 외부 투입재를 최소화하는 '홀로바이온트 육종'

① 단기 방향 (~ 향후 5년): 지역, 작물, 축종별 맞춤 처방

– 벼, 콩 등의 주요 식량작물을 대상으로 특정 기후나 환경 (예: 가뭄, 염류 스트레스) 맞춤형 SynCom 모델 구축. 자동화 실험실과의 연구 루프 완성 및 농가에 시험 적용

– 축종 · 성장단계 · 사료조건별로 사료효율, 장건강, 면역반응, 질병저항성, 메탄저감과 연관된 후보 미생물 소재를 도출하고 가축 사양시험을 통해 기초 검증

② 장기 방향 (~ 향후 10년): 범용 설계 플랫폼 및 홀로바이온트 일체형 통합 육종

– 전 지구적 환경 데이터 기반으로 일반적인 작물 대상의 범용 AI 설계엔진 고도화

– 홀로바이온트 기술 도달: 단순히 미생물을 살포하는 단계를 넘어, 유익 미생물을 스스로 모집(recruiting)할 수 있는 식물 유전자(M-genes: Microbiome-shaping genes) 개량과 해당 유익균을 종자 내부에 내재화하여 세트로 출시하는 패키징 기술 개발

– 장기적으로는 숙주 유전형, 장내 · 반추위 미생물군, 사료조건을 함께 고려한 가축 홀로바이온트 정밀육종으로 확장하고, 사료효율 · 질병저항성 · 저메탄 형실 선발에 활용

○ 진단-처방-검증 closed-loop 정밀 농축산업 인프라로의 발전

① 단기 방향 (~ 향후 5년) : 핵심 작물별 진단 마커 라이브러리 + 보급형 키트 구축

- 국내 주요 5대 작물(벼 · 콩 · 고추 · 토마토 · 과수)을 우선 대상으로 생물적 · 비생물적 스트레스별 진단 마커 패널 표준화 및 농가 보급형 LAMP · 바이오센서 키트(개당 1~3만 원대) 상용화
- 농촌진흥청 KACC와 연계한 토착 · SynCom · 미량원소 강화 미생물 자원 라이브러리 1,000종 이상 확보 및 DSS 시범 운용(농업기술센터 거점 100개소)
- AI 진단 · 처방 모델의 작물별 검증 정확도 85% 이상, pre-symptomatic 조기 경보 정확도 80% 이상 달성
- 주요 축종을 대상으로 장건강, 사료효율, 항생제 회복력, 반추위 발효, 메탄배출 관련 진단마커를 표준화하고, 분변 · 반추위 기반 신속진단을 정밀축산 플랫폼과 연계
- AI 모델은 마이크로바이옴 · 사료 · 환경 · 생체정보를 통합해 질병위험과 생산성 저하를 예측하고 관리전략을 제안하는 DSS로 시범

② 장기 방향 (~ 향후 10년) : 전국 단위 closed-loop 정밀 농축산업 인프라 + 글로벌 서비스 수출

- 스마트팜 · 노지 변량 농업 장비와 표준 연동된 전국 단위 closed-loop 운용망(데이터 주권형 K-Microbiome Cloud) 구축



그림 16. AI 기반 마이크로바이옴 기술의 향후 기술 개발 방향

- 작물 스트레스 진단 · 처방 결과의 인증 · 트레이서빌리티를 블록체인 기반으로 기록하여, EU 'Farm to Fork' 등 글로벌 환경 규제 대응 인증 데이터로 활용
- 동남아 · 중동 · 아프리카 등 기후 스트레스 취약 지역 대상 진단키트 · 처방 SaaS 서비스 수출(K-AgriBio 모델), 작물 스트레스 진단 · 처방 글로벌 표준 한국 주도
- 장기적으로 농장 단위 마이크로바이옴 · 사료 · 환경 · 질병 · 생산성 · 메탄 데이터를 통합한 K-Livestock Microbiome Cloud를 구축해 항생제 저감, 질병 예방, 사료효율 개선, 저탄소 축산인증에 활용(그림 16)

5 주요 이슈 및 한계

○ AI 에이전트 기반 맞춤형 인공 마이크로바이옴 설계 기술의 이슈 및 한계
- 실험실 데이터와 실제 가변적인 야외 필드 데이터 간의 간극을 매울 수 있는 높은 신뢰성의 통합 DB의 부족
- 유럽 연합(EU)의 기능 중심 분류 체계 제안(proposal) 등 글로벌 규제는 고도화되고 있으나, 국내 비료관리법 및 농약관련 규제는 여전히 전통적인 화학물질 중심 규제 틀에 갇혀있어 AI 설계 생물제제의 신속한 시장 진입 지연될 수 있음

○ 마이크로바이옴 활용 작물 스트레스 정밀 진단 · 처방 기술의 이슈 및 한계
- (진단 표준화 부재) 휴대형 NGS · LAMP · 바이오센서 간 기기별 · 키트별 진단 결과 편차가 크고, 작물 · 스트레스별 표준 바이오마커 패널과 reference cut-off 값이 부재하여 동일 시료에 대해서도 진단 일관성 확보가 어려움
- (처방 인증 · 잔류 안전성) 토착 보강형 컨소시엄 · SynCom · 미량원소 강화 미생물의 환경 방출 · 작물 잔류 · non-target 영향 평가 프로토콜이 정립되지 않아, 처방 안전성 인증 체계 부재로 인한 상용화 지연
- (현장 운용 비용 · 인력) 진단키트 · 재진단 주기 · DSS 구독료를 합산한 농가 부담 단가가 화학 농약 · 비료 대비 여전히 높고, 데이터 해석 · 운용 가능한 현장 컨설턴트(농업 마이크로바이옴 분석사) 인력풀 부족
- (closed-loop 데이터 거버넌스) 농가 단위 재진단 데이터의 소유권 · 활용 권한 · 국가 DB 연계 규정이 미비하여 자율 운용 루프 학습용 데이터 축적이 정체될 위험
- (규제 미스매치) 진단키트는 의료기기 기준, 처방 미생물 제제는 비료관리법 · 농약관리법으로 이원화 규제되어 통합 closed-loop 솔루션의 인허가 경로가 분절적이며 트랙별 중복 심사 부담 발생

○ 동물마이크로바이옴 기반 정밀축산 진단 · 처방 기술의 이슈 및 한계

– (동물 현장 데이터의 복잡성) 축종, 품종, 성장단계, 사료조성, 사육밀도, 축사환경, 항생제 사용 이력, 백신접종, 질병 이력에 따른 장내 · 반추위 마이크로바이옴 변동성으로 인해 모델의 현장 확장성 한계 존재
– (진단 바이오마커 표준화 부족) 장건강, 설사, 호흡기질환, 사료효율 저하, 반추위 발효 이상, 메탄배출 증가와 연관된 주요 건강 · 생산성 지표별 바이오마커의 reference range와 cut-off 표준화의 부족함 존재
– (기능 검증 체계의 제한) 장내 · 반추위 마이크로바이옴 조절 소재는 단계적 검증이 필요하지만, 대규모 반복 검증과 장기 사육시험을 수행할 수 있는 인프라는 제한적임
– (처방 효과의 재현성 및 안전성 문제) 미생물 기반 처방의 효과는 개체별 미생물군, 사료조건, 건강상태, 사육환경에 따라 달라질 수 있어 농장 현장 재현성이 제한적이며, 장내 · 반추위 정착 안정성 및 안전성 평가 기준 부재
– (규제 및 산업화 경로의 불확실성) 동물마이크로바이옴 기반 소재의 효능 표시, 안전성, 잔류성, 항생제 내생 평가 기준 정비가 필요함
– (정밀축산 연계 인프라 부족) 마이크로바이옴 · 사육환경 · 생산성 데이터를 통합하는 정밀축산 플랫폼과 데이터 거버넌스는 초기단계

○ 국내 마이크로바이옴 연구의 현주소
– 국내 연구는 여전히 기초 연구와 자원 확보 단계에 집중되어 있으며, 대규모 현장 적용 기술과 온실가스 저감의 정량적 평가 방법론이 부족한 실정
– 특히 다양한 기후대와 토양 유형에서의 장기 모니터링 데이터가 제한적이며, 미생물 군집의 시공간적 변동성을 예측하는 모델링 기술은 초기 단계
– 또한 개발된 기술의 상업화와 농가 보급을 위한 실용화 연구가 미흡하여 연구 성과의 현장 적용에 어려움
– 데이터의 표준화 부족, AI 기술과 생명과학의 융합 인력 부족, 제형화 및 생산 기술 부족 등도 주요 한계로 지적
– 농생명 마이크로바이옴 인프라를 설계할 때 데이터은행-균주은행-표준 mock community를 하나의 연구패키지 제공하여 수요자들에게 보다 효율적인 마이크로바이옴 정보제공 시스템 구축이 필요

Ⅳ.산업 및 정책 환경

1 산업 동향

1.1 글로벌 산업 동향

○ 동 · 식물 마이크로바이옴 시장 규모(주요 출처: verified market reports)

– 글로벌 마이크로바이옴 시장은 2024년 기준, 작물 마이크로바이옴 시장의 매출은 34억 5천만 달러(약 5조원)로 평가되었으며, 2033년까지 101억 2천만 달러(약 14조원)에 이를 것으로 전망, 2026년부터 2033년까지의 연평균성장률(CAGR)은 12.7%로 예상

– 북미는 전체 시장 매출의 약 35%를 차지하며 작물 마이크로바이옴 시장에서 가장 큰 비중을 차지. 그 뒤를 이어 유럽(30%), 아시아태평양(20%), 중남미(10%), 중동 및 아프리카(5%) 순

– 작물 마이크로바이옴 시장에서 가장 큰 비중을 차지하는 미생물은 박테리아로, 전체 시장의 약 50%를 차지. 그 뒤를 균류(Fungi)가 25%로 따르며, 바이러스와 기타 미생물은 각각 15%, 10%를 차지

– 과일 및 채소 작물의 마이크로바이옴 시장은 예측 기간 동안 가장 빠르게 성장할 것으로 예상되며, 이는 지속 가능한 농업과 병해충 방제 솔루션에 대한 수요 증가에 기인

– 동물 마이크로바이옴 시장 규모는 2024년 약 21억 달러(약 3조원)로 추정되며, 2033년까지 약 45억 달러(6조원)에 이를 것으로 예상. 2026년부터 2033년까지 연평균 성장률(CAGR)은 9.2%로 예상

– 미국 농무부(USDA)에 따르면, 반려동물 보유 증가와 건강한 축산물에 대한 소비자 수요 상승에 따라, 동물 건강 시장은 2025년까지 700억 달러(약 97조원)에 이를 것으로 예상되며, 이 중 마이크로바이옴 관련 제품이 핵심적인 역할을 할 것으로 예상

– 북미가 전체 동물 마이크로바이옴 시장 매출의 40%로 1위를 차지했으며, 그 뒤를 유럽 25%, 아시아 · 태평양 20%, 중남미 8%, 중동 · 아프리카 7% 순

– 동물 마이크로바이옴 활용 대상 형질은 만성 설사(Chronic Diarrhea)가 시장 점유율 주도. 만성 설사가 2023년 약 35%의 시장 점유율로 가장 큰 적용 분야를 유지, '피부 질환(Skin Condition)'관련 동물 마이크로바이옴 활용 분야는 예측 기간 동안 가장 빠른 성장이 예상

○ 식물 마이크로바이옴

– 2020년대에 들어 전 세계적으로 수십여 개 이상의 기업이 관련 연구를 진행하여 다양한 미

생물들을 활용하여 만들어진 식물병해충 방제용 혹은 수확량 증대용 제품들이 시장에 나와 있음(표 8)

표 8. 국외 식물마이크로바이옴 관련 기업 및 기술 사례

기업(국가)	활용미생물/기술	제품 및 활용	적용/특징(요약)
BASF SE (독일)	세균, 진균 (Bacillus 종, *Beauveria 종* 등)	Serifel Biofungicide®(생물 살균제), Velifer®(미생물 곰팡이 기반 해충 억제), Nemasys®(유익 선충) 등	곰팡이, 곤충, 달팽이를 포함한 질병 및 해충으로 인한 피해 경감 및 토양 건강용
Certis USA	세균, 바이러스 (Bacillus 종, 박테리오파지 등)	AgreeWG, AgSil, AgriPhage 등	곰팡이, 세균, 해충으로 인한 피해 경감용
Indigo Agriculture (인도)	마이크로바이옴 기반 생물학적 제제 (biologicals)	biotrinsic™X19), Indigo™Cotton	주요 종자병 억제용
Bayer Crop Sciences	세균 (*Bacillus thuringiensis*)	Poncho / Vitovo	해충 방제용
FMC & Chr. Hansen	세균 (*Bacillus* 종)	Nemix C	수확량 증대 및 선충 방제용
Novozymes	진균 (*Metarhizium anisopliae*)	Met52	해충 방제용

출처: 연구개발 동향 중간보고서, 화우

- 스페인 기반의 Biome Makers는 BeCrop 플랫폼을 통해 토양 마이크로바이옴 데이터를 분석하고, AI 알고리즘을 활용하여 작물별 최적의 미생물 군집을 추천하는 서비스를 제공. 이미 30개국 이상에서 상용화되어 수천 개 농장에 적용 중
- 미국 MIT와 Novozymes는 합성생물학과 AI를 결합하여 맞춤형 미생물 컨소시엄을 설계하는 연구를 수행하고 있으며, 파일럿 규모의 생산 공정 개발까지 진행 중

○ 동물 마이크로바이옴

- 축산 분야에서는 반추동물의 장내 메탄 생성을 억제하는 미생물 및 사료첨가제 개발이 주요 연구 주제로 부상하고 있으며, 해조류 · 식물 추출물 기반 첨가제를 활용한 저메탄 사료의 산업화 사례도 보고되고 있음. 또한 단세포 단백질, 미생물 유래 오일, 농업 부산물의 미생물 전환 등을 활용한 마이크로바이옴 기반 대체사료 생산기술은 기존 사료원료를 보완 · 대체하고 자원순환과 환경 부담 저감에 기여할 수 있는 기술로 주목받고 있음(표 9).

표 9. 국외 동물마이크로바이옴 기반 대체사료원료 개발 기업 및 기술 사례

기업(국가)	활용미생물/기술	제품 및 활용	적용/특징(요약)
Quorn (영국)	곰팡이 균사체 (*Fusarium*)	마이코프로틴 기반 대체육(인간식품)	1985년 상용화; 단백질 함량 80% 이상 균질육 공급, 지속 가능 대체육의 산업화
Nature's Fynd (미국)	균류단백 (*Fusarium flavolapis*)	Fy 단백질 가공품 (대체고기·유제품)	NASA 연구 기원 극한미생물 활용. 2021년 GRAS 승인, 비료 없이 토지·물로 생장 가능
Solar Foods (핀란드)	수소 산화 세균 발효 (CO_2→단백질)	Solein 단백질 분말 (식품·사료잠재)	최초 공기 단백질; 미생물이 H_2+CO_2로 성장, 단백질65~70% 함유
Calysta (미국)	메탄 영양 세균 발효 (메탄→단백질)	Feed Kind 단백질 (양식어 사료)	메탄가스를 탄소원으로 SCP 생산. 단백질~75%; 어분 30% 대체가능 양식사료로 검증
Veramaris (네덜란드)	해양 미세조류 발효 (Schizochytrium)	DHA/EPA 오일 (양식어·반려동물 사료)	2019년 상용화; 미생물 유래 Omega-3 오일. 어유 완전 대체가능, 어유시장 연간15% 대응 규모로 생산 가능
Unibio (덴마크)	메탄 기반 가스 발효	UniProtein (식품·사료 잠재)	상용화 단계 진입, 라이선스·플랜트 확장
Cellucomp (영국)	세균성 셀룰로오스(Komagataeibacter xylinus)	Curran® 섬유소	식품·포장·사료첨가제로 응용; 고강도·고수분 보유력, 친환경 천연 섬유소
Axcelon Biopolymers Corp. (캐나다)	세균성 셀룰로오스 생산 발효	Nanocellulose Hydrogel	고순도 미생물 셀룰로오스 하이드로겔; 기능성 사료첨가제 및 동물용 생체소재로 연구 중
GreenBionics (핀란드)	폐기물 발효 기반Bacterial Cellulose	BioCel™	식품·사료용 기능성 섬유소로 개발 중; 폐자원 순환형 바이오매스 생산 시스템
ZymoChem / Spiber 협력체 (미국·일본)	대사공학 균주 기반 셀룰로오스 전구체 생산	Microbial Cellulose Fiber Prototype	Fiber Prototype 대체 조사료 및 바이오소재용 섬유; 단백질·지방·섬유소 복합 원료화 시범 단계

– 또한 산업동물 분야에서는 마이크로바이옴 제어가 생산성, 질병 저항성, 사료효율 등 경제적 가치와 직접 연결되기 때문에 AI 기반 분석기술 도입이 빠르게 진행되고 있으며, 최근에는 숙주 유전체와 장내 미생물군의 상호작용을 통합적으로 해석하는 hologenomics 접근을 통해 개체별 건강 모니터링, 맞춤형 사료 배합 및 생산체계 최적화로 확장되고 있음.

○ Microbiome 기능해석 및 데이터 플랫폼 산업 고도화

– 글로벌 microbiome 산업은 기존 프로바이오틱스 및 기능성 미생물 소재 중심에서 microbiome 데이터 기반 기능 예측과 AI 플랫폼 중심 산업으로 빠르게 전환되고 있음. 작물 microbiome 시장은 2024년 약 34.5억 달러에서 2033년 약 101.2억 달러 규모로 성장할 것으로 전망되며, 연평균 성장률은 약 12% 수준으로 예측되고 있음.

- 동물 microbiome 시장 역시 장내 microbiome 기반 생산성 향상, 메탄 저감 기술, 친환경 사료원료 개발 수요 증가와 함께 확대되고 있으며, 2033년 약 45억 달러 규모까지 성장할 것으로 전망됨. 특히 반추위 microbiome 기반 메탄 저감 기술과 methane-utilizing microbial protein 생산기술은 차세대 친환경 축산 분야로 주목받고 있음.
- 미국과 유럽을 중심으로 shotgun metagenomics, metabolomics, host transcriptomics를 통합한 microbiome-metabolome-host 분석기술이 고도화되고 있으며, host-microbiome interaction 및 metabolic flux 기반 기능해석 기술이 핵심 산업기술로 부상하고 있음.
- 이에 따라 BASF, Bayer, Indigo Ag, DSM-Firmenich 등 글로벌 기업들은 microbiome reference database 구축과 AI 기반 기능 예측 플랫폼을 미래 바이오 산업의 주요 경쟁 영역으로 인식하고 투자를 확대하고 있음.

1.2 국내 산업 동향

○ 멀티오믹스 기반 마이크로바이옴 산업화 연구 확대

- 국내 microbiome 산업은 프로바이오틱스 및 기능성 미생물 제제 중심 시장에서, multi-omics 기반 기능해석 및 데이터 활용 중심 산업으로 점차 확대되고 있음. 정부의 녹색바이오 및 디지털 농축산 정책과 연계하여 microbiome 기반 정밀 농축산 기술 개발도 활발히 추진되고 있음
- 최근에는 metagenomics와 metabolomics를 결합하여 microbiome 기능을 해석하려는 연구와 microbiome-metabolome-host 통합 분석 연구가 증가하는 추세임. 축산 분야에서는 반추위 microbiome 기반 메탄 저감 기술과 장내 microbiome 기반 생산성 향상 기술이 주요 산업화 분야로 부각되고 있음
- 국내 기업 및 연구기관들은 장내 microbiome 기반 기능성 사료첨가제, 메탄 저감 미생물 소재 및 microbiome 데이터 기반 정밀 사양관리 기술 개발을 추진하고 있음. 또한 AI 기반 microbiome 분석 플랫폼과 데이터 통합 기술 개발 연구도 확대되는 추세임
- 하지만 국내의 경우 host-microbiome interaction 기반 기능 예측 및 metabolic flux 기반 microbiome 기능해석 기술은 아직 초기 연구 단계 수준이며, 해외 reference 기반 분석 의존도가 높은 상황임. 따라서 국내 기후 · 토양 · 사육환경에 특화된 microbiome 데이터 구축 및 산업화 확대가 필요함

2 국내외 정책 동향

2.1 국외 정책 동향

○ 식물 마이크로바이옴

- 미국은 2016년 국가 마이크로바이옴 이니셔티브를 출범시켜 범부처 차원에서 마이크로바이옴 연구에 대규모 투자를 진행. 농무부와 에너지부를 중심으로 토양 마이크로바이옴의 탄소 저장 기능과 온실가스 순환 조절 메커니즘 연구가 활발히 진행되고 있으며, 기후변화 시나리오에 따른 토양 미생물 군집의 변화 예측 연구가 수행 중. 하버드 의대와 암웨이가 공동 개발한 'Minerva' 플랫폼은 GPT 기반 대규모 언어 모델을 활용하여 마이크로바이옴 데이터를 심층 분석하고, 지식 그래프 기술을 활용하여 미생물–숙주–환경 간의 복잡한 인과 관계를 모델링
- 유럽연합은 호라이즌 프로그램을 통해 대규모 환경미생물 진단 연구를 수행하고 있으며, 메타지놈과 대사경로 분석 기반의 기능성 미생물 군집 설계 기술 선도. 특히 정밀농업과 연계하여 토양 건강 모니터링 센서 개발, 실시간 마이크로바이옴 분석 기술, 그리고 이를 기반으로 한 의사결정 지원 시스템 구축이 진행 중. 유럽 바이오인포매틱스 연구소를 중심으로 MGnify 데이터베이스가 구축되어 전 세계의 마이크로바이옴 데이터를 통합 관리
- 화학 비료 20% 감축 규제('Farm to Fork') 등 친환경 생물 솔루션 도입 압박 전방위 확산
- EU 규정(Regulation 2019/1009)에 의거, 식물 성장을 촉진하고 스트레스를 완화하는 생물제제를 농약이 아닌 '비료(Biostimulant)' 범주로 명확히 고시
- (미국) USDA–NIFA의 'Plant Biotic Interactions' 및 'Plant–Biotic Interactions for Soil Health' 프로그램에서 작물 스트레스 조기 진단 · 미생물 처방 분야에 대한 다부처 매칭 펀딩 운영. FDA · EPA는 '미생물 농약(Biopesticide)'을 별도 카테고리로 신속 등록 트랙(120일 이내 심사) 적용하여 진단 기반 처방 제제의 시장 진입 가속화
- (EU) 'Soil Mission' 및 'Farm to Fork' 전략 하에 2030년까지 농약 사용량 50% 감축 목표를 명시하면서, 진단 기반 정밀 살포(Precision Application) 의무화 검토. EU Regulation 2019/1009에서 식물 스트레스 완화 · 생장 촉진 미생물을 '비료(Plant Biostimulant)'로 분류하여 진단 · 처방 패키지의 인허가 일원화 기반 마련
- (일본) 농림수산성 녹색 식료 시스템 전략 에서 2050년까지 화학 농약 50% · 비료 30% 감축 목표를 설정하고, 토양 · 작물 진단 기반 변량 시비 · 살포 보조금 지급. 휴대형 진단키트 농가 보급 시범사업 확대
- (호주 · 캐나다) 곡물 · 유채 등 광역 노지 작물 대상으로 항공 살포 · 드론과 연계된 마이크로

바이옴 진단–처방 시범 사업에 농가 직불금 연계, 작물 보험(crop insurance) 할인 인센티브 부여

○ 동물 마이크로바이옴(축산)

– 국외 주요국은 동물 microbiome을 지속가능 축산과 정밀축산 구현을 위한 핵심 기술로 인식하고 있음. 미국은 USDA–NIFA를 중심으로 동물 phenomics, microbiome, 사료효율, 질병저항성 및 반추위 메탄저감 연구를 지원하고 있으며, 유럽연합은 Horizon Europe, Farm to Fork 및 HoloRuminant 등을 통해 숙주 유전형–반추위 microbiome–사료효율–메탄배출–건강 형질을 통합 분석하는 기술을 개발하고 있음.

– 호주 · 뉴질랜드 · 캐나다는 Asparagopsis, 3–NOP, 메탄 생성 억제제, 저메탄 가축 선발, rumen microbial catalog 및 machine learning 기반 예측모델을 활용한 메탄저감 기술을 추진하고 있으며, 일본은 녹색 식량 시스템 전략을 바탕으로 cashew nut shell liquid 등 사료첨가제 기반 저탄소 축산 기술을 제시하고 있음.

– 이러한 흐름은 동물 microbiome 연구가 생균제 개발을 넘어 사료효율, 질병저항성, 항생제 저감, 메탄배출 완화, 축산물 안전성 및 정밀축산 의사결정 기술로 확장되고 있음을 보여줌.

2.2 국내 정책 동향

○ 식물 마이크로바이옴

– 과기부, 농식품부, 농진청 주도로 작물 비생물적 스트레스 완화 및 화상병 방제 중심의 전략 R&D 자금 투입

– 전통적인 제조 공정 중심 규제에 머물러 있음. 현행 비료관리법 시행규칙상 투입 원료와 엄격한 투입 비율 장부 작성을 요구

– (R&D 정책) 농촌진흥청 · 과기부 공동 '작물 스트레스 제어 마이크로바이옴 조절 기술' 사업이 진행 중이나 진단 · 처방을 통합한 closed–loop 운용 사업은 부재. 농식품부의 '스마트농업 육성 기본계획' 내 정밀농업 항목과 농진청의 마이크로바이옴 R&D 간 연계 강화 필요

– (규제 · 인증) 「비료관리법」상 미생물 비료는 균종 · 균수 · 원료 중심의 사전 등록제이고, 「농약관리법」상 미생물 농약은 효능 · 독성 시험 기반 등록제로 이원화. 진단키트는 의료기기 또는 시험 · 검정 장비 분류로 별도 트랙 → 진단 · 처방 통합 패키지 인허가 통합 트랙 신설 필요

– (보급 · 지원) 농업기술센터(전국 158개소)를 거점으로 한 진단 컨설팅 시범사업이 일부 도 단위에서 진행 중이며, 작물보호제 · 비료 보조금과 별도로 '정밀 진단 · 처방 서비스 바우처' 도입 검토 단계

– (데이터 거버넌스) 농진청 NABIC · KACC 자원과 연계한 국가 작물 마이크로바이옴 데이터 표준화 사업이 추진 중이나, 농가 단위 재진단 데이터 수집 · 활용을 위한 법적 근거(가칭「농업데이터 활용 촉진법」) 미비

○ 동물 마이크로바이옴

– (R&D 정책) 산업동물 마이크로바이옴 자원 · 데이터 인프라 구축과 생산성 향상 · 메탄저감 R&D가 추진되고 있으며, 향후 통합 기능예측 및 정밀축산 DSS로 고도화가 필요함.

– (규제 · 인증) 저메탄사료 기준을 넘어 차세대 마이크로바이옴 소재의 효능, 안전성, 잔류성, 항생제 내성 평가체계 정립이 필요함.

– (보급 · 지원) 저메탄 · 질소저감 사료 지원에서 농가 단위 진단, 질병위험 평가, 사료효율 예측, 메탄저감 컨설팅으로 확대가 필요함.

– (데이터 거버넌스) 마이크로바이옴, 사료, 항생제, 질병, 생산성, 메탄배출 데이터를 표준화하고 국가 DB 및 활용 기준과 연계할 필요가 있음.

Ⅴ. 결론 및 제언

1 주요 동향 및 시사점

○ 기술 발전의 핵심 특징: 데이터 기반 자동화 연구체계로의 전환

– 기존의 경험적 균주 선발과 단일 데이터 중심 분석에서 벗어나, 멀티오믹스 데이터와 기후 · 환경 변수를 통합하여 미생물 기능과 상호작용을 예측하는 데이터 기반 분석체계로 발전하고 있음.

– 학술문헌, 공공 데이터베이스, 실험 데이터를 연계한 지식 기반 분석을 통해 유용 미생물 조합을 탐색하고, 목적 기능을 가진 인공 미생물 군집(SynCom) 설계 가능성을 높이는 방향으로 기술이 고도화되고 있음.

– 디지털 트윈 기반 가상 실험, 바이오파운드리의 고처리량(HTS) 실험 인프라, 자동화 검증 시스템을 연계하여 가설 수립-실험-검증-개량 과정을 반복적으로 개선하는 연구개발 체계로 전환되고 있음.

○ 농업 및 그린바이오 산업에 미치는 영향: 필드 재현성 극복 및 탄소 경제 융합

– 가변적인 실제 농가 포장 환경 변수를 설계 모델에 실시간으로 피드백함으로서 실험실 제제가 현장에서 나타내던 극심한 효능편차와 성능 리스크 극복

– 작물 뿌리에 정착하여 대기 중 질소를 고정하고 토양 내 불용성 인산을 가용화하는 맞춤형 미생물 처방을 통해 값비싼 화학비료의 유실 방지 및 대체 가능성 탐색

– 미생물 솔루션을 통한 식물 뿌리 발달 촉진으로 토양 내 유기 탄소 격리 능력을 극대화하고, 데이터 기반 플랫폼과 결합한 신뢰도 높은 토양 탄소 크레딧 발행 기반의 신규 배출권 수익 모델 창출

○ 연구 및 비즈니스 생태계의 구조적 변화: 홀로바이온트 패러다임과 완전 자동화(그림 17)

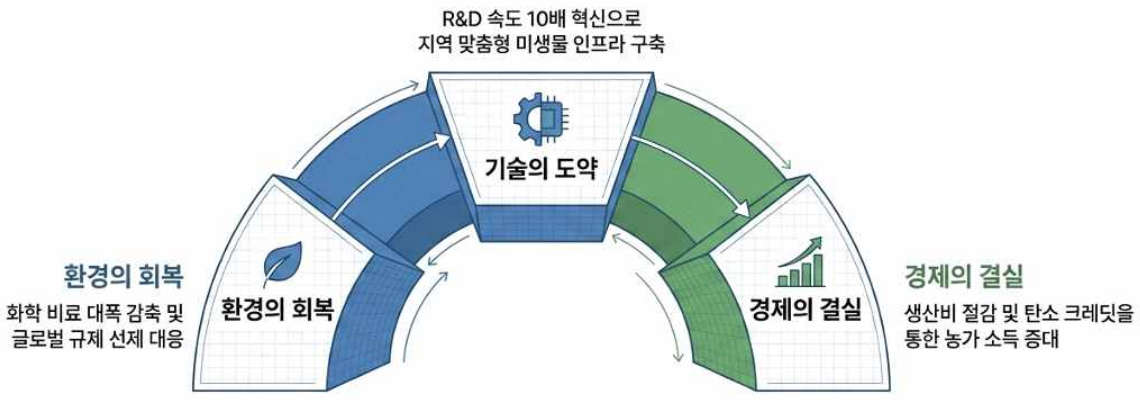


그림 17. AI 정밀 농업이 그리는 지속 가능한 선순환 생태계

- 식물 단독의 개량이나 화학 투입재 위주의 인위적 환경 조절에서 벗어나, 작물과 미생물을 하나의 통합 유기체로 제어하는 '홀로바이온트' 중심으로의 패러다임 전환
- 단순 미생물 살포 단계를 넘어 유익균을 스스로 모집하는 식물 유전자 개량 및 유익 미생물을 종자 내부에 패키징하여 출시하는 일체형 통합 육종 기술로의 비즈니스 모델 고도화
- 기능 중심 규제를 강화하는 유럽연합 등의 글로벌 인허가 트렌드 변화에 발맞추어, 수동 스크리닝 중심의 전통적인 바이오 연구소를 플랫폼 기반 데이터 지향형 자율 연구 파운드리로 체질 개선

○ 진단 · 처방 기술의 핵심 특징: 사후 대응에서 사전 진단 · 정밀 처방으로(그림 18)
- 가시 증상 발현 후 화학 농약 · 비료 일률 살포에 의존하던 전통적 작물 스트레스 대응이, 휴대형 NGS · LAMP · 바이오센서 기반 현장 즉시 진단과 AI DSS 처방으로 진화하면서, 스트레스 대응 시점이 평균 7~14일 이상 앞당겨지고 화학자재 투입량 30~50% 감축 가능성 확보
- 단일 병원체 PCR · 화학지표 분석에 머물던 진단 체계가, 작물 · 스트레스별 미생물 바이오마커 라이브러리와 멀티오믹스 통합 진단으로 전환되어 생물적 · 비생물적 스트레스를 동시에 정량 평가하는 통합 진단(integrative diagnostics) 패러다임 형성

○ 농업 및 그린바이오 산업에 미치는 영향 : 농가 운용성과 환경 안전성의 동시 확보(그림 18)
- 진단-처방-적용-재검증 closed-loop 운용 체계가 농가 단위로 보편화되면, 동일 처방의 효능 재현성이 누적 학습으로 지속 향상되어 미생물 제제의 가장 큰 약점인 '필드 재현성 편차' 문제를 구조적으로 해소
- 미량원소(Se · Zn · Fe) 강화 미생물을 활용한 기능성 · 고품질 농산물 생산이 정밀 진단 · 처방 인프라와 결합되면서, 단순 생산성 향상을 넘어 '진단 기반 인증 농산물' 등 고부가가치 시장 창출

○ 연구 · 비즈니스 생태계의 구조적 변화 : 솔루션 통합형 정밀 농업 서비스 등장(그림 18)
- 진단키트(하드웨어) + 처방 DSS(소프트웨어) + 인증 미생물 제제(소모품)를 묶은 구독형 정밀 농업 서비스(Precision Microbiome-as-a-Service) 모델이 등장, 전통적 농약 · 비료 제조 단일 비즈니스에서 데이터 · 서비스 결합형 비즈니스로 산업 구조 재편



그림 18. 작물 스트레스 진단 · 처방 기술의 주요 동향 및 시사점

○ 동물마이크로바이옴 기술의 핵심 특징: 장내균총 분석에서 정밀축산 플랫폼으로 전환

– 동물마이크로바이옴 연구는 단순한 장내 · 반추위 미생물 조성 분석과 생균제 후보 선발을 넘어, 멀티오믹스 데이터, 면역지표 및 생산성 형질을 통합 해석하는 기능예측 중심 연구로 전환되고 있음.

– 특히 장내 · 반추위 마이크로바이옴 변화가 사료효율, 질병저항성, 메탄배출을 포함 생리학적으로 미치는 영향을 host–microbiome interaction 관점에서 해석하는 기술이 핵심 연구축으로 부상하고 있음.

– 향후에는 metabolic flux/FBA 기반 커뮤니티 모델링, 디지털 트윈 기반 사양관리 기술과 결합하여 개체 · 농장 · 축종별 맞춤형 미생물 제어전략을 설계하는 정밀축산 플랫폼으로 발전할 필요가 있음.

○ 축산 및 그린바이오 산업에 미치는 영향: 생산성 향상과 저탄소 축산의 동시 달성

– 동물마이크로바이옴 기술은 사료효율 개선, 장건강 증진, 질병 감수성 및 항생제 사용 저감, 생산성 향상과 함께 반추위 methanogenesis pathway 조절을 통한 메탄배출 완화를 동시에 달성할 수 있는 핵심 기반기술로 평가됨.

– 특히 반추위 마이크로바이옴 기반 메탄저감 기술은 저메탄 사료전략, 기능성 사료첨가제, 저메탄 개체 선발 보조지표 및 정밀 사양관리 기술과 연계되어 탄소중립 축산의 핵심 수단으로 확장될 수 있음.
– 장기적으로는 probiotic, prebiotic, postbiotic, 항생제 대체 소재, 메탄저감 소재, 마이크로바이옴 진단 서비스, AI 기반 정밀축산 DSS가 결합된 데이터 · 소재 · 서비스 융합형 산업구조로 발전할 것으로 예상됨.

2 정책 및 R&D 전략

2.1 R&D 투자 방향

○ 식물마이크로바이옴 분야 연구개발 R&D 투자 방향은 그림 19와 같이 제안함.

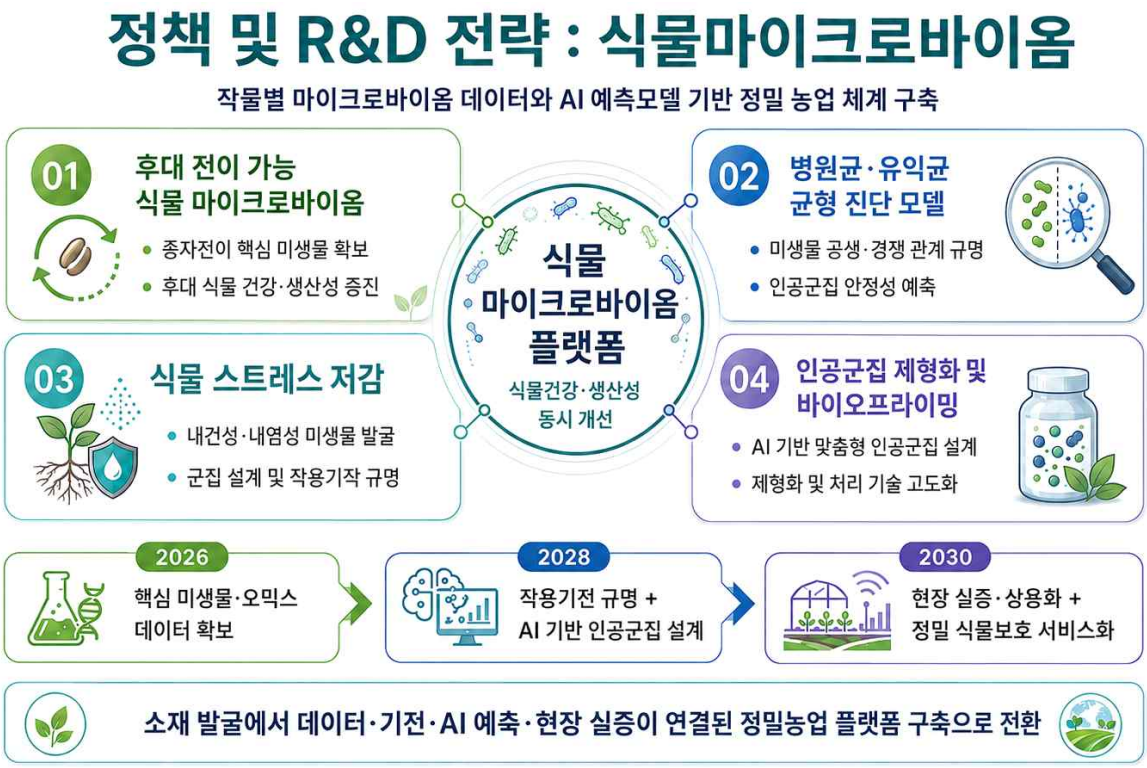


그림 19. 식물바이크로바이옴 정책 및 R&D 투자 전략 및 방향

① AI 에이전트 기반 맞춤형 인공 마이크로바이옴 설계
– 미생물 간의 공생/경쟁 관계를 정밀 추론하는 G2E 프레임워크 개발
– 인공미생물 군집(SynCom) 조합의 안정성을 사전 예측하는 대사 플럭스 분석(FBA) 모델 고도화

- LLM 기반 학술 논문 및 멀티오믹스 데이터를 자율 수집 및 추론하는 AI 과학자 에이전트 알고리즘 R&D
- AI 가설 생성, 실험 설계, 로봇 기반의 자동 실험, 데이터 피드백을 통한 재학습으로 이어지는 자율 루프 시스템 구축
- 초고속 대량 스크리닝(HTS) 및 표현형 분석 자동화
- 실험실 환경을 모사하는 디지털 트윈 가상 가동 기술
- 로봇 기반의 균주 자동 배양 및 식물체 표현형 고속 분석 장비 국산화

② 작물 스트레스 정밀 진단 및 처방 기술 개발
- (현장 진단) 작물별 · 스트레스별 진단 마커 패널 표준화 및 휴대형 NGS · LAMP · 전기화학-광학 융합 바이오센서 국산화. 농가 보급형 정밀 진단키트 단가 1~3만 원대 달성
- (AI 진단 모델) 작물-토양-기후 멀티오믹스 통합 학습 모델 개발, pre-symptomatic 조기 경보 정확도 80% 이상, 작물 · 스트레스별 진단 정확도 90% 이상
- (맞춤형 처방 엔진) 토착 · SynCom · 종자 코팅 · 미량원소(Se · Zn · Fe) 강화 미생물을 진단 결과 기반으로 자동 매칭하는 의사결정 지원 시스템(DSS) 구축
- (폐쇄순환 운용) 진단-처방-적용-재검증 closed-loop 표준 프로토콜 정립, 농업기술센터 거점 100개소 시범 운용 → 전국 확산
- (인력 양성) 농업 마이크로바이옴 분석 · 컨설팅 전문가(가칭 'AgMicro Practitioner') 자격 신설 및 농업기술센터 보급기관 우선 배치

③ 작물의 건강과 생산성 증대를 위한 마이크로바이옴 활용기술 개발
- 미생물 전이기작 구명을 통한 유전 가능한 식물 마이크로바이옴 발굴 및 유용형질 증진기술 개발
- 다양한 미생물 군집간 상호작용을 이용한 식물 재배 환경 정밀 제어 기술 개발
- 식물건강 증진을 위한 AI 활용 마이크로바이옴 군집 디자인 및 상용화 기술 개발

④ 작물 스트레스(병/해충/환경) 저감 및 고부가 활성 물질 증대를 위한 마이크로바이옴 활용 기술 개발
- (병/해충) 토양/식물 마이크로바이옴 기반 AI를 활용한 핵심 미생물 발굴 및 인공 군집(consortium) 개발 및 실용화
- (환경) 작물의 스트레스(온도, 염류 등)를 저감하는 마이크로바이옴 핵심구조 구명 및 인공 군집 설계와 활용
- (활성물질) 작물의 고부가 유용 활성물질 생산 증대를 위한 마이크로바이옴 개발 및 실용화

⑤ 농경지 토양 질 개선 및 토양 방출 온실가스 조절용 마이크로바이옴 활용 기술 개발

– (토양질) 토양내 양분(N, P) 순환과 관련된 마이크로바이옴 분석 및 작물 맞춤형 토양 마이크로바이옴 조절기술 개발
– (온실가스) 농경지 토양에서 방출되는 온실가스(N2O, CH4 등) 저감을 위한 마이크로바이옴 활용 기술
– (토양정화) 토양 마이크로바이옴을 활용한 토양내 오염 물질(플라스틱 등)의 정화 기술 개발

○ 축산 마이크로바이옴 분야 연구개발 R&D 투자 방향은 그림 20와 같이 제안함.



그림 20. 동물(축산)바이크로바이옴 정책 및 R&D 투자 전략 및 방향

① 미생물 전이기작 규명을 통한 유전 가능한 동물 마이크로바이옴 발굴 및 유용형질 증진기술 개발
– (유전가능한 마이크로바이옴) 정밀영양소 조절을 통한 유전가능한 마이크로바이옴 실물자원 확보 및 특성 규명
– (모체–신생개체 수직전이 기전) 미생물 전이기전을 통한 모체–신생개체 상호작용 및 생산성/강건성 영향도 평가
– (가축 유용형질 향상) 유전가능한 마이크로바이옴을 이용한 가축 산자능력, 생산형질 및 강건성 증진 상용화 기술 개발

② 마이크로바이옴 활용 축산용 미생물 대체사료 원료 소재 고도화 및 상용화 기술 개발

- (미생물 대체사료원료) 미생물 균체 유래의 대체사료원료 (단백질 및 지방) 생산을 위한 최적 식용 미생물 후보군 확립
- (대량생산 및 표준화) 미생물 유래 대체 단백질/유지 생산을 위한 고농도 · 대량 배양조건 탐색 및 표준화
- (유효성 검증) 미생물 유래 대체 단백질/유지의 사료화 공정 확립 및 가축내 영양대사 생체 유효성 검증

③ 한국형 동물복지 실현을 위한 스트레스 저감 마이크로바이옴 활용기술 및 친환경 공생화 시스템 개발

- (한국형 동물복지) 장건강 기능성 동물마이크로바이옴 실물자원 라이브러리 구축 및 특성 규명
- (스트레스 저감 작용기전) 동물복지 고도화를 위한 동물마이크로바이옴 후보균주의 스트레스 저감 장-뇌축 작용기작 규명
- (친환경 공생화) 한국형 동물복지 실현을 위한 동물마이크로바이옴 상용화 기술 개발

④ 동물건강 증진을 위한 마이크로바이옴 기반 AI 질환 정밀 예측모델 구축 및 상용화 기술 개발

- (오믹스 분석) 마이크로바이옴, 대사체 통합 분석 플랫폼 구축
- (통합 데이터베이스) 유전체, 전사체, 대사체 상호 유기적 활용을 위한 통합 데이터 활용기술 구축
- (AI 활용기술) AI를 활용한 질환 정밀예측 및 조기진단 시제품 개발

○ 농생명 마이크로바이옴 서비스 기반 구축 분야

① 마이크로바이옴 자원화를 위한 농업적 활용 서비스 기반 구축

- (표준화) 농생명 마이크로바이옴 데이터 활용을 위한 마이크로바이옴 연구전과정 표준화 및 DB 구축
- (서비스) 농생명 마이크로바이옴의 보존 시료 및 데이터 활용 서비스 기반 구축

◘ **AI 기술과 접목하여 동 · 식물 주요 대상 형질 개선을 위한 맞춤형 인공군집 설계 및 현장 실증을 최우선 R&D 목표로 설정**하고, 이를 위해 동 · 식물 주요 형질 관련 핵심 미생물 및 오믹스 데이터 확보, 마이크로바이옴의 작용기전 규명, AI 활용 인공군집 설계 및 현장 실증, 그리고 활용 서비스 기반 구축에 집중.

2.2 기술 확산 및 산업화 전략

○ 현장 재현성 리스크를 극복하고 고부가가치 탄소 시장과 연계한 비즈니스 모델 확산 (그림 21)

- 실험실 환경을 넘어 가변적인 실제 농가 토양(pH, 습도, 기후 등)에서의 효능 데이터를 대량 확보

– 포장 변수를 AI에 피드백하여 기후 맞춤형 인공 미생물 군집 처방 정밀도 향상
– 작물 종자 코팅 및 시비용 질소 고정 맞춤형 미생물 제제를 적극 보급하여 값비싼 화학 비료 사용량 감축 규제 선제 대응
– 패러다임 전환을 통한 농가 생산비 절감 및 지속 가능한 그린바이오 비즈니스 모델 구현
– 마이크로바이옴 제제를 활용한 식물 뿌리 발달 및 토양 내 탄소 격리 능력 극대화
– 측정/보고/검증 플랫폼과 결합하여 농가에 '토양 탄소 크레딧' 기반의 신규 부가 수익원 제공

○ 진단-처방 통합 서비스 모델 보급을 통한 정밀 농업 시장 창출(그림 21)



그림 21. 현장 검증부터 글로벌 탄소 경제 융합에 이르는 기술 확산 및 산업화 단계

– (서비스 모델) 진단키트 + DSS 구독 + 인증 미생물 제제를 묶은 'Precision Microbiome-as-a-Service' 모델을 농업기술센터 · 작목반 · 민간 컨설팅사 중심으로 보급. 농가는 별도 전문 장비 없이도 회당 진단 · 처방 패키지를 정찰 가격으로 구매 가능
– (보급 채널) 농촌진흥청 농업기술센터(158개소) 거점화, 농협 영농지도사 연계 컨설팅, 작물 보호제 판매업체와의 보완 채널 구축. 시범 도입 농가에 농작물 재해보험료 할인 · 친환경농산물 인증 가점 인센티브 부여
– (고부가가치 연계) 미량원소(Se · Zn · Fe) 강화 미생물 처방을 통한 기능성 농산물 생산 → 진단 이력 기반 '정밀 진단 인증 농산물' 별도 유통 채널 구축, 가격 프리미엄 10~20% 확보
– (글로벌 수출) 진단키트 · DSS 서비스 패키지를 동남아(베트남 · 태국 · 인도네시아) · 중동(UAE · 사우디)의 기후 스트레스 취약 작물 재배지로 K-AgriBio 모델로 수출. ODA 연계 시범 보급으로 표준 선점

○ 정밀 축산에 활용가능한 마이크로바이옴 산업 확장

– 축종별 멀티오믹스 데이터 기반 디지털 트윈 개발을 활용한 사양관리 및 질환 예측 서비스 구축

– 기능성 사료첨가제 및 저메탄 축산용 마이크로바이옴 소재 상용화

– AI 기반 마이크로바이옴 분석 플랫폼을 활용한 데이터 기반 정밀 축산 서비스 확대

○ 현장 적용형 AI · 마이크로바이옴 서비스 고도화

– 생산성 · 질병 · 환경부하 통합 예측 기반 의사결정 지원 시스템 구축

– 농가 맞춤형 정밀 영양관리 및 건강 모니터링 서비스 개발 및 운영

– 현장 데이터 기반 지속형 AI 고도화 및 예측 시스템 운영

◘ 마이크로바이옴 활용 현장 재현성 확보 및 처방 고도화를 통해 **친환경 처방법으로서의 마이크로바이옴/인공군집 처방 기술 적용 범위를 확장**하고, 이를 탄소/매탄 저감을 통한 탄소경제와 융합하여 정밀 농 · 축산 시장 창출 생태계 조성이 필요.

2.3 기반 구축 및 제도 개선

○ 공공 섹터 주도의 고신뢰도 멀티오믹스 통합 DB 뱅크(그림 22)

– 부처별로 산재된 식물, 미생물 유전체, 메타유전체(전사체), 전국 토양 기후 데이터를 통합 연계

– AI 에이전트가 정밀 학습할 수 있는 오픈 데이터 표준화 프레임워크 정립

○ 국가급 공유형 바이오 파운드리 인프라 확충(그림 22)

– 민간 생태계와 스타트업이 공동 활용할 수 있는 거점별 스마트 자동화 실험실 및 초고속 검증 랩 시설 확충

○ 성분 가이드라인 탈피, ‘기능(function) 중심’의 신속 인허가 제도(그림 22)

– 현행 비료관리법 시행규칙의 원료 성분/장부 중심 규제에서 유연하게 시프트

– EU 모델을 벤치마킹하여, AI가 설계한 복합 미생물 군집의 유용성과 기능성을 검증해 시장 진입을 패스트트랙으로 지원하는 규제 샌드박스 도입



그림. 22 국가 데이터 인프라와 규제 혁신을 통한 기반 구축 및 제도 개선

○ 진단 · 처방 통합 인허가 트랙 신설 및 데이터 거버넌스 정비(그림 22)

– (통합 인허가 트랙 신설) 현행 비료관리법(미생물 비료) · 농약관리법(미생물 농약) · 의료기기 또는 시험 · 검정 장비(진단키트) 이원 · 삼원 규제를 통합한 '농업 마이크로바이옴 진단 · 처방 솔루션' 단일 인허가 트랙 신설. EU Regulation 2019/1009의 '기능 중심 분류' 모델 벤치마킹

– (국가 진단 마커 · 미생물 라이브러리) KACC · NABIC을 모(母) 기관으로 한 'K-Microbiome Diagnostic Library' 구축. 작물 · 스트레스 조합별 표준 바이오마커 패널 및 reference cut-off 값 국가 표준 고시

– (closed-loop 데이터 거버넌스) 농가 단위 재진단 · 처방 효능 데이터의 소유권 · 활용 권한 · 국가 DB 연계 규정 정립을 위한 「농업데이터 활용 촉진법」(가칭) 제정. 농가 동의 기반 익명화 · 연합학습 방식의 자율 운용 루프 학습 데이터 축적 체계 구축

– (전문 인력 양성) 농업 마이크로바이옴 분석 · 진단 · 처방 전문가 자격(가칭 'AgMicro Practitioner') 신설, 농촌진흥청 · 농수산대 · 관련 학과 연계 정규 교육과정 운영. 농업기술센터 보급기관 · 작물보호제 판매업소 우선 배치

– (인프라 확충) 권역별(영남 · 호남 · 중부 · 강원) 정밀 진단 · 검증 거점 랩(Reference Lab)

5개소 구축, 진단키트 · 바이오센서 표준 평가 · 키트 간 진단 일관성 인증 기능 수행

○ 데이터 중심 농생명 마이크로바이옴 인프라 고도화

– 축종별 마이크로바이옴–대사체–숙주 국가 데이터베이스 및 실물자원 뱅크 구축

– 메타게놈 · 대사체 분석 표준화 및 데이터 연계 체계 구축

– 탄소중립 및 스마트축산 정책과 연계한 범부처 추진전략 수립

○ 마이크로바이옴 연구 · 활용 기반 강화

– 학계–산업계–정부 연계 실증 및 융합 연구 생태계 조성

– 마이크로바이옴 · AI 융합 전문인력 양성 및 교육 체계 구축

– 데이터 공유 기반 공동 연구 및 산업 협력 네트워크 확대

국가차원의 농생명 마이크로바이옴 통합 DB 구축 및 표준화, 기능 중심의 유연한 규제로 제도 개편, 그리고 농생명 마이크로바이옴 활용 신제품 인허가 트랙 신설 및 데이터 거버넌스 정비, 전문인력 양성 및 산학연 협력 강화 필요.

참고문헌

○ Arshad MF, Ahmed F, Nonnis F, Tamponi C, Scala A, Varcasia A. Artificial intelligence and companion animals: Perspectives on digital healthcare for dogs, cats, and pet ownership. Res Vet Sci. 2025 Sep;193:105776.

○ FAO. (2024). The State of Food and Agriculture 2024. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

○ Gerber GK. AI in microbiome research: Where have we been, where are we going? Cell Host & Microbe. 2024. 32(8):1230–1234.

○ KISTEP. (2025). 2025 KISTEP 10대 미래유망기술. 한국과학기술기획평가원.

○ Trivedi et al. 2021, New Phytologist 230: 2129–2147

○ Verified market reports(https://www.verifiedmarketreports.com/product/crop–microbiome–market/

○ 국가 마이크로바이옴 이니셔티브 상세기획연구 (국가연구재단, plan.nrf.re.kr, 2022)

○ 국내외 마이크로바이옴 시장 및 기술개발 동향, 2025(rebook.kr, 2025–03–30)

○ 글로벌 마이크로바이옴 시장 및 기술개발 동향과 사업화 전략, 2025 (irsglobal.com, 2025–03–06)

○ 글로벌 마이크로바이옴 시장 및 기술개발 동향과 전망, 2025(techforum.co.kr, 2025–05–06)

○ 기술혁신식물 마이크로바이옴 엔지니어링(bics.re.kr, 2024–11–26)

○ 농림축산식품부. (2024). 제1차 스마트농업 육성 기본계획.
○ 농생명 마이크로바이옴 혁신기술 개발 사업(scienceon.kisti.re.kr, 2024-10-29)
○ 농생명 마이크로바이옴 혁신기술 개발 사업(scienceon.kisti.re.kr, 2024-10-29)[보고서]
○ 농업 마이크로바이옴 시장 분석 및 예측 2032(wiseguyreports.com, 2024-08-21)
○ 농촌진흥청. (2024). 농업R&D 중장기 추진 방향.
○ 디지털육종기반 종자산업 혁신기술개발사업 (KISTEP, kistep.re.kr)
○ 마이크로바이옴 빅데이터 활용과 실용화 전략 모색 (kdca.go.kr, 2025-08-21)
○ 마이크로바이옴 빅데이터 활용과 실용화 전략 모색 (질병관리청, kdca.go.kr, 2025-08)
○ 마이크로바이옴 치료제: 현재의 연구 동향과 미래 전망 (BRIC, 2024-11)
○ 마이크로바이옴: 국내외 동향, 자원화 및 산업화(bioin.or.kr, 2024-12-15)
○ 미생물 유전체 연구와 동향 (질병관리청, kdca.go.kr)
○ 바이오 미래유망기술(하), 토양 마이크로바이옴 연구, 2023(bioin.or.kr, 2023-05-31)
○ 바이오인포매틱스 정보 - 마이크로바이옴 (Bioin.or.kr, 2024)
○ 식물 건강 도우미 '마이크로바이옴', 재밌는 농업미생물 이야기 (blog.naver.com, 2022-12-20)
○ 식물 마이크로바이옴 엔지니어링 관련 기술개요 및 시사점(bioin.or.kr, 2021-06-27)
○ 식물을 이해하는 또 다른 방법(nongsaro.go.kr, 2017-09-26)[RDA인테리뱅]
○ 이영희 · 박민수. (2023). 디지털육종 기술의 발전과 농업 적용 가능성. 농업생명과학연구, 57(3), 45-62.
○ 인간 마이크로바이옴 시장 규모, 점유율 및 성장 보고서 2035 (researchnester.com, 2025-10-09)
○ 인공지능 기반 마이크로바이옴 최신 연구동향 및 전망 (bioin.or.kr, 2025-06-19)
○ 인공지능(AI)와 마이크로바이옴: 현대 생명과학의 혁신적 접목 (seo.goover.ai, 2025-02-11)
○ 인공지능과 마이크로바이옴의 만남: 최신 연구 동향과 미래 (welgene.com, 2025-05-29)
○ 토양 마이크로바이옴 개질을 통한 온실가스 배출량 저감 및 질소비료 효율 증진 (scienceon.kisti.re.kr)[보고서]
○ 토양 마이크로바이옴Biocrusts microbiome](bics.re.kr, 2024-11-26)
○ 학문연구의 동향과 쟁점: 농학 · 축산학, 2021
○ 해양 마이크로바이옴 기반 생태환경관리 기술 개발, 2025(kimst.re.kr, 2025)

6. 푸드테크

AI·바이오 기반 미래 식품시스템 혁신기술

조철훈(한국농식품생명과학협회, 서울대학교) / **이기원**(한국식품과학회, 서울대학교) /
이현정(한국축산식품학회, 서울대학교)

Ⅰ. 서론

1 기술분야 개요



그림 1. 푸드테크 정의 및 역할

○ 푸드테크(Food Tech)란 식품(Food)과 기술(Technology)의 합성어로(그림 1), 2010년 전후부터 새롭게 등장한 용어임.

– (협의) 식품의 생산 · 유통 · 소비 전 과정에 IT · BT · AI 등의 첨단 기술을 융합하여 먹는 것과 관련된 문제를 해결하는 창발(創發) 기술을 정의함.

– (광의) 농업 및 제조업, 서비스업 등의 관련 전후방 산업을 포괄하는 개념으로 농업 푸드테크(Agri-Food Tech)로도 불림.

표 1. 국내외 분야별 푸드테크 정의

출처	정의
푸드테크산업법	식품과 관련된 제조 · 유통, 외식 서비스 등에 이용되는 첨단 · 혁신기술 (식물기반 식품, 세포배양 식품, 개인 맞춤형 식품, 간편 식품, 삼차원프린팅 식품, 새활용 식품[1] 스마트제조 기술[2], 친환경 포장, 스마트유통 기술[3], 외식 서비스 혁신 기술[4])
농림축산식품부	식품과 기술이 결합한 신산업 전반에 적용
식품의약품안전처	식품의 생산, 제조, 가공, 유통 분야에 4차 산업기술(AI, IoT, 빅데이터 등) 생명공학기술 등이 적용되어 부가가치를 창출하는 신기술 및 신사업
월드푸드테크협회	먹는 것과 연관된 문제를 해결하는 창발 기술
Institute of Food Technologists	Food technology is the application of food science to the selection, preservation, processing, packaging, distribution, and use of safe food.
Digital Food Lab	Food Tech is an ecosystem made of all the agrifood entrepreneurs and startups (from production to distribution) innovating on the products, distribution, marketing or business model

1) 다른 식품 제조 과정에서 발생한 부산물을 활용하여 제조하는 식품.
2)-4) 식품 제조 · 유통 · 외식 서비스 제공 과정에 로봇, 인공지능 및 정보통신 등을 활용하는 기술.

- 즉, 4차 산업혁명 기술이 사회적 수요에 부합하여 기존 농식품 산업과 융합된 새로운 기술을 의미함(표 1)
- 푸드테크 기술 활용 및 관련 소재 · 부품 · 장비 · 소프트웨어 등을 개발 · 생산 또는 유통하는 것을 푸드테크 산업으로 정의하고 있음.

○ 4차 산업혁명 시대에서 대표적인 기술로써, 제2의 반도체 산업으로 불릴 만큼 미래 성장 동력으로 주목받고 있음.

- 2010년대 중반부터 각광받기 시작하였으며, 이후 관련 스타트업 등에 대한 투자가 급증함 [2.1조('13) → 22.1조('18)].
- 2022년 CES(Consumer Electronic Show)에서 5대 키워드로 채택된 바 있고 최근까지 매년 주요한 테마로 다뤄지고 있음.

2 기술 도입 배경

2.1 농업환경 변화

○ 푸드테크는 식품산업이 직면한 사회적 문제를 해결하기 위한 핵심 수단으로 부상하고 있음 (그림 2).



그림 2. 푸드테크 기술 도입 배경

가. 공급과 수요의 불균형에 따른 식량 위기

– (기후변화) 기후변화, 재해 증가 등의 이슈와 더불어 미래의 인류는 식량안보 측면에서 심각한 위기에 직면할 것으로 우려됨.

· 지구 온난화는 온실가스 및 이산화탄소 배출 등에 따른 평균기온 지속적 증가에 의해 발생하고 있는 전 세계적인 현상으로, 폭염, 호우, 가뭄, 태풍 등과 같은 재해를 포함할 뿐 아니라 작물 생산 및 가축 사육 환경에 부정적 영향을 미침.

– (자원 고갈) 식량 생산에는 다양한 환경적 자원이 필요함. 필요한 식량의 수요에 비해 생산 가능량은 한계에 도달함.

– (식량안보 취약) 현재 전 세계 기아인구 수는 약 7.3억 명으로 추정됨. 이는 개발도상국을 중심으로 상승하는 추세로서 지역별 동향이 상이함.

· 2030년에 약 5.8억 명이 만성 영양부족으로 고통받게 될 것이고 이 중의 절반이 아프리카 대륙에서 발생할 것이라 예측하고 있음.

나. 농업 노동력의 감소

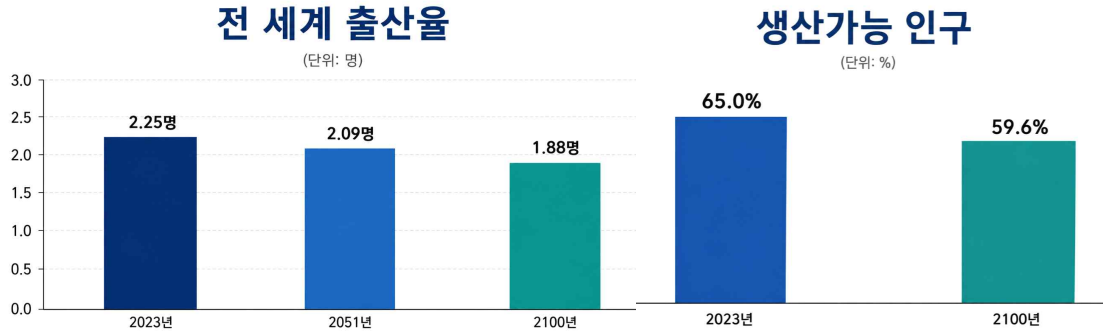


그림 3. 전 세계 출산율 및 생산가능 인구 변화

– (저출산) 저출산 현상이 심화됨에 따라 전 세계 합계 출산율은 점차 감소할 것으로 예상됨 [2.25명('23) → 2.09명('51) → 1.88명('00)](그림 3).

– (초고령화) 기술의 발전과 함께 기대수명이 늘어나면서 전 세계적으로 고령층의 비중이 빠르게 확대되고 있음. 2039년에는 고령사회, 2080년에는 초고령사회에 접어들 것으로 보임.

· 생산가능 인구의 감소는 곧 식품의 생산에 필요한 노동력 부족을 가속화하므로 인력 의존도가 높은 기존 방식만으로는 지속적인 생산성을 유지하기 어려운 상황이 되고 있음.

· 고령층은 노화로 인하여 저작 · 연하 기능 저하, 단백질 요구량 증가, 만성질환 관리 등에 대한 필요성이 높아짐에 따라 이를 반영한 식품의 수요가 늘어날 것으로 보임.

· 즉, 고령화는 생산 · 유통 · 소비 전 과정에서 기술적 대응이 필요한 변화이며, 자동화 · 로봇 기반 공정, 기능성 및 케어푸드 개발 등과 같이 다양한 기술의 확산을 촉진하는 핵심 요인으로 작용하고 있음.

· 앞으로도 국내 · 외 초고령화 문제는 심화될 것으로 생각됨. 2024년 통계청 조사에 따르면 전 세계적으로 65세 이상 고령인구 구성비는 2072년 20.3%로 증가할 것으로 전망되며, 국내 고령인구 수는 47.7%로 급격한 증가가 예측되고 있음.

– (생산인구 감소) 저출산 및 초고령화 등의 인구 구조의 변화는 곧 생산가능 인구 감소 [65%('23) → 59.6%('00)](그림 3) 및 고령층 소비자 증가 등의 사회적인 현상으로 이어질 수 있음.

다. 소비자 맞춤형 소비 증가

– (초개인화) 소비자 개인의 건강 상태, 생활 패턴, 식습관, 가치관 등을 반영한 개인 중심의 소비가 늘어나고 있음. 그 결과 평균적 기준의 식품만으로는 다양한 개인의 요구를 충족하기 어려운 상황이 만들어졌으며, 이에 따라 개인 맞춤형 식품, 건강 데이터 기반 서비스 등의 새

로운 시장이 성장하고 있음.

· 이러한 변화는 각 개인의 특성이 다르다는 인지와 더불어 개인 맞춤형 관리에 대한 소비자 수요가 높아진 데에서 비롯됨.

· 개인 건강 데이터를 정밀하게 파악할 수 있는 기술이 빠르게 발전하고 식단관리 앱과 디지털 헬스케어 플랫폼 등이 일상화되면서 소비자가 본인의 건강과 관련한 정보를 직접 관리하고 이를 식품의 선택에 반영할 수 있는 환경이 조성됨.

– (소비문화 변화) 단순히 생존에 필요한 식품에 대한 소비가 아니라 다양성, 편의성 중심의 가치 소비 시대로 진입함.

라. 소비 패러다임 변화

– (온라인 중심의 소비 확산) 코로나19 팬데믹 기간 동안 대면 접촉 최소화를 위한 사회적 제약이 강화되며, 온라인 중심의 소비가 증가하고 있음.

· 외식의 이용은 감소하고 가정 내 식사의 비중이 늘어나며, 신선식품 전자상거래가 증가함.

– (무인 시스템 확대) 외식 · 급식 분야에서 인력 부족, 위생 관리 등이 부담이 커지며 무인 매장, 로봇 조리 · 서빙 등의 시스템 확대가 진행되고 있음.

· 제조 · 유통 단계에서 온라인 수요의 변동성이 커지면서 AI 기반 수요 예측, 블록체인 이력 추적 같은 디지털 전환형 공급망 기술의 필요성이 한층 부각되고 있음.

– (비대면 서비스 정착) 소비자들이 온라인 소비과 무인 시스템에 적응하여 포스트 코로나 시대에도 일상적인 소비 방식으로 자리잡음.

2.2 기술의 필요성 및 기대효과

○ 식량 위기, 고령화, 개인화, 소비 패러다임 변화 등에 따라 급변하고 있는 소비자 수요에 대응하기 위해서는 기존의 산업은 한계가 존재함.

– 기후변화, 자원 고갈 등의 문제로 인하여 전통적인 생산방식만으로는 안정적인 식량의 공급이 어려움.

– 저출산 및 고령화 등에 따른 생산인구 감소로 인하여 노동력 부족과 이에 따른 생산성 저하가 심화되고 있음.

– 소비자 수요의 다양화로 인해 획일적인 기존 대량생산 체계만으로는 더 이상 소비자 만족이 어려운 상황임.

– 온라인 중심의 소비 확대 및 무인 시스템 확산 등에 따라 혁신적 기술의 도입이 요구됨.



그림 4. 푸드테크 도입 시 기대효과

○ 식품의 생산 · 유통 · 소비 전 과정에 푸드테크 기술을 적용 시, 식량안보 강화, 생산성 및 효율성 향상, 식품 안전성 제고, 산업 경쟁력 확보 등의 산업적 효과가 기대됨.

– IT · BT · AI 기반 자동화 및 스마트화 등을 통해 생산성 한계를 극복하고 지속가능하고 안정적인 식량의 생산을 지원함.

– 유통 시스템의 디지털화 및 공급망 고도화 등을 통해 증가하고 있는 비대면 서비스 수요에 대응이 가능할 뿐 아니라 유통 효율성을 향상하고 식품 안전성을 확보할 수 있음.

– 개인 맞춤형 식품 및 서비스를 제공함에 따라 고령화와 개인화에 따른 소비자 수요에 대응함.

– 첨단기술 기반 식품산업 혁신을 통하여 기존 산업 지속가능성과 경쟁력을 강화할 수 있음.

○ 또한, 푸드테크 산업의 성장은 국가경제 성장 및 산 업구조 고도화에 기여할 것으로 전망됨.

– 연구개발 성과 기반 사업화 및 민간 투자 활성화를 통해 신新 산업을 육성하고 전반적인 산업 내 부가가지 등을 제고할 수 있음.

– 국내 기업들의 해외시장 진출 및 수출 경쟁력을 강화함으로써 국가경제 성장에 필요한 기반을 확충할 수 있음.

Ⅱ. 기술 분야 구조 및 범위

1 기술 분야 정의

○ 식품 생산(신 식품 및 제조), 유통, 소비(서비스 및 처리기술) 3가지 분야로 분류할 수 있음 (표 2).

표 2. 푸드테크 분야 및 적용기술 사례

구분	푸드테크 분야 및 적용기술 사례	
생산	신新 식품	- 지속가능 식품(대체식품, 원료 국산화·다양화 등)
		- 간편식 (밀키트, 가정간편식 등)
		- 케어푸드(영유아·특수의료용·고령친화·기능성 식품 등)
	제조	- 스마트 팩토리
		- 간소화(로봇, 식품 프린팅 등)
유통	유통	- 스마트 안전관리 및 포장 기술
		- 주문배달앱, 온라인 플랫폼
소비	서비스	- 자동화(조리로봇, 서빙로봇 등)
		- 식당 주문·배달(배달앱, 무인주문기, 배달로봇 등)
		- 소비자 맞춤형 정보(영양 프로파일링 모델, 개인 맞춤형 식단 등)
	처리기술	- 자원순환 기술(식품 업사이클링, 친환경 포장 등)

- **(생산)** 지속가능 식품의 생산을 위해 대체식품, 원료 국산화 · 다양화 등의 신 식품 개발이 확대되고 있음. 또한, 사회적 수요에 대응하여 간편식, 케어푸드 생산 등이 증가하고 있을 뿐 아니라 제조 시 생산성 및 효율성 향상을 위하여 스마트 팩토리, 로봇, 식품 프린팅 등이 적용되고 있음.
- **(유통)** 생산된 식품은 유통 과정에서 반드시 신선도와 안전성을 유지해야 하며, 스마트 안전관리 적용 시 안전성 확보가 가능함. 또한, 유통채널로써 주문배달앱, 온라인 플랫폼 등이 확대되고 있음.
- **(소비)** 자동화, 식당 주문 · 배달 등을 통해 생산성 및 효율성 향상이 가능함. 또한, 소비자 맞춤형 정보 제공 서비스가 확대되고 있고 지속가능 소비를 위하여 식품 업사이클링 및 친환경 포장 등의 자원순환 기술들이 개발되고 있음.

2 주요 구성 기술

○ 푸드테크 주요 구성 기술로는 지속가능 식품, 케어푸드, 스마트 제조 · 유통 기술, 소비자 맞춤형 정보, 자원순환 기술 등이 있음(그림 5)



그림 5. 푸드테크 주요 구성 기술

가. 지속가능 식품

– 푸드테크 산업에서 가장 대표적인 기술로써 대체식품 및 원료 국산화 · 다양화 등을 포함하고 있음.

· 대체식품이란 지속가능성과 탄소중립 실현을 목적으로 개발된 차세대 식품군임. 육류 · 유제품 · 계란 등 동물성 식품을 대체 또는 보완하기 위한 기술 기반 식품으로 구성되며, 주로 식물성 · 곤충 · 미생물 · 세포 배양 등을 기반으로 함.

· 원료 국산화 · 다양화 기술은 국산 원료 경쟁력 확보와 안정적인 미래 식품 소재 마련을 위하여 필요함. 수입의존도가 높은 원료 대체 또는 기후변화 대응 내병성 · 내염성 작물이나 고기능성 품종들의 개발, 생물 다양성 보존을 위한 국산 원료 확보 등을 포함하고 있음.

나. 케어푸드

– 고령자 · 환자 · 영유아 같은 특수한 대상에 대한 영양 공급 또는 섭취 편의성이 요구되는 소비자를 대상으로 한 식품으로 영양 설계 · 물성 조절 · 섭취 안전성과 관련된 기술이 복합된 분야임. 메디푸드, 고령친화식품, 건강기능식품 등이 있음.

· 특정 질환 또는 임상적 상태로 인해 일반적인 식사만으로는 필요한 영양을 충족하기 어려운 환자를 위한 식품을 의미함. 이에 기능성 소재가 함께 적용되면 특수의료용도식품으로 확장되며 고령층 · 질환군 대상 제품의 가치가 크게 향상됨.

· 고령친화식품이란 고령자의 섭취, 영양 보충, 소화흡수 개선 등을 목적으로 제조·가공하여

고령자의 사용성을 높인 식품을 의미함. 조리 및 섭취가 간편한 식품을 선호하는 경향이 있으며, 이에 따라 부드러운 식감의 연화식 등이 주로 출시되고 있음.

· 건강기능성을 강화한 원료를 발굴 또는 개발하여 식품에 적용한 제품을 건강기능식품이라 함. 최근 디지털 및 바이오 기술이 결합되며 기능성 소재의 개발 또한 고도화됨.

다. 스마트 제조 · 유통 기술

– 생산인구 감소로 인하여 생산 효율성을 유지하는 것이 점차 어려워짐. 이를 해결하기 위해 스마트 팩토리, 식품 프린팅 등이 연구되고 있음. 또한, 생산된 식품은 유통 과정에서 반드시 신선도와 안전성을 유지해야 하며 유통 중의 이력 추적 및 안전관리 기술 또한 필수적이므로 안전관리 및 포장 기술 등의 고도화가 요구되고 있음.

· 스마트 팩토리 기술은 설계부터 개발, 제조, 유통, 물류까지 식품 생산 전반적 과정에 디지털 자동화 솔루션 및 정보통신기술 등을 적용하여 생산성, 품질, 고객 만족도를 향상하는 지능형 공장임.

· 식품 프린팅은 식품 소재를 잉크로 적층하여 사용자 맞춤형 식품이나 복잡한 형태를 가진 식품의 구조를 제조하는 기술을 의미함.

· 스마트 안전관리 및 포장 기술에는 식품의 품질에 미치는 영향을 최소로 하면서도 미생물 증식과 산패 · 부패 등을 억제하는 비열 기반 보존 기술, 과냉각 등의 온도 제어 기술, 지능형 포장 등이 있음.

라. 소비자 맞춤형 정보

– 초개인화 시대에 맞추어 개인별 관리가 가능하도록 영양 프로파일링 모델 및 개인 맞춤형 식단 등이 확산되고 있음.

· 영양 프로파일링 모델이란 연령 · 건강상태 · 섭취 패턴 같은 개인의 특성에 따라 식품의 영양적 가치를 정량화해 맞춤형 식품 선택을 지원하는 시스템임.

· 개인 맞춤형 식단은 식습관 · 생체 데이터 · 마이크로바이옴 등을 AI로 통합 분석해 개인별 최적 식단 제안을 가능하게 하는 기술을 의미함.

마. 자원순환 기술

– 주로 식품 생산 시 발생하는 부산물을 고부가가치 식품원료로 전환하는 기술을 의미함. 식품 업사이클링과 친환경 포장을 포함함.

· 식품 업사이클링은 부산물 및 낮은 부가가치로 폐기되었던 자원에 새로운 기술을 투입하여 새로운 제품을 창출함.

· 친환경 포장은 온실가스 배출량을 최소화할 수 있는 포장 기술로서 설계 단계에서 소재 감량, 재사용 · 재활용 등을 고려함.

3 적용분야 및 활용 영역

○ 푸드테크 기술들은 생산, 유통 및 소비 등의 식품산업 전 과정에서 적용이 가능함(표 3).

표 3. 식품산업 내 적용분야 및 활용 영역

분야	생산	유통	소비
지속가능 식품	- 대체식품 생산 - 국산 원료 활용 및 공급망 안정화 - 탄소저감 공정 도입	- 원료 공급망 구축 - 저탄소 운송·물류 시스템 - 친환경 포장 및 유통 확대	- 친환경·윤리적 식품 소비 확대 - 가치소비 및 ESG 소비문화 확산
케어푸드	- 맞춤형 영양식 설계 및 제조 - 기능성 소재 및 메디푸드 생산 - 연화식·특수식 개발	- 병원·복지시설 중심 전문 유통망 구축 - 콜드체인 기반 품질 관리 강화	- 맞춤 영양·건강 관리 지원 - 삶의 질 향상
스마트 제조·유통 기술	- 스마트 팩토리 운영 - 자동화 및 품질관리 고도화 - 생산 효율 및 식품 안전성 향상	- 콜드체인 구축 및 모니터링 - 스마트 포장 적용 - 블록체인 기반 이력 추적	- 신선도·안전성 확보 - 스마트 리테일 및 비대면 구매 - 소비 편의성 향상
소비자 맞춤형 정보	- 소비자 데이터 기반 제품 개발 - 영양 및 기능성 맞춤 설계 - 개인 맞춤형 식품 생산체계 구축	- 수요 예측 - 개인 맞춤형 마케팅 및 추천 - 공급·재고 최적화	- 개인 맞춤형 식품 추천 - 맞춤형 식생활 관리 - 식품 이력·영양정보 제공
자원순환 기술	- 농식품 부산물 자원화 - 고부가가치 식품소재 생산 - 친환경소재 및 순환형 포장 개발	- 순환형 공급망 구축 - 친환경 포장 적용 - 폐기물 및 탄소배출 저감	- 음식물 쓰레기 감소 - 지속가능 제품 선택 확대

– **(지속가능 식품)** 식물성 대체식품, 정밀발효 및 세포배양 식품 등을 중심으로 생산기술이 고도화되고 있으며, 친환경 공급망과 지속가능 소비를 연계하는 방향으로 발전하고 있음.

– **(케어푸드)** 고령화와 건강관리 수요 증가에 따라 맞춤형 영양설계와 특수의료용식품 개발이 확대되고 있으며, 전문 유통체계와 개인 맞춤형 건강관리 서비스로 기술의 영역이 확대되고 있음.

– **(스마트 제조 · 유통 기술)** AI, 로봇 및 데이터 기반의 제조공정 자동화와 품질관리 기술 등이 발전하고 있는 한편, 스마트 포장과 콜드체인 등 유통 기술을 통해서 식품의 안전성과 품질 신뢰성을 높일 수 있는 방향으로 기술 고도화가 진행 중임.

– **(소비자 맞춤형 정보)** 건강정보 및 소비 데이터를 활용한 맞춤형 제품 개발, 수요예측 및 AI 기반 개인 맞춤형 식품 · 영양관리 서비스로 기술의 영역을 점차 확대하고 있음.

– **(자원순환 기술)** 식품 부산물의 자원화와 고부가가치 소재의 개발을 중심으로 순환형 공급망 구축과 친환경 소비를 지원하는 방향으로 확대되고 있음.

Ⅲ. 기술 발전 동향 및 전망

1 국내외 기술 발전 동향

1.1 국내 동향

가. 지속가능 식품

① 대체식품

○ 식물성 대체육 제품은 전통 요리 메뉴, 레디밀 · 밀키트, 채식 · 건강 강조 식품 등의 분야에서 다양하게 제조되고 있음. 식육과 유사한 식물성 대체육 개발도 계속됨. 한국식품연구원은 고수분 압출성형 기술로 식물성조직화단백(texturized vegetable protein; TVP)의 푸석한 식감을 개선하고 근육 같은 결을 형성하기 위한 공정 최적화 연구를 수행하고 있음.

○ 국내 식용곤충으로 일반 식품원료 11종(메뚜기, 누에 유충 번데기, 백강잠, 흰점박이 꽃무지 유충, 갈색거저리 유충, 쌍벌귀뚜라미, 장수 풍뎅이 유충, 아메리카 왕거저리 유충, 수벌번데기), 한시적 식품원료 1종(풀무치)이 등록되어 있음.

○ 세포배양육의 상용화를 위한 배지 개발 연구들도 다수 진행되고 있음

– 씨위드는 해조류인 스피룰리나를 활용하여 무혈청 배지를 개발하여 배지 단가를 2,000원/L 이하로 절감하였으며, 해조류 내 글루타민의 단맛을 활용해 세포배양육의 풍미를 증진시키는 기술을 보유하고 있음 .

– 심플플래닛은 유산균을 배양하였던 배지를 재활 용하여 무혈청 배지를 개발하였으며, 기존 산업의 부산물 을 재활용하기 때문에 배지 단가 또한 1,500원/L까지 절감하였음.

– 이 외에도 셀미트, 엑셀 세라퓨틱스, 네오크레마, 셀쿠아, 스페이스에프 및 팡세 등 많은 기업들이 무혈청 배지를 개발하고 있음.

– 2024년 식약처가 발표한 '세포배양식품 인정 기준' 고시를 기반으로 세포배양육의 생산 공정 표준화 및 안전성 평가 실증 연구 본격화됨.

– 스페이스에프–국가독성과학연구소는 세포배양육에 대한 장기 섭취 기반 비임상시험을 완료함.

② 원료 국산화 · 다양화

○ 대체식품 생산에 필요한 주요 소재 또한 국산화를 시도하고 있음.

– 수입의존도가 높은 분리대두단백 대체를 위하여 국산 콩, 버섯, 쌀, 밀 등을 활용한 품종의

육성 및 단백질 분리 · 정제 기술을 개발함.

- 국내 축종을 활용한 근육 · 지방 불멸화 세포주 구축 및 동결 보존 기술을 확보함

○ 국산 농산물에서 유래한 기능성 식품소재를 생산 · 보관 · 표준화하고 기업을 지원할 수 있는 인프라를 갖춘 기능성 원료 은행이 준공됨.

○ 기후변화 등에 의해 국내 재배 · 사육 환경이 변화됨. 이에 따라 기후 대응형 동 · 식물 자원의 발굴을 위한 연구들이 계속되고 있음.

- 고온에서 생육가능한 버섯 유전자원의 발굴과 생육온도가 상대적으로 높은 고온성 버섯 품종의 개발이 진행되고 있음.
- 국내 아열대작물의 유전자원 수집 및 재배기술 연구가 수행됨. 단, 여전히 초기 연구의 단계를 벗어나지 못함.
- 한국 상용 벼 품종 296종을 대상으로 국내 품종군의 병 저항성 유전좌위 · 도너 자원 탐색이 진행됨.

나. 케어푸드

① 메디푸드

○ 당뇨, 신장 질환, 암 환자 등 특정 질환자의 영양 요구를 충족시키는 제품 개발이 활발하며, 식약처의 규정에 맞춰 조절된 영양성분 함량 기준이 적용됨.

○ 다중 오믹스를 기반으로 생애별 주기에 따른 인체 마이크로바이옴 변화를 분석 후 식이-마이크로바이옴이 질환의 예방에 미치는 작용기전 등을 연구 중임. 아커만시아 무시니필라(Akkermansia muciniphila)의 GLP-1 유도 단백질 분비 메커니즘 규명 등의 주목할 성과를 내고 있음.

○ 한독은 알츠하이머 환자들에게 부족할 수 있는 DHA, EPA, UMP, 콜린 등의 영양소를 뇌에 공급하는 연구를 수행함.

○ 씨엘바이오는 당뇨치료제 후보물질로 주목받고 있는 균사체의 배양물을 보유한 회사로 당뇨 환자들을 위한 식품을 출시함.

○ 국내의 메디푸드 기업은 특수의료용도식품이 음용제 기반 제품과 식단형 제품으로 구분되어 인식되는 경향이 뚜렷함.

○ 음용제 기반 특수의료용식품은 병원과 약국 채널을 중심으로 공급되는 영양음료형 제품군으로, 환자가 손쉽게 섭취할 수 있는 액상 형태가 주를 이룸. 대표적으로 정식품의 그린비아, 대상웰라이프의 뉴케어, 매일유업의 메디웰 등이 있음.

- 식단형 특수의료용식품은 환자 맞춤형 식단을 제공하는 형태로 메디푸드 및 가정간편식 시장과 밀접하게 연계되어 있으며, 메디쏠라, 현대그린푸드, 풀무원 등이 대표 기업으로 꼽힘.

② 고령친화식품

○ 고령층의 섭취 불편 해소를 위해 식재료의 맛과 형태를 유지하면서 부드럽게 만드는 기술을 개발 중임. 대표적으로는 포화 증기 기술이 있으며 단 시간 식품으로 열을 전달하여 영양소 손실을 최소화하고 고유의 맛, 향, 색, 질감을 유지시킬 수 있음. 또한, 초고압 처리와 병행 시 품질개선 및 유통기간 연장 효과가 입증됨.

○ 포화 증기 기술 외 수비드, 텀블링, 딥에이징, 효소 처리 기술 등도 육류 제품에서 다양하게 적용되고 있음. 현대그린푸드 및 도드람은 고단백 연화식 개발을 통해 고령자가 단백질과 필수 아미노산 등을 쉽게 섭취할 수 있도록 하였음. 이 중 도드람 제품은 고령친화우수식품으로 등록되는 성과를 보였음.

○ 효소반응, 식품 재성형 등의 기술을 통해 농 · 축 · 수산물 원료 약 20여 종의 고령자용 저작 · 연하 · 소화 용이성 부여 제품 뿐 아니라 지용성 비타민, 철분 등 결핍되기 쉬운 영양성분이 강화된 고령자용 영양강화 식품을 개발함.

○ 식품 3D 프린팅 시스템 구축을 연구하고 단백질, 고분자 등을 식품원료와 함께 활용함으로써 물성 제어 및 식품학적 특성 개선 뿐 아니라 영양성분이 강화된 고령자용 식품 개발을 진행 중임.

○ 최근 고령친화식품 제품들은 영양소 보충과 연화식 형태 유지를 기본적으로 유지하면서, 제품군의 다양화를 추구하여 고령자들의 식품 선택 폭을 넓히고자 함.

③ 건강기능식품

○ 장 건강 · 면역 · 뇌 건강 축의 미생물 · 포스트바이오틱스 · 사이코바이오틱스 기술의 개발이 활발하게 진행되고 있음.

- SPC 그룹은 비건 유산균을 활용하여 배스킨라빈스 전용 후르츠 워터를 개발함.
- 과기부 산하 세계김치연구소는 김치 및 원 · 부재료에서 유래한 66종(유산균 58종, 효모 8종), 총 1,447균주를 보유하고 있음. 최근, 김치 유래 유산균인 Lactobacillus plantarum WiKim0175의 유산균 기술은 염증 반응 억제와 연골세포 손상 완화 효과를 확인함.

○ 기업들도 여러 기능성을 가진 식품 원료 및 제품들을 개발하고 있음.

- 엔지켐생명과학의 록피드 면역은 녹용 속에 존재하는 PLAG를 주원료로 하며 식약처로부터 면역 조절 기능성을 인정받음.

- 에스에스바이오팜의 레드메리베타는 호흡기 질환과 골다공증 등에 도움을 줄 수 있다고 알려진 인도네시아 부아메라 열매에서 추출된 부아메라크루드오일을 사용하여 다양한 인체, 동물 실험으로 호흡기 질환의 개선 효과가 입증됨.
- CJ웰케어의 닥터뉴트리 메모리메이트는 기능성 원료 포스파티딜세린을 함유해 노화로 저하된 인지력 개선에 도움을 줄 수 있음. 독자적인 제조 공법으로 원료의 순도를 끌어올려 흡수율을 극대화함.
- 매일헬스뉴트리션의셀렉스 프로틴 락토프리 플러스는 근육과 뼈 건강에 신경 쓰는 이들에게 적합하며, 자체 개발한 근력 단백질(저분자유청단백가수분해물)에 칼슘 · 마그네슘 · 비타민 D 등을 더하였음.

○ 국내 건강기능식품 시장은 원료의 자체 개발 및 국산화를 전략적 목표로 추진하고 있음. 또한 재평가와 기준 · 규격의 강화로 엄격한 건강기능식품을 개발하기 위한 노력이 가속화되고 있음.

다. 스마트 제조 · 유통 기술

① 스마트 팩토리

○ 주요 구성 기술로 알려진 인공지능, 로봇, 사물인터넷, 머신비전, 3D 프린팅, 인라인 계측 및 검사 시스템 등에 대한 독립적인 연구가 수행되고 있으나 총체적인 생산 공정 내 적용과 관련한 연구는 제한적임.

○ 농식품 분야는 인라인 계측 및 검사 시스템 개발을 위한 센서의 실용성 검증, 그리고 인공지능 모델과의 연계를 통한 품질 예측 및 판정 시스템의 개발 연구가 중점적으로 이루어지고 있음.

○ 육류 생산 공정에서 농식품의 이물질 · 오염 정도를 감지하고 제품의 평가를 내리는 예측 모델 성능 향상 연구에서 VIS/NIR, FT-NIR, 초분광 카메라 등의 광학 · 분광학적 센싱 기술의 효과가 뛰어난 것으로 나타남.

○ 중소벤처기업부, 농림축산식품부, 해양수산부 등은 삼성전자, 농협중앙회 등과 협력하여 식품 제조업체를 대상으로 스마트 팩토리 구축 계획을 발표하였으며 경북, 전남, 전북 등 지자체에서도 예산을 투입하여 지역특화형 스마트 팩토리 구축지원사업을 세우는 등 정책적으로 스마트 팩토리 설계 및 구축을 통해 경쟁력 확보를 위한 움직임을 보임.

○ 국내 스마트 팩토리 도입은 낮은 수준이나, CJ제일제당, 삼양식품, 풀무원, 동원홈푸드 등의 일부 선도 기업들은 HACCP과 연계하여 스마트 팩토리 시스템을 운용하고 있음.

③ 식품 프린팅 기술

○ 국내 3D 프린팅 기술의 연구는 크게 소재 적합성을 탐색하는 연구와 제조된 제품의 물성과 감각 특성 등을 실제 식품과 비교 분석하여 효과적인 배합비와 제조 조건 등을 설정하는 연구로 추진되고 있음.

- 전자의 경우 곡류 및 전분, 단백질, 당류, 유제품 및 육류 등 식물성 및 동물성 잉크 소재를 이용하여 제조한 하이드로콜로이드의 품질 특성 평가를 통해 적용 가능성을 판단하는 연구 방향성을 띠며, 특히 당근, 시금치, 브로콜리 등 식물성 소재가 활발히 연구되고 있음.
- 후자의 경우 식감이 중요하게 작용하는 육류 및 대체단백질 연구 분야에서 주목하는 연구 분야로 실제 식육의 근섬유 구조를 모사하여 소고기 스테이크를 3D 프린팅으로 제조하고 지방 함량을 조절하여 마블링 수준을 조절하는 연구가 보고됨.

○ 한국식품연구원에서는 쌀을 팽화 처리하여 잉크를 제조한 후 탄수화물과 단백질 성분을 소재화하여 개인에 맞게 비율을 배합하는 가능성을 선보여 개인 맞춤형 식품 개발을 위한 연구 방향성을 시사한 바 있음.

○ 단, 국내 연구는 압출을 통해 식품을 증착하는 적층 기법을 이용하는 연구에 편중되어 있어 페이스트로 만들 수 있는 식품의 종류에 제한이 있다는 한계점이 존재하여 다양한 방식의 프린팅 기술을 연구할 필요가 있음.

④ 차세대 보존 기술

○ 국내 과냉각 연구는 식육 처럼 소비기한 등이 짧고 냉 · 해동에 의한 품질의 손상이 크게 나타나는 식품군에 주목하고 있음. 일반 냉장보다 과냉각이 돼지고기, 소고기 등의 육류의 소비기한이 증진하였음.

○ 능동 포장의 경우 친환경적이고 필름 형성능이 우수한 포장재 개발에 박차를 가하고 있으며 특히 생분해성, 생체적합성, 무독성 등의 특징을 가지는 폴리비닐알코올 같은 소재와 항산화 또는 항균 활성을 가지는 천연 고분자물질인 키토산, 박테리오신, 폴리페놀 화합물 등을 혼합하여 식품 저장성을 증진하는 연구들이 수차례 보고됨.

○ 지능형 포장 연구는 친환경 센서의 개발을 위하여 다층 구조 셀룰로오스 나노섬유를 이용한 이산화탄소 감지 센서 등을 제조하여 성능 및 실생활 적용 가능성을 평가하는 연구가 보고된 바 있음.

라. 자원순환 기술

① 식품 업사이클링

○ 리하베스트는 맥주 부산물인 맥주박을 이용한 대체 밀가루 제품을 개발함. 아시아에 있는

기업으로는 최초로 UFA의 업사이클 식품 인증을 받았음.

○ CJ제일제당, 삼성웰스토리, 오비맥주, SPC삼립, 농심, 풀무원 등의 대기업들이 부산물을 이용한 업사이클 식품 제품을 시장에 출시함.

○ 음식 폐기물의 에너지화 또는 비료화에 대한 연구는 감소하고 대신 특정 고부가 성분을 추출하는 연구에 집중하는 경향을 보였음. 식품 부산물을 업사이클링 하는 주요 연구 대상은 망고 · 수박 · 감귤 등의 과일류, 감자 · 양파 · 콜리플라워 등의 채소류, 곡물류, 커피, 식용유 등이 있으며 그 대상은 점차 다양하게 확장되고 있음.

○ 단순 업사이클링 뿐 아니라 이를 이용하여 고부가 기능성 소재를 개발하는 사례도 늘어남.

- 부산물에 포함된 단백질, 식이섬유, 리그닌, 항산화 및 항염증 성분과 같은 유용 성들을 발굴하고 이를 기능성 원료로 활용하는 연구가 활발함.
- 옥수수수염, 오미자박추출물, 헛개나무과병 · 오미자박추출복합물, 와사비잎추출분말 등 국내 추출물을 활용한 기능성 원료의 개발이 이루어짐.

○ 부산물 기반의 젤리, 스낵, 김치 등 실제 제품이 출시되고 있으며, 관능 및 물성 개선 연구를 통하여 제품의 품질과 맛을 높이는 데 집중하고 있음.

② 친환경 포장

○ 고강도 박막 필름, 저중량 종이 등 가벼우면서도 기능이 우수한 경량화 소재를 도입함. 복합재질 대신 단일 소재를 사용하여 재활용성을 높이면서도 경량화하며, 소형화 설계 등을 통해 부피 · 사용량 감소함.

- 동원 F&B는 미세발포필름을 통한 소재 경량화 기술을 개발함. 이는 연포장재의 주원료인 플라스틱 필름에 질소를 주입해 미세 기포를 형성시킨 친환경 소재로 두께 대비 강도와 단열성능이 우수하여 냉동 · 신선 식품의 품질을 유지하면서 원가 절감 · 생산성 향상 효과를 동시에 제공함.
- 제이케이머티리얼즈는 단일 재질 포장재 제조 시 합지 공정이 필요 없는 열접착성 BOPE 필름 기술을 이용해 기존 블로운(blown) 폴리에틸렌 필름 대비 2~3배 이상 높은 강도와 투명성을 확보하여 필름의 두께를 감소함
- ㈜농심은 국내 최초 열접착 밀봉 및 개봉 용이한 컵라면용 수성코팅 종이용기 개발을 통하여 기존 대비 코팅 중량을 약 50% 감소하고, 펄프 해리가 용이한 수성코팅을 통해 재활용률이 증가하였음.

○ 재활용이 용이한 포장재 개발을 추진함. 재질별로 분리가 어려운 복합재 포장 대신 단일 재질

구성을 확대할 뿐 아니라 재활용성 저해 요소 및 유해 물질 배출 가능한 착색제 · 접착제 사용을 최소화함.

- 동일화학공업 주식회사는 경량 열수축 필름을 개발함. 국내 최초로 상용화된 비중 1 미만의 열수축 필름으로 PET병 분쇄 후 세척 공정에서 라벨이 물에 뜨도록 설계되어 PET 조각과 자동으로 분리가 가능함.
- ㈜한국인삼공사는 플라스틱 사용 최소화 및 재활용성 강화 패키징 개발을 완료함. 사탕수수 유래 바이오 PET 30% 사용하여 기존의 석유계 PET 대비 탄소배출량 28% 감축, 100% 재활용 및 재사용이 가능해짐. 또한, 후면의 절취선 가공으로 배출 시 쉽게 종이 및 플라스틱 분리가 가능함.

○ 재생원료 또는 생분해성 포장재 개발의 필요성이 대두되고 있음.

- 매일유업 주식회사는 GRS 인증 획득한 재생원료 사용하여 플라스틱 사용량을 절감하였으며, 국내산 수용성 잉크 · 인쇄 기술로 기존 유성잉크와 동등한 인쇄 품질을 구현함.
- 어스폼은 버섯 재배 과정에서 발생하는 균사체의 자연적 성장 방식을 이용하여 폐배지를 활용한 균사체 복합 제조 포장재 및 완충제 개발에 성공함. 이는 에너지 사용량 및 탄소 배출량이 감소할 뿐 아니라 100% 생분해성 소재로 사용 후 퇴비화 과정을 통해 자연으로 돌아가며 유해 물질 미배출됨.

마, 소비자 맞춤형 정보

① 영양 프로파일링 모델

○ 식품 관련 공공기관에서 제공하고 있는 정보를 활용할 수 있으며 국내 기준, 원재료성 식품, 가공식품, 음식에 대한 영양성분 정보가 취합되어 있는 전국통합식품 영양성분 정보 표준 데이터를 활용할 수 있음. 여기에 통합된 데이터베이스로는 식품 영양성분 데이터베이스, 국가표준식품성분표, 표준수산물성분표 등이 있음.

- 식약처에서 제공하고 있는 식품 영양성분 데이터베이스는 다양한 기관에서 생산된 영양성분 데이터를 체계적으로 조직화하여 하나의 통합 데이터베이스화 한 것으로 국민 · 개인의 영양평가, 산업체의 식영양표시 및 학계의 식품영양연구에 널리 활용되어 왔음.
- 국가 표준식품성분표는 한국인의 농산물 등 상용 식품에 대한 에너지 및 각종 영양성분을 분석하거나 수집하여 데이터베이스화 한 것으로 가장 최근 발간된 국가표준식품성분표 제10개정판에는 국내에서 생산 및 소비되는 1,228개의 식품에 대해 열량, 무기질, 비타민, 식이섬유 등 42종의 영양성분이 수록되어 있음.
- 표준수산물성분표는 국립수산과학원에서 발간하였으며, 64종의 수산물 및 수산식품에 대해 일반성분 분석결과와 아미노산 265종, 지방산 338종 그리고 셀레늄 164종에 대한 분석결과가

새로 추가되었음.

○ 국내 상황에 맞는 영양 프로파일링 모델 개발 및 적극 활용이 필요한 시점임. 국내 상황에 맞는 적용 범위와 평가 요소, 한국인의 섭취 기준 등을 고려하여 한국인 맞춤 영양 프로파일링 모델 개발이 필요함.

② 개인 맞춤형 식단

○ 한국형 정밀영양 컨소시엄 사업은 2025년부터 2029년까지 5년간 총 100억 원 규모로 추진되며, 취약계층 대상 식이조사 체계 구축, 마이크로바이옴 · 대사체 기반 빅데이터 아카이브 구축, 통합 오믹스 기반 정밀영양 모델 및 가이드 개발을 목표로 함.

○ 한국식품연구원, 국립보건연구원 등에서는 NutriOmics 기반 맞춤형 식이 통합 플랫폼 구축을 위한 연구를 진행함. 데이터를 기반으로 디지털 헬스를 통한 개인 맞춤형 식이의 구현 방안을 제시함.

○ 뉴지엄랩은 세계적 기관의 데이터와 8만 개 이상 식품 데이터를 기반으로 개인별 영양 정보를 제공할 수 있는 AI 플랫폼을 개발한 바 있음.

○ 두잉랩은 음식 사진 촬영만으로 영양 정보를 인식하는 푸드렌즈 솔루션을 개발하여 50개 이상의 파트너사에 기술을 공급하고 있음. 딥러닝 이미지 처리 기술을 바탕으로 95% 이상의 정확도로 음식명과 16종의 영양 정보를 제공하며, 약 9만 개의 국내 음식과 공산품을 인식할 수 있음.

○ 카카오는 연속혈당측정기와 실시간 연동할 수 있는 AI 건강관리 플랫폼을 구축하고 덱스콤 G7, 케어센스 에어 등과 연동하여 실제 혈당의 변화를 확인하고 20가지 디지털 피노타입에 기반한 맞춤형 체중관리 루틴을 제공함.

1.2. 국외 동향

가. 지속가능 식품

① 대체식품

○ 식물성 대체육 시장의 규모가 크며 관련 기술도 고도화 되어있음.

- 미국 Impossible Foods는 콩과 식물의 뿌리에서 생산된 식물성 레그 헤모글로빈을 식물성 대체육에 첨가해 식육의 풍미와 색을 재현하였음 .
- Beyond Meat는 콩과 쌀, 코코아와 카놀라오일 등으로 기존 단백질과 지방을 대체하고 비트 주스, 사과 추출물 등을 활용하여 맛, 향, 색을 냄.

○ 버섯 균사체의 섬유질 구조를 활용하여 별도의 가공이 없어도 고기 결을 구현할 수 있는 원료로 사용됨.

○ 유럽 및 미국에서 식용곤충의 가공기술이 발전하고 있음. 1차원적 형태의 섭취가 아닌 가공 및 타 식재료와의 혼합을 통하여 제품화함. 브랜딩에 성공함으로써 소비자의 인식 전환 및 고부가가치를 창출하고 있음.

○ 국가별 동향은 다르나 일부 주요국에서는 세포배양육의 시판이 승인됨.
- Good Meat는 싱가포르(2020년)와 미국(2023년)에서 닭 배양육 시판 승인을 받았음.
- Upside Foods는 미국(2023년)에서 닭 배양육의 시판 승인을 받았음.
- Aleph Farms는 이스라엘(2024년)에서 세계 최초로 소 배양육 생산 허가를 받았음.
- 오스트레일리아-뉴질랜드 식품기준청은 최근 배양육 개발 기업 Vow의 메추라기 배양육을 식당과 슈퍼마켓에서 판매할 수 있도록 허용함.

○ 보다 성공적인 상용화를 위해 생산 단가 절감을 목표로 대량 생산 시스템 개발과 무혈청 배지의 연구가 활발하게 진행되고 있음.
- 10,000L 이상 대형 바이오리액터 운용 및 고농도 세포를 배양하기 위한 연속 배양 시스템을 확립하는 등의 경쟁이 심화됨.
- 주요 기업들이 무혈청 배지의 개발에 성공함. Good Meat, Believer Meats 등은 식품 등급의 식물성 소재를 이용하여 무혈청 배지를 개발하였으며, Upside Foods, Aleph Farms 등은 비동물성 성장인자 생산을 통하여 무혈청 조건 하 세포의 배양을 검증함.

○ 식물성 소재에 배양 근육 · 지방 또는 정밀 발효 단백질을 혼합하여 맛과 풍미를 개선한 하이브리드 제품이 출시됨.

○ 프린팅 기술의 고도화로 다중 노즐을 이용해 근육, 지방, 혈관 조직을 정교하게 모사하여 안심, 등심 같은 스테이크 형태를 제조할 수 있는 단계에 진입함.

② 원료 국산화 · 다양화

○ 호주 등의 주요국은 주류 작물 외의 다양한 식물 자원을 발굴하기 위해 토종 식물군을 기반으로 새로운 품종을 개발하기 위한 연구를 진행 중임.

○ 미생물 엔지니어링을 통하여 우유(카제인), 계란(오발부민), 헴(Heme) 등을 직접 생산할 수 있는 기술이 개발됨.

○ 기후 대응형 품종의 개발을 위한 연구들이 계속되고 있음.
- 토마토의 고온기 재배를 위한 내서성 품종은 고온 스트레스 조건에서 식물체당 많은 꽃수,

주두 이상돌출, 화분 대량생산, 충분한 화분활력 및 약으로부터 배출, 착과력 등 내서성 품종을 육성 중임.

- 미국은 고추의 경우 광 요구도가 높기 때문에 광 부족 시 낙화가 많다고 밝혔고, 중국은 피망 재배 시 광을 80% 정도 차광하면 스트레스로 인하여 낙화가 증가한다고 보고함. 고추 재배 시 저일조와 같은 스트레스는 세포 내부의 에틸렌 발생 증가를 초래하고 에틸렌은 화아 기관으로의 오옥신 이동을 줄이기 때문에 낙화를 유발한다고 제안함.
- 일본의 연구기관에서 포도의 착색불량 현상의 원인에 대한 안토시아닌 축적, 유전자 발현, 호르몬 효과, 고온이 영향을 미치는 시기 등에 대하여 다각도로 연구함.

나. 케어푸드

① 메디푸드

○ 혈액, 소변, 모발 등의 생물학적 표본으로부터 식품 섭취 바이오마커(Biomarker of food intake, BFI)와 복합 BFI를 분석하기 위하여 연구를 진행 중임. 이는 주관적인 식단 평가의 한계를 극복할 수 있는 경로를 제공할 뿐 아니라 더욱 정확하고 객관적인 데이터를 통해 정밀영양 전략에 정보를 제공하고 식단과 건강의 연관성에 대한 근거를 강화할 수 있음.

○ 스위스 Nestlé Health Science는 가수분해 단백질, 중쇄지방산 기반 소화 용이 제형 개발. UHT 멸균, 무균 충전 공전을 활용한 장기 보존 액상형 메디푸드를 생산함. 모듈형 배합 방식으로 환자 맞춤형으로 조성 가능함.

○ 미국 Medtrition은 튜브 급여용 액상 단백질 및 섬유소 제품을 개발함.

○ 프랑스 · 네덜란드 Danone Nutricia는 미세캡슐화, 스프레이 드라이 기술을 통해 불포화지방산과 프로바 이오틱스의 안정성을 확보함.

○ 일본 Nutri는 환자 및 tube feeding 대상 반고형 또는 점도 조절 제품을 제조함.

② 고령친화식품

○ 고령자용 식품 제조 기술은 일본이 선도적임. 최근 소재에 효소를 함침시켜 처리함으로써 소재의 자연스러운 형상 및 색조를 유지하면서도 구강 내에서는 부드러운 기술을 개발함. 또한, 저작 운동이 저하된 환자에게 저작 및 연하 작용 기능의 회복을 돕기 위한 겔화제 혼합물 생산 기술이 보급되고 있음.

○ 과거 일본에서 주로 발달했던 것에 비해 현재에는 전 세계적으로 고령친화식품 개발 및 발전을 위한 노력이 진행 중임.

- 프랑스는 노년층을 대상으로 한 실버 식품산업에 대한 마케팅이 매우 발전하여 쉽게 개봉할 수 있고 빠르고 편리하게 섭취할 수 있는 식품들 또는 미각을 잃은 노인 분들을 위한 식품이 출시됨
- 독일은 냉동식품 형태의 포장된 식재료를 보급하고 특히 이를 이용하여 장기요양 시설 급식이나 재가노인 이동급식 문제를 적극적으로 해결해오고 있는 게 특징임.
- 중국은 일본을 넘어서 세계 2대 건강보조식품 시장으로 언급될 정도로 고령식품 시장에 관심이 높으며, 노인 식품에는 중노년, 노년 등의 단어 사용 및 고칼슘, 고단백질, 저지방 등의 단어들을 추가해 눈에 잘 띄는 강조된 패키지가 특징으로 나타남. 판매 중인 노인 식품은 물에 타서 섭취하는 분말 형태 제품이 주를 이루고 두유, 참깨죽, 등 기타 분말제품도 같이 판매 중임.

○ 최근 3D 식품 프린팅이 연하곤란 환자 식단의 획기적 기술로 주목받고 있음. 이는 압출 기반 프린팅을 통해 국제연하곤란 식이 표준화주도 기준에 부합한 식품을 생산할 수 있음.

○ 신선한 채소를 3D 프린팅으로 연하곤란식으로 변환하는 방법을 개발하였으며, 하이드로콜로이드의 농도와 조합을 최적화하여 높은 수분 함유 식재를 인쇄 가능하게 만들었음. 이를 통해 동결 건조 대비 더 적은 하이드로콜로이드 사용과 더 나은 영양가 및 맛 보존이 가능해짐.

○ 분쇄형 식품도 3D 프린터를 이용하여 다시 원래 모양으로 재구성할 수 있음. 현재는 양배추, 완두콩, 닭고기, 당근, 감자 등을 이용하며, 앞으로는 더욱 다양한 음식을 프린팅할 수 있을 것으로 기대함.

③ 건강기능식품

○ 국내와 마찬가지로 살아 있는 균주 뿐 아니라, 사멸균체 및 대사산물까지 포함한 새로운 형태의 마이크로바이옴 유래 기능성 원료의 개발이 증가하고 있음.

○ 프로바이오틱스 및 기능성 성분의 생체이용률 향상 기술로서 나노 캡슐화, 마이크로유체공학, 3D 프린팅 등 기술이 활발히 개발 중임. 마이크로바이옴–대사체–질병 간의 인과 경로를 통합적으로 분석하는 통계/계산 방법론이 활발하게 개발되고 있어, 기능성 원료 개발 시 단순 성분 중심이 아니라 마이크로바이옴 · 대사체 · 임상 지표 변화 등을 묶는 복합 지표 접근이 가능함.

○ 포스트바이오틱스의 포도당 대사 개선, 지방조직 염증 감소, 지질산성 대사 개선 등 다중 건강 이점이 보고됨.

○ 발효 기반의 기능성 소재에 대한 기술을 통하여 식물성 바이오액티브 펩타이드 생성함. 이들

은 체중관리 효과, 심혈관 건강 효과, 포도당 및 지질 조절과 면역 지원 효과가 보고됨.

○ 건강기능식품 트렌드는 국가별로 조금씩 달라짐. 미국은 프로바이오틱스, 비타민, 오메가 3, 일본은 피부미용, 실버 세대, 관절, 음료, 대사증후군, 아이 케어, 멘탈 케어, 면역 등으로 정리할 수 있음.

다. 스마트 제조 · 유통 기술

① 스마트 팩토리

○ 글로벌 식품기업은 인공지능과 빅데이터를 활용해 전체적인 프로세스를 자율적으로 제어하는 머신비전 솔루션을 적용하여 스마트 팩토리를 구축함.

- Tyson은 SCADA · 제조 데이터 표준화를 통하여 실시간으로 프로세스 내 데이터 교환이 이루어지는 스마트 팩토리를 구축하여 육류의 절개 및 정형 등 고중량 반복업무를 수행하는 로보틱스의 효율성을 높임.
- Unilever는 머신비전 시스템과 로보틱스를 도입하여 소시지 생산 및 포장 작업을 자율화 · 자동화하여 분당 생산량을 2배 향상시키는 성공적인 결과를 보고함.
- 최대 규모의 식음료 회사 중 하나인 Nestlé는 5G 네트워크를 도입하여 원료 및 최종 제품을 운반하는 로봇의 전체적인 프로세스 반응 속도를 높여 초콜릿 공장의 생산 효율성을 향상시키는 데 일조함.
- Barilla는 AI 기반 스마트 센서, 3D 프린팅 및 홀로그래픽 디자인 시스템을 핵심으로 내세워 스마트 팩토리 설계를 위한 프로세스 개발 및 테스트를 수행하고 있음.
- ABB Robotics, Universal Robots 등에서 자동화 협동로봇 솔루션 및 휴머노이드 로봇을 개발하여 공장에 시범 적용하는 등 상용화를 위한 시험 적용 단계에 진입함.

② 식품 프린팅 기술

○ 2006년 미국 코넬대학교에서 최초의 3D 푸드 프린터인 Fab@Home 모델이 공개된 이후로 3D 프린팅의 원천기술 확보 및 기술계량, 소재 개발 등에 대한 집중적인 연구가 이루어지고 있음.

○ 기능성 화합물 또는 프로바이오틱스를 캡슐화하여 3차원 공간에 균일하게 배열함으로써 기능성 식품을 제조하는 연구도 집중됨.

○ 산업적으로는 3D Systems가 리퀴드 바인딩 방식의 3D 프린팅 기술을 개발하여 초콜릿 제조사 Hershey와 용융 압출방식의 코코젯 초콜릿을 출력하고, CSM 인그레디언츠(CSM Ingredients)와 협력하여 사탕과 제과제빵류를 제조하는 프린팅 기술을 선보였음.

③ 차세대 보존 기술

○ 국외 과냉각 연구는 국내와 유사하게 일반 냉장 저장 대비 식품의 저장성을 크게 증진시킬 수 있다고 보고됨. 이와 함께 과냉각 안정성을 확보하기 위하여 단계적 온도 조절 시스템 최적화, 전자기장을 이용한 물 분자 제어, 염지를 통한 빙핵 형성 억제 효과 상승 등 다양한 시도가 이루어지고 있음.

○ 능동 포장 시스템을 위해 Ageless® 또는 FreshLock®과 같은 기체 조절제가 활발히 사용됨. 산소와 이산화탄소 외에 포장 내부 에틸렌 제거를 위하여 과망간산칼륨, 제올라이트 등이 그 효과를 인정받아 연구 중임.

○ 리소자임, 니신, 키토산, 포도씨 추출물, 박테리오신, 벤조산 등 다양한 천연물질을 이용한 항균 필름을 개발함. 키토산, 전분, 단백질 등의 고분자에 정유, 폴리페놀, 은나노, 나노 에멀전 등을 결합 후 코팅한 나노복합필름 연구 또한 다수 수행되고 있음.

라. 자원순환 기술

① 식품 업사이클링

○ 식품 업사이클링을 단순 제품화을 넘어 제도적 기반과 인증 시스템을 구축하여 지속 가능한 산업 생태계를 조성하고 있음.

- 농수산 부산물, 식품 제조과정 부산물 등으로 시리얼, 쿠키, 빵 원료, 스낵, 젤리 등을 개발하여 상품화함.
- 대표적인 사례로는 Renewal Mill의 오카라 분말 쿠키, ReGrained의 곡물 바, Barnana의 못생긴 바나나 스낵이 있음.

○ 식품 외 포장재, 화장품, 바이오 소재로 빠르게 확장되고 있음.

- 포장재에서는 밀기울, 쌀겨, 맥주박 등 식물성 섬유에서 추출한 나노셀룰로오스를 바이오필름, 코팅, PLA 보강재에 적용하는 연구와 파일럿 검증이 진행 중임. Mondi는 농업 부산물 기반 바이오 서큘러 코팅을 Traceless와 공동 개발하여 종이 포장재의 플라스틱 코팅 대체를 지향함. Apeel Sciences은 식물성 식용 코팅을 과일과 채소 표면에 적용해 수분 손실과 산소 접촉을 줄이고 신 선도 연장과 포장재 절감에 기여함.
- 화장품에서는 과채박, 커피박, 견과 껍질 유래 성분을 보습, 스크럽, 항산화 콘셉트로 활용하는 상용 사례가 확대되고 있음. 예로 EchoSchoette는 커피박 오일로 크림을, UpCircle Beauty는 아몬드 껍질과 커피박 추출물 등을 활용하여 스크럽제로 개발하였음.

○ 포장재, 화장품, 바이오소재 등 비식품 분야로의 확장은 자원의 활용도 및 환경적 성과를 극대화할 수 있음. 식품, 비식품 간 소재 · 기술의 공동 표준화를 통해 나노 셀룰로오스 기반

포장재, 항산화 화장품 원료 등 신규 시장을 창출함.

② 친환경 포장

○ 감량, 재활용, 재생 가능 원료 등을 활용한 친환경 포장 기술이 다양하게 연구 중임.

- TOPPAN은 BOPP(Biaxially Oriented Polypropylene) 기반의 투명 고차단성 필름을 개발함. 이는 층수 및 소재 사용량을 줄여 필름 경량화를 하였으며, 재활용성을 향상하였음.
- Ecolean은 공기층을 삽입한 초경량 파우치를 개발하여 기존 유리 · 카톤 대비 자원의 사용을 40~50% 절감함. 상온 무균충전으로 냉장 유통 불필요할 뿐 아니라 원재료 및 물류비 절감됨.
- Heineken France는 유리 성형 · 냉각 공정 최적화 및 소재의 사용을 최소 설계하여 강도와 안전성 유지하면서도 유리의 투입량은 절감함.
- The Wine Society는 100% 재생 PET로 제작된 와인병임. 이는 버진 플라스틱 사용량을 절감하고 탄소 배출 저감 효과를 보였음. 뚜껑과 라벨까지 재활용할 수 있도록 설계해 완전 재활용 구조를 구현함.
- Perstorp는 중간층에 최대 90% rPET를 사용하는 구조로 외부층은 신소재로 보강하여 안정성을 최대한 확보함. 고온 충전 공정에서 견디도록 내열성을 확보하였으며 투명도 · 기계적 강도를 유지함.
- Unilever는 100% rPET으로 만든 병을 개발하여 PCR(Post-Consumer Recycled) 플라스틱 사용을 증대함.
- YUMU는 사탕수수, 대나무 등 100% 식물성 원재료 기반 친환경 신소재 포장재를 개발한 바 있음.
- 워싱턴대학교는 천연 식물 잎의 구조를 모방하여 기계적 강도를 향상시킨 신소재를 개발함. 생분해 소재로 5주 만에 완전 분해가 가능함.

마. 소비자 맞춤형 정보

① 영양 프로파일링 모델

○ 국가적 차원에서, 기업 차원에서, 혹은 연구적 차원에서 전 세계적으로 다양한 영양 프로파일링 모델이 제안되어 옴.

- 영국은 식품기준청과 통신 규제 기관 오프컴에서 FSA/Ofcom 영양 프로파일링 모델을 개발함. 영양소 별로 기준 범위를 설정하고, 해당 범위마다 포인트를 부여하여 합산하는 모델을 개발하였음. 해당 모델에서는 식품 100g을 기준으로 점수를 계산하였으며, 단백질, 식이섬유, 과일 및 채소군, 열량, 당류, 포화지방산, 나트륨 등 7가지 요소를 고려하여 식품을 평가함.
- 미국은 질병통제예방센터, 연방거래위원회, 식품의약국 및 농무부 등의 기관과 함께

Preliminary Proposed Nutrition Principles to Guide Industry Self-Regulatory Efforts라는 영양 프로파일링 모델의 개발을 제안함. 미국에서 아동 건강에 영향을 미치는 것으로 확인된 우려되는 영양소는 포화지방산, 트랜스지방산, 첨가당 및 나트륨으로, 세 가지 영양성분이 식품에 함유된 함량을 가지고 식품을 3단계로 분류함.

- 미국의 Nestlé Nutritional Foundation에서는 2004년부터 전 세계 네슬레 제품에 Nestle Nutritional Profiling System을 개발하여 사용하고 있음.
- Ajinomoto에서는 2020년 4월에 자체적인 식품 평가 시스템인 Ajinomoto Group Nutrient Profiling System for Products를 도입하였음. 이는 일본에서 영양 프로파일링 모델을 활용한 최초의 사례임.

② 개인 맞춤형 식단

○ 생체 데이터와 유전체 · 마이크로바이옴 기반 정밀 예측 모델 등을 중심으로 발전하고 있음. 연속적인 혈당 측정, 수면 · 활동량, 식이정보 등을 실시간 분석해 실제 식이반응을 예측하고자 디지털 트윈 기반 모델이 개발되는 추세이며 식품의 개인별 반응성 분석이 활발함.

- 디지털 트윈은 물리적 사물과 컴퓨터에 동일하게 표현되는 가상 모델로서 단순 시뮬레이션을 넘어 AI · 머신러닝 기반 동적 모델을 적용해 개인마다 최적 식단 · 체중감량 · 약물 조합 등 탐색하는 플랫폼으로 발전 중임.
- 특히 당뇨병과 관련하여 개인의 연속혈당, 식이기록, 활동 · 수면 웨어러블, 혈액 · 임상지표 등을 통합해 개인별 대사 반응을 예측하고 그 예측에 근거해 개인 맞춤형 영양을 실시간 제안하는 모델 · 시스템에 관한 연구가 진행 중임.

○ 라벨의 스캔을 통해 성분 · 영양 · 알레르기 정보를 자동 분석하여 개인 맞춤형 식품을 추천하는 서비스가 등장하였으며, 외식 및 가정식 모두에서 AI 기반 정밀영양 알고리즘이 확산되었음.

- MyFitnessPal은 1,400만 개 이상의 식품 데이터베이스와 바코드 스캔 기능을 갖춘 가장 인기 있는 영양 추적 앱임. 프리미엄 버전을 이용 시 매크로 목표 추적 및 식품 분석 기능을 제공함.
- Cronometer는 칼로리 및 매크로 영양소 외에도 84개의 미량영양소를 추적하는 정밀 추적 플랫폼으로써, USDA 검증 데이터베이스를 활용하며 무료 버전 또한 바코드 스캔이 가능함.
- Lifesum은 생활 방식 중심의 영양 추적 앱임. 프리미엄 버전에서 일일 점수 기능, 간헐적 단식 지원, 맞춤형 식사 계획 등을 제공하고 있음.

○ 국외에서도 연속혈당 측정 시장의 규모의 성장이 두드러지며, 실시간 연속혈당측정기, 비침습 연속혈당측정기, 웨어러블 포맷 등이 활발히 연구됨. 웨어러블 디바이스로 연속혈당측정

기를 제공하는 스마트워치와 손목밴드가 개발되었으며 이는 자극 회피 사용자와 소아 및 고령층에게 수용도가 높음.

○ 머신러닝과 하이드로겔 및 이오노겔 기반의 소프트 센서를 통해 음식 및 생리적 반응과 관련된 다양한 요인을 인식하여 학습, 분석 및 예측할 수 있는 기술을 개발 중임.

○ 최근 Viome, DayTwo 등 세계적 기업들은 장내 미생물의 RNA 발현과 AI 해석을 결합해 개인 맞춤형 식품 추천을 제공하고 있음.

1.3 국내외 기술 발전 동향 비교

○ 국내외 푸드테크 기술은 단순한 제품 개발이나 공정 등을 개선하는 수준을 벗어나 식품산업 전 과정을 고도화 · 지능화 하는 방향으로 진화하고 있음(그림 6).



그림 6. 푸드테크 기술 발전 방향

– 초기에는 식물성 대체식품, 온라인 플랫폼, 자동화와 같은 특정 제품이나 서비스 혁신을 중심으로 발전하였으나, 최근에는 원료 설계부터 생산 · 유통 · 소비까지 연결하는 통합 플랫폼 기술 확보가 중요함.
– 이에 따라, 연구개발 또한 다양한 제품과 공정에 적용이 가능한 핵심 소재, 공정 플랫폼과 데이터 기반 기술 확보로 집중되고 있음.

○ 식량안보, 탄소중립, 생산인구 감소, 고령화 및 개인화 수요에 대응하는 방향으로 발전하고 있음.
– 환경부하를 줄이면서 단백질과 기능성 소재를 안정적으로 생산하기 위한 정밀발효, 세포배양 및 원료 다변화 기술이 확대되고 있음.
– 생산성 및 품질을 높이기 위한 AI 기반 공정제어, 자동화 및 지능형 공급망 기술이 발전하고 있음.
– 소비자 개인의 건강상태 및 섭취행태 등을 분석하여 맞춤 서비스를 제공하는 정밀영양 기술 고도화가 이루어짐.

– 향후 기술의 우위는 개별 기술 보유보다 이를 하나의 체계로 통합하는 역량에 의하여 좌우될 것으로 전망됨.

○ 이러한 발전 방향에 따라 분야별 핵심기술을 중심으로 연구개발과 산업 적용이 활발하게 이루어지고 있음.

– (지속가능 식품) 식물성 대체식품, 정밀발효 및 세포배양식품을 중심으로 원료 다변화와 상용화 기술개발이 확대되고 있음.

– (케어푸드) 고령친화식품과 특수의료용 식품을 중심으로 개인 맞춤형 영양관리 기술이 고도화되고 있음.

– (스마트 제조 · 유통 기술) AI, 머신비전 및 로봇 기반의 생산공정 자동화와 품질관리 기술이 확대되고 있음.

– (소비자 맞춤형 정보) 건강데이터와 AI를 활용한 정밀영양 및 개인 맞춤형 식품 추천 기술이 발전하고 있음.

– (자원순환 기술) 식품 부산물 활용, 친환경 포장 및 바이오소재 개발을 중심으로 순환경제 기반 기술이 확대되고 있음.

○ 분야별 국내외 기술개발 동향을 비교한 결과(표 4), 국외는 기술의 상용화와 산업 확산이, 국내는 핵심기술 확보와 실증 연구가 중심을 이루고 있음.

표 4. 분야별 국내외 기술 발전 동향 비교

분야	국외	국내
지속가능 식품	- 식물성 대체식품·정밀발효 산업 상용화 확대 - 세포배양식품 대량생산 및 판매 승인 확대 - 기후대응 품종 및 대체원료 산업화 확대 - 하이브리드 단백질 제품 시장 확대	- 식물성 대체식품 및 식용곤충 연구 확대 - 배양육 배지 국산화 및 배양공정 최적화 연구 - 국산 단백질 원료 및 기능성 소재 개발 - 기후대응 품종 개발 및 원료 국산화 추진
케어푸드	- 연하곤란식 및 효소 연화기술 고도화 - 메디푸드 시장 확대 - 고령친화식품의 물성·영양 강화 기술 발전 - 식품 프린팅 기반 연하곤란식 상용화	- 고령친화 연화식 및 고단백 식품 개발 확대 - 메디푸드 및 고령친화식품 개발 확대 - 효소처리·수비드 기반 연화기술 개발 - 식품 프린팅 기반 고령자 식품 연구
스마트 제조·유통 기술	- AI·로봇 기반 스마트팩토리 확산 - 머신비전 기반 자율생산시스템 상용화 - 협동로봇 기반 제조·포장 자동화 확대 - 능동포장 및 스마트 포장기술 적용 확대	- AI·머신비전 기반 품질관리 기술 개발 - 생산공정 자동화 기술 개발 - 초분광영상 기반 품질 예측기술 개발 - 과냉각 저장·능동포장·지능형 포장 기술 개발 - 식품 프린팅 실증 연구
소비자 맞춤형 정보	- 디지털 트윈 기반 정밀영양 플랫폼 상용화 - 실시간 건강데이터 분석 서비스 확대 - 개인 맞춤형 식품 추천 서비스 운영 - 식이 반응 예측기술 고도화	- 국가 식품영양 DB 구축 및 데이터 통합 - AI 기반 정밀영양·개인 맞춤형 분석기술 개발 - 음식 인식 및 혈당 연계 서비스 개발
자원순환 기술	- 업사이클링 인증·제도 체계 구축	- 식품 부산물 기반 기능성 소재 및 식품 개발

분야	국외	국내
	- 식품 부산물 기반 바이오소재·포장재 산업 확대 - 바이오필름 및 식물성 코팅기술 상용화 - 비식품 산업과의 연계 확대	- 생분해·재활용 기반 친환경 포장기술 개발 - 고부가 바이오소재화 연구

- 지속가능 식품과 케어푸드 분야는 사회적 수요 증가를 바탕으로 제품 다양화와 기능 고도화가 공통적으로 추진되고 있으며, 국외는 시장 확대와 산업화가 빠르게 진행되는 반면 국내는 원천기술 확보와 국산화 기반 마련에 연구개발이 집중되고 있음.
- 스마트 제조 · 유통 기술은 AI, 로봇 및 데이터 기반 생산관리 기술이 식품산업 전반으로 확산되면서 생산성과 품질관리의 디지털 전환을 주도하고 있으며, 국내에서도 스마트 제조 기반 구축과 공정 고도화를 위한 기술개발이 활발히 이루어지고 있음.
- 소비자 맞춤형 정보는 건강데이터와 AI를 활용한 정밀영양 서비스가 핵심 기술로 부상하고 있으며, 향후 데이터 연계와 플랫폼 구축 수준이 기술 경쟁력을 결정하는 주요 요소가 될 것으로 전망됨.
- 자원순환 기술은 식품 부산물의 고부가가치 활용과 친환경 소재 개발을 중심으로 발전하고 있으며, 탄소중립과 순환경제 정책 확산에 따라 적용 범위가 지속적으로 확대될 것으로 예상됨.

○ 각 주요국별 기술의 수준은 다음 표 5와 같음.

표 5. 주요국별 기술 수준 비교

국가	주요 분야	수준
미국	지속가능 식품, 스마트 팩토리, 자동화	매우 높음
유럽	지속가능 식품, 케어푸드, 자원순환 기술	매우 높음
일본	케어푸드, 스마트 팩토리, 자동화	높음
중국	온라인 플랫폼, 자동화, 소비자 맞춤형 정보	높음
한국	지속가능 식품, 스마트 팩토리, 스마트 안전관리 및 포장 기술	중상

- (미국) 정밀발효, 세포배양 식품, AI 기반 식품 제조 및 푸드로봇 관련 원천기술 확보와 더불어 기술 사업화를 선도하고 있음.
- (유럽) 지속가능성과 건강 증진 중심 기술의 개발을 확대하고 있는 한편 환경 정책 등과 연계하여 저탄소 공정과 순환 경제 기술의 발전을 지속하고 있음.
- (일본) 고령친화식품, 기능성 소재의 개발 및 자동화 기술을 중심으로 발전하고 있음. 주로 고령사회 대응 목적 제품화와 제조공정 고도화에 집중하고 있음.

– (중국) 스마트 유통 및 외식 서비스 자동화, 지능형 공급망 기술을 개발하고 있음. 소비 데이터 활용과 대규모 실증을 통해 기술 상용화를 가속화할 수 있음.
– (한국) 대체식품, 스마트 제조와 같은 ICT 융합 기반 기술의 개발을 확대하고 있음. 최근에는 산업 경쟁력 강화를 목표로 핵심 소재, 공정 플랫폼과 데이터 기반 기술 확보를 추진 중임.

○ 한국의 푸드테크 기술은 개별 기술 개발에서 일정 수준 이상 경쟁력을 확보하고 있음. 다만, 원천기술, 데이터 인프라 및 플랫폼, 대규모 사업화 역량을 통합하는 기술 생태계의 측면에서 주요 선도국과 상당한 기술의 격차가 존재하는 것으로 분석됨(그림 7).

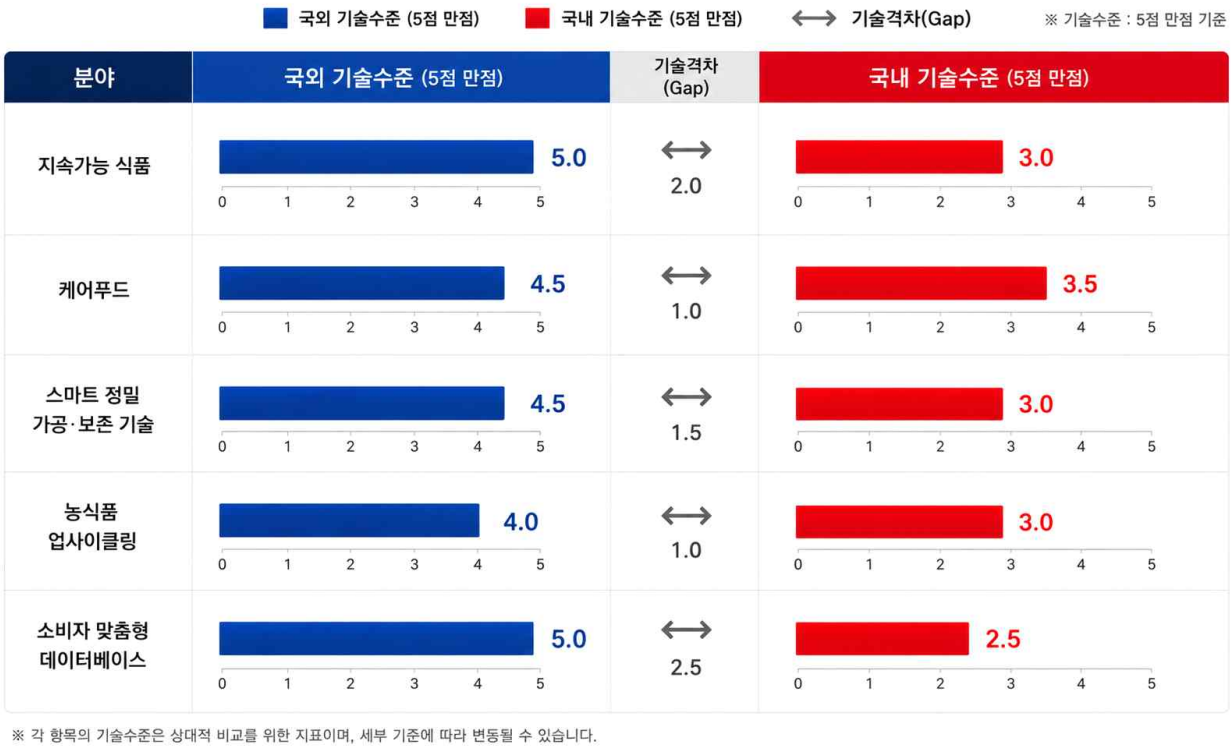


그림 7. 국내외 기술 발전 동향 비교

– (지속가능 식품) 기술 격차 큼. 대체식품 개발에 필요한 핵심 소재, 대량생산 기술 등의 원천기술과 상용화를 위한 경제성 확보와 규제 대응 경험 또한 부족한 상황임.
– (케어푸드) 다른 분야들에 비해 기술의 격차는 작은 편임. 제품 개발 역량 등은 일정 수준 이상 확보하고 있음. 단, 데이터 연계 서비스 및 효능 검증, 개인 맞춤형 솔루션 제공 역량 등은 고도화가 반드시 필요함.
– (스마트 제조 · 유통 기술) 중간 수준의 격차를 보임. 자동화 설비의 도입은 국내 또한 확대되고 있는 추세지만 AI 기반 자율공정 운영, 디지털 트윈 시스템, 품질 예측 및 공정 최적화 기술은 선도국에 비해 경쟁력이 부족한 상황임.

– (소비자 맞춤형 정보) 가장 큰 격차를 보이는 분야임. 개인 건강정보 및 식이정보 등을 통합할 수 있는 데이터 인프라, 알고리즘 및 서비스 플랫폼 구축 역량이 미흡한 것으로 평가됨.
– (자원순환 기술) 기술의 격차가 비교적 작은 분야지만 부산물 활용 기술이 개별 공정 수준에서 정체되어 있음. 소재 개발 및 순환형 산업 생태계 구축 측면에서 추가적인 기술의 개발이 필요함.

○ 향후 핵심 원천기술 확보, 통합 플랫폼 구축 중심으로 주요국과 기술의 격차를 축소할 필요가 있음.

2 기술발전 흐름

○ 푸드테크 기술은 생산 · 제조 중심의 단위 기술에서 유통 · 소비 · 자원순환까지 포괄하는 산업 전주기 기술로 발전하고 있음.
– 생산 · 제조 중심에서 유통, 소비 및 자원순환까지 확대되고 있을 뿐 아니라 그 목적 또한 맞춤형 서비스, 지속가능성과 공급망 안정성 확보로 변화하고 있음.
– 최근 식품산업 전주기를 혁신하는 방향으로 발전하고 있음.

○ 분야별로 기술 성숙도와 산업화 단계 상 차이가 존재함(그림 8). 일부 기술들은 산업화 단계에 진입한 반면 차세대 기술은 실증 또는 초기 상용화 단계임.

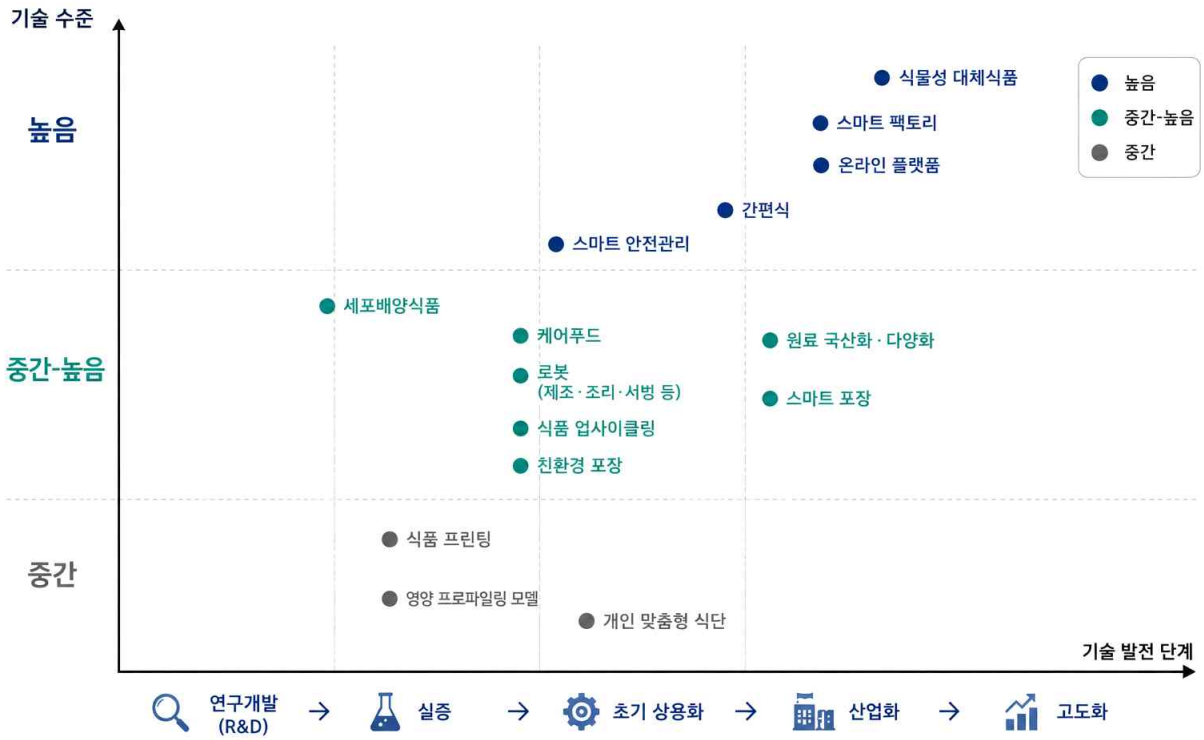


그림 8. 분야별 기술 수준 및 특징

○ (지속가능 식품) 식물성 대체식품은 기술수준이 높고 고도화 단계에 진입한 반면, 세포배양식품 및 원료 국산화 · 다양화는 중간~높은 기술수준에서 초기 발전단계에 위치하고 있음.

– 식물성 대체식품은 다양한 제품이 시장에 출시되고 유통채널이 확대되면서 제품 다양화와 품질 고도화가 지속되고 있음.

– 세포배양식품은 배양배지, 대량배양 공정 및 생산비용 절감 기술 등이 아직 충분하게 확보되지 않아 실증 및 초기 상용화 단계에 머무르고 있으며, 원천기술 확보와 생산성 향상이 주요 과제로 제시되고 있음.

– 원료 국산화 · 다양화는 국산 식품원료와 대체원료의 개발이 확대되고 있으나, 안정적인 원료 공급체계 구축과 품질 균일성 확보가 지속적인 과제로 남아 있음.

○ (간편식) 기술수준이 높고 산업화 단계에 진입하여 제조기술과 유통체계가 안정적으로 구축되어 있음.

– 소비자 편의성과 건강을 고려한 프리미엄 간편식과 기능성 간편식 등으로 제품군이 다양화되고 있으며, 자동화 생산공정과 냉장 · 냉동 유통기술 고도화를 통해 생산 효율성과 품질 경쟁력이 지속적으로 향상되고 있음.

○ (케어푸드) 기술수준은 중간~높음이며, 초기 상용화에서 산업화 단계로 발전하고 있음.

– 섭취 편의성과 영양기능을 강화한 제품 개발이 확대되고 있으며, 고령자와 환자의 건강상태, 섭취능력 및 영양 요구를 반영한 제품이 시장에 공급되면서 적용 대상과 제품군이 지속적으로 확대되고 있음.

○ (스마트 제조 · 유통 기술) 푸드테크 분야에서 가장 성숙한 영역 중 하나로, 스마트 팩토리와 온라인 플랫폼은 산업화에서 고도화 단계에 진입하였으며, 로봇 · 스마트 안전관리 · 스마트 포장은 초기 상용화에서 산업화 단계, 식품 프린팅은 실증에서 초기 상용화 단계에 위치하고 있음.

– 스마트 팩토리는 AI와 IoT를 활용한 공정 자동화와 데이터 기반 생산관리 기술이 확산되면서 생산성과 품질 안정성이 향상되고 있음.

– 제조 · 조리 · 서빙 로봇은 반복 작업과 인력 부족을 보완하는 핵심 기술로 활용 범위가 확대되고 있음.

– 식품 프린팅은 맞춤형 식품과 케어푸드 분야를 중심으로 실증과 초기 시장 적용이 진행되고 있으나, 생산속도와 소재 다양성 확보가 과제로 남아 있음.

– 스마트 안전관리는 센서와 AI 기반 위해요소 예측 및 실시간 품질관리 기술의 적용이 확대되고 있으며, 스마트 포장은 품질 유지와 신선도 관리 기능을 중심으로 상용화가 확대되고 있음.

– 온라인 플랫폼은 식품 주문 · 유통을 넘어 공급망 관리와 데이터 연계 기능까지 확대되면서

디지털 기반 식품산업 생태계 구축을 견인하고 있음.

○ (소비자 맞춤형 정보) 기술수준이 상대적으로 낮은 분야로, 영양 프로파일링 모델은 실증에서 초기 상용화 단계, 개인 맞춤형 식단은 초기 상용화 단계에 위치하고 있음.

– 영양 프로파일링 모델은 식품의 영양성분과 원재료 정보를 기반으로 식품의 영양적 특성을 평가하고 개인 맞춤형 서비스의 기반기술로 활용되고 있음.

– 개인 맞춤형 식단은 건강정보, 생활습관 및 식품 선호도를 반영한 추천서비스가 확대되고 있으나, 데이터 표준화와 개인정보 연계체계가 충분하지 않아 기술 고도화를 위한 연구개발이 필요한 상황임.

○ (자원순환 기술) 식품 업사이클링과 친환경 포장을 중심으로 중간~높은 기술수준에서 초기 상용화에서 산업화 단계로 발전하고 있음. 두 기술 모두 원료 품질의 균일성 확보, 생산비용 절감 및 기존 소재와 동등 이상의 성능 확보가 향후 산업 확산을 위한 주요 연구개발 과제로 제시되고 있음.

– 식품 업사이클링은 식품 부산물을 식품원료와 기능성 소재로 활용하는 기술로, 다양한 제품 개발과 산업 적용이 확대되고 있음.

– 친환경 포장은 생분해성 및 바이오 기반 소재를 활용한 포장재 개발이 확대되고 있으며, 플라스틱 저감과 탄소중립 정책에 대응하기 위한 핵심 기술로 주목받고 있음.

3 핵심 발전축

가. 데이터 기반화

○ 식품산업의 운영방식이 경험 및 개별 정보 중심에서 생산 · 유통 · 소비 전 과정의 데이터를 수집 · 연계 · 활용하는 구조 중심으로 전환되고 있음.

– 원료 특성부터 공정 조건, 품질, 설비 상태, 물류 및 소비 정보까지 식품산업 전 주기에서 수집되는 데이터 범위가 확대되고 있음.

– 개별 설비 및 공정에서 분산 관리되던 정보를 통합해 연구개발, 생산관리, 품질관리 및 공급망 운영에 활용하는 시스템이 확산되고 있음.

– 데이터를 사후 확인하는 방식에서 공정 중 실시간 분석하여 의사결정 시 활용하는 방식으로 변화하고 있음.

– 각 기업의 기술경쟁력이 제품 및 공정 중심에서 데이터 축적량, 품질 및 활용역량 등에 의해 좌우하는 구조로 전환됨.

– 향후 원료 생산부터 소비까지 정보를 연결하기 위해 데이터 표준화, 상호운용성 확보 및 공동 활용이 가능한 시스템 구축의 중요성이 더욱 높아질 것으로 예상됨.

나. 지능화

○ 데이터를 인공지능으로 분석하여 품질, 생산, 수요 및 위해요소 등을 예측하고 예측한 결과를 기반으로 공정 및 서비스를 최적화함.

- 작업자의 경험과 판단에 의존하던 기존의 방식이 데이터와 알고리즘 기반으로 분석 · 예측하는 방식으로 전환되고 있음.
- 품질 이상이나 설비의 고장이 발생한 이후 대응하는 사후관리에서 이상징후와 위해요인을 사전 감지하는 예측형 관리로 발전하고 있음.
- 생산조건 및 원료 특성 간의 복잡한 관계를 분석하여 공정 · 배합 등의 최적황에 활용할 수 있는 지능형 의사결정기술 등이 도입되고 있음.
- 생산과 재고를 일정하게 유지하는 방식에서 실제 시장수요 및 소비 패턴 변화에 따라서 생산량, 재고 및 물류를 조정하는 방향으로 발전하고 있음.
- 향후 단순한 정보의 제공 및 의사결정 지원을 넘어서 인공지능 스스로가 공정조건과 생산계획을 제안하고 조정하는 자율적인 운영방식으로 고도화될 것으로 전망됨.

다. 자동화 및 무인화

○ 개별의 작업을 기계로 대체하는 수준에서 벗어나서 제조 · 물류 · 조리 및 서비스 전체를 연결하고 자율 운영하는 방향으로 발전하고 있음.

- 원료 투입, 가공, 검사, 포장 및 운반 등의 단위공정 중심 자동화가 공정간 연계와 제어에 기반한 전 공정 자동화로 확대되고 있음.
- 로봇이 단순한 반복작업 및 위험한 작업을 수행하고 인간 작업자는 관리, 감독, 예외상황 대응 등을 담당하는 구조로 확산됨.
- 제조현장 중심으로 적용되던 자동화 기술이 물류, 조리, 주문, 배식 및 서빙 같은 유통 및 외식 서비스로 확대되고 있음.
- 생산속도 개선 뿐 아니라 작업조건 유지, 오염 가능성 저감 및 공정기록 자동화를 통해 품질 재현성과 식품 안전성을 향상하는 방향으로 발전하고 있음.
- 향후 설비, 로봇, 센서 및 인공지능 등이 서로 연계되어 생산계획부터 공정운영, 품질검사 및 물류까지 통합 관리하는 시스템 구축이 가능할 것으로 예상됨.

라. 지속가능화

○ 생산량과 경제성 중심의 기술개발에서 탄소배출, 자원사용, 폐기물 및 공급망 안정성을 함께 고려하는 방향으로 변화하고 있음.

- 원료의 생산과 제조 과정에서 에너지, 용수 및 원료 사용을 줄이고 생산성은 높일 수 있는 저

탄소 · 고효율 공정으로 전환되고 있음.

- 특정 원료 및 수입자원들에 대한 의존도를 낮추기 위해 원료의 국산화 · 다양화 및 대체원료 개발 중요성이 높아지고 있음.
- 식품 부산물과 폐기물을 단순 처리하는 방식에서 유용한 성분을 회수하여 식품 원료 및 소재로 활용하는 순환형 구조로 발전하고 있음.
- 제품 그 자체의 친환경성 뿐 아니라 원료 조달, 제조, 포장, 유통, 소비 및 폐기까지 전 주기의 환경적 부하를 평가하는 방식으로 지속가능성의 범위가 확대되고 있음.
- 향후 개별적 친환경 제품 개발에서 나아가서 원료, 생산공정, 포장 및 유통을 연결한 저탄소 · 순환형 식품 시스템 구축이 중요해질 것으로 전망됨.

마. 개인맞춤화

○ 동일한 제품을 대량 생산 · 공급하는 구조에서 소비자의 건강 상태, 생애주기, 섭취 능력, 선호도 및 생활방식 등을 반영하여 차별화된 제품 및 서비스를 제공하는 방향으로 발전하고 있음.

- 소비자를 연령이나 질환 등의 제한된 기준을 통해 구분하는 방식에서 개인별 특성과 실제 섭취정보 등을 통합 반영하는 방향으로 맞춤화 수준이 높아지고 있음.
- 제품을 일회성 판매하는 방식에서 식품 추천, 구매, 섭취 기록 및 건강관리까지 연계하는 지속적 서비스 구조로 전환되고 있음.
- 영양성분과 식품정보를 단순 제공하는 수준을 넘어서 소비자 특성에 적합한 식품과 식단을 분석 · 추천하는 서비스가 확대되고 있음.
- 디지털 헬스케어와 연계가 강화되면서 식품의 역할이 일반적인 영양공급에서 건강위험 예방 및 상태관리 지원으로 확장되고 있음.
- 향후 건강상태와 섭취결과를 지속 반영하여 제품과 식단을 조정하는 정밀 · 예방형 식품 서비스로 발전할 것으로 예상됨.

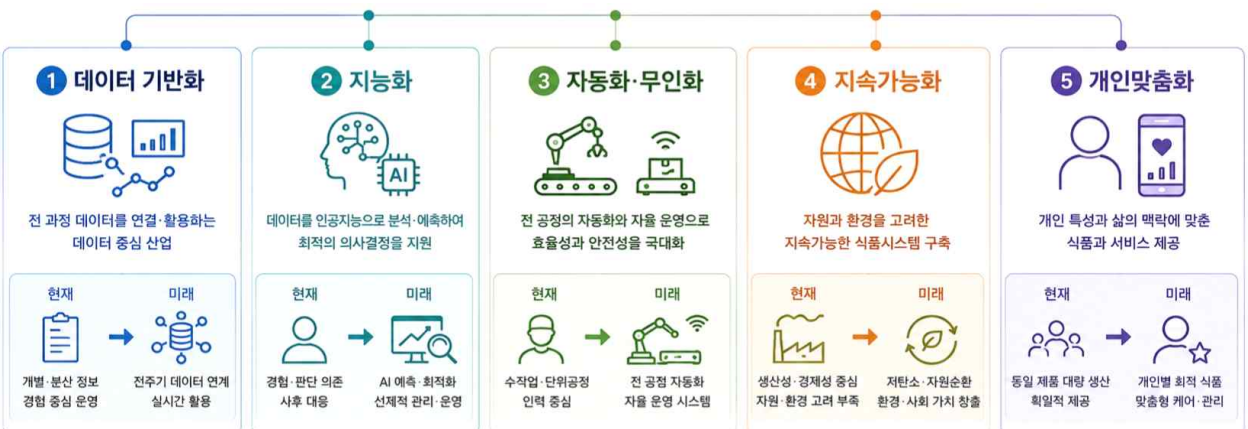


그림 9. 핵심 발전축의 변화

4 향후 기술 발전 방향

○ 푸드테크는 식품산업의 구조적 변화에 대응하기 위한 핵심 분야로, 기술성숙도와 산업화 수준에 따라 해결해야 할 기술적 과제가 상이함. 이에 분야별 기술 한계를 극복하고 산업 경쟁력을 강화하기 위한 중장기 연구개발 로드맵을 도출함.

표 6. 중장기 로드맵

분야	단기(5년)	중장기(10년)
지속가능 식품	- 식물성 대체식품의 조직감·풍미 개선 - 세포배양식품의 배지·세포주·배양공정 기술 확보 - 국산 단백질 원료 및 기능성 소재 개발 - 원료 국산화·다양화 기반 구축	- 세포배양식품의 생산성 및 경제성 고도화 - 식물성 대체식품의 품질 및 제품 다양화 - 지속가능 식품 상용화 확대 - 국산 원료 기반 안정적 공급체계 구축
케어푸드	- 고령친화식품 및 특수의료용식품 개발 - 연화기술 및 영양설계 기술 고도화 - 식품 프린팅 기반 맞춤형 케어푸드 제조기술 개발	- 식품 프린팅 기반 개인 맞춤형 케어푸드 상용화 - 개인 맞춤형 영양관리 기술 고도화 - 건강정보 연계 맞춤형 케어푸드 서비스 구현
스마트 제조·유통 기술	- AI·머신비전 기반 품질관리 기술 개발 - 스마트팩토리 기반 제조공정 자동화 확대 - 식품 프린팅 공정 및 제조기술 실증 - 스마트 안전관리 및 지능형 포장기술 개발	- AI 기반 자율 생산관리 구현 - 제조공정 통합 운영체계 구축 - 식품 프린팅 기반 다품종·맞춤형 생산체계 구축 - 실시간 품질관리 및 스마트 유통체계 고도화
소비자 맞춤형 정보	- 영양 프로파일링 모델 개발 - 개인 맞춤형 식품 추천기술 개발 - 식품·영양 데이터 구축 및 연계	- 건강·식품정보 연계 기반 개인 맞춤형 식품서비스 구현 - 개인 맞춤형 식품·영양관리 서비스 고도화 - 데이터 기반 맞춤형 식품정보 제공체계 구축
자원순환 기술	- 식품 부산물 기반 기능성 소재 개발 - 식품 업사이클링 기술 및 제품 개발 - 친환경 포장기술 개발	- 식품 부산물의 고부가가치 자원화 - 자원순환형 생산체계 구축 - 친환경 포장기술의 산업 적용 확대

○ 푸드테크 분야 연구개발 로드맵은 기술성숙도, 산업화 수준 및 기술적 한계를 종합적으로 고려하여 핵심기술 확보-기술 고도화-산업 확산의 단계적 발전 방향을 반영하여 수립함.

– (지속가능 식품) 식물성 대체식품의 산업화 진전과 달리 세포배양식품은 생산성 및 경제성 확보가 필요한 단계이며, 원료 국산화 또한 공급기반 확대가 요구됨. 이에 단기에는 기반기술과 원료 확보에 중점을 두고, 중장기에는 생산공정 고도화와 산업화를 통해 지속가능한 식품 생산체계를 구축하는 방향으로 설정함.

– (케어푸드) 고령화와 건강관리 수요 증가에 따라 시장 확대가 예상되나, 개인 맞춤형 영양설계와 식품 프린팅 기반 제조기술은 아직 초기 발전단계에 있음. 이에 단기에는 핵심 제조기술과 맞춤형 영양기술 확보를 추진하고, 중장기에는 개인 건강정보와 연계된 맞춤형 식품서비스 구현 및 산업화를 목표로 설정함.

– (스마트 제조 · 유통 기술) AI와 디지털 기술 도입이 확대되고 있으나, 제조 · 유통 전 과정의 데이터 연계와 자율 운영체계는 아직 제한적인 수준임. 이에 단기에는 제조공정의 디지털화와 핵심기술 실증을 추진하고, 중장기에는 AI 기반 자율 생산과 통합 운영체계 구축을 통해 생산성과 품질 경쟁력을 제고하는 방향으로 설정함.

– (소비자 맞춤형 정보) 식품 · 영양 데이터와 건강정보 활용의 중요성이 증가하고 있으나, 데이터 표준화와 연계 기반이 충분하지 않은 실정임. 이에 단기에는 데이터 기반 구축과 활용 기술 확보를 추진하고, 중장기에는 개인 맞춤형 식품 추천 및 영양관리 서비스를 구현하여 데이터 기반 식품산업 생태계를 조성하는 방향으로 설정함.

– (자원순환 기술) 식품 부산물 활용과 친환경 기술 개발이 확대되고 있으나, 산업 전반의 자원순환 체계는 아직 초기 단계에 있음. 이에 단기에는 자원화 기술과 친환경 기술 개발에 중점을 두고, 중장기에는 순환형 생산체계 구축과 산업 전반으로의 확산을 통해 지속가능한 식품산업 기반을 마련하는 방향으로 설정함.



그림 10. 융합기술 발전 방향

○ 푸드테크는 데이터 · AI를 중심으로 바이오기술, 디지털 헬스케어, 로봇 · 자동화 및 친환경 기술이 유기적으로 융합되는 플랫폼 중심으로 발전하고 있음. 이러한 융합은 연구개발, 생산, 유통 및 소비 전 과정의 혁신을 촉진하며 식품산업의 지능화, 맞춤화 및 지속가능화를 견인하는 핵심 기반으로 작용함.

– 데이터 · AI는 식품산업 전 과정에서 생성되는 데이터를 통합 · 분석하여 연구개발, 생산관리, 품질관리 및 공급망 운영을 지원하는 핵심 플랫폼으로 발전하고 있으며, 다양한 융합기술을 연결하는 기반 역할을 수행함.

– 바이오기술, 디지털 헬스케어, 로봇 · 자동화 및 친환경기술은 데이터 기반 플랫폼과 연계되어 신식품 개발, 개인 맞춤형 식품 · 영양 서비스, 제조 · 유통 자동화 및 저탄소 생산체계 구축을 촉진하는 방향으로 발전하고 있음.

– 기술 간 융합은 개별 기술의 성능 향상을 넘어 연구개발부터 생산, 유통 및 소비까지 데이터를 연계 · 활용하는 통합 운영체계로 발전하면서 식품산업 전반의 효율성과 부가가치를 향상시키는 방향으로 진화하고 있음.

– 융합 플랫폼의 확산은 지능형 식품생산체계, 초개인화 식품 · 영양 서비스, 디지털 공급망 및 스마트 안전관리, 저탄소 · 순환형 식품산업 등 새로운 산업 생태계 구축을 촉진할 것으로 전망됨.

○ 이에 따라 푸드테크 연구개발은 개별 요소기술 확보를 넘어 데이터 기반 플랫폼 구축과 기술 간 융합을 강화하여 산업 전반으로 확산할 수 있는 통합형 연구개발 체계로 추진될 필요가 있음.

5 주요 이슈 및 한계

○ 푸드테크는 기술 분야별로 발전 수준과 산업화 단계에 차이가 존재하며, 상용화 확대를 위해서는 기술 고도화와 산업 기반 구축이 병행될 필요가 있음(표 7).

표 7. 분야별 주요 이슈 및 한계

분야	주요 이슈 및 한계	핵심 과제
지속가능 식품	- 생산단가 부담 - 대량생산 공정 안정성 부족 - 핵심 원천기술 확보 미흡 - 소비자 수용성 제고 필요	- 생산공정 고도화 - 원천기술 확보 - 안전성·신뢰성 강화
케어푸드	- 맞춤형 데이터 활용 기반 부족 - 임상근거 및 효능 검증 부족 - 개인 맞춤 서비스 표준화 미흡	- 데이터 연계체계 구축 - 과학적 검증 강화 - 서비스 고도화
스마트 제조·유통 기술	• 중소기업 디지털 전환 한계 - AI·자동화 도입 격차 - 데이터 활용 역량 부족	- 스마트 팩토리 확산 - AI 기반 공정 고도화 - 데이터 활용 지원

소비자 맞춤형 정보	- 데이터 표준화 미흡 - 플랫폼 간 연계 부족 - 개인정보 활용 제약	- 데이터 표준 구축 - 플랫폼 연계 확대 - 데이터 활용 기반 마련
자원순환 기술	- 사업화 및 경제성 부족 - 안정적 원료 확보 어려움 - 순환체계 구축 미흡	- 고부가가치화 기술 개발 - 산업화 지원 확대 - 순환 시스템 구축

○ 분야별 주요 이슈를 종합하면 핵심 원천기술 확보와 데이터 기반 구축, 산업 현장 적용성 제고가 공통적인 과제로 나타남.

– (지속가능 식품) 생산공정 고도화와 원가 절감을 통해 산업 경쟁력을 확보하고 소비자 신뢰를 높일 수 있는 기술 개발이 요구됨.

– (케어푸드) 개인 건강정보와 식품 데이터를 연계할 수 있는 기반을 마련하고, 임상근거와 과학적 검증을 강화할 필요가 있음.

– (스마트 제조 · 유통 기술) AI와 자동화 기술의 활용을 확대하는 동시에 중소 식품기업의 디지털 전환과 데이터 활용 역량을 제고할 필요가 있음.

– (소비자 맞춤형 정보) 데이터 표준화와 플랫폼 연계체계를 구축하여 개인 맞춤형 서비스의 정확성과 활용성을 높일 필요가 있음.

– (자원순환 기술) 부산물의 고부가가치 활용기술 개발과 경제성 확보를 통해 산업화 기반을 강화할 필요가 있음.

○ 기술개발과 함께 산업 생태계를 뒷받침하는 기반 구축도 중요한 과제로 제시됨.

– 연구개발 성과가 산업 현장으로 연계될 수 있도록 실증 및 사업화 지원체계를 확대할 필요가 있음.

– 생산 · 제조 · 유통 · 소비 전 단계에서 활용 가능한 데이터 플랫폼과 표준체계를 구축하여 데이터 기반 산업 생태계를 조성할 필요가 있음.

– AI, 바이오기술 및 식품공학 등 융합기술을 활용할 수 있는 전문인력을 양성하고 산 · 학 · 연 협력을 강화할 필요가 있음.

– 핵심 원천기술과 소재의 자립 기반을 강화하여 글로벌 공급망 변화에 대응할 필요가 있음.

○ 제도 및 규제 개선도 산업 경쟁력 강화를 위한 중요한 과제로 제시됨.

– 신기술 기반 식품에 적합한 안전성 평가와 인허가 체계를 지속적으로 고도화할 필요가 있음.

– 기술 발전을 반영할 수 있도록 식품 유형, 표시기준 및 품질관리 기준을 지속적으로 정비할 필요가 있음.

– 국제 기준과의 정합성을 확보하여 국내 기업의 해외시장 진출과 글로벌 경쟁력을 강화할 필요가 있음.

Ⅳ. 산업 및 정책 환경

1 산업 동향

1.1 글로벌 산업 동향

○ 글로벌 푸드테크 시장의 규모는 연평균 6-8% 성장률로 2030년 약 4,000억 달러 이상까지 성장할 것으로 전망됨[1].

– 2024년 기준 약 2,026억 달러의 규모를 형성한 것으로 추산되고 있음.

표 8. 글로벌 푸드테크 시장 규모 및 전망

(단위: 억 달러, %)

조사기관	현황		전망		연평균 성장률
	기준연도	산업규모	기준연도	전망치	
Statista	2022	2,600.7	2028	3,601.9	5.6
Emergen Research	2021	2,560.0	2030	4,347.0	6.0
Grand View Research	2023	1,835.0	2030	3,549.0	9.9
Growth Markets Reports	2021	2,336.0	2030	3,857.0	5.8
닛케이BP종합연구소	2017	2,100.0	2025	3,600.0	7.0

○ 푸드테크 산업 관련 주요국은 미국, 유럽, 중국, 일본 등이 있음.

– (미국) 대체식품, 온라인 주문 및 배달, 로봇 중심으로 발전하였으며 기술 고도화를 통해 산업화 단계에 진입한 것으로 평가됨. 2030년 약 672억 달러까지 연평균 7.5% 성장을 기대하고 있음.

– (유럽) 대체식품, 온라인 주문 및 배달, 분자농업 등의 산업에서 시장을 선도함. 프랑스는 농업기술 분야의 투자가 활발이 이루어짐.

– (중국) 온라인 주문 및 배달, 로봇 등 자동화 기술을 위주로 산업이 발전하고 있음. 대규모 투자를 통해 기술 수준의 향상을 도모하고 있음.

– (일본) 미국, 중국, 유럽 등에 비해 규모는 작지만 산업계와 학계에서 연구가 활발히 진행되고 있음. 주로 고령화, 저출산 등에 의해 발생하는 문제의 해결을 목표함.

1) 각 산출 범위 및 방법 등에 따라 차이가 존재함.

○ 2021년 닛케이BP종합연구소는 2025년 지역별 시장의 비중을 북미 31%, 유럽 26%, 아시아 · 태평양 25%, 기타 18%로 예측하였으며(그림 11), 국가별 유니콘 기업의 비중 또한 미국 내 34% 수준까지 늘어날 것으로 기대됨(그림 11).

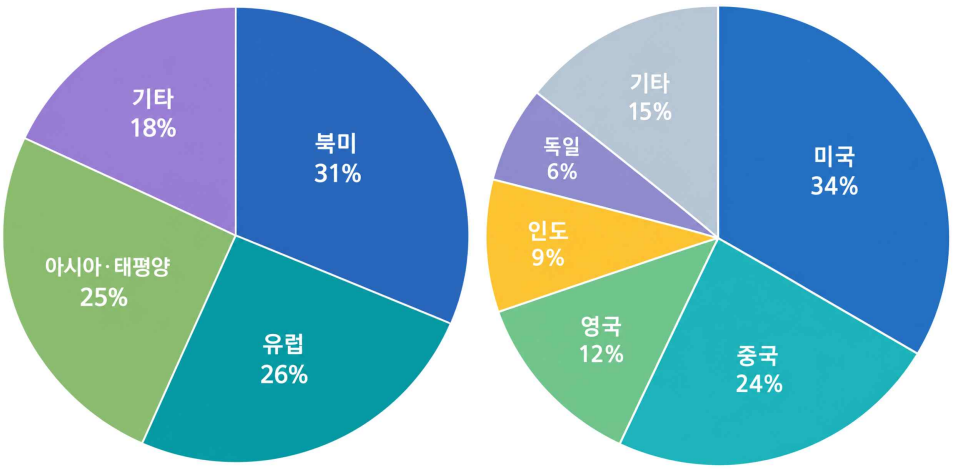


그림 11. 지역별 시장 점유율 및 국가별 유니콘 기업

1.2 국내 산업 동향

○ 국내 푸드테크 시장의 규모는 2023년 기준 약 11.4조 원으로 보고된 바 있으며, 2030년 약 23.4조 원까지 연평균 10.6% 성장할 것으로 전망됨(Grand View Research)(그림 12).

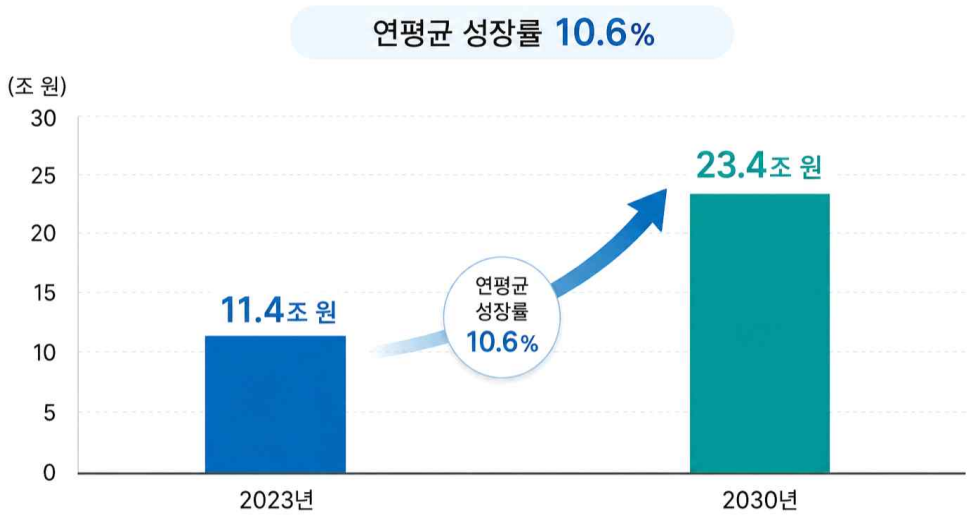


그림 12. 국내 시장 규모

- 동 조사기관(Grand View Research)에서 조사한 글로벌 푸드테크 시장의 규모는 1,835억 달러('23) → 3,549억 달러('30)로써 연평균 성장을 약 9.9%로 예측함.

- 한편, 타 조사(한국농촌경제연구원)에서 국내 푸드테크 시장의 규모를 50.1조('20) → 96.2조('24) 원으로 연평균 17.7% 수준의 성장률을 보였다고 보고한 바 있음.
- 산출 범위 및 방법 등에 따른 조사기관 간의 차이는 있으나, 두 조사기관 모두 국내 성장률이 국외 주요국을 상회할 것으로 전망함.
- 즉, 높은 성장 잠재력을 바탕으로 향후에도 지속적인 성장세를 유지할 것으로 예측됨.

○ 온라인 주문 및 배달 시장 중심으로 성장하였으며, 코로나19로 인한 비대면 수요의 확산과 더불어 디지털 전환이 가속화되면서 급격히 발전함.
- 고도화된 IT 기술력을 바탕으로 식품 생산 · 유통 · 소비 전반으로 빠르게 확대됨.
- 최근 들어 대체식품, 케어푸드, 로봇 등 산업의 영역이 다변화되면서 독립적인 산업 생태계를 구축하고 있음.

표 9. 국내 푸드테크 도입 사례

분야	사례
대체식품	- (CJ제일제당) 식물성 식품 전문브랜드'플랜테이블' 런칭
	- (신세계푸드) 대체육 브랜드 '배러미트' 런칭
	- (웨이브라이프스타일테크) 주방용 로봇 및 AI를 통한 자동화 주방 서비스 제공
스마트 유통	- (우아한형제들) 자율주행 배달로봇 서비스'딜리드라이브'서비스 시작
	- (마켓컬리) AI 기반 주문량 예측 시스템을 활용한 새벽배송 서비스 제공
	- (프레시코드) 공유배달시스템을 사용, 신선식품의 당일배송 서비스 제공
외식	- (아워홈) 빅데이터를 통한 단체 급식의 메뉴별, 요일별 수요 예측
	- (로보아르테) 조리용 로봇 설치를 통한 인건비 절감 매장 운영
	- (웨이브라이프스타일테크) 주방용 로봇 및 AI를 통한 자동화 주방 서비스 제공
스마트 농업	- (팜에이트) 식물 재배용 조명을 100% 도입한 완전 제어형 식물공장 실현 가능
	- (엔씽) 컨테이너를 활용한 수직형 수경재배 농장 운영
	- (그린랩스) 농업 데이터 분석 결과를 토대로 컨설팅 서비스 제공

○ 기업 생태계는 대기업과 스타트업 모두 공존하는 구조를 보임(표 #).
- 주로 스타트업 중심으로 신기술 개발과 사업화가 이뤄지고, 대기업은 기존 인프라를 활용하여 상용화를 확대하는 역할을 수행함.
- 최근에는 기업간의 협력사례 또한 증가하고 있음.

○ 국내 푸드테크 산업은 스마트 제조 · 유통을 중심으로 산업 적용이 확대되고 있으며, 지속가능 식품, 케어푸드, 소비자 맞춤형 정보 및 자원순환 기술 분야에서도 연구개발과 실증이 활발히 추진되고 있음.

– 스마트 제조 · 유통 기술은 자동화 및 디지털 전환이 확산되며 비교적 높은 산업 적용 수준을 보이고 있음.
– 지속가능 식품과 자원순환 기술은 기술개발과 사업화가 확대되고 있으나 원천기술 확보와 경제성 제고가 필요한 단계임.
– 케어푸드와 소비자 맞춤형 정보는 시장 수요가 증가하고 있으나 데이터 기반 구축과 서비스 고도화가 요구됨.

○ 전반적으로 연구개발 역량은 향상되고 있으나 글로벌 선도국 대비 원천기술, 데이터 활용 및 산업화 기반은 지속적인 보완이 필요함.

2 국내외 정책 동향

2.1 국외 정책 동향

○ 기술의 개발과 정책은 반드시 함께 병행되어야만 함. 정책은 단순한 지원이 아니라 환경을 만들고 규제를 조정하며 민간의 투자를 끌어오는 역할을 수행함.
– 푸드테크 정책은 4가지 축으로 나눌 수 있으며, ① 연구개발 지원, ② 실증 및 테스트베드(Testbed), ③ 규제 정비, ④ 시장 형성 등으로 구분됨.
– 국가별 상황에 따라 정책의 방향과 성격이 상이할 수 있음(그림 13).



그림 13. 주요국간 정책 동향 비교

○ 가장 대표적인 주요국인 미국의 경우는 자원적 효율을 위한 재정 지원 및 AI · 로봇 기술 규제 완화 등을 통한 시장의 혁신과 상용화에 주목하고 관련 제도들을 정비 중임.

– 2020년 국가 인공지능 이니셔티브 법 제정으로 푸드테크 연구 지원 강화 및 배양육 관리를 위한 정부 역할 정립 등을 추진한 바 있음.

– 2022년 식품의약품청이 세포배양식품 시장 출시를 허용함. 또한, Personal Delivery Device법 제정으로 배송로봇 관련 규제를 철폐함.

– 2025년 1월 트럼프 정부는 기존 AI 관련 규제를 완화해 AI 및 로봇 기술 개발을 촉진함.

– 미국 농무부는 2025년 1월 스마트 농업 작물에 대한 온실가스 정량화와 보고, 검증 등을 위한 기술 지침을 발표함.

– 2025년 4월 농업인에 대한 연방 자금 지원을 통하여 스마트 농업 기술 도입을 지원할 계획을 공개함. 농업 기술 구매 시 필요한 재정적 장벽을 낮춰줄 수 있는 조치임.

○ 그 외 유럽, 일본, 싱가포르 등도 푸드테크 관련 정책을 발표함.

– (유럽) 주로 환경 및 기후변화 등에 대응하기 위한 푸드테크 산업에 투자를 집중하고 있음. 2021년에 약 89억 유로를 식품 · 농업 분야에 투자할 뿐 아니라 친환경 기술과 제품의 생산을 촉진하고 있음.

– (일본) 고령화와 인력 부족 문제가 심각한 상황으로 식품 제조, 급식, 문류 자동화에 주목하고 있음. 2020년 산 · 학 · 관 연계 하에 「푸드테크 추진 비전」을 수립 후 지속가능한 식량시스템 구축 방안으로 식품 제조 자동화 사업을 추진 중임.

– (싱가포르) 식량 자급률이 낮아 푸드테크 산업을 국가의 생존과 연결된 산업으로 보고 정착을 설계함. 실내농업, 대체식품, 자동화, 수입 의존도 완화 등과 관련한 지원이 중심임.

2.2 국내 정책 동향

○ 푸드테크 산업의 성장에 대응하여 농림축산식품부는 2022년 12월 농식품 분야의 핵심 국정과제로써 푸드테크 산업을 선정함.

– 푸드테크 산업 육성을 위하여 3대 추진전략과 주요과제로 구성된 「푸드테크 산업 발전방안」 등을 수립함.

– 3대 추진전략으로 ① 푸드테크 산업을 육성할 혁신기업 육성, ② 푸드테크 산업 저변 확대, ③ 푸드테크 산업 성장기반 마련을 제시함.

○ 또한, 국내외 기술 동향 분석 및 산학연 의견수렴 등을 통해 10대 핵심기술 분야를 발표함(표 10).

표 10. 푸드테크 10대 핵심기술 분야

핵심기술 분야	기술개발 방향
세포배양식품	- 배양액 핵심 소재, 지지체 등 신소재 발굴 및 생산 효율화 기술개발 - 고급육 모사를 위한 구조화 등 배양육 품질(식감 · 풍미) 고도화 기술개발 - 생산비용 절감을 위한 대량 배양 공정기술 개발 등
식물기반식품	- 분리단백, 구조화단백 등 식물성 대체식품 소재 기술개발 - 고품질 단백 구조체 대량생산을 위한 스케일업 기술 및 설비 개발 - 대체 지방, 물성 구현 소재 등 고기능 신규 첨가원료 발굴
간편식	- K-Food 특성 연구 및 DB화 - K-Food 간편식 생산 자동화, 포장 개선 등을 위한 기술개발
식품 프린팅	- 국내 농산물의 식품프린팅 적성 등 특성 연구 및 DB화 - 물성제어 등 식품프린팅 가공기술 및 표준모델 개발 - 식품 잉크 소재 개발, 보존 · 유통 기술개발
식품 스마트 제조	- 식품제조업 분야 AI, 로봇 등 기반 협동기술 개발 * 인간과 로봇이 같은 공간에서 협동 작업을 수행하는 기술, 센서를 탑재하여 사람과 물리적 상호작용이 가능 - 주요 품목 제조공정별 이물질 검출 등을 위한 푸드센서 기술개발
식품 스마트 유통	- 주요 농산물 수확후 품질 판정 등 인공지능 모델 개발 - IoT 기반 농산물 가공시스템 실시간 모니터링 및 고도화 기술
식품 커스터마이징	- 식품 특성, 건강 상관성 등 기초 정보 DB화 - 개인별 질환, 유전정보 등에 기반한 식이설계 알고리즘 개발 - 질환별 관리식 적용을 위한 소재 발굴 및 생산기술 개발
외식 푸드테크	- 로봇, 수요예측 AI 등 외식 매장관리 자동화 기술개발 - 메뉴별 영양성분 정보, 고객 평가 분석 등 소비자 맞춤형 데이터 이용 기술개발
식품 업사이클링	- 농식품 부산물 성분 DB 구축 및 원료처리 공정 효율화 - 농식품 부산물 종류별 업사이클링 용도 다양화를 위한 연구개발
친환경식품 포장	- 경량화 등 플라스틱 절감 기술개발 - 플라스틱 포장재의 재활용성 제고를 위한 고차단성 유니소재 기술개발 - PHA 등 생분해성 원료 기반 식품포장 소재 생산기술 개발

○ 2023년 6월 「제4차 식품산업진흥 기본계획」을 발표 후, 2024년 1월에는 「그린바이오산업 육성에 관한 법률」을 12월 「푸드테크산업 육성에 관한 법률」을 제정함.

– 「제4차 식품산업진흥 기본계획」에서 ① 지역 산업생태계 조성, ② 해외진출 촉진 등을 위한 계획을 수립함.

– 그린바이오산업법 및 푸드테크산업법 제정과 시행(2025년 1월 및 12월)을 통하여 식품과 기술의 융합을 위한 성장기반을 마련하였음.

○ 2026년 7월 「제1차 푸드테크산업 육성 기본계획」을 발표하였음.

– 지역 산 · 학 · 연 중심의 거점 특화 클러스터 조성 및 민간 주도 자생적 생태계 구축에 방점을 두었으며, 이를 위해 L.E.A.P 전략을 제시함.

– L.E.A.P 전략에는 ① 지역 중심 푸드테크 산업 기반 구축(Local), ② 인재 양성 및 투자 확대(Empowerment), ③ 글로벌 시장 진출 및 제조 혁신(Advancement), ④ 미래 기술 선도

및 규제 혁신(Pioneer/Platform) 등이 포함되어 있음.

○ 정책 제시부터 법정 기본계획 수립까지 단계적 발전을 보임(그림 14).



그림 14. 국내 정책 동향

○ 2025년 9월 발표된 바 있는 현 정부의 123대 국정과제에도 푸드테크 산업과 연계할 수 있는 과제들을 다수 포함하고 있음(표 11).

표 11. 123대 국정과제 내의 푸드테크 관련 분야

국정목표	추진전략	푸드테크 관련 분야
세계를 이끄는 혁신경제	AI 3대 강국 도약	스마트 팩토리, 스마트 안전관리 및 포장 기술, 소비자 맞춤형 정보
	기초가 탄탄한 과학기술	지속가능 식품, 케어푸드
	혁신으로 도약하는 산업 르네상스	스마트 팩토리, 로봇, 식품 프린팅
	기후위기 대응과 지속가능한 에너지 전환	지속가능 식품, 자원순환 기술
모두가 잘 사는 균형성장	희망을 실현하는 농산어촌	지속가능 식품, 스마트 팩토리

– 그 외 「제5차 과학기술기본계획('23–'27)」에도 12대 국가전략기술 중 AI, 바이오, 첨단제조, 탄소중립 등이 푸드테크 산업과 연계됨.

Ⅴ. 결론 및 제언

1 주요 동향 및 시사점

○ AI, 바이오기술, 로봇 및 디지털 기술의 융합이 확대되면서 생산, 제조, 유통 및 소비 전 단계에서 푸드테크 기술의 활용 범위가 확대되고 있음.

– 제조공정 자동화에서 AI, 빅데이터, 디지털 트윈 등을 활용한 생산관리와 공급망 관리까지 적용 영역이 확대되고 있음.

– 식물성 대체식품, 세포배양식품 및 식품 업사이클링 기술은 친환경 생산과 자원순환을 위한 핵심 기술로 발전하고 있음.

– 건강정보와 식품정보를 연계한 맞춤형 식품 및 영양관리 서비스가 확대되면서 데이터 활용 기반의 서비스가 증가하고 있음.

– 연구개발 중심에서 실증 및 상용화 중심으로 기술개발이 전환되면서 산업 현장 적용이 확대되고 있음.

○ 푸드테크 기술은 농업과 식품산업 전반의 생산방식과 가치사슬 변화에 영향을 미치며 산업의 고부가가치화를 촉진하고 있음.

– 농업은 기능성 소재와 대체단백질 원료 등 고부가가치 식품소재 공급 기능이 확대되고 있음.

– 제조 분야는 스마트팩토리와 자동화 기술 도입으로 생산 효율성과 품질관리 수준이 향상되고 있음.

– 유통 분야는 AI 기반 수요예측과 디지털 공급망 관리가 확대되면서 운영 효율성과 식품 안전 관리 수준이 향상되고 있음.

– 소비 분야는 개인 맞춤형 식품서비스와 온라인 플랫폼이 확대되면서 소비자 중심의 서비스가 다양화되고 있음.

○ 기술개발의 중심이 연구개발에서 실증과 사업화로 이동하면서 산업화 기반 강화의 중요성이 확대되고 있음.

– 분야별 기술 성숙도 차이를 고려한 맞춤형 연구개발 및 사업화 전략이 필요함.

– 데이터 표준화와 플랫폼 구축을 통해 제조 · 유통 · 소비 단계 간 데이터 연계 기반을 강화해야 함.

– 지속가능 식품과 자원순환 기술은 생산공정 고도화와 경제성 확보를 중심으로 경쟁력을 높여

야 함.

- 농업, 식품, 바이오 및 ICT 분야 간 협력을 확대하여 기술 융합과 산업 연계를 촉진할 필요가 있음.
- 핵심 원천기술 확보와 산업 현장 실증을 확대하고, 제도 · 규제 개선을 통해 기술의 시장 확산을 지원하여야 함.

2 정책 및 R&D 전략

2.1 R&D 투자 방향

○ 푸드테크 산업 경쟁력 확보를 위해 핵심기술의 산업화 가능성과 시장 파급효과를 고려한 전략적 연구개발 투자가 필요함(그림 15).

분야	투자방향	중요도	예상 투자효과
지속가능 식품	미래 식량 원천기술 확보 및 국산 원료 확대	★★★★★	미래 단백질 시장 선점 및 식량안보 강화
케어푸드	고령친화/질환 맞춤형 식품 및 정밀영양 기술 고도화	★★★★☆	고령사회 대응 및 헬스케어 시장 창출
스마트 제조유통 기술	AI/로봇/디지털 기반 공정 자동화 및 지능화	★★★★★	생산성 향상 및 품질 경쟁력 강화
소비자 맞춤형 정보	식품/건강 데이터 기반 개인 맞춤형 정밀영양 플랫폼 구축	★★★★☆	개인 맞춤형 식품·헬스케어 서비스 산업 성장
자원순환 기술	부산물 고부가가치화 및 친환경·저탄소 자원순환 기술 확대	★★★★☆	ESG 경쟁력 확보 및 순환경제 활성화

그림 15. R&D 투자 방향 및 예상효과

- (지속가능 식품) 미래 식품 원천기술 확보와 국산 원료 경쟁력 강화를 중심으로 연구개발을 추진할 필요가 있음. 식물성 대체식품의 품질 개선, 세포배양식품 생산기술 고도화, 무혈청 배지 및 세포주 개발, 국산 단백질 원료 확보 등을 통해 미래 단백질 시장을 선점하고 식량안보를 강화하여야 함.
- (케어푸드) 고령친화 및 질환 맞춤형 식품 개발과 정밀영양 기술 고도화에 중점 투자할 필요가 있음. 고령친화식품과 특수의료용식품 개발을 확대하고, 연화기술, 식품 프린팅 및 개인

맞춤형 영양관리 기술을 고도화하여 고령사회 대응과 헬스케어 산업 성장을 지원하여야 함.

- (스마트 정밀 가공 · 보존 기술) AI · 로봇 · 디지털 기반 공정 자동화를 중심으로 연구개발을 확대할 필요가 있음. 스마트팩토리, 머신비전 기반 품질관리, 공정 자동화 및 스마트 포장 기술을 고도화하여 생산성을 향상하고 식품의 품질 경쟁력을 강화하여야 함.
- (소비자 맞춤형 정보) 식품 · 건강 데이터 기반의 개인 맞춤형 정밀영양 플랫폼 구축을 중심으로 연구개발을 추진할 필요가 있음. 영양 프로파일링 모델, AI 기반 맞춤형 식단 추천 기술 및 데이터 플랫폼을 구축하여 개인 맞춤형 식품 · 헬스케어 서비스 산업의 성장을 지원하여야 함.
- (자원순환 기술) 분야는 식품 부산물의 고부가가치화와 친환경 · 저탄소 자원순환 기술 확보를 중심으로 연구개발을 추진할 필요가 있음. 부산물 유래 기능성 소재 개발, 업사이클링 공정, 친환경 포장기술 등을 고도화하여 ESG 경쟁력을 확보하고 순환경제 활성화에 기여함.

▶ 분야별 투자 우선순위는 기술 성숙도와 산업 수요를 반영하여 지속가능 식품과 스마트 제조 · 유통 기술을 중심으로 추진할 필요가 있음. 지속가능 식품 분야에서는 대체단백질 · 정밀발효 기술을, 스마트 제조 · 유통 분야에서는 AI 기반 품질검사 · 로봇 자동화 기술을 우선 지원하고, 고령자 맞춤형 케어푸드, 식품 부산물 재활용 및 소비자 맞춤형 영양정보 제공 기술로 확대하는 것이 바람직함.

2.2 기술 확산 및 산업화 전략

○ 실증 · 파일럿 확대를 통해 연구개발 성과의 산업화를 촉진함.

- 푸드테크 기술은 연구실 수준의 기술개발에서 산업 현장으로 연결되는 과정에서 생산성, 경제성 및 품질 안정성 검증이 필수적임.
- 세포배양식품, 정밀발효, 식품 프린팅 등 신기술은 대량생산 과정에서 생산수율 저하, 품질 편차 및 생산비 증가 문제가 발생할 수 있으므로 파일럿 플랜트와 실증센터를 활용한 스케일업 검증체계를 구축할 필요가 있음.
- 제품 생산부터 품질평가, 안전성 검증까지 수행할 수 있는 테스트베드와 개방형 실증 인프라를 구축하여 기업의 기술사업화를 지원함.
- 특히 자체 생산시설 확보가 어려운 중소기업과 스타트업도 공동 활용할 수 있는 실증시설을 확대하여 산업화 진입장벽을 완화함.

○ 글로벌 시장 확대를 위한 해외 진출 기반을 강화할 필요가 있음.

- 글로벌 푸드테크 시장은 미국, 유럽, 싱가포르 등을 중심으로 빠르게 성장하고 있으며, 기술과 시장 선점을 위한 국가 간 경쟁도 심화되고 있음.

– 국내 기술의 해외시장 진출을 위해 국제 인증 취득, 해외 규제 대응 및 수출지원 체계를 강화함.
– 해외 연구기관, 기업과 공동연구 및 실증사업을 확대하여 국제 협력 네트워크를 구축하고 기술 신뢰성을 확보할 필요가 있음.
– 국가별 식문화, 소비자 선호 및 규제 환경을 고려한 현지화 전략을 통해 해외시장 진입 가능성을 높임.

○ 스마트 제조 확산을 통해 생산성과 품질 경쟁력을 제고할 필요가 있음.
– 생산가능인구 감소와 인건비 상승에 대응하기 위해 식품 제조공정의 자동화와 디지털 전환을 확대할 필요가 있음.
– AI 기반 공정제어, 머신비전 품질관리, 협동로봇 및 스마트팩토리 기술을 적용하여 제조공정의 생산성과 품질 안정성을 향상함.
– 제조공정 전반의 데이터를 실시간으로 수집 · 분석하는 시스템을 구축하여 품질 예측과 이상징후를 사전에 관리할 수 있는 기반을 마련함.
– 특히 중소 식품기업을 대상으로 스마트 제조기술 보급과 디지털 전환 지원을 확대하여 산업 전반의 경쟁력을 향상함.

○ 중소기업 중심의 사업화 지원체계를 강화함.
– 푸드테크 산업은 연구개발 이후 사업화까지 필요한 투자 규모가 크고 기술 장벽이 높아 중소기업의 단독 추진에는 한계가 있음.
– 기술이전, 시제품 제작, 성능평가, 사업화 컨설팅 및 판로 개척을 연계한 통합 지원체계를 구축함.
– 스타트업과 중소기업을 중심으로 오픈이노베이션과 민간투자 연계 프로그램을 확대하여 사업화 성공률을 고취함.
– 지역별 푸드테크 클러스터를 조성하여 기업, 대학 및 연구기관 간 협력을 확대하고 지역 기반 산업생태계를 활성화함.

◘ 푸드테크 산업의 경쟁력 강화를 위해 ‘기술개발 → 실증 · 스케일업 → 스마트 제조 → 사업화 · 투자 → 해외진출’로 이어지는 전주기 지원체계를 구축할 필요가 있음. 특히 중소기업과 스타트업이 공동 활용할 수 있는 시제품 생산시설과 품질검사 · 실증 인프라를 확대하고, 스마트 제조설비 도입, 판로 확보 및 해외 인증 등을 연계 지원하여 기술의 사업화를 촉진해야 함.

2.3 기반 구축 및 제도 개선

○ 데이터 · 플랫폼 기반을 구축하여 디지털 푸드테크 생태계를 조성함.
– 푸드테크 산업은 식품정보와 건강정보를 기반으로 맞춤형 서비스를 제공하는 산업으로 데이

터 활용 기반 구축이 필수적임.

- 식품 영양정보, 마이크로바이옴, 혈당, 섭취기록 등 다양한 데이터를 연계한 통합 플랫폼을 구축하여 연구개발과 산업 활용 기반을 마련할 필요가 있음.
- AI 기반 정밀영양 서비스 확대를 위해 데이터 표준화와 품질관리 체계를 구축하고 기관 간 데이터 공유를 활성화함.
- 공공기관, 연구기관 및 기업이 보유한 데이터를 연계하여 연구개발 효율성과 서비스 활용도를 높임.

○ 규제 및 안전성 기준을 정비하여 신기술의 시장 진입을 지원함.

- 세포배양식품, 정밀발효식품 및 신소재 식품은 기존 제도로는 평가가 어려운 사례가 증가하고 있어 신기술에 적합한 안전성 평가체계 마련이 필요함.
- 신기술 식품의 신속 심사체계와 규제 샌드박스를 확대하여 기술개발과 산업화를 지원함.
- 국제 기준과 연계한 안전성, 표시 및 인증제도를 구축하여 해외시장 진출 기반을 강화함.
- 소비자 신뢰 확보를 위해 과학적 근거에 기반한 안전성 검증과 정보 제공체계를 강화함.

○ 융합형 전문인력을 체계적으로 양성함.

- 푸드테크 산업은 식품공학뿐 아니라 AI, 바이오, 로봇 및 데이터 기술이 융합되는 분야로 전문인력 확보가 중요함.
- 대학과 연구기관을 중심으로 융합형 교육과정과 산업 맞춤형 교육 프로그램을 확대할 필요가 있음.
- 산업 현장 중심의 재교육과 실무교육을 강화하여 기업이 요구하는 전문인력을 안정적으로 공급하여야 함.
- 해외 연구기관과의 교류 및 공동연구를 확대하여 글로벌 수준의 연구개발 역량을 확보함.

○ 인증 및 표준화 체계를 구축하여 산업 경쟁력을 강화함.

- 신기술 식품의 품질과 안전성을 객관적으로 평가할 수 있는 인증 및 표준화 체계를 마련함.
- 스마트 제조, AI 기반 품질관리, 친환경 포장 등 분야별 기술 표준을 개발하여 산업 현장의 활용성을 높임.
- 국제 표준과의 정합성을 확보하여 국내 기업의 해외 인증 획득과 글로벌 시장 진출을 지원함.
- 식품 데이터, 제조공정 및 품질관리 기준을 표준화하여 산업 전반의 신뢰성과 기술 활용성을 제고함.

◘ 식품 제조 · 유통 데이터의 표준화와 개방형 플랫폼 구축을 통해 데이터 활용 기반을 확충할 필요가 있음. 또한 신기술의 안전성 평가와 규제 상담, 성능평가 · 인증 · 표준화 체계를 정비하고, 식품과 AI · 로봇 기술을 융합한 전문인력 양성 및 산 · 학 · 연 공동 연구개발을 통해 기술 활용과 산업 확산을 뒷받침해야 함.

참고문헌

○ 건강기능식품협회. (2024). 2024 건강기능식품 시장 현황 및 소비자 실태조사 보고서.
○ 국회입법조사처. (2024). 푸드테크산업 육성을 위한 입법 · 정책적 개선과제.
○ 김범근. (2024). Food tech, 식품 3D 프린팅 기술.
○ 김홍열. (2022). 미래 바이오 분야 R&D 발전 방향 기획 연구.
○ 농림식품기술기획평가원. (2020) 푸드테크 국내외 산업 · 기술 동향.
○ 농림식품기술기획평가원. (2022). 식품 부산물 업사이클링. 식품 R&D 심층분석 보고서 4호.
○ 농림식품기술기획평가원. (2023). 영양 프로파일링 모델 관련 동향 및 메디푸드 분야에의 적용. 식품 R&D 동향 보고서 3호.
○ 농림식품기술기획평가원. (2025). 「농식품 2050 6대 미래상」 기반 핵심기술 분석 보고서. 산업 · 정책 · 기술 동향 분석보고서 6호.
○ 농림식품기술기획평가원. (2025). 정밀영양 기반 메디푸드 산업 · 시장 동향과 푸드테크 적용 전략.
○ 농림축산식품부. (2020). 가공식품 세분시장 현황 고령친화식품.
○ 농림축산식품부. (2022). 농식품산업의 혁신성장을 위한 푸드테크 산업 발전방안.
○ 농림축산식품부. (2026). 농식품부, '푸드테크 대도약' 선언 K-푸드에 첨단기술을 접목하여 K-브랜드 완성 [보도자료].
○ 대한민국 정부. (2025) 이재명정부 123대 국정과제.
○ 박현진, 김현우. (2017). 세계 3D 식품 프린팅 기술 및 산업 동향과 미래 전망. 세계 농식품산업 동향 6월호.
○ 삼정KPMG. (2018). 4차 산업혁명과 제조혁신: 스마트 팩토리 도입과 제조업 패러다임 변화.
○ 식품산업통계정보시스템. (2014). 식품시장 트렌드 PICK 케어푸드.
○ 신동민, 김도현, 금동현, 한성구. (2023). 고령친화식품 산업 현황 및 전망. 축산식품과학과 산업, 12(2), 26-34.
○ 우병준, 황윤재, 허주녕, 서준영, 주문솔 (2024). 순환경제 이행을 위한 농식품산업 업(리)사이클링 전략 연구. 한국농촌경제연구원.

○ 이용건, 송우진, 김경진 (2024). 대체식품 시장 변화에 따른 축산업의 대응 과제. 한국농촌경제연구원.
○ 장우정 (2020) 세계 푸드테크 산업의 동향과 전망.
○ 조아라, 임현, 정의진 (2023). 배양육의 미래. 한국과학기술기획평가원.
○ 최경희, 김기화, 송영란, 정주희, 한진수, 정준재, 배민정, 이현순 (2024). 고령친화우수식품 개발 현황 및 기술동향. 식품산업과 영양, 29(2), 55-64.
○ 통계청 (2024). 2022년 기준 장래인구추계를 반영한 세계와 한국의 인구현황 및 전망.
○ 한국농수산식품유통공사. (2022) 글로벌 푸드테크 산업 동향.
○ 한국농수산식품유통공사. (2024) 글로벌 푸드테크 기술동향.
○ 한국농수산식품유통공사. (2025) 일본 식품시장 2025년 분석 및 2026년 전망.
○ 한국농촌경제연구원. (2026). 2026 식품외식산업 7대 이슈.
○ Kotra. (2025) 미국 푸드테크 시장 동향 및 진출 전략.
○ Amobonye, A., Pillay, B., Hlope, F., Asong, S. T., & Pillai, S. (2025). Postbiotics: an insightful review of the latest category in functional biotics. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 41(8), 1-30.
○ Choi, M. & Kim, H. J. & Ismail, A. & Kim, H. J. & Hong, H. & Kim, G. & Jo, C. (2024). Combination model for freshness prediction of pork using VIS/NIR hyperspectral imaging with chemometrics. Animal Bioscience 38(1), 142.
○ Claus, S. P. (2014). Development of personalized functional foods needs metabolic profiling. Current Opinion in Clinical Nutrition & Metabolic Care, 17(6), 567-573.
○ Cuparencu, C., Bulmuş-Tüccar, T., Stanstrup, J., La Barbera, G., Roager, H. M., & Dragsted, L. O. (2024). Towards nutrition with precision: unlocking biomarkers as dietary assessment tools. Nature metabolism, 6(8), 1438-1453.
○ Ghazal, A. F. & Zhang, M. & Li, C. (2024). 4D color change of 3D-printed pasta cooked with different-flavored waters and its potential use as a cooking indicator. Food and Bioprocess Technology 17(12), 4939-4959.
○ He, W., Lin, R., Kong, S., Qiang, M., Huang, L., Dai, B., & Zhang, X. (2025). Intelligent sensing: The emerging integration of machine learning and soft sensors based on hydrogels and ionogels. Advanced Science, e17851.
○ Hu, Y. & Li, T. (2024). Smart food packaging: Recent advancement and trends. Advances in Food and Nutrition Research 111, 1-33.
○ Isvand, A. & Karimaei, S. & Amini, M. (2024). Assessment of chitosan coating enriched with Citrus limon essential oil on the quality characteristics and shelf life of beef meat

during cold storage. International Journal of Food Microbiology 423, 110825.

○ Jung, M. H., Namkoong, K., Lee, Y., Koh, Y. J., Eom, K., Jang, H., & Park, J. (2021). Wrist-wearable bioelectrical impedance analyzer with miniature electrodes for daily obesity management. Scientific reports, 11(1), 1238.

○ Katsoulakis, E., Wang, Q., Wu, H., Shahriyari, L., Fletcher, R., Liu, J., & Deng, J. (2024). Digital twins for health: a scoping review. npj Digital Medicine, 7(1), 77.

○ Kim, E., Seo, S., Choi, Y., Chun, K., & Lee, E. (2017). The quality improvement of Bulgogi using superheated steam and high hydrostatic pressure. Food Science and Preservation, 24(5), 593-599.

○ Kim, H. W. & Lee, J. H. & Park, S. M. & Lee, M. H. & Lee, I. W. & Doh, H. S. & Park. H. J. (2018). Effect of hydrocolloids on rheological properties and printability of vegetable inks for 3D food printing. Journal of Food Science 83(12), 2923-2932.

○ Kim, M. J. & Kim, M. K. & You, Y. S. (2020). Food 3D printing technology and food materials of 3D printing. Clean Technology 26(2), 109-115.

○ Kim, S. M. & Choi, Y. H. & Kim, T. I. & Lee, C. R. & Chae, D. W. & Jeon, J. Y. & Choi, J. W. & Shin, B. S. & Kim, M. H. & Park, W. H. (2024). Preparation and characterization of poly(vinyl alcohol)/tannin blend film for active food packaging. Polymer 48(5), 536-542.

○ Kim, Y. & Yun, H. J. & Kim, B. K. & Choi, H. D. & Choi, Y. S. (2022). 3D printing technology: Food tech analysis. Resources Science Research 4(1), 1-11.

○ Lee, H. J. & Kwon, J. A. & Kim, M. & Lee, Y. E. & Ryu, M. & Jo, C. (2023). Effect of supercooling on storage ability of different beef cuts in comparison to traditional storage methods. Meat Science 199, 109137.

○ Lee, H. Y. & Jo, H. M. & Kim, D. H. & Lee, S. H. & Lee, J. Y. (2021). Development of a cellulose-based freshness sensor (II) : Manufacture of multilayer freshness sensor using cellulose-based materials and evaluation of its color expression. Journal of Korea TAPPI 30, 82-89.

○ Lin, H. & Xu, Y. & Guan, W. & Zhao, S. & Li, X. & Zhang, C. & Blecker, C. & Liu, J. (2024). The importance of supercooled stability for food during supercooling preservation: A review of mechanisms, influencing factors, and control methods. Critical Reviews in Food Science and Nutrition 64(33), 12207-12221.

○ Liu, M., Zhou, B., Rey, V. F., Bian, S., & Lukowicz, P. (2024). iEat: automatic wearable

dietary monitoring with bio-impedance sensing. Scientific Reports, 14(1), 17873.
○ Liu, T., Zheng, J., Du, J., & He, G. (2024). Food processing and nutrition strategies for improving the health of elderly people with dysphagia: A review of recent developments. Foods, 13(2), 215.
○ Livingstone, K. M., Ramos-Lopez, O., Perusse, L., Kato, H., Ordovas, J. M., & Martínez, J. A. (2022). Reprint of: Precision nutrition: A review of current approaches and future endeavors. Trends in Food Science & Technology, 130, 51-62.
○ Lorenz, T., Iskandar, M. M., Baeghbali, V., Ngadi, M. O., & Kubow, S. (2022). 3D food printing applications related to dysphagia: A narrative review. Foods, 11(12), 1789.
○ Mariam Faizullabhoy. (2025). Continuous Glucose Monitoring Market – By Component, By End Use – Global Forecast, 2025 – 2034 (Report ID: GMI6109). Global Market Insights Inc.
○ Mosquera-Lopez, C., & Jacobs, P. G. (2024). Digital twins and artificial intelligence in metabolic disease research. Trends in Endocrinology & Metabolism, 35(6), 549-557.
○ Morach, B., Witte, B., Walker, D., Koeller, E., Grosse-Holz, F., Rogg, J., Brigl, M., Dehnert, N., Obloj, P., Koktenturk, S. & Schulze U. (2021). Food for Thought: The Protein Transformation. Boston Consulting Group & Blue Horizon Corporation.
○ Park, B. R. & No, J. & Oh, H. & Park, C. S. & You, K. M. & Chewaka, L. S. (2025). Exploring puffed rice as a novel ink for 3D food printing: Rheological characterization and printability analysis. Journal of Food Engineering 387, 112313.
○ Park, D. H. & Lee, S. & Byeon, Y. M. & Kim, E. J. & Choi, M. J. (2022). Effect of supercooling storage applied with stepwise algorithm for fishes (salmon and olive flounder) and its freshness during extended storage. Food Bioscience 49, 101950.
○ Park, J. W. & Lee, S. H. & Kim, H. W. & Park, H. J. (2023) Application of extrusion-based 3D food printing to regulate marbling patterns of restructured beef steak. Meat Science 202, 109203.
○ Park, S. M. & Kim, H. W. & Park. H. J. (2020). Callus-based 3D printing for food exemplified with carrot tissues and its potential for innovative food production. Journal of Food Engineering 271, 109781.
○ ProVeg International. (2024). Food tech that's driving the next wave of growth in alternative proteins.
○ Qin, Y., Pillidge, C., Harrison, B., Chen, X., & Adhikari, B. (2025). Protein-rich soft foods for the elderly with swallowing difficulties: advances in formulation,

characteristics, and digestibility. Annual Review of Food Science and Technology, 17.
○ Shamanna, P., Erukulapati, R. S., Shukla, A., Shah, L., Willis, B., Thajudeen, M., & Joshi, S. (2024). One-year outcomes of a digital twin intervention for type 2 diabetes: a retrospective real-world study. Scientific Reports, 14(1), 25478.
○ Su, C., Wang, P., Foo, N., & Ho, D. (2025). Optimizing metabolic health with digital twins. npj Aging, 11(1), 20.
○ The Good Food Institute (GFI). (2025). 2024 State of Alternative Proteins Report.
○ Kim, Y.J., Cha, JY., Kim, J.H., Kim, T.K., Park, M.K., Lee, J.H., Choi, Y.S. (2023). Future prospects of meat protein alternative food in food tech industry. Food Science and Industry, 56(3), 186-197
○ The Good Food Institute (GFI). (2023). 2022 State of the industry report Fermentation: Meat, seafood, eggs, and dairy.
○ Wang, T., Kaur, L., Furuhata, Y., Aoyama, H., & Singh, J. (2022). 3D printing of textured soft hybrid meat analogues. Foods, 11(3), 478.
○ UNEP, (2024). Food Waste Index Report 2024.
○ Yang, I. S. & Lee, C. S. (2024). The food smart factory construction strategies to secure K-Food global competitiveness : Focusing on the SWOT-AHP method. International Commerce and Information Review 26(3), 297-318.
○ Yang, Y. & Lin, H. & Chen, Y. & Cui, L. & Li, H. & Xia, S. & Zhang, C. & Huang, J. & Zhang, H. & He, J. & Sun, X & Li, X. (2025). Effect of salt-induced supercooling stability on the quality of chicken breast during supercooled storage. Food Control 168, 110867.
○ Zhang, Y. (2022). Dual encapsulation of β -carotene by β -cyclodextrin and chitosan for 3D printing application. Food Chemistry 378, 132088.
○ Zhao, L., Liu, X., Wang, S., Yin, Z., An, T., Zhang, J., & Liu, Y. 2024. Research progress on fermentation-produced plant-derived bioactive peptides. Frontiers in Pharmacology, 15, 1438947.

Ⅲ. 지속가능 농업생산

7. 농업 기상재해 대응 기술

예측-대응-복구를 연결하는 농업 리스크 관리 운영 체계

김광수(한국농림기상학회, 서울대학교) / **조재일**(한국농림기상학회, 전남대학교) /
김연욱(한국농림기상학회, 서울대학교)

Ⅰ. 서론

1 기술분야 개요

○ 기상재해 대응 기술의 구성

– 기상재해 대응 기술은 '예측 → 대응 → 복구'를 하나의 폐쇄루프로 연결하는 농업 리스크 관리 운영체계로 정의됨.

– 예측 기술은 관측과 모형을 기반으로 위험지수와 조기경보를 수행하는 기술을 포함함.

– 대응 기술은 행동권고, 자동제어 및 현장조치를 지원함.

– 복구 기술은 피해판독과 이에 따르는 보험 지원 기술과 함께 자료의 재생산과 학습 환류를 지원함.

표 1. 기상재해 대응 미래 기술 예시

구성기술	주요 내용
예측 기술	필지 단위 기상 상세화, 과정기반 생육 예측, 확률형 조기경보
대응 기술	노지 및 시설 스마트 자동제어, 경보 연계 행동권고 알림
복구 기술	위성·드론 피해판독, 손실 산정, 재해보험 자동정산, 데이터 환류
인터페이스 기술	표준 포맷·개방형 API, 디지털 리스크 트윈, 농가 의사결정지원 플랫폼

○ 요소기술 연계와 데이터 흐름의 완결성

– (단계간 연계) 이전 단계의 기술이 다음 단계의 기술 개발을 지원하는 구조로 관측기기, 예보모델, 자동제어기 등 개별 기술의 성능지표와 함께 요소기술 간 인터페이스와 데이터 흐름의 완결성을 추구함 (Köksal and Tekinerdogan, 2019).

– (예측 신뢰도) '관측이 예측을 얼마나 개선하고, 예측이 경보로 얼마나 정확히 전환되며, 경보가 실제 행동과 복구로 얼마나 이어지는가'라는 연결의 신뢰도가 핵심 평가 기준이 됨.

○ 필지 단위 기상상세화와 생육단계별 위험판정의 필요성

– (기상 노출과 피해 이질성) 농업은 제조업과 달리 생산과정이 외부 기상에 직접 노출되어 있고, 동일 작목이라도 생육단계, 지형, 토양수분, 병해충 발생 등 생물학적 및 물리적 환경에 따라 피해 양상이 크게 달라짐

– (지역 평균 예보의 한계) 시 · 군 단위의 지역 평균 예보만으로는 농가의 개별 재배 및 사양관리 의사결정을 충분히 지원하기 어려우며, 필지 단위의 기상상세화와 생육단계별 위험판정이 필수적이라는 점이 국내 연구에서 반복적으로 지적되어 왔음 (Yoo et al., 2022).

– (생육단계 · 지형별 취약성) 같은 강수량 · 기온이라도 개화기의 과수와 등숙기의 벼는 전혀 다른 피해를 입으며, 배수가 불량한 저지대와 바람길에 놓인 능선부는 동일 재해에 대해 상반된 취약성을 보임.

– (과소 · 과대 대응) 공간 · 생육단계 이질성으로 인해 지역 대표값을 기반으로 한 대응은 실제 농가 단위에서는 과소 또는 과대 대응으로 귀결됨.

– (의사결정 정합성) 필지 수준의 상세화가 단순한 해상도 향상이 아니라 의사결정 정합성을 향상시키는 수단임 (Jalilov et al., 2026).

○ '예측 → 대응 → 복구'의 공통 운영 프레임워크

– (공통 운영 프레임워크) 기상재해의 종류에 따라 리스크 관리 시스템이 처리해야 할 내용을 다르지만, 모든 경우에 필요한 운영 프레임워크는 '예측 → 대응 → 복구'로 동일함.

– (계절별 위험) 봄의 과수 만상 · 냉해, 여름의 폭염 · 집중호우, 가을의 태풍, 겨울의 대설 · 한파처럼 위험은 계절별로 차이가 있음.

– (예측–배치–환류 설계) 시기별 위험을 예측하고 대응자원을 배치하며 복구결과를 학습에 환류하는 관리 시스템을 설계해야 함 (Cantelaube and Terres, 2005).

○ 위험관리 산업으로서의 농업과 기술개발 목표의 전환

– (위험관리 산업으로의 재정의) 농업을 위험관리 산업으로 볼 때 보험 · 금융 · 유통 · 데이터 서비스는 농업기술 생태계의 주변부가 아니라 핵심 구성요소로 편입됨

– (기술개발 목표 전환) 기술개발의 목표 역시 '단위면적당 최대 수량'에서 '기대수량 대비 변동

성 최소화와 회복속도 극대화'로 전환되어야 함.

- (해외 재해 손실 추산) 식량농업기구(FAO)는 1991-2023년 전 세계 농업 부문 재해 손실을 약 3.26조 달러로 추산하였고, 디지털 솔루션과 농민 중심 설계를 핵심 대응수단으로 제시하였음.
- (조기경보 확대) 세계기상기구(WMO)는 조기경보를 재해 피해 저감에 있어 비용 효율적인 수단으로 제안하고 2027년까지 전 지구 조기경보 보호(Early Warnings for All, EW4All)를 목표로 여러 과제들을 추진하고 있음.
- (기술분야의 위상) 이를 반영하여, 본 기술분야는 '생산 중심 산업으로서의 농업'을 '실시간 위험관리 산업'으로 재정의하는 핵심 기반에 해당함.

2 기술 도입 배경

2.1 농업환경 변화

○ 기상재해의 빈도 · 강도 증가와 농업 영향 확대

- 세계적으로 재해의 빈도와 강도가 동시에 증가하고 있으며, 최근의 재해는 농업 시스템에 더 깊고 넓은 영향을 미치고 있음 (FAO, 2025).
- 국내에서도 매년 가장 기온이 높았던 연도 기록이 갱신되고 있으며, 7-9월 고온으로 농작물 생산성 감소와 벼멸구와 같은 병해충 피해가 발생하고 있음.
- 고온은 단순 생육장해를 넘어 병해충 발생 조건을 바꾸어 2차 피해를 유발한다는 점에서 복합재해의 양상이 나타나고 있음 (Heeb et al., 2019).

○ 상이한 극한기상의 연쇄 발생과 손실 누적

- 한 해 안에 폭염 · 집중호우 · 대설이라는 상이한 유형의 극한기상이 연쇄적으로 발생하고 있어 사후복구 중심 체계로는 흡수 불가능한 수준의 손실이 단기간에 누적될 수 있음 (Qin et al., 2022).
- 2024년 7월 호우로 농작물 9,447ha 피해와 농경지 891ha 유실 · 매몰, 가축 102.2만 마리 피해가 발생하였고, 11월 대설은 농업시설 2,397ha, 농작물 476ha, 축사 129ha, 가축 102만 마리 피해를 초래하였음(기상청, 2025).

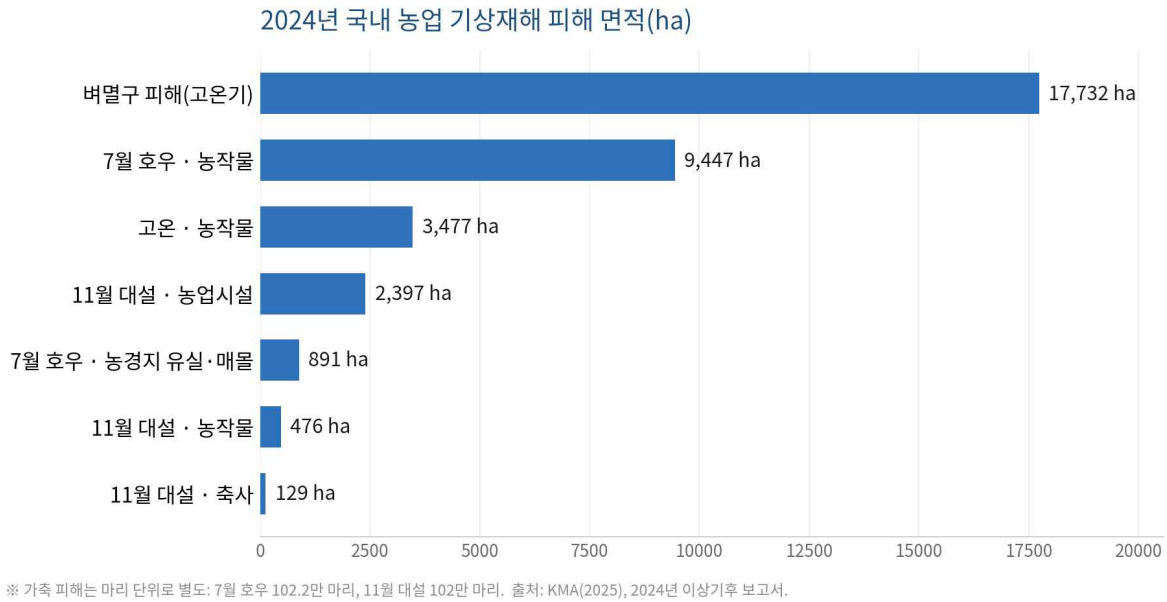


그림 1. 2024년 국내 농업 기상재해 피해 면적(ha)

○ 연간 · 전주기 통합 리스크 관리의 필요성

– 재해가 계절을 가로질러 다발 · 연쇄하는 양상은 '단일 재해 대비' 방식의 한계를 초래하여, 연간 · 전주기 관점의 통합 리스크 관리에 대한 필요성이 증대되고 있음.

– 폭염 대응에 자원을 집중한 뒤 호우 · 대설에 다시 대응해야 하는 구조에서는 인력 · 예산 · 복구역량이 특정 시점에 과부하되며, 복구가 완료되기 전 다음 재해가 도래하여 피해가 중첩될 수 있음.

○ 농업 노동력 여건 변화와 데이터 기반 전환

– 고령화 · 인력부족 · 디지털 격차가 동시에 심화되고 있어, 사람의 판단 · 이동 · 작업에 의존하는 전통적 재해대응 방식의 한계가 분명해지고 있음.

– 야간 · 휴일에 발생하는 급성 재해나 광범위 동시다발 재해에서는 인적 대응의 물리적 한계가 나타나고 있음.

– 공공 관측망 · 위성 · 센서 · 보험 데이터의 축적이 진전되고 있어, 데이터 기반 리스크 관리로의 전환을 위한 기반이 구축되고 있음.

○ 지속가능성 · 회복력 요구와 평가 기준의 다축화

– 지속가능성 · 회복력(resilience) 요구가 국제적인 공통 의제로 자리잡으면서, 농업기술의 평가 기준 또한 '생산성' 단일 축에서 '생산성 + 회복력 + 탄소 · 자원 효율성'의 다축 구조로 재편되고 있음.

– 재해대응 기술이 별도의 부가 서비스가 아니라 농업 경쟁력의 본원적 구성요소로 이동하고 있음 (Altieri et al., 2015).

2.2 기술의 필요성 및 기대효과

○ 기존 농업 방식의 구조적 한계

– 기존 방식은 지역 평균예보 · 사후 피해조사 · 일률적 보상에 의존하여, 필지 단위의 정밀 위험 판정과 생육단계별 임계기상 대응이 어려움.

– 동일 재해에도 농가별 피해 편차를 고려하지 못하고, 복구 · 보상에 장시간이 소요되는 구조적 한계가 존재함.

○ 조기경보의 피해 저감 효과와 경제성

– WMO에 따르면 재해 24시간 전 경보 발령은 피해를 약 30% 저감하며, 투자수익률도 매우 높은 것으로 정리됨(WMO, 2022).

– 국내 농업기상재해 조기경보서비스의 이용자 만족도는 약 86%, 전국 확대 시 호당 연간 경제효과는 약 8만 7,388원으로 산정되었음 (Seo et al., 2023).

– 2025년에 57.7%에 이르는 농작물재해보험 가입률 확대와 결합되어 농가 경영안정성 제고에 기여할 수 있음.

○ 예측 기반 통합 안정화 체계의 기대효과

– (정책적 효과) 과학적 위험예측을 바탕으로 농업재해 정책을 사후복구 중심에서 사전예방 중심으로 전환하고 재난지원 · 보험 · 수급관리 등 정책의 신속성과 효율성을 높일 수 있음.

– (산업적 효과) AI 예보, IoT, 원격탐사, 자동제어, 디지털트윈 및 보험기술을 연계하여 농업생산과 공급망의 안정성을 높이고 새로운 기후위험관리 산업을 창출할 수 있음.

– (사회적 효과) 농가의 재해 대응력과 농촌사회의 회복력을 강화하여 농업인의 생명과 경영을 보호하고 안정적인 농산물 공급과 식량안보에 기여할 수 있음.

– (과학기술적 효과) 다원자료 융합과 확률형 영향예측, 행동 연계 및 피해 · 복구 정보의 학습 환류를 통해 예측–대응–복구가 통합된 지능형 농업재해관리 기술체계를 구축할 수 있음.

Ⅱ. 기술 분야 구조 및 범위

1 기술 분야 정의

○ 예측–대응–복구 폐쇄루프의 기술적 정의

– 농업분야 기상재해 대응 미래기술은 '예측 → 대응 → 복구'의 3단계를 닫힌 루프로 운영하는 농업 리스크 관리 시스템으로 정의함.

– 본 기술분야의 관리 대상은 폭염 · 가뭄 · 한파 · 집중호우 등 개별 재해뿐 아니라 동시에 또는 연속적으로 발생하는 복합 · 연쇄재해이며, 작물 · 가축 · 토양 · 시설과 저장 · 유통에 미치는 영향을 필지–지역–국가 수준에서 통합적으로 다룸.

– 개별 기술로 예측 모델, 조기경보, 대응기술로 구성되며, 대응기술에는 현장 실행뿐 아니라 피해평가 · 보상 · 재생산 · 학습 환류까지 포함함.

– 관측 · 데이터 · AI · 보험을 아우르는 인터페이스 기술은 세 기술을 작동시키는 공통 기반과 연계수단으로 활용됨 (Reichstein et al., 2025).

○ 기대생산성과 회복력의 동시 최적화

– 기존 농업기술이 생산성 극대화를 단일 목적함수로 삼았다면, 본 기술분야는 기대생산성과 회복력을 동시 최적화 목표로 설정함.

– 동일한 평균생산량이라도 재해 시 변동성이 작고 복구 속도가 빠른 시스템을 더 우수한 기술로 평가함.

– 기술의 성능은 예측정확도뿐 아니라 경보 도달률, 행동이행률, 피해저감률, 복구기간 및 농가 수용성을 함께 측정하여 폐쇄루프 전체의 실효성으로 평가함.

– 선호 기술의 정의는 생산성이나 품질의 시공간적 분포를 중심으로 하방 위험(downside risk)의 관리 능력을 중시함.

○ 관리체계 내 개별 기술의 결합과 성과

– 개별 기술들은 '예측 → 대응 → 복구'의 관리체계 안에서 결합될 때 피해저감과 회복시간 단축이라는 성과를 만들어 낼 수 있음.

– 예측모델은 관측 · AI · 생육정보를 결합해 위험의 발생 가능성과 영향을 산출함.

– 조기경보는 위험지수를 행동시점 · 권고조치로 전환함.

– 대응기술은 관수 · 환기 · 방상 · 배수 등의 현장 실행부터 원격탐사 피해판독 · 보험 · 재생

산 · 학습 환류까지 담당함.

– 인터페이스 기술을 통해 각 요소의 연결성을 높여 시스템 전체의 리스크 저감 성과를 향상함 (Qazi et al., 2022).



그림 2. 핵심 기술군 및 주요 요소 기술 구성

2 주요 구성 기술

2.1 핵심 기술군

○ 예측모델의 대상 범위

– 예측모델은 기상 뿐만 아니라 작물, 가축, 병해충을 포함하는 농업 생태계의 생물학적 요인 요소와 물리적 환경을 대상으로 함.

– 국내에서 농장별 기상위험 예측 연구는 고해상도 기상격자(30m 공간해상도)와 생육단계를 결합한 농장별 기상위험 예측기술을 완성하여 농업 재해관리가 '위기관리(crisis management)'에서 '위험관리(risk management)'로 이동하였음.

– 물리적 기상값은 생육단계별 임계치 · 취약성 함수와 결합될 때 피해 가능성을 추정할 수 있게 됨.

– AI 예보 · 상세화 기술이 빠르게 성숙하면서 필지 수준 확률예측과 불확실성 전달이 현실적 운영수단이 되고 있음 (Chipanshi et al., 2015; Scher and Messori, 2019).

○ 예측모델 개발 우선순위

– 기상관측소, 농장 센서, 토양 · 지면 정보, 위성 · 드론 영상, 과거 피해 · 보험 이력과 생육정보를 동일 시간 · 공간 · 필지 체계로 정렬하는 기술이 우선적으로 개발되어야 함.

– 기상 · 위성 · 생육 · 병해충 자료를 예측에 재사용할 수 있도록 상호운용성과 품질관리 체계를 갖추는 것이 우선해야 함 (Villa-Henriksen et al., 2020).

○ 관측수단의 상호보완적 결합

– 예측모델은 기상예보와 함께 지상관측의 정밀성, 위성의 광역성, 드론의 고해상도를 상호보완적으로 결합해야 함.

– 수치예보 · AI 예보 · 생육모형과 결합해 재해의 발생 가능성, 시점, 및 강도를 산출하는 것이 필요함.

– 기상예보자료를 과정기반 모형에 적용하여 향후 발생할 수 있는 위험 요소들을 사전에 분석하고, 이를 기반으로 예상되는 위험을 회피할 수 있는 재배 및 사양관리 방안을 제시함.

– 위성으로 광역 이상을 탐지하고 드론 · 지상센서로 정밀 확인한 뒤, 필지 상세화와 과정기반 모형을 통해 농가가 활용할 수 있는 확률형 위험정보로 변환함.

– 농림위성은 다계층 예측체계의 광역 입력을 강화하는 핵심 자산으로 활용될 수 있음 (Martinuzzi et al., 2024).

○ 조기경보 기술

– 조기경보는 예측 기술을 활용하여 행동가능한 정보를 제공하는 기술로 개발됨.

– 생육단계별 임계기상 기준과 작목 · 축종별 취약성 함수를 적용해 '생육단계 × 기상' 위험지수를 산출하고, 이를 농가별 행동시점 · 대응수단과 연결함.

– 동일한 -2℃라도 개화기 과수에는 치명적이나 휴면기에는 무해하므로, 경보는 지역 평균예보가 아니라 필지 · 작목 · 생육단계에 맞춘 영향 기반 정보를 제공함 (Lamaoui et al., 2018; Lipiec et al., 2013).

○ 조기경보의 성능 평가 기준

– 조기경보의 성능은 정확도만이 아니라 실제 행동을 얼마나 바꾸는가로 평가해야 함.

– WMO는 위험지식 · 관측예측 · 경보전달 · 대응역량의 4요소를 강조하며, PICSA 대규모 적용은 기후서비스가 농업 실천을 변화시킬 수 있음을 보여주었음 (Nocezo et al., 2024).

– 경보는 위험수준, 예상 피해, 행동 마감시점, 권고조치, 필요한 장비를 함께 제시하는 행동촉발 시스템(action-triggering system)으로 설계되어야 함 (Kruger, 2016; Zougmoré et al., 2018).

○ 대응 기술의 필요성

– 조기 경보 정보가 제공되더라도 기상재해로 인한 피해를 복구하기 위한 대응 기술이 필요함.

– 조기경보를 통해 피해 노출을 줄일 수 있으나, 재해가 발생 이후에는 피해판독 · 보상 · 재생산으로 정상 생산 복귀를 지원할 수 있는 기술이 요구됨.

– 현장 조치는 자동 또는 반자동으로 실행하되, 농가가 수동 개입하거나 자동화를 해제할 수 있는 안전장치를 포함해야 함 (Kiani and Seyyedabbasi, 2018).

○ 대응기술의 단기 · 장기 성과 지표

– 대응기술의 단기 성과는 '경보-행동 지연(alert-to-action latency)'의 단축이고, 장기 성과는 '피해-보상-재생산'에 걸리는 복구시간의 단축으로 분류됨.

– 확률과 불확실성을 포함한 예측정보를 작목 · 축종 · 생육단계별 영향과 대응 임계치로 변환하고, 이를 농가가 실행 가능한 행동정보와 자동 · 반자동 제어로 연결함.

– 야간 · 휴일이나 광역 동시다발 재해에서는 경보가 자동제어를 직접 가동시키고, 잔여 피해는 원격탐사와 보험 연계로 신속히 처리해야 함.

– 성능평가에는 장비 가동률, 농가 수용성과 함께 피해저감률과 복구기간을 반영하는 것이 필요함 (Shamshiri et al., 2018).

– 대응기술의 복구 기능은 위성 · 드론 · 인공지능 등으로 피해면적과 강도를 신속히 판독하고, 보험 · 재정식 · 저장 · 유통 조정 · 품종전환 · 토양 · 시설 회복과 연결해 농가의 정상 생산 복귀 시간을 단축함.

– 복구 결과와 보험지급 이력은 다시 예측모델의 학습 · 검증 자료로 환류되어 폐쇄루프를 완성함 (Vreugdenhil et al., 2022).

표 2. 핵심 기술군 비교

구성기술	입력데이터	핵심기능	대표적용	현재 한계
예측모델	기상·토양·생육·피해이력·위성·드론	필지별 발생 가능성·시점·강도·영향 예측	농장 상세화·AI/앙상블 예보	자료 표준화·극한현상 불확실성
조기경보	예측결과·생육단계·위험임계치·사용자정보	위험수준·행동시점·권고조치 제시	웹·문자·모바일 영향예보	마지막 전달·행동전환율
대응기술	경보·장비상태·피해·보험·유통 데이터	현장 자동·반자동 실행, 피해판독·보상·재생산· 학습환류	위험유형별 대응 패키지·원격탐사 판독·지수보험	장비비용·통신·안전성·제도연계·데이터 책임성

○ 닫힌 루프 기반 리스크 관리형 기술 구축

– 예측 모델, 조기경보, 대응 기술을 하나의 닫힌 루프로 연결하여 '리스크 관리형 기술'을 구

축함.

- 예측모델과 조기경보가 우수해도 현장 실행수단이 없으면 피해를 줄일 수 없고, 대응 이후 피해판독 · 보상 · 재생산이 지연되면 농가의 경영위험은 장기간 지속됨.
- 시스템의 성능을 평가하기 위해 예측 정확도와 함께 행동 이행률, 대응시간, 피해 저감률, 복구기간을 동시에 측정해야 함.
- 작목 · 축종군별로 임계 기상변수와 대응 수단이 상이하므로, 위험지수와 대응 패키지도 군별로 특화되어야 함.
- 동일한 조기경보 아키텍처 위에서 부문별 파라미터만 교체하는 모듈형 설계를 통해 효율적인 기술 개발을 앞당길 수 있음.

2.2 구현 대상 기술

○ 주요 구성기술의 개발 방향

- 예측모델 · 조기경보 · 대응기술을 구현하기 위해 통합관측, 앙상블, 유전자 기반 모델링, 농업생태계 통합 모의 및 마이크로서비스 플랫폼 등 예측-대응-복구의 연결성과 학습 환류를 강화하는 주요 구성기술을 개발함.

○ 농업기후 통합관측망 및 다원자료 융합 구축 기술

- (기술 개요) 농업기후 통합관측망 및 다원자료 융합 구축 기술은 위성 · 드론 · 지상센서 등 분산 관측자원을 통합 네트워크로 재구성하고, 재배환경과 작물상태를 장기 · 연속 관측해 표준화, 동기화, 및 융합하는 기술로 개발함.
- (발전 로드맵) 2031년까지 국가 · 지역 통합관측망 구축을 본격화하고, 2036년에는 위성-드론-지상자료 융합 기반 필지별 자동 진단과 전국 상시 운영, 피해평가 · 보험 자동화 인프라로 발전시킬 수 있음.

○ 유전자 기반 작물모델링 기술

- (기술 개요) 유전자 기반 작물모델링 기술은 유전정보와 과정기반 작물생육모형을 통합해 품종 · 환경 · 재배관리의 상호작용(G×E×M)을 예측하고, 극한기상에 강한 품종을 선제적으로 선발하는 기술임 (Hoogenboom et al., 2019).
- (발전 로드맵) 주요 식량작물 모델링과 재해저항성 육종 파이프라인을 시범 적용하고, 2031년부터 원예작물과 지역 맞춤 품종 추천으로 확대하여 예측모델을 강화하면서 장기적 회복력 확보와 연결함.

○ 앙상블 예측 기술

- (기술 개요) 앙상블 예측 기술은 서로 다른 작물 · 농업생태계 모형과 매개변수 · 초기조건 섭

동 결과를 통합해 구조 · 입력 불확실성을 정량화하는 기술임.

– (발전 로드맵) 앙상블에 기반한 단 · 중기 확률예보와 모바일 영향예보 · 지수보험 활용을 확대하고, 2031년에는 글로벌기후모델–지역상세화–필지모형을 연결한 seamless 앙상블 체계로 발전시켜, 확률예측과 위험수준 · 행동시점 제시를 함께 지원함 (Weyn et al., 2021).

○ 농업생태계 통합 모의 기술

– (기술 개요) 농업생태계 통합 모의 기술은 대기–작물–토양–수문–축산–양분순환을 결합하고 IoT 관측자료를 실시간 동화해 기상재해와 영농관리 변화의 영향을 통합 평가하는 기술임.

– (발전 로드맵) 한국형 통합 모의 플랫폼의 시범 운영을 거쳐, 2031년 필지~국가 규모 디지털트윈 농업생태계로 확장하여 개별 구성기술을 '예측 → 대응 → 복구'의 단일 폐쇄루프로 결속하는 핵심 엔진으로 개발함 (Ghandar et al., 2021).

○ 마이크로서비스 기반 농업 플랫폼 기술

– (기술 개요) 마이크로서비스 기반 농업 플랫폼 기술은 데이터 · 모형 · 서비스를 기능 단위 마이크로서비스로 분해하고 표준 API · 컨테이너 · 이벤트 메시징으로 결합하는 개방형 플랫폼 기술임.

– (발전 로드맵) 공공 데이터와 모형을 단일 API 게이트웨이로 제공하고, 2031년에는 개방형 농업 서비스 마켓플레이스로 발전시켜, 데이터 교환과 경보–장비–보험 연계를 보장하는 공통 운영기반을 구성함.

표 3. 핵심 요소 기술과 기술군 매핑

요소기술	대응 기능군	향후 5년(2031)	향후 10년(2036)
농업기후 통합관측망·다원자료 융합	예측모델	국가·지역 통합관측망 구축, 재배환경·작물상태 표준 관측체계 확립	위성–드론–지상 융합 필지별 자동 진단, 전국 상시 운영·피해평가/보험 자동화
유전자 기반 작물모델링	예측모델·대응기술	벼·콩·옥수수 모델링 개발, 재해저항성 육종 파이프라인 시범적용	원예작물 확장, 지역맞춤 디지털 육종, 농가 맞춤 품종 추천 서비스
앙상블 예측	예측모델·조기경보	단·중장기 확률예보, 모바일 영향예보·지수보험	GCM–상세화–필지 결합 seamless 앙상블, 디지털트윈 연계
농업생태계 통합 모의	인터페이스	한국형 통합모의 플랫폼 시범 운영	필지~국가 디지털트윈 농업생태계, 실시간 동화·AI 시나리오
마이크로서비스 농업 플랫폼	인터페이스	단일 API 게이트웨이·표준 API 공개, 1~2개월 내 신규 서비스	개방형 마이크로서비스 마켓플레이스 운영·해외 수출

3 적용분야 및 활용 영역

○ 적용대상별 활용 영역

– (농식품 가치사슬) 노지작물 뿐만 아니라 과수 · 시설원예, 축산, 저장 · 유통, 수급관리, 보험 및 정책에 이르는 농식품 가치사슬 전반을 적용 대상으로 포함함.

– (작목 · 축종별 핵심 과제) 과수는 개화기 · 착과기 임계기상 대응이, 시설원예는 실시간 환경제어와의 결합이, 축산은 열스트레스 · 환기 · 사료급여 자동화가 핵심임.

– (위험 유형별 패키지) 작목 · 축종별로 임계 변수와 대응 수단이 다르므로, 위험 유형별 '패키지' 설계를 통해 효과적인 기술개발로 추진할 수 있음.

○ 적용 단계별 활용 영역

– (전주기 포괄) '생산 전(작부체계 설계 · 품종 선정 · 시설 배치)–생산 중(관측 · 경보 · 자동대응)–생산 후(피해판독 · 보험 · 저장 · 출하 조정)' 전주기를 포괄함.

– (생산 후 단계 결합) 재해로 인한 물량 · 품질 변동을 유통 · 수급 조정으로 흡수함으로써 가격 충격까지 완화할 수 있기 때문에, 생산 후 단계에서 저장 · 출하 · 유통과 결합하여 리스크 감소 효과를 최대화 할 수 있음.

○ 정책 · 금융 영역으로 확대

– (재해보험 실적) 국내 농작물재해보험은 2025년 76개 품목 · 70만ha · 63만 2천명 가입으로 역대 최고 실적을 기록하였음.

– (데이터 기반 복구 기술) 원격탐사 기반 지수보험, 이미지 기반 침수농지 판독 등 복구 영역이 데이터 기반 기술 영역으로 빠르게 편입되고 있음.

– (복구 기술의 전환) 예측–대응–복구의 마지막 고리인 '복구'가 행정 절차에서 정밀 피해산정 기술로 전환되고 있음 (Portalés–Julià et al., 2023; Perry et al., 2020).

Ⅲ. 기술 발전 동향 및 전망

1 국내외 기술 발전 동향

1.1 국내 기술 발전 동향

○ 농장 맞춤형 농업기상재해 조기경보 서비스

– 국내에서는 '농장 맞춤형 위험판정'의 운영체계 구축을 위해 고해상도 기상정보를 필지 수준으로 상세화하고, 작물 · 생육단계별 기상위험지수로 변환한 뒤 모바일 경보와 대응 권고를 함께 전달하는 농업기상재해 조기경보 서비스가 개발 및 운영되고 있음.

– 고해상도 격자분포와 농장 위치를 결합해 위기관리에서 사전 위험관리로 전환하는 방법을 구체화할 수 있으며, '필지 상세화 → 위험지수 → 행동권고'가 연결된 운영형 서비스에 강점을 가지고 있음 (Kim et al., 2024).

○ 관측 · 통신 · AI 분석기반의 고도화

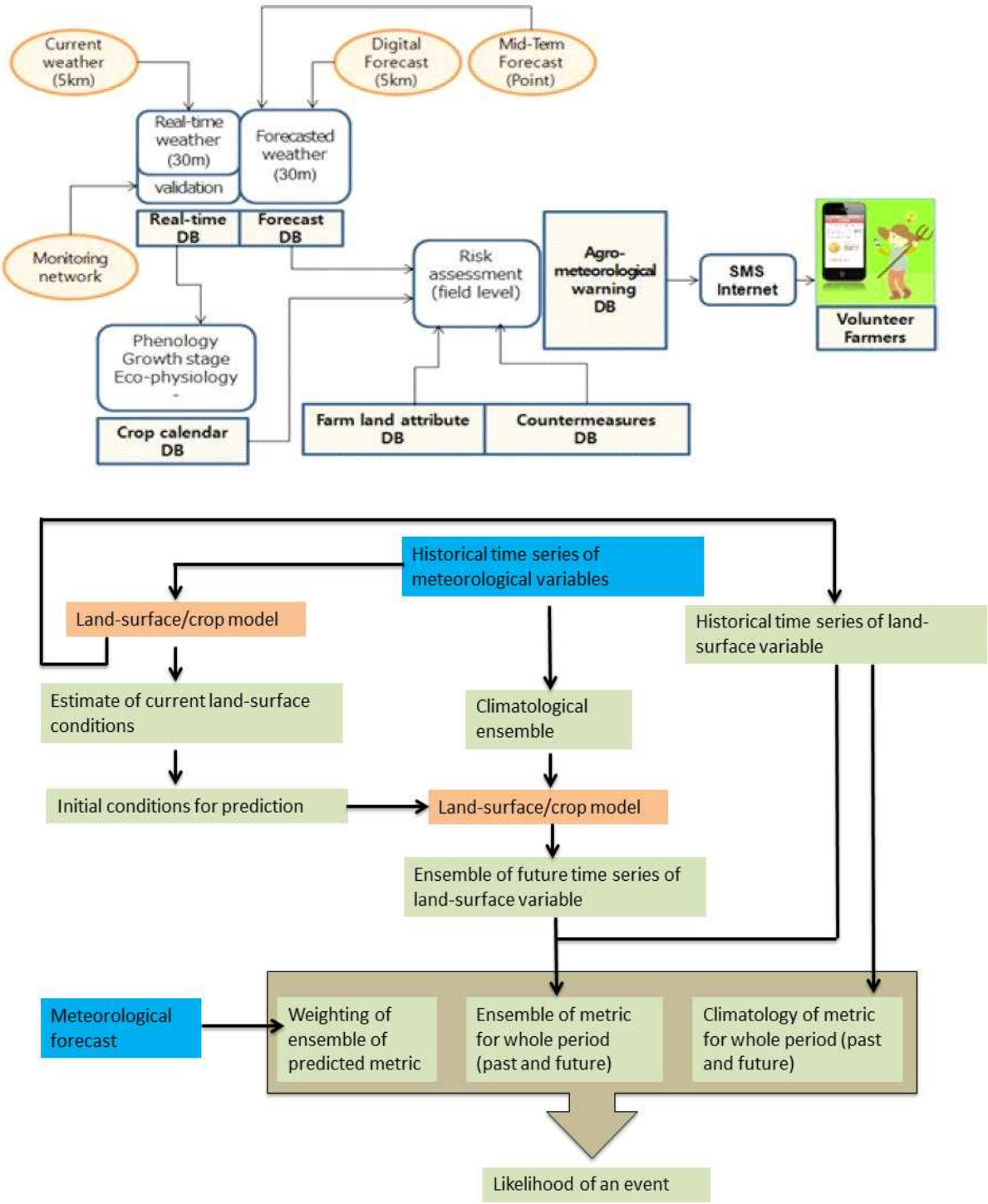
– 관측 · 통신 · AI 분석기반의 고도화가 진행되고 있으며, 토양수분, 온습도, 작물상태를 수집하는 일반적 센서망을 넘어, 기상 및 위성자료를 결합한 병해충 위험예측과 기후동인에 대한 극한 식생반응 예측으로 분석 범위가 확장되고 있음.

– 개별 스마트팜 장비보다 공공 기상관측망과 필지별 경보서비스의 입력 · 검증 기반으로 흡수될 수 있으며, 향후 이질적 자료의 표준화, 통신 신뢰성, 데이터 보안, 농가가 이해할 수 있는 의사결정정보로의 변환 능력에 의해 서비스 품질이 좌우될 수 있음 (Newlands, 2018).

○ 알림형 경보에서 자동제어형 대응 전환

– 시설원예 자동화 연구는 센서 · 온도제어 · 에너지 관리의 통합 구조를 제시하고, 노지 실증에서는 보정된 토양수분 센서와 앱 기반 관개관리로 수량 · 품질을 유지하면서 관개수를 절감시켰음 (Helmy et al., 2025).

– 통신 중단, 오작동, 상호운용성, 농가 수용성을 함께 검증해야 하므로 완전자동화보다 안전해제와 수동개입을 포함한 단계적 자동화가 현실적임 (Dong et al., 2024; Subahi and Bouazza, 2020).



(상) 농장규모 농업기상재해 조기경보 시스템 (Shim et al., 2017);
(하) 지면/작물 모델 중심 조기경보 시스템 (Asfaw et al., 2018)

그림 3. 국내외 농업 조기경보 의사결정 구조.

1.2 해외 기술 발전 동향

○ 행동 가능한 의사결정으로의 전환

– 해외 조기경보 · 기후서비스는 '정확한 예보'에서 '확률정보-현장 선택지-행동시점'의 결합을

통해 '행동 가능한 의사결정'으로 이동하고 있음 (Giraldo et al., 2024).

- TAMSAT-ALERT는 토지표면 특성, 계절예보, 과거기상을 결합해 저수량 같은 농업 결과의 확률을 계산함 (Asfaw et al., 2018).
- PICSA는 과거기후와 예보를 농가의 참여형 대안평가 · 영농계획과 연결함 (Clarkson et al., 2019).
- 이들 연구는 재배시기 조정, 기후스마트농업, 가뭄 · 고온 임계반응과 완화수단이 경보문에 함께 포함되어야 실제 위험이 감소함을 제시함.

○ AI 기상예측의 확장

- AI 기상예측은 국지 강수의 시공간 학습에서 전지구 중기 · 확률예보로 빠르게 확장되고 있음.
- ConvLSTM은 강수 나우캐스팅을 시공간 시퀀스 문제로 정식화했고, DeepDownscale은 고비용 고해상도 물리모형을 보완하는 학습기반 상세화를 제시하였음 (de Burgh-Day and Leeuwenburg, 2023).
- FourCastNet과 Pangu-Weather는 전지구 고해상도 예측을 크게 가속했으며, GenCast는 단일 결정론적 값이 아니라 보정된 확률분포와 시공간 공동구조를 예측하는 단계로 발전하였음 (Clare et al., 2021).
- 극한현상의 자료희소성, 비정상성, 설명가능성, 불확실성 검증은 여전히 운영 전환의 핵심 조건임 (Chen et al., 2023).

○ 다중센서 원격탐사 기반 피해평가 · 복구

- 토지표면모형에 마이크로파 관측을 동화하면 토양수분 · 엽면적과 수량저하를 함께 감시 · 예측할 수 있고, 지상 토양수분과 위성 식생지수의 결합은 농업가뭄의 임계점을 식별할 수 있음 (Salvia et al., 2021).
- 위성영상 · 기상관측 · 농가조사를 결합해 침수 여부와 수확 · 경제 손실을 함께 검증하는 평가체계가 제시되었음 (Müller et al., 2023).
- 현재 진행되는 기술들은 복구를 일회성 현장조사에서 반복가능한 피해판독 · 보험검증 · 회복추적 기술로 전환함 (Buitink et al., 2020; Houmma et al., 2023; Sawada et al., 2019).

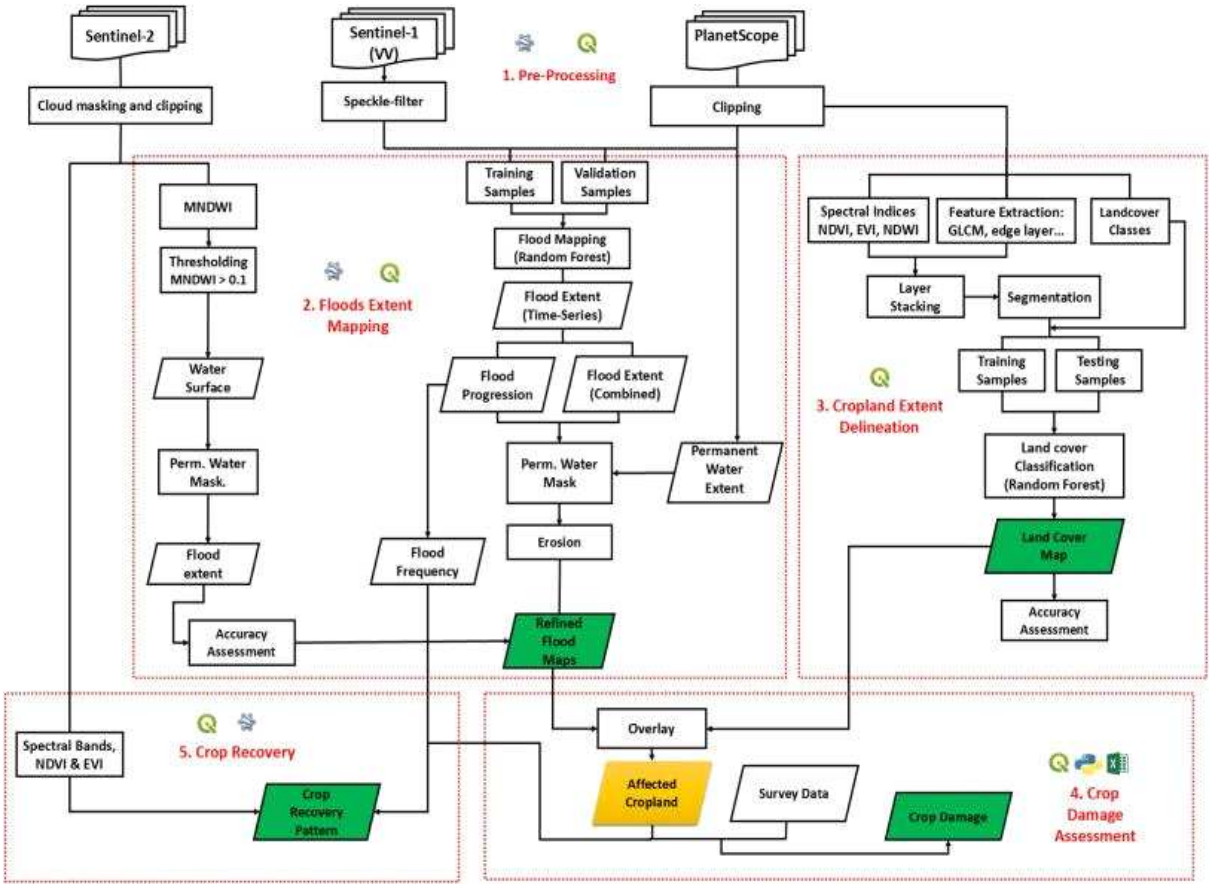


그림 4. 다중센서 기반 홍수 피해 및 회복 평가 구조 예시

○ 디지털 리스크 트윈의 부상

– 실제 농장의 상태를 실시간 복제해 개입효과를 사전 모의하고 원격 운영하는 구조를 제시하는 디지털트윈 연구가 '디지털 리스크 트윈' 개발을 위한 연구로 발전하고 있음.

– 농업 회복력 연구는 충격을 견디는 견고성뿐 아니라 적응 · 전환 역량을 함께 평가해야 함 (Meyer, 2020).

– 디지털 리스크 트윈은 원격탐사 · 역사자료 · 현장정보 · 사람의 판단을 결합하여 재해 중에도 모델을 갱신하고 복수 대응전략을 비교함.

– 해외 기술은 3D 가시화가 아니라 예측 · 대응 · 복구 의사결정을 지속적으로 갱신하는 운영체계 개발을 추구하고 있음 (Slob and Hurst, 2022).

– 피해평가와 복구는 다중센서 원격탐사와 자료동화 중심으로 정밀화되고 있음

○ 국내외 동향 시사점

– (국내 강점) 국내에서는 농장 상세화와 작물 · 생육단계별 위험지수, 경보 전달의 운영 경험에서 강점이 있음.

– (해외 강점) 해외는 확률형 AI 예보, 참여형 기후서비스, 자동제어, 다중센서 피해판독, 디지

털 리스크 트윈의 연결 기술이 빠르게 진행되고 있음.

– (추진 전략) 해외 엔진을 단순 도입하는 것이 아니라, 기존 조기경보 운영기반 위에 '확률예측 → 행동권고 · 자동대응 → 피해판독 · 복구 → 학습환류'를 결합하는 방향으로 진행하여 운영 성숙도와 차세대 엔진의 결합 우위를 만드는 전략을 추진해야 함.

표 4. 국내외 기술 사례 비교

단계	사례	핵심 입력/기법	검증/성과	시사점
예측·경보	농업기상재해 조기경보 서비스	30 m 상세기상·작물 생육단계·필지 속성	위험지수와 대응권고를 모바일 전달	필지 상세화–위험판정–행동권고의 운영모델
예측·경보	TAMSAT-ALERT	과거기상·계절예보·토지표면/작물모형	저수량 등 불리한 결과의 확률 산정	예보를 농업 결과확률로 변환
대응	PICSA	과거기후·예보·농가 참여형 대안평가	조사 농가 97%가 영농실천 변경	경보–선택지–행동계획의 마지막 마일 구현 (Clarkson et al., 2019)
예측	GenCast	확산모형·앙상블 확률분포	15일 확률예보와 시공간 공동구조 생성	결정론적 값에서 위험분포 관리로 전환
복구	파키스탄 홍수 손실평가	다중센서 위성·작물지도·홍수범위	침수 농경지와 생산손실을 공간 산정	광역 재해의 신속 피해 판독 기반 (Qamer et al., 2023)
통합	스마트농업 디지털트윈	센서·실물상태·가상모형·의사결정	개입효과 사전모의·원격 운영	실물–가상 동기화로 대응 최적화 (Verdouw et al., 2021)
통합	디지털 리스크 트윈	원격탐사·IoT·현장정보·AI·사람의 판단	재해 중 모델갱신 및 복수대안 비교	예측–대응–복구의 적응형 운영체계

2 기술발전 흐름

○ 기술발전의 4단계 구분

– 기상재해 대응 미래농업기술의 발전은 ① 관측 디지털화, ② 필지 상세화, ③ AI 예보 · 행동전환, ④ 디지털 리스크 트윈의 4단계로 정리할 수 있음.

– 기술발전은 개별 센서나 예보모델의 성능을 높이는데 그치지 않고, 관측–예측–판단–실행–피해평가–복구를 하나의 데이터 흐름으로 연결하는 방향으로 진행되고 있음

– 각 단계는 이전 기술을 대체하는 독립적 단계가 아니라 데이터의 공간해상도와 예측시간을 확장하고, 의사결정의 구체성과 자동화 수준을 높이는 누적적 발전 과정임.

– 재해 이후 확인된 피해와 복구 성과가 다시 관측설계와 모델학습에 활용된다는 점에서 전체

기술체계는 선형구조에서 순환형 구조로 전환되고 있음.



그림 5. 기상재해 대응 미래농업기술의 4단계 발전 흐름

○ 1단계: 관측 디지털화

– (단계 개요) 1 단계에서는 자동기상관측망, 위성 · 레이더, 토양 · 작물 · 시설 IoT 센서를 이용하여 기상과 농장 상태를 연속적으로 수집함.

– (관측 범위 확대) 초기 농업기상정보가 제한된 관측지점의 기온, 강수, 풍속 등 기상요소를 제공하는 수준이었다면, 디지털 관측체계에서는 작물체 온도, 토양수분, 시설 내부환경, 생육상태 및 농작업 정보까지 실시간으로 수집함.

– (핵심 과제) 센서 수의 확대와 함께 결측과 이상값의 자동 판별, 관측시각과 위치정보의 일치, 공통 메타데이터 및 인터페이스의 구축이 포함됨. 관측기관과 장비별로 자료형식과 품질기준이 다르면 후속 예측과 위험판정의 오차가 커지므로, 데이터 표준화와 상호운용성이 기술발전의 출발점이 됨(Köksal and Tekinerdogan, 2019).

– (성과지표) 관측자료의 적시성, 결측률, 정확도 및 공간대표성이며, 안정적인 실시간 자료수집과 품질관리가 확보되어야 다음 단계인 필지 상세화가 가능함.

○ 2단계: 필지 상세화

– (단계 개요) 2 단계에서는 광역 격자예보를 지형, 토지피복, 토양수분, 작목 및 생육단계 정보와 결합하여 농장과 필지 단위의 영향정보로 변환함.

– (영향정보 전환) 동일한 기온, 강수 또는 풍속이라도 작목, 품종, 생육단계, 시설형태와 재배방식에 따라 피해가 다르게 나타남. 따라서 예보값 자체를 제공하는 방식에서 벗어나 필지별 피해 가능성, 위험등급 및 대응 임계값을 산정하는 기술이 중요해짐.

– (상세화 방법론) 통계적 · 동역학적 다운스케일링과 생육모형을 이용하여 광역예보를 농장 단위로 상세화하고, 과거 피해자료와 작물별 취약성 정보를 결합하여 위험지수를 생산함. 이 과정에서는 지역별 학습자료의 편차, 관측이 부족한 필지에 대한 모델 전이성 및 작목별 위험임계값의 현장 적합성을 함께 검증해야 함(Soares et al., 2024).
– (양방향 공간구조) 기술의 공간범위도 국가 · 권역 단위 예보를 필지 단위로 세분하는 것에 머물지 않고, 필지별 피해예측을 다시 지역 생산량과 공급망 위험으로 집계하는 양방향 구조로 발전하고 있음. 이는 광역 가뭄, 집중호우, 이상고온과 같이 여러 농가에 동시에 영향을 주는 재해의 파급효과를 분석하는 기반이 됨.

○ 3단계: AI 예보 · 행동전환
– (단계 개요) 3 단계에서는 수치예보와 AI 예보, 앙상블 결과를 결합하여 단일 예측값이 아닌 재해 발생확률, 영향범위, 행동 가능시간 및 예측 불확실성을 제공함.
– (AI 확률예보) AI 기상예측모델은 빠른 계산과 다수의 미래 시나리오 생성을 통해 중기 확률예보의 활용 가능성을 높이고 있음(Bi et al., 2023; Price et al., 2025). 특히 확률형 예보는 하나의 예상경로만 제시하는 대신 발생 가능한 여러 기상장을 생성함으로써 극한현상의 위험범위와 대응 우선순위를 판단할 수 있게 함.
– (하이브리드 · 앙상블 구조) AI 예보가 기존 수치예보를 일괄 대체하기보다 수치예보 · AI 예보 · 생육모형 · 현장관측의 강점과 오류특성을 비교하여 결합하는 하이브리드 · 앙상블 구조가 현실적인 발전방향임. 극한현상에서는 평균 정확도뿐 아니라 과소예측 가능성, 지역별 편향, 확률예측의 신뢰도 및 실패조건을 함께 검증해야 함.
– (다중시간규모 확장) 예측시간의 범위도 단일 예보시간에서 다중시간규모로 확장되고 있음. 초단기 나우캐스팅은 집중호우, 우박 및 강풍에 대한 즉각적인 대응을 지원하고, 단기 · 중기 예보는 관수 · 배수 · 방제 · 수확일정의 조정을 지원함. 계절 및 기후전망은 재배작목, 품종, 파종시기, 수자원 확보 및 시설투자와 같은 중장기 의사결정에 활용됨.
– (연속적 의사결정 체계) 향후에는 서로 다른 예측시간의 정보를 개별 서비스로 제공하기보다 초단기 현장대응에서 계절 적응까지 연속적으로 연결하는 다중시간규모 의사결정체계가 중요해질 것임.

○ 4단계: 디지털 리스크 트윈
– (단계 개요) 4 단계에서는 실물 농장의 상태와 가상모형을 실시간으로 동기화하고, 재해 발생 이전에 복수 대응대안의 효과를 모의 · 비교함.
– (의사결정체계 개념) 디지털 리스크 트윈은 일반적인 3D 가시화를 넘어 관측자료, 원격탐사, 예보모델, 생육모형, 시설제어 및 농가의 판단을 결합하여 위험변화를 지속적으로 갱신하는

의사결정체계임(Verdouw et al., 2021).

- (재해 전 · 중 · 후 활용) 재해 이전에는 관수 · 배수 · 환기 · 차광 · 방상 등 대응수단별 효과와 비용을 비교하고, 재해 중에는 새로운 관측자료를 반영하여 위험도와 대응 우선순위를 수정함. 재해 이후에는 위성 · 드론 · 현장조사로 판독한 피해, 보험 보상, 복구기간과 생산회복 정보를 다시 입력하여 다음 예측과 대응규칙을 갱신함.
- (폐쇄 루프 전환) 이에 따라 기술체계가 일회성 경보에서 예측–대응–복구의 폐쇄루프로 전환되며, 농장은 단순한 데이터 수집대상이 아니라 예측, 실행 및 학습이 반복되는 능동적인 위험관리 단위가 됨(Reichstein et al., 2025).

○ AI 예보의 운영가치

- (산출물의 변화) AI 예보 기술의 기본 산출물은 '예상 기온과 강수량'에서 '어느 필지와 작목에 피해가 발생할 가능성이 높은지', '누가 무엇을 언제까지 해야 하는지', '대응수단별 기대효과와 비용은 얼마인지'를 제시하는 형태로 확대되고 있음.
- (위험도별 대응 방식) 위험도가 낮거나 대응시간이 충분한 경우에는 농가가 예측정보와 권고안을 확인하여 조치를 선택하고, 대응시간이 짧거나 시설제어가 표준화된 경우에는 관수 · 배수 · 환기 · 차광 · 방상 장비를 자동 또는 반자동으로 작동시킬 수 있음.
- (자동제어 안전장치) 자동제어는 통신 장애, 센서 오류 및 잘못된 예측에 대비하여 운영자 승인, 수동 전환, 안전정지 및 실행기록 보존 기능을 포함해야 함. 설명가능성과 불확실성 정보는 농가가 경보의 신뢰수준과 대응 필요성을 판단하고, 자동제어의 허용범위를 설정하는 데 활용되어야 함.

○ 운영상 병목

- (병목 지점) 기술발전의 운영상 병목은 정보생산자와 정보수요자 사이의 '마지막 마일(last mile)'에서 발생함.
- (경보 도달 · 행동 제약) 예보 정확도가 높아도 경보가 농가에 도달하지 않거나 전달시점이 늦으면 피해저감으로 연결되지 않음. 경보가 도달하더라도 무엇을 언제 해야 하는지가 불분명하거나 행동에 필요한 장비 · 노동력 · 자금이 부족하면 실제 대응이 이루어지기 어려움.
- (다중채널 · 취약계층 고려) 경보전달은 웹 · 문자 · 앱 등 다중채널을 활용하되, 고령농과 디지털 취약계층을 고려하여 음성, 마을방송 및 현장지도와 연계할 필요가 있음. 위험단계별 행동지침, 장비 작동법, 담당기관 연락체계와 의사결정 마감시간도 경보정보와 함께 제공해야 함(Hosterman et al., 2019).
- (통합도 격차) 농업 분야의 실질적 기술격차는 예측 정확도 자체보다 AI 예보 결과를 농가 행동, 자동제어, 보험 및 정책 의사결정으로 연결하는 통합도에서 발생함. 통신 · UX · 현장 매

뉴얼 · 장비보급과 제도적 책임체계가 기술개발 초기부터 함께 설계되어야 함.

○ 평가기준의 확대

– (평가기준의 전환) 기술발전의 평가기준은 예보 정확도 중심에서 실제 위험저감과 회복성과 중심으로 확대되어야 함.

– (공동 성과지표) 평균오차, 상관계수, 적중률과 같은 모델지표와 함께 경보 도달률, 권고 이해도, 행동전환율, 자동제어 성공률, 피해저감률, 복구소요시간 및 영농 지속성을 공동 성과지표로 적용할 필요가 있음.

– (시스템 연결성 평가) 개별 센서와 모델의 성능이 우수하더라도 데이터와 서비스가 단절되면 전체 시스템의 피해저감 성과는 낮아질 수 있음. 따라서 개별 요소기술의 성능뿐 아니라 관측자료가 예측을 얼마나 개선하고, 예측이 행동 가능한 경보로 얼마나 정확하게 전환되며, 실제 대응이 피해와 복구시간을 얼마나 줄였는지를 연속적으로 평가해야 함(Qazi et al., 2022).

– (지속 감시 · 재학습) 관측자료가 새롭게 축적되거나 기후와 재배환경이 변화하면 모델의 성능도 달라질 수 있으므로, 운영단계에서 데이터 품질, 지역별 편향 및 모델 성능저하를 지속적으로 감시하고 재학습하는 체계가 필요함.

○ 국내 기술수준의 현 위치

– (국내 상황) 현재 국내 기술수준은 ② 필지 상세화 단계에서 ③ AI 예보 · 행동전환 단계로 전환하는 위치에 있음.

– (국내 선도 · 미흡 영역) 국내의 관측망, 농장 단위 상세예측 및 조기경보 운영체계는 세계적으로도 선도적인 운영사례에 해당함. 반면 AI 확률예보의 상시 운영, 경보와 자동제어의 연계, 대응 · 피해 · 복구 데이터의 통합 및 디지털 리스크 트윈 구축은 아직 시범 · 실증 단계임.

– (해외 선도 그룹) 해외 선도그룹은 ③ 단계의 AI 확률예보와 영향기반 서비스를 운영에 적용하기 시작하였으며, ④ 단계의 디지털 리스크 트윈과 복합 · 연쇄위험 조기경보 아키텍처 연구를 확대하고 있음.

– (국내 발전 전략) 국내 기술발전 전략은 기존 조기경보체계를 전면 교체하기보다 현재 운영중인 관측 · 상세예측 · 경보 기반에 AI 확률예보, 영향기반 행동권고, 안전한 자동제어 및 피해 · 복구 데이터 환류 기능을 단계적으로 결합하는 방향으로 추진해야 함.

3 핵심 발전축

○ 기술 진화의 본질과 발전축

– 기술 진화의 본질은 ‘더 많은 관측–더 정확한 예보’에서 ‘연결된 데이터–영향기반 예측–행

동 가능한 경보–안전한 실행–피해와 복구의 학습’으로 확대되는 데 있음.

- 단기적으로는 기존 수치예보와 AI 예보를 병렬 운영하여 극한현상별 성능과 실패조건을 검증하고, 작목 · 생육단계별 행동 패키지와 연계해야 함.
- 중장기적으로는 대응, 피해, 보험 및 복구 데이터를 동일 필지 식별체계로 축적하여 디지털 리스크 트윈의 학습자료로 활용하고, 농가 · 지자체 · 보험 · 정책 담당자가 동일한 위험정보를 공유하는 운영체계로 발전시킬 필요가 있음.
- 핵심 발전축은 재해 발생 이전의 위험을 줄이는 ‘예측 기반 관리’와 재해 이후 생산과 경영의 정상화를 앞당기는 ‘회복력 강화’로 구분할 수 있음(Weersink et al., 2018).
- 두 발전축은 독립된 기술영역이 아니라 예측정보가 현장행동으로 전환되고, 대응과 복구성과가 다시 예측모델에 환류되는 상호의존적 구조로 추진되어야 함.

3.1 예측 기반 관리

○ 예측 기반 관리의 개념과 목표

- 관측 · 위성 · 센서 · 보험 · 생육정보를 동일 필지 식별체계로 연결하고, 수치예보 · AI 예보 · 생육모형 · 위험지수를 결합해 사후 대응을 사전 관리로 전환함.
- 목표는 단순 정확도 향상이 아니라 위험의 발생확률, 영향범위, 행동 마감시점과 불확실성을 농가 · 장비 · 정책 담당자에게 동시에 제공하는 것으로 설정함 (Soares et al., 2024).

○ 예측 기반 관리 수행과제

- 예측 기반 관리를 위해 데이터 표준화, 확률형 · 영향 기반 예보, 설명가능성과 검증체계, 경보-행동 인터페이스의 통합을 수행함.
- AIFS · GenCast 같은 AI 예보는 계산속도와 중기 확률예보를 개선하지만, 극한현상에 대한 강건성 · 불확실성 전달이 확보되어야 함(Price et al., 2025)
- ‘정확도보다 연결성’과 ‘예보보다 행동 가능성’을 공동 원칙으로 설정함 (Rodrigues et al., 2018).

3.2 회복력 강화

○ 회복력 강화의 개념과 목표

- 경보를 관수 · 환기 · 차광 · 방상 · 배수 · 방제 등 현장 대응과 연결하고, 대응 후 남은 피해를 원격탐사 판독, 보험, 재정식, 품종전환, 토양, 시설 회복 등으로 흡수함.
- 피해를 완전히 제거하는 것이 아니라 피해 규모와 경영 변동성을 낮추고, 농가가 정상 생산으로 돌아오는 시간을 단축하는 것을 목표로 함 (Meuwissen et al., 2019).

○ 회복력 강화의 수행과제

– 회복력 강화를 위해 위험유형별 대응 패키지, 경보-장비 자동연계, 신속 피해판독과 파라메트릭 보험, 저장 · 유통 대체, 적응품종 · 토양 · 수자원 회복을 하나의 서비스로 묶는 것이다.

– 이 축은 복구를 사후행정이 아니라 측정 · 최적화 가능한 기술과제로 전환함 (Kangogo et al., 2020).

3.3 핵심 발전축의 관계 설정

○ 순차적 · 상호의존적 관계 설정

– 예측 기반 관리가 위험의 시점 · 영향 · 행동옵션을 제시하고, 회복력 강화가 이를 현장 대응과 복구로 실행한 뒤 성과 · 피해 데이터를 다시 예측모델에 환류함.

– R&D 투자는 두 축을 별도 사업으로 분절하기보다 '예측정보의 행동 전환율'과 '재해 후 회복시간'이라는 공동 성과지표로 관리함 (Van Apeldoorn et al., 2011).

○ 공통 기반의 구축

– 두 발전축을 실제 연구개발과 농업현장 서비스로 구현하기 위해서는 데이터, 모델, 의사결정 및 성과평가를 연결하는 공통 기반을 구축해야 함.

– 관측 · 위성 · 드론 · IoT · 생육 · 농작업 · 피해 · 보험자료를 동일 필지 식별체계와 표준 데이터모델로 연결해야 함. 필지경계, 작목, 품종, 생육단계, 시설유형 및 과거 피해이력은 예측 기반 관리와 회복력 강화가 공동으로 사용하는 핵심 정보이므로, 기관별로 분산된 자료를 연계할 수 있는 API와 메타데이터 표준이 필요함.

– 수치예보, AI 예보, 생육모형 및 위험지수의 결과를 하나의 값으로 단순 통합하기보다 모델별 불확실성과 적용조건을 함께 관리해야 함. 예측모델의 평균 정확도가 높더라도 특정 지역이나 극한현상에서 오차가 증가할 수 있으므로, 재해유형 · 지역 · 작목별 비교검증과 운영 중 성능감시 체계를 구축해야 함(Reichstein et al., 2025).

– 예측결과를 위험등급과 행동권고로 변환하는 의사결정 규칙을 표준화해야 함. 위험수준별로 대응주체, 행동내용, 실행시점, 필요한 장비와 자원 및 대응하지 않았을 때의 예상손실을 제시하여 정보가 실제 행동으로 전환될 수 있도록 해야 함. 이때 동일한 경보라도 농가의 재배규모, 시설보유 여부와 대응역량에 따라 실행 가능한 조치가 달라질 수 있으므로 복수의 대응대안을 제공해야 함.

– 자동 · 반자동 대응에는 사람의 감독과 안전장치를 포함해야 함. 관수 · 배수 · 환기 · 차광 · 방상 설비를 경보와 자동으로 연계하더라도 센서 이상, 통신 장애 및 잘못된 예측에 대비하여 운영자 승인, 수동 전환, 안전정지와 실행이력 기록 기능을 적용해야 함. 이를 통해 자동

화 수준을 높이면서도 농가와 운영기관의 책임범위를 명확히 할 수 있음.

○ 재해유형별 연계방식의 차별화

– 두 발전축의 연계방식은 재해유형과 대응 가능시간에 따라 차별화할 필요가 있음.

– 서리, 우박, 집중호우 및 돌풍과 같이 대응 가능시간이 짧은 재해는 초단기 예측, 신속한 경보전달 및 장비 자동제어의 결합이 중요함. 따라서 분 단위 또는 시간 단위의 자료갱신, 경보 지연시간, 장비 작동 성공률과 같은 운영지표를 우선적으로 관리해야 함.

– 가뭄, 이상고온 및 장기습해처럼 피해가 누적되는 재해는 단기예보뿐 아니라 계절전망, 토양수분, 생육상태와 수자원 정보를 결합해야 함. 이 경우 관수계획 조정, 내재해성 품종 선택, 파종 · 수확시기 변경 및 용수배분과 같이 수주에서 수개월에 걸친 적응대안을 함께 제시해야 함.

– 대규모 재해 이후에는 원격탐사와 현장조사를 결합하여 피해면적과 생산손실을 신속하게 산정하고, 보험 · 재난지원 · 재정식 · 저장 및 유통 대체방안으로 연결해야 함. 특히 위성 기반 피해지수와 실제 농가손실 간 차이를 지속적으로 검증하여 파라메트릭 보험의 기준위험을 줄일 필요가 있음(Nguyen et al., 2025).

○ 기술개발과 운영 주체 간 역할분담

– 중앙정부와 공공기관은 국가 관측망, 공공예보, 공간정보, 필지 식별체계와 공통 데이터 표준을 제공하고, 연구기관은 AI 예보 · 생육모형 · 위험지수의 개발과 비교검증을 담당함. 지자체와 농촌지도기관은 지역별 위험임계값과 행동매뉴얼을 현장에 적용하고, 농가는 대응과 피해 · 복구 결과를 제공하는 구조가 필요함.

– 민간기업은 센서, 통신, 시설제어, 원격탐사, 보험 및 플랫폼 서비스를 담당하되, 특정 장비나 사업자에 대한 종속을 방지하기 위해 개방형 인터페이스와 데이터 이동성을 확보해야 함. 전체 시스템을 하나의 대규모 플랫폼으로 통합하기보다 공통 표준을 기반으로 기관별 서비스를 연계하는 분산형 구조가 현실적임(Qazi et al., 2022).

○ R&D 투자 계층

– R&D 투자는 기반기술, 연계기술 및 현장실증의 세 계층으로 구성할 필요가 있음.

– 기반기술에는 관측자료 품질관리, 필지 데이터모델, AI · 수치예보 결합, 생육 · 피해모형 및 원격탐사 판독기술을 포함함. 연계기술에는 확률예보의 위험등급 변환, 경보–행동 인터페이스, 장비제어 API, 피해판독–보험 연계 및 디지털 리스크 트윈을 포함함.

– 현장실증은 지역 · 작목 · 재해유형별 대표 실증단지를 선정하여 예측부터 대응과 복구까지 전체 과정을 검증해야 함. 실증성과는 모델 정확도뿐 아니라 경보 도달률, 행동전환율, 장비 작동률, 피해저감액, 복구시간 및 농가 수용성을 함께 측정해야 함.

– 단기적으로는 활용 가능한 기존 관측망과 조기경보 서비스를 연결하여 현장 행동전환 효과를

검증하고, 중기적으로는 피해 · 보험 · 복구 데이터를 추가하여 예측모델의 재학습과 대응대안 비교가 가능한 구조로 발전시켜야 함.

– 장기적으로는 디지털 리스크 트윈을 통해 농장 · 지역 · 공급망 수준의 복합재해 시나리오를 모의하고, 정책과 민간 대응의 효과를 사전에 평가할 수 있어야 함.

○ 성과 평가

– 두 발전축의 성과는 개별 기술의 최고 성능이 아니라 전체 위험관리 과정의 완결성으로 평가해야 함.

– 예측 기반 관리의 최종성과는 정확한 예보의 생산이 아니라 농가와 담당기관이 적절한 시간에 행동하여 피해를 줄였는지로 판단해야 함. 회복력 강화의 최종성과도 피해액 산정의 정확성에 그치지 않고 농가의 생산과 경영이 얼마나 빠르고 안정적으로 회복되었는지를 기준으로 평가해야 함.

– '예측정보의 행동전환율', '대응에 따른 피해저감률', '피해판독과 보상 소요시간', '정상 생산까지의 회복시간'을 두 발전축의 공동 성과지표로 설정해야 함. 이러한 공동지표를 적용할 때 예측 기반 관리와 회복력 강화가 분절된 사업이 아니라 예측–행동–피해저감–복구–학습의 연속적인 기술체계로 운영될 수 있음.

4 향후 기술 발전 방향

○ 기술개발의 방향

– 향후 기술개발은 개별 센서, 예보모델 또는 플랫폼의 성능을 독립적으로 높이는 방식에서 벗어나 관측–예측–행동–피해평가–복구–학습을 하나의 운영체계로 연결하는 방향으로 추진해야 함.

– 단기에는 데이터 표준화와 필지 단위 위험정보의 기반을 정비하고, 기존 수치예보와 AI 예보를 병렬 운영하여 극한현상별 성능과 실패조건을 검증해야 함.

– 중기에는 확률형 영향예보를 작목 · 생육단계별 행동 패키지와 안전한 자동제어에 연결하고, 피해판독 · 보험 · 복구 데이터를 예측모델에 환류해야 함.

– 장기에는 농장–산지–유통–보험–정책을 연결하는 디지털 리스크 트윈을 구축하여 복합 · 연쇄재해의 대응대안과 회복전략을 사전에 모의할 수 있어야 함.

○ 기술개발의 기본원칙

– 기술개발의 기본원칙은 '정확도보다 연결성', '예보보다 행동 가능성', '사후 피해집계보다 회복시간 단축'으로 설정함. 예측 정확도는 필수적인 기반이지만, 경보가 농가와 장비에 도달

하여 적절한 행동으로 전환되고 실제 피해와 복구시간을 줄일 때 기술적 가치가 완성됨.

- 이를 위해 농업기후 통합관측망 및 다원자료 융합, 유전자 기반 작물모델링, 앙상블 예측, 농업생태계 통합 모의, 마이크로서비스 기반 농업 플랫폼의 5개 주요 기술을 상호 연계하여 개발해야 함.
- 앞의 세 기술은 위험을 관측 · 예측하고, 농업생태계 통합 모의는 대응과 복구대안의 효과를 비교하며, 마이크로서비스 플랫폼은 데이터 · 모형 · 경보 · 장비 · 보험을 연결하는 공통 운영 기반을 담당함.

○ 농업기후 통합관측망 및 다원자료 융합

- 농업기후 통합관측망은 기상관측소, 위성, 드론, 토양 · 작물 · 시설 IoT 센서, 농작업, 피해 및 보험자료를 동일한 시간 · 공간 · 필지 체계로 연결하는 국가 농업위험 데이터 기반으로 발전시켜야 함.
- 단기에는 필지 식별자, 관측시각, 좌표계, 작목 · 품종 · 생육단계와 시설유형을 포함하는 공통 데이터모델을 확립하고, 기관별 자료의 품질관리 기준과 표준 API를 마련해야 함.
- 관측자료의 결측, 이상값, 센서 편향 및 위치오류를 자동으로 탐지하고 품질등급을 함께 제공함으로써 예측모델이 자료의 신뢰수준을 반영할 수 있어야 함(Villa-Henriksen et al., 2020).
- 기상 · 농업관측 · 보험 · 위성 · 수급 · 재해복구 데이터의 식별체계와 시공간 단위를 통일하고, 작목 · 축종별 위험지수 DB를 확대해야 함.
- 중기에는 농림위성의 광역 탐지, 드론의 고해상도 확인, 지상센서의 연속관측을 결합하여 필지별 작물상태와 재해영향을 자동 진단해야 함.
- 피해 발생 전에는 위험예측의 입력자료로 사용하고, 피해 발생 후에는 피해면적 · 피해강도 · 생산회복을 판독하여 보험과 재난지원의 근거자료로 활용함.
- 장기에는 재해위험과 자료 불확실성에 따라 관측빈도와 관측위치를 자동 조정하는 적응형 관측망으로 발전시켜야 함.
- 공공기관과 민간기업이 데이터를 안전하게 공유하면서도 농가의 데이터 권리와 접근권한을 보장하는 국가 농업기후 데이터 공간을 구축할 필요가 있음.

○ 유전자 기반 작물모델링

- 유전자 기반 작물모델링은 유전정보와 과정기반 생육모형을 결합하여 품종, 환경 및 재배관리의 상호작용(G×E×M)을 예측하고, 기후재해에 강한 품종과 관리방법을 함께 제시하는 기술로 발전시켜야 함(Hoogenboom et al., 2019).
- 단기에는 벼, 콩, 옥수수 등 주요 작물을 대상으로 발아 · 개화 · 등숙 등 생육단계별 고온 ·

저온 · 가뭄 · 침수 취약성을 정량화하고, 재해저항성 형질과 피해자료를 연결한 학습 DB를 구축함.

- 모델은 단순 수량예측을 넘어 어느 생육단계에서 어떤 기상조건이 회복 불가능한 피해를 유발하는지를 제시할 수 있도록 알고리즘을 개선함.
- 중기에는 원예 · 과수 등 고부가가치 작물로 적용범위를 확대하고, 앙상블 기상예측과 연계하여 지역 · 파종시기 · 품종 · 관리방법별 생산성과 하방위험을 동시에 비교하는 기능을 구현함.
- 농가가 평균수량뿐 아니라 재해 시 손실 가능성과 회복성을 고려하여 품종과 재배전략을 선택하도록 지원함.
- 장기에는 기후시나리오와 디지털 육종을 연결하여 지역별 미래기후에 적합한 품종 포트폴리오를 사전에 설계하고, 농가별 토양 · 미기상 · 재배이력을 반영한 맞춤형 품종–관리 추천서비스로 발전시킴.
- 유전자 기반 모델은 예측 기반 관리뿐 아니라 재해 이후 재정식과 품종전환을 지원하여 장기 회복력을 높이는 수단으로 활용함.

○ 앙상블 예측

- 앙상블 예측은 단일 수치예보나 AI 예보에 의존하지 않고 수치예보, AI 예보, 생육모형, 초기조건 및 매개변수의 불확실성을 결합하여 재해 발생확률과 영향범위를 산출하는 핵심 기술로 개발함.
- 단기에는 기존 수치예보와 AI 예보를 병렬 운영하고, 지역 · 계절 · 극한현상별 정확도와 실패조건을 공통 시험자료로 검증해야 함.
- 평균오차뿐 아니라 극한현상 적중률, 과소예측률, 확률예보의 신뢰도 및 필지별 편향을 평가하고, 불확실성을 위험등급과 함께 전달함(Price et al., 2025).
- 중기에는 초단기 나우캐스팅, 단 · 중기 예보 및 계절전망을 필지 생육모형과 연결하는 다중 시간규모 앙상블을 구축해야 함.
- 예측결과는 단순한 기상확률이 아니라 작목 · 생육단계별 피해확률, 영향범위, 행동 마감시점 및 대응수단별 기대효과로 변환하여 제공함.
- 앙상블에 기반한 과수 냉해 · 노지 가뭄 · 시설 폭염 등 주산지별 ‘위험 패키지’ 가 실증을 거쳐 표준화함.
- AI 예보 · 상세화 · 생육모형 · 보험 데이터를 결합한 하이브리드 예측 · 경보 시스템과 ‘경보–자동제어’ 연계를 추진함
- 원격탐사 기반 피해판독 · 지수보험을 지원하기 위한 기술체계를 확보함 (Sønderby et al., 2020).

- 장기에는 새로운 관측, 행동, 피해 및 복구자료가 축적될 때 모델의 가중치와 위험임계값을 지속적으로 갱신하는 학습형 앙상블로 발전시킴
- 자동 재학습 과정에서 지역별 편향이나 성능저하가 발생하지 않도록 모델 버전, 입력자료, 변경이력 및 검증결과를 관리하는 운영체계를 함께 구축함.
- 향후 R&D 평가지표를 '예측 정확도' 단일 지표에서 '대응시간 단축, 피해저감률, 복구 소요기간, 행동이행률, 데이터 연계도' 등 운영성과 중심 지표로 전환함.

○ 농업생태계 통합 모의

- 농업생태계 통합 모의는 대기–작물–토양–수문–축산–양분순환을 결합하고 실시간 관측자료를 동화하여 재해와 영농관리 변화가 생산, 환경 및 경영에 미치는 영향을 함께 평가하는 기술로 발전시켜야 함.
- 단기에는 주요 작목과 재해유형을 대상으로 대기–작물–병해충 모형을 결합하고, 관수 · 배수 · 차광 · 환기 · 방상 · 수확시기 변경 등 대응수단별 효과를 비교하는 위험 패키지를 개발함.
- 모델의 성과는 모의 정확도뿐 아니라 대응대안이 실제 피해를 얼마나 줄이는지 가상실험을 통해 의사결정 방향을 제시함.
- 중기에는 축산, 병해충, 양분순환, 저장 · 유통, 보험 및 경영모형을 추가하여 생산 전–생산 중–생산 후의 영향을 연속적으로 모의함.
- 재해 중에는 새로운 관측자료로 위험도와 대응 우선순위를 갱신하고, 재해 후에는 피해판독 · 보상 · 재정식 · 토양과 시설 복구대안의 비용과 회복기간을 비교함.
- 장기에는 농장–유역–산지–국가 수준의 디지털 리스크 트윈으로 확장하여 가뭄과 폭염, 집중호우와 병해충, 생산감소와 유통 · 가격충격과 같은 복합 · 연쇄위험을 모의함.
- 디지털 리스크 트윈은 단순한 3D 가시화가 아니라 실세계 자료와 가상모형을 지속적으로 동기화하고 사람의 판단과 실행결과를 다시 학습하는 의사결정 엔진으로 구축함(Verdouw et al., 2021; Reichstein et al., 2025).
- 융합기술 측면에서는 AI 예보 + IoT 자동제어 + 위성/드론 원격탐사 + 인슈어테크 + 디지털트윈이 단일 플랫폼으로 통합되며, 농업이 '생산 산업'에서 '리스크 관리 산업'으로 재정의될 수 있도록 지원함 (Slob et al., 2023).
- 경보 채널은 웹 · 문자 · 앱 · 민간 플랫폼 다중화로 '마지막 전달' 문제를 해소함 (Mowla et al., 2023).

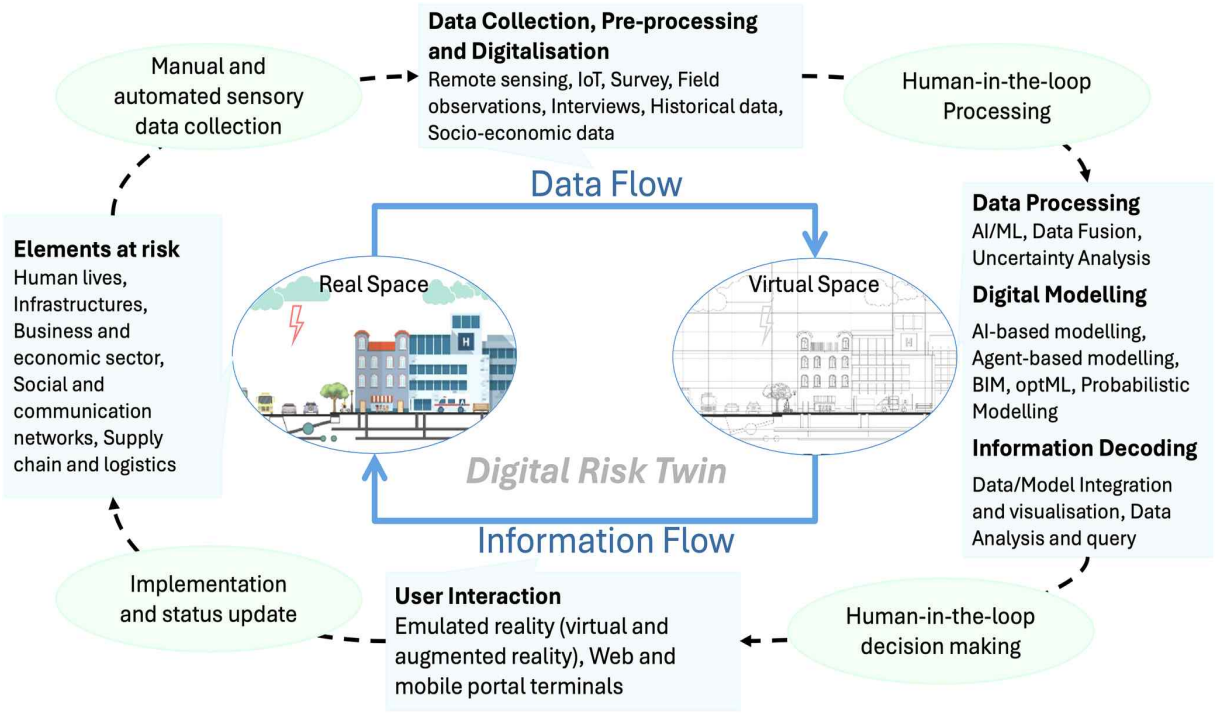


그림 6. 디지털 리스크 트윈의 데이터/정보 환류 구조

○ 마이크로서비스 기반 농업 플랫폼

– 마이크로서비스 기반 농업 플랫폼은 데이터, 모델, 위험지수, 경보, 장비제어, 피해판독 및 보험서비스를 기능 단위로 분리하고 표준 API와 이벤트 메시징으로 결합하는 개방형 운영기반으로 개발해야 함.

– 단기에는 공공 데이터와 예측모델을 단일 API 게이트웨이로 제공하고, 서비스별 입력 · 출력 · 품질 · 버전정보를 관리하는 카탈로그를 구축함.

– 동일 필지 식별자를 기준으로 관측–예측–경보 데이터를 연결하고 웹 · 문자 · 앱 · 민간 플랫폼을 통해 경보를 전달하여 마지막 마일의 도달률을 높임.

– 중기에는 경보–장비 자동제어, 원격탐사 피해판독–보험, 저장 · 출하 조정 서비스를 표준 인터페이스로 연계함.

– 자동제어에는 운영자 승인, 수동 전환, 안전정지 및 실행이력 기록을 포함하고, AI 모델에는 운영 중 성능감시, 재학습, 설명가능성 및 감사기록 기능을 적용함.

– 장기에는 공공기관, 연구기관, 장비기업, 보험사 및 농업서비스 기업이 새로운 서비스를 등록 · 결합할 수 있는 개방형 농업 서비스 생태계로 발전시킴.

– 특정 사업자나 장비에 대한 종속을 방지하기 위해 데이터 이동성과 상호운용성을 보장하고, 개인정보 · 경영정보 · 시설제어 권한을 구분하는 보안 및 데이터 거버넌스를 구축함(Qazi et al., 2022).

○ 단계적 통합 개발

– 5개 기술은 동일한 속도로 개발하기보다 데이터와 플랫폼을 공통기반으로 우선 구축하고, 예측 · 모의기술의 현장실증과 운영 연계를 단계적으로 확대해야 함.

– 단기에는 통합관측망과 마이크로서비스 플랫폼을 중심으로 데이터 표준, 필지 식별체계, API 및 품질관리 기반을 구축함. 동시에 유전자 기반 작물모델과 수치–AI 앙상블 예측을 주요 작목 · 주산지에서 검증하고, 위험단계별 행동 패키지를 개발함.

– 중기에는 5개 기술을 지역 실증단지에서 통합하여 예측정보가 실제 경보와 장비작동으로 전환되는 과정과 피해판독 · 보험 · 복구로 이어지는 과정을 검증함. 실증은 서리 · 폭염 · 가뭄 · 집중호우 등 재해별로 실시하고, 자동제어가 어려운 노지와 시설원예의 적용방식을 구분해야 함.

– 장기에는 농장 단위 기술을 산지 · 유역 · 유통 · 보험 · 정책으로 확대하여 국가 농업위험 관리체계를 구축함. 기술성과는 예측 정확도뿐 아니라 경보 도달률, 행동전환율, 대응시간, 피해저감률, 보험지급기간, 정상 생산까지의 회복시간 및 데이터 연계도로 평가해야 함.

표 5. 핵심 요소 기술 개발 로드맵

핵심기술	주요 내용	단기(5년)	중장기(10년)
농업기후 통합관측망 및 다원자료 융합	공통 필지 식별자·데이터 표준 및 자동 품질관리	■	■
	위성·드론·IoT 융합 기반 필지 자동 진단	■	■
	적응형 관측망·피해판독·보험연계 데이터 통합	■	■
유전자 기반 작물모델링	주요 식량작물의 생육단계별 재배취약성 DB·모델 구축	■	■
	원예·과수 확대 및 지역 맞춤 품종·관리 추천	■	■
	미래기후 연계 디지털 육종·품종전환 지원	■	■

핵심기술	주요 내용	단기(5년)	중장기(10년)
앙상블 예측	수치예보 – AI 예보 병렬 검증·극한현상 벤치마크		
	초단기–계절 연속 앙상블·확률 영향 예보		
	행동·피해·복구자료 기반 학습형 앙상블		
농업생태계 통합 모의	대기–작물–병해충 모형 결합 및 대응 패키지 구축		
	축산·병해충·보험·유통 확장과 실시간 자료동화		
	농장–국가 디지털 리스크 트윈·복합 모의		
마이크로서비스 기반 농업 플랫폼	API 게이트웨이·서비스 카탈로그·다중 채널 경보		
	경보·장비·피해판독·보험 연계 및 MLOps		
	개방형 서비스 생태계·연합 디지털 트윈 운영		

5 주요 이슈 및 한계

○ 데이터 품질과 상호운용성

– 농업기상 관측자료는 관측기관, 센서 제조사 및 자료 생산주체에 따라 공간좌표, 관측주기, 단위, 품질관리 기준과 메타데이터 형식이 달라 통합 활용에 한계가 있음.

– 농장 센서는 설치 위치, 토양 깊이, 교정 상태 및 통신환경에 따라 측정값의 편차가 크게 나타나며, 결측과 이상치가 예측모델의 입력오차로 누적될 수 있음.

– 위성 · 드론 · 지상센서 · 생육조사 · 피해이력 자료를 동일한 필지 식별자와 시간 기준으로

연결하지 못하면 예측결과의 재현성과 피해평가의 객관성을 확보하기 어려움.

- 공통 데이터 사전, 품질등급, 교정이력, 결측처리 규칙과 표준 API를 포함하는 전주기 데이터 관리체계가 선행되어야 함(Villa-Henriksen et al., 2020; Köksal and Tekinerdogan, 2019).

○ 복합 · 연쇄재해 대응의 한계

- 현재의 위험지수와 대응기준은 폭염, 가뭄, 한파, 침수 등 개별 재해를 독립적으로 평가하는 경우가 많아 복합재해가 실제 생산체계에 미치는 영향을 충분히 반영하지 못함.
- 가뭄 이후 폭염이 발생하거나 집중호우 이후 병해충이 확산되는 경우처럼 선행 재해가 작물과 토양의 취약성을 변화시키면 동일한 기상강도에서도 피해규모가 달라질 수 있음.
- 재해가 생산량 감소에서 저장 · 유통 차질, 가격 변동 및 농가 경영위험으로 전이되는 연쇄효과도 단일 작물모형이나 단일 위험지수만으로는 설명하기 어려움.
- 복합재해의 발생순서, 지속기간 및 상호작용을 반영하는 다중위험 시나리오와 농장-유역-유통 단계의 연계모형이 요구됨(Reichstein et al., 2025; Camps-Valls et al., 2025).

○ 모델 전이성과 검증자료 부족

- 특정 지역과 작목을 대상으로 개발된 예측모델이 다른 지역, 품종 또는 재배환경에서도 동일한 성능을 보장하지 못하는 공간적 전이성 문제가 존재함.
- 기상상세화와 AI 예측모델은 학습자료가 충분한 주산지에서는 높은 성능을 보일 수 있으나, 산간지 · 도서지역이나 관측밀도가 낮은 지역에서는 편향이 증가할 수 있음.
- 극한재해는 발생빈도가 낮아 학습과 검증에 활용할 수 있는 피해자료가 부족하고, 보험자료와 행정 피해자료도 조사기준 및 공간단위가 달라 모델 검증에 제약이 있음.
- 연도 · 지역 · 작목을 분리한 외부검증, 극한사상 중심의 스트레스 테스트, 확률예측의 보정도 평가와 모델 갱신이력 관리가 필요함(Yoo et al., 2022).

○ 경보의 실효성과 신뢰도

- 예측정확도가 높더라도 경보가 농가의 실제 의사결정과 행동으로 연결되지 않으면 피해저감 효과를 달성하기 어려움.
- 경보가 지나치게 빈번하거나 실제 피해로 이어지지 않는 사례가 반복되면 경보피로와 불신이 발생하고, 반대로 경보를 보수적으로 운영하면 위험한 상황을 놓칠 가능성이 높아짐.
- 동일한 위험수준이라도 농가의 노동력, 장비 보유 여부, 대응비용 및 작물의 경제적 가치에 따라 실행 가능한 조치가 달라지므로 단일한 행동권고를 일률적으로 제공하는 데 한계가 있음.
- 경보에는 예상 피해, 행동 마감시점, 조치별 비용과 기대효과, 대체수단을 함께 제시하고 농업인 · 지도사와의 반복적인 검증을 통해 권고기준을 개선해야 함(Clarkson et al., 2019;

Nyoni et al., 2024).

○ 현장 자동화의 안전성과 운영 연속성

– 자동관수 · 환기 · 방상 · 배수 기술은 경보–행동 지연을 줄일 수 있으나, 재해 발생 시 통신망 · 전력 · 센서가 동시에 장애를 일으킬 가능성이 있음.

– 강풍 · 침수 · 폭설과 같은 극한상황에서는 센서 오작동이나 통신두절이 발생할 수 있으며, 잘못된 제어명령은 시설과 작물의 피해를 오히려 확대할 수 있음.

– 자동화 장비의 고장진단, 오프라인 운전, 안전정지, 수동전환 및 우선순위 제어기능이 표준화되어 있지 않아 제조사별 대응수준의 차이가 큼.

– 자동제어 시스템은 사람의 최종 개입권한, 작업자 안전기준, 비상운전 절차 및 통신복구 후 데이터 동기화 기능을 포함하도록 설계해야 함(Kiani and Seyyedabbasi, 2018; Shamshiri et al., 2018).

○ 피해판독과 보험연계의 불확실성

– 위성 · 드론 기반 피해판독은 조사시간을 단축할 수 있으나, 구름 · 관측주기 · 혼합화소 · 필지경계 및 생육단계 차이로 인해 피해원인과 강도를 정확히 구분하는 데 한계가 있음.

– 재해 이전부터 생육이 불량했던 필지와 재해로 새롭게 피해를 입은 필지를 구분하기 위해서는 재해 전 기준영상과 지상조사자료가 함께 확보되어야 함.

– 원격탐사 지표와 실제 손실 사이의 차이가 커지면 지수보험의 기준위험이 증가하고, 보험금 지급결과에 대한 농가의 이의제기와 분쟁이 발생할 수 있음.

– 피해면적과 강도뿐 아니라 판독 불확실성을 함께 제시하고, 표본 현장조사 · 농가 참여형 검증 · 보험자료를 결합한 다원 검증체계가 필요함(Vreugdenhil et al., 2022; Portalés–Julià et al., 2023).

○ 총소유비용과 사업 지속성

– 초기 장비가격 외에도 센서 교정, 통신요금, 배터리 · 부품 교체, 소프트웨어 구독, 데이터 저장 및 유지보수 인력에 대한 총소유비용이 지속적으로 발생함.

– 실증사업 기간에는 정부 지원으로 시스템을 운영할 수 있으나 사업 종료 후 유지관리 주체와 예산이 확보되지 않으면 장비가 방치되거나 데이터 수집이 중단될 가능성이 있음.

– 특정 제조사나 플랫폼에 종속되면 장비 교체와 서비스 확장 비용이 증가하고, 새로운 기관이나 기술이 기존 시스템에 참여하기 어려운 공급자 종속 문제가 발생할 수 있음.

– 공공 통합관측망과 공동 데이터 플랫폼은 공공재로 구축하되, 농가에는 경보 · 제어 · 보험을 묶은 서비스형 패키지를 제공하는 비용분담 구조가 필요함(Farooq et al., 2022; Kampker et al., 2019).

○ 데이터 권리와 사이버보안

– 농장 데이터는 기상 · 생육 · 수량 · 피해 · 보험 및 경영정보가 결합될수록 활용가치가 높아지지만 개인정보와 영업정보의 노출 위험도 증가함.

– 농가가 제공한 데이터의 소유권, 제3자 제공범위, 보유기간 및 삭제권한이 명확하지 않으면 데이터 제공에 대한 농가의 신뢰를 확보하기 어려움.

– 경보 · 자동제어 · 보험 시스템이 연결되면 계정 탈취, 센서값 변조 또는 제어명령 위 · 변조가 실제 농작업과 보험금 지급에 영향을 줄 수 있음.

– 데이터 최소수집, 목적별 동의, 접근권한 관리, 암호화, 변경이력 기록과 침해사고 대응절차를 포함하는 농업 데이터 거버넌스가 요구됨(Qazi et al., 2022).

○ 기술 접근성과 형평성

– 디지털 기반 재해관리 기술의 편익이 규모화된 농가나 통신환경이 우수한 지역에 집중될 경우 농가 간 위험관리 역량의 격차가 확대될 수 있음.

– 고령농 · 임차농 · 소규모 농가와 산간 · 도서지역 농가는 스마트폰 활용능력, 통신품질, 장비투자 여력이 상대적으로 낮아 서비스에서 배제될 가능성이 있음.

– 복잡한 확률정보나 전문용어 중심의 경보는 이용자의 이해를 저해하므로 문자 · 음성 · 전화 · 마을방송 등 다중채널과 그림 · 색상 기반의 단순한 표현방식이 병행되어야 함.

– 보급성과는 전체 가입자 수뿐 아니라 농가규모 · 연령 · 지역 · 작목별 도달률과 행동이행률을 구분해 평가해야 함(Farooq et al., 2019; Nocezo et al., 2024).

○ 실증과 상시운영 간 격차

– 연구개발 단계에서는 제한된 지역과 기간을 대상으로 성능을 검증하는 경우가 많아 전국 단위 상시서비스에서 발생하는 운영문제를 충분히 확인하기 어려움.

– 실제 재해는 발생시점과 유형을 사전에 통제할 수 없으므로 단기간 실증만으로 극한상황에서의 시스템 안정성과 피해저감 효과를 입증하기 어려움.

– 연구기관이 개발한 모델이 행정기관, 지도기관, 보험사 및 장비업체의 업무체계와 연결되지 않으면 우수한 기술도 실험실 수준에 머무를 가능성이 있음.

– 장기 실증지와 표준 시험장을 운영하고, 모델 성능뿐 아니라 장비 가동률, 통신복구 시간, 행동이행률, 피해저감률 및 정상생산 복귀기간을 공동 평가해야 함.

○ 환경적 · 사회적 역효과

– 개별 농장의 피해저감에 최적화된 대응이 지역 전체의 물 · 에너지 이용이나 농산물 수급에 부정적인 영향을 줄 가능성도 고려해야 함.

– 가뭄경보에 따라 다수 농가가 동시에 관수를 실시하면 유역 단위의 용수부족이 심화될 수 있

으며, 냉난방 · 환기설비의 확대는 에너지 소비와 운영비용을 증가시킬 수 있음.

- 단기적인 피해회피를 위해 특정 품종이나 작목으로 전환하는 농가가 증가하면 생산의 다양성이 감소하고 시장가격 변동성이 확대될 가능성이 있음.
- 대응기술의 성과를 평가할 때 피해저감률 외에도 물 · 에너지 사용량, 탄소배출, 노동안전, 생물다양성 및 지역 수급 영향을 함께 검토해야 함(Urruty et al., 2016; Meuwissen et al., 2019).

○ 종합적 해결방향

- 주요 이슈는 데이터, 예측모델, 경보전달, 현장실행, 피해평가 및 제도운영 단계에서 연쇄적으로 발생하므로 개별 기술의 성능개선만으로는 해결하기 어려움.
- 기술적으로는 데이터 표준화, 확률형 예측, 외부검증, 모델 갱신 및 사람 참여형 의사결정체계를 동시에 구축해야 함.
- 경제적으로는 공공 관측 · 데이터 인프라와 민간 서비스의 역할을 구분하고, 총소유비용과 유지관리비를 반영한 공동이용 · 서비스형 보급모델을 마련해야 함.
- 확산 측면에서는 다중채널 경보, 농업기술지도 인력의 재교육, 농가 참여형 서비스 설계와 취약계층별 접근성 평가가 필요함.
- 제도적으로는 데이터 권리, AI 설명가능성, 자동제어 책임, 피해판독 검증 및 보험금 산정에 관한 표준과 분쟁조정 절차를 사전에 정비해야 함.
- 최종적으로 연구개발 평가지표를 예측정확도 중심에서 경보 도달률, 행동이행률, 대응시간, 피해저감률, 복구기간, 운영비용 및 형평성을 포함하는 시스템 성과 중심으로 전환해야 함.

Ⅳ. 산업 및 정책 환경

1 산업 동향

1.1 글로벌 산업 동향

○ 회복력 서비스 시장으로의 재편

– 글로벌 산업은 '데이터 판매 시장'이 아니라 회복력 서비스(resilience service) 시장으로 재편되고 있으며 '예보 · 운영 플랫폼형'과 '보험 · 복구 연계형'이라는 상이한 산업모델이 보급되고 있음 (Lamonaca et al., 2026).

– Tomorrow.io는 30개 이상 기상 파라미터를 위치별로 시각화하여 운영의사결정으로 전환하는 플랫폼형 모델을 개발하고 있음 (Hosterman et al., 2019)

– Pula는 위성 · 강우 · 수량 데이터를 활용한 농업생태권 단위 인슈어테크 모델을 운영하고 있음 (Nguyen et al., 2025)

○ 글로벌 산업 구조의 분화

– 산업 구조는 ① 예보 · 운영 플랫폼형(Tomorrow.io 등), ② 보험 · 복구 연계형(Pula 등 인슈어테크), ③ 농기계 · 자동제어 결합형(자율주행 · 스마트 관수/환기 자동화)의 세 축으로 분화되고 있으며, 글로벌 R&D 투자와 벤처 투자가 두 번째 · 세 번째 축으로 빠르게 이동 중임.

– 시장가치가 '예측 정보 자체'에서 '예측을 행동 · 보상으로 전환하는 서비스'로 이동하고 있음을 시사함 (Zhao et al., 2023).

1.2 국내 산업 동향

○ 공공 실증–민간 사업화–정책 확산 구조

– 농촌진흥청 농업기상재해 조기경보서비스는 운영형 공공 인프라로서 민간 솔루션의 데이터 기반이 되고 있음

– 농작물재해보험(2025년 76개 품목 · 70만ha · 63만 2천명 · 가입률 57.7%)은 보험 · 금융 영역의 최대 수요원임 (농림축산식품부, 2025)

– 농림위성은 향후 정밀 수급예측 · 피해판독의 핵심 인프라가 될 것으로 전망됨.

○ 초기 시장 형성 산업 발전 단계

– 공공 데이터 · 보조사업이 초기 수요를 창출하고, 민간 기업이 예보엔진 · 자동제어 · 피해판독 · 보험 · 산지유통 최적화 영역에서 사업모델을 형성하는 단계로, 향후 5년 내 표준 API ·

성과기반 구매 · 실증시장 조성 정책의 영향이 클 것으로 예상된다.

표 6. 국내 산업 구조

생태계 층위	핵심 주체	역할	대표 예시
공공 관측·예보 인프라	KMA·RDA·농림위성	관측·필지예측· 조기경보 기반 제공	AAOS·30×30m 조기경보
농업 현장 서비스	지자체·현장지도· 협동조합	경보 전달·대응 지원·교육	웹/문자/앱 알림
민간 솔루션·장비	스마트농업 기업·제조사	자동제어·플랫폼· 데이터 분석	스마트 관수·자율장비
보험·금융·보상	농작물재해보험· 인슈어테크	위험 흡수· 정밀 피해산정	지수보험·원격탐사 판독
정책·제도	정부	실증시장·표준· 성과기반 구매	AX 전략·적응대책

2 국내외 정책 동향

2.1 국외 정책 동향

○ WMO 조기경보 및 기후서비스 정책

– WMO 'Early Warnings for All(EW4All)'은 2027년까지 전 지구 조기경보 보호를 목표로 하며, 위험지식 · 관측예측 · 경보전달 · 대응역량의 4요소가 모두 갖춰져야 효과가 있음을 강조함.

– WMO WCSP 및 기후서비스 체계는 농업 · 식량안보를 우선 부문으로 지정하여 국가-지역-세계 정보 생산 · 유통 체계를 권고함.

○ 주요국의 인슈어테크 · 디지털 트윈 정책

– 미국 · EU · 영국은 인슈어테크 · 지수보험 · 기후적응형 농정에 정책 자원을 집중하고 있으며, 일본 · EU는 디지털트윈 · 디지털 리스크 트윈 연구를 국가 R&D 전략의 한 축으로 명시하고 있음. 이들 정책의 공통 키워드는 '다부처 통합 · 사용자 중심 · 조기행동 지원'으로 요약된다.

– 미국 NOAA · NIDIS의 가뭄 시범사업(2024-2025)은 '정확한 예보'가 아니라 '행동 가능한 정보'를 정책 구현의 중심에 두며, 농업 · 물 · 보건 부문 사용자가 시나리오를 공동 설계함.

– ECMWF는 2025년 AIFS를 운영체계에 도입하여 AI 예보의 공공 인프라화를 선도하고 있음

2.2 국내 정책 동향

○ 국가 기후위기 적응대책

– 정부는 '제4차 국가 기후위기 적응대책'을 수립하여 기후변화 대응을 지원하고 있음.

– AI 예·경보, 스마트 생산시설 보급, 기후적응형 품종 개발, 재해보험 보장 범위 확대, 기후위험 분석 플랫폼 구축, 농업인 작업안전 기준 등 적응을 위한 기술 개발을 포함하고 있음.

○ 농업·농촌 AX 전략

– 농림축산식품부의 2026년 '농업·농촌 AX 전략'은 생산·유통·농촌생활 전반으로 AI 적용을 확장하며, AI 기반 재해 위험지도·지하수 가용량 예측·국가 농업 AX 플랫폼·AI-Farm·NEXT Farm·농업 특화 데이터센터를 핵심 과제로 제시하였음.

– 2025년 주요 계획으로 품목·기후별 매뉴얼 고도화, 예방시설 확대, 위성 활용, 스마트 APC 확대가 포함되었음.

○ 국가 농업 기후리스크 운영체계 구축 단계

– 국내 정책 흐름은 개별 사업의 병렬 집행 단계를 넘어 '국가 차원의 농업 기후리스크 운영체계 구축 단계'에 진입하였음.

– 부처 간 데이터 표준·책임성 거버넌스, 보험-예측 시스템의 법제도적 연결, AI 시스템 검증·투명성 기준은 추가 정비가 필요함.

○ 국내 정책의 특징

– 국제 동향과 비교할 때 국내 정책의 특징은 '운영형 공공 인프라의 조기 확보'와 '부처 분절'이 공존함.

– 농업기상재해 조기경보·농작물재해보험·농림위성·AX 전략 등 개별 축은 세계적으로도 앞선 수준이나, 이들을 하나의 데이터·거버넌스 체계로 묶는 결합 정책은 아직 초기 단계임.

– 향후 기존 자산의 상호운용성 확보와 성과기반 평가체계 도입을 중심으로 기술개발을 하는 것이 비용 효율적일 것으로 판단됨.

표 7. 국내외 정책 비교

구분	정책/기관	핵심 목표	농업 관련 수단	시사점
국제	WMO EW4All	2027 전 지구 조기경보 보호	4요소 기반 조기행동	농업 조기경보의 국제 기준
국제	WMO WCSP/ 기후서비스	국가·지역·세계 기후서비스 운영	농업·식량안보 우선	공공 기후서비스 인프라 강화
국제	NOAA 시범사업	맞춤형 가뭄 시나리오 경보	농업·물·보건 공동설계	예보보다 행동가능성 강조
국내	제4차 기후위기 적응대책	산업·기반·취약계층 적응 강화	스마트 시설·품종·보험·플랫폼	농업 리스크 관리 상위 정책틀
국내	농식품부 AX 전략	농업·농촌 전반 AI 전환	AI 위험지도·NEXT Farm·데이터센터·위성	재해대응·운영혁신 통합
국내	재해보험·수급대응	위험 흡수·수급 안정	보험 확대·예방시설·위성 활용	복구와 예측의 연결

Ⅴ. 결론 및 제언

1 주요 동향 및 시사점

○ 핵심 특징: 단일 운영체계로의 통합

– 농업분야 기상재해 대응 미래기술의 본질은 '더 정교한 예보'나 재해별 기술목록이 아니라 예측-대응-복구-학습을 단일 운영체계로 연결하는 데 있음.

– 기술의 단위가 개별 재해대응 솔루션에서 국가적 리스크 관리 시스템으로 이동하고 있으며, 5개 요소 기술과 2개 발전축이 이를 설명하는 핵심 틀로 활용될 수 있음.

○ 농업 · 산업 영향

– 농업의 기술 평가 기준이 '평균 생산성'에서 '평균 생산성 + 변동성 흡수 + 회복 속도'로 확장됨에 따라, 보험 · 금융 · 유통 · 정책이 농업기술 생태계의 핵심 구성요소로 편입됨.

– 산업 측면에서는 회복력 서비스 시장(예보 플랫폼 · 인슈어테크 · 자동제어 결합형)이 형성되고 있음 (Urruty et al., 2016).

○ 구조적 변화

– 한국은 농장단위 조기경보의 운영 역량(155개 시군 · 30m · 만족도 86%)을 이미 확보하였으나, 보험 · 위성 · 유통 · 수급 · R&D와의 '연결성'에서 발전 여지가 큼.

– AI 예보 · 디지털 리스크 트윈은 빠르게 발전하지만 성패는 사용자 적합성 · 제도 연계에 달려 있음 (Nyoni et al., 2024).

○ 시사점

– 향후 국가 차원의 우선과제는 '예측 정확도 경쟁'이 아니라 예측 기반 관리와 회복력 강화를 동시에 달성하는 것이 필요함.

– 데이터 통합, 행동 전환, 복구 연결, 정책 정합성을 하나의 운영성과 체계로 관리해야 함

– 농업의 미래 경쟁력을 향상시키기 위해 생산량보다 위험을 얼마나 빠르게 예측 · 흡수 · 회복할 수 있는 기술 개발 체계로 추진되어야 함.

2 정책 및 R&D 전략

2.1 R&D 투자 방향

○ 하이브리드 예측모델

– 공공예보 · 농장센서 · 위성 · 피해이력 · 보험자료를 결합한 하이브리드 예측모델 개발에 집중 투자가 필요함.
– 정확도와 함께 '확률형 정보 · 불확실성 전달 · 설명가능성'을 포함한 의사결정형 예측으로 고도화함 (Bocquet, 2023).

○ 위험지수 DB 확장
– 작목 · 축종별 위험지수 DB를 확대하여 조기경보의 대상 범위를 넓히고, 생육단계별 임계기상 기준을 표준화함.
– 과정기반 모형 적용을 통해 생물학적인 반응을 예측하여 대응 방안을 제안할 수 있는 체계를 구축함.

○ AI · 자동화 융합
– AI 예보 결과를 자동제어 · 드론 방제 · 자율장비와 직결하여 경보-대응 시간차를 최소화함.
– 농장단위 시간단위 자동대응 트리거를 성과지표로 설정함 (Gonzalez-de-Santos et al., 2017; Payero et al., 2017).

○ 디지털 리스크 트윈
– 주산지 또는 유역 단위에서 디지털 리스크 트윈을 시범 구축함.
– 농장-산지-유통-보험 데이터의 동기화를 실험하고, 단계적으로 전국 단위 통합 운영체계로 확장함 (Palacios Játiva et al., 2024).

기상 · 작물모형과 인공지능 (AI)를 결합한 하이브리드 예측모형을 개발하여 농지별 재해위험과 대응시점을 제시해야 함. **작목 · 축종별 피해 가능성을 수치화한 위험지수 자료를 확충**하고, 예보를 **관수 · 온실 환기 · 방상팬의 가동과 연결**하되 운영자 확인과 수동 전환 기능을 갖추도록 함. **실제 농장상태를 반영하는 디지털 리스크 트윈으로 대응방법별 피해와 비용을 비교**하고, **현장 실증 후 확대**해야 함.

2.2 기술 확산 및 산업화 전략

○ 패키지형 기술/서비스 확산
– 단일 장비 보급보다 '위험 유형별 패키지'단위로 서비스를 개발함.
– 과수 냉해 패키지에는 개화기 예측, 방상팬 · 관수 제어, 문자 · 앱 경보와 함께 재해보험을 연계함
– 노지 가뭄 패키지의 경우, 토양수분, 관수 추천, 지하수 예측 및 보험을 포함하여 개발함.
– 시설 폭염 · 한파 패키지의 경우, 실시간 환경제어, 에너지 최적화 및 보험 관련 기술이 운영됨

○ 민간 사업모델 다각화

– 예보엔진, 현장 자동제어, 피해판독, 보험/금융, 산지유통 최적화 중 단일 또는 복수 영역에서 사업화를 추진함.

– 인슈어테크(파라메트릭 보험), 회복력 서비스 구독, 데이터 기반 작부계획 컨설팅이 유망 사업영역으로 육성함 (Kampker et al., 2019).

○ 정부 역할

– 실증시장 조성 · 공공데이터 개방 · 표준 API · 성과기반 구매를 통해 생태계를 키우는 방식을 채택함.

– 단순 보조금 지급보다 피해저감률 기반 보조금과 같이 '성과 기반 구매'를 추진하여 기술 성숙의 가속화를 지원함.

예측 · 경보 · 장비제어 · 보험을 묶은 위험유형별 통합서비스를 보급해야 함. 공공기관은 **자료와 시스템 간 연결규칙인 표준 API를 공개**하고 민간기업은 위성 · 드론 **피해 판독과 보험서비스를 개발**하도록 함. 정부 · 지자체는 실증에서 확인한 **피해저감 효과와 복구기간을 서비스 구매 · 보급지원**에 반영해야 함.

2.3 기반 구축 및 제도 개선

○ 데이터 표준 · 기관 간 연결

– 데이터 표준과 기관 간 연결이 가장 시급한 제도 개선 사항임.

– 기상 · 농업관측 · 보험/수급 · 위성 · 재해복구 데이터가 동일 식별체계와 시공간 단위로 연결되어야 함.

– 데이터 · 인프라 구축, 전문인력 양성, 제도 및 규제개선 등이 추진되어야 함.

○ 전달체계

– 웹 · 문자 · 모바일 · 민간 플랫폼 연동을 강화하되, 고령농 · 소규모 농가를 고려한 다중채널 접근이 필요함

– 음성안내 · 간소화 UI · 마을방송 연계가 포함되어야 함.

○ 제도 통합

– 재해보험 · 적응품종 · 예방시설 · 작업안전 기준을 단일 '리스크 관리체계' 안에서 설계하는 것이 필요함.

– AI 예측 시스템에 대한 성능검증 · 책임성 · 투명성 기준을 사전 마련하고, 지수보험 등 신상품의 제도적 인정을 명문화함.

○ 전문인력 양성

– 농업기상 · AI · 원격탐사 · 인슈어테크 · 디지털트윈을 아우르는 융합형 전문인력 양성 체계가 필요함.

– 농촌진흥청 · 대학 · 지자체가 협력하여 학생 대상 교육 훈련 프로그램과 농가 현장지도사의 디지털 역량 재교육이 병행되어야 함.

○ 우선순위

– 단기-중기-장기 로드맵과 연계하여 데이터 · 전달 · 제도의 개선을 우선순위를 두고 진행함.

– 데이터 표준 · 연결이 선행되어야 예측 · 경보의 품질이 담보되고, 전달체계가 정비되어야 그 품질이 현장 행동으로 전환되며, 제도 · 인력이 뒷받침되어야 개선이 일회성이 아니라 지속 · 확산됨.

– 정부는 개별 사업의 병렬 확대보다 '표준 → 전달 → 제도'의 순차적 정합성 확보를 우선하는 것이 효과적임.

○ 종합정리

– 국내에는 농장단위 조기경보라는 세계적 강점 자산을 이미 보유하고 있어, 향후 10년의 과제는 예측모델 · 조기경보 · 대응기술의 3개 구성기술을 '예측 → 대응 → 복구'로 연결하고, 예측 기반 관리와 회복력 강화라는 2개 발전축을 제도화해야 함.

– 데이터가 연결되고 예측이 행동으로 닿으며 복구결과가 다시 학습으로 이어질 때 농업은 재해에 흔들리지 않는 리스크 관리 산업으로 전환될 수 있음 (Mabhaudhi et al., 2025).

예측 · 경보 기술이 현장에서 실제 행동과 보상으로 이어질 수 있도록 기상 · 관측 · 보험 · 위성 **데이터를 하나의 식별체계로 묶는 표준화**를 출발점으로 **전달체계를 정비**함. AI 예측의 검증방법과 오류 시 책임범위를 정하는 등 **의사결정 지원 서비스의 법적 지위를 명시**하여 리스크 관리 산업 기반을 다지는 한편, **피해 예측 규모에 따라 보험금을 정하는 지수보험**은 실제 손실과의 차이를 점검함. 이를 운영할 **융합형 전문인력을 농촌진흥청 · 대학 · 지자체와 공동 양성**함.

참고문헌

○ 농림축산식품부. (2026). 2026년 농작물보험, 이렇게 바뀝니다! https://www.mafra.go.kr/home/5109/subview.do;jsessionid=ZYLXngdB5QjKEmNBXq8GBKdU.inst11?enc=Zm5jdDF8QEB8JTJGYmJzJTJGaG9tZSUyRjc5MiUyRjU3Njc1MyUyRmFydGNsVmlldy5kbyUzRg%3D%3D

○ Altieri, M. A., Nicholls, C. I., Henao, A., & Lana, M. A. (2015). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. Agronomy for Sustainable

Development, 35(3), 869-890. DOI: 10.1007/s13593-015-0285-2.

○ Asfaw, D., Black, E., Brown, M., Nicklin, K. J., Otu-Larbi, F., Pinnington, E., et al. (2018). TAMSAT-ALERT v1: a new framework for agricultural decision support. Geoscientific Model Development, 11(6), 2353-2371. DOI: 10.5194/gmd-11-2353-2018.

○ Bi, K., Xie, L., Zhang, H., Chen, X., Gu, X., & Tian, Q. (2023). Accurate medium-range global weather forecasting with 3D neural networks. Nature, 619(7970), 533-538. DOI: 10.1038/s41586-023-06185-3.

○ Bocquet, M. (2023). Surrogate modeling for the climate sciences dynamics with machine learning and data assimilation. Frontiers in Applied Mathematics and Statistics, 9, 1133226. DOI: 10.3389/fams.2023.1133226.

○ Buitink, J., Swank, A. M., van der Ploeg, M., Smith, N. E., Benninga, H. J. F., van der Bolt, F., et al. (2020). Anatomy of the 2018 agricultural drought in the Netherlands using in situ soil moisture and satellite vegetation indices. Hydrology and Earth System Sciences, 24(12), 6021-6031. DOI: 10.5194/hess-24-6021-2020.

○ Camps-Valls, G., Fernández-Torres, M. Á., Cohrs, K. H., Höhl, A., Castelletti, A., Pacal, A., et al. (2025). Artificial intelligence for modeling and understanding extreme weather and climate events. Nature Communications, 16(1), 1919. DOI: 10.1038/s41467-025-56573-8.

○ Cantelaube, P., & Terres, J.-M. (2005). Seasonal weather forecasts for crop yield modelling in Europe. Tellus A, 57(3), 476-487. DOI: 10.3402/tellusa.v57i3.14669.

○ Chen, L., Zhong, X., Zhang, F., Cheng, Y., Xu, Y., Qi, Y., & Li, H. (2023). FuXi: a cascade machine learning forecasting system for 15-day global weather forecast. npj Climate and Atmospheric Science, 6, 190. DOI: 10.1038/s41612-023-00512-1.

○ Chipanshi, A., Zhang, Y., Kouadio, L., Newlands, N., Davidson, A., Hill, H., et al. (2015). Evaluation of the Integrated Canadian Crop Yield Forecaster (ICCYF) model for in-season prediction of crop yield across the Canadian agricultural landscape. Agricultural and Forest Meteorology, 206, 137-150. DOI: 10.1016/j.agrformet.2015.03.007.

○ Clare, M. C. A., Jamil, O., & Morcrette, C. (2021). Combining distribution-based neural networks to predict weather forecast probabilities. arXiv. DOI: 10.48550/arXiv.2103.14430.

○ Clarkson, G., Dorward, P., Osbahr, H., Torgbor, F., & Kankam-Boadu, I. (2019). An investigation of the effects of PICSA on smallholder farmers' decision-making and livelihoods when implemented at large scale – The case of Northern Ghana. Climate Services, 14, 1-14. DOI: 10.1016/j.cliser.2019.02.002.
○ de Burgh-Day, C. O., & Leeuwenburg, T. (2023). Machine learning for numerical weather and climate modelling: a review. Geoscientific Model Development, 16, 6433-6477. DOI: 10.5194/gmd-16-6433-2023.
○ Dong, Y., Werling, B., Cao, Z., & Li, G. (2024). Implementation of an in-field IoT system for precision irrigation management. Frontiers in Water, 6, 1353597. DOI: 10.3389/frwa.2024.1353597.
○ ECMWF. (2025). ECMWF's AI forecasts become operational (AIFS).
○ FAO. (2025). The Impact of Disasters on Agriculture and Food Security 2025. DOI: 10.4060/cd7185en.
○ Farooq, M. S., Riaz, S., Abid, A., Abid, K., & Naeem, M. A. (2019). A Survey on the Role of IoT in Agriculture for the Implementation of Smart Farming. IEEE Access, 7, 156237-156271. DOI: 10.1109/access.2019.2949703.
○ Farooq, M. S., Riaz, S., Helou, M. A., Khan, F. S., Abid, A., & Alvi, A. (2022). Internet of Things in Greenhouse Agriculture: A Survey on Enabling Technologies, Applications, and Protocols. IEEE Access, 10, 53374-53397. DOI: 10.1109/access.2022.3166634.
○ Ghaffarian, S. (2025). Rethinking digital twin: Introducing digital risk twin for disaster risk management. npj Natural Hazards, 2(1), 79. DOI: 10.1038/s44304-025-00135-x.
○ Ghandar, A., Ahmed, A., Zulfiqar, S., Hua, Z., Hanai, M., & Theodoropoulos, G. (2021). A Decision Support System for Urban Agriculture Using Digital Twin: A Case Study With Aquaponics. IEEE Access, 9, 35691-35708. DOI: 10.1109/access.2021.3061722.
○ Giraldo, D., Clarkson, G., Dorward, P., & Obando, D. (2024). First Experiences with Participatory Climate Services for Farmers in Central America: A Case Study in Honduras. Advancements in Agricultural Development, 5(2), 6-26. DOI: 10.37433/aad.v5i2.363.
○ Gonzalez-de-Santos, P., Ribeiro, A., Fernández-Quintanilla, C., López-Granados, F., Brandstoetter, M., Tomic, S., et al. (2017). Fleets of robots for environmentally-safe pest control in agriculture. Precision Agriculture, 18, 574-614. DOI: 10.1007/s11119-016-9476-3.
○ Heeb, L., Jenner, E., & Cock, M. J. W. (2019). Climate-smart pest management: building

resilience of farms and landscapes to changing pest threats. Journal of Pest Science, 92, 951–969. DOI: 10.1007/s10340–019–01083–y.

○ Helmy, H. S., Abuarab, M. E., Abdeldaym, E. A., Abdelaziz, S. M., Abdelbaset, M. M., Dewedar, O. M., et al. (2025). Field–grown lettuce production optimized through precision irrigation water management using soil moisture–based capacitance sensors and biodegradable soil mulching. Irrigation Science, 43, 1045–1070. DOI: 10.1007/s00271–024–00969–9.

○ Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Shelia, V., Wilkens, P. W., Singh, U., et al. (2019). The DSSAT crop modeling ecosystem. In K. J. Boote (Ed.), Advances in Crop Modelling for a Sustainable Agriculture (pp. 173–216). Burleigh Dodds Science Publishing. DOI: 10.19103/AS.2019.0061.10.

○ Hosterman, H. R., Lazo, J. K., Sprague–Hilderbrand, J. M., & Adkins, J. E. (2019). Using the National Weather Service's impact–based decision support services to prepare for extreme winter storms. Journal of Emergency Management, 17(6), 455–467. DOI: doi.org/10.5055/jem.2019.0439

○ Hou, D., & Wang, X. (2025). Can agricultural insurance enhance comprehensive grain production capacity? Frontiers in Sustainable Food Systems, 9, 1649495. DOI: 10.3389/fsufs.2025.1649495.

○ Houmma, I. H., Gadal, S., El Mansouri, L., Garba, M., Gbetkom, P. G., Barkawi, M. B. M., et al. (2023). A new multivariate agricultural drought composite index based on random forest algorithm and remote sensing data developed for Sahelian agrosystems. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 14(1), 2223384. DOI: 10.1080/19475705.2023.2223384.

○ Jalilov, S.–M., Maltsbarger, R., & Gedikoglu, H. (2026). The Cost of Bad Timing: How Phenology and Frequency Determine Agricultural Flood Risk. Water Resources Management, 40, 417. DOI: 10.1007/s11269–026–04801–1.

○ Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., et al. (2003). The DSSAT cropping system model. European Journal of Agronomy, 18(3–4), 235–265. DOI: 10.1016/S1161–0301(02)00107–7.

○ Kampker, A., Stich, V., Jussen, P., Moser, B., & Kuntz, J. (2019). Business models for industrial smart services – The example of a digital twin for a product–service–system for potato harvesting. Procedia CIRP, 83, 534–540. DOI: 10.1016/j.procir.2019.04.114.

○ Kangogo, D., Dentoni, D., & Bijman, J. (2020). Determinants of Farm Resilience to Climate Change: The Role of Farmer Entrepreneurship and Value Chain Collaborations. Sustainability, 12(3), 868. DOI: 10.3390/su12030868.
○ Kiani, F., & Seyyedabbasi, A. (2018). Wireless sensor network and Internet of Things in precision agriculture. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 9(6). DOI: 10.14569/IJACSA.2018.090614.
○ Kim, D. J., Kim, J. H., Yun, E. J., Kang, D. G., & Ban, E. (2024). Farmstead-Specific Weather Risk Prediction Technique Based on High-Resolution Weather Grid Distribution. Atmosphere, 15(1), 116. DOI: 10.3390/atmos15010116.
○ Köksal, Ö., & Tekinerdogan, B. (2019). Architecture design approach for IoT-based farm management information systems. Precision Agriculture, 20, 926-958. DOI: 10.1007/s11119-018-09624-8.
○ Kruger, L. (2016). The timing of agricultural production in hazard-prone areas to prevent losses at peak-risk periods: A case of Malawi, Madagascar and Mozambique. Jàmbá: Journal of Disaster Risk Studies, 8(2). DOI: 10.4102/jamba.v8i2.179.
○ Lamaoui, M., Jemo, M., Datla, R., & Bekkaoui, F. (2018). Heat and Drought Stresses in Crops and Approaches for Their Mitigation. Frontiers in Chemistry, 6, 26. DOI: 10.3389/fchem.2018.00026.
○ Lamonaca, E., Maccarone, I., & Santeramo, F. G. (2026). Catastrophic weather events and (subsidised) crop insurance markets: Evidence from Italy. Bio-based and Applied Economics. DOI: 10.36253/bae-18389.
○ Lateef, L. O., Costa, H., & Cabral, P. (2025). Improved integrated framework for flooded crop damage and recovery assessment: A multi-source earth observation and participatory mapping in Hadejia, Nigeria. Journal of Environmental Management, 384, 125542. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.125542.
○ Lipiec, J., Doussan, C., Nosalewicz, A., & Kondracka, K. (2013). Effect of drought and heat stresses on plant growth and yield: a review. International Agrophysics, 27(4), 463-477. DOI: 10.2478/intag-2013-0017.
○ Mabhaudhi, T., Dirwai, T. L., Taguta, C., Senzanje, A., Abera, W., Govid, A., et al. (2025). Linking weather and climate information services (WCIS) to Climate-Smart Agriculture (CSA) practices. Climate Services, 37, 100529. DOI: 10.1016/j.cliser.2024.100529.

○ Martinuzzi, F., Mahecha, M. D., Camps-Valls, G., Montero, D., Williams, T., & Mora, K. (2024). Learning extreme vegetation response to climate drivers with recurrent neural networks. Nonlinear Processes in Geophysics, 31, 535-557. DOI: 10.5194/npg-31-535-2024.

○ Meuwissen, M. P. M., Feindt, P. H., Spiegel, A., Termeer, C. J. A. M., Mathijs, E., Mey, Y. D., et al. (2019). A framework to assess the resilience of farming systems. Agricultural Systems, 176, 102656. DOI: 10.1016/j.agsy.2019.102656.

○ Meyer, M. A. (2020). The role of resilience in food system studies in low- and middle-income countries. Global Food Security, 24, 100356. DOI: 10.1016/j.gfs.2020.100356.

○ Mowla, M. N., Mowla, N., Shah, A. F. M. S., Rabie, K. M., & Shongwe, T. (2023). Internet of Things and Wireless Sensor Networks for Smart Agriculture Applications: A Survey. IEEE Access, 11, 145813-145852. DOI: 10.1109/access.2023.3346299.

○ Müller, C., Ouédraogo, W. A., Schwarz, M., Barteit, S., & Sauerborn, R. (2023). The effects of climate change-induced flooding on harvest failure in Burkina Faso: case study. Frontiers in Public Health, 11, 1166913. DOI: 10.3389/fpubh.2023.1166913.

○ Newlands, N. K. (2018). Model-Based Forecasting of Agricultural Crop Disease Risk at the Regional Scale, Integrating Airborne Inoculum, Environmental, and Satellite-Based Monitoring Data. Frontiers in Environmental Science, 6, 63. DOI: 10.3389/fenvs.2018.00063.

○ Nguyen, T. T., Mushtaq, S., Kath, J., Nguyen-Huy, T., & Reymondin, L. (2025). Satellite-based data for agricultural index insurance: A systematic quantitative literature review. Natural Hazards and Earth System Sciences, 25, 913-927. DOI : 10.5194/nhess-25-913-2025

○ NOAA & NIDIS. (2025). Drought resilience pilot program 2024-2025.

○ Nocezo, Y.-I., Manyike, J. Z., Zhou, L., & Ngarava, S. (2024). The impact of access to climate services on smallholder farmers' cropping decisions and household food security in Elundini municipality, Eastern Cape province. Frontiers in Climate, 6, 1458999. DOI: 10.3389/fclim.2024.1458999.

○ Nyoni, R. S., Bruelle, G., Chikowo, R., & Andrieu, N. (2024). Targeting smallholder farmers for climate information services adoption in Africa: A systematic literature review. Climate Services, 34, 100450. DOI: 10.1016/j.cliser.2024.100450.

○ Palacios Játiva, P., Soto, I., Azurdia-Meza, C. A., Sánchez, I., Wang, R., & Kern, W. (2024). Hybrid Digital Twin Model for Greenhouse and Underground Environments. IEEE Access. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3402537.
○ Pathak, J., Subramanian, S., Harrington, P., Raja, S., Chattopadhyay, A., Mardani, M., et al. (2022). FourCastNet: A Global Data-driven High-resolution Weather Model using Adaptive Fourier Neural Operators. arXiv. DOI: 10.48550/arxiv.2202.11214.
○ Payero, J. O., Mirzakhani-Nafchi, A., Khalilian, A., Qiao, X., & Davis, R. (2017). Development of a Low-Cost Internet-of-Things (IoT) System for Monitoring Soil Water Potential Using Watermark 200SS Sensors. Advances in Internet of Things, 07(03), 71-86. DOI: 10.4236/ait.2017.73005.
○ Perry, E. D., Yu, J., & Tack, J. (2020). Using insurance data to quantify the multidimensional impacts of warming temperatures on yield risk. Nature Communications, 11, 4542. DOI: 10.1038/s41467-020-17707-2.
○ Portalés-Julià, E., Mateo-García, G., Purcell, C., & Gómez-Chova, L. (2023). Global flood extent segmentation using multi-spectral optical satellite images. Scientific Reports, 13, 20316. DOI: 10.1038/s41598-023-47595-7.
○ Price, I., Sanchez-Gonzalez, A., Alet, F., Andersson, T. R., El-Kadi, A., Masters, D., et al. (2025). Probabilistic weather forecasting with machine learning. Nature, 637(8044), 84-90. DOI: 10.1038/s41586-024-08252-9.
○ Qamer, F. M., Abbas, S., Ahmad, B., Hussain, A., Salman, A., Muhammad, S., et al. (2023). A framework for multi-sensor satellite data to evaluate crop production losses: the case study of 2022 Pakistan floods. Scientific Reports, 13(1), 4240. DOI: 10.1038/s41598-023-30347-y.
○ Qazi, S., Khawaja, B. A., & Farooq, Q. U. (2022). IoT-Equipped and AI-Enabled Next Generation Smart Agriculture: A Critical Review, Current Challenges and Future Trends. IEEE Access, 10, 21219-21235. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3152544.
○ Qin, X., Shi, Q., Wang, D., & Su, X. (2022). Inundation Impact on Croplands of 2020 Flood Event in Three Provinces of China. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 15, 3179-3193. DOI: 10.1109/JSTARS.2022.3161320.
○ Reichstein, M., Benson, V., Blunk, J., Camps-Valls, G., Creutzig, F., Fearnley, C. J., et al. (2025). Early warning of complex climate risk with integrated artificial intelligence.

Nature Communications, 16, 2564. DOI: 10.1038/s41467-025-57640-w.

○ Rodrigues, E. R., Oliveira, I., Cunha, R. L. F., & Netto, M. A. S. (2018). DeepDownscale: A Deep Learning Strategy for High-Resolution Weather Forecast. 2018 IEEE 14th International Conference on e-Science (e-Science), 415-422. DOI: 10.1109/escience.2018.00130.

○ Salvia, M. M., Sánchez, N., Piles, M., Ruscica, R. C., González-Zamora, Á., Roitberg, E., et al. (2021). The Added-Value of Remotely-Sensed Soil Moisture Data for Agricultural Drought Detection in Argentina. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 14, 6487-6500. DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3084849.

○ Sawada, Y., Koike, T., Ikoma, E., & Kitsuregawa, M. (2019). Monitoring and Predicting Agricultural Droughts for a Water-Limited Subcontinental Region by Integrating a Land Surface Model and Microwave Remote Sensing. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 58(1), 14-33. DOI: 10.1109/tgrs.2019.2927342.

○ Scher, S., & Messori, G. (2019). Weather and climate forecasting with neural networks: using general circulation models (GCMs) with different complexity as a study ground. Geoscientific Model Development, 12(7), 2797-2809. DOI: 10.5194/gmd-12-2797-2019.

○ Shamshiri, R. R., Kalantari, F., Ting, K. C., Thorp, K. R., Hameed, I. A., Weltzien, C., et al. (2018). Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 11(1), 1-22. DOI: 10.25165/j.ijabe.20181101.3210.

○ Shi, X., Chen, Z., Wang, H., Yeung, D. Y., Wong, W. K., & Woo, W. C. (2015). Convolutional LSTM Network: A Machine Learning Approach for Precipitation Nowcasting. arXiv. DOI: 10.48550/arxiv.1506.04214.

○ Shim, K. M., Kim, Y. S., Jung, M. P., Choi, I. T., Kim, H., & Kang, K. K. (2017). Implementation of Agrometeorological Early Warning System for Weather Risk Management in South Korea. Journal of Climate Change Research, 8(2), 171-175. DOI: 10.15531/KSCCR.2017.8.2.171.

○ Slob, N., & Hurst, W. (2022). Digital Twins and Industry 4.0 Technologies for Agricultural Greenhouses. Smart Cities, 5, 1179-1192. DOI: 10.3390/smartcities5030059.

○ Slob, N., Hurst, W., van de Zedde, R., & Tekinerdogan, B. (2023). Virtual reality-based digital twins for greenhouses: A focus on human interaction. Computers and Electronics in Agriculture, 208, 107815. DOI: 10.1016/j.compag.2023.107815.
○ Soares, P. M. M., Johannsen, F., Lima, D. C. A., Lemos, G., Bento, V. A., & Bushenkova, A. (2024). High-resolution downscaling of CMIP6 Earth system and global climate models using deep learning for Iberia. Geoscientific Model Development, 17, 229-259. DOI: 10.5194/gmd-17-229-2024.
○ Subahi, A. F., & Bouazza, K. E. (2020). An Intelligent IoT-Based System Design for Controlling and Monitoring Greenhouse Temperature. IEEE Access, 8, 125488-125500. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3007955.
○ S ø nderby, C. K., Espeholt, L., Heek, J., Dehghani, M., Oliver, A., Salimans, T., et al. (2020). MetNet: A Neural Weather Model for Precipitation Forecasting. arXiv. DOI: 10.48550/arXiv.2003.12140.
○ Urruty, N., Tailliez-Lefebvre, D., & Huyghe, C. (2016). Stability, robustness, vulnerability and resilience of agricultural systems. A review. Agronomy for Sustainable Development, 36(1), 15. DOI: 10.1007/s13593-015-0347-5.
○ Van Apeldoorn, D. F., Kok, K., Sonneveld, M. P. W., & Veldkamp, T. A. (2011). Panarchy Rules: Rethinking Resilience of Agroecosystems, Evidence from Dutch Dairy-Farming. Ecology and Society, 16(1), 39. DOI: 10.5751/ES-03951-160139.
○ Verdouw, C., Tekinerdogan, B., Beulens, A., & Wolfert, S. (2021). Digital twins in smart farming. Agricultural Systems, 189, 103046. DOI: 10.1016/j.agsy.2020.103046.
○ Villa-Henriksen, A., Edwards, G. T. C., Pesonen, L. A., Green, O., & S ø rensen, C. A. G. (2020). Internet of Things in arable farming: Implementation, applications, challenges and potential. Biosystems Engineering, 191, 60-84. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2019.12.013.
○ Vreugdenhil, M., Greimeister-Pfeil, I., Preimesberger, W., Camici, S., Dorigo, W., Enenkel, M., et al. (2022). Microwave remote sensing for agricultural drought monitoring: Recent developments and challenges. Frontiers in Water, 4, 1045451. DOI: 10.3389/frwa.2022.1045451.
○ Weersink, A., Fraser, E., Pannell, D., Duncan, E., & Rotz, S. (2018). Opportunities and Challenges for Big Data in Agricultural and Environmental Analysis. Annual Review of Resource Economics, 10(1), 19-37. DOI: 10.1146/annurev-resource-100516-

053654.

○ Weyn, J. A., Durran, D. R., Caruana, R., & Cresswell-Clay, N. (2021). Sub-seasonal forecasting with a large ensemble of deep-learning weather prediction models. arXiv. DOI: 10.48550/arXiv.2102.05107.

○ World Meteorological Organization (WMO). (2025). Early Warnings for All in focus: Hazard monitoring and forecasting(WMO-No. 1381). Geneva: WMO. ISBN 978-92-63-11381-8.

○ Yoo, B. H., Kim, K. S., Park, J. Y., Moon, K. H., Ahn, J. J., & Fleisher, D. H. (2022). Spatial portability of random forest models to estimate site-specific air temperature for prediction of emergence dates of the Asian corn borer in North Korea. Computers and Electronics in Agriculture, 199, 107113. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107113.

○ Zhao, X., Wang, W., Wen, L., Chen, Z., Wu, S., Zhou, K., et al. (2023). Digital twins in smart farming: An autoware-based simulator for autonomous agricultural vehicles. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 16(4), 184-189. DOI: 10.25165/j.ijabe.20231604.8039.

○ Zougmoré, R. B., Partey, S. T., Ouédraogo, M., Torquebiau, E., & Campbell, B. M. (2018). Facing climate variability in sub-Saharan Africa: analysis of climate-smart agriculture opportunities to manage climate-related risks. Cahiers Agricultures, 27(3), 34001. DOI: 10.1051/cagri/2018019.

8. 정밀 병해충 관리 분야

기후변화 대응형 K-그린방제 기술 혁신과 정밀 병해충 관리 기술

손호경(한국식물병리학회, 서울대학교) / **김광형**(한국식물병리학회, 서울대학교)

Ⅰ. 서론

1 기술분야 개요

○ 정밀 병해충 관리(Precision Pest Management)의 정의와 패러다임 전환

– 정밀 병해충 관리는 병해충 위험을 조기에 파악하고, 필요한 장소, 시점, 대상에 적정한 방제수단과 용량을 적용한 뒤 현장 결과를 다음 예찰과 처방에 반영하는 데이터 기반 작물보호 체계임. AI, 센서, 원격탐사, 분자진단과 새로운 방제소재는 이러한 의사결정을 지원하는 수단으로 활용됨.

– 곧 정밀 병해충 관리의 핵심은 특정 장비나 단일 농약이 아니라 예측, 진단, 소재선정, 정밀 살포, 효과검증, 등록자료 축적이 하나의 순환체계로 작동하는 데 있음.

– 정밀 병해충 관리는 기존 통합병해충관리(IPM)의 생태 · 경제적 원칙을 유지하면서, 현장 데이터를 실시간으로 활용하고 첨단 바이오소재와 자동화 장비를 연결하여 실행의 공간 · 시간 · 표적 정밀도를 높이는 발전 단계로 이해해야 함.



그림 1. 정밀 병해충 관리의 전주기 운영구조

1.1 기술의 범위와 기존 방제체계와의 차별성

○ 정밀 병해충 관리는 병징 영상분류, 드론 살포 또는 생물농약 개발과 같은 개별 기술을 포괄하지만, 개별 기술만으로는 충분하지 않으며 위험정보와 방제 의사결정, 현장성과 환류가 연결되어야 함.

– 관행적 화학방제는 신속성과 표준화된 사용법이 장점이나 정기 · 일괄 살포에 따른 과잉투입과 저항성 · 잔류 · 환경부하의 문제가 누적될 수 있음.

구분	관행적 화학방제	통합병해충관리(IPM)	정밀 병해충 관리
의사결정	• 경험·관행 중심	• 관측과 과거수준과 다수 방제수단을 종합	• 실시간 위험·발생예측에 기반한 처방
공간·시간 단위	• 포장 전체·정기 살포	• 포장·발생단계 중심	• 먼지·지역·시점·표적별
방제수단	• 화학농약 중심	• 화학·생물·재배 관리	• AI·센서·복합제형·SIGS·자동살포
성과평가	• 방제 직후 효능	• 피해·유지량·경제 영향	• 효능·위해도·비용·탄소·수출기준
데이터 활용	• 제한적	• 조사자료 중심	• 현장 관측과 모델·처방·정책으로 순환 학습

그림 2. 관행방제 · IPM · 정밀 병해충 관리의 차이

– IPM은 경제적 피해수준과 생물적 · 재배적 · 화학적 수단의 조합을 강조하며, 정밀 관리는 여기에 센서 · AI · 분자진단 · 첨단 제형을 결합하여 필지 · 지점 · 시점별 실행력을 강화함.
– 따라서 정책 목표도 단순 농약량 감소보다 피해와 생산성, 위해도, 비표적 영향, 비용, 수출 기준을 함께 평가하는 다차원 성과체계로 전환할 필요가 있음.

1.2 정밀 병해충 관리가 필요한 복합 압력

○ 기술 도입을 요구하는 국제적 압력의 심화
– 기후변화와 글로벌 교역 확대로 병해충의 발생 시기 · 분포 · 월동 범위가 급변하고 외래 · 돌발 병해충 유입이 증가하는 가운데, 화학농약에 대한 글로벌 규제 강화와 농약 저항성 확산이 복합적으로 심화되면서 기존 화학농약 중심 방제체계의 구조적 전환을 요구하는 국제적 압력이 전례 없이 높아지고 있음.
– EU는 2020년 Farm to Fork 전략을 통해 2030년까지 화학농약의 사용과 위험을 50% 줄이는 정책목표를 제시하였고, 실제로 최근 EU 지표에서는 2023년 화학농약 사용 · 위험이 기준기간 대비 크게 감소한 것으로 나타남(https://food.ec.europa.eu). 또한 수출 농산물의 잔류허용기준 강화와 농촌 인력 고령화가 동시에 작동하면서 데이터 · 생명공학 기반 정밀 방제 기술의 도입은 필수 과제로 부상하고 있음(European Commission, 2020).

○ 4대 핵심 기술군의 구성과 순환적 연계 구조
– 본 분야는 ① AI · 빅데이터 기반 병해충 예측 · 진단, ② 화학–생물 융합 정밀 방제, ③ 살포형 유전자침묵(SIGS) 기반 분자표적 방제, ④ 휘발성 바이오마커(VOC) 기반 조기선별의 4대 기술축으로 구성됨. AI는 병해충 위험을 예측하고 방제 의사결정을 지원하며, 화학–생물 융합과 SIGS는 방제수단을, VOC는 병징 전 이상징후 선별을 담당하며, 4대 기술은 현장확인과 방제성과 환류를 통해 연결됨.
– 4대 기술은 'AI 기반 예측 · 진단을 중심으로 방제소재 제공과 현장 적용 · 성과 환류가 순환적으로 연결되는' 통합 의사결정 플랫폼 안에서 상호 보완적으로 기능함. 이를 통해 기술개발부터 현장 적용, 효과검증 및 등록 · 규제 대응까지 전주기 관리가 가능해짐.

○ One Health 기반 지속가능 방제 패러다임과 산업적 파급효과
– 이 체계는 농업 생산성 유지와 환경 · 인체 건강 보호를 동시에 달성하는 One Health 기반 지속가능 방제 패러다임의 핵심을 이룸.
– 또한 친환경 농자재, 디지털 예찰 · 진단, 정밀살포, 시험 · 등록 서비스의 연계를 촉진할 수 있음. 국내 현장 실증과 등록자료를 확보할 경우 관련 농자재와 서비스의 해외 적용 가능성도 높아질 것으로 전망됨.



그림 3. 방제 패러다임 전환을 요구하는 농업환경 변화

2 기술 도입 배경

2.1 농업환경 변화

○ 기후변화에 따른 병해충 발생 패턴의 구조적 변화

– 기온과 강수 패턴의 변화는 병원체의 생존 · 전염, 매개체의 활동과 작물의 감수성에 영향을 주어 병해충의 발생시기와 위험지역을 변화시킬 수 있음. 따라서 과거 발생자료뿐 아니라 기상 · 작물생육 · 재배환경 자료를 함께 활용하는 지역별 예측체계가 필요함(Delfani et al., 2024; Madden, 2025).

– 기후변화와 국제교역 확대는 병해충의 발생시기 · 분포 · 정착 가능성을 변화시키며, 기존에 문제가 되지 않던 지역에서도 새로운 발생위험을 높일 수 있음. 다만 영향의 방향과 크기는 병원체 · 작물 · 지역에 따라 다르므로, 기상 · 작물생육 · 예찰자료를 결합한 병해충별 평가와 장기 현장자료가 필요함(Singh et al., 2023; Méndez et al., 2026).

○ One Health 관점의 통합 관리 필요성 증대

– 병해충 문제는 작물 생산성 저하를 넘어 인체 · 축산 · 환경의 건강에까지 연쇄적으로 영향을 미치는 One Health 차원의 복합 위해요인임. FAO · UNEP · WHO · WOAH는 One Health Joint Plan of Action(2022–2026)을 통해 기후변화로 인한 병해충 확산 및 농약 저항성 증가에 대응하는 글로벌 협력체계를 구축하고 있으며, 농업 분야에서도 인체 · 환경 위해성까지 통합하는 방제 전략 도입 필요성이 크게 확대되고 있음(FAO et al., 2022).

○ 글로벌 농약 규제 강화 및 친환경 전환 압력

– EU는 2020년 Farm to Fork 전략을 통해 농약 사용 · 위험 저감 목표를 제시하였음. 또한 Directive 2009/128/EC에 따른 IPM과 지속가능한 농약 사용 원칙을 유지하고 있음(European Commission, 2020, 2024). 미국 EPA는 생물농약을 별도 범주로 심사하고 있

으며, 2023년 살포형 dsRNA 성분 Ledprona를 등록하여 RNA 기반 방제제의 실제 등록 선례를 제시함(U.S. EPA, 2023).

○ 농촌 인력 감소 · 고령화에 따른 디지털 전환 수요

– 농촌 인구의 급속한 고령화로 현장 예찰 인력이 지속적으로 감소하고 있으며, AI · 딥러닝 기반 병해충 탐지 기술이 인력 부족 환경에서의 정밀 방제를 실현하는 핵심 솔루션으로 부상하고 있음(Shoaib et al., 2025).

2.2 기술의 필요성 및 기대효과

○ 기존 방제체계의 구조적 한계

– 경험적 예찰은 숙련 인력 의존도가 높아 광역 · 실시간 대응에 한계가 있으며, 화학농약 일변도의 방제는 저항성 발생 · 환경오염 · 잔류농약 문제를 야기함. 병해충 관련 자료는 농업 · 검역 · 산림 등 기관별 목적에 따라 수집되고 있어 조사대상, 단위, 주기와 분류체계가 서로 다름. 따라서 국가농작물병해충관리시스템(NCPMS)을 중심으로 공통 코드와 메타데이터를 마련하고, 기관별 자료를 단계적으로 연계할 필요가 있음.

○ 정밀 병해충 관리 기술의 기대 효과

– AI 기반 예측기술은 병해충의 발생확률, 예상 발생 시기 및 고위험 지역을 산출할 수 있음. 이러한 정보는 현장조사의 우선순위를 정하고 예찰 · 방제 의사결정을 지원하는 데 활용될 수 있음. 다만 피해와 방제비 절감효과는 작물 · 지역 · 연도와 운영조건에 따라 달라질 수 있으므로 다지역 · 다년 현장 실증을 통해 검증해야 함.

– 화학–생물 융합 제형과 SIGS는 기존 방제수단을 보완하고 약제 사용량과 저항성 관리에 기여할 가능성이 있음. 다만 효능과 위해성은 성분 조합, 제형, 처리조건과 표적생물에 따라 달라질 수 있으므로 제품별 현장 실증과 안전성 평가가 필요함(Hamrouni et al., 2025; OECD, 2020, 2023).

– VOC 기반 조기탐지는 병징 발현 이전 또는 초기 단계에서 나타날 수 있는 휘발성 패턴 변화를 선별하여 현장조사와 정밀진단의 우선순위를 제시하고, 적기 방제를 지원할 가능성이 있음. 다만 VOC 패턴은 환경조건과 비생물적 스트레스의 영향도 받으므로 영상 · 분자진단과 함께 활용해야 함(Gan et al., 2023).

변화 요인	현황 및 문제점	정밀 방제 기술 대응
기후변화·이상기후	• 병해충 발생 주기·분포 급변 • 신규 병해 출현 가속화	• AI 발생 예측모델 • 실시간 조기경보 서비스
외래·돌발 병해충 유입	• 국제 교역 확대로 유입 증가 • 급속 확산으로 피해 대형화	• 통합 컨트롤센터 • 검역 연계 방제체계
농약 저항성 확산	• 기존 화학농약 효과 감소 • 저항성 균주 확산 가속화	• 다중 작용기작 복합제형 • SIGS 분자표적 방제
글로벌 농약 규제 강화	• EU Farm to Fork 50% 감축 목표 • 수출 잔류기준 강화 추세	• 생물농약·친환경 복합제형 • VOC 조기예측·최적 방제
농촌 인력 감소·고령화	• 현장 예찰 인력 부족 • 방제 작업 효율 저하	• AI·디지털 자동화 예찰 • 스마트 방제 의사결정

그림 4. 농업 환경 변화에 따른 정밀 병해충 관리 기술 수요

Ⅱ. 기술 분야 구조 및 범위

1 기술 분야 정의

○ 정밀 병해충 관리 기술은 AI · 빅데이터 · 센서 · 원격탐사 · 분자생물학 등 첨단 기술을 융합하여 병해충의 발생 예측, 정밀 진단, 최적 방제 의사결정, 친환경 방제소재 개발 및 현장 적용을 포괄하는 디지털 기반 스마트 방제 기술 체계로 정의됨.

○ 단순한 화학농약 대체를 넘어 데이터 기반 예측–진단–방제의 통합 순환 체계를 구축하여 농업 생산성과 환경 건강성을 동시에 추구하는 지속가능 농업 방제의 핵심 패러다임임. AI와 기계학습은 병해충 탐지와 발생예측을 지원할 수 있으나, 실제 활용성은 학습데이터의 대표성, 지역 · 연도 간 외부검증, 예측 불확실성과 현장 확인절차에 의해 결정됨(Murphy et al., 2024; Madden, 2025).

○ K–그린방제 기술 전략의 핵심 축으로서, 병해 예측 · 병인 규명 · 표적 제어 · 제제화 기술 · 등록 체계를 통합하는 기술 생태계를 지향함.

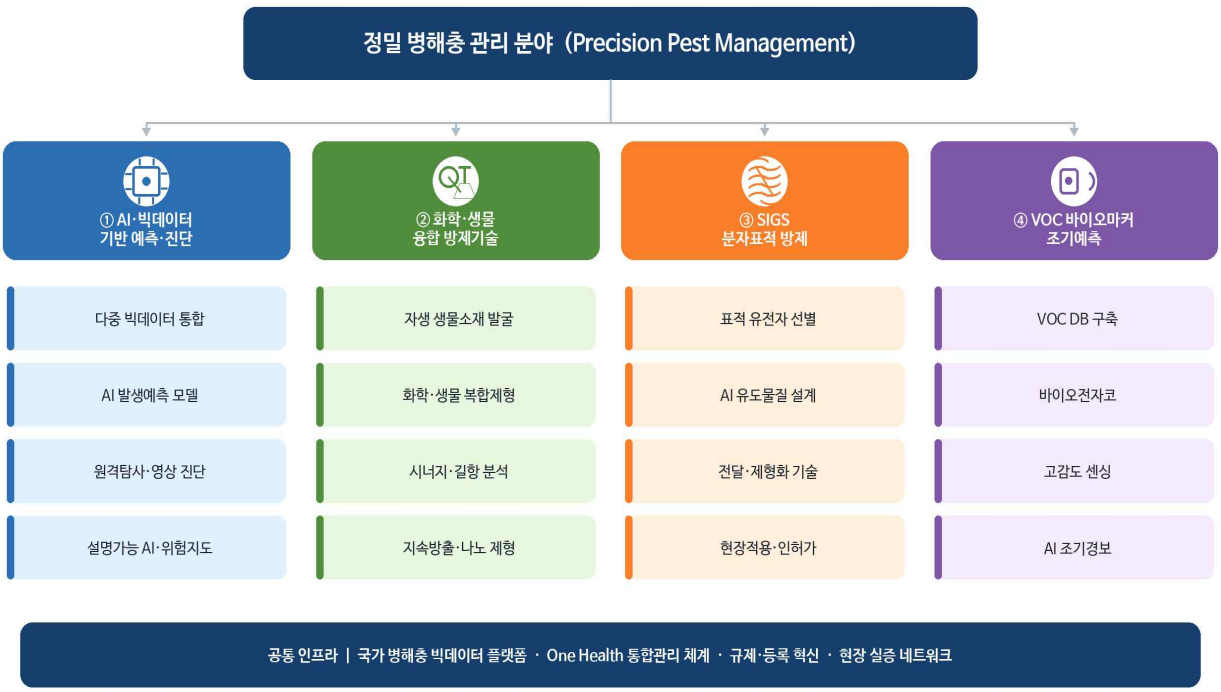


그림 5. 정밀 병해충 관리 분야 4대 핵심기술 구성 체계도

2 주요 구성 기술

2.1 AI · 빅데이터 기반 병해충 예측 · 탐지 및 진단 지원 기술

○ 기상 · 작물생육 · 병해충 발생조사 · 영상 · 원격탐사 · 토양 · 재배관리 등 다중 농업 빅데이터를 AI 기반으로 통합 분석하여, 돌발 병해충의 발생 가능성 · 시기 · 확산 경로 및 피해 수준을 사전에 예측하는 디지털 정밀 병해충 예측기술임.

○ 병해충의 발생 특성과 자료 축적 수준에 따라 예측방식을 구분할 필요가 있음. 반복적으로 발생하여 충분한 자료가 축적된 병해충에는 과거 발생 · 기상 · 작물생육 자료를 이용한 발생확률 및 시기 예측을 적용할 수 있음. 반면 희귀 · 외래 · 신규 병해충은 정상 범위를 벗어난 영상, 포획량 또는 생육 패턴을 탐지하고 전문가 판독과 현장조사를 결합하는 방식이 적절함.

○ 기상 · 예찰 · 영상 · 토양 · 작물생육 자료를 활용한 통계 · 기계학습 모델은 병해충의 발생확률, 예상 발생시기와 위험지역을 산출하는 데 활용됨. 설명가능 AI는 예측에 영향을 미친 영상 영역과 환경요인을 제시하여 전문가 검토와 사용자의 이해를 지원함. 다만 설명가능성이 예측의 정확성과 인과성을 보장하지는 않으므로 독립적인 현장검증이 병행되어야 함(Shoaib et al., 2025).

○ 운영형 AI로의 전환 조건

– 학습데이터의 출처 · 품질 · 변경 이력을 체계적으로 관리하고, 모델별 적용 지역 · 작물 · 병해충과 데이터 갱신주기를 명시하는 AI 모델 운영관리 체계를 국가 예찰업무에 맞게 구축해야 함.

– 고위험 경보가 발생하면 현장 관찰, 분자진단 및 전문가 판정을 통해 실제 발생 여부를 확인해야 함. 이후 처방과 방제 결과를 기록하여 오경보 · 미탐의 원인을 분석하고 데이터, 모델과 경보기준을 지속적으로 개선해야 함.

○ 주요 요소기술:

– 병해충 다중 빅데이터 통합 기술: 기상 · 토양 · 작물생육 · 영상 · 원격탐사 등 이종데이터 통합, 공공 예찰자료 · 민간 농업데이터 · 농가 신고자료의 표준화와 품질관리, 시 · 공간 단위가 서로 다른 자료의 정합화

– AI 기반 발생예측 및 원격탐지: 통계모델과 기계학습 모델의 비교 · 결합; 위성 · UAV · RGB · 다중분광 기반 이상징후 조기탐지; 스마트트랩 이미지 기반 밀도 · 병징 AI 자동 판별

– 설명가능 AI · 위험지도 · 의사결정 지원 서비스화: 시군 · 필지 단위 발생위험 지도화; 예측 불확실성 정량화 및 경보등급 산출; 모바일 · 웹 기반 경보 전달체계

○ AI 기반 돌발 병해충 예측 시스템의 운영체계

– 기상 · 예찰 · 작물생육 · 토양 · 원격탐사 · 스마트트랩 · 검역 · 농가 신고자료를 표준화하여 통합하고, AI 모델이 병해충의 발생확률, 예상 발생시기, 공간적 확산 가능성, 피해수준 및 예측 불확실성을 산출함.

– 분석 결과는 국가 · 시군 · 필지 단위 위험지도와 단계별 경보로 제공하며, 경보 수준에 따라 통상 관찰, 예찰밀도 확대, 현장 표본채취와 정밀진단, 공동방제 준비 및 방제 실행으로 이어지는 표준 행동절차를 적용함.

– 방제 후 발생량, 피해, 수량, 약제 사용량과 오경보 · 미탐 결과를 NCPMS에 다시 축적하여 모델과 처방기준을 지속적으로 개선하는 순환학습 체계로 운영함.

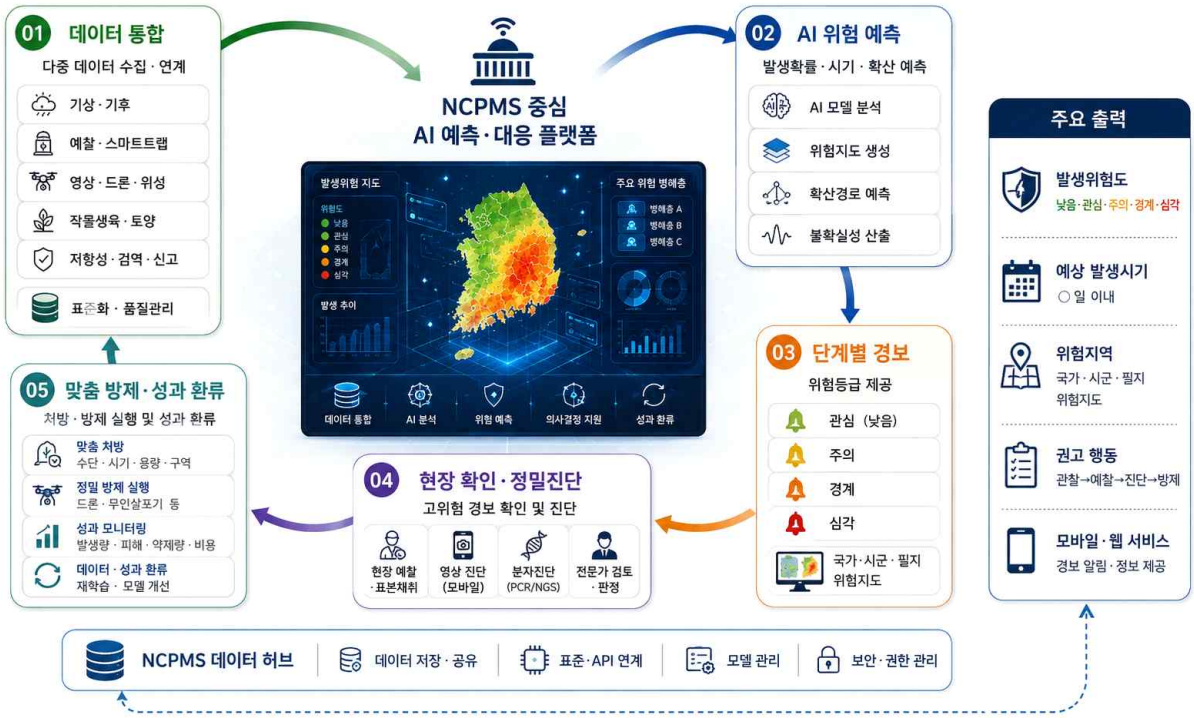


그림 6. NCPMS 중심 AI 기반 돌발 병해충 예측 · 대응 운영체계

2.2 화학–생물 융합 정밀 방제기술

○ 화학농약과 미생물 · 식물유래물질 · 생화학적 소재를 단일 제형, 탱크믹스, 또는 순차처리 방식으로 조합하는 기술임. 조합효과는 성분의 작용기작뿐 아니라 처리순서, 용매, pH, 환경조건에 따라 상승 · 상가 · 길항으로 달라질 수 있음. 따라서 후보조합은 방제효과만 비교할 것이 아니라 저장 중 활성유지, 약해, 혼용성, 살포장비 적합성, 생산원가와 살포횟수 감소효과를 포함한 제품 단위로 평가해야 함(Galli et al., 2024; Folorunso et al., 2024;

Hamrouni et al., 2025).

○ 단, 미생물의 생존성이 화학성분에 의해 저하되는 경우에는 단일 복합제형보다 분리포장이나 순차처리가 적합함. 반대로 성분 간 안정성이 확보되고 농가의 혼용 오류 가능성이 큰 경우에는 공동제형이 유리함. 따라서 연구목표를 일률적으로 '복합제형 개발'로 설정하기보다는 조합별 최적 사용방식을 결정하는 방향성이 더욱 실용적일 것임.

○ 글로벌 농화학 기업은 생물학적 방제소재의 포트폴리오를 확대하고 기존 화학농약과 연계한 프로그램형 방제를 개발하는 추세임. 다만 생물농약 · 생화학제 · 미생물제제 · 생물자극제의 포함 범위가 조사기관마다 다르므로 구체적인 시장규모보다 제품 포트폴리오, 현장 실증과 서비스 확대 추세를 중심으로 제시하는 것이 적절함.

○ 제품화 관점의 필수 조건

– 시장 진입을 위해서는 방제효과뿐 아니라 저장 안정성, 유통기한, 생산원가, 살포장비 적합성, 혼용성, 사용 편의성과 기존 유통채널을 초기 연구단계부터 제품 요구조건에 포함해야 함.

– 미생물 · 식물유래물질 외에도 단백질 · 펩타이드 · 효소와 합성생물학 기반 소재를 후보군으로 확대하되, 생물자극제는 직접 방제제와 기능, 효능표현, 등록체계가 다르므로 인접기술로 구분하여 연계해야 함.

○ 주요 요소기술: 자생 생물유래 방제소재 발굴 및 고속 스크리닝 기반 기능성 라이브러리 구축; 전사체 · 단백질체 기반 병원체 억제기작 분석; 화학–생물 복합 시너지 · 길항 효과 정량분석; 나노포뮬레이션 · 지속방출형 차세대 제형기술 개발

2.3 살포형 유전자침묵(SIGS) 기반 정밀 병해충 관리 기술

○ 이중가닥 RNA(dsRNA) 등을 작물 표면에 처리하여 표적 병해충의 특정 유전자 발현을 억제하는 분자표적 방제기술임. 서열에 기반한 선택성이 장점이 될 수 있으나, 표적생물의 RNAi 감수성, 비표적 생물과의 서열유사성, 제형과 노출조건에 따라 효능과 위해성이 달라질 수 있음(Chen et al., 2025; OECD, 2020, 2023).

– 따라서 표적서열의 비표적 유사성, dsRNA와 전달체의 환경거동, 비표적 생물 영향, 제조품질 및 현장 지속성을 완제품 단위로 검증해야 함(Chen et al., 2025; Mannaa et al., 2026).

○ 실용화 성패를 좌우하는 전달 · 현장 조건

– 병원균 · 곤충 · 선충별 RNAi 유입경로와 세포 내 가공효율이 다르므로 동일한 dsRNA 농도와 제형을 일률 적용하기보다 표적생물별 전달장벽과 작용시간을 반영해야 함.

– 강우 · 자외선 · 잎 표면 · 생육단계에 따른 잔존성과 방제효과의 시간차를 검증하고, 복수 표적 · 교대사용 · 감수성 모니터링을 포함한 저항성 관리전략을 함께 설계해야 함.

○ 주요 요소기술:

– 병해충 표적 유전자 선별 · 매칭 기술: 병해충의 생물학적 취약점을 고려한 표적 유전자 선별 및 공공 데이터베이스 구축

– 생물정보학 · 서열분석 기반 표적 dsRNA 설계: 표적 유전자의 보존성, 유효구간과 비표적 생물과의 서열유사성을 분석하고, 축적된 실험자료가 있는 경우 기계학습을 보조적으로 활용

– 병해충 맞춤형 전달 · 제형화 기술: 나노소재(LDH 클레이, 지질나노입자 등) 기반 dsRNA 안정성 · 부착성 · 세포 내 전달 효율 향상; sLDH 나노시트와 복합화한 dsRNA는 무담체 dsRNA보다 잿빛곰팡이병 억제효과가 더 오래 유지된 것으로 보고되었음(Spada et al., 2025). 다만 나노전달체는 소재별 환경거동과 비표적 영향을 별도로 평가해야 함(Xi et al., 2025).

– 현장 적용 표준화 및 인허가 대응: 저비용 대량합성 · 제형화 공정 표준화; 전용 등록평가기준 확립 및 K-그린방제 규제혁신



그림 7. 살포형 유전자침묵(SIGS) 기반 정밀 병해충 관리 기술

2.4 휘발성 바이오마커(VOC) 기반 병해충 조기예측 기술

○ VOC 센서는 병원체 감염이나 해충 가해 과정에서 나타나는 휘발성 패턴 변화를 비파괴적으로 탐지하여 현장조사와 정밀진단의 우선순위를 제시하는 조기 선별기술임.

– VOC 패턴은 품종, 생육단계, 온습도, 토양과 비생물적 스트레스의 영향을 함께 받으므로 단일 물질보다 복수 VOC 패턴과 환경정보를 결합하고, 영상 · 분자진단으로 확인하는 방식이 적절함(Gan et al., 2023; Lee et al., 2024).

○ 현장 재현성과 표준화

– 온도 · 습도 · 광 · 토양 · 비료 · 품종 및 주변 휘발성 물질의 영향을 보정하고 센서 드리프트를 관리하기 위한 표준시료, 포집조건, 교정주기와 품질관리 절차가 필요함.

– VOC는 단독 확진수단보다 병징 전 선별경보로 활용하고, 영상, 분자진단, 예찰조사와 결합하여 민감도와 특이도를 단계적으로 확보하는 것이 현실적임.
– 해충 가해에 따른 VOC도 단일 화합물보다 여러 성분의 상대적 패턴으로 분석하는 것이 적절하며, 학습에 포함되지 않은 작물·재배지와 환경조건에서 성능을 별도로 검증해야 함 (Vermeeren et al., 2025).

○ 주요 요소기술: 병해충 유래 VOC 및 작물–병해충 상호작용 VOC 발굴·데이터베이스 구축; 생체수용체 기반 다채널 바이오전자코 플랫폼; SERS(표면증강 라만 분광법) 기반 VOC 포집·분석기술과 현장형 센서의 환경보정; VOC 다성분 패턴 분석과 단계별 경보기준 개발

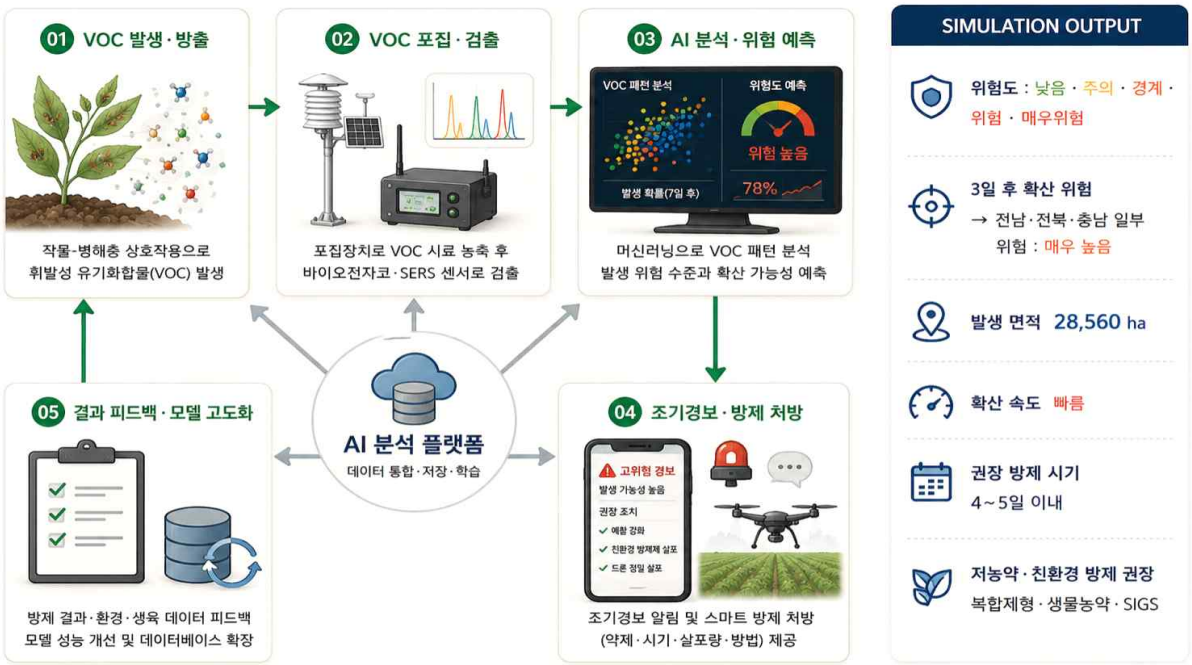


그림 8. 휘발성 바이오마커(VOC) 기반 병해충 조기예측 기술

3 적용분야 및 활용 영역

○ 작물 유형별 적용
– 벼·밀·콩 등 식량작물은 광역 예찰자료, 위성·드론 영상과 기상자료를 결합한 발생위험 지도 및 공동방제 의사결정에 우선 적용할 수 있음.
– 채소·과수·화훼 등 원예작물은 시설환경의 센서 데이터와 VOC 조기탐지, AI 영상진단, 복합제형을 연계하여 병징 발현 전 대응과 수출 농산물의 잔류농약 저감에 활용할 수 있음.
– 특용·수출 고부가가치 작물은 친환경 방제의 비용편익이 비교적 명확하므로 SIGS·바이오전자코·신규 복합제형의 제한적 실증과 초기 시장 검증에 적합함.

○ 농업 생산 전주기 활용

– 재배 전에는 기후 시나리오와 지역별 병해충 이력으로 발생 잠재력을 분석하여 작부체계 · 저항성 품종 · 예방 전략을 설계함.

– 생육 중에는 NCPMS 등 공공 예찰정보, 스마트트랩, 기상 · 토양 · 영상 · VOC 센서를 통합하여 발생위험을 확률적으로 제시하고 현장 관찰과 분자진단으로 확인함.

– 방제 단계에서는 작물 · 병해충 · 발생량 · 약제저항성 · 기상조건에 맞추어 복합제형, SIGS, 생물농약 및 화학농약을 선택하고 드론 · 스마트팜 장비로 정밀 살포함.

– 수확 후에는 잔류농약 · 병원체 오염 · 저장병 발생을 추적하여 유통 · 수출 기준 대응과 검역 · 품질관리로 적용 범위를 확장함.



그림 9. 농업 생산 전주기별 정밀 병해충 관리 기술의 활용

○ 수요자 및 운영주체별 활용

– 농업인은 모바일 경보와 처방 서비스를 통해 방제 여부, 시기, 약제, 살포량을 결정하고, 지도 · 방제기관은 지역 단위 위험지도와 공동방제 계획에 활용함.

– 농자재 기업은 소재 발굴, 제형 최적화, 혼용성 · 저장성 평가, 등록자료 생산과 사후 성과자료를 통합하여 제품개발 기간과 실패위험을 줄일 수 있음.

– 정책 · 검역기관은 예찰–검역–저항성–기후 데이터를 연계하여 외래 · 돌발 병해충 상시감시, 방제자원 배분, 수입 · 수출 위험관리 및 정책평가에 활용함.

○ 서비스형 방제와 초기 적용시장

– 데이터 구독, 위험지도 · 처방 서비스, 센서 임대, 계약방제, 등록자료 생산과 수출 규제지원이 결합된 서비스형 비즈니스 모델로 확장될 수 있음.

– 단기에는 환경제어와 데이터 수집이 용이하고 저농약 프리미엄이 큰 시설원예 · 수출작물 · 고부가가치 작물에서 실증한 뒤, 광역 식량작물과 노지작물로 확장하는 단계적 전략이 적절함.

Ⅲ. 기술 발전 동향 및 전망

1 국내외 기술 발전 동향

1.1 국외 기술 발전 동향

○ AI · 멀티모달 기반 예측 · 진단의 고도화

– 딥러닝 기반 영상분석은 병징과 해충의 종류, 위치 및 피해 범위를 탐지하는 데 활용되고 있음. 최근에는 영상에 기상 · 센서 · 재배이력을 결합하여 현재 상태의 판별을 넘어 향후 발생 위험을 예측하려는 멀티모달 연구가 확대되고 있음. 연구의 초점도 단일 데이터셋의 정확도보다 학습자료의 대표성, 지역 · 연도 · 품종 간 외부검증, 예측 불확실성과 실제 현장 적용성으로 이동하고 있음(Delfani et al., 2024; Murphy et al., 2024; Madden, 2025; Shoaib et al., 2025).

– 설명가능 AI와 예측 불확실성을 함께 제시하여 경보의 근거와 신뢰도를 확인하고, 고위험 경보는 현장 관찰 · 분자진단 · 전문가 판정으로 확인하는 절차가 필요함. AI는 조사와 방제의 우선순위를 제시하되, 최종 방제 여부는 현장 확인을 거쳐 결정하는 인간 개입형 의사결정 체계가 중요해지고 있음.

○ 경쟁의 초점은 개별 기술에서 통합 운영으로 이동

– 글로벌 경쟁력은 최고 정확도의 단일 모델이나 신규 소재 한 건보다 데이터 확보–모델 갱신–제형 · 생산–현장 실증–등록자료–살포장비–서비스를 하나의 체계로 반복 운영할 수 있는 플랫폼 역량에서 결정되는 방향으로 이동하고 있음.

– AI 기업은 위험지도와 처방 서비스를, 농자재 기업은 종자, 화학농약, 생물농약, 디지털 처방을 결합한 프로그램형 솔루션을 확대하고 있음. 실제 사용 시점 · 위치 · 살포량과 방제결과를 축적하는 성과 데이터가 제품 개선과 등록 갱신의 핵심 자산으로 부상함.

– 국제 시험법, 데이터 형식, 센서 교정, 비표적 생물 평가와 등록 가이드라인을 선점하면 복수 국가에서 자료를 재활용할 수 있어 개발비와 해외 등록기간을 줄일 수 있음. 따라서 기술개발과 표준화 · 특허 · 데이터 거버넌스를 동시에 추진해야 함.

○ 화학–생물 융합 및 생물학적 방제 산업의 확대

– 생물학적 방제수단은 IPM에서 화학적 · 재배적 수단을 보완하는 방향으로 확대되고 있으며, 실제 제품화에서는 단일 복합제형뿐 아니라 탱크믹스, 분리포장과 순차처리 방식이 함께 검

토되고 있음(Galli et al., 2024; Folorunso et al., 2024).

- 연구개발의 경쟁축은 신규 소재 발굴뿐 아니라 발효 · 정제 수율, 활성성분과 균주의 표준화, 장기 저장 안정성, 화학성분과의 혼용성, 살포장비 적합성 및 다양한 환경에서의 현장 성능 일관성으로 이동하고 있음.
- 단일 복합제형은 사용 편의성이 높지만 용매 · 보존제 · pH가 미생물 생존성과 생물활성물질의 안정성에 영향을 줄 수 있으므로, 공동제형 · 분리포장 · 탱크믹스 · 순차처리 중 최적 방식을 제품별로 비교해야 함. 상승작용뿐 아니라 길항작용과 경제성도 함께 평가할 필요가 있음.

○ SIGS 상용화 선례와 국제 위해성 평가 기반의 형성

- 미국 EPA의 2023년 Ledprona 등록은 살포형 dsRNA 방제제가 실제 농업용 등록 · 사용 단계로 진입했음을 보여주는 대표 사례임. Ledprona는 감자잎벌레의 특정 유전자 발현을 억제하는 새로운 작용기작의 생물농약으로 등록되었음(U.S. EPA, 2023).
- 미국EPA의 Ledprona 등록 사례의 의미는 RNAi 기술의 실현 가능성을 입증했을뿐 아니라, 신규 작용기작의 제품도 표적 해충, 처리시기, 적용작물과 사용조건을 구체적으로 한정하고 환경노출과 비표적 영향을 제품 단위로 평가함으로써 단계적으로 등록될 수 있음을 보여줌. 따라서, 국내 SIGS 개발에서도 '범용 RNA 농약'보다 작물-병해충-제형-처리조건이 명확한 최초 사용사례를 우선 확보하는 전략이 보다 현실적임.
- OECD는 2020년 환경위해성, 2023년 인체 건강 위해성 평가 고려사항을 발간하여 환경 중 분해, 비표적 생물 노출, 서열 유사성, 작업자 · 소비자 노출 등 국가별 심사자료 정비의 공통 기반을 제공하고 있음(OECD, 2020, 2023).
- EFSA 지원 외부 과학보고서에서는 2026년 dsRNA, 펩타이드, 식물유래물질 등 저우려 활성물질의 특성을 반영한 단계적 위해성 평가방법이 제안되었음. 이는 EFSA가 채택한 공식 지침이나 현행 등록기준이 아니라, 향후 평가체계 정비를 위한 방법론적 제안으로 이해할 필요가 있음(Vryzas et al., 2026).
- 기술경쟁력은 필수 표적 유전자 선정, 저비용 · 고순도 dsRNA 생산, 잎 표면 부착과 세포 내 전달, 자외선 · 강우 안정성, 전달체 안전성 및 비표적 생물 평가에 의해 좌우됨. 반복 사용에 따른 표적서열 변이와 RNAi 감수성 저하에 대비해 복수 표적과 기존 방제수단을 연계한 저항성 관리도 필요함.

○ VOC 센서의 고감도 · 현장형 전환

- GC-MS 등 정밀 분석기술과 함께 이온이동도 분광, 금속산화물 · 나노소재 센서, 생체수용체 기반 바이오전자코, SERS 및 웨어러블 센서가 개발되면서 실시간 · 비파괴 조기탐지 가능성이 확대되고 있음(Lee et al., 2024; Li et al., 2024).

– 작물 품종, 생육단계, 병원체 · 해충, 상처, 온습도와 토양 조건이 VOC 패턴에 동시에 영향을 주므로 단일 화합물보다 다성분 패턴과 환경정보를 결합한 AI 판별이 적합함. 학습에 사용하지 않은 재배지와 계절에서의 외부검증이 필수적임.
– 해충 가해에 따른 VOC 변화 역시 단일 표지물질보다 다성분 패턴으로 분석하는 것이 적절함. 최근 GC–MS 기반 연구에서도 해충 가해 여부를 VOC 조성의 다변량 분석으로 구분할 수 있는 가능성이 제시되었음(Vermeeren et al., 2025).
– 현장 적용에서는 센서의 장기 사용에 따른 drift와 오염을 관리하기 위한 표준시료, 교정주기 및 품질관리 절차가 요구됨. VOC는 단독 확진수단보다 병징 발현 전 선별경보로 활용하고, 영상 · 분자진단 · 예찰조사와 결합해 민감도와 특이도를 단계적으로 확보하는 것이 현실적임.

기술축	글로벌 동향	국내 현황	핵심 격차
AI 예측 · 탐지	Foundation Model · VLM · XAI 디지털트윈 · 강화학습	공공 예찰자료 기반 모델 진단앱 도입 단계	데이터 표준화 독립 검증
복합제형	BASF · Bayer · Syngenta 생물농약 · 복합 솔루션 확대	미생물 · 천연물 연구 활발 병용 적용 초기	전용 등록기준 제형 안정성
SIGS / RNA	EPA Ledprona 승인 OECD · EFSA 평가기반	꿀벌 상용화 선례 작물 적용 초기	전달 · 제형화 인허가 체계
VOC 센싱	나노 · 웨어러블 센서 GC-MS / IMS 실시간 분석	바이오전자코 · SERS 원천기술 선도 ★	작물별 DB 현장 실증

그림 10. 정밀 병해충 관리 기술의 글로벌 동향과 국내 기술격차

1.2 국내 기술 발전 동향

○ 공공 예찰체계와 AI 서비스 기반의 축적
– 농촌진흥청 국가농작물병해충관리시스템(NCPMS)은 병해충 예찰 · 발생정보, 예측지도, 도열병 방제결정지원, 기후변화 영향평가, AI 영상진단 및 OpenAPI 등을 제공하여 국가 단위 디지털 예찰의 기반을 보유하고 있음(농촌진흥청, 2026).
– 향후에는 지역별 조사밀도와 조사품질을 높이고, 토양 · 기상 · 작물생육 · 스마트트랩 · 약제저항성 · 검역 데이터를 공통 코드와 메타데이터로 표준화하여 연계할 필요가 있음. 데이터의 출처 · 품질 · 변경 이력과 모델별 적용 작물 · 지역 · 병해충 범위, 갱신주기를 명확히 하는 운영관리 체계도 요구됨.
– 향후 NCPMS는 예찰정보와 예측지도를 제공하는 정보서비스를 넘어, 예찰–위험예측–현장확인–방제권고–성과평가가 연결되는 운영형 의사결정지원 플랫폼으로 발전해야 함. 고위험 경

보는 현장 관찰 · 분자진단 · 전문가 판정으로 확인하고, 처방과 실제 방제결과를 다시 학습 자료로 활용하여 오경보와 미탐을 지속적으로 줄여야 함.

○ 친환경 방제소재 연구와 제품화 사이의 격차

- 국내는 *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Streptomyces* 등 유용미생물, 식물추출물과 천연물의 항균 · 살충활성 연구가 활발하고 농약기업의 생물학적 방제에 대한 관심도 확대되고 있으나, 복합제형의 장기 저장성, 대량생산 경제성, 혼용 · 살포장비 적합성 및 전용 등록기준 확보는 상대적으로 초기 단계임.
- 실내 효능이 우수한 후보도 원료 · 균주 배치 간 활성 변동, 발효 · 정제 수율, 유통기한과 현장 환경에 따라 성능이 달라질 수 있음. 효능 자료뿐 아니라 목표 원가, 저장온도, 포장규격, 사용자 편의성, 기존 제품과의 병용성을 소재 선정 단계부터 제품 요구조건으로 설정해야 함.
- 기술이전 이후 기업이 제형과 등록시험을 다시 수행하는 구조를 줄이기 위해 연구 초기부터 기업이 참여하는 산학연 공동개발이 필요함. 공공부문은 공통 제형평가, 다지역 · 다년 실증과 안전성 자료를 지원하고, 기업은 생산공정 · 품질관리 · 유통 및 사용자 피드백을 담당하는 역할분담이 효과적임.
- 단백질 · 펩타이드 · 효소와 합성생물학 유래 대사산물도 차세대 소재로 확대될 가능성이 있음. 국내의 미생물 발효 · 대사공학 강점을 바이오파운드리와 연계하면 후보물질의 설계–생산–평가 속도를 높일 수 있으나 제조품질과 규제분류를 초기부터 함께 검토해야 함.

○ SIGS와 VOC 분야의 전략적 원천기술

- 허니가드–R액은 2024년 6월 동물용의약품 품목허가, 2025년 상용화, 2026년 정부 혁신제품 지정을 통해 국내 농생명 RNAi 제품의 제도 진입 선례를 제공함(농림축산검역본부, 2025; 제놀루션, 2026). 다만 꿀벌 바이러스 치료용 동물용의약품이므로 작물 병해충용 SIGS 농약의 등록 선례와 동일시할 수 없으며, 작물용 SIGS는 표적선정–dsRNA 설계 · 생산–전달제형–다지역 실증–비표적 평가–등록으로 이어지는 전주기 자료와 표준 시험체계가 필요함.
- 국내에서는 크리핑벤트그래스 달러스팟 병원균인 *Clarireedia jacksonii*를 대상으로 SIGS의 식물체 내 방제효과와 dsRNA 흡수 · 유전자침묵이 확인되었음(Lim et al., 2026). 이는 작물병 방제에 대한 국내 적용 가능성을 보여주는 연구사례이나, 농약 등록이나 상용화 선례와는 구분해야 함.
- 국내 연구진은 웨어러블 VOC 센서와 SERS 기반 실시간 식물 VOC 모니터링 기술을 제시한 바 있음. 다만 이를 병해충 조기경보 서비스로 전환하려면 작물 · 병해충 · 감염단계별 VOC 데이터베이스, 현장 포집법, 온습도 보정, 장기 교정과 경보 선행시간 검증이 필요함(Lee et al.,

2024; Choi et al., 2025).

- 시설원예는 환경센서와 자동제어 인프라가 비교적 잘 보급되어 있어 VOC와 SIGS의 초기 실증에 유리함. 토마토 · 딸기 · 파프리카 등 수출 원예작물에서 영상 · 환경 · VOC · 분자진단을 동시에 수집하고, 친환경 방제의 비용편익과 잔류농약 저감효과를 함께 검증하는 접근이 적합함.

○ 국내 기술의 단계별 포지셔닝과 실증전략

- AI 예찰 · 진단은 개별 모델의 정확도 경쟁을 넘어, 다지역 · 다년 독립검증과 지속적인 성능 감시가 가능한 공공서비스 운영단계로, 화학-생물 융합은 소재 탐색에서 제품 요구조건 설정과 등록자료 확보 단계로 발전시킬 필요가 있음. 작물용 SIGS와 VOC는 원천기술의 우수성을 현장 재현성 · 대량생산 · 등록자료로 전환하는 실증단계가 핵심임.
- 단기적으로는 NCPMS 고도화, 제품화 중심의 산학연 협력과 공통 시험법을 우선하고, 중기적으로는 복합제형 · SIGS 등록자료 구축과 규제 사전상담과 VOC 조기경보 실증을 확대해야 함. 장기적으로는 예측-확인-처방-정밀살포-효과검증-등록자료가 순환하는 국가형 K-그린방제 운영체계와 수출 패키지로 발전시킬 필요가 있음.

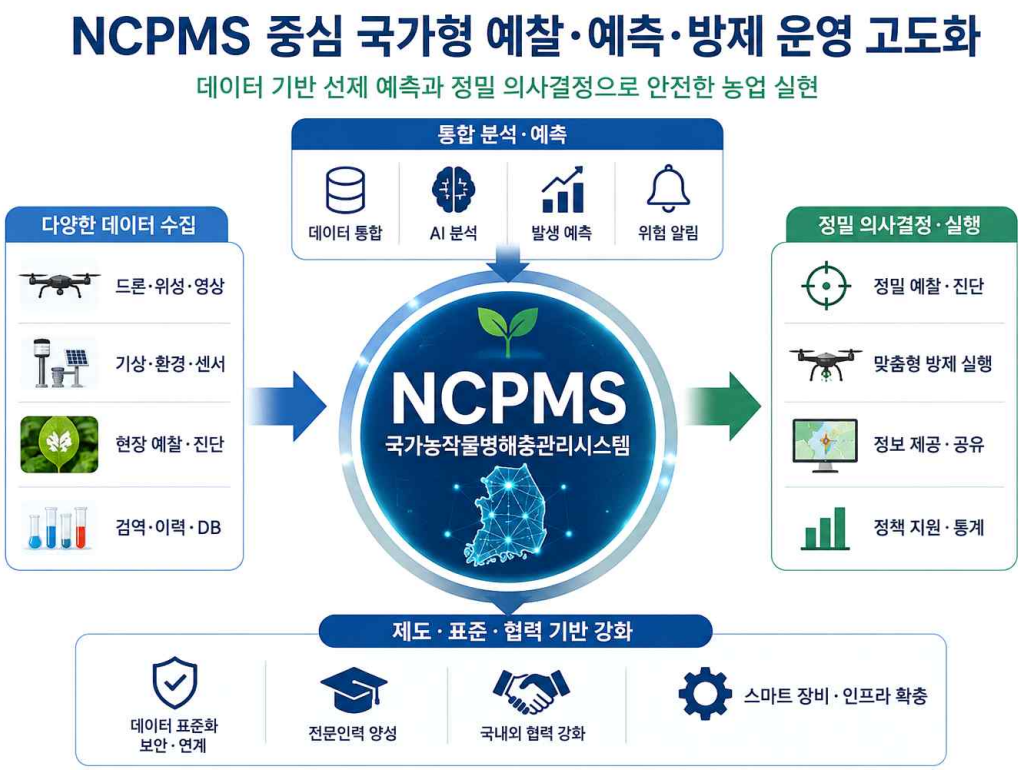


그림 11. NCPMS 중심 국가형 예찰 · 예측 · 방제 운영 고도화

2 기술발전 흐름

○ 정밀 병해충 관리 기술은 경험과 화학농약 중심의 1세대에서 출발해, 센서 · 드론 · 디지털 예찰을 도입한 2세대, AI와 첨단 바이오기술을 융합한 3세대를 거쳐, 향후에는 예측 · 진단 · 처방 · 자동살포 · 성과환류가 통합된 국가형 플랫폼 중심의 4세대로 발전할 것으로 전망됨.

○ 기술발전은 새로운 진단기기나 방제제의 출현뿐 아니라, 병해충 정보를 수집 · 분석하고 방제를 시행한 후 실제 성과를 다시 데이터로 축적하는 운영체계의 고도화 과정으로 이해할 필요가 있음.



그림 12. 정밀 병해충 관리 기술의 세대별 발전 흐름

○ 1세대: 경험 · 화학 중심 방제(~2010년대 초)

– 숙련된 농업인과 예찰 인력의 육안 관찰, 과거 발생경험과 재배력에 기반하여 방제시기를 판단하는 방식이 중심이었음. 지역별 방제력과 기상조건을 참고하였으나, 실제 포장 내 발생분포보다 일정 시기에 일괄 방제하는 방식이 일반적이었음.

– 방제수단은 광범위한 병해충에 빠르게 작용하는 화학농약이 중심이었으며, 예방적 또는 주기적 살포가 농업생산 안정화와 수량 확보에 크게 기여하였음.

– 초기 생물농약과 천적, 경종적 방제도 일부 활용되었으나 제품 수와 현장 안정성이 제한되어 화학농약을 보완하는 수준에 머무름. 병해충 예측도 온도 · 강우 · 습도 등 소수의 기상요인에 기반한 단순 모델이 중심이었음.

– 포장 전체에 동일한 약제와 살포량을 적용하면서 과잉 살포, 약제저항성, 농산물 잔류, 비표적 생물 영향과 토양 · 수계 오염 문제가 누적됨.

– 예찰과 방제 결과가 농가 또는 조사자의 기록에 머물러 지역 간 정보 공유와 장기 성과분석이 어려웠으며, 숙련자의 경험을 다른 지역과 작물로 확장하는 데 한계가 있었음.

○ 2세대: 데이터 · 디지털 방제 도입기(2015~2022년)

– 스마트폰 병해충 진단 앱, 디지털 예찰, 스마트트랩, 드론 영상과 위성 · 원격탐사 자료가 도

입되고, 현장 영상과 센서자료를 활용한 기계학습 진단 · 예측모델이 개발되기 시작함.

- 드론과 무인살포장비의 보급으로 작업 효율이 향상되었고, 스마트팜에서는 온습도 · 광 · 토양수분 · 환기정보를 이용하여 병 발생에 유리한 환경을 사전에 탐지할 수 있게 됨.
- 화학농약에 생물농약, 천적, 재배관리와 물리적 방제를 결합하는 IPM의 활용이 확대되었으며, 경제적 피해수준과 발생단계에 따른 방제 및 작용기작 교호사용이 강조됨.
- 다만 디지털 기술이 기관 · 사업 · 기업별로 개별 개발되면서 데이터 형식, 병해충 분류체계, 조사단위와 품질기준이 서로 달랐음. 동일 병해충 자료도 조사방법과 촬영조건이 달라 통합 활용이 어려웠음.
- 진단 앱, 예측모델, 드론 살포와 농자재 제품이 독립적으로 운영되어 예측–진단–처방–살포–성과평가가 하나의 체계로 연결되지 못하는 한계가 지속됨.
- 기술평가도 모델 정확도와 단기 방제효과에 집중되었으며, 농약 사용량, 작업시간, 생산비와 피해 감소를 종합적으로 평가하는 체계는 미흡하였음.

○ 3세대: AI · 첨단 바이오 융합 정밀 방제(2023년~현재)

- 병징 영상과 기상 · 토양 · 작물생육 · 위성 · UAV · 스마트트랩 · 검역 · 약제저항성 자료를 함께 처리하는 멀티모달 AI가 발전하고 있음. AI의 역할도 병해충 판별에서 발생확률, 확산경로와 적정 방제시기를 제시하는 의사결정 지원으로 확대되고 있음.
- AI 모델 평가는 단일 데이터셋에서의 정확도보다 지역 · 연도 · 품종이 달라져도 성능을 유지하는 일반화 능력, 오경보 · 미탐률, 확률예측의 불확실성 및 외부 현장검증을 중시하는 방향으로 전환되고 있음.
- 방제소재 분야에서는 화학농약의 즉효성과 미생물 · 천연물의 지속성 및 다중 작용기작을 결합하는 화학–생물 융합이 확대되고 있음. 혼용성, 저장 안정성, 생산원가와 살포장비 적합성을 함께 고려하는 제품화 연구가 중요해짐.
- 살포형 유전자침묵(SIGS)은 dsRNA 등을 작물 표면에 살포하여 병해충의 필수 유전자 발현을 억제하는 분자정밀 방제기술임. 미국에서 살포형 dsRNA 방제제가 등록되면서 RNA 기반 작물보호제가 실제 제품화 단계에 진입하였음(U.S. EPA, 2023).
- VOC 기반 조기예측은 병징 발현 전에 작물–병해충 상호작용에서 발생하는 휘발성 신호를 탐지한다는 점에서 영상진단을 보완할 가능성이 큼. 바이오전자코, SERS, 나노소재 센서와 AI 분석이 결합되면서 비파괴 · 실시간 경보기술로 발전하고 있음.
- 국내에서는 NCPMS를 기반으로 예찰정보, 예측지도, AI 영상진단과 OpenAPI가 제공되고 있음. 다만 데이터 표준화, 외부검증, 모델 갱신, 처방책임과 성과환류 체계는 추가 고도화가 필요함(농촌진흥청, 2026).
- 개별 기술은 실증 또는 상용화 단계에 접근하고 있으나, AI 예측과 현장확인, 방제제 선택,

정밀살포 및 성과평가를 통합한 운영모델과 관련 제도는 아직 과도기적 단계임.

○ 4세대: 통합형 국가 방제 플랫폼과 글로벌 서비스화(2030년~전망)

– 향후 정밀 병해충 관리는 예측–현장확인–정밀처방–자동살포–효과검증이 연결되고, 처리 결과가 다음 예측과 처방에 반영되는 성과 환류형 체계로 발전할 전망임. 현장 결과가 자동으로 축적되고 다음 예측과 처방에 반영되면서 지역 · 작물별 성능이 지속 개선될 것으로 예상됨.

– 국가 단위에서는 기후 · 예찰 · 검역 · 약제저항성 자료를 통합하여 외래 · 돌발 병해충 위험과 방제자원을 관리하고, 지역에서는 공동방제 계획, 필지에서는 농업인 맞춤형 경보와 처방을 제공하는 다층적 구조가 형성될 전망임.

– 드론, 무인주행 살포기와 스마트팜 장비는 병해충 위험정보와 작업자가 설정한 기준에 따라 방제 위치 · 시점 · 용량을 조정하고, 처리 후 예찰 · 센서 · 영상자료로 효과를 평가하는 체계로 발전할 수 있음. 작업자는 고위험 경보와 예외상황을 확인하고 최종 실행 여부를 결정함.

– 실제 농가에서 축적된 제품 효능, 환경조건, 혼용성, 약해와 비표적 영향자료가 제품개선과 등록 갱신에 활용되면서 연구 · 개발 · 등록 · 사후관리가 연결될 전망임.

– 친환경 복합제형, SIGS, VOC 센서와 디지털 처방서비스는 작물별 통합 패키지로 제공되고, 국제표준 · 등록자료 · 현지 실증을 확보한 K–그린방제 서비스로 발전할 가능성이 있음.

– 이 과정에서는 공공성과 민간 지식재산권, 농가 데이터 소유권, 개인정보, 사이버보안과 AI 처방의 책임범위를 함께 관리해야 함. 국가 플랫폼은 공통 데이터 · 표준 · 검증기반을 제공하고 민간 서비스가 연계되는 구조가 적절함.

○ 본 보고서의 단계 구분에 따르면 국내는 개별 원천기술과 현장 실증이 확대되는 3세대 단계에 있으며, 데이터 운영, 다지역 실증, 제품화와 등록 · 표준을 통합한 국가 운영체계는 아직 구축 중인 것으로 판단됨.

○ 단기적으로 분산된 기술과 데이터를 연결하고, 중기에는 공통 실증지와 등록평가체계를 확보하며, 장기적으로 NCPMS 중심 국가 인프라와 글로벌 서비스로 전환하는 전략이 요구됨.

3 핵심 발전축

○ 정밀 병해충 관리는 개별 진단기술이나 신규 방제소재만으로 완성되기 어려우며, 데이터 · AI, 친환경 방제, 현장 자동화, 제품화 · 규제 및 기후 · 환경 관리가 상호 연결되어야 함.

○ 예찰 · 진단 결과가 방제수단 선택으로 이어지고, 방제 후 성과가 다시 데이터와 제품개발에 반영되는 순환구조가 핵심임.

○ 데이터 기반화와 AI 지능화

– 기상 · 예찰 · 토양 · 작물생육 · 위성 · 드론 · 영상 · 약제저항성 · 검역자료를 공통 분류체계와 메타데이터로 표준화해야 함. 조사일시, 위치, 작물 · 품종, 생육단계, 조사방법과 데이터 품질정보를 함께 기록하여 재사용성을 높여야 함.

– 공공기관과 민간기업 데이터의 소유권, 접근권, 활용범위와 품질책임을 명확히 하는 거버넌스가 필요함. 농가 · 기업 데이터는 익명화와 접근권한 관리를 전제로 안전하게 연계해야 함.

– AI 모델은 정확도뿐 아니라 발생확률, 예측 불확실성, 오경보 · 미탐률 및 경보 선행시간을 함께 제공해야 함. 위험수준별로 관찰 유지, 추가 조사, 현장확인과 분자진단 등 행동기준을 마련할 필요가 있음.

– 학습데이터의 출처 · 품질 · 변경 이력, 모델 적용지역 · 작물 · 병해충과 갱신주기를 관리하는 AI 모델 운영관리 체계를 구축해야 함. 새로운 연도와 지역자료로 정기적인 외부검증과 재학습을 실시해야 함.

– 설명가능 AI를 활용하여 위험도 산출에 영향을 미친 영상 영역, 기상조건과 재배환경 요인을 제시하되, 그 결과는 전문가와 현장 조사자의 판단을 지원하는 보조정보로 활용해야 함.



그림 13. 정밀 병해충 관리의 5대 핵심 발전축과 순환학습 구조

○ 친환경 · 저독성화와 분자 정밀화

– 미생물 · 천연물 · 생화학적 방제제와 화학농약의 조합은 처리량과 살포횟수를 줄이거나 방제 효과를 보완할 가능성이 있음. 실제 효과는 조합, 제형, 처리순서와 환경조건에 따라 제품별로 검증해야 함.

– 화학–생물 조합은 상승 · 상가 · 길항작용을 체계적으로 평가해야 하며, 탱크믹스, 순차처리, 분리포장과 단일 복합제형 중 적합한 방식을 제품별로 결정해야 함.

– SIGS는 병해충의 생존 · 감염 · 번식에 필수적인 유전자를 선택적으로 억제할 수 있음. 비표적 생물과의 서열유사성을 분석하고 복수 표적과 기존 약제의 교호사용을 통해 저항성을 관리해야 함.

– 단백질 · 항균펩타이드 · 효소, 미생물 대사산물과 합성생물학 기반 소재를 후보군으로 확대하되, 실내 활성뿐 아니라 생산수율, 원료 표준화, 저장성과 환경 중 분해특성을 평가해야 함.

– 나노전달체, 미세캡슐화, 지속방출, 자외선 보호와 부착성 향상기술을 공통 제형 플랫폼으로 개발하면 다양한 활성성분에 활용할 수 있음. 전달체 자체의 환경거동과 비표적 영향도 검증해야 함.

○ 현장 실시간화 · 자동화와 순환학습

– 스마트트랩, 영상 · 기상 · 토양 · VOC 센서가 병해충과 환경변화를 연속 수집, 그 결과가 NCPMS와 지역 처방서비스에 실시간으로 연결되어야 함.

– 센서자료는 장비 종류, 설치위치와 교정상태에 따라 값이 달라질 수 있으므로 표준시료, 교정주기, 결측치 처리와 드리프트 관리절차가 필요함. 자동수집 자료도 정기적인 현장조사로 확인해야 함.

– AI 위험도와 처방을 드론, 무인살포기와 스마트팜 장비에 연계하여 방제위치, 시점, 약제와 용량을 자동 조정하는 방향으로 발전할 전망임.

– 자동 처방은 기상급변, 장비오류, 약제혼용과 비산위험을 고려하여 사람이 중단하거나 수정할 수 있어야 하며, 고위험 처방에는 전문가 확인과 농업인 승인이 필요함.

– 방제 후 발생량, 수량, 품질, 약제량, 작업시간, 비용, 약해와 비표적 영향을 수집하여 모델과 처방규칙에 환류해야 함.

○ 제품화 · 규제 · 표준의 동시 설계

– 연구 초기부터 목표 작물, 대상 병해충, 사용방식, 목표가격, 유통기한, 포장규격과 살포장비를 포함한 제품 요구조건을 설정해야 함.

– 후보 발굴부터 등록까지 실내 효능, 온실시험, 제형, 저장성, 대량생산, 포장 실증 및 안전성을 단계별로 평가하고, 단계별 중단 · 계속 기준을 적용하여 개발비용과 실패위험을 줄여야 함.

– 복합제형에는 성분 간 상용성과 저장 중 활성 유지, RNA 기반 방제제에는 dsRNA 품질, 환경

중 분해, 비표적 서열유사성과 전달체 안전성에 적합한 시험기준이 필요함.

- 제품시험과 등록자료는 국제 기준과 정합성을 확보하여 국내 자료가 해외 진출에도 활용될 수 있도록 해야 함. 국제공동실증과 시험법 표준화도 병행할 필요가 있음.
- 연구기관은 원천기술 · 공통 시험법 · 실증과 안전성 평가를, 기업은 생산 · 품질관리 · 유통과 사용자 피드백을 담당하는 공동개발체계가 요구됨.

○ One Health와 기후적응형 통합관리

- 병해충과 약제저항성은 토양 · 수계, 축산, 검역, 식품안전 및 농작업자 노출과 연결되므로 단계적인 One Health 데이터 연계가 필요함.
- 농약 사용량과 저항성 정보를 토양 · 수질, 비표적 생물과 잔류자료에 연계하고, 지역별 약제저항성 지도를 작용기작 교호사용과 방제제 공급계획에 활용해야 함.
- 기후변화에 따라 월동지역, 발생시기, 세대수와 외래 병해충 정착위험이 달라지므로 단기 기상예측과 중장기 기후전망을 함께 반영해야 함.
- 생물자극제는 작물 생육과 스트레스 내성을 높여 피해를 간접적으로 줄일 수 있으나, 직접 방제제와의 기능과 규제범위를 명확히 구분해야 함.
- 다섯 발전축은 NCPMS와 공통 실증지를 중심으로 연결하고, 데이터 · AI가 위험을 예측하면 방제소재와 자동화 장비가 이를 실행하고 현장성과가 제품 · 규제 · 정책에 환류되도록 해야 함.

4 향후 기술 발전 방향

4.1 단기 발전 방향(2026~2028년)

○ AI · 빅데이터 예측 · 진단

- NCPMS 고도화를 중심으로 예찰조사 품질관리체계와 공통 데이터 표준을 마련하고, OpenAPI와 공공-민간 데이터 연계를 확대해야 함. 이와 함께 주요 병해충 예측모델을 학습에 사용하지 않은 지역과 연도의 자료로 독립 검증해야 함.
- 병해충 통합데이터 기반 디지털 예찰 · 경보체계 구축을 신규 · 연계 사업으로 추진하여 현장관찰, 스마트트랩, 영상 · 분자진단과 확률예측을 결합한 시범서비스를 운영함.
- 반복 발생형 병해충의 확률예측 모델과 희귀 · 외래 병해충의 이상징후 탐지 모델을 구분하여 개발하고, 학습에 사용되지 않은 지역 · 연도 · 품종에서 독립적으로 검증함.
- 모델은 판별 정확도뿐 아니라 경보 선행시간, 미탐률, 오경보율과 발생확률의 보정도를 평가해야 함. 또한 AI 경보가 현장조사의 효율과 방제 의사결정을 실제로 개선했는지도 별도로 검증해야 함.

○ 화학-생물 융합 방제

- 자생 미생물, 식물유래 천연물, 미생물 대사산물과 단백질 · 펩타이드 후보의 라이브러리를 구축하고 기원, 유전체, 활성성분과 작용기작을 관리해야 함.
- 후보소재와 화학농약 간 상승 · 상가 · 길항작용을 평가하고 탱크믹스, 순차처리, 분리포장과 단일 복합제형을 비교해야 함.
- 초기 효능평가와 함께 발효 · 정제수율, 생산원가, 제형 안정성, 유통기한, 장비 적합성과 사용편의성을 검토해야 함.
- 시설원예와 수출작물을 우선 대상으로 온실 · 소규모 포장시험을 수행하고, 기업이 목표가격과 제품규격 설정에 초기부터 참여하도록 해야 함.

○ SIGS 분자표적 방제

- 주요 작물-병해충별 필수 표적 유전자와 서열정보를 확보하고 비표적 생물과의 유사성을 평가하는 데이터베이스를 구축해야 함.
- 유전체 · 전사체 정보와 생물정보학 분석을 활용하여 표적 유전자의 보존성, 유효구간 및 비표적 생물과의 서열유사성을 평가하고, 축적된 실험자료가 충분한 경우 기계학습을 보조적으로 활용해야 함.
- 미생물 발효와 무세포 합성 등 저비용 생산기술을 비교하고 dsRNA 길이, 순도, 이중가닥 비율과 불순물 관리기준을 설정해야 함.
- 나노전달체를 활용하여 부착성, 자외선 · 강우 안정성과 세포 내 전달을 높이되 환경거동과 비표적 안전성을 함께 평가해야 함.
- 실내 · 온실 효능, 잔존성, 작물약해와 비표적 평가의 표준 프로토콜을 마련해야 함.

○ VOC 바이오마커 조기예측

- 작물, 품종, 생육단계, 병해충, 감염시기와 환경조건을 구분한 VOC 표준시료와 데이터베이스를 구축해야 함.
- GC-MS를 기준분석법으로 활용하고 바이오전자코, SERS, 이온이동도 분광과 나노소재 센서의 감도, 선택성, 비용과 현장성을 비교해야 함.
- 정상작물, 비생물적 스트레스, 병원체 감염과 해충 가해를 구분하는 AI 모델을 개발하고 센서 드리프트와 장비 간 편차를 보정해야 함.
- VOC 경보는 단독 확진보다 현장 관찰, 영상진단과 분자진단의 우선순위를 정하는 선별기술로 운영해야 함.

○ 공통 실증 · 제도 기반

- 시설원예, 수출 원예작물과 광역 식량작물에 공통 실증지를 조성하여 4대 핵심기술을 동일한

조건에서 평가해야 함.

- 발생량, 피해, 수량, 품질, 농약 사용량, 비용, 약해와 비표적 영향 등 공통 성과지표를 설정하고 관행방제 · IPM과 비교해야 함.
- 식물병리, 곤충, 데이터과학, 센서, 제형, 독성 · 환경과 규제 전문가가 참여하는 융합인력 양성체계를 운영해야 함.



그림 14. 정밀 병해충 관리 4대 기술축의 단계별 발전 로드맵(2026~2036)

4.2 중기 발전 방향(2029~2031년)

○ 다지역 · 다년 현장 실증 확대

- 단기 단계의 우수 후보를 시설원예, 수출작물과 광역 식량작물의 다지역 · 다년 포장에서 검증하여 지역 · 품종 · 기상조건별 적용범위를 명확히 해야 함.
- AI · VOC 예측이 현장조사와 진단, 방제제 선택 및 정밀살포로 연결되고, 처리 후 성과가 다시 데이터로 축적되는 운영형 서비스를 실증해야 함.
- 지역별 시범서비스를 전국 위험지도와 공동방제 의사결정으로 확대하고 농업인 모바일 경보, 지자체 상황판과 방제기관을 연계해야 함.

○ 기술별 제품화 단계 진입

- 화학–생물 복합제형은 저장성, 생산 경제성, 혼용성과 장비 적합성을 확보한 후보를 중심으로 등록자료를 단계적으로 확보하고 규제기관 사전상담을 추진해야 함.
- SIGS는 포장 유효량과 지속기간을 확정하고 생산공정, 품질관리, 비표적 생물과 환경분해 자료를 포함한 등록자료를 구축해야 함.
- VOC 센서는 작물별 핵심 패턴과 환경보정 알고리즘을 확립하고, 시설원예 · 검역 · 저장환경

등 통제 가능한 분야에서 초기 서비스를 운영해야 함.

- AI 서비스는 외부검증, 오류 대응, 갱신과 책임주체를 포함한 운영지침을 마련해야 함.

○ 등록 · 표준 · 산업화 기반 확립

- 복합제형과 RNA 기반 방제제의 전용 평가항목과 효능 · 약해 · 비표적 · 환경영향 시험법을 마련해야 함.
- 공통 실증평가 플랫폼과 등록자료 지원체계를 구축하여 기업과 연구기관이 시험시설과 전문인력을 공동 활용하도록 해야 함.
- 국내 시험자료를 해외 등록에도 활용할 수 있도록 데이터 형식을 국제기준에 맞추고 주요 수출국과 공동실증을 추진해야 함.
- 수출 전략형 신작물보호제 개발사업의 성과를 후속 R&D, 생산설비와 기업 제품화로 연결해야 함.

4.3 장기 · 확산기 발전 방향(2032~2036년)

○ 국가 방제 의사결정 인프라 정착

- 장기적으로는 공통 데이터 구조와 재학습 체계를 기반으로 새로운 작물과 병해충에 적용범위를 확장할 수 있는 AI 플랫폼을 구축해야 함. 이 플랫폼은 기후 · 예찰 · 검역 · 저항성 위험을 통합 분석하고, 현장 센서 및 정밀살포장비와 연계되는 국가 방제 의사결정 인프라로 운영함.
- NCPMS는 정보조회 시스템에서 예찰, 확률예측, 현장확인, 방제처방, 성과평가와 모델개선이 반복되는 국가 순환학습 플랫폼으로 발전해야 함.
- 국가기관은 외래 · 돌발 병해충과 방제자원을 관리하고, 지자체는 공동방제 계획, 농업인은 필지별 방제시기 · 수단 · 살포량을 제공받는 다층적 운영체계를 구축해야 함.
- 현장 센서와 자동살포장비는 병해충 위험정보와 작업자가 설정한 기준에 따라 위치 · 시점 · 용량을 조절하고, 처리 후 효과를 평가한 결과가 다음 예측과 처방에 반영되는 성과 환류형 방제체계로 발전해야 함.

○ 친환경 · 분자정밀 방제제품 상용화

- 친환경 복합제형은 작물별 프로그램 방제에 포함되어 화학농약 사용량과 횟수를 줄이고 저항성 관리를 지원해야 함.
- SIGS는 표적 설계, 저비용 생산과 전달제형을 플랫폼화하고 복수 작물 · 병해충으로 적용범위를 확대해야 함.
- VOC 바이오마커는 영상 · 기상 · 분자진단과 결합하여 병징 전 경보를 제공하고, 시설원예 · 검역 · 저장병과 수출작물 품질관리로 확대될 수 있음.
- 제품의 효능, 안전성, 생산품질과 사용성과를 국가 플랫폼에 축적하여 제품개선과 등록 갱신에 활용해야 함.

○ 글로벌 K-그린방제 서비스 확산

– 친환경 복합제형, SIGS, VOC 센서, AI 위험예측과 정밀살포를 작물별 패키지로 구성하여 국제표준 · 등록자료 · 현지 실증을 갖춘 수출모델로 발전시켜야 함.

– 단일 농자재 수출에서 벗어나 데이터 플랫폼, 진단 · 예측, 농자재, 장비, 교육과 사후관리를 통합 제공하는 사업모델이 필요함.

– 기후와 병해충 양상이 유사한 아시아 지역을 우선 대상으로 현지 기관 · 기업과 공동 실증하고 국가별 작물과 규제에 맞게 현지화해야 함.

– 국제공동 시험법과 실증자료를 축적하여 표준과 특허를 선점하고 국가 간 검역정보 연계를 강화해야 함.

○ One Health · 기후적응형 관리체계 확립

– 정밀 병해충 관리 의사결정에 필요한 정보를 단계적으로 연결하는 One Health 원칙에 따라, 병해충, 약제저항성, 농약 사용과 잔류자료를 토양 · 수계 · 검역 및 식품안전 정보와 연계할 필요가 있음.

– 즉, 1단계에서는 병해충 발생 · 농약 사용 · 저항성 자료를 연계하고, 2단계에서는 잔류농약 · 토양 · 수질 · 비표적 생물 자료를 연결하며, 3단계에서는 검역 · 식품안전 · 농작업자 노출자료까지 확장함으로써, 방제효과뿐 아니라 환경 · 건강 측면에서 발생하는 상충관계를 평가해야 함.

– 기후시나리오에 따른 병해충 분포와 발생시기 변화를 전망하고 고위험 지역에 예찰 · 검역 · 방제자원을 선제 배치해야 함.

– 국가 플랫폼의 성과자료를 농약 감축, 환경부하, 수출 안전성과 식량안보 정책평가에 활용하여 정밀 병해충 관리를 농업정책 기반으로 정착시킬 필요가 있음.

핵심기술	주요 내용	단기 (2026~2028)	중기 (2029~2031)	장기 (2032~2034)	확산기 (2035~2036)
① AI·빅데이터 기반 예측·진단	• 통합 데이터 플랫폼 구축 • AI 예측·경보 고도화 • 디지털 예찰·진단 서비스 운영 • 전국 서비스 및 의사결정 인프라화	데이터 통합·표준화 플랫폼 구축 예측모델 개발·실증 시범 서비스 운영	전국 운영 서비스 정교화 민간 연계 확대 위험지도 본격화	국가 의사결정 인프라 구축 AI 고도화·자동화 맞춤형 처방 고도화	범용 AI 플랫폼 완성 글로벌 디지털 서비스 확산
② 화학·생물 융합 정밀 방제	• 친환경 복합제형 개발·최적화 • 실증·시범등록 및 제품화 • 국내 시장 확대·해외 진출	소재 라이브러리 구축 복합제형 개발·최적화 온실·소규모 실증	현장 다지역 실증 시범등록·제품화 공정·규격 확립	국내 보급 확대 사용성·경제성 개선 주요 작물 패키지화	친환경 농자재 글로벌 시장 진출 해외 등록 확대
③ SIGS 분자표적 방제	• 표적 유전자 발굴·설계·DB 구축 • 전달기술·저비용 생산 확립 • 실증·등록 및 플랫폼화 • 범용 플랫폼 및 수출제품화	표적 유전자 DB 구축 AI 설계·선별 생산기술 개발 실내·온실 효능평가	포장 실증 전용 평가·등록기준 마련 공식 등록·제품화 시작	플랫폼 공정 최적화 다양한 작물·해충 적용 안정적 대량생산 체계	범용 플랫폼 완성 글로벌 수출제품화 국제 표준·규제 정합
④ VOC 바이오마커 조기예측	• VOC DB·표준시료 구축 • 센서 원형 개발·현장 검증 • 조기경보 서비스 운영 • AI 통합센싱 플랫폼 확산	VOC DB 구축 센서 원형 개발 AI 판별 알고리즘 개발 온실·현장 검증	현장 실증 조기경보 서비스 시범운영 다중센서 융합·보정 정확도 고도화	AI 통합 플랫폼 구축 전국 조기경보 확대 스마트트랩·검역·저장 연계 적용	AI 통합센싱 플랫폼 상용화 K-그린방제형 서비스 확산 국내외 수출 모델 구축

그림 15. 정밀 병해충 관리 4대 핵심기술 종합 로드맵(2026~2036)

5 주요 이슈 및 한계

○ 데이터 표준화 · 거버넌스와 모델 신뢰성

– 기관별로 조사대상 · 단위 · 주기와 병해충 분류체계가 달라 데이터 통합과 분석 재현성이 낮음. 또한 희귀 · 외래 병해충의 양성자료와 정상 · 비발생 음성자료가 부족하여 실제 현장의 심한 클래스 불균형을 반영한 모델 학습과 평가가 어려움.

– AI 모델은 학습지역과 다른 기후 · 품종 · 재배체계에서 성능이 저하될 수 있으므로 다지역 · 다년 외부검증과 발생확률 보정이 필요함. 또한 예측 근거의 설명, 데이터 · 모델 변경 이력 관리 및 독립 성능평가를 통해 운영과정의 신뢰성을 확보해야 함. 특히 정확도뿐 아니라 경보 선행시간, 미탐 · 오경보율과 고위험 경보 이후의 현장확인 결과를 함께 평가해야 함.

– 공공 · 민간 데이터의 소유권 · 접근권 · 품질책임, 농가정보 보호, 사이버보안 및 장기 운영 재원이 불명확하면 플랫폼 구축 이후 데이터와 모델의 품질이 빠르게 저하될 수 있음.

○ 화학–생물 복합제형의 제품화 · 제도적 병목

– 생물소재는 균주 · 원료 · 발효공정과 환경조건에 따라 활성이 변하고 화학성분과의 상용성, 장기 저장 중 분해, 탱크믹스 안정성 및 살포장비 적합성이 제품화의 핵심 장애요인임.

– 실험실 시너지와 포장 방제효과 사이의 차이를 줄이려면 제형, 투입순서, 용량, 기상, 작물 생육단계를 표준화하고 생산원가 · 유통기한 · 사용 편의성을 동시에 검증해야 함.

– 현행 화학농약 또는 생물농약 중심 분류로는 화학+생물 복합제품의 자료요건과 등록경로가 불명확할 수 있어 전용 시험법 · 평가기준과 사전 규제상담이 필요함.

○ SIGS의 전달효율 · 안전성 · 경제성 장벽

– dsRNA의 자외선 · 강우 · 핵산분해효소에 대한 안정성, 잎 표면 부착, 병해충 체내 유입과 세포 내 전달효율이 표적생물과 환경에 따라 달라 현장효능의 변동성이 큼.

– 나노전달체는 효율을 높일 수 있으나 환경 중 거동과 비표적 생물 영향, 잔류 · 분해 특성을 제형별로 평가해야 하며, 대량생산 단가와 품질 일관성도 상용화의 핵심 조건임.

– 표적 유전자 보존성 · 비표적 유사성 · 저항성 발생을 지속 모니터링하고, 복수 표적 또는 교대사용을 포함한 제품 수명주기 관리가 필요함.

○ VOC 기술의 현장 재현성 · 센서 표준화

– VOC 패턴은 병해충뿐 아니라 품종 · 생육단계 · 온습도 · 광 · 토양 · 비료 · 기계적 상처와 주변 화학물질에 영향을 받아 실험실과 포장 간 성능차가 발생하기 쉬움.

– 표준시료 · 포집시간 · 농축법 · 센서 교정 · 드리프트 보정 · 데이터 전처리와 작물–병해충별 기준 DB가 부족하면 기관 · 장비 간 결과를 비교하기 어려움.

– 따라서, 병징 전 선별경보의 민감도를 높이되 적용분야 별로 허용 가능한 오경보 비용과 미탐 피해를 먼저 설정하는 방식으로 경보기준을 최적화해야 함. 또한 영상 · 분자진단과의 단계적 확인절차를 설계하여 오경보에 따른 불필요한 방제를 방지해야 함.

○ 현장 적용성 · 농가 수용성과 전문인력 부족

– 농업인은 정확도보다 경보의 이해가능성, 사용 편의, 비용 대비 피해저감, 책임소재와 사후 지원에 민감하므로 장기 실증 · 교육 · 보급서비스가 함께 제공되어야 함.

– 병리 · 곤충 · 잡초 · 미생물 · 제형 · 센서 · AI · 데이터 · 규제 전문가가 함께 문제를 정의하고 운영할 융합인력이 부족하며, 지역 예찰 전문인력의 안정적 경력경로도 필요함.

– 기술 자체보다 데이터–제형–현장–규제–시장 사이의 연결구조가 병목이므로 공공 기준물질 · 시험포장 · 등록지원 · 기업 공동개발을 공통 인프라로 운영해야 함.



그림 16. 정밀 병해충 관리 기술의 주요 한계와 연결 구조의 병목

Ⅳ. 산업 및 정책 환경

1 산업 동향

1.1 글로벌 산업 동향

○ 친환경 방제와 디지털 농업의 동시 성장

– 글로벌 산업은 농약 단품 판매에서 데이터 · 센서 · 진단 · 처방, 생물소재 · 정밀제형, 자동살포, 시험 · 등록과 사후 성과관리까지 연결하는 전주기 솔루션으로 확장되고 있음.

– 생물농약 · 생물학적 방제소재와 AI 농업 플랫폼은 높은 성장세가 전망되지만 시장 정의에 따라 수치가 크게 달라, 단일 규모보다 기업 투자 · 제품등록 · 현장 서비스의 실제 증가를 중심으로 판단해야 함.

– 기후변화 · 농약저항성 · 잔류기준 강화로 인해 예방적 일괄 살포보다 위험기반 처방과 저위해 소재를 결합한 서비스 수요가 확대되고 있음.

○ 글로벌 기업의 통합 포트폴리오 경쟁

– 주요 글로벌 농화학 기업은 화학농약, 생물학적 방제제, 종자처리와 디지털 처방을 결합한 프로그램형 솔루션을 확대하고 있음.

– 경쟁우위는 신규 활성성분뿐 아니라 발효 · 정제 생산성, 균주 · 원료 표준화, 저장성, 혼용성, 등록자료 패키지와 유통 · 사후서비스에서 결정됨.

– SIGS · 센서 · AI 분야 스타트업은 독자 판매보다 글로벌 농화학 · 종자 · 장비기업과의 라이선스, 공동개발, 플랫폼 연계를 통해 시장 진입기간을 단축하는 경향이 있음.

○ 데이터 · 센서 · 규제서비스의 산업화

– 위험지도와 처방은 구독형 소프트웨어, 센서는 임대 · 유지보수, 드론은 계약방제, 신규 방제제는 등록 · 수출 규제지원과 결합된 복합 비즈니스 모델로 발전할 수 있음.

– 현장 데이터와 실제 방제성과를 보유한 기업이 모델 개선과 제품 재등록 · 시장확대에서 우위를 가지므로 데이터 권리와 상호운용성이 산업 경쟁의 핵심 자산이 됨.

1.2 국내 산업 동향

○ 공공 예찰 · 연구 · 제조 기반이라는 국내 강점

– 국내는 NCPMS와 장기간 축적된 공공 예찰 · 기상자료, 전국 농업기술센터 네트워크, 농약제조 · 유통 및 포장시험 기반을 보유하여 국가형 정밀 방제 플랫폼을 구축할 잠재력이 큼.

– RNAi 농생명 제품의 제도 진입 선례와 바이오전자코 · SERS 등 나노센싱 원천기술은 SIGS와 VOC 분야의 차별화 자산으로 평가됨.
– 농약기업 · 스마트팜 · 드론 · 영상진단 스타트업이 존재하지만 데이터와 시험포장, 제품화 · 등록지원이 분절되어 공동 사업모델로 연결되는 사례는 아직 제한적임.

○ 분야별 산업화 수준과 병목
– AI 예측 · 진단은 공공서비스와 앱 중심의 초기 시장이 형성되었으나 공공부문과 민간에 의한 정확도 검증 · 책임범위 · 서비스판매 · 지속적 유지보수와 같은 가치체인 별 역할분담을 통한 지속가능한 사업모델이 필요함.
– 미생물 · 천연물 방제소재는 연구와 제품이 축적되어 있으나 복합제형의 장기 저장성, 원가 · 대량생산, 기존 제품과의 혼용성 및 전용 등록경로가 부족함.
– 작물용 SIGS와 VOC 센서는 실증 · 등록 · 표준화 단계가 초기이므로 공공 실증 · 등록지원과 기업 공동개발을 통해 첫 시장과 레퍼런스를 형성할 필요가 있음.

○ 초기시장과 확산 경로
– 시설원예 · 수출작물 · 특용작물은 환경데이터 수집이 용이하고 저농약 · 품질 프리미엄이 커서 정밀 방제기술의 초기 사업화와 비용편익 검증에 적합함.
– 이후 광역 식량작물은 지역 위험지도, 공동방제 · 보험 · 정책지원과 결합하여 규모의 경제를 확보하고, 검역 · 저장 · 유통 분야로 센서와 진단 서비스의 적용범위를 확대할 수 있음.
– 즉, 초기시장에서는 기술별 독립 판매보다 계약방제, 센서 임대, 진단비와 방제제 공급을 묶은 서비스가 실현가능한 옵션 중 하나임. 특히 농가가 장비를 직접 구매하기 어려운 경우 지자체 · 농협 · 방제단이 서비스 구매자가 되고 농업인이 최종 이용자가 되는 민간 플랫폼 연계 공공 보급(B2G2F 또는 B2B2F) 형태도 검토할 필요가 있음

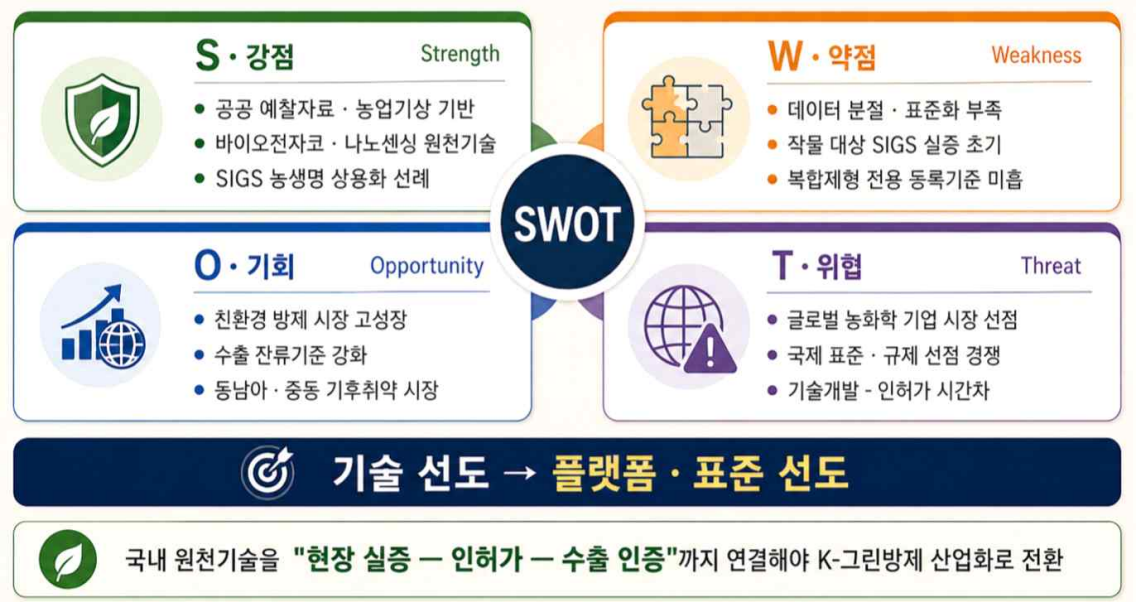


그림 17. 국내 정밀 병해충 관리 분야의 전략적 기회와 한계

2 국내외 정책 동향

2.1 국외 정책 동향

○ EU: IPM과 저위해 방제수단 중심의 전환

– Farm to Fork 전략은 2030년 농약 사용 · 위험 감축 목표를 제시했으며 법적 구속력이 있는 SUR 제안은 2024년 철회되었으나, Directive 2009/128/EC에 따른 IPM과 비화학적 수단 우선 원칙은 유지되고 있음(European Parliament and Council, 2009; European Commission, 2020, 2024).

– 생물학적 활성물질의 승인 촉진, 잔류허용기준과 환경위해성 평가 강화는 수출 농산물과 국내 방제제 개발 모두에 국제 정합성을 요구함.

○ 미국: 생물농약 등록체계와 RNA 방제제 선례

– 미국 EPA는 생물농약 전담 심사체계를 운영하며, 2023년 Colorado potato beetle을 표적으로 하는 살포형 dsRNA 활성성분 Ledprona를 등록하여 RNA 방제제의 효능 · 노출 · 비표적 평가 선례를 제시함(U.S. EPA, 2023).

○ OECD · 국제기구: 위해성 평가와 One Health

– OECD는 2020년 환경, 2023년 인체 건강 관점의 외부 처리 RNAi 농약 평가 고려사항을 발간하여 국가별 자료요건과 시험전략의 공통 기반을 제공함(OECD, 2020, 2023).

– FAO · UNEP · WHO · WOAH의 One Health Joint Plan of Action은 식물 · 동물 · 인체 · 환경 건강의 연계를 강조하며, 병해충 · 약제저항성 · 기후 · 검역 자료를 부처 간 공유할 정책적 근거를 제공함(FAO et al., 2022).

2.2 국내 정책 · 제도 동향

○ NCPMS 고도화와 국가 디지털 예찰 · 경보

– 농촌진흥청 NCPMS는 병해충 예찰결과와 발생정보, 예측지도, 일부 방제결정지원, 기후변화 영향정보, AI 영상진단 및 OpenAPI를 제공하는 국가 병해충 정보 기반임(농촌진흥청, 2026).

– 향후에는 조사자료의 품질관리, 기상 · 토양 · 작물생육 · 검역 · 약제저항성 자료의 표준 연계, 모델별 적용범위와 외부검증 결과 공개, 방제성과 환류 기능을 단계적으로 보완할 필요가 있음.

○ 스마트농업 기본계획과 현장 인프라

– 농림축산식품부의 제1차 스마트농업 육성 기본계획(2025~2029)은 스마트농업 확산, 데이터 · 기술 기반과 전문인력 · 산업 생태계 조성을 추진하고 있어 정밀 병해충 관리의 센

서 · AI · 서비스 확산과 연계 가능함(농림축산식품부, 2025).

○ 친환경 농자재 · 수출전략형 작물보호제 R&D

– 친환경 농자재와 신작물보호제 관련 R&D는 소재 발굴에서 제형, 효능, 안전성, 등록과 수출 자료 구축까지 이어지는 후속 사업구조로 설계할 필요가 있음.

– 제4회 농업기술전망대회 토론에서 제안된 2027~2031년 병해충 통합데이터 기반 디지털 예찰 · 경보체계는 기존 시스템과 기관별 데이터를 연계하는 중장기 R&D 기획안으로 구체화할 필요가 있음(제4회 농업기술전망대회, 2026).

○ 제도 · 인력 · 지원체계 개선

– 복합제형 · SIGS · 센서 기반 처방에 적합한 전용 등록평가기준과 사전상담, 공공 시험포장 · 기준물질 · 분석법, 규제과학 전문인력을 확충해야 함.

– 지역 예찰 · 지도기관의 디지털 활용역량, 농업인 교육과 사후지원, 공공조달 · 시범사업을 연계하여 연구성과가 일회성 실증에 그치지 않고 운영서비스로 정착하도록 해야 함.



그림 18. 정밀 병해충 관리 산업 · 정책 환경 개요

Ⅴ. 결론 및 제언

1 주요 동향 및 시사점

○ 데이터 기반 선택적 개입으로의 구조적 전환

– 정밀 병해충 관리는 기후변화, 외래 병해충 유입, 약제저항성, 규제 강화와 농촌 인력 감소에 대응하여 관행적 일괄 살포를 필요한 곳 · 시점 · 대상에만 개입하는 체계로 전환하는 과정임. 이는 단순한 방제기술 개선을 넘어 농업생산의 안정성과 위기 대응력을 높이는 국가 농업 회복력 기술임.

– 핵심은 병해충 발생 이후 일률적으로 대응하는 방식에서 벗어나 기상 · 예찰 · 작물생육 · 영상 · 센서자료를 이용해 위험을 조기에 판단하고, 발생 가능성과 피해수준에 따라 방제 여부 · 시기 · 수단 · 용량을 차등화하는 것임.

– 다만 화학농약의 전면 대체보다는 IPM 원칙 아래 화학농약, 생물농약, 천적, 경종적 방제, SIGS와 VOC 조기예측 등을 작물 · 지역 · 위험수준에 맞게 조합하여 생산성과 품질을 유지하면서 사용량과 위해도를 함께 낮추는 전략이 현실적임.

○ 개별 기술보다 통합 플랫폼 역량이 경쟁력

– 향후 경쟁력은 단일 AI 모델의 정확도나 신규 방제소재의 실험실 효능보다 데이터 수집–위험예측–현장확인–처방–정밀살포–효과평가를 연결하는 운영역량에 의해 결정될 전망임.

– 방제소재도 후보 발굴뿐 아니라 제형, 생산공정, 저장 안정성, 혼용성, 현장 실증, 등록과 유통이 연계되어야 제품으로 정착할 수 있음. 센서 역시 검출감도보다 표준시료, 교정, 환경보정, 데이터 분석과 경보서비스의 통합이 중요함.

– 실제 방제결과, 실패사례, 오경보, 미탐과 음성자료를 AI 모델과 제품개발에 환류하는 순환학습이 이루어져야 지역 · 연도 · 품종과 기상조건 변화에 적응할 수 있음.

– 국가 플랫폼은 개별 기술과 민간 서비스를 대체하기보다 공통 데이터, 표준, 검증체계와 연계기반을 제공하는 방향이 적절함.

○ 국내 강점과 전략적 공백

– 국내는 NCPMS와 공공 예찰자료, 농업기술센터 중심의 지역 예찰 · 지도체계, 농약산업과 스마트농업 인프라를 보유하고 있어 국가 단위 정밀 병해충 관리체계를 구축할 기본 여건이 양호함.

- RNAi 제품의 제도 진입 선례, 미생물 · 천연물 연구기반, 바이오전자코와 나노센싱 원천기술도 화학-생물 융합 방제, SIGS와 VOC 조기예측 분야의 강점임.
- 반면 데이터 표준과 품질관리, 독립 외부검증, 다지역 · 다년 실증, 제형 · 대량생산, 전용 등록평가기준과 수출인증의 연결은 상대적으로 취약함. 개별 연구성과가 시제품이나 단기 실증에 머무르고 기업 제품화와 운영서비스로 이어지지 못하는 문제도 지속됨.
- 이에 따라 NCPMS, 공통 시험포장, 표준시료 · 기준물질, 등록지원과 산업화를 연계한 공통 플랫폼 중심의 투자가 필요하며, 기술개발 초기부터 기업 · 규제기관 · 현장 사용자가 함께 참여해야 함.

○ 농업 · 환경 · 산업에 대한 복합 효과

- 정밀 예찰과 적기 방제는 병해충 피해와 수량 변동을 줄여 생산성과 농가소득을 안정시키고, 돌발 · 외래 병해충 발생 시 방제자원을 고위험 지역에 우선 배분하도록 지원함.
- 필요한 지점과 시기에만 방제하면 농약 사용량, 살포횟수, 작업시간과 비용을 줄일 수 있으며, 비표적 생물과 토양 · 수계에 대한 부담도 완화할 수 있음. 이는 농산물 안전성과 수출 경쟁력 향상에도 기여할 수 있음.
- 산업적으로는 데이터 플랫폼, AI 진단 · 예측, 스마트트랩과 VOC 센서, 드론 · 자동살포장비, 친환경 복합제형, RNA 방제제, 시험 · 분석 · 등록서비스 등 새로운 시장을 창출할 수 있음.
- 장기적으로는 디지털 처방, 친환경 농자재, 센서와 정밀살포를 작물별 패키지로 구성하여 국제표준과 현지 실증을 갖춘 K-그린방제 서비스로 확장할 수 있음.

○ One Health와 투명한 위험소통

- 병해충 발생과 약제저항성은 검역, 토양 · 수계, 비표적 생물, 식품안전과 농작업자 건강에 영향을 줄 수 있으므로 One Health 관점의 통합관리가 필요함.
- 병해충 · 약제저항성 · 농약 사용과 잔류 · 검역 · 환경자료를 연계하면 방제효과와 환경 · 건강 영향을 함께 평가하고 지역별 약제 선택과 저항성 관리에도 활용할 수 있음.
- AI 예측과 센서 경보는 불확실성을 완전히 제거할 수 없으므로 발생확률, 예측범위, 오경보 · 미탐 가능성과 권고행동을 이해하기 쉽게 제시해야 하며, 고위험 경보에는 현장조사와 분자진단을 포함한 확인절차가 필요함.
- 복합제형, SIGS와 나노전달체도 친환경성이나 저독성을 전제하기보다 제품별 효능, 노출경로, 비표적 영향과 환경 중 분해특성을 투명하게 평가해야 사회적 신뢰와 수용성을 확보할 수 있음.

2 정책 및 R&D 전략

2.1 R&D 투자 방향

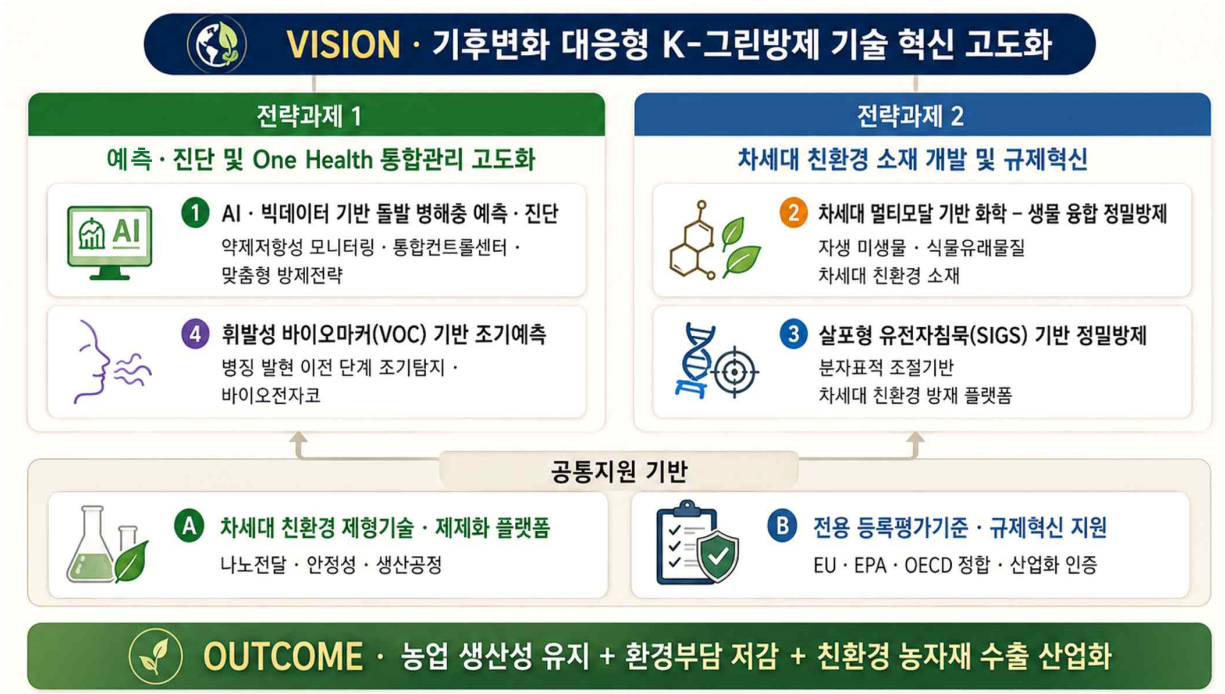


그림 19. 정밀 병해충 관리 R&D 투자체계와 공통지원 기반

○ 4대 핵심기술과 2대 공통기반의 미션형 투자

– ① AI · 빅데이터 예측 · 진단, ② 화학–생물 융합, ③ SIGS, ④ VOC를 핵심기술로 유지하고, A 친환경 제형 · 제제화 플랫폼과 B 등록평가 · 규제혁신을 공통기반으로 구축함.

– 핵심기술별 독립과제만 지원하면 동일한 제형 · 실증 · 등록 인프라가 중복되고 사업화 병목이 반복되므로, 공통 플랫폼을 다수 과제가 활용하는 허브–스포크 구조가 필요함.

○ 단계별 R&D 포트폴리오

– 단기에는 데이터 표준 · 공개 DB, 주요 작물 예측모델, 생물소재 · 표적유전자 · VOC 라이브러리와 원형기술을 확보하고 외부검증 가능한 시험법을 마련함.

– 중기에는 시설원예 · 수출작물 · 광역 식량작물에서 다지역 · 다년 실증을 수행하고, 예측–진단–처방–정밀살포–성과평가를 연결한 운영형 서비스를 전국 단위 위험지도로 확대함.

– 적용환경에 따라 서비스 모델을 차별화함. 광역 식량작물은 기상 · 원격탐사 · 스마트트랩 기반 권역 위험지도와 공동방제를 중심으로 하고, 시설원예는 영상 · 환경 · VOC 센서를 활용한 근실시간 탐지와 정밀처방을 적용함. 외래 · 희귀 병해충은 이상징후 탐지와 검역 · 예찰 전문가의 확인을 결합하여 조사 우선순위와 초기 대응을 지원함.

– 장기에는 국가 예측–경보–정밀방제 운영체계와 국제표준 · 등록자료를 갖춘 글로벌 서비스 · 농자재 패키지로 확산함.

○ 성과지표의 전환

– AI 성과는 정확도뿐 아니라 경보 선행시간, 미탐 · 오경보 비용, 외부검증 범위와 실제 행동 변화로 평가함.

– 방제제는 방제효과, 유효성분 사용량 또는 처리횟수, 위해도, 저항성 관리효과, 저장성, 제조원가, 등록자료 완성도와 농가 채택률로 평가함. 산업성과는 제품 등록 · 출시, 반복구매, 해외 등록 · 수출, 표준화와 지식재산 확보 여부로 평가함.

AI · 빅데이터, 화학–생물 융합, SIGS, VOC의 4대 핵심기술을 공통 실증 · 제형 · 등록 기반과 연계하는 '미션형 R&D 체계'로 전환하고, 원천기술 개발부터 현장검증 · 제품화 · 등록까지 이어지는 단계적 투자에 집중함.

2.2 기술 확산 및 산업화 전략

○ 현장 수요 중심의 단계적 실증

– 시설원예 · 수출작물은 VOC · 영상센서와 저농약 복합제형 · SIGS를 통합 실증하고, 노지 식량작물은 위험지도 · 스마트트랩 · 드론 공동방제 중심으로 적용모델을 차별화함.

– 다지역 · 다년 무작위배치 · 반복시험과 가능한 범위의 평가자 맹검, 농가 참여형 실증을 통해 기상 · 운영자에 따른 변동성을 확인하고, 관행방제 · IPM 대비 비용편익과 사용 편의성을 검증함.

○ 기업 참여와 제품화 트랙의 조기 결합

– 연구 초기부터 기업이 목표원가 · 유통기한 · 포장 · 살포장비 · 유통채널을 제시하고, 공공기관은 기준물질 · 시험포장 · 등록자료와 사전 규제상담을 지원함.

– 우수 기술은 단계적으로 등록자료를 확보하고, 등록을 완료한 제품은 정책실증 · 혁신제품 · 공공조달 등을 통해 초기 수요를 형성하며, 사후 성과자료를 민간시장 확대에 활용함.

○ 서비스형 비즈니스 모델

– 위험지도 · 처방 구독, 센서 임대 · 교정, 계약방제, 성과기반 지불, 보험 · 수출인증 연계 등 제품과 데이터 서비스를 결합한 반복수익 모델을 개발함.

○ K–그린방제 수출 패키지

– 대상 작물 · 병해충 · 기후와 규제 적합성이 높은 해외시장을 선별하여 예측, 센서 · 진단, 친환경 방제제, 정밀살포, 교육과 등록자료를 현지형 패키지로 구성함.

– ODA · 국제공동실증과 현지 기업 · 연구기관 파트너십을 활용하고, VOC · 디지털 예측은 장

비 · 소프트웨어 서비스로, 복합제형 · SIGS는 현지 등록 · 제조 · 유통 협력으로 진입전략을 차별화함.

◘ **시설원예 · 수출작물을 중심으로 현장 실증과 초기 시장을 확보**하고, 기업 참여 · 등록지원 · 서비스형 비즈니스 모델을 조기에 결합하여 우수 기술이 **제품 · 서비스 및 K-그린방제 수출 패키지**로 이어지는 산업화 체계 구축이 필요함.

2.3 기반 구축 및 제도 개선

○ 국가 병해충 빅데이터 통합 플랫폼

– 농촌진흥청 · 검역본부 · 산림청 · 식품안전 · 민간 데이터를 공통 분류체계 · 메타데이터 · API로 연계하고, 데이터 품질 · 권한 · 보안 · 비식별화와 장기 운영재원을 명확히 함.

– NCPMS에 모델 등록 · 검증 · 배포 · 갱신 기능을 마련하고, 모델별 적용 작물 · 지역 · 병해충, 학습데이터, 외부검증 결과, 예측 불확실성 및 변경이력을 관리함. 성능저하가 확인된 모델은 재검증 또는 재학습하도록 국가 예찰용 AI 운영관리 절차를 구축함.

○ 전용 등록 · 평가와 규제과학 기반

– 화학-생물 복합제형과 SIGS의 효능 · 비표적 · 환경영향 · 잔류 · 전달체 평가기준을 마련하고 OECD · EPA · EU 등 국제 자료요건과 정합성을 확보함.

– 신기술별 사전상담, 단계별 자료제출, 공공 시험기관 · 표준물질 · 분석법과 해외 등록지원 플랫폼을 구축하여 개발-등록 간 공백을 단축함.

○ 전문인력 · 교육 · 지역 운영체계

– 병리 · 곤충 · 미생물 · 제형 · 센서 · AI · 데이터 · 규제과학을 결합한 융합형 학위 · 재교육 과정과 현장 예찰전문가의 경력체계를 마련함.

– 농업인과 지도 · 방제기관에는 경보 해석, 현장확인, 안전사용, 데이터 기록 교육과 지속적 기술지원을 제공함.

○ 범부처 거버넌스와 지속가능한 운영

– 돌발 · 외래 병해충에 대한 범부처 협의 · 대응체계를 마련하여 예찰 · 검역 · 연구 · 현장대응의 역할과 경보 발령 · 책임체계를 명확히 하고 One Health 자료연계를 단계적으로 확대함.

– 플랫폼을 단기 구축사업으로 종료하지 않고 데이터 품질, 모델 갱신, 센서 교정, 보안과 사용자 지원을 위한 안정적 운영예산을 확보해야 함.

◘ **NCPMS를 중심으로 병해충 데이터와 AI 모델의 표준·검증·갱신 체계를 구축**하고, 복합제형·SIGS 등 신기술에 적합한 **등록·평가기준과 범부처 운영체계**를 마련하여 연구개발부터 현장 적용까지 지속적으로 지원할 제도적 기반이 필요함.

참고문헌

○ 농림축산검역본부. (2025). 세계 최초 꿀벌 낭충봉아부패병 유전자치료제 '허니가드-R액' 상용화 [보도자료, 2025.8.12.].

○ 농림축산식품부. (2025). 제1차 스마트농업 육성 기본계획(2025~2029).

○ 농촌진흥청. (2026). 국가농작물병해충관리시스템(NCPMS) (접속일: 2026.7.28.).

○ 제4회 농업기술전망대회. (2026). 정밀 병해충 관리 분야 종합토론 의견 취합자료 [내부자료].

○ 제놀루션. (2026). 허니가드-R액 조달청 혁신제품 지정 [기업 공식 홈페이지] (접속일: 2026.7.28.).

○ Chen, C., Imran, M., Feng, X., Shen, X., & Sun, Z. (2025). Spray-induced gene silencing for crop protection: Recent advances and emerging trends. Frontiers in Plant Science, 16, 1527944. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1527944

○ Choi, Y. S., Son, W. K., Kwak, H., Park, J., Choi, S., Sim, D., Kim, M. G., Kimm, H., Son, H., Jeong, D. H., & Kwak, S.-Y. (2025). Real-time monitoring of volatile organic compound-mediated plant intercommunication using surface-enhanced Raman scattering nanosensor. Advanced Science, 12(7), 2412732. https://doi.org/10.1002/advs.202412732

○ Delfani, P., Thuraga, V., Banerjee, B., & Chawade, A. (2024). Integrative approaches in modern agriculture: IoT, ML and AI for disease forecasting amidst climate change. Precision Agriculture, 25, 2589-2613. https://doi.org/10.1007/s11119-024-10164-7

○ European Commission. (2020). A Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system. COM(2020) 381 final.

○ European Commission. (2024). Withdrawal of Commission Proposals. C/2024/3117. Official Journal of the European Union.

○ European Parliament and Council. (2009). Directive 2009/128/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action to achieve the sustainable use of pesticides. Official Journal of the European Union, L 309, 71-86.

○ FAO, UNEP, WHO, & WOAH. (2022). One Health Joint Plan of Action (2022-2026):

Working together for the health of humans, animals, plants and the environment. https://doi.org/10.4060/cc2289en

○ Folorunso, E. A., Bohata, A., & Mraz, J. (2024). Factors influencing pesticide–biocontrol agent compatibility: A metadata–based review. Pesticide Biochemistry and Physiology, 206, 106204. https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2024.106204

○ Galli, M., Feldmann, F., Vogler, U. K., & Kogel, K.–H. (2024). Can biocontrol be the game–changer in integrated pest management? A review of definitions, methods and strategies. Journal of Plant Diseases and Protection, 131(2), 265–291. https://doi.org/10.1007/s41348–024–00878–1

○ Gan, Z., Zhou, Q., Zheng, C., & Wang, J. (2023). Challenges and applications of volatile organic compounds monitoring technology in plant disease diagnosis. Biosensors and Bioelectronics, 237, 115540. https://doi.org/10.1016/j.bios.2023.115540

○ Hamrouni, R., Regus, F., Farnet Da Silva, A.–M., Orsiere, T., Boudenne, J.–L., Laffont–Schwob, I., Christen, P., & Dupuy, N. (2025). Current status and future trends of microbial and nematode–based biopesticides for biocontrol of crop pathogens. Critical Reviews in Biotechnology, 45(2), 333–352. https://doi.org/10.1080/07388551.2024.2370370

○ Lee, S., Kim, J., Kim, D., Park, H., Myoung, S., Han, J., Park, C., Kim, Y., Choi, C., & Lee, G. (2024). Wearable volatile organic compound sensors for plant health monitoring. Advanced Sustainable Systems, 8(9), 2300634. https://doi.org/10.1002/adsu.202300634

○ Li, X.–H., Li, M.–Z., Li, J.–Y., Gao, Y.–Y., Liu, C.–R., & Hao, G.–F. (2024). Wearable sensor supports in–situ and continuous monitoring of plant health in precision agriculture era. Plant Biotechnology Journal, 22(6), 1516–1535. https://doi.org/10.1111/ pbi.14283

○ Lim, S., Jeon, H., Kim, W., Kim, M., & Son, H. (2026). Spray–induced gene silencing as a novel strategy for managing dollar spot in creeping bentgrass caused by Clarireedia jacksonii. Pest Management Science, 82(4), 3993–4006. https://doi.org/10.1002/ps.70519

○ Madden, L. V. (2025). Reflections on the past, present, and future of quantitative plant disease epidemiology. Annual Review of Phytopathology, 63, 1–22. https://doi.org/10.1146/annurev–phyto–031725–033728

○ Mannaa, M., Kil, E.-J., Park, I., & Seo, Y.-S. (2026). Spray-induced gene silencing for plant disease control: Mechanistic basis and deployment-oriented design. Frontiers in Plant Science, 17, 1829123. https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1829123
○ Méndez, I., Barra, P. J., Larama, G., & Durán, P. (2026). Does climate change increase disease severity caused by crop pathogens? A systematic review. Plant Disease. Advance online publication. https://doi.org/10.1094/PDIS-03-25-0573-SR
○ Murphy, K. M., Ludwig, E., Gutierrez, J., & Gehan, M. A. (2024). Deep learning in image-based plant phenotyping. Annual Review of Plant Biology, 75, 771-795. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-070523-042828
○ OECD. (2020). Considerations for the Environmental Risk Assessment of the Application of Sprayed or Externally Applied ds-RNA-Based Pesticides. Series on Pesticides and Biocides, No. 104. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/576d9ebb-en
○ OECD. (2023). Considerations for the Human Health Risk Assessment of Externally Applied dsRNA-Based Pesticides. Series on Pesticides and Biocides, No. 110. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/54852048-en
○ Shoaib, M., Sadeghi-Niaraki, A., Ali, F., Hussain, I., & Khalid, S. (2025). Leveraging deep learning for plant disease and pest detection: A comprehensive review and future directions. Frontiers in Plant Science, 16, 1538163. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1538163
○ Singh, B. K., Delgado-Baquerizo, M., Egidi, E., Guirado, E., Leach, J. E., Liu, H., & Trivedi, P. (2023). Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward. Nature Reviews Microbiology, 21(10), 640-656. https://doi.org/10.1038/s41579-023-00900-7
○ Spada, M., Pugliesi, C., Fambrini, M., Palpacelli, D., Caneo, A., & Pecchia, S. (2025). Spray-induced gene silencing (SIGS): Nanocarrier-mediated dsRNA delivery improves RNAi efficiency in the management of lettuce gray mold caused by Botrytis cinerea. Agronomy, 15(1), 194. https://doi.org/10.3390/agronomy15010194
○ U.S. Environmental Protection Agency. (2023). EPA Registers Novel Pesticide Technology for Potato Crops [Press release, 2023.12.22.].
○ Vermeeren, S., Witzler, M., Makarow, R., Engelhard, C., & Kaul, P. (2025). Multivariate evaluation method for the detection of pest infestations on plants via VOC analysis using gas chromatography mass spectrometry. Scientific Reports, 15, 25858. https://doi.org/10.

1038/s41598-025-11607-5

○ Vryzas, Z., Arts, G. H. P., Dalakouras, A., Fragkoulis, G., Guijarro, B., Karazafeiris, E., Karpouzas, D., Menkissoglu-Spiroudi, U., Papadakis, E.-N., Papadopoulou, K. K., Patino-Ropero, M. J., Polst, B., Alonso-Prados, J. L., Steenbergh, A., Tsaloumi, S., & Tsampoula, A. (2026). Fit-for-purpose risk assessment for low-concern active substances and uses. EFSA Supporting Publications, 23(1), 9791E. https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2026.EN-9791

○ Xi, Y., Akram, S., Yang, X., Hu, B., Saddique, M. A. B., Guan, G., Tian, D., Luo, X., & Ren, M. (2025). Innovative strategies for plant protection: The combination of spray-induced gene silencing and nanotechnology. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 73(28), 17344-17357. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5c02537

9. 친환경·저탄소 축산

친환경 정밀축산(Eco-friendly Precision Livestock Farming)으로 전환

김명후(한국축산학회, 서울대학교) / **오준표**(한국축산학회, 서울대학교) /
박규현(한국축산환경학회, 강원대학교)

Ⅰ. 서론

1 기술분야 개요

○ 지구온난화 심화와 농축산부문의 온실가스 감축 요구 확대

– 산업화 이후 지속되고 있는 지구 평균기온 상승은 인류의 생존과 생태계의 지속가능성을 위협하는 핵심 요인으로 작용하고 있으며, 주요 원인으로 인위적 온실가스(Anthropogenic Greenhouse Gas, GHG) 배출이 지목되고 있음.

– 국제사회는 기후변화 대응을 위해 국제협약과 국가별 온실가스 감축목표(Nationally Determined Contribution, NDC)를 지속적으로 강화하고 있으며, 이에 따라 농축산부문에서도 온실가스 배출 저감과 환경부하 관리에 대한 정책적 · 산업적 · 사회적 요구가 확대되고 있음.

– 축산업은 식량과 단백질을 공급하는 핵심 산업인 동시에 생물학적 발효, 분뇨 발생 및 자원 순환 과정에서 다양한 온실가스와 환경오염물질을 배출하는 산업적 특성을 지님.

– 축산업의 지속가능성을 확보하기 위해서는 생산성 중심의 기존 발전방식에서 환경성과 자원 효율성을 함께 고려하는 생산체계로의 전환이 요구됨.

○ 축산업에서 발생하는 주요 환경부하

– 반추가축의 소화과정에서는 반추위 내 장내발효(Enteric fermentation)에 의해 메탄(CH_4)이 발생하며, 가축분뇨의 저장 · 처리 및 농경지 환원 과정에서는 메탄과 아산화질소(N_2O)

가 배출됨.

- 가축분뇨에 포함된 질소는 저장과 처리 과정에서 암모니아(NH_3)로 휘산되거나, 토양에 투입된 이후 질산화와 탈질 과정을 거치면서 아산화질소로 전환될 수 있음. 과잉 양분의 농경지 투입은 수질오염, 토양 부영양화 및 악취 문제를 유발할 가능성이 있음.
- 사료작물 생산, 원료사료 가공과 운송, 축사 에너지 사용, 가축 사육 및 축산물 가공 · 유통 과정에서 발생하는 직 · 간접 탄소배출도 축산물의 환경성과 국제 경쟁력을 결정하는 주요 요인으로 작용함.
- 축산부문의 환경부하는 개별 배출원에 한정되지 않고 '사료-가축-분뇨-토양 및 에너지'로 이어지는 가치사슬 전반에서 발생하므로, 특정 공정만을 개선하는 방식보다 전 과정을 통합적으로 관리하는 접근이 필요함.

표 1. 친환경 · 저탄소 축산의 주요 환경부하와 대응 기술

발생단계	주요 환경부하	주요 대응기술
사료 생산 및 조달	사료작물 생산 및 운송 배출, 수입사료 의존	부산물 사료화, 조사료 자급, 저탄소 원료 선택
가축 사육	장내발효 메탄, 낮은 사료 및 질소 이용효율	저메탄 사료, 질소저감 사료, 정밀영양사양기술, 생산효율 향상 기술
분뇨 저장 및 처리	메탄, 아산화질소, 암모니아, 악취 및 수질오염	퇴비화 개선, 정화처리, 바이오가스, 고체연료화, 바이오차
탄소관리	활동자료와 감축효과 한계 존재	센서, AI, Tier 2/3, LCA, MRV
유통시장	환경성과의 가격 미반영	저탄소 인증, 탄소라벨, Scope 3, 4, 탄소크레딧

○ 친환경 · 저탄소 축산의 정의와 범위

- 친환경 · 저탄소 축산은 가축의 육종, 사료 생산 및 급여, 사양관리, 가축분뇨 처리와 자원화, 축산물 생산 및 유통에 이르는 전 과정에서 온실가스와 환경오염물질의 배출을 최소화하고, 자원과 에너지의 이용효율을 향상시켜 지속가능한 축산 생산체계를 구현하기 위한 융합기술 분야임.
- 단순히 축산업에서 발생하는 환경부하를 사후적으로 처리하는 기술이 아니라, 생산성과 경제성을 유지 · 향상하면서 탄소와 질소 배출을 저감하고 자원순환을 촉진하는 생산시스템 전환 기술임.
- 친환경 · 저탄소 축산은 생산단계별 온실가스 발생원을 통합적으로 관리하고 축산물 기능단위 생산량당 탄소배출량을 최소화하는 것을 핵심 목표로 함.
- 이를 위해 사료 투입량과 영양소 공급을 정밀화하고, 가축의 생산효율과 복지를 향상시키며, 가축분뇨를 오염원이 아닌 에너지 · 비료 · 탄소자원으로 가치를 높이는(업사이클링) 기술적 접근이 요구됨.

○ 친환경 · 저탄소 축산의 핵심 기술체계

– 친환경 · 저탄소 축산 기술은 **육종 · 사료 · 영양, 가축 생산효율, 분뇨 처리와 자원순환, 탄소 모니터링 및 시장 가치화 기술**로 구성됨.

– 첫째, **친환경 사료 투입 최적화 기술**은 저메탄 사료, 질소저감 사료, 고품질 조사료, 농식품 부산물 사료화 및 정밀 사료배합 등을 통해 축산 생산단계로 유입되는 탄소와 질소를 효율적으로 관리하는 기술임.

– 둘째, **가축 생산효율 최적화 기술**은 개체별 영양 요구량에 기반한 정밀급여, 사료효율 향상, 사육기간 단축, 생애 생산성 개선 및 저탄소 형질 개량 등을 통해 생산물 단위당 환경부하를 감소시키는 기술임.

– 셋째, **분뇨 환경부하 저감 및 에너지화 기술**은 퇴 · 액비화 공정 개선, 정화처리, 혐기소화, 바이오가스 생산, 고체연료화, 바이오차 및 양분 회수 등분뇨 유래 온실가스와 오염물질을 저감 및 자원순환을 실현하는 기술임.

– 넷째, **디지털 탄소 · 자원 모니터링 및 통합관리 기술**은 농장과 시설에서 발생하는 활동자료를 센서와 정보통신기술을 통해 수집하고, IPCC 인벤토리, 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA), 온실가스 프로토콜 및 측정 · 보고 · 검증(Measurement, Reporting and Verification, MRV) 체계와 연계하여 환경성과를 정량화하는 기술임.

– 다섯째, **친환경 · 저탄소 축산 가치창출 기술**은 저탄소 축산물 인증, 탄소발자국 표시, 공급망 온실가스 관리, 탄소크레딧 및 ESG 경영과 연계하여 축산농가와 기업의 감축성과를 경제적 가치로 전환하는 기술임.

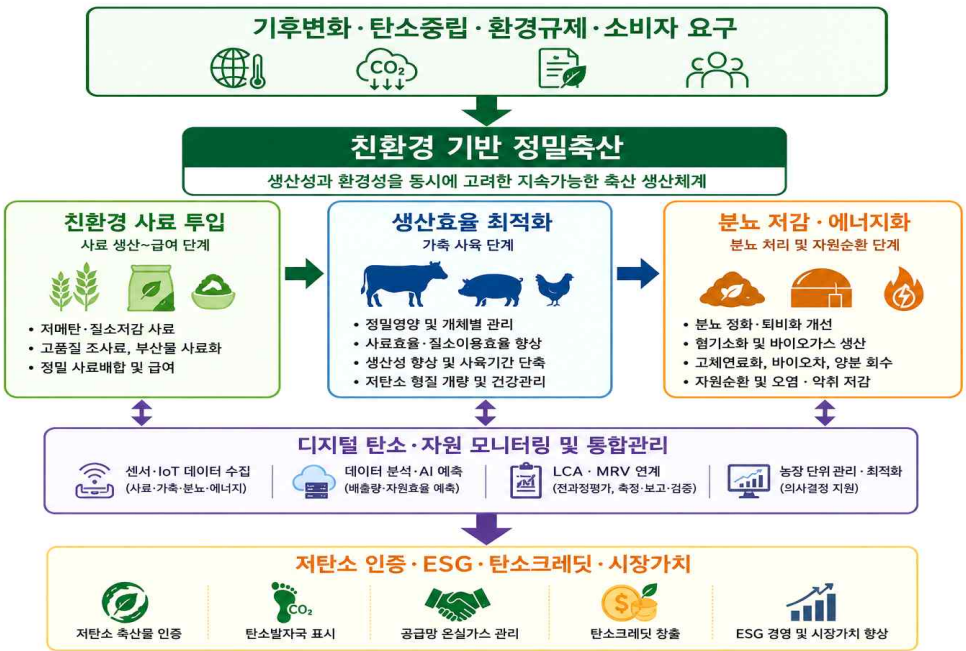


그림 1. 친환경 · 저탄소 축산의 핵심 기술 체계

○ 디지털 · 바이오 기술 융합에 따른 기술 발전

– 친환경 · 저탄소 축산 기술은 초기의 분뇨 처리와 개별 배출원 저감 중심에서 벗어나, 최근에는 디지털 기술과 바이오기술이 융합된 정밀축산(Precision Livestock Farming) 기반 통합 탄소관리 기술로 발전하고 있음.

– 반추위 미생물과 발효대사를 조절하는 저메탄 사료, 필수아미노산 균형을 활용한 질소저감 사료, 생산성 향상과 사육기간 단축기술, 농식품 부산물의 사료자원화 기술은 사료와 가축 단계의 환경부하를 저감하는 핵심기술로 부상하고 있음.

– 사료섭취량, 체중, 산유량, 건강상태 및 분뇨 발생량과 같은 현장 데이터를 센서와 인공지능으로 수집 · 분석함으로써 농장과 개체 단위의 탄소배출량을 예측하고, 최적의 사료급여와 분뇨 처리방식을 제안하는 정밀관리 기술로 발전하는 추세임.

– 농장단위 온실가스 모니터링, LCA 및 MRV 기술과의 연계를 통해 개별 저감기술의 효과를 객관적으로 검증하고, 이를 국가 온실가스 인벤토리, 저탄소 축산물 인증 및 탄소시장에 반영할 수 있는 기반이 확대중임.

○ 친환경 기반 정밀축산으로의 전환

– 기존 축산기술이 생산량 증대와 생산비 절감을 중심으로 발전하였다면, 친환경 · 저탄소 축산은 생산효율 향상과 환경부하 저감을 동시에 달성하는 지속가능한 생산체계 구축을 목표로 함.

– 사료 이용효율과 질소 이용효율 향상, 장내발효 및 분뇨 유래 온실가스 저감, 농식품 부산물 활용 확대, 가축분뇨의 에너지화 및 양분순환 기술을 통합적으로 적용함으로써 환경성 · 경제성 · 사회적 수용성을 함께 확보하는 것이 핵심임.

– 특히 친환경 · 저탄소 축산은 개별 기술의 단순한 집합이 아니라, 사료 · 가축 · 분뇨 · 에너지 · 탄소 데이터를 상호 연결하고 현장에 환류하여 생산과 환경을 동시에 최적화하는 친환경 기반 정밀축산으로 정의할 수 있음.

– 친환경 기반 정밀축산은 국가 온실가스 감축목표 이행, 축산농가의 생산비 절감과 신규 소득 창출, 저탄소 축산물 시장 확대, 지역단위 경축순환 및 지속가능한 축산업을 견인하는 미래 핵심기술 분야로 발전할 전망임.

2 기술 도입 배경

2.1 농업환경 변화

○ 기후변화와 탄소중립 시대의 도래

– 기후변화는 농업 생산환경 전반에 가장 큰 영향을 미치는 글로벌 메가트렌드로 자리 잡고 있으며,

축산업 역시 온실가스 감축과 지속가능한 생산체계 구축이라는 새로운 전환기를 맞이하고 있음.

- 이상고온, 폭염, 집중호우 및 가뭄과 같은 기상이변의 발생 빈도와 강도가 증가하면서 가축의 생산성 저하, 번식성적 감소 및 질병 발생 위험이 확대되고 있으며, 조사료 생산성과 사료원료의 안정적 공급 또한 기후변화의 영향을 크게 받고 있음.
- 국제사회는 파리협정, 글로벌 메탄 서약 및 국가온실가스감축목표(NDC)를 중심으로 농축산부문의 온실가스 감축을 강화하고 있으며, 우리나라 역시 「2050 탄소중립」과 「2030 국가온실가스 감축목표(NDC)」를 통해 축산부문의 메탄과 아산화질소 감축을 주요 정책과제로 추진하고 있음.
- 이와 함께 세계적인 단백질 식품 수요 증가, 탄소중립(Net-Zero) 대응, 환경 · 사회 · 지배구조(ESG) 경영 확대 및 친환경 축산물에 대한 소비자 요구 증가는 축산업의 가치창출 구조를 근본적으로 변화시키고 있음.
- 이에 따라 친환경 · 저탄소 축산기술은 환경규제에 대응하기 위한 선택적 기술이 아니라 축산업의 지속가능성과 국제 경쟁력을 확보하기 위한 필수 기술로 인식되고 있음.

○ 농업 노동력 감소와 생산구조 변화

- 국내 농업은 농촌 인구 감소와 고령화가 지속되면서 노동집약적 생산체계의 유지가 점차 어려워지고 있음. 특히 축산업은 사양관리, 질병관리, 분뇨 처리 및 환경관리 등 상시 노동력이 필요한 산업으로 노동력 부족에 따른 생산비 증가와 경영 효율성 저하가 심화되고 있음.
- 국제 곡물가격 변동, 에너지 비용 상승 및 사료원료 수입 의존도 증가는 축산 경영의 불확실성을 확대하고 있으며, 생산성 향상과 함께 자원 이용효율 향상 및 생산비 절감을 동시에 달성할 수 있는 생산기술의 중요성이 증가하고 있음.
- 이에 따라 데이터 기반의 정밀사양, 자동화 · 스마트축산 및 디지털 탄소관리 기술을 활용하여 노동력을 절감하고 생산성과 환경성을 동시에 향상시키는 친환경 기반 정밀축산으로의 전환이 요구되고 있음.

○ 축산업 패러다임 변화

- 기존 축산업은 생산량 증대와 생산비 절감을 중심으로 발전하여 왔으나, 최근에는 환경성(Environment), 경제성(Economy) 및 사회적 수용성(Social Acceptance)을 동시에 고려하는 지속가능한 생산체계 구축이 핵심 가치로 부상하고 있음.
- 특히 저메탄 사료, 질소저감 사료, 생산효율 향상, 가축분뇨 자원화 및 디지털 탄소관리 기술은 개별 환경기술이 아니라 축산 생산 전 과정의 탄소와 자원 흐름을 통합적으로 관리하는 핵심 기술로 발전하고 있음.
- 또한 축산농가의 감축활동은 저탄소 축산물 인증, 전과정평가(LCA), GHG 프로토콜, 탄소크레딧 및 ESG 경영과 연계되면서 환경성과를 새로운 경제적 가치로 전환하는 방향으로 확대되고 있음.

– 이러한 변화는 축산업이 단순히 많은 축산물을 생산하는 산업에서 벗어나, 생산효율, 환경부하, 자원순환 및 탄소가치를 동시에 관리하는 친환경 기반 정밀축산(Eco-friendly Precision Livestock Farming) 으로 전환되고 있음을 의미함.



그림 2. 친환경 · 저탄소 축산으로의 패러다임 전환

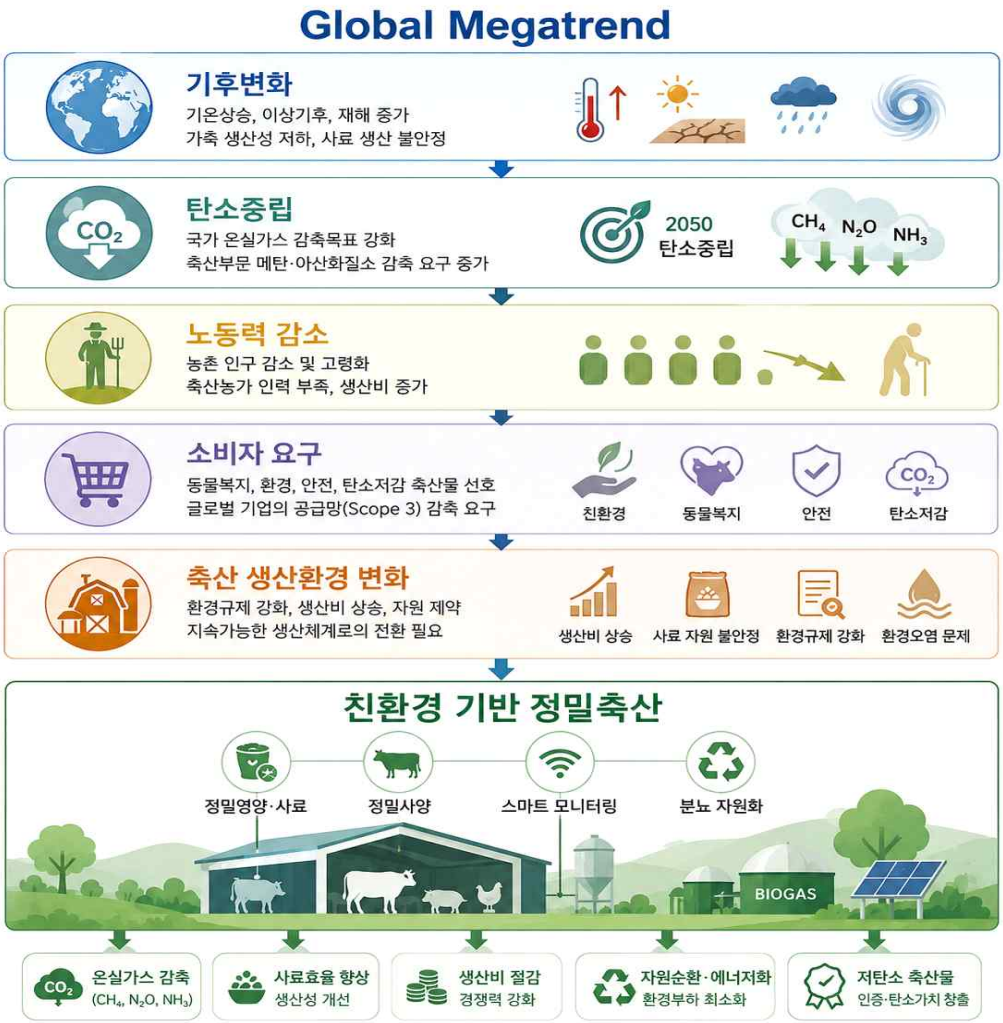


그림 3. 축산 분야 메타트렌드 변화

2.2 기술의 필요성 및 기대효과

○ 기존 생산성 중심의 축산업의 문제점

– 기존 생산성 향상 중심의 축산기술 개발은 축산물 공급 확대에 크게 기여하였으나, 반추가축 장내 발효에 의한 메탄 발생, 분뇨 유래 질소 배출, 악취 및 수질오염 등 다양한 환경문제가 지속적으로 제기되고 있음.

– 또한 생산량 증가를 위한 고단백질 사료 급여와 장기 사육체계는 사료 이용효율 저하와 함께 분뇨 발생량 증가 및 온실가스 배출 증가로 이어지는 한계를 가지고 있음.

– 이러한 축산업의 환경부하 증가경향음 전세계적인 기후변화 대응 이슈와 맞물려 축산업의 지속가능성에 대한 의문점을 제기하며 이는 축산업 전반의 패러다임 전환을 강하게 요구하고 있음.

○ 축산업 분야 기후변화 대응 필요성 증대

– 대한민국은 2021년 글로벌 메탄서약(Global Methane Pledge)에 가입하고, 2030 국가 온실가스 감축목표(NDC)로 2018년 대비 40% 감축을 확정하였으며, 농축산 부문은 메탄 기준 20.5% 감축이 요구됨. 농식품부는 사료관리법에 '저메탄사료'를 신설('23)하고 2030년까지 30% 보급을 목표로 설정함.

– 현재 국가 인벤토리는 IPCC Tier 1와 2를 혼합하여 사용하고 있으며 Tier 2를 확대하고 있음. 저메탄사료기술은 생산성 유지 · 농가 경제성 확보 · NDC 이행 · 탄소 크레딧 연계라는 복합 목표를 동시에 달성하는 핵심 수단임.

– 2023년 발표된 한국형 탄소중립 100대 핵심기술에 축산 분야 기술이 포함되지 못하였고, 국내에서 개발 · 상용화된 공식 인증 메탄저감제가 아직 없어, 기술적 도약과 제도적 기반 마련이 시급한 상황임.

○ 과학 기반 온실가스 관리체계 구축의 필요성

– 기후변화 대응 정책의 실효성을 확보하기 위해서는 축산부문의 온실가스 배출량을 객관적으로 산정하고 지속적으로 관리할 수 있는 과학 기반 관리체계 구축이 필수적임.

– 온실가스 산정은 평가 목적과 시스템 경계(System boundary)에 따라 IPCC 국가 인벤토리, 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA), 기업 단위 온실가스 프로토콜(GHG Protocol) 등으로 구분되며, 동일한 축산 활동도적용하는 방법론에 따라 산정 결과와 기술의 저감효과가 달라질 수 있음.

– 따라서 온실가스 측정의 투명성(Transparency), 정확성(Accuracy), 일관성(Consistency), 비교가능성(Comparability), 완전성(Completeness)을 의미하는 TACCC 원칙을 기반으로 한 표준화된 산정체계와 MRV(Measurement, Reporting and Verification) 시스템 구축이

요구됨.

- 이를 통해 저감기술의 효과를 객관적으로 검증하고 국가 온실가스 감축목표(NDC)와 연계할 수 있는 기반 마련이 가능함.

○ 시장 기반 탄소감축체계 구축의 필요성

- 온실가스 감축을 규제 중심으로 추진할 경우 축산농가의 생산비 증가와 국제 경쟁력 저하를 초래할 수 있으며, 생산기반이 환경규제가 상대적으로 낮은 국가로 이전되는 탄소누출(Carbon leakage)과 풍선효과(Balloon effect)가 발생할 가능성이 있음.
- 따라서 규제 중심의 접근에서 벗어나 농가의 자발적인 저감 활동을 유도할 수 있는 시장 기반 감축체계 구축이 필요함. 이를 위해 최근에는 기준 시나리오 대비 온실가스 감축 기여도를 평가하는 Scope 4(회피배출량, Avoided Emissions) 개념이 주목받고 있음.
- 가축분뇨의 에너지화, 농식품 부산물의 사료화, 저메탄 사료 및 가축 개량기술 등은 화석연료 대체 및 자원순환 효과를 통해 추가적인 온실가스 감축 편익을 창출할 수 있으며, 이러한 회피배출량을 정량화하여 탄소시장 및 정책지원과 연계하는 체계 구축이 요구되며 이는 저감기술 도입에 따른 농가의 경제적 부담을 완화하고 지속적인 기술 투자를 유도하는 기반이 될 수 있음.

○ 친환경 · 저탄소 축산기술을 통한 지속가능한 축산업 실현 필요성

- 친환경 · 저탄소 축산기술은 이러한 한계를 극복하기 위하여 사료 생산부터 가축 사양관리, 분뇨 처리 및 자원화에 이르는 생산 전 과정을 통합적으로 관리하는 기술체계를 가짐.
- 최근에는 디지털 기술과 생명공학 기술의 발전에 따라 정밀영양, 스마트축산, 농장단위 온실가스 모니터링, 전과정평가(LCA), 배출량 측정 · 보고 · 검증(MRV) 기술이 융합되면서 친환경 · 저탄소 축산은 단순한 환경저감기술을 넘어 데이터 기반 탄소관리 기술로 발전하고 있음.
- 궁극적으로 친환경 · 저탄소 축산기술은 온실가스 감축뿐 아니라 사료 이용효율 향상, 생산비 절감, 자원순환 확대, 저탄소 축산물 인증 및 탄소크레딧 창출을 통해 축산업의 경제성과 환경성을 동시에 향상시키는 미래 핵심기술로 자리매김할 것으로 전망됨.
- 즉 지속가능한 축산업 발전을 위한 친환경 · 저탄소 축산은 **“생산성과 환경친화성을 동시에 최적화하는 친환경 기반 정밀축산으로의 패러다임 전환”**이 필요한 기술임.

Ⅱ. 기술 분야 구조 및 범위

1 기술 분야 정의

○ 친환경 · 저탄소 축산 기술의 정의

– 친환경 · 저탄소 축산은 사료 생산과 조달, 가축 육종 및 사양관리, 가축분뇨의 처리 · 자원화, 온실가스의 측정 · 관리 및 환경성과의 가치창출에 이르는 축산물 생산 전 과정을 통합적으로 최적화하는 미래 축산기술 분야임.

– 기존 축산기술이 생산량 증대 중심으로 발전하였다면, 친환경 · 저탄소 축산은 정밀영양, 스마트축산, 생명공학, 환경공학 및 디지털 탄소관리 기술을 융합하여 생산성과 환경성을 동시에 향상시키는 "**친환경 기반 정밀축산(Eco-friendly Precision Livestock Farming)**" 의 핵심 기술체계임.

– 개별 환경기술의 단순한 집합이 아니라, '사료-가축-분뇨-토양 및 에너지'로 이어지는 축산 가치사슬(Value Chain) 전 과정의 물질 · 에너지 · 데이터 흐름을 통합 관리하여 지속가능한 축산 생산체계를 구축하는 융합기술임.

○ 친환경 · 저탄소 축산기술의 목표

– 친환경 · 저탄소 축산의 궁극적인 목표는 축산물 생산량을 감소시키는 것이 아니라, 사료와 에너지의 이용효율을 향상시키고 장내발효 및 분뇨 처리과정에서 발생하는 온실가스와 환경오염물질을 최소화하여 축산물 기능단위당 환경부하(Carbon Intensity)를 저감하는 데 있음.

– 축산부문의 주요 환경부하는 반추가축 장내발효에서 발생하는 메탄(CH_4), 가축분뇨 저장 · 처리 및 농경지 환원 과정에서 발생하는 메탄(CH_4)과 아산화질소(N_2 O), 그리고 분뇨 유래 암모니아(NH_3) 배출로 구성되며, 이러한 환경부하는 사료 생산과 이용, 가축 생산성 및 분뇨 관리기술과 밀접하게 연계되어 있음.

– 나아가 온실가스 감축과 함께 자원순환, 에너지 회수, 생산성 향상 및 농가 경제성을 동시에 확보함으로써 국가 탄소중립 실현과 지속가능한 축산업 전환에 기여하는 것을 목표로 함.

2 주요 구성 기술

○ 친환경 · 저탄소 축산기술의 구성 체계

– 친환경 · 저탄소 축산 기술은 기능과 적용 단계에 따라 **친환경 사료 투입 최적화, 가축 생산효율 최적화, 가축분뇨 환경부하 저감 및 에너지화, 디지털 탄소 · 자원 모니터링 및 통합관리, 친환경 · 저탄소 축산 가치창출**의 5단계 기술체계로 구성됨.

– (친환경 사료 투입 최적화) 저메탄 사료, 질소저감 사료, 및 농식품 부산물 활용 등을 통해 탄소와 질소의 유입을 최소화하는 기술.

– (가축 생산효율 최적화) 정밀영양사양, 스마트축산 및 저탄소 형질 개량을 활용하여 생산성과 자원 이용효율을 향상시키고 단위 생산량당 환경부하를 감소시키는 기술.

– (가축분뇨 환경부하 저감 및 에너지화) 퇴비화 개선, 정화처리, 바이오가스 생산, 고체연료화, 바이오차 및 양분 회수 등을 통해 분뇨를 환경오염원이 아닌 자원으로 전환하는 기술.

– (디지털 탄소 · 자원 모니터링 및 통합관리) IPCC 인벤토리, 전과정평가(LCA), GHG Protocol, MRV 및 탄소 및 자원 통합 관리 디지털 플랫폼(C-RIMS 등)을 활용하여 축산 전과정의 탄소와 자원 흐름을 정량적으로 관리하는 기술.



그림 4. 친환경 · 저탄소 축산 5단계 핵심 기술 체계

- (친환경 · 저탄소 축산 가치창출) 저탄소 축산물 인증, 탄소발자국 표시, 공급망 탄소관리(Scope 3), 회피배출량(Scope 4), ESG 경영 및 탄소크레딧을 통해 환경성과를 경제적 가치로 전환하는 기술.
- 친환경 · 저탄소 축산 기술은 축산물 생산 전 과정에서 발생하는 탄소와 질소의 흐름을 통합적으로 관리하기 위한 기술체계로 구성되며, 개별 기술이 독립적으로 적용되는 것이 아니라 생산 전 과정에서 상호 연계되는 시스템 기술의 특성을 가짐.
- 특히 사료 투입부터 가축 생산, 분뇨 처리, 탄소관리 및 가치창출에 이르기까지 각 단계에서 생성되는 정보와 성과가 다음 단계의 효율성을 결정하는 순환형 구조를 형성함.

○ 친환경 · 저탄소 축산의 기술분야 정의 및 범위
- (친환경 사료 투입 최적화) 축산물 생산의 출발점인 사료 생산 · 조달 및 급여 단계에서 탄소와 질소의 투입을 최소화하기 위한 기술영역임. 저메탄 사료와 질소저감 사료, 기능성 사료첨가제, 농식품 부산물의 사료자원화, 자가 조사료 생산 및 정밀 사료배합 기술 등을 포함하며, 반추위 장내발효와 분뇨에서 발생하는 환경부하를 사전에 저감하기 위한 기술 범위를 포괄함.
- (가축 생산효율 향상) 사료 투입 이후 가축의 성장, 번식 및 생산 전 과정에서 생산성과 자원이용효율을 향상시키는 기술영역임. 정밀영양, 개체별 사양관리, 사료효율 개선, 생산성 향상, 사육기간 단축, 건강관리, 스마트축산 및 저탄소 형질 개량 기술 등을 포함하며, 기능단위당 환경부하를 최소화하기 위한 생산기술 전반을 포함함.
- (가축 분뇨 환경부하 저감 및 에너지화) 분뇨의 저장, 처리, 이용 및 자원순환 과정에서 발생하는 환경부하를 최소화하기 위한 기술영역임. 퇴 · 액비화 공정 개선, 정화처리, 바이오가스 생산, 고체연료화, 바이오차 생산, 양분 회수 및 경축순환 기술 등을 포함하며, 분뇨를 환경오염원이 아닌 에너지 및 자원으로 활용하기 위한 기술 범위를 포괄함.
- (디지털 탄소 · 자원 모니터링 및 통합관리) 축산물 생산 전 과정에서 발생하는 탄소와 자원의 흐름을 측정 · 분석 · 관리하는 디지털 기술영역임. 온실가스 측정기술, 농장단위 활동자료 수집, 국가 온실가스 인벤토리(IPCC Tier), 전과정평가(LCA), 온실가스 프로토콜(GHG Protocol), 측정 · 보고 · 검증(MRV), 탄소 및 자원 통합 관리 디지털 플랫폼(C-RIMS) 및 의사결정지원 시스템 등을 포함하며, 축산 생산 전 과정의 환경성과를 정량적으로 관리하기 위한 기술 범위를 포함함.
- (친환경 · 저탄소 축산 가치창출) 앞선 기술단계에서 확보된 환경성과를 인증과 시장으로 연계하여 경제적 가치로 전환하는 기술 및 제도 영역임. 저탄소 축산물 인증, 탄소발자국 표시, 공급망 온실가스 관리(Scope 3), 회피배출량(Scope 4), 탄소크레딧, ESG 경영 및 친환경

축산물의 차별화 전략 등을 포함하며, 농가의 자발적 기술 도입과 지속가능한 산업 생태계 조성을 지원하는 가치창출 범위를 포괄함.

○ 친환경 · 저탄소 축산기술 체계의 상호 연계성

– 친환경 · 저탄소 축산의 5대 기술체계는 사료 생산과 투입에서부터 가축 생산, 분뇨 처리 및 자원화, 디지털 탄소관리, 환경가치 창출까지 이어지는 축산 가치사슬(Value Chain)을 기반으로 구성되며, 각 단계의 기술과 데이터가 상호 연계되는 순환형 구조를 형성함.

– (친환경 사료 투입 최적화) 장내발효 메탄과 질소 배설량을 감소시키는 출발 단계이며, 가축 생산효율 최적화는 사료 이용효율과 생산성을 향상시켜 축산물 기능단위당 온실가스 배출강도(Carbon Intensity)를 감소시키는 역할을 수행함. 두 단계에서 형성된 생산성과 환경성은 이후 분뇨의 발생 특성과 자원화 효율을 결정하는 핵심 요인으로 작용함.

– (가축분뇨 환경부하 저감 및 에너지화) 분뇨의 저장 · 처리 과정에서 발생하는 메탄, 아산화질소 및 암모니아 배출을 저감하는 동시에 바이오가스, 고체연료, 바이오차 및 양분 회수를 통해 에너지와 자원으로 전환하는 단계이며, 축산 생산과 자원순환을 연결하는 핵심 역할을 수행함.

– (디지털 탄소 · 자원 모니터링 및 통합관리) 사료 생산, 가축 사육, 분뇨 처리 및 에너지 이용 과정에서 발생하는 활동자료를 실시간 수집하고, IPCC 인벤토리, 전과정평가(LCA), GHG Protocol 및 측정 · 보고 · 검증(MRV) 체계와 연계하여 환경성과를 정량적으로 평가하는 기술영역임. 이를 통해 개별 기술의 감축효과를 객관적으로 검증하고 농장 맞춤형 의사결정을 지원하는 탄소 및 자원 통합 관리 디지털 플랫폼(C-RIMS)의 기반을 제공함.

– (친환경 · 저탄소 축산 가치창출) 앞선 단계에서 확보된 환경성과를 저탄소 축산물 인증, 공급망 온실가스 관리(Scope 3), 회피배출량(Scope 4), 탄소크레딧 및 ESG 경영과 연계하여 경제적 가치로 전환하는 단계임. 이를 통해 농가의 저감기술 도입과 재투자를 촉진하고 지속적인 기술 확산과 산업 생태계 조성을 유도함.

○ 친환경 · 저탄소 축산의 기술분야별 세부기술 정의와 영역

① 친환경 사료 투입 최적화

세부기술 1. 저메탄 사료기술

– 저메탄 사료기술은 반추가축의 장내발효(Enteric fermentation) 과정에서 발생하는 메탄(CH_4)을 저감하면서 생산성과 건강성을 유지 · 향상시키기 위한 사료 및 영양관리 기술임.

– 반추위 내 메탄생성균의 활성을 직접 억제하거나 발효경로와 수소 이용 흐름을 조절하여 메탄 생성을 감소시키는 기술과 함께, 사료의 이용효율 향상 및 메탄 발생량의 측정 · 평가 기술까지 포함하는 통합 기술영역임.

- (사료첨가물 기반 저감) 3-NOP, 질산염, 해조류 유래 물질, 캐슈넛 껍질액(CNSL), 마늘 추출물 등 메탄생성균 활성을 직접 억제하는 소재를 배합사료에 첨가하는 방식임.
- (사료조성 및 정밀영양 최적화) 정밀영양 설계, 사료 소화율 등 영양소 이용률 향상, 지방 및 지방산 조성 함량 조절, 조사료 품질 조절을 통해 메탄 생성을 간접 저감하는 방식임.
- (생산효율 향상 연계) 도체중 증가, 산유량 향상, 사육기간 단축 등을 통해 축산물 기능단위당 배출강도(emission intensity)를 낮추는 방식임. 저메탄 사료기술을 생산성 향상 기술과 결합하여 환경성과 경제성을 동시에 확보하는 것을 목표로 함.
- (메탄 측정 및 성과 평가) 호흡대사챔버, 그린피드 시스템, 스니퍼 법, AI 예측모델 등 개체별 메탄 배출량을 정량화하는 기술로, 상기 세 범주의 성과 검증 기반이 됨.

세부기술 2. 질소저감 사료기술

- 질소저감 사료기술은 사료 내 단백질 공급량과 아미노산 균형을 최적화하여 가축의 질소 이용효율을 향상시키고, 분뇨를 통해 배출되는 질소와 NH_3 , N_2O의 발생을 최소화하기 위한 사료 및 영양관리 기술임.
- 단순히 사료의 조단백질 함량을 낮추는 것이 아니라, 가축의 생산성과 건강성을 유지하면서 질소 이용효율을 극대화하는 정밀 단백질 영양기술과 반추위 단백질 이용기술을 포함하는 통합 기술영역임.
- (저단백질 사료 설계) 가축의 영양 요구량에 맞추어 사료의 조단백질(Crude Protein) 함량을 적정 수준으로 조절하고, 잉여 질소의 체외 배출을 최소화하는 기술임. 단백질 과잉 공급을 줄여 분뇨 내 질소 배설량과 암모니아 휘산을 감소시키며, 사료비 절감과 환경부하 저감을 동시에 달성하는 가장 기본적인 질소저감 기술임.
- (반추위 단백질 이용효율 향상) 반추위 분해단백질(Rumen Degradable Protein, RDP)과 반추위 비분해단백질(Rumen Undegradable Protein, RUP)의 균형을 최적화하고, 반추위 보호단백질(By-pass Protein) 및 보호아미노산을 활용하여 단백질 이용효율을 향상시키는 기술임. 반추위 미생물의 단백질 합성을 촉진하고 소장에서 이용 가능한 아미노산 공급을 증가시켜 생산성을 유지하면서 질소 배설을 감소시키는 기술임.
- (정밀 단백질 영양관리) 성장단계, 생산단계 및 개체별 영양 요구량에 따라 필수아미노산의 균형을 최적화하고, 정밀영양(Precision Nutrition) 기술을 적용하여 질소 이용효율을 극대화하는 기술임. AI 기반 사료배합, 개체별 정밀급여 및 영양소 요구량 예측기술과 연계하여 불필요한 단백질 공급을 최소화하고, 질소배출 저감과 생산성 향상을 동시에 실현하는 미래형 정밀축산 기술임.

세부기술 3. 자원순환형 사료기술

- 자원순환형 사료기술은 농식품 부산물과 미이용 바이오매스 등 다양한 순환자원을 사료원료로 활용하고, 조사료 생산과 사료 공급체계를 최적화하여 사료 생산 · 운송 과정에서 발생하는 탄소배출을 저감하는 기술임.
- 기존의 수입 곡물 중심 사료체계를 지역 순환형 자원 이용체계로 전환함으로써 사료 생산의 환경부하를 감소시키고, 자원의 순환 이용과 축산업의 지속가능성을 향상시키는 통합 기술 영역임.
- (농식품 부산물 사료화) 식품가공 부산물, 농산 부산물 및 미이용 바이오매스를 가축의 사료원료로 활용하여 자원의 순환 이용을 확대하는 기술임. 부산물의 영양학적 특성과 안전성을 평가하고, 저장 · 가공기술을 적용하여 기존 곡물사료를 대체함으로써 폐기물 발생과 사료 생산에 따른 탄소배출을 동시에 감소시키는 기술임.
- (조사료 자급 및 지역순환 사료 생산) 양질의 조사료 생산 확대와 지역 내 사료자원 활용을 통해 수입 조사료 의존도를 낮추고 사료 공급체계를 안정화하는 기술임. 지역에서 생산된 조사료와 부산물을 활용한 자급형 사료 생산체계를 구축하여 장거리 운송에 따른 탄소배출을 줄이고, 경축순환농업과 연계된 자원순환을 촉진하는 기술임.
- (기능성 순환사료 개발) 부산물 및 미이용 바이오매스를 단순한 대체원료가 아니라 고부가가치 기능성 사료자원으로 활용하기 위한 기술임. 발효, 효소처리 및 생물학적 전처리 기술 등을 이용하여 영양소 이용성을 향상시켜 생산성과 환경성을 동시에 향상시키는 기술임.

② 가축 생산효율 최적화

세부기술 1. 정밀영양사양기술

- 정밀영양 및 정밀급여기술은 성장단계와 개체별 영양 요구량을 고려하여 필요한 영양소를 적정 수준으로 공급함으로써 사료 이용효율과 생산성을 향상시키는 기술임.
- AI 기반 영양 요구량 예측, 정밀 사료배합, 스마트 급이시스템 및 실시간 생체정보 기반 개체별 급여관리 기술 등을 포함하며, 생산성과 환경성을 동시에 향상시키는 기술영역임.
- (정밀영양설계) 성장단계, 생리상태 및 생산목적에 따라 영양소 요구량을 정밀하게 산정하고 사료를 설계하는 기술임. 정밀 사료배합, 영양소 균형 설계 및 개체 맞춤형 영양관리 기술 등을 포함하여 사료 이용효율과 생산성을 향상시키는 기술임.
- (개체별 정밀사양관리) 개체의 성장, 건강상태 및 생산성을 실시간으로 분석하여 최적의 사양관리를 수행하는 기술임. 체중, 섭취량, 반추행동 및 생체정보를 활용한 개체별 관리기술을 포함하며, 생산성과 건강성을 동시에 향상시키는 기술임.
- (스마트 급여 및 디지털 관리) AI 기반 영양 요구량 예측, 자동 급이시스템, IoT 센서 및 데

이터 기반 의사결정을 활용하여 개체별 급여를 자동으로 최적화하는 기술임. 스마트축산 플랫폼과 연계하여 사료급여의 정확성과 관리 효율성을 향상시키고 노동력을 절감하는 기술임.

세부기술 2. 생산효율 향상기술

- 생산효율 향상기술은 가축의 성장, 번식 및 건강성을 종합적으로 개선하여 동일한 자원 투입으로 더 높은 생산성을 확보하는 기술임. 사료효율 향상, 증체량 및 산유량 증대, 번식성적 개선, 질병 예방 및 건강관리 기술 등을 포함하며, 축산물 기능단위당 온실가스 배출강도(Carbon Intensity)를 감소시키고 생산성과 경제성을 동시에 향상시키는 기술임.
- (생산성 향상) 성장속도, 증체량, 산유량 및 육질 등 생산형질을 향상시켜 동일한 사육기간과 자원 투입으로 생산량을 증대시키는 기술임. 생산성 향상을 통해 축산물 생산단위당 온실가스 배출을 감소시키는 기술임.
- (번식효율 향상) 번식률, 수태율, 분만간격 및 생애 생산성을 개선하여 생산성을 향상시키는 기술임. 수정란이식, 번식관리 기술 등을 활용하여 비생산기간을 단축하여 자원 이용효율을 향상시키는 기술임.
- (건강 및 질병관리) 질병 예방, 면역력 증진 및 조기 질병진단을 통해 폐사율과 생산손실을 최소화하는 기술임. 스마트 모니터링, 바이오센서 및 디지털 헬스케어 기술 등을 활용하여 개체 건강을 관리하고 지속적인 생산성을 유지하는 기술임.

세부기술 3. 저탄소 유전체 및 형질개량기술

- 저탄소 유전체 및 형질개량기술은 사료효율, 메탄 발생량, 질소 이용효율 및 생산성과 관련된 형질을 유전체 기반으로 선발하여 환경부하가 낮은 가축을 육종하는 기술임.
- 유전체 선발(Genomic Selection), 저탄소 형질 발굴 및 AI 기반 육종기술 등을 포함하는 미래형 저탄소 육종기술임.
- (저탄소 형질 발굴) 메탄 발생량, 사료효율, 질소 이용효율 및 온실가스 배출과 관련된 신규 형질과 생체지표(Biomarker)를 발굴하는 기술임. 유전체, 전사체, 대사체 및 장내미생물체(Microbiome) 정보를 활용하여 저탄소 형질을 규명하고 육종의 기초 정보를 확보하는 기술임.
- (유전체 기반 선발) SNP, 유전체 정보 및 유전능력을 활용하여 저탄소 형질을 가진 우수 개체를 조기에 선발하는 기술임. 유전체 선발(Genomic Selection), 유전체 예측 및 정밀육종 기술을 활용하여 육종 효율을 높이고 생산성과 환경성을 동시에 향상시키는 기술임.
- (AI 기반 디지털 육종) 유전체, 표현형 및 환경정보를 통합 분석하여 최적의 교배계획과 육종 전략을 수립하는 기술임. AI 및 빅데이터 기반 유전능력 예측과 디지털 육종 플랫폼을 활용하여 저탄소 형질의 개량 속도를 향상시키는 미래형 스마트 육종기술임.

③ 가축분뇨 환경부하 저감 및 에너지화

세부기술 1. 가축분뇨 처리기술

- 가축분뇨 처리기술은 가축분뇨의 저장, 처리 및 퇴·액비화 과정에서 발생하는 메탄(CH_4), 암모니아(NH_3), 아산화질소(N_2O) 및 악취를 저감하여 환경오염을 최소화하는 기술임. 정화처리 공정 개선과 퇴·액비화 효율 향상을 통해 분뇨의 안정성을 확보하고 환경부하를 감소시키는 기술영역임.
- (분뇨 정화처리) 고액분리, 생물학적 처리 및 고도 정화공정을 이용하여 분뇨 내 유기물과 오염물질을 제거하는 기술임
- (퇴액비화 최적화) 퇴비화 및 액비화 공정을 개선하여 메탄, 암모니아 및 악취 발생을 저감하고 양질의 퇴·액비를 생산하는 기술임.

세부기술 2. 바이오가스 생산기술

- 바이오가스 생산기술은 가축분뇨를 혐기소화하여 메탄을 회수하고 전기와 열 등 재생에너지로 활용하는 기술임. 폐자원의 공동소화와 에너지 회수를 통해 온실가스 배출을 저감 및 순환경제를 실현하는 핵심 기술영역임.
- (혐기소화) 가축분뇨 및 유기성 부산물을 혐기성 미생물을 이용하여 분해하고 바이오가스를 생산하는 기술임.
- (바이오가스 회수 및 이용) 생산된 바이오가스를 정제하여 전력, 열 및 도시가스 등 다양한 에너지원으로 활용하는 기술임.

세부기술 3. 분뇨 자원화기술

- 분뇨 자원화기술은 처리된 가축분뇨를 비료, 연료 및 탄소자원으로 전환하여 자원순환을 촉진하는 기술임.
- (고체연료화) 분뇨를 건조 및 성형하여 고체연료(SRF 등)로 전환하고 화석연료를 대체하는 기술임.
- (바이오차 생산) 열분해 공정을 이용하여 바이오차를 생산하고 탄소를 장기 저장함과 동시에 토양개량재로 활용하는 기술임.
- (양분회수 및 순환농업) 질소와 인 등 양분을 회수하여 비료로 재활용하고 경축순환농업과 연계하여 자원의 순환 이용을 확대하는 기술임.

④ 디지털 탄소·자원 모니터링 및 통합관리

세부기술 1. C-RIMS(Carbon-footprint & Resource Integration Management System)

- (IPCC 인벤토리 방법론) 국가 단위의 하향식 계산법으로 IPCC 가이드라인은 유엔기후변화 협약 체제에서 각국이 자국 온실가스 배출량을 산정하고 보고하기 위한 국제 지침으로 이는 국가에서 발생하는 직접 배출원만을 추적하는 하향식(Top-down) 접근법을 적용함. 국가 내 배출원 및 배출량의 중복 산정(double counting)및 누락을 피하기 위해 축산 부문 배출원은 반추동물 소화 대사에 의한 장내발효 유래 메탄, 그리고 분뇨 처리과정에서 배출되는 가축분뇨 관리 유래 메탄과 아산화질소로 한정함. IPCC 체계는 국가별 통계 인프라와 데이터 가용성에 따라 3가지 Tier(단계) 방법을 제공함.

표 2. IPCC 국가 인벤토리 방법론의 체계

Tier 1	가축 사육 두수에 사전에 결정된 배출계수(Default emission factor)를 활용하는 산정 방식이며, 국가 통계 시스템이 미비한 국가에서도 적용 가능. 사양 관리 기술이나 가축분뇨 정화처리, 고체연료화 등 공정 다각화에 따른 온실가스 저감 효과를 반영할 수 없는 한계가 존재함.
Tier 2	국가 고유 사양환경, 가축 체중, 사료 소화율, 우유 생산량 등 생리적 변수와 가축분뇨의 생물학적, 물리화학적 처리 방법을 대입하여 국가 고유 배출계수를 산출하는 방식. 메탄은 가축의 유지, 성장, 비유, 임신에 요구되는 총에너지섭취량을 도출후, 메탄전환계수(Ym)를 적용하여 산출하여 저메탄 사료 보급 효과를 반영함. 분뇨 처리과정 시 배출되는 메탄과 아산화질소는 가축분뇨 내 휘발성 고형물과 질소 배출량 총량에 분뇨 처리 시스템별 메탄전환계수(MCF)와 분뇨처리시스템 이용비율(MS) 등을 곱하여 도출함. 이를 통해 분뇨 처리 공정 변경에 따른 저감 성과를 국가 단위 인벤토리에 반영할 수 있음.
Tier 3	활동자료의 정밀 모니터링 및 수집, 물질수지 적용, 모델링 등을 활용하기 때문에 현장 측정 및 복잡한 공정 분석을 통해 배출량을 구하며 정확한 센서 데이터와 클라우드 컴퓨팅 자원이 필요함. 이를 구현하기 위해서는 센서 데이터와 클라우드 컴퓨팅 자원이 필요함.

- (전과정평가(LCA) 방법론) 전과정평가는 원료 생산부터 가공 · 유통 · 소비 · 폐기까지 축산물의 생애주기 전반에서 발생하는 환경부하를 기능단위(FU) 기준으로 정량화하는 상향식 평가방법임. 따라서 수입 사료의 재배 · 운송 등 공급망의 간접배출까지 포함할 수 있으나, 국가 온실가스 인벤토리와 연계할 때에는 배출량 중복 가능성을 고려해야 함. 속성전과정평가(aLCA)는 우유와 고기처럼 복수의 산출물이 발생하는 경우 질량 · 경제가치 등을 기준으로 배출량을 배분하여 공급망 내 환경부하 발생지점(Hotspot)을 파악하는 데 활용됨. 반면 결과발생적 전과정평가(Consequential LCA, cLCA)는 시스템 확장을 통해 기술 또는 의사결정에 따른 시장 전반의 변화를 평가하며, 분뇨 고체연료화에 따른 화석연료 대체효과 등 Scope 4 회피배출량 산정의 핵심 방법론으로 활용될 수 있음. 결과발생적 전과정평가(cLCA)는 시스템 확장(System expansion) 기법을 사용하여 영농 의사결정이 경제 체계 전체에 미치는 결과를 한계 데이터(Marginal data) 기반으로 모델링함. 예를들어, 가축분뇨를 고체연료로 변환하여 산업용 보일러에 투입할 때, 농산부산물 사료화 및 화석연료 소비 감소와 비료 생산 변화 등 온실가스 증감 효과를 추적하며 이는 Scope 4 회피배출량 산정의 바탕임.
- (온실가스 프로토콜(GHG Protocol)과 Scope 4의 도입) GHG Protocol은 기업 · 조직의 온실가스 배출을 Scope 1~3으로 구분하는 국제 산정체계이다. 축산에서 Scope 1은 장내발효, 분뇨처리 및 농장 내 연료사용 등 직접배출, Scope 2는 구매 전력 사용에 따른 간접배출, Scope 3는 사료 생산 · 운송 등 가치사슬에서 발생하는 기타 간접배출을 의미함. Scope 4는 공식 배출 Scope으로 간주되기 보다 기술 적용으로 인해 외부에서 회피된 배출량을 정량화하는 개념으로, 부산물 사료화, 분뇨의 바이오가스 · 고체연료화 등을 통한 화석연료 대체효과를 평가하는 데 활용될 수 있음. 이러한 감축성과를 제도적으로 활용하기 위해서는 센서 기반 활동자료 수집, 표준화된 보고 및 독립적 검증을 포함하는 MRV 체계를 구축하여 데

이터의 객관성과 신뢰성을 확보해야 함

표 3. IPCC, LCA, GHG Protocol 산정 방법론 비교

구분	IPCC 인벤토리 방법론	전과정평가 (LCA)	온실가스 프로토콜
적용 목적	UNFCCC 체제 하 국가 온실가스 배출량 보고 및 NDC 목표 관리.	개별 제품의 생애주기 환경 부하 정량화 및 공급망 내 환경문제 주 발생원 식별	기업/조직 단위 온실가스 인벤토리 구축 및 ESG 보고
시스템 경계	국가 단위 지리적 국경 내 직접 배출원 (공간적 하향식 접근)	원료 채취부터 폐기까지 전 생애주기 (공정 기반 상향식 접근)	조직의 재무적/운영적 통제 권한에 따른 직간접 배출원 (Scope 1~4 기반)
주요 장점	통일된 수학적 표준 제공, 데이터 가용성에 따른 Tier 단계별 접근 가능	시스템 확장을 통해 수입 사료 내재 배출량 추적 및 화석연료 대체 효과(cLCA) 분석 가능	배출 책임 이중 계산 방지, Scope 4를 통한 자원화 기술 편익 정량화 가능
주요 단점	수입 사료 배출량 누락, Tier 1 사용 시 분뇨처리방식 변경(정화, 고체연료 등) 저감 효과 반영 불가	시스템 경계 설정 시 연구자 주관 개입 가능, 데이터 수집 필요량이 많음	Scope 3 산정 시 2차 데이터 의존성에 따른 불확실성 존재, Scope 4 기준선 시나리오 설정 논란 존재
축산 배출원 적용	장내발효(CH_4), 가축분뇨 관리 및 처리(CH_4, N_2O)	사료작물 재배, 비료, 에너지 사용, 수송, 가공 등 생애주기 전 과정의 CO_2, CH_4, N_2O 등 모두 계산	Scope 1(농장 직배출), Scope 2(외부 전력), Scope 3(공급망), Scope 4(에너지 대체 회피 배출)

세부기술 2. 온실가스 및 환경배출 측정 기술 고도화

- 온실가스 및 환경배출 측정기술은 농장과 개체 단위에서 발생하는 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O), 암모니아(NH_3) 등의 배출량을 직접 측정하거나 활동자료를 기반으로 정량화하는 기술임.
- (개체 및 축군 단위 메탄 측정) 호흡대사챔버, GreenFeed, 스니퍼, 레이저 및 센서 기반 측정장비를 활용하여 개체와 축군의 장내발효 메탄 발생량을 정량화하는 기술임. 사료, 사양관리 및 유전적 요인에 따른 메탄 배출 차이를 평가하고 저메탄 기술의 성과를 검증하는 기반 기술임.
- (축사 및 분뇨처리 배출 측정) 축사, 분뇨 저장시설, 퇴·액비화 및 바이오가스 처리시설에서 발생하는 CH_4, N_2O 및 NH_3 를 측정하는 기술임. 가스센서, 자동시료채취 및 연속 모니터링 기술을 활용하여 배출원별 환경부하를 정량적으로 관리하는 기술임.
- (배출량 산정 및 측정자료 표준화) 직접 측정자료와 사료섭취량, 가축두수, 생산성 및 분뇨처리 활동자료를 연계하여 농장단위 배출량을 산정하는 기술임. 측정방법, 배출계수 및 데이터 품질을 표준화하여 국가 온실가스 인벤토리, LCA 및 MRV 체계와 연계하는 기술임.

세부기술 3. AI 기반 탄소관리 플랫폼

- AI 기반 탄소관리 플랫폼은 사료 투입, 가축 생산, 분뇨 처리 및 에너지 사용 과정에서 생성되는 데이터를 통합하여 농장단위 탄소배출과 자원 이용현황을 실시간으로 분석 · 예측 · 관리하는 기술임.
- (IoT 기반 데이터 수집 및 연계기술) 사료섭취량, 생산성, 축사환경, 에너지 사용량 및 분뇨처리 정보를 IoT 센서와 자동화 장비를 통해 실시간 수집하는 기술임. 서로 다른 장비와 데이터베이스를 연계하여 농장단위 탄소 · 자원 데이터의 통합관리 기반을 구축하는 기술임.
- (AI · 디지털 트윈 기반 예측 및 최적화) 농장의 사료, 가축, 환경 및 분뇨처리 데이터를 AI로 분석하여 온실가스 배출과 자원 이용효율을 예측하는 기술임. 디지털 트윈을 활용하여 사료배합, 사양관리 및 분뇨처리 조건별 감축효과를 가상으로 평가하고 최적의 운영방안을 제시하는 기술.
- (탄소 대시보드 및 의사결정지원) 농장별 탄소배출량, 배출강도, 에너지 사용량 및 감축성과를 시각화하여 제공하는 기술임. MRV, 저탄소 인증 및 탄소크레딧 체계와 연계하여 농가, 기업 및 정책담당자의 탄소관리 의사결정을 지원하는 기술임.

⑤ 친환경 · 저탄소 축산 가치창출

세부기술 1. 저탄소 축산물 인증

- 저탄소 축산물 인증기술은 축산물 생산과정에서 달성한 온실가스 감축성과를 객관적으로 평가하고 인증하여 시장에서 친환경 가치를 인정받도록 하는 기술 및 제도임.
- (저탄소 축산물 인증체계) 축산물 생산과정의 탄소배출량과 감축성과를 평가하여 저탄소 축산물 인증을 부여하는 기술 및 제도임.
- (탄소라벨링) 제품별 탄소발자국(Carbon Footprint) 정보를 라벨로 표시하여 소비자에게 환경정보를 제공하고 친환경 소비를 촉진하는 기술.

세부기술 2. 탄소크레딧 및 탄소시장 연계 기술

- 탄소크레딧 및 탄소시장 연계기술은 축산분야의 온실가스 감축성과를 경제적 가치로 전환하여 농가의 새로운 소득원으로 활용하는 기술과 제도.
- (탄소크레딧 인증) 온실가스 감축량을 검증하여 탄소배출권(Carbon Credit)으로 인증하는 기술임.
- (탄소시장 연계) 자발적 탄소시장(VCM) 및 국내외 탄소시장과 연계하여 탄소배출권을 거래하는 기술 및 운영체계임.
- (농가 인센티브 지원) 감축성과에 따른 보상체계를 구축하여 농가의 저탄소 기술 도입과 지속적인 참여를 유도하는 기술 및 정책수단임.

세부기술 3. ESG 및 공급망 탄소관리

- 축산물 생산부터 유통 · 소비까지 공급망 전 과정의 탄소배출을 관리하고 기업의 ESG 경영과 연계하여 지속가능한 축산 가치사슬을 구축하는 기술 및 관리체계임.
- (공급망 탄소관리) Scope 3 배출량을 포함한 공급망 전 과정의 탄소배출을 관리하고 기업의 탄소감축 전략을 지원하는 기술임.
- (Green Premium 창출) 저탄소 축산물의 환경가치를 가격 프리미엄으로 연계하여 친환경 제품의 시장 경쟁력을 향상시키는 기술임.
- (지속가능 공급망 구축) ESG 경영, 지속가능성 인증 및 글로벌 공급망 기준과 연계하여 친환경 축산 가치사슬을 구축하는 기술임.

표 4. 친환경 · 저탄소 축산 기술과 미래발전 방향

저탄소 축산 실현을 위한 5가지 기술 체계 및 하위 세부기술

기술 체계 (5대 분야)	세부기술 (3개)	하위 세부기술	핵심 내용
① 친환경 사료 투입 최적화	① 저메탄 사료 개발·이용기술	• 천연소재 기반 저메탄 사료개발 • 사료첨가제 개발 및 활용 • 발효·생물학적 저메탄 사료기술	• 장내 발효 메탄(CH_4) 발생 저감
	② 질소저감 사료 개발·이용기술	• 단백질 정밀설계 및 저단백 사료기술 • 아미노산 조성 최적화기술 • 질소배출 저감 사료첨가제 개발	• 질소 배출(NH_3, N_2O) 저감 및 단백질 이용효율 향상
	③ 사료 자원순환 및 바이오소재 활용기술	• 식품 부산물 및 농업부산물 사료화 기술 • 미생물·곤충 등 바이오소재 활용기술 • 순환형 사료 생산·이용기술	• 자원순환 기반 사료 활용 확대 및 사료 수입 의존도 저감
② 가축 생산효율 최적화	① 정밀영양사양기술	• 정밀영양 설계기술 • 개체별 사양관리기술 • 스마트 급여기술	• 개체별 적정 영양 공급으로 사료이용효율 및 생산성 극대화
	② 생산효율 향상기술	• 사료효율 및 증체·산유량 향상기술 • 번식효율 향상기술 • 건강관리 및 질병예방기술	• 성장·번식·건강 개선으로 단위 생산량당 탄소배출 강도 감소
	③ 저탄소 유전체 및 형질개량기술	• 저탄소 형질 발굴기술 • 유전체 기반 선발기술 • 디지털 육종기술	• 사료효율·메탄 배출 등 저탄소 형질 선발로 지속적 개량 실현
③ 가축분뇨 환경부하 저감 및 에너지화	① 분뇨 정화기술	• 분뇨 정화처리기술 • 퇴·액비화 최적화기술 • 환경오염 저감기술	• CH_4, NH_3, N_2O 및 악취 저감으로 환경부하 최소화
	② 바이오가스 생산기술	• 혐기소화기술 • 바이오가스 회수 및 이용기술 • 통합 에너지화기술	• 메탄 회수 및 전기·열 생산으로 재생에너지 활용
	③ 분뇨 자원화기술	• 고체연료화 기술 • 바이오차 생산기술 • 양분 회수 및 순환농업기술	• 연료·토양개량재·비료 등 자원순환을 통한 순환농업 실현
④ 디지털 탄소·자원 모니터링 및 통합관리	① C-RIMS (통합관리 시스템)	• IPCC 인벤토리(Tier 1~3) • LCA(aLCA/cLCA) • GHG Protocol(Scope 1~4) • MRV(측정·보고·검증) 통합 관리	• 국가 인벤토리·LCA·Scope 4·MRV를 통합한 축산 탄소·자원 통합관리 체계
	② 온실가스 및 환경배출 측정기술	• 개체·축군 단위 메탄 측정기술 • 축사·분뇨처리 배출 측정기술 • 배출량 산정 및 측정자료 표준화기술	• CH_4, N_2O, NH_3 배출 정량화 및 저감기술 효과 검증
	③ AI 기반 탄소관리 플랫폼	• IoT 기반 데이터 수집 및 연계기술 • AI·디지털 트윈 기반 예측·최적화기술 • 탄소 대시보드 및 의사결정지원기술	• 데이터 기반 실시망 탄소관리 및 저감 의사결정 지원
⑤ 친환경·저탄소 축산 가치창출	① 저탄소 축산물 인증기술	• 저탄소 축산물 인증체계 • 탄소라벨링 기술	• 저탄소 축산물의 시장 신뢰 확보 및 소비자 친환경 선택 지원
	② 탄소크레딧 및 탄소시장 연계기술	• 탄소크레딧 인증기술 • 탄소시장 연계기술 • 농가 인센티브 지원기술	• 감축성과의 경제적 가치화로 농가 소득 증대
	③ ESG 및 공급망 탄소관리기술	• 공급망 탄소관리기술 • Green Premium 창출기술 • 지속가능 공급망 구축기술	• ESG 경영 및 공급망 탄소관리로 지속가능한 축산 가치사슬 구축

※ 본 표는 5대 기술체계와 각 세부기술의 하위 세부기술(하위 항목) 및 핵심 내용을 요약한 것입니다.

3 적용분야 및 활용 영역

○ 친환경 · 저탄소 축산 기술의 적용 분야

- 친환경 · 저탄소 축산 기술은 한우, 젖소, 돼지 및 가금류 등 주요 축종의 생산 특성과 온실가스 발생 특성을 고려하여 적용되는 통합기술 분야임. 반추가축은 장내발효에 의한 메탄 발생 비중이 높아 저메탄 사료, 정밀영양사양 및 생산효율 향상기술의 적용 효과가 크며, 돼지와 가금은 질소 이용효율 향상과 분뇨 정화 · 자원화 기술을 중심으로 환경부하 저감 효과를 기대할 수 있음.
- 또한 본 기술은 축산농가뿐 아니라 사료산업, 종축산업, 축산기자재 산업, 가축분뇨 처리산업, 에너지 산업, 축산물 유통산업 및 식품기업까지 적용되는 융합기술 분야이며, 최근에는 저탄소 축산물 인증, ESG 경영 및 공급망 탄소관리 확대에 따라 정부, 지자체 및 민간기업의 탄소중립 전략을 지원하는 핵심 기반기술로 활용되고 있음.

○ 친환경 · 저탄소 축산 기술의 활용 영역

- 친환경 · 저탄소 축산 기술은 농장 운영, 국가 정책 및 산업 · 시장 분야에서 상호 연계되는 통합 활용체계를 구성하며, 축산 가치사슬 전반의 탄소관리와 경제적 가치 창출의 기반기술로 활용됨.
- (국가 단위 정책 지원) 국가 차원에서는 IPCC Tier 1~3 방법론을 기반으로 축산부문의 온실가스 배출량을 산정하고 국가 온실가스 인벤토리 구축, 국가온실가스감축목표(NDC) 이행 및 정책 수립에 활용됨. 특히 센서와 디지털 기술을 활용한 Tier 2 · 3 고도화를 통해 농가의 실제 저감 성과를 국가 통계에 반영할 수 있으며, 친환경 축산 지원정책과 감축사업의 객관적 근거를 제공함.
- (제품 및 시장 가치 창출) 제품 및 시장 분야에서는 전과정평가(LCA)를 활용하여 사료 생산부터 축산물 생산, 유통 및 소비까지 생애주기의 탄소발자국을 정량화하고, 저탄소 축산물 인증과 탄소라벨링의 기반자료로 활용됨. 또한 결과발생적 전과정평가(cLCA)를 통해 바이오가스 생산, 고체연료화 및 바이오차 생산과 같은 자원화 기술의 화석연료 대체효과를 평가하여 친환경 축산물의 시장 경쟁력과 부가가치를 향상시키는 데 활용됨.
- (농가 · 기업의 탄소경영 및 수익화) 농가와 기업에서는 GHG Protocol 기반의 Scope 1~3 온실가스 관리와 Scope 4 회피배출량 산정을 통해 생산 전 과정의 탄소경영 체계를 구축하는 데 활용됨. 또한 센서 기반의 MRV(측정 · 보고 · 검증) 체계를 통해 저감성과를 객관적으로 검증하고, 탄소배출권 거래, 자발적 탄소시장(VCM), ESG 경영 및 공급망 탄소관리와 연계하여 친환경 활동을 경제적 가치와 수익으로 전환하는 기반기술로 활용됨.
- (디지털 기반 통합 탄소관리 플랫폼) 국가 정책, 제품 인증 및 농가 경영에서 생산되는 데이터를 통합하여 축산분야 전과정평가(LCA) 및 탄소 및 자원 통합 관리 디지털 플랫폼(C-RIMS)을 구축하는 데 활용됨. C-RIMS는 농장 IoT 센서와 MRV 데이터를 기반으로 국

가 인벤토리(IPCC Tier 3), LCA, GHG Protocol 및 Scope 4를 연계하는 디지털 플랫폼으로 활용되며, 향후 AI 기반 자원화 최적화, 바이오차 탄소격리 평가, 고체연료 품질관리, 경축순환농업의 탄소저장 평가 및 블록체인 기반 탄소이력관리 등 축산 탄소관리 기술의 핵심 인프라로 발전할 것으로 전망됨.

표 5. 친환경 · 저탄소 축산 기술 적용 및 활용방안

구분	활용 방법론	주요 적용 영역 및 내용
국가 온실가스 저감목표(NDC) 달성 및 정책 수립	IPCC Tier 2, Tier 3	• **국가 인벤토리 보고서(NIR) 작성:** UNFCCC 제출용 통계의 신뢰성 확보 • **친환경 축산 보조금 평가:** 저메탄 사료·분뇨 처리 개선 저감 성과를 국가 통계에 반영 • **탄소중립 지도 구축:** 지역별 사육·처리 데이터를 바탕으로 맞춤형 정책 수립
저탄소 축산물 인증 및 ESG 유통 마케팅	속성 전과정평가 (aLCA), GHG Protocol Scope 1~3	• **저탄소 인증 및 라벨링:** 축산물 기능단위당(kg, L 등) 온실가스 배출량을 표시해 프리미엄 시장 개척 • **Scope 3 공급망 관리:** 사료 재배부터 환경까지 가치사슬 전반의 온실가스 배출량 관리
축산 부산물·분뇨 자원화 및 에너지 사업	결과발생적 전과정평가 (cLCA), GHG Protocol Scope 4	• **바이오가스·고체연료화:** 분뇨 자원화로 화석연료를 대체하여 발생하는 회피 배출량 정량화 • **푸드 업사이클링 사료화:** 식품 부산물 재활용으로 폐기물 처리 시 온실가스 배출 회피 효과 입증
스마트 축산 연계 탄소배출권 거래 및 MRV	IPCC Tier 3, MRV 시스템, GHG Protocol Scope 1	• **실시간 배출 관리:** IoT 센서 및 자동 급이기 기반 활동 데이터 수집(M) 및 클라우드 보고(R) • **탄소배출권(Offset) 거래:** 검증(V)받은 저감량을 자발적 탄소배출권으로 전환해 매매

Ⅲ. 기술 발전 동향 및 전망

1 국내외 기술 발전 동향

1.1. 친환경 사료 투입 최적화 기술

○ 장내발효 메탄 저감을 위한 사양 기술

가. 세계 기술개발 동향

- 메탄은 축산부문 온실가스의 가장 큰 배출원으로 인식되면서 세계적으로 저메탄 사료첨가제 개발과 상용화가 빠르게 진행되고 있음.
- 현재 가장 상용화 수준이 높은 기술은 DSM-Firmenich가 개발한 (3-NOP, Bovaer®)로, 반추위 내 메탄 생성의 최종단계를 촉매하는 Methyl-CoM reductase(MCR)를 선택적으로 억제하여 메탄 배출을 10~20% 이상 안정적으로 감소시키는 것으로 보고되었으며, 약 40 개국에서 사용이 승인됨.
- 호주의 홍조류(Asparagopsis spp.) 기반 첨가제는 브로모포름을 이용하여 최대 80% 수준의 메탄 저감 효과를 보이고 있으며, 미국의 질산염 기반 첨가제, 일본의 캐슈넛 껍질액(CNSL), 유럽의 Mootral(마늘 추출물 기반) 등 다양한 천연소재와 기능성 사료첨가제가 개발 · 상용화되고 있음.
- 최근에는 단일 첨가제보다 저메탄 사료와 정밀영양기술을 결합한 복합 저감기술 개발이 확대되는 추세임.
- 저메탄 기술의 효과를 객관적으로 검증하기 위해서는 메탄 발생량을 정량적으로 측정하는 기술이 필수적이며, 호흡대사챔버(Respiration Chamber), GreenFeed 시스템, 스니퍼(Sniffer), 레이저 기반 측정법(LMD) 등이 대표적으로 활용되고 있음. 최근에는 직접 측정기술과 함께 AI 및 머신러닝을 이용한 메탄 발생량 예측기술이 빠르게 발전하고 있음.

표 6. 메탄 측정 방법의 종류 및 장단점

측정 방법	측정 원리	장점	단점	주요 활용
호흡대사챔버	밀폐 공간 내 CH_4·CO_2 등 농도 변화 측정	최고 정밀도, 에너지대사 연계	고비용, 현장 적용 불가	Golden standard, Tier 2 계수 개발
GreenFeed	자동 먹이통에서 호기가스 측정	자동화, 현장 설치 가능	장비 고가, 관리 필요	목장 단위 지속 모니터링
스니퍼 법	사료섭취 시 날숨·트림 가스 채집	다 두수 현장 측정 가능	개체 행동 변이, 추정식 정확도	대규모 DB 구축, 현장 예측 모델
LMD(레이저측정법)	반사 레이저로 CH_4 농도 측정	휴대성, 비침습적	기상 조건 영향, 변이 큼	스크리닝, 첨가제 효과 평가

나. 국내 기술 수준

- 국내에는 아직 공식 등록된 메탄 저감 사료첨가제가 없으나, 메탄 측정과 국가 고유 배출계수 개발에서는 상당한 기술 기반을 확보하고 있음. 서울대학교는 호흡대사챔버를 활용하여 한우 국가 고유 메탄 배출계수를 개발하여 국가 인벤토리에 반영하였으며(2019), 2024년 국내 최초 메탄저감제 등록시험 수행기관으로 지정되어 저메탄 사료 실증 기반을 구축함.
- 한경국립대학교는 GreenFeed 및 스니퍼 데이터를 기반으로 AI 메탄 예측모델(XGBoost, R^2=0.930)을 개발하여 기존 회귀모델보다 높은 정확도를 확보하는 등 디지털 기반 메탄 모니터링 기술을 보유함.

다. 향후 발전 전망

- 향후 저메탄 사료기술은 기능성 사료첨가제 중심의 단일 저감기술에서 정밀영양, AI 기반 메탄 예측 및 디지털 탄소관리와 연계된 통합기술로 발전할 것으로 전망됨.
- 특히 실시간 메탄 측정기술과 MRV 체계가 구축되면 저메탄 사료의 감축효과를 국가 인벤토리(IPCC Tier 3), 전과정평가(LCA) 및 탄소크레딧과 직접 연계할 수 있어, 저메탄 기술이 환경규제를 위한 기술을 넘어 농가의 새로운 경제적 가치 창출 기술로 발전할 것으로 예상됨.

○ 가축분뇨 질소 저감을 위한 저단백 사료 체계

가. 세계 기술개발 동향

- 가축분뇨에서 발생하는 아산화질소(N_2O)는 가축이 이용하지 못한 질소가 분뇨 처리 및 토양 환경에서 질산화 · 탈질화 과정을 거치며 생성되는 대표적인 온실가스임. 이를 저감하기 위해 세계적으로는 저단백질 사료(Low Crude Protein Diet)와 필수아미노산 균형 공급을 기반으로 하는 정밀 단백질 영양(Precision Protein Nutrition) 기술이 빠르게 확산되고 있음.
- 최근에는 보호아미노산과 반추위 보호단백질을 활용하여 생산성을 유지하면서 질소 이용효율(NUE)을 높이는 기술이 상용화되고 있으며, AI 기반 영양설계 기술 연계 정밀 단백질 급여체계가 차세대 기술로 주목받고 있음.

나. 국내 기술 수준

- 국내에서도 저단백 사료기술은 가축분뇨 질소 저감을 위한 대표적인 감축기술로 인정받고 있으며, 조단백질 함량을 낮추고 필수아미노산 중심으로 영양을 설계하여 질소 배설량을 감소시키는 기술이 현장에 적용되고 있음.
- 이를 통해 암모니아 휘산과 분뇨 유래 아산화질소 발생이 감소하는 것으로 보고되고 있으며, 사료비 절감 효과까지 확인되어 농가의 수용성이 높은 기술로 평가받고 있음.

다. 향후 발전 전망

– 단순한 저단백 사료에서 정밀 단백질 영양 관리와 디지털 사양관리 기술이 결합된 고도화 기술로 발전할 것으로 전망됨. 보호아미노산, 반추위 보호단백질 및 AI 기반 영양설계가 확대되면서 생산성을 유지하면서 질소 이용효율을 극대화하는 방향으로 발전할 것으로 예상됨.

– 또한 질소 저감효과가 메탄 저감 및 분뇨 자원화 기술과 연계되면서 축산부문의 통합 온실가스 감축체계 구축에 중요한 역할이 전망됨.

1.2. 가축 생산효율 최적화 기술

○ 정밀영양 및 스마트 사양관리 기술

가. 세계 기술개발 동향

– 가축 생산효율 향상기술은 동일한 사료와 자원을 이용하여 더 많은 축산물을 생산하면서 온실가스 배출강도를 감소시키는 핵심 기술로 발전하고 있음. 최근에는 정밀영양(Precision Nutrition), 정밀급여(Precision Feeding) 및 스마트축산 기술이 결합되면서 개체별 영양 요구량을 실시간으로 분석하고 최적의 사료를 공급하는 기술이 상용화되고 있음.

– 특히 유럽과 북미에서는 자동급이기, 반추행동 센서, 체중 및 산유량 자동계측 시스템, 웨어러블 센서 등을 활용하여 개체별 생체정보를 실시간으로 수집하고 AI 기반 의사결정 시스템과 연계하는 정밀사양관리 기술이 빠르게 보급되고 있으며, 이를 통해 사료 이용효율을 향상시키고 메탄과 질소 배출을 동시에 감소시키는 통합 관리기술로 발전하고 있음.

나. 국내 기술 수준

– 국내에서는 ICT 기반 스마트축산 장비의 보급과 함께 자동급이시스템, 환경센서 및 개체 모니터링 기술이 확대되고 있으며, 한우와 젖소를 중심으로 정밀사양관리 기술의 현장 적용이 증가하고 있음.

– 또한 AI 기반 사료배합과 개체별 영양관리 기술 개발이 진행되고 있으며, 축사 환경정보와 생산정보를 연계한 데이터 기반 의사결정 기술이 지속적으로 고도화되고 있음.

다. 향후 발전 전망

– 향후 정밀사양관리 기술은 IoT 센서와 AI 기반 디지털 플랫폼이 결합된 디지털 정밀축산으로 발전할 것으로 전망됨. 개체별 생체정보와 사료섭취량, 생산성 및 환경정보를 실시간으로 분석하여 최적의 영양관리와 사양관리를 자동 수행하는 기술이 확대될 것이며, 탄소 및 자원 통합 관리 디지털 플랫폼(C-RIMS)과 연계되어 생산성과 온실가스 감축효과를 동시에 관리하는 것이 예상됨.

○ 생산성 향상 및 저탄소 육종기술

가. 세계 기술개발 동향

– 가축 생산효율 향상을 위한 육종기술은 증체량, 산유량, 번식성적 등 생산형질 중심에서 사료효율, 메탄 발생량 및 질소 이용효율을 함께 고려하는 저탄소 육종기술로 발전하고 있음.

– 특히 유전체 선발(Genomic Selection)의 도입으로 생산성과 환경성을 동시에 개선할 수 있는 개체를 조기에 선발하는 기술이 발전하고 있으며, 표현형 데이터와 유전체 정보를 통합 분석하는 AI 기반 디지털 육종기술이 빠르게 확산되고 있음.

– 젖소에서는 생애 생산성과 사료효율 향상, 한우에서는 사육기간 단축과 사료효율 개선이 주요 육종목표로 설정되고 있음.

나. 국내 기술 수준

– 국내에서는 한우 유전체 선발체계가 구축되어 경제형질 중심의 개량이 이루어지고 있으며, 최근에는 메탄 배출량과 사료효율을 고려한 저탄소 형질 발굴 연구가 확대되고 있음.

– 친환경 축종과 관련한 한우를 중심으로 연구가 시작되는 단계임.

다. 향후 발전 전망

– 향후 생산효율 향상기술은 생산성 중심의 개량에서 생산성 · 환경성 · 경제성을 동시에 고려하는 지속가능 육종체계로 발전할 것으로 전망됨. AI 기반 유전체 예측과 디지털 표현형 분석기술이 확대되면서 메탄 발생량, 사료효율 및 질소 이용효율을 동시에 고려하는 저탄소 육종이 예상됨.

1.3. 가축 분뇨 관련 기술 동향

○ 가축 분뇨 환경부하 저감 및 에너지화

가. 세계 기술개발 동향

– 가축분뇨 관리기술은 단순한 퇴비화 중심의 처리기술에서 온실가스 저감과 자원순환을 동시에 달성하는 친환경 처리기술로 빠르게 전환되고 있음. 과거의 단순 퇴적식 퇴비화는 혐기성 분해 과정에서 메탄(CH_4)과 악취를 다량 발생시키는 한계가 있었으나, 최근에는 강제송풍과 기계교반을 이용한 호기성 퇴비화 기술이 보급되면서 메탄 발생을 효과적으로 저감하고 퇴비 품질을 향상시키는 방향으로 발전하고 있음.

– 또한 액상분뇨를 대상으로 하는 생물학적 정화처리 기술과 혐기소화 기반 바이오가스 생산기술이 확대되면서 분뇨를 단순 폐기물이 아닌 에너지 자원으로 활용하는 기술이 상용화되고 있음.

– 특히 유럽을 중심으로 바이오가스 생산과 전력 · 열 이용이 활발하게 이루어지고 있으며,

최근에는 가축분뇨를 고체연료(Solid Fuel)와 바이오차(Biochar)로 전환하여 화석연료를 대체하는 기술이 주목받고 있음.

나. 국내 기술 수준

- 국내에서는 가축분뇨의 퇴·액비화가 가장 보편적인 처리방식으로 활용되고 있으며, 메탄 및 암모니아 배출을 줄이기 위한 강제송풍 퇴비화와 기계교반 기술이 점차 확대되고 있음. 액상 돼지분뇨를 대상으로 하는 정화처리 기술은 생물학적 폭기와 화학적 응집·침전 공정을 이용하여 방류수 수질기준을 충족시키는 수준까지 상용화되어 있음.
- 최근에는 우분을 활용한 고체연료 생산과 바이오가스 실증사업이 확대되고 있으며, 생산된 고체연료는 제철소 및 발전소의 혼소연료로 활용되어 화석연료를 대체하고 있음.
- 또한 경축순환농업과 연계한 자원순환 기술도 실증 단계로 확대되고 있으나, 경제성과 제도적 지원체계는 아직 보완이 필요한 수준임.

다. 향후 발전 전망

- 향후 가축분뇨 관리기술은 환경오염 저감 중심의 처리기술에서 탄소중립형 자원순환 시스템으로 발전할 것으로 전망되며, 단순 퇴비화에서 벗어나 바이오가스 생산, 고체연료화, 바이오차 생산 및 양분 회수 기술이 통합된 에너지·자원화 체계가 확대될 것으로 예상됨.
- 또한 분뇨 처리시설에 IoT 센서와 AI 기반 운영기술을 적용하여 메탄과 암모니아 배출을 실시간으로 관리하고, 생산된 바이오에너지와 탄소저감 효과를 MRV 체계를 통해 검증하는 기술이 확대될 것으로 전망됨.
- 이러한 기술은 Scope 4 회피배출량 산정, 탄소크레딧 및 저탄소 축산물 인증과 연계되어 발전할 것으로 기대됨.

○ 디지털 탄소·자원 모니터링 및 통합관리

가. 세계 기술개발 동향

- 축산분야의 탄소관리는 단순한 온실가스 배출량 산정에서 벗어나 생산 전 과정의 데이터를 통합 관리하는 디지털 플랫폼 중심으로 발전하고 있음. 국가 차원에서는 IPCC Tier 2/3 기반 국가 온실가스 인벤토리 고도화가 추진되고 있으며, 기업과 시장에서는 전과정평가(LCA), GHG Protocol 및 MRV 체계를 활용한 탄소관리 체계가 확대되고 있음.
- 최근에는 위성영상 및 IoT 센서를 활용한 디지털 모니터링 기술이 개발되고 있으며, 수집된 데이터를 AI 기반 플랫폼에서 통합 분석하여 농장단위 탄소배출을 관리하는 기술이 빠르게 확산되고 있음.
- 또한 글로벌 식품기업들은 Scope 3 공급망 배출량 관리와 ESG 공시를 위해 축산 공급망 전체의 탄소정보를 관리하는 체계를 구축하고 있음.

나. 국내 기술 수준

- 국내에서는 국가 온실가스 인벤토리의 Tier 2 고도화를 위한 국가 고유 배출계수 개발이 지속적으로 추진되고 있으며, 장내발효와 분뇨관리 분야의 활동자료를 활용한 배출량 산정기술이 구축되고 있음.
- 서울대학교와 국립축산과학원은 한우 국가 고유 메탄 배출계수를 개발하여 국가 인벤토리에 적용하였으며, AI 기반 메탄 예측모델과 농장단위 LCA 및 MRV 기술 개발도 활발히 진행되고 있다.
- IoT 센서, 스마트축산 플랫폼 및 AI 기반 의사결정 기술을 활용하여 농장의 생산정보와 환경정보를 통합 관리하는 기술이 확대되고 있으며, 축산 전과정평가(LCA), GHG Protocol, Scope 3/4 및 MRV를 통합 관리하기 위한 탄소 및 자원 통합 관리 디지털 플랫폼(C-RIMS) 구축이 추진되고 있음.

다. 향후 발전 전망

- 향후 개별 온실가스 측정기술에서 AI 기반 통합 탄소관리 플랫폼으로 발전할 것으로 전망되며, 농장 IoT 센서, 위성 및 원격탐사, AI 예측모델과 디지털 트윈 기술이 결합되면서 생산 전 과정의 탄소배출과 자원 흐름을 실시간으로 관리하는 체계가 구축될 것으로 예상됨.
- 또한 IPCC Tier 3, 전과정평가(LCA), GHG Protocol, Scope 3/4 및 MRV를 하나의 플랫폼에서 통합 관리하는 C-RIMS가 축산분야 디지털 탄소관리의 핵심 인프라로 자리잡을 것으로 전망됨.

○ 친환경 · 저탄소 축산 가치창출

가. 세계 기술 개발 동향

- 친환경 · 저탄소 축산의 가치창출 체계는 온실가스 감축성과를 인증, 거래 및 시장 차별화로 연계하는 방향으로 발전하고 있음. 자발적 탄소시장(Voluntary Carbon Market, VCM)을 활용하여 축산분야 온실가스 감축량을 탄소크레딧으로 전환하려는 시도가 확대되고 있음.
- 또한 식품기업과 유통기업을 중심으로 공급망 배출량을 감축하는 인세팅(Insetting) 방식과 Scope 3 관리가 강화되면서, 농가의 저탄소 생산활동을 기업의 ESG 경영과 연계하는 체계가 확산되고 있음.

나. 국내 기술 수준

- 국내에서는 저탄소 축산물 인증과 농가 인센티브 제도를 중심으로 가치창출 기반이 형성되고 있으나, 감축실적의 정량화와 탄소시장 연계를 위한 MRV 체계는 아직 고도화가 필요한 수준임.
- 저메탄 사료, 저단백 사료, 분뇨 자원화 등 기술별 감축효과를 객관적으로 검증하고 이를

인증 및 보상체계에 반영하는 표준화된 방법론이 요구됨.

– 또한 친환경, 동물복지 및 저탄소 인증을 연계하여 복합적인 환경 · 사회 가치를 소비자에게 전달하려는 시도가 확대되고 있음. 다만 인증 간 평가기준과 정보표시 방식이 상이하여 통합적 시장가치 형성을 위한 제도적 정비가 필요한 상황임.

다. 향후 발전 전망

– 향후 친환경 · 저탄소 축산 가치창출은 단순 인증 중심에서 벗어나 감축성과의 측정 · 검증, 탄소시장 거래 및 공급망 가치화가 결합된 통합체계로 발전할 것으로 전망됨.

– 또한 친환경 · 동물복지 · 저탄소 인증의 연계와 탄소라벨링 확대를 통해 소비자의 선택기준이 다양화되고, 저탄소 축산물의 Green Premium 형성이 본격화될 것으로 전망됨.

표 7. 친환경 · 저탄소 축산 기술의 국내외 기술 수준 비교

핵심기술	국내 수준	주요 선도국	국외 발전 특징	국내 보완과제
친환경사료 투입 최적화	실증 및 초기 보급	EU, 미국, 일본	첨가제 상용화 및 크레딧 연계	장기 안정성 및 경제성 검증
생산효율 최적화	축종별 기술 개발	EU, 북미, 뉴질랜드	센서, AI, 유전체 통합	환경형질 데이터 확보
분뇨 환경부하 저감 및 에너지화	시설 확산 단계	독일, 덴마크, 일본	지역 에너지망 연계	규모별 경제성 확보
탄소 모니터링 및 관리	Tier 고도화 단계	EU, 뉴질랜드, 미국	농장, 공급망 단위 MRV	표준 데이터체계 구축
가치창출	인증 및 시범사업 단계	EU, 호주, 뉴질랜드	탄소시장 및 인세팅 확대	**감축량 보상 체계 정립**

표 8. 환경부하 저감 핵심 기술 평가

저감 핵심 요소 기술	기술적 난이도	현장 실현 가능성	온실가스 저감량 범위
저단백 사료 급여	★★☆☆☆ (배합비율 조정 수준의 낮은 장벽)	★★★★★ (단백질 원료 절감에 따른 사료비 인하 효과로 높음)	분뇨 질소 31.1% 저감, N_2O 9.7~13.2% 저감
저메탄 사료 보급	★★★☆☆ (미생물 적응 반응 제어 및 생리적 안전성 확보 필요)	★★★★☆ (배합 용이성 존재하나, 농가 생산성 개선이 미확정되어 보조금 필요)	CH_4 14~91% 저감, 한육우 누적 71만톤 저감 목표
퇴비화 송풍/교반 개선	★★☆☆☆ (기존 퇴비사에 기계 장치 설치로 장벽 낮음)	★★★★☆ (저탄소 영농 보조금 지원 시 현장 도입 용이)	한육우 1두당 연간 0.15~0.17 톤 CO_2eq 직배출 저감
가축분뇨 정화처리 (수처리)	★★★☆☆ (화학적 응집 및 생물학적 폭기조 설비 운영 기술 요구)	★★★★☆ (정부의 양돈장 규제 강화와 시설 자금 지원으로 확대)	액상 분뇨 저장에 따른 메탄 방지, 국가 처리비중 25% 목표
고체연료화 및 석탄 대체	★★★★☆ (수분 건조 최적화 및 펠릿 성형 기술 요구)	★★★☆☆ (외부 화력발전소/제철소와의 공급망 인프라 계약 선결 필요)	석탄 연소 대체로 연간 3.8만 가구 전력 공급 및 온실가스 회피 저감 목표

2 기술발전 흐름

○ 친환경 · 저탄소 축산 기술의 발전 흐름

– 친환경 · 저탄소 축산기술은 초기의 환경오염 저감 중심 관리에서 출발하여 개별 감축기술 개발, 생산성과 환경성의 통합관리, 그리고 환경성과의 경제적 가치 창출 단계로 발전하고 있음. 최근에는 개별 기술의 성능 향상보다 생산 전 과정의 데이터를 통합하여 탄소와 자원을 동시에 관리하는 디지털 플랫폼 중심으로 기술 패러다임이 전환되고 있음.

○ 1단계 : 환경오염 대응 중심 (1990년대~2000년대)

– 악취, 수질오염 및 분뇨 민원 대응 중심의 환경관리 추진

– 퇴 · 액비화 중심의 가축분뇨 처리기술 보급

– 생산성 향상과 환경관리가 독립적으로 추진됨

– 온실가스 감축 개념은 제한적으로 적용되었음

○ 2단계 : 개별 온실가스 저감기술 개발 (2000년대 후반~2010년대)

– 저메탄 사료첨가제 및 저단백질 사료 개발 확대

– 퇴비화 공정 개선 및 분뇨 정화처리기술 고도화

– 바이오가스 및 고체연료화 기술 도입

– 기술별 온실가스 감축효과 검증 연구 확대되었음

○ 3단계 : 생산성과 환경관리의 통합 (2010년대 후반~2020년대)

– 정밀영양 및 정밀사양관리 기술 확대

– 사육기간 단축 및 사료효율 향상을 통한 배출강도 관리

– 스마트축산 기반 개체별 생체정보 관리기술 도입

– 분뇨 처리와 에너지 생산을 통합하는 자원순환 체계 구축되었음

○ 4단계 : 데이터 기반 전 과정 탄소관리 (현재)

– 농장단위 MRV 및 전과정평가(LCA) 적용 확대

– 국가 고유 배출계수(IPCC Tier 2/3) 고도화 추진

– 사료-가축-분뇨처리 데이터를 통합하는 디지털 관리체계 구축

– AI 기반 탄소예측과 의사결정지원 기술 개발 확대되었음

– C-RIMS 구축을 위한 국가 단위 데이터 통합 기반 마련되었음

○ 5단계 : 디지털 탄소관리 기반 환경성과의 가치창출 (미래)

– C-RIMS 기반 국가 · 농가 · 기업 탄소정보 통합관리 실현

– 저탄소 축산물 인증 및 탄소라벨링 고도화
– 탄소크레딧, Scope 3/4 및 공급망 인세팅(Insetting) 확대
– ESG 경영과 Green Premium 기반 시장 차별화 확산
– 지역순환경제, 재생에너지 및 AI 기반 자원순환 플랫폼과 연계된 지속가능 축산체계 구축될 것으로 전망됨

○ 향후 발전 전망

– 저메탄 사료기술은 단순한 메탄저감 첨가제나 원료사료 조성 개선 중심의 기술에서 AI 기반 개체별 메탄 예측, 정밀영양 및 저메탄 형질개량을 통합하는 디지털 정밀축산 기술로 발전하고 있음. 또한 가축분뇨 관리기술은 퇴 · 액비화 중심의 처리기술에서 바이오가스, 고체연료, 바이오차 및 양분 회수를 포함하는 자원순환 기술로 확대되고 있으며, 이러한 기술들의 감축효과를 객관적으로 검증하기 위한 LCA 및 MRV 연구가 활발히 추진되고 있음.
– 국내에서는 서울대학교, 강원대학교 등 학계와 연구기관을 중심으로 국가 고유 배출계수(IPCC Tier 2/3), 농장단위 LCA, MRV 및 Scope 3/4 산정을 위한 기초 연구가 진행되고 있으며, 플로팅 챔버, 윈드터널, 환경조절챔버 및 AI 기반 분석기술을 활용하여 장내발효와 분뇨처리 과정의 배출량을 정량화하고 있음. 이러한 연구성과는 축산분야 전과정평가(LCA)와 탄소 및 자원 통합 관리 디지털 플랫폼(C-RIMS) 구축의 핵심 기반자료로 활용되고 있음.

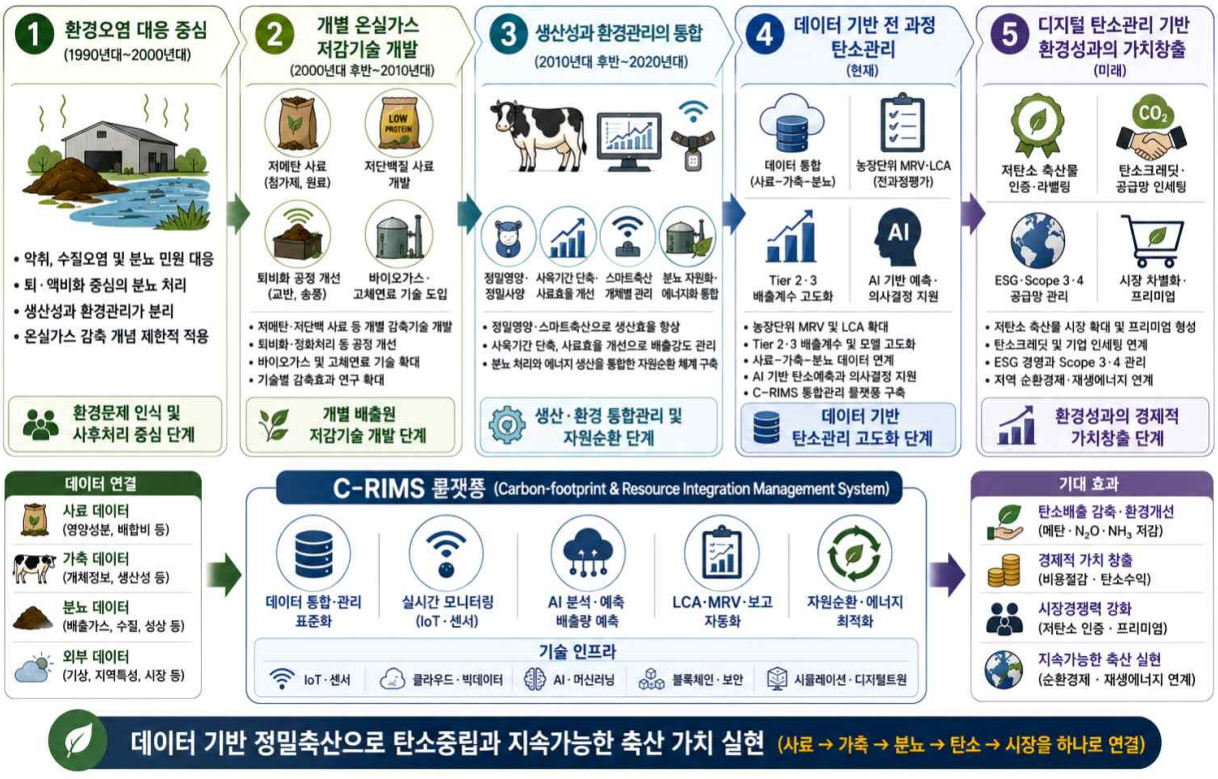


그림 5. 친환경 저탄소 축산기술의 발전단계 및 향후 전망

– 향후 친환경 · 저탄소 축산기술은 개별 감축기술 중심에서 벗어나 '사료-가축-분뇨-토양 및 에너지, 그리고 탄소시장'을 하나의 데이터 체계로 연결하는 디지털 플랫폼 중심으로 발전할 것으로 전망됨. C-RIMS를 기반으로 IPCC Tier 3, LCA, GHG Protocol, MRV 및 Scope 3/4가 통합되면 국가 온실가스 인벤토리 고도화는 물론 저탄소 축산물 인증, 탄소크레딧, ESG 공급망 관리 및 AI 기반 자원순환 최적화까지 연계되는 친환경 기반 정밀축산(Eco-friendly Precision Livestock Farming) 체계가 구축될 것으로 전망됨.

3 핵심 발전축

○ 발전축 1. 정밀화 · 데이터화 (Precision & Data-driven)

– 경험과 평균값에 의존하던 축산관리가 개체별 생체정보와 농장 데이터를 기반으로 정밀하게 제어되는 방향으로 발전할 것으로 전망됨. 생산 전 과정에서 발생하는 활동자료를 자동으로 수집 · 분석하여 탄소관리와 생산관리를 동시에 최적화하는 기반기술로 발전할 것으로 예상됨.

– (핵심기술) 축종 · 사육단계 · 개체별 영양 요구량 정밀화, 사료 · 생산성 · 메탄 · 질소 · 분뇨 데이터 통합, Data Ingestion API 기반 활동자료 자동 수집, 농장단위 탄소발자국 및 배출량 실시간 산정, 데이터 기반 의사결정 및 Tier 3 고도화

○ 발전축 2. 지능화 · 자동화 (AI & Autonomous Management)

– AI와 디지털 기술이 축산 생산 전 과정에 적용되면서 사람의 경험을 대신하여 실시간 분석과 자동 제어가 가능한 자율형 스마트축산으로 발전할 것으로 전망됨. 생산성 향상과 온실가스 감축을 동시에 고려하는 최적 의사결정 기술이 핵심 경쟁력이 될 것으로 예상됨.

– (핵심기술) AI 기반 정밀급여, 건강 · 행동 · 생산성 실시간 모니터링, 분뇨처리시설 자동운전 및 공정제어, AI 기반 탄소배출 예측 및 감축전략 추천

○ 발전축 3. 바이오기반 저감기술 고도화 (Bio-based Carbon Mitigation)

– 화학적 저감기술 중심에서 벗어나 반추위 미생물과 유전체를 활용한 생물학적 저감기술이 확대될 것으로 전망됨. 기능성 소재와 정밀영양 및 유전개량 기술이 융합되어 생산성과 환경성을 동시에 향상시키는 방향으로 발전할 것으로 예상됨.

– (핵심기술) 반추위 미생물 및 메탄 생성경로 제어, 기능성 미생물 · 대사체 · 효소제 개발, 멀티오믹스 기반 정밀영양, 저메탄 및 고효율 유전체 선발, 저감소재-정밀사양-유전개량 통합기술

○ 발전축 4. 순환경제 · 에너지 통합 (Circular Bioeconomy)

– 축산 부산물을 폐기물에서 에너지와 자원으로 전환하는 순환형 생산체계가 확대되며 농장 단위를 넘어 지역 단위의 자원순환과 에너지 자립을 실현하는 통합 솔루션으로 발전할 것으로 예상됨.

– (핵심기술) 농식품 부산물의 사료자원화, 바이오가스 · 고체연료 · 바이오차 생산, 질소 · 인 회수 및 GIS 기반 양분순환 관리, LCA Computation Engine 기반 Scope 4 평가

○ 발전축 5. 디지털 탄소관리 기반 가치창출 (Carbon Value Creation)

– 온실가스 감축성과를 단순한 환경지표가 아닌 경제적 가치로 전환하는 기술과 제도가 확대될 것으로 전망됨. 디지털 탄소관리 플랫폼을 기반으로 인증, 탄소시장, 공급망 및 ESG가 하나의 가치사슬로 연결될 것으로 예상.

– (핵심기술) 실시간 MRV 및 자동 검증체계 구축, LCA 기반 제품단위 탄소발자국 산정, 저탄소 축산물 인증 및 탄소라벨링, 탄소크레딧, VCM 및 기업의 생태계 내 직접 온실가스를 줄이는 인세팅(Insetting), MRV Dashboard 기반 온실가스종합정보센터의 온실가스 배출권거래제(GIR · K-ETS) 연계, Green Premium 및 ESG 공급망 가치 창출

○ 미래 핵심 플랫폼 : C-RIMS

– 위의 발전축은 각각 독립적으로 발전하는 것이 아니라 C-RIMS를 중심으로 하나의 통합 플랫폼으로 연결될 것으로 전망됨. C-RIMS는 Data Ingestion API를 통한 활동자료 자동 수집, LCA Computation Engine 기반 Scope 1~4 통합 산정, AI 기반 시나리오 시뮬레이션 및 MRV Dashboard를 통한 정책 · 인증 · 탄소시장 연계를 수행하는 핵심 플랫폼으로 발전할 것으로 예상됨. 이를 통해 '사료-가축-분뇨-토양 및 에너지'를 하나의 데이터 체계로 연결하여 탄소 시장에 대응하는 친환경 기반 정밀축산이 구현될 것으로 전망됨.

표 9. 축산환경 이론 및 정책의 한계점 대응을 위한 C-RIMS

축산 환경 이론/정책 한계점	C-RIMS 플랫폼의 통합적 구현 메커니즘	기대되는 거시적 파급 효과
현장 인벤토리 활동 데이터 수집의 한계 및 2차 데이터 의존에 따른 불확실성 상존	Data Ingestion API: 스마트팜 센서 및 자원화 공정 제어기와 연동하여 전력/사육/연료 데이터를 자동 취합.	MRV 체계 확보 및 행정 비용 저감
자원화 공정 내 자체 에너지 소모 시 배출량이 증가하는 내부 풍선효과	LCA Computation Engine: Scope 1~3 배출량과 Scope 4 상쇄 효과를 연산하여 공정 전환의 저감량 모니터링.	온실가스 증가 방지 및 저탄소 자원화 공정 유도

4 향후 기술 발전 방향

○ 친환경 정밀축산(Eco-friendly Precision Livestock Farming)으로의 전환

– 기후변화 대응과 탄소중립 정책이 강화됨에 따라 미래 축산은 개별 온실가스 저감기술을 적용하는 수준을 넘어, 생산성 · 환경성 · 경제성을 동시에 최적화하는 친환경 기반 정밀축산체

계로 전환될 것으로 전망됨.

- (개별 저감기술에서 통합 플랫폼 기반 기술로의 전환) 메탄 저감, 질소 저감, 정밀사양, 분뇨 처리 및 자원화 기술을 개별적으로 적용하는 방식에서 벗어나, 생산 전 과정을 연계 · 관리하는 통합 기술체계로의 발전이 예상됨.
- (데이터 기반 디지털 정밀축산으로의 전환) 축산 현장에서 생성되는 사양정보, 생체정보, 생산정보, 환경정보 및 온실가스 배출정보의 실시간 수집 · 연계를 기반으로 한 데이터 중심 축산체계로의 전환이 예상됨.
- (AI 기반 자율형 스마트축산으로의 전환) AI, IoT 및 디지털 트윈 기술을 활용한 분석 · 예측 · 제어기능의 통합으로 자율형 스마트축산 체계의 구축이 예상되며 축산농가의 사양관리와 분뇨 처리 공정에 대한 실시간 분석을 바탕으로 다양한 자동 의사결정 체계의 확립이 핵심 과제임.
- (순환경제 기반 탄소중립 축산으로의 전환) 축산분뇨와 농식품 부산물을 폐기 대상이 아닌 사료 · 비료 · 에너지 · 탄소저장 자원으로 활용하는 순환경제 체계로의 발전이 예상됨. 농장 단위 처리 중심에서 지역단위 자원순환과 에너지 통합관리로의 확장, 양분 수용력과 시장 수요를 고려한 최적 자원화 경로의 설계가 핵심 방향임.

표 10. 친환경 기반 정밀축산 기술 개발 로드맵(안)

핵심기술	주요 내용	단기(5년)	중장기(10년
친환경사료 투입 최적화	저메탄·질소저감 순환경 사료	• 저메탄·저질소 사료소재 실증 및 안전성 검증 • 축종별 정밀영양 기준 확립 • 메탄·질소 측정기술 및 활동자료 표준화	• 저탄소 인증 및 탄소라벨 확대 • 탄소크레딧 방법론 개발 • 정책 인센티브 체계 마련
생산효율 최적화	사료효율 향상 및 사육기간 단축 기술	• IoT 기반 생체·생산정보 수집 • 정밀사양 및 생산효율 향상기술 보급 • 저탄소 형질 발굴 및 데이터 축적	• AI 기반 자율형 스마트축산 구현 • 디지털트윈 기반 농장 운영 최적화 • 저메탄·고효율 유전체 육종체계 구축
분뇨 환경부하 저감 및 에너지화	분뇨정화·바이오가스·고체연료화·바이오차 기술	• 바이오가스·고체연료화 기술 고도화 • 지역 공동처리 및 경제성 확보 • 양분 회수기술 및 자원화 공정 실증	• 바이오리파이너리 기반 자원순환 구축 • GIS 기반 양분순환 관리체계 구축 • Scope 4 회피배출 및 에너지 자립 실현
디지털 탄소 모니터링 및 통합관리	MRV, LCA, Tier 2,3, AI 플렛폼	• MRV·LCA 표준화 • Tier 2~3 산정체계 구축 • AI 기반 배출량 예측모델 개발	• 실시간 디지털 MRV 구축 • AI 기반 감축 시나리오 추천 • Scope 1~4 통합 탄소관리 플랫폼 구축
친환경·저탄소 축산 가치창출	저탄소 인증 크레딧,탄소 시장, ESG	• 저탄소 인증 및 탄소라벨 확대 • 탄소크레딧 방법론 개발 • 정책 인센티브 체계 마련	• K-ETS·VCM·기업 Insetting 연계 • Scope 3 공급망 관리 확대 • Green Premium 기반 저탄소 시장 구축

- (환경성과의 경제적 가치 창출로의 전환) 온실가스 감축성과를 인증 · 시장 · 공급망 · 정책 인센티브와 연계하여 경제적 가치로 전환하는 체계의 확대가 예상됨. 신뢰성 있는 측정 · 보고 · 검증체계의 구축과 농가의 시장 접근비용 절감, 저탄소 축산물의 차별화된 시장가치 확보가 핵심 방향임.

– (탄소 및 자원 통합 관리 디지털 플랫폼 : C-RIMS) 향후 친환경 기반 정밀축산의 핵심 인프라로서 C-RIMS 구축의 중요성 증대가 예상됨. C-RIMS를 중심으로 현장 데이터 수집, 온실가스 전과정평가, 자원순환 최적화, MRV 및 정책 · 시장 연계 기능의 통합이 핵심 방향임.

표 11. C-RIMS 핵심 플랫폼 로드맵

핵심기술	주요 내용	단기 (5년)	중장기 (10년)
C-RIMS 현장 데이터 수집 API 모듈	스마트팜 센서망 및 자원화 공정 제어기 연동을 통한 데이터 자동 취합	IoT 데이터 수집 체계 완비 및 현장 보급	국가 디지털 인프라로 정착 및 고도화
LCA 자동 연산 및 MRV 엔진	Tier 2/3 배출계수 DB 연동, Scope 1~4 통합 연산 및 대시보드 시각화	엔진 개발 및 현장 실증 연동	전과정평가 자동 계산 엔진 상용화 및 정책 통합 거버넌스 도구 확산
양분 순환 시뮬레이션 모듈	지역 농경지 N, P, K 양분 수지 GIS 매핑 및 적정 살포 경로 추천	AI 기반 자원화 경로 추천 모듈 현장 보급	지역 단위 양분 관리 및 경축순환농업 거버넌스 정착

5 주요 이슈 및 한계

○ 기술 실증 및 현장 적용의 한계

– 실험실 수준에서 검증된 기술이 실제 농장 환경에서도 동일한 효과를 나타내는지에 대한 검증이 충분하지 않으며, 축종 · 품종 · 사육환경에 따른 효과의 변동성이 큰 한계가 존재함.

– (기술실증의 한계 예시) 실험실과 실제 농장 간 감축효과 차이, 축종 · 품종 · 사육단계별 저감효과 변이, 사료섭취량 및 생산성 변화에 대한 장기 검증 부족, 메탄 저감과 질소 배출 간 Trade-off 발생 가능성, 분뇨처리시설의 계절 및 규모별 성능 편차, 실시간 · 저비용 온실가스 측정기술 부족

○ 동물 건강 및 생산성 영향 연구 부족

– 친환경 · 저탄소 기술은 온실가스 감축뿐 아니라 생산성과 건강성을 동시에 확보하여야 하나, 현재 대부분의 연구는 단기적인 감축효과 검증에 집중되어 있으며 장기적인 생리 · 면역 및 질병 영향에 대한 연구는 부족한 실정임.

– (부족한 연구 내용) 저메탄 · 저질소 사료의 장기 생산성 영향 검증, 반추위 및 장내 미생물 변화가 면역기능에 미치는 영향 연구, Host-Microbiome-Environment 상호작용 연구, 기능성 미생물 · 대사체의 질병 저항성 및 장 건강 효과 검증, 번식성, 면역성 및 동물복지 영향 평가, 생산성 · 환경성 · 건강성을 통합 평가할 수 있는 검증체계

○ 경제성 확보와 산업화의 한계

– 친환경 기술은 환경성과는 우수하지만 초기 투자비와 운영비 부담으로 인해 농가의 기술 도입이 제한되고 있으며, 감축성과가 직접적인 수익으로 연결되지 않는 구조적 문제가 존재함.

– (경제성 및 산업화 제한점) 기능성 사료 및 첨가제의 추가 비용 발생, 분뇨처리 및 에너지화 시설의 초기 투자 부담, 소규모 농가의 기술 도입 한계 존재, 감축 편익이 농가 수익으로 연결되지 않는 구조, 에너지 판매가격 및 부산물 시장의 불확실성

○ 데이터 기반 탄소관리 체계의 한계

– 농장단위 활동자료의 부족과 표준화된 탄소 산정체계의 미흡은 데이터 기반 탄소관리의 가장 큰 제약요인으로 작용하고 있음.

– (탄소관리 체계 한계) 농장단위 활동자료 부족, 국내 Tier 2/Tier 3 배출계수 및 모델 부족, 기술별 감축량 산정방법의 불일치, LCA 시스템 경계 및 기능단위 차이, 기업 · 정부 · 농가 간 데이터 연계 부족, MRV 자동화 및 디지털 탄소관리 플랫폼 미흡

○ 제도 및 정책 기반의 한계

– 기술 개발 속도에 비해 인증, 규제 및 탄소시장 제도의 정비가 충분하지 않아 기술 확산을 제한하는 요인으로 작용함.

– (제도적 한계) 저메탄 · 저질소 사료의 인정기준 및 인증절차 미흡, 감축실적의 중복계상(Double Counting) 방지체계 부족, 탄소크레딧의 추가성 · 영속성 · 검증 문제, 분뇨의 에너지 · 비료 · 바이오차 활용 관련 복수 규제, 부처별 사업 및 데이터의 분절, 정책과 MRV 기반의 연계체계 부족

○ 농가 수용성과 시장 확산의 한계

– 기술의 지속적인 확산을 위해서는 농가와 소비자의 수용성 확보와 경제적 유인 제공이 필요하나, 현재는 이에 대한 기반이 충분하지 않음.

– (확산의 한계) 기술효과 및 경제적 보상에 대한 불확실성, 농가의 행정 관리 부담 증가, 신규 사료 및 자동화시설에 대한 신뢰 부족, 저탄소 축산에 대한 비용 증가 인식, 소비자의 추가 지불 의사 및 시장 수요 불확실성

○ 시스템 차원의 부작용 및 탄소 거버넌스의 한계

– 개별 온실가스 저감기술은 물리 · 화학적으로 감축효과가 입증되었더라도, 시스템 전체를 고려하지 않을 경우 새로운 환경부하나 경제적 비효율을 초래할 가능성이 존재함. 따라서 개별 기술이 아닌 전과정 관점의 통합 평가와 디지털 탄소 거버넌스 구축이 필요함.

– (시스템 운영 시 제한점) 메탄 저감에 따른 에너지 소비 증가 등 내부 풍선효과(Trade-off), 규제 강화에 따른 생산 이전 및 탄소누출(Carbon Leakage) 가능성, LCA 적용에 따른 시스템 경계 확대 및 평가 복잡성, 농가 단위 LCA 및 MRV 수행의 높은 거래비용(Transaction Cost), Scope 1~4를 동시에 고려한 통합 탄소관리체계 부족, 국가 차원의 데이터 거버넌스 및 플랫폼 부재

Ⅳ.산업 및 정책 환경

1 산업 동향

1.1 글로벌 산업 동향

○ 친환경 · 저탄소 축산 산업의 성장

– 과거에는 분뇨 처리와 환경규제 대응이 산업의 중심이었으나, 최근에는 저메탄 · 저질소 사료, 정밀영양, 스마트축산, 분뇨 에너지화, 디지털 탄소관리 및 탄소가치 창출산업이 동시에 성장하면서 축산업의 산업구조가 빠르게 전환되고 있음.

– 글로벌 식품 · 유통기업은 기업 공급망에서 발생하는 Scope 3 온실가스 감축을 주요 과제로 설정하고 있으며, 농장단위 활동자료 확보와 감축실적 검증 요구를 강화하고 있음. 이에 따라 친환경 · 저탄소 축산기술은 단순한 생산기술을 넘어 공급망 관리, 지속가능 조달 및 탄소가치 창출을 지원하는 산업으로 확대되고 있음.

– 유럽연합에서는 현행 탄소국격조정제도(CBAM)과는 별도로 역내 축산농가에 적용되는 환경기준과 수입 축산물 간의 형평성 확보방안이 검토되고 있음. 향후 수입 농축산물의 환경성과, 공급망 추적성 및 내재배출량 정보에 대한 요구가 강화될 가능성이 있으며, 이는 제품단위 탄소발자국과 검증 가능한 환경정보를 새로운 무역경쟁력으로 전환시키는 요인이 될 것으로 예상됨.

○ 핵심 산업별 발전 동향

– 친환경 사료산업에서는 dsm-firmenich의 Bovaer®를 비롯하여 다양한 저메탄 사료첨가제의 상용화가 추진되고 있으며, 기능성 소재의 저감효과, 지속성, 안전성 및 경제성을 중심으로 기업 간 경쟁이 확대되고 있음. 질소저감 분야에서는 Evonik, Adisseo 등 사료 · 아미노산 기업이 저단백질 사료와 아미노산 균형기술을 결합한 정밀영양 시장을 확대하고 있음.

– 저메탄 사료산업의 경쟁구조는 개별 첨가제의 판매에서 농장 실증, 감축량 산정, MRV 및 공급망 감축성과를 통합 제공하는 방향으로 전환되고 있음. 이에 따라 사료기업, 식품기업, 탄소검증기관 및 디지털 플랫폼 기업 간의 협업이 새로운 산업모델로 부상하고 있음.

– 글로벌 식품 · 유가공기업은 공급망 탄소중립 목표 달성을 위해 협력농가를 대상으로 저메탄 사료, 정밀급여, 분뇨관리 및 탄소성과 측정 프로그램을 확대하고 있음. 향후 감축실적에 따른 농가 인센티브, 원유 · 축산물 조달기준 및 기업 인세팅과의 연계가 강화될 것으로 예상됨.

– 분뇨 자원화산업은 바이오가스와 바이오메탄 생산을 중심으로 성장하고 있으며, 최근에는 고체연료, 바이오차, 양분 회수 및 재생에너지 생산을 통합하는 바이오리파이너리 개념으로 발전하고 있음.
– 디지털 탄소관리 분야에서는 Cool Farm Tool, Regrow 및 Agreena 등의 플랫폼이 농장과 공급망의 온실가스 산정, 감축 시나리오 분석, MRV 및 탄소성과 보고 서비스를 제공하고 있음.
– 특히 디지털 플랫폼은 단순 계산도구에서 API 기반 데이터 수집, 공급망 Scope 3 관리, 제3자 검증 및 감사 대응을 지원하는 통합 탄소관리 인프라로 발전하고 있음. Cool Farm Platform은 API 중심의 시스템 통합 방향을 제시하고 있으며, Regrow와 Agreena도 자동 데이터 입력, 원격탐사 및 디지털 MRV 기능을 확대하고 있음.

표 12. 글로벌 친환경 · 저탄소 축산 산업 동향

산업분야	주요 기업	산업 동향	향후 전망
친환경사료 투입 최적화	DSM-Firmenich, Cargill, CH4 Global	저메탄 첨가제 상용화 확대	기능성 바이오소재 중심 성장
생산효율 최적화	DeLaval, Lely, Allflex	AI·센서 기반 정밀관리	개체 맞춤형 관리체계 확산
분뇨 환경부하 저감 및 에너지화	PlanET, Wärtsilä	바이오가스 및 에너지 산업 확대	바이오리파이너리 구축
디지털 탄소 모니터링 및 통합관리	Regrow, Agreena	MRV 및 탄소회계 플랫폼 확대	디지털 탄소관리 산업 성장
친환경·저탄소 축산 가치창출	Nestlé, Danone, Fonterra	Scope 3 및 ESG 대응	탄소시장 공급망 연계 확대

1.2 국내 산업 동향

○ 국내 친환경 · 저탄소 축산 산업의 성장
– 국내 친환경 · 저탄소 축산 산업은 정부의 탄소중립 정책과 축산환경 개선사업을 중심으로 연구개발, 현장 실증 및 정책 지원이 확대되는 단계임. 저메탄 · 저질소 사료, 스마트축산, 분뇨 자원화, 국가 온실가스 배출계수 개발 및 저탄소 축산물 인증을 중심으로 산업 기반이 형성되고 있으나, 글로벌 선도국과 비교할 때 민간 중심의 상용화와 통합 서비스 산업은 아직 초기 단계임.
– 국내 산업은 개별 기자재와 사료제품 중심의 공급구조에서 점차 농장 데이터, 온실가스 산정, 감축성과 검증 및 정책 인센티브를 연계하는 복합 서비스 산업으로 전환되는 과정임.

○ 친환경 사료 및 정밀영양 산업
– 국내 사료산업에서는 주요 배합사료기업을 중심으로 저메탄 · 질소저감 사료, 저단백질 사료 및 정밀영양 제품의 개발과 보급이 추진되고 있음. 기존의 생산성 중심 사료설계에서 메탄과 잉여 질소 배출을 함께 고려하는 친환경 사료시장으로의 전환이 진행 중임.

- 국립축산과학원의 공개 등록 목록상 Bovaer®-10이 한우용 메탄저감제로 등록되어 있으며, 사료 내 첨가 기준과 검정방법이 제시되어 있음. 공개된 등록 목록에는 젖소용 등록 제품이 확인되지 않아, 국내 저메탄 사료첨가제 시장은 한우 중심의 초기 상용화 단계로 평가 가능함.
- 메탄저감제의 효과 검증을 위한 국내 시험 기반도 확대되고 있음. 2025년 기준 국립순천대학교, 서울대학교 그린바이오과학기술연구원 및 건국대학교가 한우 또는 젖소 대상 메탄저감제 실험기관으로 지정되어 있어, 제품 개발과 등록을 지원하는 시험 · 검증 산업 기반이 형성되는 단계임.
- 국산 메탄저감 소재는 아직 개발과 실증 단계에 있으며, 수입 제품 의존도를 낮추기 위한 미생물, 식물추출물, 대사체 및 신규 기능성 소재 개발의 중요성이 증대되고 있음. 농림축산식품부도 2026년 메탄저감제 개발기업을 대상으로 소 위액 활용 테스트베드 지원사업을 추진하고 있어 국내 제품개발 생태계 확대가 예상됨.

○ 가축분뇨 자원화 및 에너지 산업
- 국내 가축분뇨 산업은 퇴 · 액비화와 공동자원화 중심에서 정화처리, 바이오가스, 고체연료, 바이오차 등 다각적 자원화 산업으로 확대되는 과정임.
- 지역 내 가축분뇨를 수거하여 퇴비 · 액비를 생산하고 경종농가에 공급하는 경축순환체계가 추진되고 있으며, 지자체, 농축협, 경종농가, 축산농가 및 자원화 조직을 연계하는 지역단위 거버넌스 모델도 검토되고 있음.
- 바이오가스 및 공동자원화시설의 확대는 분뇨 적정처리와 재생에너지 생산을 동시에 달성할 수 있는 산업기회를 제공하고 있으나, 높은 초기 투자비, 원료 수거비용, 계절별 성상 변화 및 에너지 판매가격의 불확실성이 산업 확산의 제약요인으로 작용함.
- 향후 분뇨처리 산업은 단일 처리공정 판매에서 벗어나 양분수지 분석, 에너지 생산, 탄소저감량 산정 및 부산물 유통을 결합한 지역단위 자원순환 서비스로 발전할 필요가 있음.

○ 국가 고유 배출계수 및 탄소산정 기반 산업
- 농촌진흥청 국립축산과학원은 국내 사육환경과 가축분뇨 특성을 반영한 국가 고유 온실가스 배출계수를 지속적으로 개발 · 등록하고 있음. 장내발효 부문에서는 한우 · 젖소 · 돼지 대상 계수가 구축되었으며, 분뇨처리 부문에서도 한우, 돼지, 육계, 산란계 관련 계수가 순차적으로 개발되고 있음.
- 국가 고유계수와 농장단위 활동자료의 연계는 탄소배출 산정, 저탄소 인증 및 농가 감축성과 보상의 기초가 되므로, 향후 배출계수 개발 자체가 연구성과를 넘어 탄소측정 · 검증 서비스 산업으로 확장될 가능성이 있음.

○ 디지털 탄소관리 및 통합 플랫폼 산업
- 국내에서는 스마트팜 센서, 축산 ICT 장비, 분뇨처리 공정제어 및 국가 인벤토리 구축이 각각 추진되고 있으나, 이를 LCA, MRV 및 탄소시장과 직접 연계하는 축산 특화 통합 플랫폼은 초기 단계임.

– 현재의 데이터 시스템은 생산관리, 가축분뇨 관리, 정책사업 및 국가 인벤토리 등 목적별로 분산되어 있어 농가-자원화시설-기업-정부 간 데이터의 자동 연계와 재활용에 한계가 존재함.
– 향후 국내 산업에서는 사육두수, 사료섭취량, 생산성, 분뇨 발생량, 에너지 소비 및 자원화 생산물 데이터를 API로 연계하고, 국가 고유 배출계수와 LCA 방법론을 적용하여 농장단위 온실가스 배출량을 자동 산정하는 서비스의 중요성이 증대될 것으로 예상됨.
– 특히 현장 데이터 수집, Scope 1~4 산정, 양분순환 분석, AI 기반 감축 시나리오 및 MRV 대시보드를 통합하는 C-RIMS형 플랫폼은 국내 스마트축산 산업과 탄소관리 산업을 연결하는 새로운 시장기회가 될 수 있음.

○ 저탄소 인증과 가치창출 산업
– 국내에서는 저탄소 축산물 인증, 저탄소 농업 프로그램 및 정책 인센티브가 확대되면서 친환경 · 저탄소 축산기술의 시장 기반이 점차 형성되고 있음. 2026년 저탄소 농업 프로그램은 저메탄사료 급여, 분뇨처리 방식 개선 및 사육기간 단축 등의 활동을 지원하고 있어, 개별 기술의 보급과 농가 보상을 연계하는 정책시장으로 발전 중임.
– 다만 국내 시장은 정부 보조와 시범사업 의존도가 높으며, 탄소크레딧, 기업 인세팅, Scope 3 공급망 관리 및 Green Premium을 통한 민간 수익모델은 아직 제한적임.
– 향후 저탄소 축산물 인증과 탄소발자국 정보를 유통 · 식품기업의 지속가능 조달 및 ESG 관리와 연결하고, 감축성과가 농가의 실질적 소득으로 환원되는 시장구조의 확립이 필요함.

표 13. 국내 친환경 · 저탄소 축산 산업 발전 수준

산업분야	산업 수준	주요기관 및 기업	향후 과제
친환경사료 투입 최적화	실증 초기 상용화	농협사료, CJ Feed, 카길애그리퓨리나	저메탄, 질소저감 소개 상용화
생산효율 최적화	기술 보급 확대	스마트 축산 기업	AI 기반 정밀관리 확대
분뇨 환경부하 저감 및 에너지화	지역 실증 확대	환경시설 기업	경제성 확보 및 시설 확산
탄소 모니터링 및 관리	초기 구축 단계	농촌진흥청, 국립축산과학원	MRV 및 Tier 3 구축
가치창출	인증 시범 사업 운영	농식품부	탄소시장 및 ESG 연계

2 국내외 정책 동향

2.1 국외 정책 동향

○ 국제사회의 주요 정책 동향

- 국제사회는 농업과 축산부문의 온실가스 감축을 국가 탄소중립 목표 달성의 핵심 과제로 설정하고 있으며, 특히 반추가축의 장내발효와 가축분뇨에서 발생하는 메탄 및 아산화질소 감축을 중점 정책대상으로 확대중.
- 주요국의 축산정책은 생산량이나 사육두수를 직접 제한하는 규제 중심 방식에서 벗어나, 저메탄 사료, 정밀영양, 유전개량, 분뇨 자원화 및 디지털 MRV를 지원하는 기술 · 성과 중심 정책으로 전환되는 추세임.

○ 유럽연합 정책 동향

- (European Green Deal과 Farm to Fork Strategy) 유럽연합은 European Green Deal을 통해 2050년 기후중립을 장기목표로 설정하고, Farm to Fork Strategy를 통해 식품 생산부터 소비까지 전 과정의 환경부하 저감을 추진하고 있음.
- Farm to Fork Strategy는 2030년까지 화학비료 사용량을 최소 20% 감축하고, 농장동물과 양식업에 사용되는 항생제 판매량을 50% 감축하며, 유기농업 면적을 전체 농경지의 25%까지 확대하는 목표를 제시함.
- 축산부문에서는 저메탄 사료, 사료효율 향상, 분뇨관리, 동물복지 개선 및 항생제 사용 저감을 연계하는 방식으로 지속가능한 생산체계 전환을 추진하는 방향임.
- (공동농업정책을 통한 환경성과 보상) EU 공동농업정책은 농업환경 · 기후조치 및 조건부 직불제를 통해 환경부하 저감활동에 참여하는 농가를 직접 지원하는 구조임. 정책지원은 단순한 시설보조를 넘어 정밀영양, 초지관리, 탄소농업, 동물복지 및 양분관리 등 농가의 지속가능성 활동에 대한 성과보상 방식으로 확대되는 추세임.
- 이와 함께 EU의 농업부문 배출은 Effort Sharing Regulation의 적용대상으로 관리되고 있으며, 회원국은 농업 · 수송 · 건물 · 폐기물 등 비ETS 부문의 2030년 감축목표를 이행해야 함.
- (산업배출지침 강화와 축산농가 규제) 2024년 개정된 산업배출지침은 일정 규모 이상의 돼지와 가금류 농장을 적용대상에 포함하여 배출허가, 최적가용기법, 환경정보 공개를 강화함. EU 정책은 대규모 돼지 · 가금 농가에 대해서는 규제를 강화하는 한편, 반추가축과 중소규모 농가에는 기술혁신, 환경성과 보상 및 자발적 전환을 병행하는 이원적 구조로 발전 중임.
- (2026년 EU 축산 전략) EU 집행위원회는 2026년 7월 축산업의 회복력, 경쟁력 및 지속가능성을 강화하기 위한 EU 축산전략을 발표함. 해당 전략은 축산업을 온실가스 배출원으로만 규정하지 않고, 식량안보, 농촌경제, 생물다양성, 순환바이오경제 및 전략적 자율성을 지원하는 핵심 산업으로 재정의함. 주요 정책방향은 농장단위 축산배출량 산정방법의 조화, 기후완화 기술의 보급, 양분관리, 동물질병 예방, 동물복지 개선, 디지털 기술 도입 및 지역별 축산체계 유지 등임. 따라서 EU 정책은 일률적인 사육두수 감축보다는 농가의 경쟁력과 식량안보를 유지하면서 저배출 기술과 농장단위 환경관리를 확대하는 방향으로 조정되고 있음.

○ 미국 정책 동향

– (Climate-Smart Agriculture 중심의 지원정책) 미국은 농업부문에 일률적인 배출규제를 적용하기보다 USDA의 기후스마트 농업과 자연자원 보전프로그램을 활용하여 농가의 자발적인 감축활동을 지원하는 방식임. 2022년 제정된 Inflation Reduction Act는 USDA 보전프로그램에 5년간 195억 달러를 추가 배정하였으며, 이 중 일부는 온실가스 감축효과의 측정 · 평가 및 정량화에 활용됨.

– (분뇨 에너지화와 바이오가스 산업 지원) 미국은 AgSTAR, Environmental Quality Incentives Program 및 Rural Energy 관련 사업을 통해 축산분뇨 혐기소화, 바이오가스, 재생천연가스 및 에너지효율 시설에 대한 기술 · 재정 지원을 추진하고 있음.

– (민간 공급망과 Scope 3 감축 연계) 미국 정책은 정부지원과 식품 · 유통기업의 자발적 공급망 감축 프로그램을 결합하는 특징임. 저메탄 사료, 정밀급여, 분뇨관리 및 재생농업의 감축성과를 기업의 Scope 3 또는 인세팅 성과로 활용하고, 농가에 비용보전이나 성과 인센티브를 제공하는 사업모델의 확대임.

○ 뉴질랜드 정책 동향

– (농업 메탄 특화 정책) 뉴질랜드는 농업이 국가 온실가스 배출의 약 절반을 차지하는 산업구조로 인해 메탄과 아산화질소 감축을 국가 기후정책의 핵심으로 관리해 왔음. 주요 정책수단은 농장단위 배출량 산정, 저메탄 사료, 메탄백신, 저메탄 유전체, 사양관리 및 민관 공동 연구개발임.

– (농업배출 가격제에서 기술 · 시장 중심으로의 전환) 뉴질랜드는 농장단위 농업배출 가격제 도입을 추진하였으나, 2024년 농업을 NZ ETS에서 제외하고 2025년에는 2030년까지 농장단위 배출가격제를 도입하지 않기로 결정함. 2026년 개정된 배출감축계획도 기술개발과 시장주도 인센티브 중심으로 수정됨. 정책 전환의 배경에는 농가 수익성 악화, 생산의 해외이전, 식량생산 감소 및 탄소누출 가능성에 대한 우려가 존재함. 이에 따라 현재 정책은 배출에 직접 가격을 부과하기보다 저감기술의 연구개발, 인허가, 상용화 및 농가 보급을 우선하는 방향임.

– (메탄 감축목표와 기술투자) 뉴질랜드는 2025년 법 개정을 통해 2050년 생물기원 메탄 감축목표를 2017년 대비 14~24%로 조정함. 정부는 농업배출 저감기술의 개발과 상용화를 위해 4년간 4억 뉴질랜드달러 이상을 투자하고 있으며, 농장단위 배출량 측정방법, 저메탄 가축 육종 및 신기술 승인체계의 구축을 추진 중임.

○ 일본 정책 동향

– (MIDORI 전략 기반의 녹색 전환) 일본 농림수산성은 2021년 MIDORI Strategy for

Sustainable Food Systems를 수립하여 2050년 농림수산업의 탄소중립과 환경부하 저감을 추진하고 있음. 주요 목표에는 농림수산업 화석연료 기원의 CO_2 무배출, 화학비료 사용량 30% 감축, 유기농업 면적 확대 및 식품 공급망 전반의 혁신 촉진 포함됨. 2026년에는 MIDORI BOOST 계획을 통해 기존 전략의 GX 투자, 기후적응 및 현장 실증을 가속화하는 방향을 제시함.

- (축산 메탄과 분뇨 자원화 기술 지원) 축산부문에서는 장내발효 메탄 저감사료, 생산효율 향상, 가축분뇨의 퇴비 · 에너지화, 환경부하 저감기술 개발이 주요 정책과제로 추진되고 있음. 흑모화우 등 일본 고유 축종을 대상으로 생산성 · 사료효율 · 메탄배출 형질을 연계한 유전적 개량과 국가 고유 산정모델 개발이 확대되는 추세임.
- (환경성과의 가시화와 시장 연계) 일본은 농축산물의 환경부하 저감성과를 소비자에게 표시하는 가시화 정책과 판매실증을 확대하고 있음. 2026년에는 축산물 환경부하 저감활동의 가시화 판매 실증도 확대됨. 향후 저탄소 생산기술, 환경라벨, J-Credit 및 공급망 탄소정보를 연결하는 시장 중심 정책의 확대가 예상됨.

표 14. 주요국 정책 비교 1

국가	핵심정책	주요 특징
EU	Green Deal, CAP	저탄소 생산 전환
미국	Climate-Smart Agriculture	기술 실증 및 민간 탄소 시장
뉴질랜드	Methane Strategy	농장단위 MRV 및 메탄 감축
일본	MIDORI strategy	저탄소 육종 및 스마트 축산

2.2 국내 정책 동향

○ 국내 주요 정책 동향

- (국가 탄소중립 및 축산부문 감축정책) 정부는 「2030 국가온실가스감축목표(NDC)」와 「2050 농식품 탄소중립 추진전략」을 기반으로 농축산부문의 메탄과 아산화질소 감축을 추진 중임. 축산부문에서는 반추가축의 장내발효, 가축분뇨 처리, 에너지 사용 및 생산효율을 주요 배출관리 대상으로 설정하고 저탄소 사양관리, 분뇨처리 방식 개선, 재생에너지 생산 확산을 주요 정책수단으로 활용 중임. 2024년 발표된 「축산분야 2030 온실가스 감축 및 녹색성장 전략」은 축산부문 온실가스 배출량을 2018년 940만 톤 CO_2eq에서 2030년 770만 톤 CO_2eq로 18% 감축하는 것을 목표로 설정함. 이는 별도 감축수단이 적용되지 않을 경우 예상되는 2030년 배출량 대비 약 30% 감축에 해당함. 주요 이행방향은 ① 저메탄 · 저질소 사료와 생산성 향상을 통한 직접배

출 저감, ② 가축분뇨 정화 · 에너지화 확대, ③ 스마트축산과 자원순환농업 확산, ④ 저탄소 농업프로그램 및 인증제 확대를 통한 농가 이행기반 확충으로 구성됨.

- (저메탄 · 질소저감 사료 정책) 정부는 축산의 고투입 사양체계를 저투입 · 저배출 구조로 전환하기 위해 사료 조단백질 함량 관리와 저메탄 · 질소저감 사료 기준을 마련함. 환경부담 저감을 위한 축종 · 성장단계별 조단백질 상한기준은 2021년 말 「사료 등의 기준 및 규격」 개정을 통해 도입되었으며, 이를 통해 과잉 단백질 급여와 분뇨 내 질소 배출을 줄이기 위한 제도적 기반 마련임. 2023년에는 메탄배출을 10% 이상 줄이면서 생산성에 부정적 영향을 주지 않는 물질을 메탄저감제로 인정하고, 이를 포함한 사료를 저메탄사료로 표시 · 판매할 수 있도록 사료공정서 기준 마련임. 2024년에는 한우 · 돼지 · 산란계의 성장단계별 적정 단백질 수준을 기반으로 질소저감사료의 성분등록과 표시기준을 마련함. 이를 통해 저메탄사료와 질소저감사료를 구분하여 관리하는 친환경 사료정책 체계 형성임. 정부는 2030년까지 한육우 · 젖소 사료의 30% 이상을 저메탄사료로 보급하는 목표를 제시하고, 국산 저감소재 개발, 해외 제품의 국내 효과 검증, 사료공정서 등록 및 농가 인센티브 연계를 추진 중임.
- (저탄소 농업프로그램을 통한 농가 인센티브) 정부는 2024년부터 축산농가의 자발적인 감축활동을 지원하기 위한 저탄소 농업프로그램 시범사업을 본격 추진함. 초기에는 저메탄사료와 질소저감사료 급여를 중심으로 지원하였으며, 이후 분뇨처리 방식 개선과 사육기간 단축 등으로 지원활동을 확대함. 2026년 사업에서는 소 대상 저메탄사료 급여 지원단가를 두당 5.5만 원으로 상향하고, 기계교반 · 강제송풍 등 분뇨처리 방식 개선에 톤당 보조금을 지원하며, 거세한우의 사육기간을 29개월 이하로 단축하는 활동을 신규 지원대상에 포함함. 저탄소 축산물 인증농가에는 기본 지원단가의 20%를 추가 지원하는 연계구조 마련임. 향후에는 단순 기술 도입 여부가 아니라 농장단위 감축량, 생산성 및 비용효과성을 함께 반영하는 성과기반 지원체계로의 고도화가 필요함.
- (저탄소 축산물 인증과 시장 확산 정책) 저탄소 축산물 인증제는 생산과정에서 저탄소 기술을 적용하여 온실가스 배출량을 축종별 평균보다 10% 이상 줄인 농장을 인증하는 제도임. 2025년 신규 인증농가는 338호로 확대되었으며, 인증대상은 한우 · 돼지 · 젖소 농가로 운영 중임. 향후 정책과제는 인증 자체의 확대를 넘어 소비자 인지도 향상, 유통단계 분리관리, 가격 프리미엄 형성 및 기업의 Scope 3 감축과의 연계 강화임.
- (가축 분뇨 정화처리 및 자원화 정책) 「축산환경개선 대책」에서는 가축분뇨 정화처리 비중을 2020년 약 10%에서 2030년 25%로 확대하고, 에너지화 비중을 2030년 15%까지 높이는 목표를 제시함. 대규모 양돈농가의 정화처리시설 설치 확대와 관련 지원사업의 개편도 주요 추진방향임. 2024년 「축산분야 2030 온실가스 감축 및 녹색성장 전략」에서는 분뇨 정화처리 비중 25%, 에너지화시설 30개소, 온실가스 저감설비 보급률 56%를 주요 정책목표로 설정

함. 2026년 발표된 가축분뇨 고체연료 활성화 방안은 2030년까지 고체연료 전환량을 연간 118만 톤으로 확대하고, 이를 통해 연간 약 50만 톤 CO_2eq의 온실가스 감축을 목표로 설정함.

- (국가 배출계수, MRV 및 디지털 탄소 관리 정책) 축산부문의 온실가스 산정은 IPCC 기본배출계수 중심의 Tier 1에서 국내 사육조건을 반영한 국가 고유배출계수 기반 Tier 2로 고도화되는 단계임. 향후 저메탄 사료, 질소저감 사료, 사육기간 단축, 생산성 향상 및 분뇨처리 개선의 실제 감축성과를 반영하기 위해서는 농장 · 축군 단위 활동자료를 활용한 Tier 3 모델 개발 필요성임. 현재 저탄소 농업프로그램, 저탄소 축산물 인증, 국가 인벤토리, 스마트축산 및 분뇨관리 데이터가 목적별로 분산되어 있어 농가의 중복 입력과 행정비용 발생 가능성임. 향후 정책은 사육두수, 사료섭취량, 생산성, 분뇨 발생량, 처리방식, 에너지 사용 및 자원화 생산물 데이터를 자동 수집하고, LCA와 MRV를 통해 감축량을 검증하는 디지털 정책체계로의 전환 필요성임.

표 15. 국내 주요 정책 추진 방향

정책	주요내용	향후 발전 방향
2050 농식품 탄소 중립	축산 부분 온실가스 감축	전 과정 탄소관리 확대
2030 NDC	메탄 및 아산화질소 감축	감축목표 고도화
저탄소 축산물 인증	저탄소 생산기술 인증	대상 축종 및 품목확대
저탄소 농업 프로그램	탄소 저감기술 적용 농가 지원	성과기반 인센티브 확대
MRV 및 LCA	배출량 측정 및 검증	국가 표준 플렛폼 구축

Ⅴ. 결론 및 제언

1 주요 동향 및 시사점

○ 기후변화 대응과 탄소중립 정책이 전 세계적으로 강화됨에 따라 축산업은 단순한 식량 생산 산업을 넘어 온실가스 감축, 자원순환 및 지속가능한 식품 생산을 동시에 실현하는 기후변화 완화 산업(Climate Change Mitigation Industry)으로 빠르게 전환되고 있음. 과거에는 축산환경 정책이 분뇨 처리와 오염물질 저감 등 환경규제 대응에 초점을 두었다면, 최근에는 생산성 향상과 환경성 확보를 동시에 달성하는 기술혁신과 산업 생태계 전환이 핵심 정책 방향으로 자리 잡고 있음.

○ 이러한 변화는 개별 온실가스 저감기술의 개발을 넘어 '사료-가축-분뇨-토양 및 에너지, 그리고 탄소시장'을 하나의 가치사슬로 연결하는 통합 접근으로 발전하고 있음. 특히 저메탄 사료와 정밀영양기술은 메탄과 질소 발생을 근본적으로 줄이는 방향으로 고도화되고 있으며, 생산효율 향상과 저탄소 유전체 기술은 동일한 생산량을 더 적은 자원과 온실가스로 달성하는 저배출 생산체계 구축을 가능하게 하고 있음. 또한 가축분뇨는 단순한 폐기물이 아니라 바이오가스, 바이오차, 고체연료 및 양분회수 자원으로 활용되는 순환바이오경제의 핵심 자원으로 전환되고 있으며, 이를 통해 에너지 생산과 화석연료 대체효과를 동시에 창출하는 방향으로 발전하고 있음.

○ 기술개발의 방향 역시 개별 기술의 감축효율 경쟁에서 벗어나 다양한 기술을 유기적으로 연결하여 생산성과 환경성을 동시에 최적화하는 방향으로 변화하고 있음. 저메탄사료의 효과는 생산성, 가축 건강 및 반추위 미생물 생태계와 함께 평가되고 있으며, 분뇨 자원화 역시 에너지 생산량뿐 아니라 전 과정의 온실가스 저감효과와 지역 양분순환을 함께 고려하는 시스템 기반 접근으로 확대되고 있음. 이는 환경성과 생산성을 상충 관계가 아닌 상호 보완적 가치로 인식하는 패러다임 전환이라 할 수 있음.

○ 이와 함께 디지털 기술은 친환경 · 저탄소 축산의 핵심 기반으로 부상하고 있음. 스마트축산을 통해 수집되는 사료섭취량, 생산성, 생체정보 및 환경정보는 농장단위 탄소배출량을 보다 정밀하게 산정할 수 있는 기반을 제공하며, AI와 데이터 분석기술은 사료 배합, 생산관리 및 분뇨처리 공정을 최적화하여 온실가스 감축과 생산성 향상을 동시에 지원하고 있음. 특히 개별 기술에서 생성되는 데이터를 통합하여 전과정평가(LCA), 온실가스 산정(Tier 2/3), 자원

순환 분석 및 MRV를 수행하는 디지털 플랫폼은 향후 친환경 축산정책의 핵심 인프라로 자리매김할 것으로 전망됨.

○ 친환경 · 저탄소 축산의 또 다른 중요한 변화는 환경성과를 경제적 가치로 전환하는 시장의 형성임. 저탄소 축산물 인증, 탄소크레딧, ESG 경영, 공급망 Scope 3 관리 및 Green Premium은 농가의 감축 노력을 새로운 수익으로 연결하는 구조를 형성하고 있으며, 환경규제에 대응하기 위한 비용으로 인식되던 저감기술은 경쟁력 확보와 부가가치 창출을 위한 핵심 투자로 인식이 변화하고 있음. 향후에는 기술의 감축효과를 객관적으로 검증하고 이를 정책지원과 시장보상으로 연계하는 체계가 축산산업 경쟁력의 핵심 요소가 될 것으로 전망됨.

○ 종합하면, 미래 축산업의 경쟁력은 특정 저감기술의 성능에 의해 결정되는 것이 아니라, 친환경 사료 투입 최적화, 생산효율 향상, 가축분뇨 자원화, 디지털 탄소관리 및 가치창출을 하나의 산업 생태계로 통합하는 능력에 의해 좌우될 것으로 판단됨. 따라서 친환경 · 저탄소 축산은 환경규제에 대응하는 산업이 아니라, 데이터와 바이오기술을 기반으로 생산성 · 환경성 · 건강성 및 경제성을 동시에 최적화하는 친환경 기반 정밀축산(Eco-friendly Precision Livestock Farming)으로 전환될 필요성이 있음.



그림 6. 친환경 기반 정밀축산(Eco-friendly Precision Nutrition)으로의 전환

2 정책 및 R&D 전략

2.1 R&D 투자 방향

○ 기후변화 대응과 탄소중립 실현을 위한 축산부문의 연구개발은 단일 저감기술 개발에서 벗어나 생산성 · 환경성 · 건강성 및 경제성을 동시에 향상시키는 친환경 기반 정밀축산(Eco-friendly Precision Livestock Farming) 구축을 목표로 추진될 필요가 있음. 향후 R&D는 친환경 사료, 생산효율 향상, 자원순환, 디지털 탄소관리 및 가치창출을 유기적으로 연계하는 융합형 연구체계로 확대되어야 하며, 기초연구부터 실증 · 산업화까지 연계되는 중장기 투자전략이 요구됨.



그림 7. 친환경 · 저탄소 축산 기술 중장기 R&D 추진 방향

○ 친환경 사료 및 장내발효 제어기술 고도화

– 반추동물 장내발효에서 발생하는 메탄과 질소 배출을 근본적으로 저감하기 위해서는 저메탄 사료첨가제 개발을 넘어 장내 미생물 생태계와 숙주 대사를 함께 조절하는 차세대 기능성 사

료기술 개발이 필요함. 이를 위해 아래와 같은 연구 확대가 요구됨. 또한 저메탄 효과뿐 아니라 사료효율, 성장성, 번식성 및 장기 안전성을 함께 평가하는 장기실증연구가 병행되어야 함.

- 관련기술: 저메탄 · 저질소 기능성 사료첨가제, 미생물 기반 메탄 저감 소재, 천연물 및 기능성 대사체, 반추위 마이크로바이옴 제어기술

○ 가축 건강 · 면역 및 스트레스 제어 기술 개발

- 친환경 · 저탄소 축산기술은 온실가스 감축뿐 아니라 가축 건강과 생산성을 동시에 향상시키는 방향으로 발전해야 함. 향후에는 아래와 같은 핵심 연구분야로 확대할 필요가 있음. 특히 장내 미생물과 면역세포 간 상호작용을 활용한 기능성 소재 개발은 항생제 사용 저감과 질병 예방을 동시에 달성할 수 있는 차세대 축산기술로 발전 가능성이 높음.
- 관련기술: 가축 장관 면역 발달 조절 기술, 기능성 대사체 사료첨가제를 이용한 질병 예방 기술, 고온 스트레스 대응 대사조절 기술, 면역대사 기반 생산성 향상, 스트레스 · 질환 조기 진단 바이오마커 개발

○ 저탄소 생산성 향상 및 디지털 육종

- 단위 축산물 생산당 온실가스 배출량을 감소시키기 위해서는 생산효율 향상과 저탄소 형질을 동시에 고려한 육종기술 개발이 필요함. 중점 투자분야는 아래와 같은 분야 등이 될 것으로 전망됨.
- 관련기술: 저메탄 가축 유전체 선발 기술, 사료효율 및 질소이용효율 연관 유전체 및 대사체 기반 바이오마커 발굴, AI 기반 디지털 육종, 가축 정밀사양 AI 알고리즘, 개체단위 메탄 예측모델

○ 가축분뇨 자원화 및 순환바이오경제 기술

- 가축분뇨는 폐기물이 아니라 탄소중립 사회의 핵심 바이오자원으로 활용될 필요가 있음.
- 관련기술: 분뇨 건조 · 탄화 공정 개발, 저에너지 고체연료 성형기술, 바이오가스 생산효율 향상, 질소 · 인 회수기술, 지역단위 양분순환 모델, 바이오차 토양 탄소격리 효과 검증

○ 탄소 및 자원 통합 관리 디지털 플랫폼(C-RIMS) 구축

- 향후 친환경 축산은 데이터 기반 의사결정이 핵심 경쟁력이 될 것으로 전망되며 아래와 같은 기술을 활용하여 통합하는 C-RIMS 구축 필요함.
- 관련기술: 농장 데이터 자동수집 (Data Ingestion API), AI 기반 의사결정 자동화 모델, LCA 자동 계산엔진, Tier 2/3 배출량 산정, MRV 자동화, GIS(Geographic Information System) 기반 양분순환 분석

○ 저탄소 가치창출 및 산업화 기술

– 친환경 기술의 지속적인 확산을 위해서는 감축성과를 경제적 가치로 전환하는 연구가 필요함. 중점 연구분야는 아래와 같이 전망됨.

– 관련기술: 저탄소 축산물 인증 고도화, 제품단위 Carbon Footprint 산정기술, Scope 3 공급망 관리기술, 탄소크레딧 방법론 개발, Green Premium 평가기술, ESG 기반 축산 가치 평가

축산 R&D는 단순한 온실가스 저감을 넘어 사료 · 가축 건강 · 분뇨 · 데이터 · 시장체계를 연계하는 친환경 정밀축산 전환기술 확보에 집중할 필요가 있음. 기능성 사료, 건강 · 열스트레스 대응, 저탄소 디지털 육종, 분뇨 자원화 및 MRV 기반 탄소관리체계를 통합하고, 생산성 · 경제성 · 동물복지 · 환경성을 함께 검증하는 현장 중심 중장기 융합형 투자전략이 요구됨.

2.2 기술 확산 및 산업화 전략



그림 8. 친환경 · 저탄소 축산 기술 산업화 전략의 핵심 방향

○ 친환경 사료 및 건강관리 기술의 현장 보급 확대

– 저메탄 · 질소저감 사료와 기능성 사료첨가제는 연구개발 이후 현장 적용과 경제성 검증이 병행되어야 하며 이를 위해 축종별 실증농장을 구축하여 생산성, 메탄 저감효과 안정성 및 경제성을 장기적으로 평가하고, 지역별 사양관리 프로그램과 연계한 보급체계를 마련할 필요가 있음.

– 장관면역 조절기술, 스트레스 저감 기술 및 질병 예방 기능성 소재를 저메탄 사료와 통합하여 "생산성과 건강성을 동시에 향상시키는 친환경 사양관리 패키지"로 서비스화하는 전략이 필요함.

○ AI 기반 정밀축산 서비스 산업 육성

– 스마트축산 장비는 단순한 자동화 설비에서 AI 기반 의사결정 서비스로 발전할 필요가 있음.

– 향후에는 AI 정밀급이 서비스, 개체 건강관리 플랫폼, 메탄 발생 예측 서비스 디지털 육종 플랫폼, Heat stress 대응 솔루션 등이 통합된 Precision Livestock Farming Service 산업 육성이 필요함.

○ 가축분뇨 자원화 산업 활성화

– 가축분뇨를 탄소산업으로 전환하기 위해 지역 거점 중심 바이오가스–전력망 연계, 고체연료 생산 및 산업체 공급, 바이오차 활용 시장 확대, 질소 · 인 회수 기반 비료산업 등을 중심으로 산업생태계를 구축할 필요가 있음.

– 분뇨 건조 · 탄화, 고체연료 펠릿 생산, 바이오차 생산 등을 통합하는 지역 순환바이오경제 클러스터 구축이 필요함.

○ 디지털 탄소관리 서비스 산업 육성

– C–RIMS를 중심으로 농장 데이터 자동수집, LCA 자동 산정, Tier 2/3 배출량 계산, MRV 자동화, AI 기반 감축 시나리오 추천 등을 하나의 플랫폼에서 제공하는 디지털 서비스 산업 육성이 필요함.

➡ 축산 탄소중립 기술은 친환경 사료 · 가축 건강관리 · AI 정밀축산 · 분뇨 자원화 · 디지털 탄소관리를 통합한 산업체계로 확산될 필요가 있음. 현장실증을 통해 생산성 · 감축효과 · 경제성을 검증하고, 이를 저탄소 인증 · 탄소크레딧 · ESG 공급망과 연계하여 농가의 환경성과가 실질적인 수익으로 이어지는 지속가능한 축산 비즈니스 모델을 구축해야 함.

2.3 기반 구축 및 제도 개선

기반 구축 및 제도 개선의 핵심 방향

분야	추진 방향	주요 내용	관련 기반/제도	기대 효과
① 친환경 사료	저메탄 사료 등록·평가체계 및 기능성 소재 실증 인프라 구축	• 저메탄·질소저감 사료 평가 및 등록 기준 마련 • 기능성 사료첨가제 안전성·효과 검증 • 축종별 실증농장 및 연구 인프라 구축	사료 관리·평가 제도 개선 실증 인프라 및 시험·평가센터	기술 보급 확대 및 농가 적용성 향상
② 생산효율	스마트축산 데이터 표준화 및 AI 기반 정밀사양 지원	• 데이터 표준화 및 수집 인프라 구축 • AI 기반 정밀사양·개체관리 지원 • 디지털 육종 및 생산성 예측 모델 고도화	스마트축산 플랫폼 데이터 표준 및 연계 제도	생산성 향상과 저탄소 생산체계 구축
③ 분뇨 자원화	지역 거점 자원화시설 및 바이오경제 클러스터 조성	• 바이오가스·고체연료·바이오차 시설 지원 • 양분회수 및 비료화 인프라 구축 • 지역 순환 바이오경제 클러스터 조성	자원화시설 지원 제도 순환자원 인정 및 표준화	자원순환 확대 및 에너지 자립
④ 디지털 탄소관리	C-RIMS, Policy & MRV Dashboard, 데이터 거버넌스 구축	• C-RIMS 통합 플랫폼 구축 및 고도화 • Policy & MRV Dashboard 운영 • 블록체인 기반 탄소이력 및 데이터 신뢰성 확보	MRV 및 데이터 관리 제도 개인·기업 데이터 보호체계	자동화된 탄소관리 및 정책 연계
⑤ 가치창출	Scope 4 기반 탄소크레딧, 저탄소 인증 및 ESG 연계	• Scope 4(회피배출량) 제도 마련 • 탄소크레딧 거래 및 저탄소 인증 체계 구축 • ESG · 공급망 · Green Premium 연계	탄소시장 및 인증 제도 ESG 및 공급망 연계 제도	농가 소득 증대 및 산업 경쟁력 강화

데이터 · 제도 · 시장이 연계된 통합 생태계 구축으로 친환경 · 저탄소 축산의 지속가능한 성장 실현

그림 9. 친환경 · 저탄소 축산 기반 구축 및 제도 개선의 핵심 방향

○ 데이터 기반 디지털 인프라 구축

- 친환경 · 저탄소 축산의 핵심 기반인 농장단위 데이터를 활용한 디지털 탄소관리 체계 구축을 위해 스마트축산 장비, 사료관리 시스템, 가축분뇨 처리시설, 에너지 생산시설, 저탄소 인증 시스템 등에서 생성되는 데이터를 표준화하여 연계할 수 있는 국가 통합 데이터 플랫폼 구축이 필요함.
- 특히 C-RIMS를 중심으로 농장 활동자료 자동수집, LCA 자동 산정, Tier 2/3 배출량 계산, AI 기반 탄소감축 시나리오, GIS 기반 자원순환 분석 등을 통합하는 디지털 인프라 구축이 요구됨.

○ MRV 체계 및 데이터 거버넌스 구축

- 저탄소 기술의 확산을 위해서는 감축성과를 객관적으로 측정하고 검증할 수 있는 MRV 체계가 필수적이므로 농장에서 생성되는 데이터를 자동으로 수집 · 분석하여 측정 및 보고 절차를 표준화된 인벤토리와 시각화된 대시보드로 제공하는 핵심 기능을 수행할 필요가 있음.
- 검증된 LCA 데이터를 저탄소 농업프로그램, 저탄소 축산물 인증 국가 온실가스 종합정보센터(GIR), 배출권거래제(K-ETS) 등과 API 기반으로 연계함으로써 행정절차를 간소화하고 데이터의 신뢰성과 활용성을 높여야함.
- 또한 블록체인 기반 탄소이력 관리기술을 도입하여 데이터 위 · 변조를 방지하고, 저탄소 축산물과 탄소감축 성과의 추적성을 확보하는 데이터 거버넌스 체계 구축이 요구됨.

○ 전문인력 양성 및 융합 연구기반 구축

- 친환경 · 저탄소 축산은 생명과학, 환경공학, 데이터과학 및 AI 기술이 융합되는 분야로, 기존 축산 전문인력만으로는 기술 확산에 한계가 있으므로 저메탄 사료 및 정밀영양, 장내 마이크로바이옴, 가축 면역 및 건강관리 AI · 빅데이터, LCA · MRV, 탄소회계 및 ESG 분야를 아우르는 융합형 전문인력 양성이 필요함.

○ 규제 개선 및 제도 정비

- 친환경 · 저탄소 기술의 산업화를 촉진하기 위해서는 신기술의 인허가 절차를 합리화하고, 안전성과 환경성을 동시에 고려한 평가체계를 마련할 필요가 있으며 부처별로 분산되어 있는 축산, 환경, 에너지 및 탄소 관련 제도를 연계하여 연구개발, 인증, 보조금 및 산업화를 하나의 정책체계로 통합하는 거버넌스 구축이 요구됨.

○ 탄소시장 및 정책 연계 기반 구축

- 친환경 축산기술의 지속적인 확산을 위해서는 환경성과를 경제적 가치로 연결하는 제도적 기반이 마련되어야 함.
- 현재 가축분뇨 바이오가스와 고체연료를 활용하여 화석연료를 대체할 경우 발생하는 온실가

스 감축효과는 주로 에너지부문 실적으로 인정되어 실제 투자 주체인 축산농가나 자원화시설의 성과로 연결되지 못하는 한계가 존재하므로 이를 개선하기 위해 Scope 4(회피배출량) 개념을 활용하여 분뇨 자원화와 부산물 활용을 통해 가치사슬 외부에서 감축된 배출량을 Consequential LCA(cLCA) 기반으로 정량화하고, 이를 탄소감축 성과로 인정할 수 있는 제도 마련이 필요함.

➡ 친환경 · 저탄소 축산 확산을 위해 농장 · 사료 · 분뇨 · 에너지 데이터를 연계한 C-RIMS 기반 디지털 탄소관리와 표준 MRV 체계를 구축할 필요가 있음. 또한 축산 · 환경 · 데이터 사이언스를 아우르는 융합형 전문인력 양성과 현장 실증 협력체계를 강화하고, 저탄소 인증과 탄소시장 제도를 연계하여 축산분야 탄소 감축성과가 농가, 자원화시설 등 축산업 전반의 실질적 보상으로 이어지도록 제도를 정비할 필요가 있음.

참고문헌

○ 국가온실가스종합정보센터(GIR). (2024).『국가 온실가스 인벤토리 보고서』. 인천: 국가온실가스종합정보센터.

○ 농림축산식품부. (2021).『2050 농식품 탄소중립 추진전략』. 세종: 농림축산식품부.

○ 농림축산식품부. (2024a).『축산분야 2030 온실가스 감축 및 녹색성장 전략』. 세종: 농림축산식품부.

○ 농림축산식품부. (2024b).『저탄소 농업프로그램 시범사업 추진계획』. 세종: 농림축산식품부.

○ 농림축산식품부. (2024c).『저탄소 축산물 인증제 운영지침』. 세종: 농림축산식품부.

○ 농림축산식품부. (2024d).『사료 등의 기준 및 규격』. 세종: 농림축산식품부.

○ 한국농촌경제연구원. (2023).『가축분뇨 고체연료화: 축산업의 새로운 기회와 도전』. 나주: 한국농촌경제연구원.

○ 환경부. (2023).『국가 탄소중립 · 녹색성장 기본계획』. 세종: 환경부.

○ Antimiani, A., Costantini, V., Martini, C., Salvatici, L., & Tommasino, M. C. (2023). Carbon Leakage Risk in the Agri-food and Transport Sectors. Braunschweig: Thünen Institute.

○ Beauchemin, K. A., Ungerfeld, E. M., Eckard, R. J., & Wang, M. (2022). Review: Fifty years of research on rumen methanogenesis and methane mitigation. Animal, 16(Suppl. 3), 100597. https://doi.org/10.1016/j.animal.2022.100597

○ Böhringer, C., Fischer, C., Rivers, N., & Rosendahl, K. E. (2024). Carbon leakage and Ag-CBAM. Climate Policy, 24(1), 1-15.

○ Branger, F., & Quirion, P. (2014). Would border carbon adjustments prevent carbon leakage and heavy industry competitiveness losses? Insights from a meta-analysis of

recent economic studies. Ecological Economics, 99, 29-39.
○ CIAT. (2022). CIAT Partners Pursue Mitigation Actions in Colombian Livestock Production. CGIAR Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS).
○ ClimateSeed. (2023). Carbon Emission Avoidance: Principles, Calculation, and Key Issues. Paris: ClimateSeed.
○ European Commission. (2019). The European Green Deal. Brussels: European Commission.
○ European Commission. (2020). A Farm to Fork Strategy for a Fair, Healthy and Environmentally-Friendly Food System. Brussels: European Commission.
○ Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2013). Tackling Climate Change through Livestock: A Global Assessment of Emissions and Mitigation Opportunities. Rome: FAO.
○ Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2023). Pathways towards Lower Emissions: A Global Assessment of the Greenhouse Gas Emissions and Mitigation Options from Livestock Agrifood Systems. Rome: FAO.
○ Gonzalez Fischer, C. M., Cabrini, S. M., & Bilenca, D. (2024). Agriculture Carbon Pricing in EU, Carbon Leakage and Carbon Adjustment Mechanism Impacts in Southern Cone Beef Exports. CLIMTRADE.
○ Hristov, A. N., Ott, T., Tricarico, J., et al. (2013). Mitigation of Greenhouse Gas Emissions in Livestock Production: A Review of Technical Options for Non-CO_2 Emissions. FAO Animal Production and Health Paper No. 177. Rome: FAO.
○ International Organization for Standardization (ISO). (2006a). ISO 14040: Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework. Geneva: ISO.
○ International Organization for Standardization (ISO). (2006b). ISO 14044: Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines. Geneva: ISO.
○ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 4. Agriculture, Forestry and Other Land Use. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies.
○ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Geneva: IPCC.
○ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University

Press.

○ Knapp, J. R., Laur, G. L., Vadas, P. A., Weiss, W. P., & Tricarico, J. M. (2014). Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and impact of reducing emissions. Journal of Dairy Science, 97, 3231-3261.

○ Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (MAFF). (2021). MIDORI Strategy for Sustainable Food Systems. Tokyo: MAFF.

○ Nugrahaeningtyas, E., Lee, J.-S., & Park, K.-H. (2024). Greenhouse gas emissions from livestock: Sources, estimation, and mitigation. Journal of Animal Science and Technology, 66(6), 1083-1098. https://doi.org/10.5187/jast.2024.e86

○ Park, M. S., Hwang, Y. W., Kim, B. C., Lee, Y. M., & Jung, J. M. (2024). Evaluation of contribution to greenhouse gas reduction and economic benefits of livestock manure based solid fuel. Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 46(3), 81-89.

○ Thomassen, M. A., Dalgaard, R., Heijungs, R., & de Boer, I. J. M. (2008). Attributional and consequential LCA of milk production. The International Journal of Life Cycle Assessment, 13(3), 255-264.

○ United Nations Development Programme (UNDP). (2021). Measurement, Reporting and Verification (MRV) Technical Paper. New York: UNDP.

○ Young-Ferris, A., Malik, A., Calderbank, V., & Jacob-John, J. (2025). Making things (that don’ t exist) count: A study of Scope 4 emissions accounting claims. Accounting, Auditing & Accountability Journal, 38(1), 60-89. https://doi.org/10.1108/AAAJ-04-2023-6406

발 행 일	2026년 10월
발 행 인	농촌진흥청장 **이승돈** (사) 한국농식품생명과학협회장 **강병철**
감 수 인	농촌진흥청 차장 **김상경**
편 집 인	농촌진흥청 연구정책국장 **방혜선**
편집기획	농촌진흥청 연구정책과장 **지상윤** **길근환, 강지은, 우관식, 도윤수, 손인창, 고창호, 심재홍, 권용희, 최송이, 권경석, 심재홍, 장윤우, 이치훈**
	(사)한국농식품생명과학협회 **박영준, 박창권, 송정섭**
발 행 처	**농촌진흥청** 54875 전북특별자치도 전주시 덕진구 농생명로 300 063-238-0729. 0730, http://www.rda.go.kr
등록번호	11-1390000-100143-01
I S B N	978-89-480-9273-895520
공공누리 (제1유형)	OPEN 출처표시 공공누리 공공저작물 자유이용허락