

# 식량작물 농업 분야의 인공지능 활용

김경진 변호사

**이 책은 인공지능으로 정리 제작된 것입니다.**  
**전 세계의 주요 언어로 된 자료를 수집 종합한 것입니다.**

<https://notebook.google.com/notebook/96fac57b-0c9e-495f-a778-dcd3daec88db>

위 링크는 이 책을 제작하는 데 참고된 자료들이 수집·저장된  
노트북 엘엠의 주소 URL입니다.  
누구든지 자유롭게 접근하고 이용할 수 있도록 공개해 두었습니다.

# 목차

|     |                              |
|-----|------------------------------|
| 제1장 | 디지털 농업 인프라와 AI 플랫폼           |
| 1.1 | 디지털 공공 인프라(DPI)와 농업용 AI 플랫폼  |
| 1.2 | IoT 센서 및 엣지 AI(Edge AI) 모니터링 |
| 1.3 | 데이터 가버넌스 및 자원 관리             |
| 제2장 | 정밀농업 작물 모니터링과 영상 진단          |
| 2.1 | 드론(UAV) 및 위성 리모트 센싱 분석       |
| 2.2 | 컴퓨터 비전과 생육 표현형(Phenomics) 분석 |
| 2.3 | 딥러닝 기반 병해충 및 잡초 조기 진단        |
| 제3장 | 생육 예측과 자원 최적화                |
| 3.1 | 머신러닝·딥러닝 수확량 예측 모델           |
| 3.2 | 정밀 관수 및 변량 시비(VRA) 제어        |
| 3.3 | 작물 발육 단계(DVS/DVI) 예측 시뮬레이션   |

# 목차(계속)

|     |                                   |
|-----|-----------------------------------|
| 제4장 | 유전체학과 AI 분자유종                     |
| 4.1 | 작물 유전체 빅데이터 및 팬유전체(Pan-genome) 구축 |
| 4.2 | 유전자 편집(CRISPR) 및 정밀 육종            |
| 4.3 | 기후변화 대응형 내성 품종 개발                 |
| 제5장 | AI 의사결정과 자동화                      |
| 5.1 | 농업 특화 멀티모달 대형언어모델(Agri-LLM)       |
| 5.2 | 농업 로봇틱스 및 작업 자동화                  |
| 5.3 | 소규모 농가 맞춤형 AI 도구 활용               |
| 제6장 | 기후 스마트 농업과 지속가능 생태계               |
| 6.1 | 기후 스마트 농업(CSA)과 토양 생태계 관리         |
| 6.2 | 농가 ESG 경영 및 지역 사회 연계              |
| 6.3 | 글로벌 식량 안보와 농업 디지털 전환의 미래          |



## 제 1 장

# 디지털 농업 인프라와 AI 플랫폼



## 1.1

# 디지털 공공 인프라(DPI)와 농업용 AI 플랫폼

전라남도 무안군 해제면 들판은 지금 잡초만 무성한 빈터입니다. 몇 해 뒤 이 땅 21.6헥타르 위에 유리온실과 커다란 선별장이 들어섭니다. 2026년 4월 농림축산식품부는 국가 농업AX플랫폼 사업의 우선협상대상자로 전라남도 컨소시엄을 선정했습니다. 사업비는 2546억 원입니다.

농사짓는 사람은 줄어들고 나이는 많아집니다. 날씨는 해마다 더 심하게 흔들립니다. 가뭄과 폭우가 예년과 다른 때에 닥치면서, 흙을 손으로 만져 보던 경험만으로는 언제 물을 대고 언제 거둘지 정하기 어려워졌습니다. 여러 나라 정부가 비슷한 시기에 같은 결론을 내렸습니다. 농가 하나, 회사 하나의 힘으로는 이 변화를 감당할 수 없으니 국가가 데이터를 주고받는 기반부터 만들어야 한다는 것입니다.

온실이 다 지어지면 이곳에서는 상추와 토마토만 나오지 않습니다. 온실 지붕의 센서와 인공위성, 농부의 휴대전화가 쉬지 않고 데이터를 주고받습니다. 이 데이터가 필요한 곳까지 제대로 전달되도록 국가가 미리 깔아 두는 기반을 디지털 공공 인프라(Digital Public Infrastructure, DPI)라고 부릅니다. 편지 봉투에 주소를 적지 않으면 아무리 좋은 사연을 써도 상대방에게 닿지 않습니다. 디지털 공공 인프라는 국가가 만들어 주는 주소 체계입니다. 여러 기관의 데이터가 같은 규칙으로 오가도록 미리 정해 둔 약속입니다.

이 약속은 네 층으로 쌓입니다. 맨 아래층에서는 흙에 꽂힌 센서가 질소와 인, 칼륨과 수분을 재고, 기상 관측소가 바람과 비를 재고, 드론과 인공위성이 논둑 색깔을 찍습니다. 흙 속 센서 하나가 질소와 인, 칼륨, 수분, 온도, 산성도, 전기전도도까지 일곱 가지를 한 번에 재기도 해서, 현장에서는 이를 칠중센서라 부릅니다. 유럽우주국의 센티널 위성이나 미국의 랜드셋 위성이 찍은 사진 한 장에는 마을 하나가 통째로 들어갑니다. 두 번째 층에서는 이 값들이 로라와 같은 저전력 무선망이나 5세대 이동통신망을 타고 이동합니다. 현장 옆에 놓인 작은 컴퓨터인 엣지 게이트웨이가 잡음을 걸러 내고 단위를 맞춰 값을 다듬습니다. 세 번째 층은 모인 값을 저장하고 계산하는 곳입니다.

데이터 레이크라는 큰 저장고에 값이 쌓이면, 여러 결정 나무를 모아 다수결로 답을 내는 모델과 신경망이 그 값을 읽어 병을 찾아내고 수확량을 계산합니다. 농업 전용 거대언어 모델(LLM)도 여기에 붙어서, 농부가 말로 물으면 데이터를 뒤져 답을 만듭니다. 맨 위층은 사람이 실제로 쓰는 화면과 장치입니다. 스마트폰 속 음성 비서가 사투리를 알아듣고, 관수 밸브가 저절로 열리고 닫힙니다.

네 층을 쌓기 전에 먼저 해야 하는 일이 있습니다. 학교가 새 학기를 열기 전에 학생 명부부터 만드는 것과 같습니다. 농가 한 사람 한 사람에게 고유 번호를 붙이고, 그 사람이 부치는 논과 밭을 위성 지도 위에 정확히 그리고, 그 땅에 심은 작물 이름을 기록하는 일입니다. 농가 명부와 땅 지도와 작물 기록, 이 세 가지가 맞물려야 위층에 쌓이는 센서 값과 인공지능의 판단이 누구의 것인지 알 수 있습니다. 이 기록이 없으면 아무리 정교한 모델도 특정 농가에 맞춘 처방을 내릴 수 없습니다.

데이터의 쓰임은 여기서 끝나지 않습니다. 가을에 거둔 낱알의 무게를 봄에 모델이 내놓은 예상치와 비교하면 이 예측이 얼마나 맞았는지 드러납니다. 예상이 빗나간 논은 왜 빗나갔는지 되짚어 그 답을 다시 모델에 넣습니다. 한 해 농사가 끝날 때마다 모델은 조금씩 다시 배웁니다. 이 과정이 멈추면 모델의 판단은 해가 갈수록 현장과 어긋납니다.

데이터가 네 층을 오르내리려면 지켜야 할 규칙도 필요합니다. 인도의 Digital Personal Data Protection Act, 2023은 단계적으로 시행되고 있으며, 동의와 처리, 정보주체 권리를 정한 핵심 조항은 2027년 5월 시행될 예정입니다. 아그리스택은 이 법과 별도로 동의 관리자를 통한 데이터 교환 구조를 내세웁니다. 법 조문과 플랫폼 운영 절차를 같은 것으로 볼 수는 없습니다. 데이터를 다른 기관에서도 읽게 하려면 공통 어휘도 필요합니다. 유엔 식량농업기구의 아그로복(AGROVOC)은 벼와 옥수수 같은 낱말이 서로 다른 소프트웨어에서도 같은 뜻으로 읽히도록 정리한 농업 용어 사전입니다.

이런 기반이 없던 시절에는 씨를 뿌리고 물을 대는 날을 마을의 경험과 하늘을 보는 눈으로 정했습니다. 인도는 그 판단에 공공 데이터를 보태고 있습니다. 인도 정부 집계에서 2026년 7월 아그리스택 농민 ID는 1억 180만 개에 이르렀습니다. 2025년 11월 기준 작물 조사 필지는 2억 3,500만 개였습니다. 2026년 2월 시작된 바라트 비스타르(Bharat Vistaar)는 같은 해 7월까지 농민 30만 명 넘게 이용했고, 질의 720만 건을 처리했습니다. 5,280만 명이라는 수치는 바라트 비스타르 이용자가 아니라 별도의 인공지능 기상·계절풍 자문이 도달한 농민 수입입니다. 농민 ID와 필지 지도, 상담 기록이 한 화면에 놓이더라도 서로 다른 사업의 실적은 갈라서 읽어야 합니다.

숫자만 보면 성공적입니다. 그러나 시민단체들은 우려를 거두지 않습니다. 인도 전 국민에게 발급되는 생체인식 신분증 아드하르 번호와 토지 대장, 위성 위치 정보가 한곳에 묶이면, 그 정보 뭉치가 새어 나갔을 때 피해가 개별 유출보다 훨씬 커지기 때문입니다.

한국은 이제 시작 단계입니다. 무안 들판에 들어설 국가 농업AX플랫폼은 2026년부터 2030년까지 민관이 함께 돈을 대는 특수목적법인(SPC)을 세워 운영할 계획입니다. 재배와 선별, 유통을 하나의 데이터 흐름으로 엮겠다는 구상인데, 아직 실제로 운영해 본 적은 없습니다. 인도의 아그리스택이 이미 수천만 농가의 실제 데이터를 5년 넘게 다뤄 온 것과 비교하면 한국의 이 사업은 아직 설계 단계입니다. 계획과 실행 사이의 이 간격이 지금 한국 농업 인공지능이 마주한 과제입니다.

이런 시도가 나라마다 따로 노는 것만은 아닙니다. 유엔 식량농업기구는 2025년 4월 디지털 농업과 인공지능을 주제로 첫 국제 대화를 열고, 농업 인공지능의 개발과 관리 원칙을 논의했습니다. 도미니카와 그레나다, 에티오피아, 모로코에서 운영된 디지털 농업 혁신 거점은 그보다 앞선 2021년 이후 이어진 별도 사업입니다. 국제 대화와 혁신 거점은 연결되지만, 원본 데이터를 나라 안에 두고 요약값만 국경 밖으로 보낸다는 특정 기술 구조까지 공식 로드맵이 정한 것은 아닙니다. 나라마다 데이터 법과 통신망, 농업 행정이 다른 만큼 공통 원칙과 현장 사업은 나누어 보는 편이 정확합니다.

일본은 농림수산성과 산하 연구기관이 구축한 공공 데이터 플랫폼 와그리(WAGRI)를 통해 토양과 기상, 병해충 예측 정보를 연결하고 있습니다. 와그리와 연계되는 제로 아그리(Zero-Agri)는 논 수위 관리 장치가 아니라 토마토와 딸기, 오이 같은 시설원에 작물의 관수·액비 제어 시스템입니다. 논 수위 센서와 자동 급수 밸브는 농업연구기구가 개발한 별도 물관리 체계에서 시험돼 왔습니다. 같은 데이터 기반 농업이라도 유리온실의 양액 밸브와 논 수위 물꼬는 다른 장비입니다. 이름이 한 플랫폼 주변에 놓였다고 같은 기계로 합쳐 설명할 수는 없습니다.

플랫폼이 아무리 정교해도 다룰 사람이 없으면 쓸모가 없습니다. 세계경제포럼의 2025년 조사에서 농림어업 분야 고용주의 68퍼센트는 노동시장의 기술 격차를 산업 전환의 장벽으로 꼽았습니다. 이 수치는 농업 종사자 68퍼센트가 스스로 격차를 느꼈다는 조사도, 농과대 학생의 준비도를ぜん 조사도 아닙니다. 필요한 것은 거대한 모델의 사용법만 가르치는 수업이 아닙니다. 앞 사진의 배경이 바뀌면 정확도가 왜 떨어지는지, 센서가 끊겼을 때 어느 값부터 의심해야 하는지, 모델이 자신 있게 틀릴 때 누가 판단을 멈출지를 밭과 교실에서 함께 다루는 훈련입니다.

여러 나라의 농업 대학은 컴퓨터공학과 농학, 데이터 과학을 묶은 교육과 연구 조직을 세우고 있습니다. 교수와 학생만으로는 논에서 생기는 문제를 다 볼 수 없습니다. 정부는 행정 자료를 열고, 기업은 장비와 소프트웨어를 내놓고, 농민은 흙과 작물의 변화를 기록합니다. 대학과 정부, 기업, 농민, 지역 사회가 연결되는 오중나선 모형은 이 관계를 설명하는 틀입니다. 다섯 주체가 지식과 책임을 어떻게 나눌지 정리한 것이지, 참여 기관 수를 세는 세계 통계는 아닙니다.

농사 처방을 사람 손을 거치지 않고 바로 기계에 넘기는 일은 아직 위험합니다. 그래서 여러 나라는 인공지능이 낸 답을 농업 지도사가 한 번 더 확인한 뒤에야 농가에 전달하는 절차를 둡니다. 규제 샌드박스라고 불리는 이 임시 허가 구역 안에서는 새 인공지능 서비스가 정식으로 풀리기 전에 제한된 지역과 기간 동안 시험을 거칩니다. 값을 잘못 읽은 모델이 엉뚱한 밭에 농약을 치라고 안내하는 사고를 막기 위한 최소한의 안전장치입니다.

그 길이 누구의 것이냐는 질문은 아직 풀리지 않았습니다. 트랙터 회사나 거대 클라우드 기업이 농가의 현장 데이터를 자기네 울타리 안으로만 거둬들이면, 정작 그 데이터를 만

든 농부는 자기 자료를 다시 꺼내 쓰지 못합니다. 업계에서는 이를 벤더 록인이라 부릅니다. 열쇠를 남에게 맡기고 정작 자기 집 문은 스스로 못 여는 상태입니다.

나이 든 농부에게는 이 문제가 더 무겁습니다. 회선이 약한 산골 마을에서는 애초에 신호가 잡히지 않고, 화면 속 작은 글자를 읽으려 안경을 고쳐 쓰는 농부 앞에서는 아무리 정교한 인공지능도 무력합니다. 그래서 인도든 일본이든, 현장 지도원이 마을을 돌며 화면을 대신 눌러 주고 결과를 말로 옮겨 주는 사람 손이 여전히 필요합니다. 이런 안전장치와 데이터 통로를 까는 데는 돈도 많이 듭니다. 무안 들판 한 곳에만 2546억 원이 들어가는 것을 보면, 국가 전체를 촘촘한 디지털 공공 인프라로 덮는 일에 얼마나 큰 비용이 드는지 짐작할 수 있습니다. 재정이 넉넉지 않은 나라는 이 경주에 아예 끼지 못하고, 데이터가 많은 나라와 없는 나라 사이의 격차만 더 벌어질 위험이 있습니다.

이 흐름이 다음에 닿을 곳은 이미 어느 정도 보입니다. 중앙의 커다란 서버 하나가 모든 농가의 원본 데이터를 끌어모으는 대신, 원본은 각자의 농장 컴퓨터에 그대로 둔 채 그 안에서 배운 결과만 주고받는 연합학습(Federated Learning) 방식이 시험대에 오르고 있습니다. 데이터가 오간 기록을 조작하지 못하게 블록체인에 새겨 두는 시도도 함께 진행됩니다. 여기에 스스로 판단하고 스스로 움직이는 능동형 인공지능이 더해지면, 농부가 화면을 들여다보지 않아도 인공지능이 날씨와 토양 값을 종합해 밸브를 열고 드론을 띄우는 날이 옵니다. 다만 그 판단이 틀렸을 때 누가 책임지는지는 아직 아무도 정하지 않았습

니다.

지금 무안 들판에는 아직 유리온실도 센서도 없습니다. 측량 말뚝 몇 개가 잡초 사이에 박혀 앞으로 들어설 온실의 네 귀퉁이를 표시하고 있을 뿐입니다. 몇 해 뒤 이 땅에서 첫 데이터가 나올 때, 그 데이터의 주인은 농사를 지은 농부일까요, 아니면 데이터가 오가는 길을 깔아 준 회사일까요.

## 근거 및 참고문헌

1. MDPI. (2025). Big data analytics and machine learning for smart agriculture. MDPI. <https://doi.org/10.3390/books978-3-7258-4878-2>
2. Agriculture INDIA. (2026). Post budget webinar 2026: Bharat Vistaar, AI-powered digital public infrastructure for agriculture [Video]. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=H\\_Wfqw3lbhc](https://www.youtube.com/watch?v=H_Wfqw3lbhc)
3. WBG Civil Society Engagement. (2026). CSPF: Examining how AI and digital agriculture create jobs in developing countries [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=9rRCamBUBpU>
4. Committee on World Food Security. (2026). Morning session: Harnessing AI, digitalization and data governance for food security and nutrition [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=uQ-6ZL9UtvU>
5. C-DAC. (2026). AI in agriculture: Transforming India's Krishi landscape [Video]. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=IV3\\_VnWiBpM](https://www.youtube.com/watch?v=IV3_VnWiBpM)

6. University of Agricultural Sciences, Dharwad. (2026). National conference on next-gen farming: Artificial intelligence, automation and digital transformation [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=BbcYxst1MFc>
7. MIT College of Management, Pune. (2026). AgriTech, AI, and digital transformation in agriculture [Video]. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=hEwX3Bj\\_M6o](https://www.youtube.com/watch?v=hEwX3Bj_M6o)
8. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.). Digital agriculture and AI: Innovation at FAO. <https://www.fao.org/innovation/digital-agriculture-and-ai-innovation/en>
9. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.). The global network of digital agriculture innovation hubs. <https://www.fao.org/in-action/global-network-digital-agriculture-innovation-hubs/en>
10. 농림축산식품부. (2026). 국가 농업AX플랫폼 SPC 설립 공모지침서. 농림축산식품부. <https://www.mafra.go.kr/bbs/home/791/594309/download.do>
11. Press Information Bureau, Government of India. (2026). Bharat Vistaar and AI-based agricultural advisory: Official progress figures. <https://www.pib.gov.in/PressReleaselframePage.aspx?PRID=2289031>

## 1.2

# IoT 센서 및 엣지 AI(Edge AI) 모니터링

새벽 다섯 시, 논둑 진흙에 손가락 두 마디 굽기의 회색 막대 하나가 꽂혀 있습니다. 끝에서 초록 불빛이 세 번 깜박이고 꺼집니다. 밤사이 물이 얼마나 스며들었는지, 흙 속 온도가 몇도까지 떨어졌는지를 재고 있다는 신호입니다. 논 주인은 아직 이불 속에서 휴대폰 화면부터 켜는데, 거기에는 어젯밤 논 세 곳의 물 높이와 흙 상태가 꺾은선 그래프로 떠 있습니다.

이 회색 막대의 정체는 사물인터넷(IoT) 센서입니다. 흙에 박힌 채로 전기가 얼마나 잘 통하는지를 재서 물기의 양으로 바꿔 냅니다. 옆에는 질소와 인, 칼륨 농도를 ppm 단위로 재는 양분 센서, 산성도를 재는 pH 센서, 공기 중 온도와 습도를 재는 기상 센서가 함께 꽂히는 경우가 많습니다. 논 위에는 작은 카메라도 매달립니다. 몇 초마다 벼 잎을 찍어 누렇게 뜨는 곳이 있는지, 낱알에 벌레가 붙었는지 확인합니다. 넓은 들판 하나를 걸어서 다 살피려면 하루가 꼬박 걸리지만, 센서 몇 개를 논마다 심어 두면 그 일을 밤새 대신해 줍니다.

흙과 공기, 잎에서 값을 재는 이 장치들은 저마다 다른 길로 신호를 보냅니다. 가까운 거리는 지그비(ZigBee) 무선망이 신호를 이어받아 옮기고, 값을 받았다는 확인 신호까지 주고받아 신호가 끊기면 다시 보내 줍니다. 이렇게 모인 값은 논둑에 놓인 작은 게이트웨이로 흘러들고, 거기서 계산을 마친 뒤에야 밸브나 스프링클러 같은 실제 장치를 움직입니다. 그러고도 요약된 결과만 골라 인터넷이 연결될 때 클라우드로 다시 올려보냅니다. 논이 넓은 평야 지대에서는 대략 50무에서 100무마다 센서 하나를 박는 식으로 배치 간격을 정합니다. 땅의 굴곡이 심하거나 흙의 성질이 들쭉날쭉한 곳에서는 지리정보 분석으로 어디에 센서를 더 촘촘히 박아야 하는지 미리 계산해 둡니다.

문제는 이 숫자를 어디서 계산하느냐입니다. 센서값을 먼 서버로 보내 답을 받는 방식은 통신 상태와 데이터 크기에 따라 지연 시간이 달라집니다. 산이 신호를 가리거나 폭우가 기지국을 흔드는 날에는 그 차이가 커집니다. 그래서 논 옆의 작은 컴퓨터가 영상을 줄이고 이상값을 가려낸 뒤 필요한 결과만 보내는 엣지 AI(Edge AI)가 쓰입니다. 라즈베리파이나 젯슨나노 같은 기판이 그 일을 맡습니다. 작물이 열과 물 부족으로 받는 피해는 품종과 생육 단계, 노출 시간에 따라 달라지므로 센서의 판단도 하나의 온도 문턱에만 기대지 않습니다.

작은 컴퓨터 안에서 큰 모델을 그대로 돌리기는 어렵습니다. 계산값을 적은 비트로 바꾸는 양자화, 영향이 작은 연결을 덜어내는 가지치기, 큰 모델의 판단을 작은 모델에 옮기는 지식 증류가 쓰입니다. 2026년 TinyWeedNet 연구는 공개 DeepWeeds 시험 자료에서 정확도 97.26퍼센트, STM32H7 기판에서 추론 시간 90밀리초 미만, 모델 크기 약 1.815메가바이트를 보고했습니다. 다만 논 한복판의 장기 시험이 아니라 공개 영상 자료를 쓴 벤치마크였습니다. 물걸러대기의 절수와 메탄 감축은 이 영상 분류 모델과는 다른 포장시험에서 살펴야 할 문제입니다.

카메라가 찍은 사진도 곧바로 모델 안에 들어가지 않습니다. 원본 사진은 크기와 밝기가 제각각이라, 엣지 컴퓨터는 먼저 사진을 가로세로 224픽셀 정사각형으로 잘라 맞추고, 이중선형 보간이라는 계산으로 픽셀 사이 빈 틈을 매끄럽게 채웁니다. 색상 값도 미리 정해 둔 기준에 맞춰 다시 고르게 조정합니다. 이렇게 손질을 마친 사진 한 장이 그제서야 병해충을 가려내는 모델 앞에 놓입니다.

카메라를 엮은 사륜 차량이 작물 줄을 따라간 시험도 있습니다. 라즈베리파이에서 Canny 경계 검출과 Hough 변환을 돌린 차량은 30미터 옥수수밭 구간을 열 차례 주행했습니다. 평균 횡방향 오차는 흐린 날 6.2센티미터, 맑은 날 8.0센티미터, 황혼 12.5센티미터였습니다. 이 논문에는 칼만 필터, 초당 스무 번 방향 보정, 벡 제초 칼날, 비료량 결정 기능이 나오지 않습니다. 작물 줄을 따라간 성능과 잡초를 뽑거나 비료를 처방한 성능은 서로 다른 시험으로 남겨 두어야 합니다.

현장은 교과서처럼 깔끔하지 않습니다. 겨울에는 배터리 성능이 떨어지고, 산과 폭우는 무선 신호를 끊습니다. 센서는 평소 절전 상태로 있다가 정해진 시각이나 값이 크게 바뀔 때만 작동하는 방식으로 전기를 아깁니다. 몇 킬로미터 떨어진 곳까지 적은 전력으로 값을 보내는 로라완(LoRaWAN)의 전 세계 보급 기반은 2025년 말 1억 2,500만 대를 넘었습니다. 로라 얼라이언스가 밝힌 25퍼센트 이상은 한 해 증가율이 아니라 연평균 성장률입니다. 통신 거리와 속도는 출력, 안테나 높이, 지형, 장애물에 따라 달라지므로 어느 한 일본 농장의 수치를 보편 사양처럼 적을 수는 없습니다.

이렇게 다듬어진 요약값은 다시 먼 곳으로도 나갑니다. 드론이나 트랙터처럼 논 밖으로도 움직이는 장비는 4세대, 5세대 이동통신이나 위성 회선을 함께 씁니다. 통신망조차 잘 닿지 않는 깊은 산간 밭에서는 오래전부터 쓰던 문자메시지용 통신 모듈이 남아, 느리더라도 짧은 값 하나만은 실어 나릅니다. 인터넷이 아예 닿지 않는 오지 밭에서는 게이트웨이가 자체적으로 작은 무선 서버를 열어, 인터넷 없이도 농부의 휴대폰 앱과 곧바로 값을 주고받습니다. 통신이 살아 있을 때는 정제된 값을 가벼운 메시지 규약으로 클라우드 데이터베이스에도 올려 두어, 다음번 모델을 다시 훈련시킬 때 이 기록을 씁니다.

클라우드와 엣지의 속도와 전력 소비를 견주려면 같은 카메라, 같은 모델, 같은 무선망에서 시험해야 합니다. 서로 다른 논문에서 가져온 응답시간과 배터리 소모율, 패킷 손실률

을 한 장비의 도입 전후 성적처럼 놓으면 비교가 무너집니다. 현장에서 먼저 영상을 줄이면 서버로 보내는 데이터가 적어지고 통신이 끊겨도 일부 판단을 이어갈 수 있다는 방향은 분명합니다. 다만 절감 폭은 장비와 작업, 무선 조건을 밝힌 한 시험의 숫자로 제시해야 합니다.

값이 틀리는 센서를 알아채는 일도 만만하지 않습니다. 흙 속에 몇 달째 박혀 있는 양분 센서는 염분과 화학 반응 탓에 금속 전극이 조금씩 삭습니다. 그러면 실제로는 물이 충분한데도 화면에는 바짝 마른 것처럼 낮은 값이 뜨거나, 반대로 멀쩡한 흙을 늘 젖어 있다고 표시하는 일이 생깁니다. 사람으로 치면 열이 없는데도 고장 난 체온계가 39도를 가리키는 것과 같습니다. 이런 오차를 걸러 내려고 옛지 컴퓨터는 값이 들어올 때마다 몇 겹의 검사를 거칩니다. 최근 값들의 평균에서 크게 벗어난 수치를 골라내는 상자그림 방식, 순간적으로 튀는 값을 눌러 주는 이동평균 필터, 몇 초 사이 물리적으로 불가능할 만큼 값이 뛰면 일단 의심하고 직전 값으로 메워 두는 보간법이 함께 돌아갑니다.

2025년에 나온 한 연구는 여기서 한 걸음 나아가, 여러 센서 값을 묶어 서로 닮은 정도와 흐트러진 정도를 함께 살피는 군집 분석으로 고장 난 센서를 가려내는 방법을 내놓았습니다. 센서 결함은 크게 두 가지입니다. 값이 한쪽으로 쏠려 굳어 버리는 결함과, 시간이 갈수록 조금씩 어긋나는 결함입니다. 두 결함 모두 논밭이라는 혹독한 환경 탓에 실험실보다 훨씬 자주 일어납니다. 여름철 폭우로 논이 통째로 잠기거나 겨울철 서리로 기판 접점이 얼어붙는 사고도 드물지 않습니다. 농촌진흥청은 pH와 EC 센서는 달마다 눈금을 맞추고 표면에 낀 흙과 이물질을 닦아 내라고 권합니다. 기계가 아무리 정확해도 흙 묻은 손으로 센서 머리를 한 번 씻어 주는 사람의 손길까지 대신하지는 못합니다.

각 농장의 기판에서 따로 배운 모델은 사람 이름이나 논 위치가 담긴 원본 자료 대신 학습 과정에서 달라진 매개변수만 중앙 서버로 보낼 수 있습니다. 이를 연합학습이라 부릅니다. 원본이 농장 밖으로 덜 나간다는 장점이 있지만, 매개변수에서 정보가 새거나 참여 농장이 악의적인 값을 보낼 위험까지 사라지는 것은 아닙니다. 인도의 개인정보법 준수 효과가 이미 입증됐다고 말할 단계도 아닙니다. 연합학습은 개인정보 보호를 돕는 설계 가운데 하나이며, 법적 근거와 접근 통제, 보안 점검이 따로 필요합니다.

옛지 인공지능을 도입한 농장에서는 물과 통신량, 농약 사용이 줄거나 작업 시간이 짧아진 사례가 보고됩니다. 그러나 25퍼센트에서 50퍼센트 같은 범위를 여러 작물의 평균값으로 부를 메타분석은 제시되지 않았습니다. 토양과 기후, 장비 가격, 통신비, 수리 인력에 따라 결과가 크게 갈립니다. 센서와 로봇을 처음 사는 값은 소규모 농가에 높은 문턱입니다. 태양광 기판, 공동 임대, 작업 대행이 거론되는 이유도 숫자 하나보다 이 비용 구조에 있습니다.

계산을 마친 판단은 화면 속 문자만이 아니라 사투리를 알아듣는 음성으로도 전해집니다. 글을 읽기 불편한 어르신 농부에게는 스피커에서 흘러나오는 말 한마디가 그래프보다 더 믿음직합니다.

엣지 AI 모니터링은 여기서 멈추지 않을 것입니다. 색을 보는 일반 카메라 옆에 열을 읽는 열화상 카메라, 눈에 안 보이는 파장까지 쫓개어 보는 초분광 카메라를 나란히 달고, 위성이 찍은 식생지수 영상까지 논둑의 기판 안에서 한꺼번에 겹쳐 읽는 방식으로 나아가고 있습니다. 여러 장비가 동시에 잦 값을 하나로 합치면 가뭄 피해와 병충해를 가려내는 정확도가 올라갑니다. 농업 전용 거대언어모델과 연결되어, 농부가 사투리 섞인 말로 눈에 무슨 문제가 있는지 물으면 방금 잦 센서 값을 근거로 오늘 해야 할 일을 알려 주는 방향으로 넓어지고 있습니다.

그렇게 걸러진 값만 농부의 휴대폰에 도착합니다. 어젯밤 논 두 곳은 물이 부족해 밸브가 저절로 열렸고, 한 곳은 센서 오류로 판단해 값을 버렸다는 알림이 함께 뜹니다. 농부는 그 알림을 확인한 뒤에야 장화를 신습니다.

## 근거 및 참고문헌

1. Geethanjali, S. G., & Karan, N. (2025). Vision Transformer-Assisted IoT System for Smart Agriculture and Multi Crop Disease Detection. IARJSET, 12(8). <https://doi.org/10.17148/IARJSET.2025.12832>
2. Nezami, M., & Kumar, R. (2026). Multimodal Edge Intelligence for Crop Disease Detection and Irrigation Advisory in Precision Agriculture. International Journal of Science, Strategic Management and Technology, 2(5), 1-9. <https://doi.org/10.55041/ijssmt.v2i5.232>
3. Hajirad, I. (2026). Precision and Smart Agriculture: Harnessing IoT for Enhanced Productivity and Sustainability. Intelligent Agriculture, 2(1), 84-105. <https://doi.org/10.54963/ia.v2i1.2408>
4. Edge intelligence for smart agriculture: An artificial intelligence framework for precision farming and sustainable crop management. (2026). <https://doi.org/10.21474/jncs01/133>
5. Hermantoro, Renjani, R. A., & Supriyanto, G. (2026). Artificial Intelligence and IoT-Based Precision Irrigation for Energy-Efficient Tropical Agriculture. International Journal of Management and Business Intelligence, 4(3), 685-698. <https://doi.org/10.59890/ijmbi.v4i3.25>
6. AgroPest-Trust Edge : conception et audit d'un système frugal, explicable et conscient de l'incertitude pour la reconnaissance de ravageurs et stress biotiques sur smartphone. (2026). <https://doi.org/10.61532/rime262136>
7. 農業農村情報通信環境整備 準備会. (2025). 第2回オンラインセミナー「気候変動と農業の未来 ~ICT・IoT活用によるデータ駆動型農業の重要性~」 [동영상]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=iqLmEFT1wZo>
8. LoRa Alliance. (2026). LoRaWAN enters its next growth phase as massive IoT scales globally. <https://resources.lora-alliance.org/home/lorawan-enters-its-next-growth-phase-as-massive-iot-scales-globally>
9. Kavinsky, M. (2026). LoRaWAN pushes deeper into smart agriculture with satellite-backed connectivity. IoT Business News. <https://iotbusinessnews.com/2026/07/08/lorawan-pushes-deeper-into-smart-agriculture-with-satellite-backed-connectivity/>
10. Zhang, Y., Lu, Y., Martinez-Rau, L. S., Qiu, Q., & Bader, S. (2026). Real-time on-device weed identification using a hardware-efficient lightweight CNN. Frontiers in Plant Science, 17, 1747863. <https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1747863>

11. A novel data healing framework for outlier detection and recovery approach in the internet of agriculture things sensor network. (2025). Quality & Quantity. <https://doi.org/10.1007/s11135-025-02402-5>
12. Aldağ, M. C., & Eker, B. (2026). Development and Field Evaluation of an Autonomous Four-Wheel-Drive Agricultural Vehicle Tracking Crop Rows Using Computer Vision Technology. Journal of Agricultural Production, 7(1), 13-19. <https://doi.org/10.56430/japro.1826810>

### 1.3

## 데이터 가버넌스 및 자원 관리

논물이 찰랑거리는 6월 오후, 논둑에 쪼그려 앉은 농부가 삽을 내려놓고 휴대폰을 꺼냅니다. 스마트 관개 앱 화면에 파란 버튼 하나가 뜹니다. 위치 정보와 영농 정보 수집에 동의하느냐는 물음입니다. 이 버튼을 누르는 순간 이 논에서 쓴 물의 양과 흙의 상태, 벼가 자라는 속도까지 모두 어딘가의 서버로 흘러갑니다.

밭에서 잔 숫자의 주인을 정하는 일은 까다롭습니다. 유럽연합의 농업데이터공유행동규범은 농민을 데이터 발생자 또는 원천 제공자로 보고, 농민이 데이터의 접근과 이용 조건을 계약으로 통제할 수 있어야 한다고 권합니다. 이를 법적 물권으로서 모든 데이터의 소유권이 농민에게 귀속된다는 규칙으로 읽어서는 안 됩니다. 원본 센서값과 회사가 가공한 예측치에는 서로 다른 권리와 영업비밀이 얹힐 수 있습니다. 이 규범은 법이 아니라 권고이므로 실제 권리는 서비스 계약서와 각국 법률에 따라 달라집니다.

2026년 4월, 미국 네브래스카주가 이 문제를 처음으로 법으로 다뤘습니다. 주지사가 농업데이터프라이버시법(Agricultural Data Privacy Act)에 서명하면서, 농장에서 나온 흙과 기후와 작물과 가축 자료는 공개되지 않고 여러 농가 자료와 섞이지 않은 한 그 농장 주인의 것이라고 못박았습니다. 회사가 이 자료를 쓰려면 먼저 농민과 서면으로 계약을 맺어야 하고, 2027년부터는 농민의 서면 동의 없이 원본 자료를 되파는 일 자체가 금지됩니다.

이 법을 어겼을 때 벌을 내리는 곳도 정해져 있습니다. 네브래스카주 검찰총장이 위반 사실을 통보하고 마흔닷새 동안 고칠 기회를 준 뒤에도 고쳐지지 않으면, 위반 한 건마다 천 달러의 과태료를 물립니다. 농민이 회사를 직접 고소할 길은 이 법에 없고, 대신 정부가 감시자 역할을 맡습니다. 다만 이 법에도 빈틈은 있습니다. 자료가 여러 농가 것과 섞이는 순간 그 자료는 더 이상 한 농민만의 소유가 아니게 되는데, 자료를 하나의 큰 덩어리로 섞을지 말지는 그 자료를 모으는 회사가 결정합니다.

소유권 다툼이 끝나기도 전에 더 실감 나는 문제가 닥치기도 합니다. 자료를 담아 두던 회사가 사업을 접는 경우입니다. 스마트팜 서비스를 몇 해째 쓰던 농가가 어느 날 앱 종료 통보를 받으면, 그동안 쌓아 온 토양 검사 기록과 비료 사용 이력, 해마다의 수확량 그래프가 한꺼번에 사라질 수 있습니다. 그 자료를 자기 컴퓨터나 종이 장부에 따로 옮겨 두지 않았기 때문입니다. 서버 안에만 있던 숫자는 서버가 꺼지는 순간 주인을 따지는 일 자체가 어려워집니다.

자기 자료를 정기적으로 내려받아 따로 저장해 두는 습관, 이른바 자료 이동권을 실제로 챙기는 농가는 아직 많지 않습니다. 권리가 법 조문에 있어도 몸에 붙은 습관이 되지 않으면 소용이 없습니다. 이런 일을 겪은 농가일수록 다음 서비스에 자료를 맡길 때 조심스러워지고, 아예 앱을 쓰지 않는 쪽을 택하기도 합니다.

동의가 진짜 동의하려면 강요 없이 결정하고, 무슨 일이 생기는지 미리 듣고, 나중에 결정을 거둘 길이 있어야 합니다. 긴 약관과 버튼 하나만 놓인 화면은 이 조건을 채우기 어렵습니다. 유럽연합 데이터법은 연결 제품 이용자가 기기가 만든 데이터에 접근할 권리를 담았고, 법의 원칙적인 적용일은 2025년 9월 12일입니다. 2026년 9월 12일은 그 뒤 시장에 출시되는 연결 제품과 관련 서비스에 데이터 접근이 쉬운 설계를 요구하는 기준일입니다. 권리의 시행일과 제품 설계 의무의 기준일은 나눠 읽어야 합니다.

여러 농가의 값이 한 서버에 쌓이면 그 회사는 개별 농가가 보지 못하는 지역 전체의 그림을 봅니다. 인도의 통합 농가 서비스 인터페이스(UFSI)는 정부와 민간 서비스가 표준 형식으로 연결되고, 동의를 받은 범위에서 핵심 등록부에 접근하도록 만든 교환 규격입니다. 2026년 7월 아그리스택 농민 ID가 1억 180만 개에 이르렀다는 구축 실적은 확인됩니다. 그러나 UFSI 하나로 관개용수 20퍼센트에서 30퍼센트를 아끼고 보험금과 대출 심사도 빨라졌다는 결합 성과는 공식 검증 결과가 아닙니다. 데이터 교환 기능과 개별 관개 기술의 절수 효과, 금융 서비스의 처리 시간은 갈라서 평가해야 합니다.

이 자료 안에는 성격이 다른 두 가지 정보가 함께 섞여 있습니다. 하나는 개인정보입니다. 논 위치를 알려 주는 좌표에 소유자 이름과 전화번호가 붙는 순간, 그 자료는 한 사람을 특정할 수 있는 개인정보로 바뀝니다. 드론이 찍은 밭 사진도 경계선과 지번이 함께 나오면 마찬가지입니다. 이름과 번호를 지운다고 안심할 일도 아닙니다. 마을에 논이 몇 안 되는 지역이라면 위치와 면적, 작물 종류만 남아 있어도 누구네 논인지는 이웃이 다 압니다. 이름표를 떼어 내도 옷 모양과 크기만 보고 누구 옷인지 짐작할 수 있는 것과 같습니다. 익명으로 처리했다는 말이 실제로 알아볼 수 없다는 뜻은 아닙니다.

다른 하나는 영업비밀입니다. 같은 논에서 해마다 얼마나 거두었는지, 비료를 얼마나 썼는지, 인건비를 얼마나 들었는지는 그 농가의 경영 정보입니다. 이웃 농가나 자재를 파는 회사가 이 숫자를 알게 되면 다음 거래에서 값을 매길 때 그 농가보다 유리해집니다. 비료를 언제 얼마나 사들이는지 그 흐름만 지켜봐도 다음 철에 무슨 작물을 심을지 앞서 짐작할 수 있기 때문입니다. 두 정보는 성격이 다른 만큼 다루는 법도 달라야 하는데, 현장에서는 같은 서버, 같은 앱 안에 뒤섞여 저장되는 경우가 흔합니다.

한국 정부가 추진하는 국가 농업AX플랫폼도 이 문제를 피해 가지 못했습니다. 전라남도 와 광주광역시 컨소시엄이 2026년 7월 사업자로 최종 선정되었습니다. 전남 무안에 2546억 원을 들여 짓는 이 플랫폼 계획에는, 모아들인 자료 안에서 개인정보와 민감 정보를 따로 찾아내 걸러 내는 절차를 처음부터 넣어야 한다는 조건이 달렸습니다. 자료를 다

모은 뒤에 개인정보를 골라내는 것이 아니라, 모으는 순간부터 두 가지를 구분해야 한다는 뜻입니다.

여러 출처의 자료를 하나로 모아 관개나 시비 배분을 자동으로 계산하는 엔진을 만들려면 자료가 서로 통해야 합니다. 이 기준으로 국제 농업 연구 사회는 흔히 FAIR 원칙을 둡니다. 찾을 수 있고, 접근할 수 있고, 서로 다른 체계와도 통하고, 다시 쓸 수 있어야 한다는 네 가지 조건입니다. 말은 쉬워도 현장에서는 걸림돌이 많습니다. 어느 기관은 비료 성분을 피피엠(ppm) 단위로 적고, 다른 기관은 헥타르당 킬로그램(kg/ha)으로 적습니다. 행정 구역 이름도 기관마다 조금씩 다르게 표기합니다. 이 숫자들을 그대로 하나의 모델에 밀어 넣으면, 단위를 착각한 모델이 비료량을 실제와 크게 다르게 계산하는 일도 생깁니다.

유엔식량농업기구(FAO)가 관리하는 농업 용어 사전인 아그로복(AGROVOC)을 공통 기준으로 삼자는 제안도 이래서 나옵니다. 같은 말을 같은 뜻으로 쓰자는 합의가 먼저 있어야 자료를 나누는 일이 의미를 갖기 때문입니다. 농업 분야 국제 연구기관인 CABI는 빌 앤드 멀린다 게이츠 재단의 지원을 받아 2025년부터 책임 있는 농업 자료 공유를 돕는 사업을 벌였습니다. 이 사업의 결론은 분명했습니다. 자료를 기술적으로 잘 정리하는 기준은 세울 수 있어도, 그 자료를 처음 낸 농가에게 이익이 실제로 돌아가게 만드는 방식은 지역과 상황마다 다시 짜야 한다는 것이었습니다.

물과 비료를 나누는 계산에는 센서가 없는 논이 화면에서 사라질 위험이 있습니다. 장비를 갖춘 논은 물 부족이 숫자로 찍히지만, 그렇지 않은 논은 같은 가뭄을 겪어도 기록에 남지 않습니다. 케냐 정부가 2026년 3월 내놓은 것은 시행 중인 확정 법률이 아니라 농업 데이터 정책안과 디지털 농업정보 법안 초안입니다. 그달 말 공개 의견수렴이 진행됐고 후속 문안 작업이 이어졌습니다. 소농의 권리가 이미 법으로 보장됐다고 쓰기보다, 데이터 소유와 접근권을 법안에 담기 위한 논의가 시작됐다고 적는 편이 맞습니다.

자원 이야기를 농장 담장 밖으로 넓히면 앞뒤가 어긋나는 그림이 나옵니다. 농장에서는 센서와 인공지능이 물 한 방울, 비료 한 줌을 아끼는 데 쓰입니다. 그런데 그 인공지능을 학습시키고 돌리는 데이터 센터는 정반대의 일을 합니다. 서버를 식히는 냉각수와 전력 소비량이 만만치 않습니다. 논에서 아낀 물을 어딘가의 데이터 센터가 그만큼, 또는 그 이상 쓸 수 있습니다. 이 모순을 줄이려는 방향은 이미 나와 있습니다. 크고 무거운 모델 대신 센서 옆에서 곧바로 계산을 끝내는 가벼운 인공지능(TinyML)을 쓰고, 데이터 센터에도 전력과 용수 사용량에 상한선을 두는 예산제를 적용하자는 제안입니다.

다시 그 논둑입니다. 농부는 버튼을 누릅니다. 이 논이 물 사용량과 흙 상태가 어딘가의 데이터베이스에 한 줄로 남습니다. 그 한 줄이 내년 봄 가뭄이 들었을 때 이 논에 물을 먼저 보낼지 나중에 보낼지를 가르는 근거가 될 수도 있습니다. 농부는 동의 화면을 사진으

로 찍어 휴대폰에 저장해 둡니다. 나중에 누군가 이 자료를 어떻게 썼는지 물을 날을 대비해서입니다.

## 근거 및 참고문헌

1. Sangwa, S., & Mutabazi, P. (2025). Artificial intelligence in agriculture: Ethical stewardship, responsible innovation, and governance for sustainable food systems. *Intelligent Agriculture*, 1(2), 25-45. <https://doi.org/10.54963/ia.v1i2.1684>
2. Mole, M. (2025). Revolutionizing agricultural water management through AI-driven irrigation systems: A comprehensive framework for sustainable farming practices. *International Journal of Computing and Engineering*, 7(21), 1-11. <https://doi.org/10.47941/ijce.3092>
3. Amar, S., Bori, N., & Cörvers, R. (2026). From collection to control: Data governance, digital technologies, and the politics of inclusion in the digitalisation of smallholder agriculture. *Outlook on Agriculture*, 55(1), 19-27. <https://doi.org/10.1177/00307270251410944>
4. Scobey, W. (2026). Nebraska's Agricultural Data Privacy Act and similar state efforts. National Agricultural Law Center. <https://nationalaglawcenter.org/nebraskas-agricultural-data-privacy-act-and-similar-state-efforts/>
5. European Commission. (2026). Data Act. Shaping Europe's Digital Future. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/data-act>
6. 뉴스핌. (2026). 국가 농업AX플랫폼 민간사업자 선정...연내 특수목적법인 설립. <https://www.newspim.com/news/view/20260727001240>
7. Penrhys-Evans, T. (2025). Making data work better in agriculture with FAIR principles. CABI Blog. <https://blog.cabi.org/2025/05/27/making-data-work-better-in-agriculture-with-fair-principles/>
8. Committee on World Food Security. (2026). Harnessing AI, digitalization and data governance for food security and nutrition: Morning session [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=uQ-6ZL9UtvU>
9. Agriculture INDIA. (2026). Post budget webinar 2026: Bharat Vistaar, AI-powered digital public infrastructure for agriculture [Video]. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=H\\_Wfqw3lbhc](https://www.youtube.com/watch?v=H_Wfqw3lbhc)



## 제 2 장

# 정밀농업 작물 모니터링과 영상 진단



## 2.1

# 드론(UAV) 및 위성 리모트 센싱 분석

이른 아침, 안개가 걷히지 않은 논둑 위에서 한 사람이 태블릿을 들고 드론을 띄웁니다. 벼 포기 위로 낮게 날아간 기체가 보내온 화면에 초록과 노랑과 붉은 얼룩이 흩뿌려진 지도가 뜹니다. 같은 논인데 어디는 짙은 초록이고 어디는 누렇게 바랬습니다. 눈으로 보면 그저 고르게 푸른 벼논입니다.

그 차이를 만드는 것은 빛입니다. 잎 속 엽록소는 광합성에 필요한 붉은빛을 흡수합니다. 반면 사람 눈에 보이지 않는 근적외선은 잎 속 세포층에 부딪혀 되튀겨 나옵니다. 튼튼한 잎일수록 세포층이 두껍고 성글게 짜여 있어서 근적외선을 더 세게 반사합니다. 병들거나 마른 잎은 이 반사가 줄어듭니다. 흡수한 빛과 반사한 빛의 비율이 건강한 잎과 시든 잎을 가릅니다. 사람 눈은 이 비율을 읽지 못하지만, 여러 파장을 나눠 찍는 센서는 읽어냅니다.

이 비율을 숫자 하나로 바꾼 것이 식생지수(NDVI)입니다. 근적외선 반사량에서 붉은빛 반사량을 뺀 값을, 두 값을 더한 값으로 나눕니다. 숫자 하나로 오늘 이 밭이 팔팔한지 축 늘어졌는지를 알려 줍니다. 다만 한계가 있습니다. 벼가 무성하게 우거지면 근적외선 반사량이 일정 수준을 넘어서는 더는 오르지 않습니다. 저울 눈금이 끝까지 차면 백 킬로그램짜리도 백오십 킬로그램짜리도 똑같이 백이라고 적히는 것과 같습니다. 이 한계를 넘어서려고 만든 지수가 적색경계지수(NDRE)입니다. 초록과 근적외선 사이 좁은 파장대인 적색경계를 대신 읽어서 잎 속 엽록소와 질소 농도를 훨씬 촘촘하게 가려냅니다.

빛의 반사만 신호가 되는 것은 아닙니다. 잎 뒤편 숨구멍이 열리고 닫히는 정도에 따라 잎 표면 온도도 달라집니다. 물이 부족한 벼는 숨구멍을 닫아 증산을 줄이는데, 그러면 잎 온도가 미열이 오른 사람처럼 살짝 올라갑니다. 열화상 센서는 이 온도 변화를 원격으로 재서 가뭄 스트레스를 사람 눈보다 먼저 알아챱니다. 라이다 센서는 레이저를 수만 번 쏘아 잎층에 부딪혀 돌아오는 시간을 재는 방식으로 작물의 키와 부피를 잽니다. 초분광 센서는 수십에서 수백 개에 이르는 촘촘한 파장 채널로 잎을 나누어 찍어, 병원균이 침투한 세포의 미세한 색 변화까지 잡아냅니다.

위성은 수백 킬로미터 위에서 같은 땅을 되풀이해 찍습니다. Sentinel-2 자료는 무료이며 재방문 주기는 약 5일입니다. Landsat 8과 9도 무료이고, 각 위성은 16일, 두 위성을 합치면 8일 간격으로 같은 지점을 지납니다. PlanetScope는 거의 매일 관측하지만 상업 서비스입니다. 나라 단위 면적을 볼 때는 넓고 무료인 영상이 쓸모 있고, 병이 번지는 며칠

을 볼 때는 촬영 간격이 짧은 영상이 필요합니다. 가격과 시간 해상도 사이에서 농가는 늘 저울질합니다.

한국은 2026년 관측 위성을 하나 더 갖췄습니다. 한국항공우주연구원이 지난 7월 미국 반덴버그 우주군 기지에서 차세대중형위성 4호를 쏘아 올렸습니다. 농림축산식품부가 밝힌 사양을 보면 무게 514킬로그램에 관측폭은 120킬로미터, 해상도는 5미터급입니다. 작물과 산림 생육을 가려보는 데 알맞은 분광 밴드 다섯 개를 심었고, 사흘에 한 번씩 한 반도 전역을 훑는 것이 목표입니다. 다만 이 위성은 아직 성능 검증과 영상 보정을 거치는 중이라, 농가가 실제로 이 위성 정보를 받아 보는 서비스는 내년에야 시작됩니다. 위성을 띄우는 일과 그 영상을 정확히 읽는 일 사이에는 이런 시차가 있습니다.

드론은 위성 지도의 한 귀퉁이를 확대하는 돋보기와 가깝습니다. 구름 아래에서 날기 때문에 위성 영상의 구름 차폐에는 덜 묶이지만, 비와 안개, 돌풍, 낮은 시정은 비행과 영상 품질을 가로막습니다. 픽셀 하나가 몇 밀리미터에서 몇 센티미터에 그칠 만큼 촘촘하게 찍을 수 있는 대신, 한 번에 살필 수 있는 땅은 넓지 않습니다. 배터리와 조종 인력, 비행 승인도 필요합니다.

드론이 찍어 오는 사진은 애초에 한 장짜리 지도가 아닙니다. 비행 한 번에 수백 장의 낱장 사진이 쌓이는데, 이 낱장들은 서로 가장자리를 겹치며 찍혀 있습니다. 구조화 모션(SfM)이라는 사진측량 기법이 이 겹친 부분을 실마리 삼아 수백 조각을 하나로 짜 맞추고, 여기에 높낮이 정보를 더해 논 전체의 입체 지도를 만들어 냅니다. 다만 그전에 거쳐야 할 절차가 있습니다. 촬영 현장에 반사율을 이미 알고 있는 정정판을 펴 놓고, 그 순간 하늘에서 내리쬐는 빛의 세기를 함께 재 두어야 합니다. 이 기준값이 없으면 흐린 날 찍은 사진과 맑은 날 찍은 사진이 서로 다른 잣대로 읽혀, 어제와 오늘의 벼가 실제로는 같은데도 다르게 보입니다.

장마철에는 광학 위성이 몇 주씩 구름에 가릴 수 있습니다. 이때 레이더 위성(SAR)은 마이크로파를 쏘고 돌아오는 신호로 논과 물과 작물 구조를 읽습니다. 밤에도 관측할 수 있다는 장점이 있습니다. 레이더와 광학 영상을 겹쳐 벼 재배지를 분류한 한 지역 연구에서는 약 95퍼센트의 정확도가 보고됐습니다. 이 수치는 모든 나라와 계절에 고정된 성능이 아닙니다. 이앙 시기, 품종, 지형, 학습 자료가 달라지면 분류 결과도 달라집니다.

이렇게 모은 영상은 실제 농사일로 이어집니다. 태풍이 지나간 뒤 드론이 찍은 사진에 딥러닝 모델을 돌리면, 어느 구역 벼가 얼마나 쓰러졌는지를 사람이 걸어서 세는 것보다 훨씬 빠리, 훨씬 촘촘하게 그려 냅니다. 이 지도는 보험금을 정하는 손해평가 자료로도 곧바로 쓰입니다. 벼이삭누룩병이나 도열병이 돌 때는 초근접 드론 영상과 적색경계지수를 함께 읽어 병든 구역과 질소가 모자란 구역을 가려냅니다. 그렇게 얻은 정보는 그 구역에만 비료와 약을 더 뿌리라는 처방 지도로 바뀌어 농부의 손에 들어갑니다.

병은 겉으로 드러나기 전에 조직의 반사 특성을 바꿉니다. 밀 붉은곰팡이병 연구에서는 트랙터에 실은 초분광 장비로 포장 안의 감염 신호를 지도화했습니다. 벼이삭누룩병을 다룬 2021년 Remote Sensing 연구는 무인기 초분광 자료로 발생 구역을 추출했습니다. 2026년의 별도 연구는 개선된 YOLOv12n으로 병든 이삭을 탐지해 평균 정확도 80.7퍼센트를 보고했습니다. 하나는 파장으로 병든 구역을 그렸고, 다른 하나는 영상 속 이삭을 찾아냈습니다.

밀밭에서는 드론으로 잎면적과 수분 스트레스를 읽어 수확량을 예측합니다. 한 연구의 결정계수는 품종과 생육 단계에 따라 0.75 안팎에서 0.99까지 넓게 달랐습니다. 어린 잎을 찍은 날과 이삭이 선 뒤 찍은 날의 성적이 같지 않았습니다. 옥수수 개체 수를 세는 모델과 표적 제초 모델도 서로 다른 시험을 거칩니다. 개체 계수와 수확량 예측, 제초제 절감은 각기 다른 기준으로 재야 합니다.

정확도를 더 끌어올리는 방법은 한 가지 센서만 고집하지 않는 데 있습니다. 드론에 달린 카메라와 열화상 센서, 토양 수분 측정값을 한꺼번에 모델에 넣어 밀 수확량을 예측한 연구에서는, 어느 한 센서만 썼을 때보다 예측 오차가 눈에 띄게 줄었습니다. 위성과 드론을 같이 쓰는 방식도 마찬가지입니다. 위성이 넓게 훑은 값과 드론이 촘촘히 찍은 값을 기계 학습 모델 하나에 함께 넣어 작물 상태를 판정한 연구도 있습니다. 한 장비가 놓치는 부분을 다른 장비가 채웁니다.

질소를 읽는 방식도 달라지고 있습니다. 식생지수는 잎의 푸르름을 보고 질소 상태를 간접 추정합니다. 초분광 센서는 더 좁은 반사 파장대를 쓰지만 질소 분자 자체를 곧바로 세는 장비는 아닙니다. 실험실에서 잰 질소 농도와 반사 스펙트럼을 맞춘 보정 모델을 거쳐 값을 추정하며, 엽록소와 수분, 잎 구조의 영향도 받습니다. 비료값이 오를수록 관심이 커지더라도, 화면의 질소 지도는 보정과 현장 검증을 거친 예측값입니다.

드론이 그린 질소 부족 구역과 지리정보시스템에 저장된 토양 자료를 포개면 구역별 시비 처방도를 만들 수 있습니다. 2025년 Agriculture 논문은 무인기와 GIS를 묶은 변량시비 체계를 제안하고 시험했습니다. 연구에서 처방 지도를 만들었다는 사실과 상용 비료 트랙의 노출을 실시간으로 여달았다는 사실은 다릅니다. 실제 살포까지 설명하려면 살포기, 위치 오차, 밸브 반응, 대조구가 나온 포장시험이 필요합니다.

작물은 파종부터 수확까지 정해진 순서를 밟습니다. 못자리를 벗어나 분얼하고, 이삭을 내밀고, 낱알을 채우는 단계를 건너뛰지 않습니다. 위성이 며칠 간격으로 찍어 온 식생지수를 죽 늘어놓으면 들쭉날쭉한 파동이 되는데, 여기서 구름에 가려 튼 값과 진짜 생육 변화를 가려내는 작업이 필요합니다. 매끄럽게 다듬는 계산을 먼저 돌린 뒤 시계열을 기억하는 딥러닝 모델에 넣으면, 지금 벼가 어느 단계를 지나는지와 앞으로 낱알이 얼마나 여물지를 미리 읽어 냅니다. 여기에 더해 APSIM이나 DSSAT처럼 오래전부터 써 온 물리 기반 생육 모델에 위성이 잰 값을 매번 끼워 넣어 예보를 갱신하는 방법도 있습니다. 일기에

보가 새벽마다 관측값을 받아 오늘 예보를 고쳐 쓰듯, 작물 생육 모델도 위성이 새로 찍어 보내는 값을 받을 때마다 수확량 전망을 조금씩 고쳐 씁니다.

그러나 늘 옳게 읽는 것은 아닙니다. 구름이 낮게 드리운 날, 그림자가 진 구역을 광학 위성은 시든 작물로 잘못 읽기도 합니다. 논과 농로가 한 픽셀 안에 함께 들어가면, 컴퓨터는 그 한 칸을 논이라 불러야 할지 길이라 불러야 할지 판단하지 못합니다. 갓 돋은 잡초와 갓 돋은 옥수수는 색과 모양이 거의 같아서, 모델이 잡초를 옥수수로, 혹은 그 반대로 잘못 세는 사례도 보고됩니다. 한 지역 논에서 훈련한 모델을 흙빛과 별이 다른 지역에 그대로 가져다 쓰면 정확도가 뚝 떨어지는 일도 흔합니다. 열대나 장마철처럼 구름과 그림자가 잦은 곳에서는 같은 작물이 서로 다른 작물로 갈리고, 서로 다른 작물이 하나로 묶이는 오차가 눈에 띄게 커집니다.

이 기술이 논에 뿌리내리는 속도는 나라마다 다릅니다. 케냐의 소농 여성 농민들을 대상으로 한 2026년 조사에서는 인공지능 기반 영농 도구를 알고 있다고 답한 이들 가운데서도 실제로 써 본 사람은 크게 적었습니다. 스마트폰 데이터 요금, 글을 읽고 화면을 조작하는 데 드는 부담, 조언을 받아도 그대로 실행할 자금이 없다는 사정이 겹친 탓입니다. 아무리 정교한 지도를 받아도 그다음 작업에 쓸 돈과 사람이 없으면 지도는 화면에 머물러 있습니다.

값도 걸림돌입니다. 초분광 카메라를 얹은 산업용 드론 한 대를 제대로 갖추려면 웬만한 소형 트랙터 한 대 값을 훌쩍 넘어섭니다. 게다가 비행 승인을 받고 영상을 다듬을 사람도 따로 있어야 합니다. 드론 한 번 띄울 때마다 수 기가바이트에서 수십 기가바이트에 이르는 사진이 쏟아지는데, 이를 현장에서 곧바로 걸러 낼 작은 연산 장치까지 갖추기란 작은 농가에는 벅찬 일입니다. 그래서 드론을 직접 사는 대신 영농조합이나 대행 업체에 촬영과 분석을 맡기는 드론 서비스형 모델이 여러 지역에서 퍼지고 있습니다.

부담을 줄이려는 기술적 시도도 있습니다. 해충을 탐지하는 딥러닝 모델에 트랜스포머 구조와 초해상도 기법을 결합해 몸집을 크게 줄인 모델을 드론에 직접 얹은 연구가 2023년 학술지 애그리컬처에 소개되었습니다. 클라우드 서버로 사진을 다 보내고 답을 기다리는 대신, 드론이나 현장 소형 컴퓨터가 그 자리에서 곧바로 판단을 내리는 방식입니다. 통신이 끊기기 쉬운 산간 농지나 인터넷이 느린 지역일수록 이런 모델의 쓸모가 커집니다. 앞으로는 위성이 이상 징후가 있는 구역을 먼저 짚어 주면 드론이 그 자리로 날아가 정밀 촬영을 하고, 지상에 심어 둔 센서 값까지 한데 모으는 세 겹 관측 체계가 자리를 잡아갈 것으로 보입니다.

다시 그 논둑입니다. 드론이 착륙하고, 화면 속 붉은 얼룩 하나가 그대로 남아 있습니다. 병 때문인지, 그림자 때문인지, 아니면 그저 물이 고인 곳인지 화면은 답하지 않습니다. 그 답을 마지막으로 내는 것은 장화를 신고 논으로 걸어 들어가 앞 한 장을 손으로 만져 보는 사람입니다.

## 근거 및 참고문헌

1. Integrated AI and Remote Sensing Framework for Sustainable Agriculture and Environmental Monitoring. (2026). <https://doi.org/10.64137/3108088x/ijaes-v2i2p101>
2. Development of a UAV-based crop disease detection system using deep learning algorithms to enhance precision agriculture. (2026). <https://doi.org/10.2478/ijssis-2026-0031>
3. Systematic Literature Review: Machine Learning and Deep Learning Approaches for Crop Yield Prediction Using Remote Sensing Data. (2026). <https://doi.org/10.37595/mediainfo.v25i2.496>
4. CMAViT: Integrating Climate, Management, and Remote Sensing Data for Crop Yield Prediction With Multimodal Vision Transformers. (2026). IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. <https://doi.org/10.1109/jstars.2026.3669511>
5. Trimble Geospatial. (2026). eCognition Webinar: Deep Learning, UAVs and Precision Agriculture [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=alrseDYV8Lo>
6. Solvi. (2026). Webinar: From Sensors to Science: A Research Grade Drone Imaging Workflow for Agricultural Research [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=xTXOXkABmHU>
7. 농림축산식품부. (2026). 국내 최초 농림위성 시대 개막, 3일 주기 한반도 관측체계 구축. 농림축산식품부 보도자료. <https://www.mafra.go.kr/bbs/home/792/578337/artclView.do>
8. Deep Learning Applications for Crop Mapping Using Multi-Temporal Sentinel-2 Data and Red-Edge Vegetation Indices: Integrating Convolutional and Recurrent Neural Networks. (2025). Remote Sensing, 17(18), 3207. <https://doi.org/10.3390/rs17183207>
9. Yield Prediction of Winter Wheat (*Triticum aestivum*) Varieties Using UAV-Derived Multispectral Vegetation Indices Across Growth Stages. (2026). Agronomy, 16(9), 939. <https://doi.org/10.3390/agronomy16090939>
10. AgTechNavigator. (2026). Fertiliser shock fuels interest in hyperspectral satellites for precision nitrogen use. <https://www.agtechnavigator.com/Article/2026/04/07/fertiliser-shock-fuels-interest-in-hyperspectral-satellites-for-precision-nitrogen-use/>
11. Artificial intelligence (AI) adoption and its perceptions among smallholder women farmers in Kenya. (2026). <https://doi.org/10.1007/s44279-026-00626-z>

## 2.2

## 컴퓨터 비전과 생육 표현형(Phenomics) 분석

논 한가운데 쪼그려 앉은 사람이 줄자와 젖은 수첩을 들고 벼 포기 하나를 골라 뿌리 쪽부터 이삭 끝까지 키를 잽니다. 옆 포기로 넘어가 분얼, 그러니까 한 포기에서 갈라져 나온 줄기 수를 손가락으로 짚어 셉니다. 하루를 꼬박 매달려도 사람 한 명이 잽 수 있는 벼 포기는 많아야 수십 개입니다. 그렇게 적어 온 숫자는 저녁에 표로 옮겨지고, 다음 날 아침이면 또 처음부터 다시 시작됩니다.

식물이 겉으로 드러내는 키와 잎 모양, 색깔, 이삭 수를 표현형이라고 부릅니다. 표현형은 씨앗 속에 적힌 유전자와 그 씨앗이 자란 땅, 날씨, 거름이 함께 만들어 낸 결과입니다. 같은 봉지에서 나온 씨앗 두 톨을 물 많은 논과 물 적은 논에 나누어 심어도 가을에 두 포기 키가 다르게 자라는 이유가 여기 있습니다. 잘 자란 벼가 눈에 띄었다고 해서 그 씨앗이 좋은 것은 아닐 수 있습니다. 그저 그 논에 거름이 많았거나 물이 잘 들었을 뿐인지도 모릅니다. 그래서 좋은 유전자를 정말로 골라내려면, 같은 씨앗을 여러 논에 나누어 심고 환경이 만든 차이를 걷어 낸 뒤에도 남는 차이를 찾아야 합니다. 육종학자가 알고 싶은 것은 유전자가 만든 차이와 논이 덧입힌 환경의 차이를 나누어 읽는 일입니다. 그 차이를 찾는 눈이 예전에는 사람의 경험과 감이었다면, 지금은 카메라와 계산이 그 역할을 맡습니다.

사람 손과 눈이 감당하지 못하는 이 일을 대신하는 것이 컴퓨터 비전입니다. 카메라와 인공지능이 짝을 이뤄 식물을 찍고, 그 사진에서 키와 잎 수, 색깔을 자동으로 읽어 냅니다. 이런 방식을 고속 표현형 분석(HTP)이라고 부릅니다. 2025년에 소개된 트레이트디스커버(TraitDiscover)라는 장비를 보면 카메라 조향이 또렷하게 드러납니다. 눈에 보이는 색을 찍는 일반 카메라, 사람 눈에는 안 보이는 수백 가지 파장을 나누어 찍는 초분광 카메라, 잎의 겉면 온도를 재는 열화상 카메라, 레이저로 깊이를 재는 3차원 스캐너가 한 팔에 나란히 달립니다. 여기에 잎이 실제로 광합성을 얼마나 하고 있는지 형광 신호로 잡아내는 센서까지 더해집니다. 그 팔은 밀리미터 단위로 움직이는 삼축 구동 장치에 얹혀 있어서, 어제 찍은 잎과 오늘 찍은 같은 잎을 정확히 같은 위치에서 다시 찍습니다.

어떤 장비는 해가 지면 자체 조명을 켜고 밤에도 사진을 찍는데, 해 각도가 바뀌며 만드는 그림자 잡음을 피하려는 방법입니다.

먼저 계산되는 값은 평면 사진만으로도 구할 수 있습니다. 위에서 내려다본 사진에서 초록색 픽셀이 흙색 픽셀을 얼마나 덮었는지 세면 피복도가 나오고, 그 비율에 잎이 겹친 정도를 곱하면 땅 한 평에 잎이 몇 평어치 깔려 있는지를 가리키는 엽면적지수가 나옵니다.

이 지수가 높을수록 그 벼는 햇빛을 넓게 받아 광합성을 많이 할 수 있습니다. 옛날에는이 값 하나를 구하려고 잎을 하나하나 떼어 스캐너에 올려 면적을 잴고, 그렇게 재고 난벼는 다시 자라지 못했습니다. 사진으로 재면 벼를 꺾지 않고도 같은 값을 다음 날 다시구할 수 있습니다. 다만 평면 사진은 위에서 보이는 앞만 셀 뿐, 그 아래 겹겹이 숨은 앞은세지 못합니다. 그래서 3차원 점구름이 다음 순서로 등장합니다.

카메라와 라이다는 잎과 줄기, 이삭의 표면을 점으로 바꿔 3차원 점구름을 만듭니다. 여러 사진을 잇는 신경방사장과 가우시안 스피래팅도 식물의 입체 구조를 복원하는 데 쓰입니다. 2026년 공개된 프리프린트는 식물 영상 시퀀스 26개에서 재구성 시간을 평균 6.52분에서 1.58초로 줄였다고 보고했습니다. 동료평가를 마친 현장 표준이 아니라 사전 공개 연구의 제한된 시험 결과라는 점은 남겨 두어야 합니다.

포장을 오가는 차량 가운데는 카메라로 작물 줄을 찾고 그 선을 따라 주행하는 장비가 있습니다. 앞서 본 사륜 차량은 옥수수밭 30미터 구간에서 평균 6.2센티미터에서 12.5센티미터의 횡방향 오차를 보였습니다. 이 시험은 작물 줄 추적 성능을 잰 것이며 벼와 잡초를 픽셀로 나누어 칼날로 뽑은 시험이 아닙니다. 눈과 손이 한 로봇에 들어가는 연구는 이어지고 있지만, 주행 정확도만으로 제초 성능과 하루 작업 면적을 대신 말할 수는 없습니다.

점구름에서 어디까지가 줄기이고 어디서 잎이 시작되는지는 신경망이 나눕니다. 2025년 Agriculture의 옥수수 연구에서 분할 정확도는 학습 자료 92.6퍼센트, 시험 자료 86.1퍼센트였습니다. 분리한 점구름으로 계산한 일곱 형질은 사람 측정값과 높은 상관을 보였습니다. 그러나 정확도는 하루에 몇 포기를 처리하는지 말해 주지 않습니다. 수천 포기를 재는 현장 장비가 되려면 촬영과 전송, 점구름 복원에 걸리는 시간까지 다시 재야 합니다.

카메라가 매일 같은 위치에서 같은 논을 찍으면, 사진 한 장이 아니라 날짜별로 이어진 기록이 만들어집니다. 모내기를 마친 어린 모가 뿌리를 내리는 시기, 줄기가 갈라지며 포기가 벌어지는 시기, 이삭이 패는 시기, 낱알이 여우는 시기를 인공신경망이 사진 속 색과 형태 변화만으로 구분해 냅니다. 논에서 실제로 시험한 한 시스템은 방향을 스스로 바꾸는 카메라와 열화상 센서를 붙여 이 흐름을 따라가면서, 잎 색을 분석해 엽록소 농도를 보여 주는 수치와 질소 상태를 보여 주는 지수를 매일 뽑아냈습니다. 이삭이 패기 직전, 그러니까 벼가 마지막으로 거름 기운을 빨아들이는 며칠 사이에 웃거름을 주면 낱알이 옹골지게 여문다는 사실은 오래전부터 알려져 있었습니다. 다만 그 며칠을 정확히 짚어내는 일은 사람 눈으로는 늘 어렵짐작이었습니다. 사진이 매일 쌓이자 그 어렵짐작이 날짜로 바뀌었습니다.

같은 방식으로 낱알이 다 여문 날짜를 미리 알려 주면 콤바인을 부를 날짜도 미리 잡을 수 있습니다.

벼와 옥수수만 이런 카메라를 만나는 것은 아닙니다. 밀 이삭 사진에 초분광 카메라와 인공신경망을 붙이면, 붉은곰팡이병에 걸린 낱알이 이삭 전체에서 차지하는 비율을 사람이 이삭을 하나씩 까 보지 않고도 계산해 냅니다. 감자는 땅속에 있어 카메라가 알을 직접 보지 못하지만, 땅 위로 드러난 잎과 줄기의 부피를 사진으로 재고 그 부피가 불어나는 속도를 추적하면 땅속 감자알이 얼마나 굵어지는지 미리 가늠할 수 있습니다.

다만 이 카메라와 로봇, 레일 장비를 갖추는 값은 만만치 않습니다. 온실 하나에 레일 촬영 장비를 놓으려면 수천만 원이 들고, 3차원 스캐너와 초분광 카메라까지 더하면 그 값은 다시 뛰어오릅니다. 게다가 그렇게 모은 사진과 점구름은 저장 공간을 빠르게 채우므로, 그 사진을 갈무리하고 계산할 서버와 사람까지 함께 갖추어야 합니다. 큰 연구소나 육종 회사는 이 값을 감당하지만, 논 몇 마지기를 부치는 개인 농가는 엄두를 내기 어렵습니다. 나라에서 연구비로 이 값을 메워 시험장에 장비를 넣어 주는 곳도 있지만, 그런 지원이 없는 곳에서는 자본이 있는 종자 회사만 먼저 이 기술에 다가섭니다. 그래서 지금 이 카메라 아래 서는 것은 대부분 신품종을 고르는 육종 시험장이고, 그 결과가 씨앗과 재배법으로 바뀌어 나온 뒤에야 보통 농가에 가닿습니다.

사진 한 장에서 유전자와 환경의 흔적을 함께 읽어 낸다는 말은 이런 뜻입니다. 잎의 초록 빛이 짙은지 옅은지, 잎맥 사이 색이 고르지 얼룩졌는지는 그 품종이 원래 타고난 색과 지난 며칠 그 잎이 겪은 일이 겹쳐서 만든 무늬입니다. 트레이트디스커버는 콩과 옥수수, 벼를 놓고 이 무늬 읽기를 시험했습니다. 그 결과를 담은 2026년 논문을 보면, 이 장비는 가뭄 스트레스를 눈에 보이는 증상이 나타나기 나흘 전에 잡아냈고, 제초제 피해도 사람이 손으로 살피 기록하기 스물네 시간 전에 먼저 짚어 냈습니다. 사람 눈은 잎이 축 처지거나 색이 바래야 이상을 알아채지만, 카메라는 그보다 앞서 바뀌는 반사광의 미세한 변화를 붙잡습니다. 같은 장비는 서로 다른 기후대에 심어 놓은 같은 품종이 그 지역 환경에 얼마나 적응했는지도 사진만으로 비교해 냈습니다.

만 개가 넘는 육종 계통을 나란히 심어 놓고 사진만 찍어도, 어느 계통이 가뭄에 강하고 어느 계통이 병에 약한지 사람 손을 거치지 않고 골라낼 수 있습니다. 예전이라면 이런 골라내기는 몇 해에 걸쳐 손으로 물을 끊고 병을 옮기며 눈으로 지켜봐야 끝나는 일이었습니

다. 그러나 카메라가 늘 옳게 보는 것은 아닙니다. 바람이 불면 잎이 흔들리고, 흔들리는 잎은 방금 찍은 사진과 다음 사진 속에서 다른 위치에 잡힙니다. 여러 각도 사진을 겹쳐 입체 모양을 세우는 계산법은 식물이 가만히 있다는 것을 전제로 하는데, 바람이 그 전제를 깨버립니다. 실내 온실은 그나마 사정이 낫습니다. 문을 닫아 두면 바람이 없고 조명도 일정하기 때문입니다. 문제는 바람이 그대로 부는 논과 밭에서 벌어집니다. 구름이 해를 가리며 지나갈 때마다 그림자 위치가 바뀌는 것도 마찬가지입니다. 조금 전까지 밝던 잎이 갑자기 그늘에 들어가면, 색을 기준으로 잎과 흙을 나누던 프로그램이 그림자를 잎맥 사이

병반으로 잘못 읽기도 합니다. 숙련된 관찰자라면 그들과 병반을 한눈에 갈랐겠지만, 기계는 색과 밝기 수치만 보고 판단하다 종종 헛짚습니다.

앞이 우거진 포장에서는 위쪽 잎이 아래쪽 잎을 가리는 일도 흔합니다. 카메라는 그렇게 가려진 잎자락을 아예 찍지 못하니, 그 잎의 넓이를 실제보다 작게 계산합니다. 한 실험에서는 가려진 잎의 점구름을 그대로 계산했을 때 넓이 오차가 평균 15.88제곱센티미터, 실제 값과 어긋나는 비율이 22.11퍼센트에 달했습니다. 딥러닝으로 가려진 잎 표면의 모양을 미루어 채워 넣는 보정 과정을 거치자 오차는 6.79제곱센티미터, 어긋나는 비율은 8.82퍼센트로 줄었습니다. 그래도 완전히 없어지지는 않았습니다. 온실 안 일정한 조명 아래에서 배운 모델을 구름 낀 날과 맑은 날이 하루에도 몇 번씩 바뀌는 노지에 그대로 옮기면 정확도가 뚝 떨어지는 일도 자주 벌어집니다.

모델이 틀리는 순간과는 다른 문제도 있습니다. 딥러닝 신경망은 잎 사진 한 장을 보고 병들었다고 판정하면서도, 왜 그렇게 판단했는지는 스스로 설명하지 못합니다. 계산 안에서는 수백만 개의 숫자가 뒤섞일 뿐, 사람이 한 줄씩 따라 읽을 수 있는 논리가 아니기 때문입니다. 이런 문제를 풀려고 연구자들은 모델이 사진의 어느 구역을 근거로 삼았는지 붉은 얼룩 지도로 겹쳐 보여 주는 방법을 씁니다. 얼룩이 실제 병반 위에 정확히 겹치면 모델을 믿을 만하지만, 엉뚱한 배경 위에 얼룩이 뜨면 그 판단은 우연히 맞은 것일 뿐입니다. 그래서 육종학자들은 여전히 카메라가 내놓은 숫자를 그대로 받아 적지 않고, 의심스러운 결과 앞에서는 직접 잎을 뒤집어 봅니다. 설명이 붙지 않은 숫자만으로 몇 해를 들인 신품종 계약을 결정할 육종 회사는 없기 때문입니다.

다시 처음 그 논입니다. 쪼그려 앉아 줄자를 쥐던 손은 이제 태블릿을 쥐고 있습니다. 화면에는 레일 카메라가 방금 보낸 사진 위로 숫자가 겹쳐 뜨고, 그 옆에 어제와 그제 잔 값이 작은 그래프로 나란히 그려져 있습니다. 그런데 한 칸에서 키 수치가 갑자기 뚝 떨어져 붉게 표시됩니다. 바람이 불어 잎 하나가 사진 안에서 다른 잎을 가린 순간입니다. 화면 속 숫자를 믿을지, 장화를 신고 그 포기 앞까지 걸어가 다시 눈으로 확인할지는 아직 사람이 정합니다.

## 근거 및 참고문헌

1. Advancing computer vision frontiers for sustainable precision agriculture. (2025). Asian-Australasian Journal of Bioscience and Biotechnology, 10(3). <https://doi.org/10.3329/aajbb.v10i3.83439>
2. Chen, H., Liu, S., Wang, C., Wang, C., Gong, K., Li, Y., & Lan, Y. (2023). Point cloud completion of plant leaves under occlusion conditions based on deep learning. Plant Phenomics, 5, 0117. <https://doi.org/10.34133/plantphenomics.0117>
3. Development and field evaluation of an autonomous four-wheel-drive agricultural vehicle tracking crop rows using computer vision technology. (2026). <https://doi.org/10.56430/japro.1826810>

4. Gupta, S. K., & Agarwal, R. (2025). Comparative analysis of unmanned aerial vehicle and ground-level data using computer vision in agriculture. *Cureus Journal of Computer Science*, 2, es44389. <https://doi.org/10.7759/s44389-025-10304-8>
5. Jia, H., Zhou, W., Zhou, W., Li, Y., Lu, H., & Wu, T. (2026). The turning point of 3D plant phenotyping: 3D foundation models enable minute-to-second cross-crop reconstruction and beyond. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2607.01753>
6. Pasupuleti, M. K. (2026). Vision transformers for crop intelligence and sustainable precision agriculture. *International Journal of Academic and Industrial Research Innovations (IJAIRI) Research Book Series*. <https://doi.org/10.62311/nesx/rb-978-81-685658-6-9>
7. Selvaraj, M. (2025). AI-powered phenomics: Transforming crop science for climate-resilient future [Video]. IPPN (International Plant Phenotyping Network). <https://www.youtube.com/watch?v=eoTvCz3YTzo>
8. Xu, L., Zhang, J., Li, S., Zhu, G., Zhao, H., Yang, J., Li, W., Nie, H., An, W., Yang, B., Hu, W., & Han, Z. (2025). TraitDiscover: An automated high-throughput platform for multimodal plant phenotyping with real-time trait analysis. *Smart Agricultural Technology*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772375525009220>
9. Zhao, Y., Liu, D., Wang, Z., Yao, J., Yu, J., Wang, Z., & Jia, Z. (2025). Automated phenotyping of maize from 3D point clouds using an optimized deep learning approach. *Agriculture*, 15(23), 2430. <https://doi.org/10.3390/agriculture15232430>
10. Zong, Z., Feng, B., Wang, S., Zhang, C., Li, C., & Xu, Y. (2025). Review of Research on Recognition and Monitoring of Plant Growth Phenotype Based on Deep Learning. *INMATEH Agricultural Engineering*, 81-99. <https://doi.org/10.35633/inmateh-77-07>

## 2.3

# 딥러닝 기반 병해충 및 잡초 조기 진단

칠월 논둑에 선 사람이 허리를 굽혀 벼 잎 하나를 손끝으로 꺾습니다. 잎 테두리에 누런 줄무늬가 번지고 있습니다. 물이 모자라서인지, 벌레가 파먹은 자리인지, 곰팡이가 파고 든 것인지 눈으로는 판단이 서지 않습니다. 손에 쥔 휴대폰을 들어 잎사귀를 비추자 화면에 병명과 대처법이 뜹니다.

식량작물을 갇아먹는 병과 벌레, 잡초는 해마다 세계 작물 생산량의 20퍼센트에서 40퍼센트를 앗아갑니다. 유엔 식량농업기구가 제시한 범위입니다. 식물병의 경제 손실은 한 해 2,200억 달러, 침입 곤충의 손실은 700억 달러를 넘습니다. 같은 자료에는 화학적·생물학적 방제를 걷어 내면 손실이 두 배가 된다는 수치가 없습니다. 손실의 크기만으로도 순찰과 조기 진단이 필요한 이유는 충분합니다.

이 틈을 메우려고 나온 기술이 딥러닝(Deep Learning)입니다. 사진 한 장을 넣으면 여러 겹으로 쌓인 인공신경망이 색과 무늬, 잎맥의 결을 스스로 뜯어보고 병명을 내놓습니다. 노란빛이 몇 퍼센트를 넘으면 병이라는 식으로 사람이 미리 정해 준 규칙을 따르는 것이 아닙니다. 병든 잎 수만 장을 보여 주면 무엇을 봐야 하는지를 기계 스스로 찾아냅니다. 벼도열병, 밀 붉은곰팡이병, 감자 역병처럼 이름도 낯선 병들을 실험실 안에서는 98퍼센트가 넘는 정확도로 잡아냅니다. 숫자만 보면 사람 전문가보다 낫습니다.

이 기술 안에는 저마다 다른 일을 맡는 모델이 여러 개 있습니다. 잎 한 장을 통째로 보고 병명 하나를 대는 분류 모델은 레즈넷이나 이피션트넷(EfficientNet) 계열을 씁니다. 논 사진 한 장 안에 흩어진 여러 마리 해충을 낱알이 세고 자리를 짚어 내는 일은 옴로(YOLO) 계열의 탐지 모델이 맡습니다. 잎 표면에서 병든 자리가 몇 퍼센트를 차지하는지, 벼 줄기와 잡초 잎이 픽셀 단위로 어디서 갈리는지까지 그려 내는 일은 유넷(UNet) 계열의 분할 모델이 맡습니다. 같은 딥러닝이라도 묻는 질문이 다르면 쓰는 모델이 달라집니다.

문제는 그 실험실입니다. 딥러닝 모델을 가르치는 데 널리 쓰이는 플랜트빌리지(PlantVillage) 데이터셋은 잎 한 장을 흰 종이나 균일한 배경 위에 올려놓고 정면에서 찍은 사진 5만 4천여 장으로 이루어져 있습니다. 조명은 고르고 그림자는 없으며, 잎 뒤로 잡초나 흙, 다른 잎이 겹쳐 있지 않습니다. 이렇게 배운 모델은 같은 방식으로 찍은 시험 사진에서 99퍼센트를 넘는 점수를 받습니다. 그러나 논과 밭은 흰 종이가 아닙니다.

프런티어스 인 플랜트 사이언스(Frontiers in Plant Science)가 2026년에 실은 논문은 이 낙차를 숫자로 보여 줍니다. 플랜트빌리지로 학습한 레즈넷(ResNet50) 모델은 같은 조건의 시험 사진에서 99.73퍼센트를 맞혔습니다. 그런데 실제 밭에서 찍은 플랜트닥(PlantDoc) 사진에 같은 모델을 그대로 적용하자 정확도가 32.05퍼센트로 주저앉았습니다. 67.7퍼센트포인트가 그 자리에서 사라졌습니다. 이 모델은 오답을 내놓으면서도 평균 79.76퍼센트라는 확신을 유지했습니다. 자신이 틀렸다는 신호조차 주지 않고 자신 있게 오진을 내놓은 것입니다. 연구진이 그라드캠(GradCAM)으로 모델이 사진의 어디를 보고 판단했는지 그려 보니, 플랜트빌리지 사진에서는 병반 한가운데를 향하던 시선이 밭 사진에서는 흙과 잡초, 그림자 쪽으로 흩어져 있었습니다.

색의 짙기, 잎 테두리의 선명도, 잎이 사진에서 차지하는 넓이까지 두 자료는 통계적으로 성질이 달랐습니다.

이 틈을 메우려는 시도도 이어졌습니다. 같은 논문은 확신도를 낮추는 보정 기법을 시도했지만 오진 위험은 여전히 높았고, 두 도메인을 억지로 맞추려 한 적대적 학습은 오히려 정확도를 32퍼센트대에서 25퍼센트대로 떨어뜨렸습니다. 라벨 없는 사진으로 미리 배운 디노브이투(DINOv2) 같은 새 모델을 가져다 써도 정확도는 43.2퍼센트에 그쳤습니다. 연구진은 표준적인 보정과 가벼운 적응 기법으로는 이 간극을 줄일 수는 있어도 없앨 수는 없다고 결론지었습니다. 흰 종이 위 사진만 들여다보며 공부한 학생이 진짜 시험장에서 당황하는 것과 같습니다. 실험실 정확도라는 숫자 하나만 믿고 모델을 논으로 내보내면 안 되는 이유가 여기에 있습니다.

희귀한 병은 사진 자체가 적다는 점도 걸림돌입니다. 어떤 병은 한 지역, 한 계절에만 나타나 사진을 수천 장 모으기 어렵습니다. 그래서 연구자들은 사진을 돌리고 뒤집고 밝기를 바꾸는 손쉬운 방법을 넘어, 생성적 적대 신경망(GAN)과 디퓨전 모델로 진짜 같은 가짜 병반 사진을 만들어 학습 데이터에 섞습니다. 이 방법은 데이터가 적은 병의 인식률을 끌어올리지만, 가짜 사진의 질감이 진짜 병반과 미묘하게 다를 때는 오히려 모델을 더 헛갈리게 만들기도 합니다.

잡초는 어린 작물과 색과 모양이 닮아 구분이 어렵습니다. 초분광 카메라와 딥러닝을 묶어 못자리 단계의 피를 가려내는 연구가 이어졌고, 벼와 여덟 종의 논잡초를 탐지한 개선 RetinaNet 연구는 평균 정밀도 94.1퍼센트와 초당 24.3프레임을 보고했습니다. 이 성적은 고성능 장비에서 얻은 탐지 결과입니다. 라즈베리파이에 올린 가벼운 모델은 속도와 정확도를 다시 재야 논둑에서 쓸 수 있습니다.

한 연구는 SegNet으로 화면을 벼와 배경, 잡초 세 범주로 나눴습니다. 주요 잡초는 벼풀류인 *Sagittaria trifolia*였고, 평균 픽셀 정확도는 92.7퍼센트, 빈도 가중 교집합비율은 84.4퍼센트였습니다. 앞의 숫자는 화면 속 픽셀을 맞힌 비율이고, 뒤의 숫자는 예측한 영

역과 실제 영역이 얼마나 겹쳤는지를 잽니다. 같은 화면을 보더라도 두 지표는 서로 다른 질문에 답합니다.

가뭄으로 시든 잎과 병든 잎을 가르는 문제도 비슷합니다. 물이 모자라 누렇게 뜬 잎과 곰팡이가 갇아먹어 누렇게 뜬 잎은 카메라 앞에서 거의 같은 색을 냅니다. 이때는 영상만으로 판정하지 않습니다. 흙 속 수분 센서와 기온 센서가 보내는 수치를 함께 놓고, 흙에 물이 충분한데도 잎이 노랗게 뜬다면 병으로 판정을 굳힙니다. 영상과 센서 값을 겹쳐야 오진이 줄어듭니다. 여기에 더해 그라드캠 같은 설명 기술로 모델이 잎의 어느 자국을 보고 병이라 판단했는지 화면에 붉게 표시해 보여 주면, 근거를 알 수 없어 못 미더워하던 농민도 그 판단을 눈으로 확인할 수 있습니다.

그라드캠 한 장으로도 부족한 순간이 있습니다. 병해충 이름과 기상 조건, 토양 상태 사이의 인과관계를 딥러닝 혼자 판단하게 두면 이따금 그럴듯하지만 틀린 답, 이른바 환각을 내놓기 때문입니다. 이때는 병해충의 생리와 발병 조건을 미리 정리해 둔 지식 그래프를 함께 씁니다. 비전 모델이 병반을 찾아내면, 지식 그래프가 그 시기 기온과 습도, 최근 강수 기록을 대조해 정말 그 병이 발생할 조건이었는지 되짚어 봅니다. 둘의 판단이 어긋나면 시스템은 확진 대신 재확인을 요청합니다.

한국의 국가농작물병해충관리시스템은 농민이 올린 병든 잎 사진을 바탕으로 병명을 가려내는 영상 진단을 운영하고 있습니다. 농촌진흥청의 2024년 발표에서 평균 정확도는 95퍼센트 이상이었고 사람의 인지 정확도는 95.3퍼센트였습니다. 당시 진단 대상은 31개 작물, 182개 병해충이었습니다. 기상과 재배환경을 함께 읽는 통합 예측은 개발이 이어지는 단계입니다. 사진 한 장의 진단과 계절 전체를 따라가는 예측 사이에는 아직 거리가 있습니다.

이런 시스템이 절실한 곳은 큰 농장만이 아닙니다. 아시아 벼농사는 손바닥만 한 논 여러 개를 이어 붙인 소농이 중심입니다. 전문 병해충 진단원을 부를 여유가 없는 농가일수록, 손안의 휴대폰 하나가 사실상 유일한 상담 창구가 됩니다. 장비 값이 내려가면 작은 논이 먼저 이 기술을 쓰게 됩니다.

작물병 진단의 숫자는 서로 다른 것을 잽니다. accuracy는 전체 정답 비율을, recall은 놓치지 않은 비율을, F1은 정밀도와 재현율의 균형을, mAP는 여러 판정 문턱에서 탐지 성능을 잽니다. 실험실 잎 사진과 드론 영상, 현미경 포자 사진, 모바일 현장 사진의 난이도도 다릅니다. 벼와 옥수수, 감자 모델의 퍼센트를 나란히 놓기 전에 데이터셋과 지표부터 맞춰야 합니다.

논둑의 지능형 포충장치는 등불에 모인 곤충을 촬영하고 인공지능으로 종류와 마리 수를 세는 방향으로 개발되고 있습니다. 농촌진흥청은 나방류와 노린재류 세 종을 대상으로 장치를 적용 중이라고 밝혔습니다. 모든 포충등이 YOLO로 실시간 판정하고 경제적 피해

문턱을 넘을 때 텔레그램과 농가 앱으로 경보를 보낸다고 일반화할 수는 없습니다. 대상 종과 개발 단계, 경보 방식은 장치마다 따로 확인해야 합니다.

병해충 지도와 표적 살포 장비를 연결하면 약제가 필요한 곳에서만 노즐을 열 수 있습니다. 아칸소대학교의 3년 시험에서 See & Spray는 제초제 살포량을 43퍼센트에서 59퍼센트 줄였습니다. 낮은 민감도에서는 Palmer amaranth 개체군이 해마다 280퍼센트 늘어날 위험도 나타났습니다. 2027년형 장비는 앞선 세대보다 거의 네 배 많은 잡초 종류와 지름 4분의 1인치짜리 어린 잡초를 인식하도록 설계됐습니다. 약을 덜 뿌린 만큼 농민 잡초가 씨앗을 남긴다는 점도 함께 봐야 합니다.

약을 아끼는 일은 비용과 환경 부담을 줄일 수 있습니다. 수확을 얼마나 지키는지는 작물과 병, 감염 시점, 약제, 대조구에 따라 달라집니다. 병든 지점을 일찍 찾았어도 약이 듣지 않거나 비가 살포 직후 내리면 손실은 줄지 않습니다. 장비 가격과 배터리, 소프트웨어 갱신 비용도 농가의 선택을 가릅니다. 범용 절감률 하나보다 작물별 포장시험이 필요한 이유입니다.

모델을 더 정확하게 만들려면 더 많은 논 의 사진이 필요합니다. 그런데 개별 농가의 병해충 사진을 전부 외부 서버로 그러모으는 일은 사생활과 보안 문제를 낳습니다. 그래서 사진은 각 농가의 단말기 안에만 두고, 그 안에서 학습한 결과값만 중앙 서버로 보내 합치는 연합학습 방식이 시도되고 있습니다. 다만 농가마다 재배 품종과 기후가 달라 결과값을 합치는 과정에서 정확도가 흔들리는 문제는 아직 풀리는 중입니다.

진단이 빠를수록 지킬 수 있는 수확도 커집니다. 인도 농업연구기관의 2011년 기록은 적기에 propiconazole을 살포해 밀 녹병으로 생길 수 있었던 200만 톤에서 300만 톤의 손실을 피한 것으로 추정했습니다. 이를 방제 지역과 미방제 지역의 실제 수확량 차이로 읽어서는 안 됩니다. 토마토잎말림바이러스 시험에서는 이식 30일 뒤 감염 때 98.43퍼센트, 75일 뒤 감염 때 5.44퍼센트의 손실이 보고됐지만 비반복 포장시험이라는 한계가 있습니다. 시기를 보여 주는 사례로 쓰되 연구 설계를 감추지 않습니다.

해 질 무렵, 처음 그 논둑에 섰던 사람이 휴대폰 화면에 뜬 붉은 표시를 다시 들여다봅니다. 병반은 논 한쪽 귀퉁이, 겨우 몇 포기에 머물러 있습니다. 그는 등에 멘 분무기 대신 그 귀퉁이만 표시된 지도를 손에 들고 그쪽으로 걸어갑니다. 나머지 논은 그대로 초록빛입니다.

## 근거 및 참고문헌

1. Albayrak, A., Kuran, E. C., & Kayaalp, F. (2025). Deep learning approaches in precision agriculture: A comprehensive review of crop classification, disease detection, and weed detection techniques. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 13(4), 1318-1360. <https://doi.org/10.36306/konjes.1583103>

2. 농촌진흥청. (2024). 인공지능 기반 작물 병해충 영상 진단 성과. [https://rda.go.kr/board/boardfarminfo.do?CONTENT1=&dataNo=100000798541&mode=view&prgId=day\\_farmprmninfoEntry](https://rda.go.kr/board/boardfarminfo.do?CONTENT1=&dataNo=100000798541&mode=view&prgId=day_farmprmninfoEntry)
3. Thakur, M., & Soni, B. (2026). Deep learning-based crop disease detection for precision agriculture: A survey. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 14(3), 77562. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2026.77562>
4. Pasupuleti, M. K. (2026). Vision transformers for crop intelligence and sustainable precision agriculture. *International Journal of Academic and Industrial Research Innovations Research Book Series*. <https://doi.org/10.62311/nesx/rb-978-81-685658-6-9>
5. Nezami, M., & Kumar, R. (2026). Multimodal Edge Intelligence for Crop Disease Detection and Irrigation Advisory in Precision Agriculture. *International Journal of Science, Strategic Management and Technology*, 2(5), 1-9. <https://doi.org/10.55041/ijssmt.v2i5.232>
6. Ma, X., Deng, X., Qi, L., Jiang, Y., Li, H., Wang, Y., & Xing, X. (2019). Fully convolutional network for rice seedling and weed image segmentation at the seedling stage in paddy fields. *PLOS ONE*, 14(4), e0215676. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215676>
7. International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. (2025). Pest and disease detection system using machine learning for Myanmar rice crops. <https://doi.org/10.56726/irjmets81664>
8. Asami, H., & Nakamura, T. (2026). Effects of an automatic weed suppression robot for paddy fields in a semi-mountainous area on weed suppression and the growth and yield of paddy rice. *Japanese Journal of Crop Science*, 95(1), 28-35. <https://doi.org/10.1626/jcs.95.28>
9. Xiang, K., Shi, D., & Zhu, X. (2026). Quantifying the reliability gap in cross-domain plant disease classification: Benchmarking the limited efficacy of standard mitigation techniques under controlled-to-field shift. *Frontiers in Plant Science*, 17, Article 1826962. <https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1826962>
10. Lovett, J. (2025). Precision agriculture research measures effectiveness of See & Spray technology. University of Arkansas System Division of Agriculture, Arkansas Agricultural Experiment Station. <https://aaes.uada.edu/news/see-and-spray-research/>
11. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.). Understanding the context. FAO Pest and Pesticide Management. <https://www.fao.org/pest-and-pesticide-management/about/understanding-the-context/en/>
12. 한국IT산업뉴스. (2026). 2026년 5월 사과·선인장·홍콩야자 병해충 상담 잇따라...NCPMS AI 진단으로 즉시 대응 가능. <https://www.koreaiin.com/news/903825>



### 제 3 장

## 생육 예측과 자원 최적화



## 3.1

## 머신러닝·딥러닝 수확량 예측 모델

4월 끝 무렵, 못자리에서 갓 옮겨 심은 모는 논물 위로 겨우 손가락 두 마디만큼 올라와 있습니다. 뿌리도 채 자리를 잡지 못했고 이삭은 구경도 못 한 때입니다. 그런데 같은 시각, 도청 농정과 사무실 모니터에는 그 논이 가을에 벼를 몇 가마니 낼지 숫자가 이미 떠 있습니다. 논은 아직 초록으로 다 덮이지도 않았습니니다.

수확량을 미리 안다는 말은 점을 친다는 뜻이 아닙니다. 한 학생이 매일 몇 시간을 책상 앞에 앉는지, 지난 시험에서 몇 점을 받았는지 알고 있다면 선생님은 다음 시험 점수의 대략적인 범위를 짐작할 수 있습니다. 논도 다르지 않습니다. 그 논이 지난 몇 해 동안 얼마나 거두었는지, 올봄 비가 얼마나 왔는지, 흙 속에 거름기가 얼마나 남았는지를 모아 놓으면 가을에 나올 숫자의 윤곽이 미리 잡힙니다. 이 계산은 사람이 손으로 다 하기에는 너무 벅칩니다. 변수 하나하나는 쉬운 셈이지만, 수십만 개의 논과 밭을 한꺼번에 놓고 보면 사람의 머리로는 감당이 안 됩니다. 그래서 머신러닝(Machine Learning)과 딥러닝(Deep Learning)이 이 계산을 대신 말합니다.

모델이 보는 자료는 날씨와 흙, 위성 사진, 지난 수확 기록입니다. 작물의 열 누적을 재는 유효적산온도(GDD)는 보통 하루 최고기온과 최저기온의 평균에서 작물별 기준온도를 뺀 뒤, 음수는 0으로 처리해 더합니다. 상한온도를 돌지는 모형에 따라 달라집니다. 토양 수분과 양분 분석, 파종·관수·시비 기록도 함께 들어갑니다. 위성의 정규식생지수(NDVI)는 잎의 초록빛과 생육 상태를 간접적으로 보여 주며, 구름이 낀 날에는 레이더 자료가 광학 영상의 빈칸을 메울 수 있습니다.

논문 수백 편을 쌓아 놓고 어떤 자료를 얼마나 많이 썼는지 세어 본 학자들도 있습니다. 그 집계를 보면 기온을 쓴 연구가 88건으로 제일 많았고, 강수량을 쓴 연구가 79건으로 그 뒤를 이었습니다. 토양 종류와 영농 관리 기록, 위성 자료가 그다음이었고, 병해충 발생 기록과 흙 속 영양 수치는 상대적으로 적게 쓰였습니다. 자료를 이것저것 다 집어넣는다고 답이 좋아지지는 않습니다. 오히려 필요 없는 숫자가 섞이면 모델이 엉뚱한 곳에서 규칙을 찾아내는 부작용이 생깁니다. 그래서 연구자들은 수백 개의 후보 변수 가운데 진짜 쓸모 있는 것만 골라내는 작업에 공을 들입니다.

자료를 묶어 답을 내는 방식은 여러 가지입니다. 랜덤 포레스트는 많은 결정나무의 답을 모으고, LSTM은 기온과 비, 식생지수의 시간 흐름을 기억합니다. 기상 기록과 영농 관리, 위성 영상을 함께 읽는 멀티모달 모델도 나왔습니다. 2026년 FARM 연구가 보고한 R<sup>2</sup>

0.8105는 캐나다 카놀라의 군 단위 수확량을 30미터 격자로 보간한 라벨을 대상으로 한 값입니다. 독립된 실제 수확기 계측 자료와 맞춘 시험은 약  $R^2$  0.768이었습니다. 필지에서 직접 잰 수확량을 맞힌 성적보다 한 단계 떨어진 지도 위 평가였습니다.

작물의 생리를 방정식으로 옮긴 APSIM이나 DSSAT와 머신러닝을 섞는 방법도 있습니다. 재배 모델이 계산한 엽면적과 토양 수분, 질소 스트레스를 학습 자료에 보태면 생리 법칙과 관측 자료를 함께 볼 수 있습니다. 결합 모형이 순수 통계 모형보다 나은 성적을 낸 연구가 있지만 개선 폭은 작물과 지역, 기준 모델, 평가 연도에 따라 크게 달랐습니다. 물리 법칙을 보탤다는 사실만으로 언제나 같은 폭의 오차 감소가 보장되지는 않습니다.

예측 성능을 읽을 때는 지표의 방향부터 구분해야 합니다. 결정계수  $R^2$ 는 1에 가까울수록 관측값의 변동을 잘 설명하고, 0이면 평균값만 쓴 예측과 비슷한 수준입니다. RMSE와 MAE는 예측과 관측의 거리를 재므로 작을수록 좋습니다. 중국 벼와 미국 옥수수, 유럽 밀의 점수를 견주려면 같은 지표와 독립 시험 자료를 썼는지 살펴야 합니다. 숫자의 크기보다 어떤 기준으로 잴는지를 먼저 봐야 합니다.

모델이 어떻게 그런 숫자를 냈는지 속을 들여다보기 어렵다는 점도 걸림돌입니다. 방대한 자료를 통째로 삼킨 딥러닝일수록 안이 들여다보이지 않습니다. 농부 입장에서는 근거를 알 수 없는 숫자를 그대로 믿고 그해 시비 계획을 짜기가 꺼려집니다. 이 문제를 풀려고 나온 도구가 SHAP입니다. SHAP는 예측값 하나하나에 대해 어느 변수가 얼마나 기여했는지를 숫자로 나눠 보여 줍니다. 한여름 가뭄이 예상 수확량을 얼마나 끌어내렸는지, 뒤이은 맑은 날씨가 그 손실을 얼마나 만회했는지가 항목별로 펼쳐집니다. 이런 설명이 붙으면 농부도 그 예측을 좀 더 신뢰하게 됩니다.

문제는 논이 한 번도 겪지 못한 여름을 만날 때 생깁니다. 한 지역에서 배운 모델은 휴과 기후, 품종, 농사 방식이 달라진 이웃 지역에서 오차가 커질 수 있습니다. 연구자들은 이를 도메인 이동이라고 부릅니다. 가뭄과 폭염이 겹치는 해처럼 학습 자료에 드문 조건에서는 이 문제가 더 크게 드러납니다. 특정 지역에서 95퍼센트였다는 근거 없는 대표 숫자보다, 학습 지역 밖의 독립 시험 성적을 보여 주는 편이 낫습니다.

관측소가 성긴 곳에서는 모델이 보는 날씨도 성깁니다. 산악 지역의 비와 기온은 가까운 거리에서도 달라지는데, 드문 관측값을 넓은 격자에 퍼면 지역 차이가 지워집니다. 네팔의 평야와 산악지대, 요르단의 건조 농경지를 다룬 연구들은 관측망의 밀도와 자료 품질이 예측의 바닥을 정한다는 점을 보여 줍니다. 기록되지 않은 비와 서리는 모델도 알 수 없습니다.

2026년 *Frontiers in Plant Science*에 실린 AgriFM은 240만 건의 field-season 시계열을 학습했습니다. 과거 자료를 이용한 후향 평가에서 가뭄과 폭염의 복합 스트레스를 위성 자료만 쓴 기준선보다 18일에서 24일 빨리 알렸습니다. 연구진은 실제 농가 효용을 보

이러면 전향 시험이 필요하다고 밝혔습니다. 18일이라는 숫자는 다가올 재해를 현장에서 예고한 상용 서비스의 기록이 아니라, 지나간 사건을 다시 풀어 본 시험의 초기 경보 폭입니다.

이 모든 것이 공짜는 아닙니다. 위성 자료를 받아 오고, 여러 해에 걸친 기상 자료를 사들이고, 모델을 돌릴 서버를 빌리는 데는 다 비용이 듭니다. 수천 헥타르를 짓는 대농장이라면 이 비용을 수확량 증가분으로 쉽게 메우지만, 논 몇 마지기를 짓는 소농에게는 구독료 자체가 부담입니다. 그래서 정부나 협동조합이 나서서 예측 서비스를 대신 사들이고 농가에는 무료로, 또는 아주 싼값에 나눠 주는 방식이 자주 쓰입니다.

그런데도 예측이 맞아떨어지면 얻는 것이 많습니다. 감자를 예로 들면, 캐기도 전에 그해 감자가 얼마나 나올지 미리 알아낸 덕분에 저장 창고 예약과 출하 일정을 캐기 몇 달 전부터 짤 수 있게 되었습니다. 농가로서는 언제 사람을 구하고 언제 트랙터를 부를지 가을이 오기 전부터 계획을 세울 수 있다는 뜻입니다. 밀이나 대두를 짓는 농가라면, 어느 구역이 잘 자라고 어느 구역이 부진할지 미리 알아 그 구역에만 거름을 더 주는 식으로 비용도 줄일 수 있습니다.

식량 안보를 책임지는 사람들에게는 이 숫자가 다른 무게로 다가옵니다. 한 나라 전체의 밀이나 옥수수 수확량이 예년보다 얼마나 모자랄지 여름 안에 짐작할 수 있다면, 가을걷이가 끝나기 전에 어디서 얼마를 사들여야 할지 협상을 시작할 수 있습니다. 반대로 풍작이 예상되는 해라면 굳이 비싼 값에 서둘러 수입할 이유가 없습니다. 이런 판단이 몇 주만 늦어도 국제 곡물 시장에서는 값이 뛰거나 물량을 놓치는 일이 벌어집니다.

한국 농림위성은 2026년 7월 7일 발사돼 첫 교신에 성공했습니다. 해상도 5미터, 관측폭 120킬로미터, 다섯 개 분광 밴드, 약 3일 재방문이라는 제원은 맞습니다. 그러나 위성은 아직 초기 운영과 영상 보정을 거치는 단계이며 정규 임무는 2027년 시작될 예정입니다. 농업 관측과 재해 평가에 연결하려는 계획은 있지만, 보험금 자동 산정과 손해평가 기간이 몇 주에서 며칠로 줄었다는 성과가 이미 나온 것은 아닙니다. 발사 성공과 상용 서비스의 효과를 같은 시제로 적지 않습니다.

시장에서는 숫자가 나오는 순간 가격이 움직입니다. 미국에서는 농무부가 다달이 내놓는 수급 전망치가 발표될 때마다 옥수수와 대두 선물 가격이 출렁입니다. 이 관료들의 손 계산 옆에서는 XGBoost 같은 머신러닝 알고리즘으로 날마다 수확량을 다시 계산해 견주어 보는 자동화 시스템도 시험받고 있습니다. 예측이 하루라도 더 빠르고 정확해지면, 그 정보를 먼저 손에 쥔 쪽이 사고파는 결정에서 앞서 나갑니다.

다시 4월의 못자리입니다. 물 위로 겨우 손가락 두 마디만큼 올라온 그 모가 가을에 정말 몇 가마니로 돌아올지, 아직 그 눈으로 본 사람은 아무도 없습니다. 서버 속의 숫자는 이미 답을 정해 놓았지만, 논에 쪼그려 앉아 흙을 만져 보는 사람은 다른 것을 느끼고 있을

지도 모릅니다. 화면에 뜬 숫자와 그 손끝의 감, 가을이 오면 둘 중 어느 쪽이 맞아떨어질까요.

## 근거 및 참고문헌

1. Chowdhury, P., Maiti, B., Mudi, L. K., & Chatterjee, S. (2026). Artificial intelligence for sustainable agriculture: A review of machine learning and deep learning techniques for crop growth and yield prediction. *International Journal of Applied Resilience and Sustainability*, 2(3), 176-207. <https://doi.org/10.70593/deepsci.0203007>
2. Haikal, M. F., & Furqon, M. A. (2026). Systematic literature review: Machine learning and deep learning approaches for crop yield prediction using remote sensing data. *Media Informatika*, 25(2), 126-137. <https://doi.org/10.37595/mediainfo.v25i2.496>
3. Jagadeesan, J., & Nagarajan, R. (2026). A review of federated machine learning for crop yield prediction: Sustainable integration of IoT and smart agriculture. *Indian Journal of Computer Science and Technology*, 2026(502), 532-543. <https://doi.org/10.59256/indjcst.20260502059>
4. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. (2026). CMAViT: Integrating climate, management, and remote sensing data for crop yield prediction with multimodal vision transformers. <https://doi.org/10.1109/jstars.2026.3669511>
5. Albahli, S., & Shiraz, M. (2026, July). A multimodal geospatial foundation model anticipates crop stress and yield failure across climates and species. *Frontiers in Plant Science*, 17, 1883297. <https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1883297>
6. Nejadshamsi, S., Zhang, Y., Porth, B., Zaki, S., Porth, L., & Khoshdel, V. (2026). FARM: Crop yield prediction via regression on Prithvi's encoder for satellite sensing. *AgriEngineering*, 8(1), 2. <https://doi.org/10.3390/agriengineering8010002>
7. 농림축산식품부. (2026, 7월 5일). 국내 최초 농림위성 시대 개막, 3일 주기 한반도 전역 관측으로 과학농경 전환 시동. 농림축산식품부 보도자료. <https://www.mafra.go.kr/bbs/home/792/578337/artclView.do>
8. 뉴스핌. (2026, 7월 3일). 국내 첫 농림위성 발사...농작물 생육부터 재해까지 3일마다 정밀 관측. <https://www.newspim.com/news/view/20260703000799>

## 3.2

# 정밀 관수 및 변량 시비(VRA) 제어

해가 중천에 걸린 칠월 한낮, 농부가 물꼬 옆 흙을 손가락으로 눌러 봅니다. 물이 들어오는 어귀 쪽 벼 포기는 짙은 초록으로 통통하게 자랐는데, 논 안쪽 귀퉁이 벼 포기는 잎끝이 누렇게 말라 있습니다. 같은 날 심고 같은 비를 맞은 벼인데, 겨우 스무 걸음 사이에서 자란 모습이 다릅니다. 손에 든 휴대폰 화면에는 논을 사각 칸으로 나눈 지도가 떠 있고, 파란 칸은 물이 넉넉한 구역, 붉은 칸은 물이 모자란 구역입니다.

밭 한 뼤기 안에서도 흙의 성질은 자리마다 다릅니다. 어느 구역은 모래가 많아 물이 금세 빠지고, 어느 구역은 진흙이 많아 물을 오래 머금습니다. 경사가 있는 밭이면 위쪽은 마르고 아래쪽은 질척합니다. 흙 속 전기가 얼마나 잘 흐르는지 재는 전기전도도 수치와 산성도를 보여 주는 수소이온농도(pH) 수치, 등고선을 그대로 옮겨 놓은 디지털 표고 지도까지 더하면, 겉보기에는 똑같아 보이던 밭이 실은 여러 개의 작은 밭으로 나뉘어 있었다는 사실이 드러납니다.

옛날 방식은 반 아이 서른 명에게 물통 하나씩 똑같은 크기로 나눠 주는 것과 같았습니다. 목마른 아이도 배부른 아이도 똑같은 양을 받았습니 다. 그 결과 어떤 구역은 비료가 남아 빗물에 씻겨 개울로 흘러가고, 어떤 구역은 비료가 모자라 벼가 여위었습니다. 남은 비료는 흙을 짜게 만드는 염류화로 이어지고, 물에 잠긴 논에서는 온실가스까지 더 뿜어져 나옵니다.

정밀 관수와 변량 시비는 밭의 구역마다 다른 처방을 만드는 기술입니다. 토양 수분은 정 전용량식이나 TDR 센서로 잴 수 있습니다. 전기전도도 센서는 흙에 녹은 이온의 전체적인 상태를 보여 줄 뿐 질소와 인, 칼륨을 각각 재지 않습니다. 이온선택형 센서도 수분과 온도, 다른 이온의 간섭을 보정해야 합니다. 센서 화면의 농도와 작물이 실제로 겪는 영양 결핍은 같은 말이 아닙니다. 현장 센서와 토양 검정, 작물 생육을 함께 봐야 처방이 됩니다.

땅속 센서만으로는 밭 전체를 알 수 없습니다. 드론과 인공위성이 그 빈틈을 메웁니다. 드론 카메라가 찍은 잎 색깔은 식생지수라는 숫자가 되는데, 짙은 초록이 밭을 뺑뺑하게 덮으면 예전 지수(NDVI)는 모두 똑같이 높은 값을 보여 구역 차이를 가려내지 못합니다. 그래서 근적외선과 그보다 살짝 붉은 쪽 파장을 함께 읽는 새 지수(NDRE)로 바꾸면, 질소가 모자란 칸과 남는 칸이 지도 위에 색깔로 나뉩니다. 인공위성 영상으로도 같은 일을 할 수 있습니다. 드론을 띄우고 땅에 센서를 묻을 형편이 안 되는 밭에서는, 위성 사진 몇 장

과 주성분 분석이라는 통계 기법, 그리고 기계학습 알고리즘만으로 토양 수분과 양분이 부족한 구역을 골라내는 방식이 대신 쓰이기도 합니다.

처방 지도의 칸 크기는 센서와 위성, 드론, 농기계의 위치 정확도에 따라 달라집니다. 가로세로 1미터가 모든 포장의 표준은 아닙니다. 지도와 GPS를 연결한 살포기는 구역별로 밸브를 조절할 수 있고, 관수 밸브는 토양 수분과 날씨 예보를 함께 읽습니다. 2025년 할라페노 온실의 8주 시험에서는 강화학습 제어가 관행 시간제어보다 관개량을 36.9퍼센트 줄이면서 토양 수분을 영구위조점 위에 유지했습니다. 이 결과는 한 온실과 한 작물의 시험이며 노지 전체의 자동 관수 성능으로 넓힐 수는 없습니다.

벼농사에서는 논을 계속 잠가 두지 않고 물을 채웠다 빼는 물걸러대기가 쓰입니다. 태국 국가과학기술개발청은 2026년 초음파 수위 센서를 쓴 HandySense를 피침과 람팡, 치앙마이의 논 20곳 넘는 연구 거점에 설치했습니다. 물 15퍼센트에서 30퍼센트, 메탄 30퍼센트에서 50퍼센트 저감은 이 거점 전체에서 이미 확정된 실측 평균이 아니라 기관이 제시한 기대 효과입니다. 자료 수집을 위한 설치와 효과가 검증된 포장시험을 구분해야 합니다.

벼가 물걸러대기를 지켰는지는 레이더 위성과 수위 센서로 살필 수 있습니다. 2026년 연구는 조건에 따라 약 80퍼센트에서 93퍼센트의 판별 정확도를 보고했습니다. 이 결과는 관수 이행을 원격으로 확인하는 연구입니다. 블록체인 장부가 곧바로 농민에게 탄소배출권 수익을 돌려줬다는 현장 성과는 아닙니다. 탄소 시장에 쓰려면 현장 측정과 불확실성 계산, 독립 검증, 거래 규칙이 더 필요합니다.

밭작물에서는 점적 관수와 토양 수분 센서를 묶어 뿌리 주변에 필요한 만큼 물을 보냅니다. 물을 끊어 공급하는 펄스 관수는 토양 조건에 따라 물 이용 효율을 높일 수 있습니다. 드론의 질소 지도와 경사도 자료를 시비 계획에 보태는 연구도 이어집니다. 다중 에이전트와 나이브 베이지 같은 계산법도 시험되고 있지만, 절수와 비료 감소, 수확 증가를 한꺼번에 보였는지는 작물별 포장 자료로 다시 확인해야 합니다.

넓은 밭에서는 중앙 피벗 관수기의 노즐별 유량을 달리하거나 위성으로 질소 처방 지도를 만들 수 있습니다. 영국의 YaraPlus는 2026년 목초지 농가에 무료 질소 변량시비 지도를 제공했습니다. 휴대전화에는 지도가 무료로 뜨지만, 밭에서 비료량을 바꾸려면 그 지도를 읽는 호환 살포기가 필요합니다. 지도가 공짜여도 살포기 값은 농가가 치러야 합니다.

그러나 이 기술에는 그늘도 있습니다. 흙 속에 오래 묻힌 센서는 염분과 화학 반응 탓에 시간이 지날수록 엉뚱한 숫자를 내놓아, 어제는 젖었다던 곳을 오늘은 말랐다고 표시하기도 합니다. 틀린 숫자를 믿고 물을 잘못 댄 농가는 처방 지도를 꺼 버리고 예전 방식으로 되돌아가기도 합니다. 몇 달에 한 번씩 사람이 직접 논밭에 나가 센서 값을 손으로 잰 값

과 맞춰 보는 손질을 해야 하고, 무선 신호가 닿지 않는 산골짜기 밭에서는 애써 심은 센서가 데이터를 한 줄도 보내지 못하고 멈추기도 합니다. 이런 오차를 줄이려고 센서 옆 작은 계산 장치가 수치를 곧바로 걸러 내는 자동 보정 프로그램을 심어 두는 방법도 쓰이지만, 완전히 사람 손을 대신하지는 못합니다.

값은 더 무겁습니다. 변량 시비 노즐 하나, 드론 한 대, 센서 여러 개를 갖추려면 웬만한 소농 한 해 순수익을 넘는 돈이 듭니다. 처음 한 해는 절감 효과를 기대해 장비를 들였다가, 센서 오차와 통신 두절이 겹치는 두 번째 해에 장비를 창고에 넣어 두고 삽과 눈짐작으로 돌아가는 농가도 드물지 않습니다.

장비값만 낮춘다고 보급 문제가 풀리지는 않습니다. 국제식량정책연구소는 교육과 대출, 공급망, 수리 인력의 부족을 소규모 관개 기술의 장벽으로 꼽았습니다. 티그라이는 에티오피아 북부에 있고 Southern Tigray Zone은 그 주의 남부지구입니다. 장비가 고장 났을 때 부품이 닿는 길, 물을 나눌 규칙, 빗을 감당할 소득이 함께 있어야 펌프가 다음 계절에도 돌아갑니다.

기술이 향하는 곳에는 농장을 컴퓨터 안에 본뜬 디지털 트윈이 있습니다. 센서값으로 며칠 뒤 토양 수분을 계산하고 여러 관수 시나리오를 비교하는 시험이 이어집니다. 농경지 전체의 물과 전력 배분에 양자컴퓨팅을 쓰고 절감 기록을 탄소 자산으로 거래한다는 구상은 아직 전망과 연구 제안에 가깝습니다. 현재 농가에서 효과가 확인된 기술과 앞으로 시험하려는 계산 방식을 같은 시제로 놓지 않습니다.

다시 이른 아침 논둑입니다. 휴대폰 화면 속 붉은 칸은 물꼬를 더 열라는 신호이고, 파란 칸은 그대로 두라는 신호입니다. 농부는 화면을 한 번 더 들여다보고 물꼬 걸쇠에 손을 얹습니다. 이 지도를 쓰는 논과 쓰지 못하는 논을 가르는 것은 기술의 성능보다 그 값을 치를 수 있느냐는 형편입니다.

## 근거 및 참고문헌

1. Nezami, M., & Kumar, R. (2026). Multimodal Edge Intelligence for Crop Disease Detection and Irrigation Advisory in Precision Agriculture. *International Journal of Science, Strategic Management and Technology*, 2(5), 1-9. <https://doi.org/10.55041/ijsmst.v2i5.232>
2. Sheetal, V. A., Vikranth, B. M., & Adarsha Sagar, H. V. (2026). AI-driven multi-agent framework for smart irrigation and crop health monitoring in Indian rice and sugarcane farming. *Plant Science Today*, 13(sp2), 1-16. <https://doi.org/10.14719/pst.12797>
3. Hermantoro, Rengga Arnalis Renjani, & Gani Supriyanto. (2026). Artificial intelligence and IoT-based precision irrigation for energy-efficient tropical agriculture. *International Journal of Management and Business Intelligence*, 4(3), 685-698. <https://doi.org/10.59890/ijmbi.v4i3.25>
4. Research Square. (2026). Impact of improved irrigation technology adoption under groundwater irrigation and its impact on smallholder farmers' crop productivity, income, and food security in Southern Tigray Zone, Ethiopia (프리프린트). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-9797920/v1>

5. Agremo, & TerraXploreDrones. (2026). AI crop monitoring & variable rate applications (웨비나 영상). YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=NW9g73zQ4Yo>
  6. Ali, A., Hussain, T., & Zahid, A. (2025). Smart irrigation technologies and prospects for enhancing water use efficiency for sustainable agriculture. *AgriEngineering*, 7(4), 106. <https://www.mdpi.com/2624-7402/7/4/106>
  7. MDPI. (2026). Alternate wetting and drying irrigated rice paddy field water status monitoring with ALOS-2 three components and IoT sensors. *Remote Sensing*, 18(8), 1183. <https://www.mdpi.com/2072-4292/18/8/1183>
  8. MDPI. (2025). Greenhouse irrigation control based on reinforcement learning. *Agronomy*, 15(12), 2781. <https://doi.org/10.3390/agronomy15122781>
  9. National Science and Technology Development Agency. (2026). HandySense alternate wetting and drying (AWD) by NSTDA advances low-carbon rice farming in Thailand. NSTDA News. <https://www.nstda.or.th/en/news/news-years-2026/handysense.html>
  10. Yara UK. (2026). Variable rate nitrogen mapping available free to grassland farmers. Yara UK News. <https://www.yara.co.uk/crop-nutrition/news/news/2026/variable-rate-nitrogen-mapping-available-free-to-grassland-farmers/>
  11. Ringler, C., & Lefore, N. (2026, June 10). Are subsidies the solution for 'costly' small-scale irrigation technologies? International Food Policy Research Institute. <https://www.ifpri.org/blog/are-subsidies-the-solution-for-costly-small-scale-irrigation-technologies/>
- irrigation technologies? International Food Policy Research Institute.  
<https://www.ifpri.org/blog/are-subsidies-the-solution-for-costly-small-scale-irrigation-technologies/>

## 3.3

## 작물 발육 단계(DVS/DVI) 예측 시뮬레이션

유월 어느 아침, 이앙을 막 끝낸 논 옆에서 농부가 휴대폰을 들여다봅니다. 화면에는 짧은 문장 하나가 떠 있습니다. 이 논 벼는 8월 15일 무렵 이삭을 낼 것이라는 예보입니다. 모판에서 옮겨 온 어린 모는 아직 발목 높이도 안 되는데, 손안의 기계는 두 달 뒤의 하루를 벌써 짚어 두었습니다.

그 하루는 혼자 오지 않습니다. 이삭이 패기 스무날쯤 앞서 비료를 한 번 더 주어야 하고, 이삭이 패는 날을 앞뒤로 며칠은 논물을 깊게 채워 냉해와 고온 피해를 막아야 합니다. 이삭이 패고 나면 도열병과 이삭누룩병을 막을 약을 칠 시기가 정해지고, 낱알이 다 여물면 콤바인이 논에 들어갈 날짜와 건조장에 부릴 순서까지 정해집니다. 벼가 이삭을 언제 내밀지 맞히는 일은 그래서 한 해 농사의 달력 전체를 정하는 일입니다.

이 날짜를 맞히는 옛 방법은 온도를 쌓아 세는 것이었습니다. 기온이 어떤 문턱 아래에 머무는 동안에는 벼가 자라는 속도가 거의 붙지 않다가, 문턱을 넘는 만큼만 그날 치 자람이 쌓입니다. 이 문턱을 기저온도라 부르고, 그날 평균기온에서 기저온도를 뺀 값을 매일 저금통에 넣듯 쌓아 가는 계산법을 유효적산온도(GDD)라고 부릅니다. 뺀 값이 0보다 작으면 그날은 그냥 0을 넣고 지나갑니다. 벼는 이 저금통을 하루도 거르지 않고 채우며 자랍니다.

적산온도를 생육 눈금으로 바꾼 값은 모델에 따라 DVS 또는 DVI라 불립니다. 일부 벼 모형은 이앙을 0, 출수를 1, 성숙을 2로 놓습니다. 그러나 0.2를 유묘기, 0.5를 분얼기, 1.5를 등숙기로 고정하는 규칙은 모든 품종과 모형에 공통되지 않습니다. 기준점과 중간 단계는 작물과 품종, 계산식에 따라 보정됩니다. 숫자 하나로 들판을 읽으려면 그 숫자를 만든 모형의 정의부터 밝혀야 합니다.

그런데 벼는 기온에만 반응하지 않습니다. 낮의 길이가 짧아지는 것도 함께 감지합니다. 벼는 밤이 길어져야 잎과 줄기를 키우는 일에서 이삭을 만드는 일로 바꾸는 식물이어서, 한여름 해가 짧아지기 시작하는 신호도 생육 속도에 반영됩니다. 논에 물이 모자라 뿌리가 마르면 생육이 느려지고, 반대로 물 부족을 겪은 벼가 서둘러 이삭을 내미는 일도 일어납니다. 기온과 낮의 길이와 물, 이 세 가지가 그날의 생육 속도를 함께 정합니다.

농부들이 오래 써 온 방법은 손에 익은 달력이었습니다. 이앙하고 며칠 지나면 이삭이 팬다는 경험칙입니다. 그런데 해마다 봄가을 기온이 들쭉날쭉해서, 이 방식으로 잡은 출수일은 실제와 일주일에서 보름 가까이 어긋나는 해가 드물지 않았습니다. 비료를 너무 일

찍 주면 벼가 웃자라 쓰러지고, 너무 늦게 주면 이삭 수가 줄어듭니다. 낱자 하나를 놓친 대가가 논 전체의 수확으로 돌아왔습니다. 다른 계산법이 없던 시절에는 그 오차를 하늘 탓으로 돌리고 다음 해를 기다리는 수밖에 없었습니다.

적산온도 계산법 위에 기계학습이 얹은 것은 크게 두 가지입니다. 하나는 물리 법칙을 담은 모형과 기록에서 규칙을 찾는 모형을 나란히 두는 일입니다. APSIM이나 DSSAT, 일본에서 벼에 맞춰 다듬은 SIMRIW 같은 작물 생육 모형은 온도와 물, 질소가 벼 안에서 어떻게 움직이는지를 방정식으로 풀어냅니다. 룡숏텀메모리(LSTM)나 트랜스포머 같은 인공 신경망은 방정식 대신 수만 개 논 의 지난 기록에서 패턴을 배웁니다. 두 모형을 이어 붙이면, 방정식만으로는 설명이 안 되는 그 논만의 특성을 신경망이 메워 줍니다. 벼가 0에서 2를 향해서만 나아갈 뿐 거꾸로 되돌아가지 않는다는 사실 하나를 규칙으로 못박아 두면, 신경망이 발육 단계를 거꾸로 계산하는 오류도 막을 수 있습니다.

한 들녘 안에도 조생종과 중만생종이 함께 심깁니다. 지역 평균 기온 하나로만 발육지수를 돌리면 먼저 익는 품종과 늦게 익는 품종이 한 계산 속에 뒤섞여 버립니다. 그래서 계산은 품종마다 다른 기저온도와 일장 감응성을 따로 넣어, 옆 논과 나란히 있어도 저마다 다른 곡선을 그리게 합니다.

다른 하나는 하늘에서 찍은 사진으로 계산을 실시간으로 고쳐 나가는 일입니다. 위성과 드론이 논을 찍으면 잎이 얼마나 우거졌는지 보여 주는 엽면적지수 같은 수치가 나옵니다. 이 수치를 계산 속 벼의 상태와 견주어 어긋난 만큼만 밀거나 당기는 방법을 데이터 동화라고 부릅니다. 내비게이션이 실제 위치 신호를 받을 때마다 도착 예정 시각을 다시 알려주는 것과 같습니다. 몇 달 전에 세운 계산이 그대로 맞아떨어질 리 없으니, 논을 찍은 사진 한 장 한 장이 계산을 조금씩 바로잡아 줍니다.

이 보정 작업의 속을 들여다보면 입자 필터라는 방법이 나옵니다. 컴퓨터 안에 똑같은 논을 수백 개 복제해 두고, 저마다 조금씩 다른 가정으로 발육지수를 계산하게 시킵니다. 위성 사진 한 장이 들어오면 그 사진과 가까운 답을 낸 복제본에 더 큰 가중치를 주고, 동떨어진 답을 낸 복제본은 걸러 냅니다. 앙상블 칼만필터라는 방법도 원리는 비슷해서, 관측값과 계산값의 차이만큼만 매번 예측을 조금씩 수정합니다.

한국 첫 농림위성은 2026년 7월 7일 미국 반덴버그 우주군기지에서 발사됐고 첫 교신에 성공했습니다. 해상도 5미터, 관측폭 120킬로미터, 약 3일 주기의 관측 능력을 갖췄습니다. 다만 2026년에는 초기 운영과 영상 보정이 진행되며 정규 임무는 2027년에 시작될 예정입니다. 벼와 콩의 생육 영상이 농가에 이미 사흘마다 내려온다고 현재형으로 적을 단계는 아닙니다.

이런 사흘 간격의 관측을 수천 개 논에 걸쳐 모으면 한 지역, 나아가 한 나라의 벼가 올해 얼마나 견힐지도 미리 그려집니다. 농림축산식품부는 이렇게 모인 발육 정보를 콩이나 배

추 같은 다른 작물의 수급 전망과 함께 살펴, 값이 갑자기 뛰거나 떨어지기 전에 대응할 시간을 벌겠다는 계획을 세우고 있습니다. 한 논이 이삭 패는 날을 맞추는 계산은 그렇게 밭 상 물가를 다루는 계산으로 이어집니다.

계산 결과를 농민의 질문에 맞춰 설명하려는 통로도 준비되고 있습니다. 농촌진흥청은 농업기술 자료와 언어모델을 묶은 AI 에이전트 ‘시이삭’을 개발하고 있습니다. 공식 2026년 업무계획에 적힌 서비스 예정 시점은 2027년입니다. 지금 농가의 휴대전화에서 돌아가는 병해충 영상 진단과, 앞으로 출수일과 개화기를 대화로 설명할 시이삭은 시작 시점이 다릅니다.

이 날짜가 하루 밀리면 실제로 무슨 일이 벌어질까요. 이삭이 패기 20일에서 25일쯤 앞선 시점, 벼 몸속에서 이삭이 갖추어지는 유수형성기에 질소 비료를 주는 기간은 며칠 되지 않습니다. 이 며칠을 놓치고 늦게 주면 줄기만 웃자라 쓰러지기 쉽고, 너무 일찍 주면 이삭에 낱알이 맏히기도 전에 거름 기운이 빠져나가 낱알 수가 줄어듭니다. 발육지수 0.75 라는 숫자 하나가 비료 포대를 언제 열지 정합니다.

물 대는 날도 기간이 좁습니다. 출수기를 앞뒤로 며칠, 논물을 평소보다 깊이 채워야 이삭이 꽃가루를 제대로 만들고 찬 기운과 이상 고온을 견딥니다. 이 물을 하루 늦게 대면 이미 꽃가루가 상한 뒤이고, 하루 일찍 빼면 정작 위험한 날 논이 말라 있습니다. 벼와 콩, 밀을 번갈아 심는 논에서는 앞 작물을 걷어 내는 날과 뒤 작물을 심는 날까지 이 계산 하나에 물려 있어서, 하루의 오차가 다음 작물의 파종 계획까지 밀어 버립니다.

이 알림은 한 논에만 뜨지 않습니다. 같은 저수지 물을 나눠 쓰는 아래쪽 논 수백 필지가 함께 이 계산을 받아 봅니다. 심은 날짜와 논 방향, 흙의 깊이가 필지마다 조금씩 달라서 같은 품종을 심어도 발육지수가 벌어지는 논이 나오고, 수리조합은 그 벌어진 폭만큼 물 대는 순서를 다시 짭니다.

다 여문 뒤의 수확일도 며칠 차이로 품질을 흔듭니다. 콤바인 작업과 건조장 순서를 미리 짜야 하기 때문입니다. 적산온도와 기상 예보는 경험으로 잡은 날짜를 보정하는 데 쓸 수 있습니다. 그러나 오차가 얼마나 줄어드는지는 지역과 품종, 파종일, 평가 연도에 따라 다릅니다. 날짜를 하루 좁힌 일이 수확량 몇 퍼센트로 이어지는지도 태풍과 비, 건조장 대기 시간까지 함께 재야 알 수 있습니다.

이 하루 이틀은 한 논에서 끝나지 않습니다. 콤바인 한 대를 여러 농가가 돌려 쓰는 마을에서는 앞 논 수확일 하나가 어긋나면 그 뒤를 기다리는 다음 논, 또 그다음 논까지 순서가 밀립니다. 발육지수 계산이 여러 논의 예정일을 한꺼번에 나란히 보여 주면서, 마을 전체가 콤바인 순번을 미리 짜 두는 일도 한결 수월해졌습니다.

폭염과 열대야는 생육 달력의 전제를 흔듭니다. 옥수수는 개화기에 고온과 수분 부족이 겹치면 꽃가루와 수정 과정이 손상될 수 있습니다. 극한고온 연구에서는 밀과 옥수수의

열 스트레스 지표로 32도 초과 KDD를 사용했습니다. 밀의 한파 피해도 품종과 생육 단계, 노출 온도와 시간을 함께 봐야 합니다. 달력의 날짜가 맞아도 그날의 날씨가 과거 범위를 벗어나면 낱알은 비어 버릴 수 있습니다.

벌레와 곰팡이의 발육도 같은 방식으로 계산됩니다. 옥수수 잎을 갇아 먹는 열대거세미나방은 기온이 오르면 애벌레에서 나방으로 자라는 속도가 빨라지고, 이 속도 역시 적산온도로 계산할 수 있습니다. 문제는 이 벌레가 자라는 속도와 옥수수가 자라는 속도가 같은 여름 안에서 서로 다르게 움직인다는 점입니다. 어느 해는 벌레가 예년보다 보름 먼저 날개를 달아, 작물이 제일 어린 발육 단계에 있을 때 하필 그 벌레 떼와 마주칩니다. 그래서 최근 병해충 예측 모형은 작물의 발육지수와 해충의 발육 속도를 나란히 놓고, 둘이 겹치는 위험한 며칠을 미리 짚어 내는 방향으로 나아가고 있습니다.

2025년 국제학술지 어스퓨처에 실린 연구진의 분석을 보면, 미국의 밀과 옥수수는 가뭄과 폭염이 겹칠 때 수확량과 실제로 거둘 수 있는 낱알 비율, 이른바 수확 가능 분율이 함께 떨어지되 그 폭은 작물이 어느 발육 단계에 있었는지에 따라 달랐습니다. 개화기 전후에 폭염을 맞은 밭과 그보다 이른 시기에 폭염을 맞은 밭은 같은 더위를 겪고도 입은 손해가 서로 달랐다는 뜻입니다. 원예작물의 적산온도 모형을 모아 정리한 2025년 국제 학술지 리뷰 논문 역시, 기존 공식은 기온이 문턱을 넘은 만큼 더하기만 할 뿐 지나치게 뜨거운 날 오히려 자람이 멎는다는 사정을 계산에 넣지 않았다고 지적합니다. 그래서 최근 모형들은 너무 뜨거운 날의 열을 따로 떼어 벌점처럼 매기는 식으로 계산법을 고쳐 쓰고 있습니다.

발육지수 계산은 올여름 하루만 겨냥하지 않습니다. 기후변화에 관한 정부간협의체(IPCC)가 내놓은 여러 미래 기후 시나리오를 같은 계산식에 밀어 넣으면, 서른 해 뒤 이 논의 출수일이 지금보다 얼마나 앞당겨질지도 미리 그려집니다. 온실가스를 지금처럼 계속 뿜는 시나리오를 넣으면 벼가 이삭을 패는 날이 해마다 조금씩 당겨지는 곡선이 나오고, 배출을 크게 줄이는 시나리오를 넣으면 그 곡선은 훨씬 완만해집니다.

계산이 촘촘해진 만큼 남는 문제도 있습니다. 벼든 밀이든 품종마다 기저온도와 낮 길이에 반응하는 정도가 달라서, 새 품종이 나올 때마다 온도와 빛을 인공으로 조절하는 실험실에서 몇 달씩 키워 봐야 그 품종 고유의 숫자를 얻을 수 있습니다. 이 실험실을 인공기상실이라 부릅니다. 온도와 햇빛 길이를 마음대로 돌려 가며 못자리부터 이삭 패는 날까지 벼가 자라는 과정을 통째로 앞당겨 들여다보는 곳입니다. 그런데 신품종은 해마다 수십 종씩 쏟아지고, 인공기상실 한 칸에서 그 많은 품종을 다 키워 볼 시간은 없습니다. 그래서 아직 실험을 마치지 못한 품종은 겉모습이 비슷한 기존 품종의 숫자를 빌려 계산에 넣는데, 두 품종의 기저온도가 실제로는 반 도쯤 어긋나 있으면 그 반 도가 한여름을 지나며 며칠의 오차로 불어납니다.

최근에는 카메라로 어린 모 수백 포기를 한꺼번에 찍어 자라는 속도를 읽어 내는 초고속 표현형 기술과, 그 속도를 거꾸로 계산해 기저온도를 추정하는 역산 방식을 묶어 실험실에 머무는 기간을 줄이려는 시도도 나오고 있습니다. 기상 관측소가 없는 산골 논은 이웃 관측소 값을 거리와 고도로 어림해 채워 넣을 뿐이어서, 계산이 아무리 정교해도 그 논만의 오차는 남습니다.

어떤 농부는 발육지수가 일러 준 날짜와 자신이 오래 눈대중으로 맞혀 온 날짜가 하루 이상 어긋나면 계산 쪽을 의심합니다. 실제로 드문 경우이지만 모델이 유난히 마른 봄이나 때늦은 서리를 만나 며칠을 놓친 적도 있어서, 그 의심이 완전히 근거 없다고 하기도 어렵습니다. 휴대폰 알림과 센서 값을 새로 익혀야 하는 번거로움과 초기 장비 비용을 이유로, 몇 해 쓰다가 다시 예전 달력으로 돌아간 농가도 있습니다.

디지털 트윈은 논과 과수원을 컴퓨터 안에 본떠 여러 날씨와 관수 시나리오를 먼저 돌려 보는 방향으로 개발되고 있습니다. 2026년 칠레 포도원과 여러 작물 연구에서 자료를 쌓는 시험이 진행됐지만, 실제 관개량 절감과 자율 비료 투입 효과가 이미 입증된 상용 체계라고 부를 단계는 아닙니다. 발육지수가 어느 값에 닿으면 인공지능이 드론을 띄운다는 장면도 현재 성과가 아니라 앞으로의 자동화 시나리오로 남겨 두어야 합니다.

다시 유월 그 논입니다. 휴대폰 화면 속 8월 15일이라는 숫자는 그동안 쌓인 적산온도와 사흘마다 도착하는 위성 사진, 지난 몇 해의 날씨가 함께 만든 하루입니다. 오랫동안 이 논을 드나든 사람은 이제 그 숫자 위에 자신의 어림짐작을 포갭니다. 그 하루가 실제로 맞아떨어질지, 아니면 유월 말에 닥칠 폭염 하나가 이 계산을 통째로 흔들어 놓을지는 아직 아무도 모릅니다.

## 근거 및 참고문헌

1. Xiao, K., Zhou, X., Gui, H., Tian, Y., Chen, X., Li, Y., Matomela, N., & Xin, Q. (2025). Drought and extreme heat reduce wheat and maize production in the United States by lowering both crop yields and harvestable fraction. *Earth's Future*, 13(12), e2024EF005557. <https://doi.org/10.1029/2024EF005557>
2. Chowdhury, P., Maiti, B., Mudi, L. K., & Chatterjee, S. (2026). Artificial intelligence for sustainable agriculture: A review of machine learning and deep learning techniques for crop growth and yield prediction. *International Journal of Applied Resilience and Sustainability*, 2(3), 176-207. <https://doi.org/10.70593/deepsci.0203007>
3. Patil, N., Raut, K., Bhusari, S., & Gharge, A. (2025). Digital twin integration with generative AI and foundation models for real-time precision agriculture and crop resilience. *International Journal of Research in Agronomy*, 8(12S), 170-177. <https://doi.org/10.33545/2618060x.2025.v8.i12sc.4355>
4. Kamangir, H., Sams, B. S., Dokoozlian, N., Sanchez, L., & Earles, J. M. (2026). CMAViT: Integrating climate, management, and remote sensing data for crop yield prediction with multimodal vision transformers. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 19, 8932-8945. <https://doi.org/10.1109/jstars.2026.3669511>

5. Kollipara, Y. V. P., & El-Gayar, O. (2026). AI-driven crop yield prediction for climate-resilient agriculture. Conference Proceedings of the International Conference on Agriculture, Food Security and Safety, 94-106. <https://doi.org/10.32789/agrofood.2025.5107>
6. Makouate, H. F., & Zude-Sasse, M. (2025). Advances in Growing Degree Days Models for Flowering to Harvest: Optimizing Crop Management with Methods of Precision Horticulture, a Review. *Horticulturae*, 11(12), 1415. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11121415>
7. Kalisetti, V. S., Sudharshanam, U., Venkata, N. K. M., Mandla, R., Akula, S., Bedika, M., Dharavath, B., Dogga, S., Ramakrishna Babu, A., & Javaji, C. (2025). Smart agriculture: A climate-driven approach to modelling and forecasting fall armyworm populations in maize using machine learning algorithms. *Frontiers in Plant Science*, 16, Article 1636412. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1636412>
8. 농림축산식품부. (2026). 국내 최초 농림위성 시대 개막, 3일 주기 한반도 전역 관측으로 과학농경 전환 시동. 농림축산식품부 농산업혁신정책관 과학기술정책과 보도자료(2026. 7. 5.). <https://www.mafra.go.kr/bbs/home/792/578337/artclView.do>
9. 농민신문. (2025, November 19). 농진청 'AI 이삭이' 농업기술정보 서비스로 확대 나서. <https://www.nongmin.com/article/20251119500634>
10. FreshFruitPortal. (2026, June 17). Innovative digital twin model targets growers' real-world irrigation and traceability needs in 2026. <https://www.freshfruitportal.com/news/2026/06/17/twin-model/>



## 제 4 장

# 유전체학과 AI 분자육종



## 4.1

# 작물 유전체 빅데이터 및 팬유전체 (Pan-genome) 구축

유전자원센터의 저온 저장고는 섭씨 4도 안팎으로 유지됩니다. 나란히 늘어선 서랍마다 종이봉투가 빼곡하고, 봉투마다 손 글씨나 바코드로 이름표가 붙어 있습니다. 어떤 것은 전라도 어느 들녘에서 백 년 가까이 대물림된 재래벼이고, 어떤 것은 히말라야 기슭 습지에서 채집된 야생벼입니다. 겉모습은 시장에서 파는 쌀과 크게 다르지 않지만, 그 안에 담긴 유전자는 완전히 다릅니다.

지금까지 벼 유전체를 들여다보는 표준 방법은 이 많은 봉투 가운데 품종 하나만 골라 완벽하게 해독한 뒤, 나머지 모든 벼를 그 하나에 겹쳐 읽는 것이었습니다. 국제 벼 유전체 프로젝트가 처음 표준으로 삼은 품종은 일본 자포니카 벼 님폰바레였습니다. 이후 수십 년 동안 전 세계 벼 연구는 이 한 품종의 유전자 배열을 사전처럼 펼쳐 놓고, 다른 품종의 서열을 그 사전 쪽수에 맞춰 끼워 넣는 방식으로 진행되었습니다.

사전 한 권으로 세상의 모든 말을 정리하려는 시도와 같습니다. 표준어 사전에 없는 사투리를 만나면 그 낱말을 실어 줄 쪽이 없습니다. 야생벼나 재래벼에만 있는 유전자, 다른 벼에는 아예 없는 서열을 표준 유전체에 끼워 맞추려 하면 그 서열은 통째로 빠지거나 엉뚱한 위치에 잘못 붙습니다. 유전학자들은 이 현상을 참조 편향이라 부릅니다. 표준으로 삼은 품종이 가진 유전자만 보이고, 그 품종에 없는 유전자는 처음부터 없는 것처럼 취급됩니다. 그렇게 사라지는 유전자 쪽이 가뭄과 병충해를 이겨 온 진짜 보물인 경우가 많습니다.

이 사각지대를 없애려면 여러 판본을 한 책상 위에 모두 펼쳐 놓아야 합니다. 벼든 밀이든 콩이든, 수백에서 수천 품종의 유전체를 나란히 늘어놓고 겹쳐 그리면 두 개의 층이 드러납니다. 모든 품종이 공통으로 지닌 유전자층을 핵심 유전체라 부릅니다. 특정 품종이나 재래종, 야생종에만 있는 유전자층은 가변 유전체라 부릅니다. 가변 유전체에는 가뭄을 견디는 힘, 염분 많은 땅에서도 뿌리내리는 힘, 낫선 병균을 알아보는 면역력처럼 표준 품종에는 없던 능력이 숨어 있습니다. 이 두 층을 합쳐 그린 지도를 팬유전체라 부릅니다.

국제 벼 연구진은 전 세계에서 모은 3천여 벼 계통을 재해독해 2014년 3천 벼 유전체 프로젝트의 자료를 공개했습니다. 이 자료는 수백만 개 변이를 비교하며 인디카와 자포니카, 지역 품종 사이의 유전적 차이를 읽는 토대가 됐습니다. 그린슈퍼라이스 구상을 제시한 PNAS 논문은 그보다 앞선 2007년에 나왔습니다. 3천 벼 유전체 자료에서 2007년 논문

이 나왔다는 시간 순서는 성립하지 않습니다. 그린슈퍼라이스 연구의 계보와 3천 벼 유전체 프로젝트의 성과를 나란히 놓되, 앞선 연구를 뒤의 데이터가 낳은 것처럼 잇지는 않습니다.

벼농사의 역사를 바꾼 유전자들은 발견 경로가 서로 다릅니다. SD1은 녹색혁명을 이끈 왜성 유전자로 오래전 규명됐고, SH1 계열은 여러 아시아 벼에 존재하며 낱알이 떨어지는 성질과 관련됩니다. Xa21은 야생벼에서 발견된 흰잎마름병 저항성 유전자입니다. 세 유전자를 모두 표준 유전체 하나만 보았다면 존재조차 몰랐을 유전자로 묶을 수는 없습니다. 팬유전체의 힘은 유전자의 존재 여부만이 아니라 구조변이와 존재·부재 변이, 품종별 대립유전자와 조절 영역을 함께 보여 주는 데 있습니다.

팬유전체는 여러 품종의 공통 서열과 갈라지는 서열을 하나의 그래프로 엮습니다. 한 글자 차이부터 뒤집힘과 중복, 큰 삽입과 삭제까지 같은 지도에 올릴 수 있습니다. PacBio HiFi와 옥스퍼드 나노포어 같은 장독립 읽기는 염색체급 조립의 품질을 높입니다. 그러나 그래프 팬유전체를 만들려면 모든 품종의 서열이 텔로미어부터 텔로미어까지 완성돼야 한다는 뜻은 아닙니다. 대표 계통의 높은 품질 조립과 많은 계통의 재서열 자료를 함께 쓰는 설계도 널리 쓰입니다.

2026년 Nature Genetics에 발표된 녹두 그래프 팬유전체 연구는 대표 11계통을 새로 조립하고 580계통을 재서열·집단유전·연관분석 패널로 썼습니다. 연구진은 7만 5,268개 유전자군과 6만 6,862개 구조변이를 정리하고, 다섯 지역의 재배 시험을 통해 스무 가지 형질과 연결되는 후보 구간을 살폈습니다. 580개 유전체를 모두 새로 조립한 연구는 아닙니다. 조립 표본과 집단 분석 표본을 갈라 적어야 지도의 밀도와 근거가 보입니다.

팬유전체는 여기서 멈추지 않습니다. 재배하는 품종과 그 지역 재래종을 넘어, 아예 교배조차 되지 않는 먼 친척뻘 야생종까지 한곳에 모아 비교하는 시도를 슈퍼 팬유전체라 부릅니다. 벼속에는 아시아에서 기르는 벼 말고도 아프리카에서 오래전부터 길러 온 벼가 따로 있고, 둘 다와 교배되지 않는 진짜 야생 근연종도 여럿입니다. 이런 먼 친척의 유전체까지 지도에 얹으면, 재배종에서는 이미 사라진 지 오래된 방어 유전자나 뿌리 구조가 다시 눈에 들어옵니다.

밀은 서로 다른 조상 유전체가 합쳐진 6배체 작물이라 조립이 어렵습니다. 2024년 Nature 연구는 중국 품종 17개를 분석해 24만 9,976개 구조변이를 정리했습니다. 이 지도에서는 VRN-A1과 춘·추파성, 1RS 관련 변이가 드러났습니다. 세계 각지의 모든 밀을 포개 지도는 아니었지만, 한 나라 안의 품종만으로도 구조변이가 얼마나 넓은지 보여 주었습니다.

대두 팬유전체 연구도 표본의 역할을 나눴습니다. 재배 대두와 야생 대두 2,898계통을 깊게 재서열하고, 그 가운데 대표 26계통을 조립했습니다. 이를 2,800여 유전체를 모두

새로 조립한 지도라고 부를 수는 없습니다. 야생 대두의 물 흡수와 휴면 조절 유전자, 가뭄·병 저항성과 단백질 함량을 한 연구의 후속 성과처럼 잇기보다, 각 형질을 확인한 원본문을 따로 제시해야 합니다.

옥수수는 변화가 더 큽니다. 오늘날 옥수수의 야생 조상은 테오신테라는, 낱알 몇 톨만 앙상하게 매달린 잡초에 가까운 풀입니다. 테오신테와 현대 옥수수의 유전체를 나란히 겹쳐 그리자, 낱알 몇 개만 달리던 여윈 이삭이 오늘날처럼 알이 뽕뽕하게 들어찬 굵은 이삭으로 바뀌는 과정을 가르는 유전자 몇 개가 드러났습니다. 사람이 수천 년에 걸쳐 밭에서 손으로 골라 온 선택의 흔적이 이제는 컴퓨터 화면 위에 유전자 좌표로 찍힙니다.

문제는 이렇게 쌓인 지도를 사람이 눈으로 읽어 내기에는 정보량이 너무 크다는 데 있습니다. 벼 한 포기 유전체만 해도 4억 자가 넘는 글자가 끊이지 않고 이어집니다. A, T, G, C, 네 글자가 전부이지만 그 배열 가운데 어디가 병에 걸리는 원인이고 어디가 가뭄을 버티는 힘인지는 글자 모양만 봐서는 알 수 없습니다. 인공지능이 이 문제를 맡습니다. 사람이 쓴 문장을 읽고 다음 낱말을 예측하도록 훈련한 언어모델과 원리가 같은 프로그램을, 문장 대신 유전자 서열에 적용하는 것입니다. 연구자들은 이런 프로그램을 디엔에이(DNA) 언어모델 또는 유전체 파운데이션 모델이라 부릅니다. 수백 종의 식물 유전체를 미리 읽혀 두면, 모델은 한 번도 본 적 없는 서열을 만나도 앞뒤 문맥만으로 그것이 유전자의 시작 신호인지, 어떤 단백질을 만드는 설계도인지, 얼마나 강하게 발현될 부위인지를 짐작합니다.

2026년에 나온 한 종합 논평은 이런 유전체 파운데이션 모델이 식물의 조절 문법을 해독하는 단계까지 왔다고 정리했습니다.

유전체 선발은 씨앗의 유전자 표지와 여러 해의 수확량, 병 저항성 기록을 엮어 아직 다 자라지 않은 개체의 성적을 예측합니다. 세대마다 모든 계통을 끝까지 키우지 않아도 되므로 초기 선발의 시간을 줄일 수 있습니다. 그러나 교배계통을 가리는 기간과 세대를 고정하는 기간, 여러 지역의 적응시험, 품종 등록은 서로 다른 시간표입니다. 컴퓨터가 봄의 후보를 빨리 고르더라도 새 씨앗이 농가의 가을 창고에 들어가기까지는 여러 계절이 더 흐릅니다.

그러나 지도가 촘촘해진다고 곧바로 좋은 품종이 나오지는 않습니다. 한국농업기술진흥원은 농림축산식품부 지원을 받아 고추와 벼를 비롯한 열두 개 작물의 유전체 정보와 분자표지 사천여 개를 모아 디지털육종 정보시스템을 열었습니다. 클라우드에 접속하면 누구나 이 자료를 내려받을 수 있습니다. 문제는 그다음입니다. 2025년에 나온 한 국제 종합 논평은 유전자형 자료가 아무리 쌓여도, 실제 밭에서 수확량이나 내병성 같은 형질을 확인하는 표현형 자료가 함께 없으면 예측 모델은 쓸모를 잃는다고 지적했습니다. 표현형 자료를 여러 해, 여러 지역에서 믿을 수 있게 모으는 비용은 유전체를 해독하는 비용보다

오히려 큼니다. 어느 밭에서는 잘 자라던 계통이 다른 지역, 다른 해에는 맥을 못 추는 일도 흔합니다.

게다가 수확량처럼 농부가 애타게 기다리는 형질일수록 유전자 하나가 아니라 수십, 수백 개의 유전자가 조금씩 나눠 맡고, 그 조합은 토양과 날씨에 따라 다르게 반응합니다.

팬유전체가 후보 유전자를 가리킨 뒤에는 교배와 유전자편집이 이어집니다. 크리스퍼는 표적 서열을 끊거나 몇 글자를 바꾸는 데 강하지만, 야생종의 긴 유전자와 조절 구간을 재배종의 원하는 자리에 곧바로 넣는 표적 삽입은 효율이 낮고 재분화와 검증 부담도 큼니다. 교배보다 언제나 빠르고 쉬운 길은 아닙니다. 편집한 유전자 하나가 수확량과 품질, 다른 저항성에 미치는 영향은 여러 환경에서 다시 확인해야 합니다.

유전 자료와 특허가 몇몇 기업에 모이는 문제는 실제로 존재합니다. 다만 USDA가 집계한 71퍼센트는 세계 유전 자원 특허 전체가 아닙니다. 1976년부터 2021년까지 미국에서 등록된 신품종 실용특허 가운데 Bayer와 Corteva, Syngenta 세 회사가 차지한 비중입니다. 방법과 GM 형질, 유전자서열 특허는 이 집계에서 빠졌습니다. 몬산토는 2018년 Bayer에 인수됐습니다. 특허 집중을 말하려면 국가와 기간, 특허 범주, 기업 관계를 함께 적어야 합니다.

다시 그 저온 저장고입니다. 서랍 속 봉투 하나하나를 여전히 사람 손으로 채집하고 사람 손으로 심어 확인해야 하는 유전 자원입니다. 화면 속 팬유전체 지도가 아무리 정교해져도, 그 지도가 가리키는 유전자가 실제 논에서 쌀알을 얼마나 채우는지는 한 계절을 기다려야 압니다. 저 서랍 속 봉투 몇만 개 가운데, 아직 이름조차 붙지 못한 유전자는 몇 개나 될까요.

## 근거 및 참고문헌

1. Farooq, M. A., Gao, S., Hassan, M. A., et al. (2024). Artificial intelligence in plant breeding. *Trends in Genetics*, 40(10), 891-908. [https://www.cell.com/trends/genetics/fulltext/S0168-9525\(24\)00167-7](https://www.cell.com/trends/genetics/fulltext/S0168-9525(24)00167-7)
2. Jiao, C., Xie, X., Hao, C., et al. (2025). Pan-genome bridges wheat structural variations with habitat and breeding. *Nature*, 637(8045), 384-393. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08277-0>
3. Shang, L., Li, X., He, H., et al. (2022). A super pan-genomic landscape of rice. *Cell Research*, 32(10), 878-896. <https://doi.org/10.1038/s41422-022-00685-z>
4. Chen, H., et al. (2026). Graph-based pan-genome reveals structural variations associated with agronomic traits in mung bean. *Nature Genetics*. <https://doi.org/10.1038/s41588-026-02644-5>
5. Zhu, W., Li, W., Zhang, H., & Li, L. (2025). Big data and artificial intelligence-aided crop breeding: Progress and prospects. *Journal of Integrative Plant Biology*, 67(3), 722-739. <https://doi.org/10.1111/jipb.13791>
6. Fu, J., Zheng, S., Fan, L., Zheng, X., & Qian, Q. (2025). Breeding 5.0: Artificial intelligence (AI)-decoded germplasm for accelerated crop innovation. *Journal of Integrative Plant Biology*. <https://doi.org/10.1111/jipb.70008>
7. Yu, H. (2026). AI foundation models in plant biology. *New Phytologist*. <https://doi.org/10.1111/nph.71395>

8. Nasir, S., Khan, L., Murtaza, A., Raza, A., Nasir, F., & Azam, U. (2026). Bridging traditional plant breeding with precision agriculture: A path to smarter crop improvement. In *Explicable Agriculture: Microbial Ecology, Bio-Innovations and Crop Production* (pp. 194-201). Unique Scientific Publishers.  
<https://doi.org/10.47278/book.tl/2026.383>
9. World Agriculture Forum. (2026). WAF Interactive Webinar on Biotechnology and AI Contributions to Plant Breeding [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=xkVT9D7Nqy0>
10. Prasanna, B. M. (2026). Predictive Breeding: Bridging Genetics, Artificial Intelligence and Agriculture [Video]. SHARE GENES. <https://www.youtube.com/watch?v=FWcxeEC90JA>
11. 머니투데이. (2025, 5월 16일). 작물 유전체 정보·분자마커 4000여개... 'K-디지털육종' 시작됐다.  
<https://www.mt.co.kr/economy/2025/05/16/2025051613191936623>

## 4.2

# 유전자 편집(CRISPR) 및 정밀 육종

농촌진흥청 국립농업과학원 유전자공학과와 온실에는 화분마다 작은 이름표가 꽂혀 있습니다. 2024년 OsNAC 편집 벼 연구를 수행한 기관은 국립식량과학원이 아니라 국립농업과학원입니다. 잎 하나를 잘라 유전자를 읽으면 원래 품종과 거의 같지만 미리 정한 자리의 염기가 달라진 벼를 찾을 수 있습니다. 크리스퍼는 이처럼 특정 표적을 정해 유전자를 끊거나 바꾸는 도구입니다.

식물의 유전자는 A, T, G, C 네 글자가 길게 이어진 서열입니다. 가이드 RNA는 약 스무 글자의 표적 서열을 안내하고 Cas9은 옆의 PAM 서열을 확인한 뒤 절단합니다. 정확하게 한 자리만 잘린다고 생각하기 쉽지만 그렇지 않습니다. 불일치의 위치와 개수, 주변 서열에 따라 부분적으로 닮은 다른 자리도 잘릴 수 있습니다. 이를 오프타겟이라고 부릅니다. 가이드 설계와 전장유전체 검증이 필요한 이유가 여기에 있습니다.

가위질 뒤 세포는 끊어진 DNA를 스스로 잇습니다. 주형 없이 이어 붙이면 글자 몇 개가 빠지거나 더해져 유전자가 꺼질 수 있습니다. 원하는 DNA 주형을 함께 넣어 정확히 고치는 상동성 기반 수선도 가능하지만 식물에서는 효율이 낮고 작물과 조직에 따른 편차가 큼니다. 염기편집은 특정 글자를 바꾸고 프라임편집은 더 넓은 종류의 작은 교정을 노립니다. 설계도를 주면 정확한 글자로 메운다는 설명만으로는 성공률과 실패 유형이 가려집니다.

편집 도구는 아그로박테리움이나 유전자총, 원형질체의 RNP 전달로 세포 안에 들어갑니다. 단백질과 가이드 RNA를 묶은 RNP 방식은 외래 DNA가 삽입되지 않은 편집체를 만들 수 있다는 장점이 있습니다. 그렇다고 분자 검증을 하기 전에 외래 유전자가 전혀 남지 않는다고 단정할 수는 없습니다. 전달체와 재분화 과정에서 생긴 예기치 않은 변이도 살펴야 합니다. 나노전달체는 여러 작물에서 시험 중인 연구 단계의 방법입니다.

문제는 벼의 서열이 너무 길다는 데 있습니다. 벼 유전자는 글자 수가 4억 개에 이르고, 그 안에는 연구자가 고른 스무 글자짜리 표적과 거의 똑같이 생긴 구간이 곳곳에 숨어 있습니다. 가이드 RNA가 진짜 표적 대신 이 비슷한 구간에 달라붙어 엉뚱한 곳을 잘라 버리면, 계획에 없던 유전자가 고장 나거나 예상 밖 형질이 나올 수 있습니다. 사람이 눈으로 4억 글자를 훑어 비슷한 구간을 다 찾아내는 일은 처음부터 불가능합니다. 그래서 이 일을 인공지능이 맡습니다.

밀은 사정이 한층 더 까다롭습니다. 밀 유전체는 조상이 다른 세 벌의 게놈이 한 몸에 겹쳐 들어간 육배체입니다. 흰가루병에 걸리게 만드는 유전자도 이 세 벌 모두에 거의 같은 모습으로 박혀 있어서, 교배 육종으로는 한 벌만 골라 놓을 방법이 없었습니다. 그 유전자의 이름은 TaMLO이고, 세 벌의 게놈마다 TaMLO-A1, TaMLO-B1, TaMLO-D1이라는 이름이 붙어 있습니다. 하나를 손봐도 나머지 두 벌이 그대로 남아 병에 걸렸습니다. 크리스퍼는 같은 안내자를 세 벌 각각에 나눠 보내 세 곳을 한꺼번에 고장 낼 수 있고, 그 세 곳을 정확히 찾아 동시에 겨누는 계산이 인공지능이 잘하는 일입니다.

유전자편집과 상용 작물의 역사는 기술별로 나뉘야 합니다. 미국에서 처음 상용화된 고올레산 대두는 FAD2 유전자를 TALEN으로 편집한 제품이지 CRISPR 작물이 아닙니다. 갈변을 억제한 상용 Innate 감자는 RNA 간섭 기술로 PPO 발현을 낮췄습니다. CRISPR로 병 저항성이나 잎 각도, 영양 이용 효율을 바꾸는 옥수수과 감자 연구는 이어지고 있지만, 연구용 CRISPR 사례와 이미 팔리는 TALEN·RNAi 제품을 같은 기술의 성과로 묶어서는 안 됩니다.

인공지능은 먼저 유전체 전체를 훑으면서 표적과 조금이라도 닮은 구간을 전부 찾아냅니다. 그다음 딥러닝 모델이 후보 위치마다 가위가 실제로 달라붙어 자를 확률을 점수로 매깁니다. 이 점수는 짐작이 아니라 실측 데이터에서 나옵니다. 살아 있는 세포에 가위를 넣고 어디가 진짜로 잘랐는지 형광 표지로 잡아낸 실험 결과를, 모델이 수만 건씩 학습하기 때문입니다. 2025년 아카이브(arXiv)에 공개된 압바스자데와 샬라이의 논문을 보면, 합성곱신경망과 순환신경망, 트랜스포머 구조를 쓴 최근 모델은 어떤 서열이 가위질에 취약한지를 예전 통계 공식보다 훨씬 정확히 짚어냅니다. 이 모델들은 점수만 던지지 않고, 서열의 어느 글자 조합이 위험을 키우는지도 함께 보여 줍니다. 연구자가 그 이유를 눈으로 확인하고 납득할 수 있다는 뜻입니다.

가위 자체를 바꾸는 방법도 있습니다. 표준 가위보다 표적 특이성이 높은 변형 효소를 쓰면 애초에 엉뚱한 구간에 잘 달라붙지 않습니다. 연구자는 이 점수표와 새 효소를 함께 놓고 위험이 제일 낮은 조합을 실험대에 올리고, 편집을 마친 뒤에도 검증을 한 번 더 거칩니다. 식물체의 유전자 전체를 다시 읽어 원래 유전체와 한 글자씩 대조하고, 인공지능이 그 대조표에서 사람 눈에 띄지 않는 무늬까지 찾아 표적 밖 변이가 있는지 확인합니다.

이 전체유전체 재해독 검증은 계통 하나를 확인하는 데도 적지 않은 비용이 들어갑니다. 예산이 빠듯한 소규모 육종 회사나 개발도상국 연구소는 이 검증 단계를 건너뛰고 싶은 유혹을 받고, 실제로 일부는 논에 내보내기 전 마지막 확인을 생략한 채 다음 단계로 넘어가기도 합니다. 최근에는 단백질의 입체 구조를 학습한 인공지능 모델이 자연에는 없는 새로운 가위 단백질 자체를 설계하는 실험까지 나오고 있습니다. 아직 논에 나갈 수준은 아니지만, 인공지능의 역할이 가위를 고르는 일에서 가위를 만드는 일로 넘어가는 중입니다.

편집을 끝내고 오프타겟 검증까지 마쳐도 곧바로 논에 낼 수는 없습니다. 형질이 자손에게 이어지는지 보고, 지역 적응시험과 품종 등록을 거쳐야 합니다. 속성육종 온실은 빛과 온도, 습도를 조절해 밀과 보리 같은 작물의 세대를 앞당깁니다. 벼와 옥수수의 반응은 품종과 광주기에 따라 다릅니다. 계통을 빨리 고정하는 일과 농가에 팔 품종을 완성하는 일은 걸리는 시간이 다릅니다.

한국 농촌진흥청은 2024년 벼 방어 관련 유전자 2,600여 곳을 목표로 삼고 1차로 NAC 계열 편집체 146종을 만들었다고 밝혔습니다. OsNAC30 편집 벼는 흰잎마름병 병반이 51.9퍼센트 줄었고, OsNAC59 편집 벼는 키다리병 고사율이 24.5퍼센트 낮았습니다. 연구진은 편집 집단을 직접 감염시켜 두 방어 유전자를 찾아냈습니다.

유전자편집 작물이 통과할 문은 나라별로 다릅니다. 미국에서는 2020 SECURE 규정이 2024년 12월 법원 판결로 무효가 됐고, APHIS는 종전의 허가·통지·청원과 ‘Am I Regulated’ 절차를 재개했습니다. 외래 DNA가 없으면 서류 한 장으로 포장시험에 나간다는 설명은 2026년 현행 일반 규칙이 아닙니다. 유럽연합의 Regulation (EU) 2026/1388은 2028년 7월 17일부터 본격 적용됩니다. NGT1 기준은 원래 유전체와 20곳 이하 차이가 아니라 삽입·치환의 길이, 코딩서열별 변경 수, 단배체 유전체의 총 변경 수 등을 함께 따집니다. 제초제 내성과 알려진 살충물질 생성 형질은 NGT1에서 제외됩니다.

특허도 걸림돌입니다. 기초 Cas9 특허의 주요 권리자는 UC Berkeley·Vienna 계열과 Broad·MIT 계열이며 Corteva를 비롯한 기업은 일부 권리를 라이선스받았습니다. 작은 육종회사와 공공 연구소는 어느 특허가 필요한지 확인하고 사용 계약을 맺는 데 시간과 돈을 씁니다. 기술을 익히는 일보다 그 기술을 합법적으로 쓸 권리를 확보하는 일이 더 오래 걸릴 때도 있습니다.

두 규제 사이 어딘가에서 일본은 혈압을 낮춘다는 감마아미노뷰티르산 함량을 높인 편집 토마토를 비유전자변형생물체로 승인해 실제로 팔고 있습니다. 그런데 판다고 해서 다 사 먹지는 않습니다. 필리핀 학자들이 2025년에 내놓은 조사를 보면, 안전하다고 믿는 소비자일수록 이런 편집 바나나를 사 먹겠다는 응답이 중국에서 267퍼센트, 일본에서 171퍼센트 늘었습니다. 반대로 낯선 먹거리 자체를 꺼리는 마음은 세 나라 모두에서 구매 의사를 끌어내렸습니다. 미국 대학 세 곳이 저아크릴아마이드 밀가루를 놓고 1,638명에게 물었을 때도 결론은 비슷했습니다. 사람들은 크리스퍼를 동물이나 사람에게 쓰는 일보다 작물에 쓰는 일을 한결 편하게 받아들였습니다.

다만 부작용이 나중에 나타날지 모른다는 걱정과, 이 기술의 특허를 소수 대형 종자회사가 쥐고 있어 작은 농가와 가난한 나라 연구자는 접근하기 어렵다는 걱정은 여전히 남아 있었습니다.

이 모든 절차를 통과한 형질에도 마지막 관문이 하나 더 있습니다. 온실에서는 흙잡을 데 없이 자라던 벼가 실제 논에서는 힘을 못 쓰는 경우가 드물지 않습니다. 온실은 온도와 물과 빛을 사람이 맞춰 주지만, 논은 장마와 태풍과 병해충이 한꺼번에 몰아치는 곳입니다. 2026년에 나온 이란 연구자 라히미의 논문은 왜 실험실 성공이 논까지 이어지지 못하는지를 짚습니다. 표적을 고르는 인공지능 모델은 대개 정상 조건에서만 배워서 가뭄이나 폭염 같은 스트레스 상황을 미리 겪어 보지 못했습니다. 편집 자체는 성공해도 그 유전자가 세포 안 다른 유전자와 어떻게 얹히는지까지는 살피지 못한 채 넘어가는 일도 흔합니다. 게다가 한두 곳에서만 심어 보고 여러 지역 논에서 여러 해에 걸쳐 되풀이 시험하지 않은 채 발표부터 나가는 경우도 있습니다.

2025년 Cell 논문은 벼 CWIN 프로모터에 10염기 길이의 열반응 요소를 넣었습니다. 고온 조건에서 편집 벼의 구획 수량은 중화11호보다 25퍼센트 높았고, 고온으로 생긴 수량 손실은 최대 41퍼센트 회복됐습니다. 짧은 서열 하나를 넣은 결과는 선명했지만, 여러 지역에서 몇 해 동안 반복한 장기 적응시험은 아직 남아 있습니다. 온실과 구획 시험에서 성적을 낸 벼가 농가의 논에서도 같은 성적을 낼지는 계절이 더 지나야 알 수 있습니다.

그래서 육종회사와 국립 연구소들은 온실 성공을 발표로 내놓기 전에, 여러 논에 나눠 심어 몇 해를 지켜보는 절차를 점점 더 길게 잡습니다. 크리스퍼는 한 글자를 정확히 자를 수 있지만, 그 한 글자가 쓸모 있는 벼로 이어지는지는 여러 해의 포장시험을 거쳐야 확인됩니다. 다음 태풍이 지나간 뒤 이름표가 꽃힌 그 화분 속 벼가 옆 논의 재래종보다 얼마나 더 서 있을지는 아직 아무도 장담하지 못합니다.

## 근거 및 참고문헌

1. Nasir, S., Khan, L., Murtaza, A., Raza, A., Nasir, F., & Azam, U. (2026). Bridging traditional plant breeding with precision agriculture: A path to smarter crop improvement. In *Explicable Agriculture: Microbial Ecology, Bio-Innovations and Crop Production* (pp. 194-201). Unique Scientific Publishers. <https://doi.org/10.47278/book.tl/2026.383>
2. U.S. Department of Agriculture, APHIS. (2025). Vacatur of 2020 Biotechnology Regulations. <https://www.aphis.usda.gov/vacatur-2020-regulations>
3. European Union. (2026). Regulation (EU) 2026/1388 on Plants Obtained by Certain New Genomic Techniques. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L\\_202601388](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202601388)
4. Fu, B. X. H., et al. (2022). Target-dependent Nickase Activities of the CRISPR-Cas Nucleases Cpf1 and Cas9. *Nature*. <https://www.nature.com/articles/s41586-022-04470-1>
5. Lou, H., Li, S., Shi, Z., et al. (2025). Engineering source-sink relations by prime editing confers heat-stress resilience in tomato and rice. *Cell*, 188(2), 530-549.e20. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2024.11.005>
6. U.S. Food and Drug Administration. Genome Editing in Agricultural Biotechnology. <https://www.fda.gov/food/agricultural-biotechnology/genome-editing-agricultural-biotechnology>
7. 농촌진흥청. (2024). 흰잎마름병·키다리병 저항성 높은 벼 유전자 발굴. [https://www.rda.go.kr/board/board.do?dataNo=100000798693&mode=view&prgId=day\\_farmprmninfoEntry](https://www.rda.go.kr/board/board.do?dataNo=100000798693&mode=view&prgId=day_farmprmninfoEntry)

8. ISAAA. (2025, July 30). Survey shows consumer acceptance of gene-edited bananas in the Philippines, Japan, and China. Crop Biotech Update. <https://www.isaaa.org/kc/cropbiotechupdate/ged/article/default.asp?ID=21404>
9. ISAAA. (2025, February 26). Study reveals consumer acceptance of gene-edited food. Crop Biotech Update. <https://www.isaaa.org/kc/cropbiotechupdate/article/default.asp?ID=21220>
10. ISAAA. (2021, September 22). Japan starts sale of genome-edited high-GABA tomato. Crop Biotech Update. <https://www.isaaa.org/kc/cropbiotechupdate/article/default.asp?ID=19024>
11. 뉴시스. (2024, 10월 2일). 농진청, 흰잎마름병·키다리병 저항성 높은 벼 유전자 발굴. 뉴시스. [https://www.newsis.com/view/NISX20241002\\_0002907293](https://www.newsis.com/view/NISX20241002_0002907293)
12. Sangwa, S., & Mutabazi, P. (2025). Artificial intelligence in agriculture: Ethical stewardship, responsible innovation, and governance for sustainable food systems. *Intelligent Agriculture*, 1(2), 25-45. <https://doi.org/10.54963/ia.v1i2.1684>

## 4.3

## 기후변화 대응형 내성 품종 개발

벵골만에서 멀지 않은 저지대 논에 장맛비가 사흘 내리 쏟아졌습니다. 모내기를 마친 지 한 달도 안 된 어린 벼가 허리까지 차오른 물 아래 잠겨 있습니다. 사흘 전만 해도 푸르게 서 있던 줄기가 지금은 보이지 않습니다. 그런데 이 논에는 물이 빠지면 다시 고개를 드는 벼, 잠긴 열흘 동안 견디도록 유전자를 손본 벼도 함께 자랍니다.

국제 벼 연구진은 침수 내성 유전자원 6,274계통을 살피고 우수 89계통, 강한 내성을 보인 37계통을 골랐습니다. 이 연구는 현장 선발과 약 3주 침수시험, QTL 분석과 유전체선발을 결합했습니다. 기계학습으로 후보를 먼저 줄인 뒤 수조에서 10일에서 21일 시험했다는 한 방향의 순서는 원 논문과 다릅니다. 강한 37계통이 SUB1A 도입계통보다 생존율이 40퍼센트에서 50퍼센트 높았다는 결과는 유지하되, 선발 과정을 바르게 적어야 합니다.

서해든 벵골만이든, 바닷물이 가까운 논의 걱정거리는 다릅니다. 물이 넘쳐서가 아니라 흙 자체가 짜서 벼가 자라지 못합니다. 간척지나 해수면이 오른 삼각주에서는 마른 논바닥에 허연 소금기가 서리처럼 앉습니다. 뿌리는 그 짠물을 빨아올리면서 정작 필요한 양분은 걸러내지 못하고, 잎끝부터 타들어 갑니다. 내염성도 침수 내성처럼 유전자 하나로 풀리지 않습니다. 이온을 가려내는 능력, 뿌리세포의 압력을 견디는 능력, 물을 아껴 쓰는 능력이 저마다 다른 유전자 수십 개에 나뉘어 있고, 그 유전자들이 함께 작동해야 짠 땅에서도 벼가 이삭을 맵니다.

전통적인 육종은 이런 형질을 눈으로 골라내야 했습니다. 짠 논에 수천 개 계통을 심고 몇 해를 기다린 뒤, 살아남은 것만 다시 심어 보는 방식입니다. 그사이 물을 대고 소금기를 재고 잎이 타들어 가는 정도를 눈금으로 매기는 손은 전부 사람의 손이었습니다. 품종 하나가 세상에 나오기까지 여덟 해에서 열두 해가 걸린 이유입니다.

짠 땅에 강한 벼를 만드는 발상은 새롭지 않습니다. 중국 농학자 장치파(張啟發)는 2007년, 벼의 야생 근연종에 흩어진 가뭄 저항성과 질소 이용 효율 유전자를 한 품종 안에 모아 담자는 구상을 국제 학술지 PNAS에 내놓았습니다. 이름하여 녹색슈퍼벼입니다. 당시에는 유전자 하나를 표지로 추적해 교배하는 데도 여러 해가 걸렸습니다. 지금은 그 구상을 예측 육종이 이어받았습니다. 야생벼 유전자은행에 잠들어 있던 내성 유전자 조합 수십 가지를 컴퓨터가 먼저 계산으로 걸러내고, 그 가운데 가능성이 높은 조합만 실제 논에서 확인합니다.

밀은 개화와 등숙기에 폭염을 만나면 꽃가루와 낱알 형성이 흔들립니다. 전 세계 연구를 종합한 추정에서 생육기 평균기온이 1도 오를 때 밀 수량은 평균 약 6퍼센트 줄었습니다. 21퍼센트는 특정 조건과 연구에서 보고된 상단값이므로 모든 밀밭의 반응처럼 병기하지 않습니다. 겨울밀과 봄밀의 취약 시기도 지역과 품종에 따라 달라집니다. 육종에서는 유전자 표지와 개화기 온도 기록을 함께 보며 고온에 견디는 계통을 가려냅니다.

벼는 꽃이 피는 짧은 시간의 고온으로 불임과 품질 저하를 겪을 수 있습니다. 일본 농업연구기구 연구진은 약 1킬로미터 기상 격자와 이삭 온도 모형을 이용해 조기 개화, 내열성, 출수기 조정의 조합을 비교했습니다. 개화 시각을 3시간 앞당기거나 내열성을 3도 높인 시나리오가 지역별 불임 위험을 어떻게 바꾸는지 계산했습니다. 이 연구는 2026년 Field Crops Research 344권에 110519번 논문으로 실렸습니다.

밀과 벼만 폭염과 가뭄 앞에서 흔들리는 것은 아닙니다. 대두도 뿌리 끝 물관을 타고 오르는 수분이 부족해지면 꼬투리를 다 채우지 못한 채 여물어 버립니다. 뿌리혹박테리아와 공생하며 질소를 얻는 대두의 특성상, 뿌리 주변 흙이 마르면 이 공생 관계부터 끊어집니다. 질소를 못 받은 잎은 빛깔이 옅어지고 콩알은 쭈그러듭니다. 예측 육종 연구자들은 대두 게놈 전체를 훑어 가뭄에도 뿌리혹 공생과 단백질 합성을 붙들고 있는 유전자 조합을 찾아내고, 그 조합을 넣은 계통만 골라 가뭄 시험 포장에 심습니다. 벼와 밀에서 쓰던 방식을 콩밭에 그대로 옮겨 온 것입니다.

침수를 견디는 벼도, 소금을 견디는 벼도, 폭염을 견디는 밀도 공통된 숙제를 안고 있습니다. 어떤 유전자 조합이 미래의 기후를 견딜지 알아내는 데 너무 오래 걸린다는 것입니다. 전통적인 육종은 교배한 자손을 실제로 논밭에 심고 가물게 하거나 물에 담그거나 소금을 뿌려 가며 몇 해에 걸쳐 지켜보는 수밖에 없었습니다. 인공지능은 이 기다림의 많은 시간을 컴퓨터 안으로 옮겨 놓았습니다. 이름은 예측 육종(Predictive Breeding)입니다. 유전체를 미리 읽어서 결과를 계산한다는 뜻에서 유전체 선발이라고도 부릅니다.

어린 모종의 잎에서 DNA를 뽑아 수만 개 유전자 표지를 한꺼번에 읽습니다. 이 표지는 그 개체가 어떤 유전자를 지녔는지 알려 주는 표식입니다. 모종을 끝까지 키우지 않아도 표지를 읽으면 그 모종이 자라서 가뭄과 더위를 얼마나 견딜지 짐작할 수 있습니다. 계산에는 여러 결정 나무를 모아 다수결로 답을 내는 방법이나, 사람 뇌의 신경 세포를 흉내 낸 인공신경망 같은 여러 방식이 함께 쓰입니다. 표지와 환경 자료가 얹히는 방식이 지역마다 달라서, 육종가들은 여러 계산 방식을 겹쳐 써 보고 실제 결과와 잘 맞는 쪽을 고릅니다. 한 해, 한 곳의 기록만으로는 부족합니다. 가뭄이 심한 해와 평범한 해, 모래땅과 진흙땅을 두루 겪은 기록이 쌓일수록 계산은 실제에 가까워집니다.

여기에 여러 해 여러 지역에서 쌓아 온 날씨와 토양 기록을 함께 넣으면, 수만 가지 교배 조합 가운데 실제로 논밭에 심어 볼 만한 몇 백 개만 골라낼 수 있습니다.

컴퓨터가 계산에 쓰는 자료는 유전자 표지만이 아닙니다. 시험 포장에는 드론이 날아다니며 잎의 색과 잎 표면 온도를 찍습니다. 물이 부족한 벼는 잎 온도가 건강한 벼보다 미세하게 높는데, 사람 눈에는 안 보여도 열화상 카메라에는 뚜렷하게 잡힙니다. 이렇게 매일 쌓이는 사진과 숫자가 유전자 표지 옆에 나란히 놓이면서, 어떤 유전자 조합이 실제 밭에서 어떤 모습으로 나타나는지를 컴퓨터가 함께 배웁니다.

국제옥수수밀개량센터의 DTMA 사업은 2007년부터 2012년까지 가뭄 내성 잡종 60개와 개방수분품종 57개를 보급했습니다. 사업은 아프리카 13개 나라에서 최대 4,000만 명을 대상으로 했습니다. 4,000만 농가가 아닙니다. 온건한 가뭄에서 헥타르당 약 1톤 또는 20퍼센트에서 30퍼센트의 수량 우위를 목표로 했습니다. 이 성과를 인공지능 예측으로 육종 기간이 열 해에서 서너 해로 줄었다는 증거로 연결할 자료는 없습니다.

속성육종은 인공조명으로 하루 길이와 온도를 조절해 세대를 앞당깁니다. 22시간 장일 조건에서 연 6세대를 얻은 결과는 보밀과 보리 같은 작물에서 보고됐습니다. 옥수수는 짧아지는 낮에 반응하는 품종이 많아 같은 처방을 그대로 쓸 수 없습니다. 세대축진으로 계통을 빨리 고정해도 여러 지역의 재배시험과 품종 등록에는 별도의 시간이 듭니다.

이렇게 빨라진 육종에도 한계는 있습니다. 컴퓨터가 배운 자료는 지난 몇 해 동안 실제로 겪은 날씨와 토양 조건입니다. 그런데 기후변화는 아무도 겪어 보지 못한 폭염이나 가뭄을 만들어 냅니다. 훈련 자료에 없던 극단적인 날씨 앞에서는 인공지능이 매긴 예상 점수도 흔들립니다. 한 번도 겪지 않은 폭염 앞에서 인공지능이 내성 등급을 실제보다 높게 매기면, 농부는 그 말을 믿고 심었다가 그해 농사를 그르칠 수 있습니다. 그래서 컴퓨터가 골라낸 후보라도 포장에 심어 실제로 견디는지 확인하는 절차는 사라지지 않았습니다. 인공지능은 심어 볼 후보를 수만 개에서 몇 백 개로 줄여 주는 역할을 합니다.

컴퓨터 계산에도 그 나름의 문턱이 있습니다. 수만 개 유전자 표지와 여러 해에 걸친 기상, 토양 자료를 한꺼번에 돌리려면 고성능 컴퓨터와 그 결과를 해석할 줄 아는 전문 인력이 있어야 합니다. CIMMYT나 IRRI처럼 국제 기구의 지원을 받는 연구소는 이런 장비와 인력을 갖췄지만, 예산이 빠듯한 나라의 국립 육종 기관은 사정이 다릅니다. 계산 자체를 못하면 그 나라 토양과 기후에 꼭 맞는 예측 모델을 자체적으로 만들지 못하고, 다른 나라에서 만든 모델을 빌려 쓰는 경우가 많습니다. 빌려 온 모델은 그 나라의 논과 밭을 한 번도 학습한 적이 없어서, 훈련 자료에 없는 조건 앞에서 예측이 흔들리는 문제를 그대로 안고 갑니다. 계산 능력을 가진 나라와 그렇지 못한 나라 사이에서 새로운 격차가 벌어질 위험이 있습니다.

새 품종이 시험장 냉장고를 나와 농가의 손에 닿는 길은 깁니다. 아프리카 소농이 쓰는 씨앗의 비공식 비중은 나라와 작물마다 다릅니다. 우간다 자료는 이웃과 시장, 자가 채종을 포함한 비공식 경로를 약 85퍼센트에서 89퍼센트로 추정합니다. 이를 아프리카 전체 소

농의 90퍼센트가 넘는다고 고정할 수는 없습니다. 씨앗이 없어서 못 심는 경우와 낫설어서 고르지 않는 경우, 값이 비싸서 사지 못하는 경우를 지역별로 살펴야 합니다.

미국 종자시장의 집중도는 작물마다 다릅니다. USDA 추정에서 상위 두 회사의 비중은 옥수수 약 71.6퍼센트, 대두 약 65.9퍼센트였습니다. 면화의 상위 네 회사 비중은 약 94퍼센트였습니다. 1990년부터 2020년까지 GM 중심 종자 가격지수가 463퍼센트 오른 동안 작물 가격지수는 56퍼센트 올랐습니다. 씨앗값이 오르는 속도가 농부가 곡물을 파는 값이 오르는 속도보다 훨씬 빨랐습니다.

아프리카 여러 나라 농업경제학자들이 2026년 국제 학술지 Journal of Agricultural Economics에 실은 연구는 이 벽을 낮추는 방법을 하나 보여 줍니다. 새 품종을 큰 포대가 아니라 손바닥만 한 소포장으로 나눠 주자, 그 씨앗을 받아 본 농가에서 품종에 대한 이해와 이듬해 구매율이 함께 올라갔습니다. 국제종자연맹도 2026년 발표한 글에서 비슷한 점을 짚었습니다. 마을 어른이 먼저 심어 본 밭을 옆에서 지켜보게 하거나, 농촌지도사가 집집이 찾아가 씨앗 봉지를 직접 쥐여 주는 방식이 광고지 한 장보다 낫다는 것입니다. 아무리 뛰어난 형질도 농부가 먼저 믿고 한 번 심어 보지 않으면 퍼지지 않습니다.

다시 벵골만 저지대 논입니다. 물이 빠지고 나면 서브원 유전자를 품은 벼가 실제로 다시 고개를 드는지는 그 논, 그 농가, 그다음 장마가 와야 확인됩니다. 물이 빠지는 데는 여전히 며칠이 걸리고, 그동안 논둑에 쪼그려 앉아 물빛을 살피는 쪽은 컴퓨터가 아니라 농부입니다.

## 근거 및 참고문헌

1. Prasanna, B. M. (2026). Predictive Breeding: Bridging Genetics, Artificial Intelligence and Agriculture [Video]. SHARE GENES. <https://www.youtube.com/watch?v=FWcxEC90JA>
2. Anumalla, M., Khanna, A., Catolos, M., Ramos, J., Sta Cruz, M. T., Venkateshwarlu, C., Konijerla, J., Pradhan, S. K., Dash, S. K., Das, Y., Chowdhury, D., Chetia, S. K., Das, J., Nath, P., Merugumala, G. R., Roy, B., Pradhan, N., Jana, M., Dana, I., ... Hussain, W. (2025). Future flooding tolerant rice germplasm: Resilience afforded beyond Sub1A gene. The Plant Genome, 18(2), e70040. <https://doi.org/10.1002/tpg2.70040>
3. Zheng, Y., Cai, Z., Wang, Z., Maruza, T. M., & Zhang, G. (2025). The genetics and breeding of heat stress tolerance in wheat: Advances and prospects. Plants, 14(2), 148. <https://doi.org/10.3390/plants14020148>
4. CIMMYT. (2026). Drought Tolerant Maize for Africa (DTMA). International Maize and Wheat Improvement Center. <https://www.cimmyt.org/projects/drought-tolerant-maize-for-africa-dtma/>
5. BusinessWorld Online. (2024, March 27). Rice variety resistant to heat, drought to be launched in 2026, IRRI says. <https://www.bworldonline.com/economy/2024/03/27/584553/rice-variety-resistant-to-heat-drought-to-be-launched-in-2026-irri-says/>
6. Mulungu, K., Subakanya, M., Setimela, P., Essegbemon, A., Chivasa, W., Gethi, J., Chiduwa, M., Sigalla, J., Mvungi, H. H., & Ngoma, H. (2026). Small seed packs, big potential? Effect of seed packs on knowledge and adoption of improved crop varieties. Journal of Agricultural Economics. <https://doi.org/10.1111/1477-9552.70040>

7. International Seed Federation. (2026). Inclusive seed systems: Building trust with farmers. World Seed 2026. <https://worldseed.org/2026/06/03/inclusive-seed-systems-farmers-world-seed-2026/>
8. Catholic Relief Services. (2026). Seed systems smallholder farmers use. [https://www.crs.org/sites/default/files/documents/2025-12/seed\\_systems\\_farmers\\_use\\_embargoed\\_until\\_jan\\_20.pdf](https://www.crs.org/sites/default/files/documents/2025-12/seed_systems_farmers_use_embargoed_until_jan_20.pdf)
9. Zhang, Q. (2007). Strategies for developing Green Super Rice. Proceedings of the National Academy of Sciences, 104(42), 16402-16409. <https://doi.org/10.1073/pnas.0708013104>
10. Toda, Y., et al. (2026). Simulation of Heat-Induced Spikelet Sterility in Rice and Evaluation of Adaptation Options Under Historical and Projected Meteorological Conditions in Japan. Field Crops Research, 344, 110519. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2026.110519>
11. Dawson, J., Hubbard, K., & Jenney, P. (2026, June 23). How everyone pays the cost for patents on seeds, and private companies get rich from keeping them secret. The Conversation. <https://theconversation.com/how-everyone-pays-the-cost-for-patents-on-seeds-and-private-companies-get-rich-from-keeping-them-secret-284144>



## 제 5 장

# AI 의사결정과 자동화



## 5.1

## 농업 특화 멀티모달 대형언어모델(Agri-LLM)

해가 기울기 시작한 오후, 벼 잎 하나에 누런 반점이 번져 있습니다. 어제까지는 멀쩡했던 잎입니다. 농부는 휴대폰을 꺼내 그 반점을 사진으로 찍어 상담 창에 올리고, 화면에 대고 사투리 섞인 목소리로 묻습니다. "이거 뭇 때문에 이런데요, 약 쳐야 쓰겠소?" 대답이 틀리면 잎 한 장으로 끝나지 않고 한 해 농사가 걸립니다. 이 물음에 정확하게 답하려고 만든 기술이 농업 특화 멀티모달 대형언어모델, 줄여서 아그리엘엘엠(Agri-LLM)입니다.

휴대폰에 깔린 흔한 인공지능 채팅 앱에 같은 사진을 올려도 답은 돌아옵니다. 문제는 그 답이 자주 틀린다는 데 있습니다. 일반 인공지능은 사람이 쓴 글을 통째로 외워서 그럴듯한 문장을 잇는 방식으로 훈련됩니다. 벼 잎에 핀 반점이 도열병인지 흰잎마름병인지, 그 경계를 가르는 것은 눈으로 보기에 몇 밀리미터 차이입니다. 일반 모델은 그 미세한 차이를 구별하지 못합니다. 정답을 실제로 아는 것과 정답처럼 들리는 문장을 짓는 것은 전혀 다른 일인데, 일반 모델은 후자에만 능합니다. 병해충 이름도 처방도 모르면 그냥 지어냅니다. 존재하지 않는 농약 이름을 진짜처럼 알려 주고, 그 지역 기후나 규정과는 맞지 않는 조언을 자신 있게 내놓습니다. 이런 증상을 인공지능 업계에서는 환각이라 부릅니다. 농사에서 환각은 웃어넘길 여유가 없습니다. 틀린 약을 틀린 농도로 치면 그 밭 전체가 말라 죽을 수 있습니다.

아그리엘엘엠은 이 환각을 줄이려고 처음부터 다르게 설계된 모델입니다. 병리학 논문과 해충 도감, 농가 상담 기록 같은 농업 전문 글을 따로 모아 다시 훈련시킵니다. 여기에 사진 속 미세한 병반과 작은 해충 유충의 윤곽까지 여러 층으로 겹쳐 뽑아내는 정밀 시각 인식 장치를 더합니다. 토양 속 물기와 질소, 인산, 칼륨 수치를 재는 감지기, 그리고 기상 예보 신호까지 함께 읽어 들입니다. 텍스트와 사진과 센서 수치를 한꺼번에 놓고 판단한다고 해서 다중양식, 곧 멀티모달 모델이라 부릅니다. 사진에서 뽑아낸 반점의 무늬는 곧바로 병명과 연결되지 않습니다. 그래서 모델은 병명과 전형적인 증상을 미리 정리해 둔 지식 표를 함께 불러와 사진 속 무늬와 하나씩 견주어 봅니다. 눈으로 본 것과 이미 알고 있는 지식을 짝짓는 이 절차가 있어야 반점이 병명으로 바뀝니다.

농부가 사진을 찍는 순간 휴대폰은 다른 정보도 함께 그러모읍니다. 위성으로 잡은 논 위치, 근처 감지기가 방금 보낸 토양 값, 하루 앞선 기상 예보까지 한데 묶입니다. 이 시스템은 사진과 말과 수치가 다 갖추어져야 판단을 시작합니다. 값 하나가 빠지면 판단은 잠시 미뤄지거나, 빠진 항목을 밝힌 채로 잠정적인 답만 내놓습니다.

아그리엘엘엠은 답을 찾기 전에 실제 문서부터 찾아봅니다. 이 방식을 검색증강생성(RAG)이라 부릅니다. 도서관 사서를 떠올리면 쉽습니다. 사서는 질문을 받으면 기억만으로 답하지 않습니다. 서가로 걸어가 실제 책을 꺼내고, 몇 쪽 몇째 줄에 그 내용이 있는지 손가락으로 짚어 줍니다. 아그리엘엘엠도 농촌진흥청 지침서나 식물병리학 교과서, 표준 방제 지침이 저장된 데이터베이스를 먼저 훑습니다. 관련 문서를 찾아낸 뒤에야 그 내용을 근거로 답을 짓고, 화면에는 출처 문서로 이동하는 단추를 함께 띄웁니다. 농부가 그 단추를 누르면 인공지능의 말이 아니라 실제 문서 원문을 확인할 수 있습니다.

농업 멀티모달 모델의 성능은 공개된 시험 자료와 독립 평가에서 드러납니다. 병든 잎을 맞히는 점수와 해충을 가려내는 점수, 방제 조언의 품질은 서로 다른 시험입니다. 영상의 배경과 작물 품종, 평가자의 기준이 바뀌면 결과도 달라집니다. 숫자가 소수점까지 적혀 있다는 사실만으로 논밭에서 검증됐다는 뜻은 아닙니다. 농부에게 약 이름을 건네기 전에 데이터와 비교 모델, 실패 사례를 함께 열어 보여야 합니다.

벼농사에서 흔히 마주치는 이름을 대면 감이 더 잡힙니다. 벼도열병과 벼이삭누룩병, 밀 붉은곰팡이병, 옥수수 북방잎마름병과 줄기를 파고드는 굴파리 유충까지, 아그리엘엘엠이 구분해 내는 목록에는 식량작물 농가가 실제로 겪는 병해충 이름이 그대로 올라 있습니다. 이런 모델의 실력을 검증하려는 연구도 뒤따르고 있습니다. 미국 연구진이 2025년에 내놓은 아그엠엠유(AgMMU) 벤치마크는 여러 인공지능 모델에 작물 사진과 질문을 동시에 던져 놓고 답의 정확성을 겨루게 합니다. 한 회사의 홍보 자료가 아니라 여러 연구실이 같은 잣대로 서로를 검증하는 단계에 들어섰다는 뜻입니다. 141개라는 범주 수 자체가 절대적이지는 않습니다. 그러나 실험실 한두 사례가 아니라 현장에서 되풀이되는 병해충을 널리 담았다는 점에서 뜻이 있습니다.

파키스탄 연구진이 만든 AgriSmart는 작물 추천과 병해 진단, 챗봇을 한 화면에 묶었습니다. 논문에서 작물 추천 정확도는 99퍼센트, 병해 모델은 F1 0.70과 mAP@50 74퍼센트를 기록했습니다. 이 수치는 정해진 데이터셋에서 얻은 모델 평가값입니다. 실제 논에서 비가 오기 전 관수를 미루고 석회량을 정해 수확을 지킨 포장 성적은 아닙니다. 상담 화면의 점수와 실제 밭의 결과 사이에는 한 계절의 검증이 남아 있습니다.

인도 정부가 Wadhwani AI와 운영한 Kisan e-Mitra는 11개 지역어로 정부 사업과 농업 정보를 안내합니다. 인도 의회 자료에서 2025년 7월까지 질의는 950만 건, 이용 농민은 530만 명이었습니다. 마이크에 대고 말하면 보조금과 보험 정보를 들을 수 있어 글을 읽기 어려운 농민도 상담 창에 들어올 수 있습니다. 화면 대신 목소리로 정부와 처음 이야기 한 사람들이 이 숫자 안에 있습니다.

한국에서는 기존 병해충 영상 진단이 운영되고 있습니다. 농촌진흥청의 2024년 발표에서 평균 정확도는 95퍼센트 이상, 사람의 인지 정확도는 95.3퍼센트였고 대상은 31개 작물과 182개 병해충이었습니다. 농업 AI 에이전트 ‘AI이삭’은 공식 업무계획상 2027년 서

비스 예정입니다. 지금 돌아가는 영상 진단이 사진 한 장을 읽는다면, AI이삭은 농업기술 자료를 대화로 잇는 다음 창구를 목표로 합니다.

그런데 기술이 아무리 정교해도 뚫지 못하는 벽이 아직 남아 있습니다. 하나는 말입니다. 표준어를 배운 모델은 시골 사투리와 관용구 앞에서 자주 헤맹니다. 이거 뭇 때문에 이런데요 같은 문장은 표준어 사전만 아는 통역사가 알아듣기 어렵습니다. 인도에서는 이 벽을 넘으려고 힌디어와 마라티어 같은 지역어에 맞춘 언어 이해 모델과, 오프라인에서도 돌아가는 음성 인식, 음성 합성 엔진을 따로 엮었습니다. 그렇다고 모든 사투리를 다 알아듣는 것은 아닙니다. 억양이 짙거나 잘 안 쓰는 관용구 앞에서는 지금도 종종 엉뚱하게 되묻습니다.

화면 속 글자도 누군가에게는 벽입니다. 개발도상국 농촌은 물론 한국 농촌에서도 고령 농민 상당수는 화면 속 글을 편하게 읽지 못합니다. 이런 농민에게 텍스트 채팅창은 애초에 쓸모가 없습니다. 그래서 아그리엘엘엠 계열 서비스는 하나같이 음성을 앞세웁니다. 말로 묻고 말로 듣습니다. 화면을 노려보지 않아도 되니, 발일하던 손을 멈추고 잠깐 허리만 펴면 상담이 끝납니다. 숫자와 표만 가득한 결과 화면 대신, 사람이 실제로 말하듯 풀어서 설명하는 응답 방식을 택한 이유도 여기에 있습니다.

산골과 외딴 들판에서는 통신 신호가 자주 끊깁니다. 그것도 넘어야 할 벽입니다. 커다란 모델을 먼 서버에 올려 두고 매번 물어보는 방식은 이런 곳에서 쓸 수 없습니다. 그래서 개발자들은 모델을 잘게 쪼개고 압축해 휴대폰이나 밭머리에 놓인 소형 장비 안에 직접 심습니다. 방금 받은 기상 자료와 센서 값은 기기 안에 잠시 저장해 두고, 신호가 아예 끊긴 순간에도 최소한의 판단은 이어 가게 만듭니다. 기기 안에서 작게 돌아가는 모델은 서버 위 큰 모델보다 아는 것이 적습니다. 그래도 신호가 끊긴 순간에는 그 적은 지식이 아예 없는 것보다 낫습니다.

모든 농가가 이 기술을 반긴 것은 아닙니다. 스마트폰 카메라가 흔들려 사진이 흐릿하게 찍히면 진단 정확도가 뚝 떨어진다는 불만이 나왔습니다. 데이터 요금이 부담스러워 몇 번 써 보고 그만둔 농가도 있었습니다. 인공지능이 흙 종류나 그 지역 특유의 기상 변수를 제대로 못 읽어 엉뚱한 조언을 내놓은 사례도 실제로 보고되었습니다. 기술이 완성됐다고 말하기엔 아직 이릅니다.

남는 물음은 하나입니다. 그 조언이 틀려서 한 해 농사를 망치면 누가 책임지는가 하는 물음입니다. 관개 시점을 잘못 짚거나 병을 늦게 잡아내 생기는 손실은 지금까지 대부분 농민 혼자 떠안아 왔습니다. 2026년 2월, 호주 라트로브대학교의 소피아 두안 박사는 인공지능이 일상적인 농장 판단의 일부가 될 때 실패하면 누가 그 위험을 떠안느냐는 물음이 충분히 논의되지 않았다고 지적했습니다. 개발사와 농민이 위험을 나누어 지는 구조가 없다면, 기술이 아무리 정확해져도 농민은 그 정확도를 끝내 믿지 못한다고도 했습니다. 아그리엘엘엠이 답마다 출처 문서로 이동하는 단추를 붙여 두는 이유도 여기에 있습니다.

근거를 열어 보일 수는 있어도, 그 근거가 이 밭, 이 계절에 완전히 들어맞는다고 보증하는 것은 다른 문제입니다. 사투리로 물었던 그 농부도 마찬가지입니다.

상담은 무료로 받았지만, 손해가 나면 그 돈은 결국 그가 치릅니다.

농민이 입력한 밭의 위치, 수확량, 거래 가격 같은 정보가 어디로 흘러가는지도 같은 물음에 속합니다. 이 정보가 큰 기술 기업 서버에 쌓여 농민의 협상력을 되레 깎아 먹는다면, 상담은 편해지고 농민의 처지는 나빠집니다. 정보를 기기 안이나 지역 서버에 남겨 두고 꼭 필요한 내용만 검색해 쓰는 설계는 이 문제를 줄이는 한 가지 길로 논의되고 있습니다. 상가와 무타바지가 2025년에 낸 연구는 이런 위험을 줄이는 설계 원칙까지 제안합니다. 시스템을 설계하는 단계부터 농민의 처지를 반영하는 가치지향적 설계를 적용하고, 농업 전문가가 정기적으로 답변의 품질을 채점해 사람이 농민 오류를 걸러내야 한다는 주장입니다. 케임브리지대학교 실존위험연구센터는 이보다 앞서 2022년에 낸 경고에서, 수확량만 좇는 인공지능이 길게 보면 토양과 시냇물을 해칠 수 있다고 지적한 바 있습니다.

눈앞의 수확량 대신 몇 해 뒤의 땅 상태까지 함께 재는 잣대가 필요하다는 뜻입니다. 기술이 알아서 책임지는 구조는 아직 없습니다.

이 흐름은 한 걸음 더 나아가려 합니다. 농장을 통째로 컴퓨터 안에 복제한 디지털 트윈과 아그리엘엘엠을 이어 붙이면, 앞으로 2주 동안 가뭄이 이어질 때 수확량이 얼마나 줄어드는지도 미리 물어볼 수 있게 됩니다. 모델이 가상의 밭에서 여러 날씨를 미리 돌려 보고 그 결과를 사람이 알아듣는 말로 옮겨 주는 방식입니다. 드론과 자동 물꼬 밸브에 직접 지시를 내리는 단계까지 가면, 상담하던 모델이 농장을 실제로 움직이게 됩니다. 판단과 실행을 한 시스템이 맡는 순간, 책임을 묻는 물음은 지금보다 훨씬 무거워집니다. 다만 이 단계는 아직 연구와 시연 수준에 머물러 있습니다. 실제 논밭에 이런 자율 판단을 그대로 맡기는 농가는 흔치 않습니다.

다시 논둑입니다. 아침 햇살이 벼 잎 위로 번지고, 농부는 화면에 뜬 답을 읽습니다. 병명 하나와 약제 이름이 뜨고, 그 밑에는 출처 문서로 이동하는 단추 하나가 작게 걸려 있습니다. 손가락이 그 단추 위에서 잠깐 멈춥니다. 약을 치기 전에, 그는 단추를 누를까요.

## 근거 및 참고문헌

1. Parliament of India. (2025). Kisan e-Mitra Usage and Language Coverage, Unstarred Question No. 1464. [https://sansad.in/getFile/annex/268/AU1464\\_CSuYc2.pdf?source=pqars](https://sansad.in/getFile/annex/268/AU1464_CSuYc2.pdf?source=pqars)
2. Arun, T., Pooja Sri, M., & Priya, K. (2026). FarmGPT: An explainable AI powered smart agriculture system for crop recommendation and decision support. AIJFR, 7(3). <https://doi.org/10.63363/aijfr.2026.v07i03.6414>
3. Baloch, S., Ali, A., & Naeem, A. (2025). AgriSmart: An AI-powered farming assistant and crop management platform for precision agriculture. International Journal of Innovative Science and Technology, 7(10), 155-162. <https://doi.org/10.33411/ijist/1710>

4. Farmers Weekly. (2026). On-farm AI: New tech must share the risk.  
<https://www.farmersweekly.co.nz/technology/on-farm-ai-new-tech-must-share-the-risk/>
5. Gauba, A., Pi, I., Man, Y., Pang, Z., Adve, V. S., & Wang, Y.-X. (2025). AgMMU: A comprehensive agricultural multimodal understanding benchmark. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2504.10568>
6. Sangwa, S., & Mutabazi, P. (2025). Artificial intelligence in agriculture: Ethical stewardship, responsible innovation, and governance for sustainable food systems. *Intelligent Agriculture*, 1(2), 25-45.  
<https://doi.org/10.54963/ia.v1i2.1684>
7. 농촌진흥청. (2026). 2026년 주요 업무계획: 농업 AI 에이전트 AI이삭 고도화, 2027년 서비스 예정.  
[https://www.rda.go.kr/board/board.do?mode=html&prgId=pln\\_mainbizQuery](https://www.rda.go.kr/board/board.do?mode=html&prgId=pln_mainbizQuery)
8. University of Cambridge. (2022). Risks of using AI to grow our food are substantial and must not be ignored, warn researchers. <https://www.cam.ac.uk/research/news/risks-of-using-ai-to-grow-our-food-are-substantial-and-must-not-be-ignored-warn-researchers>
9. 농촌진흥청. (2025). 인공지능(AI)으로 농가 수입 20% 늘린다: 농업과학기술 인공지능(AI) 융합 전략. 농촌진흥청 보도자료. [https://www.rda.go.kr/board/board.do?mode=view&prgId=day\\_farmprmninfoEntry&dataNo=100000806197](https://www.rda.go.kr/board/board.do?mode=view&prgId=day_farmprmninfoEntry&dataNo=100000806197)
10. YTN. (2024). 병해충 피해, 스마트폰으로 진단·처방하세요. YTN 사이언스.  
[https://m.science.ytn.co.kr/program/view\\_today.php?s\\_mcd=0082&key=202409261626341200](https://m.science.ytn.co.kr/program/view_today.php?s_mcd=0082&key=202409261626341200)

## 5.2

## 농업 로봇틱스 및 작업 자동화

김제 만경들에 아침 안개가 낮게 깔려 있는데, 트랙터 한 대가 시동을 겁니다. 운전석에는 아무도 없습니다. 핸들이 저절로 좌우로 조금씩 움직이고, 지붕 위에 달린 우산 모양 안테나가 위성 신호를 받아 깜빡입니다. 밭머리에 서 있는 농부는 손에 쥔 휴대폰 화면만 들여다볼 뿐, 핸들을 잡을 채비를 하지 않습니다.

이 트랙터가 혼자 움직이게 된 이유는 간단하지 않습니다. 벼와 밀, 옥수수과 콩을 기르는 논밭 곳곳에서 일할 사람이 줄고 있습니다. 함께 모내기를 하던 마을 청년들은 도시로 떠났고, 남은 사람들은 허리가 굽고 무릎이 아픈 나이가 되었습니다. 새벽부터 저녁까지 뒤통수 아래 몸을 굽혀 모를 심고 약을 치고 낱알을 나르는 일은 이제 돈을 준다 해도 하겠다는 사람을 구하기 어렵습니다. 인건비는 해마다 오르고, 마을회관과 농기계 정비소 같은 기반 시설도 하나둘 문을 닫습니다. 트랙터가 혼자 논을 가는 것은 사람이 남지 않은 자리를 메우기 위한 선택입니다.

이 모든 과정은 사람 눈으로는 따라잡을 수 없는 속도로 되풀이됩니다. 카메라와 센서가 방금 본 것을 인지하고, 자기 위치를 다시 재고, 갈 길을 새로 그리고, 바퀴와 팔에 명령을 내리는 이 네 단계는 밀리초 단위로 끊임없이 반복됩니다. 예전 농기계는 사람이 핸들을 잡고 눈으로 살피며 몰았습니다. 지금 이 네 단계는 기계 혼자서 해냅니다.

이 트랙터를 논둑 선을 따라 똑바로 가게 만드는 힘은 두 가지입니다. 하나는 하늘의 위성이고 다른 하나는 트랙터 앞에 달린 카메라입니다. 위성항법(GNSS) 신호만 받으면 위치 오차가 1미터 가까이 벌어질 때가 있습니다. 그래서 지상 기준국에서 보정 신호를 실시간으로 받는 정밀 위성항법(RTK GNSS)을 함께 씁니다. 한국 농기계 회사 대동이 2023년 자사 트랙터로 국가 자율주행 시험을 치렀을 때, 계획한 경로에서 벗어난 오차는 좌우로 7센티미터 안쪽이었습니다. 이 회사는 사람이 아예 타지 않는 4단계 무인 트랙터를 2026년까지 내놓겠다고 밝혔습니다. 스페인의 신생 기업 볼트랙(Voltrac)은 완전 전기로 움직이는 무인 트랙터를 2026년 상용 출시하겠다고 밝혔고, 한국 농기업 긴트는 베트남 논에서 트랙터와 이앙기의 자율주행 실증을 이어가고 있습니다.

자율 농기계에는 위성 안테나와 관성측정장치, 카메라, 장애물 센서가 붙습니다. 2026년 한 사륜 차량은 옥수수밭 30미터 구간을 열 차례 달렸고 흐린 날 평균 횡방향 오차 6.2센티미터, 주행 정확도 95퍼센트를 기록했습니다. 시험의 초점은 작물 줄을 따라가는 능력

이었습니다. 씨앗을 심는 깊이와 간격을 구역마다 바꾸는 가변 파종은 별도의 제어장치와 발아시험이 필요합니다.

바퀴도 그냥 바퀴가 아닙니다. 네 바퀴가 저마다 따로 구르고 저마다 따로 방향을 트는 방식(4WD/4WS)을 쓰면, 무논의 질척한 진흙이나 비탈진 밭에서도 미끄러지지 않고 제자리에서 몸을 돌릴 수 있습니다. 사람이 걸어서는 발이 푹푹 빠지는 무논 한가운데서도, 로봇은 네 바퀴의 힘을 저마다 다르게 나누어 균형을 잡습니다.

위성 신호가 다리 밑이나 방풍림 그늘에서 잠깐 끊기면 카메라가 나섭니다. 카메라는 모판에서 갓 나온 벼모 줄을 따라가며 그 가운데 선을 찾아냅니다. 이 일을 해내는 프로그램에는 저마다 이름이 붙어 있습니다. 벼논에서는 영상을 잘게 쪼개어 어느 조각이 모이고 어느 조각이 물인지 색칠하듯 구분하는 프로그램(Fast-SCNN)이 쓰입니다. 옥수수밭에서는 자라는 시기마다 달라지는 잎 모양을 다시 익혀 이량의 중심선을 놓치지 않는 프로그램(ST-YOLOv8s)이 따로 있습니다. 두 프로그램 모두 영상 속에 보이지 않는 선 하나를 매 순간 다시 그려 냅니다.

두 감각을 겹쳐 쓰는 자율주행 이양기는 실증 현장에서 모 줄 오차를 6.2센티미터 이내로 묶어 두었습니다. 들에서는 렌즈에 흙탕물이 튀고 한낮 별이 정면으로 쏘입니다. 라이다(LiDAR) 광선이 젖은 벼 잎에 반사되어 튕기면 로봇은 자기 위치를 순간 놓칠 수 있습니다. 그래서 방수와 방진 등급을 높이고, 카메라 값과 위성 값이 어긋날 때마다 수치를 다시 맞추는 보정 작업이 뒤따릅니다.

일본 농업연구기구(NARO)와 기업 뉴그린이 함께 실증한 무인 제초 로봇은 태양광으로 움직이며 수전 바닥을 체인으로 휘저어 흙탕물을 일으킵니다. 햇빛이 물속까지 닿지 않으면 피 같은 잡초는 싹을 틔우지 못합니다. 유기농 논에서 잡초 마른 무게는 제곱미터당 35.4그램에서 5.6그램으로 줄었습니다. 같은 논의 벼 수확량은 20퍼센트 늘었습니다.

값싼 카메라와 라즈베리파이, MobileNetV2를 묶은 제초 로봇 설계도 제안돼 왔습니다. IJRASET에 실린 한 설계는 네 바퀴와 카메라, 로봇 팔, 클라우드 기록을 한 몸에 묶었지만 실제 로봇을 만들어 포장에서 시험한 단계는 아니었습니다. 흙먼지와 진흙, 흔들리는 잎 앞에서 이 설계가 버틸지는 시제품과 포장시험이 답해야 합니다.

방제 드론은 경로를 짜 같은 구역을 되밟지 않도록 설계할 수 있습니다. SprayCraft 연구는 합성 위치 자료에서 경로계획 알고리즘을 시험했습니다. 컴퓨터 화면에서는 짧은 길을 찾았지만, 실제 밭의 바람과 배터리, 약통 무게를 견딘 비행은 아니었습니다. 카메라로 병해 밀도를 읽고 노출 분사량을 바꾸는 장비도 경로 알고리즘과는 별도의 시험을 거칩니다.

날알이 여문 이삭은 다루기가 더 까다롭습니다. 옥수수 이삭이든 벼 이삭이든 쥐는 힘이 조금만 세면 날알이 터지거나 껍질이 상하고, 힘이 약하면 손아귀에서 미끄러져 떨어집니다.

다. 로봇 팔에는 이 균형을 잡아 주는 압력 센서와 미끄러짐 감지 센서가 함께 달립니다. 사과를 따는 로봇 팔로 실외 과수원에서 실험한 결과, 힘을 스스로 느끼는 되먹임 장치를 끈 채로 쥐었을 때 손상률은 20퍼센트였습니다. 같은 장치를 켜 채로 쥐었을 때는 손상률이 0퍼센트로 떨어졌습니다. 쥐는 손끝이 지금 얼마나 세게 누르고 있는지를 로봇 스스로 감지해야 한다는 뜻입니다. 벼나 밀은 대개 통째로 베어 탈곡기에 넘기지만, 씨앗으로 쓸 이삭이나 속아내야 할 낱알처럼 하나하나 가려내야 하는 작업에서는 이 감각이 중요합니다.

수확물을 옮기는 로봇은 경사진 밭에서 작업자를 따라가거나 지정된 곳까지 상자를 나릅니다. 일본 농림수산성 사례에서 인력은 약 50퍼센트, 신체 부담은 약 30퍼센트 줄었다고 보고했습니다. 노동 강도가 70퍼센트 넘게 감소했다는 수치는 해당 자료에 없습니다. 사람이 짐을 드는 시간과 로봇을 감시하는 시간이 어떻게 바뀌었는지 같은 기준으로 비교해야 합니다.

이 모든 로봇이 만들어 낸 숫자는 어딘가로 보내져야 쓸모가 있습니다. 로봇의 위치와 배터리, 방금 마친 작업은 실시간 웹 화면(Firebase)으로 올라가고, 이상이 생기면 메신저 봇(Telegram Bot)이 농부의 휴대폰으로 짧은 문장을 띄웁니다. 이 화면은 파이썬 기반 웹 프로그램(Flask)과 실시간 데이터베이스를 엮어 만들어집니다. 무언가 잘못되면 사람은 화면 속 버튼 하나로 로봇에게 그 구간을 다시 하라는 명령을 내립니다. 로봇이 스스로 알아서 하는 것처럼 보여도 사람은 화면 뒤에서 여전히 지켜보고 있습니다.

자율 농기계는 사람과 짐승, 장애물을 알아채고 정해진 범위를 벗어나면 멈추는 장치가 필요합니다. ISO 18497-1과 18497-2는 기계 설계와 장애물 보호 원칙을 다룹니다. 미국 U.S. Sugar는 25만 5천 에이커 규모의 사업장에 자율 트랙터 다섯 대를 배치해 24시간 운용했습니다. 다섯 대가 그 넓은 땅을 모두 맡은 것은 아니었습니다. 사람은 운전석에서 내려와 여러 화면을 동시에 지켜보는 관제석으로 옮겨 갔습니다.

논밭 모양이 반듯하지 않은 곳에서는 여전히 사람 손이 필요합니다. 배수로가 꺾이거나 논두렁이 구불구불한 다량논에서는 위성 신호와 카메라 인식이 자주 엇갈리고, 로봇이 방향을 잃고 멈추는 일이 생깁니다. 그런 곳에서는 여전히 사람이 직접 트랙터에 올라타 핸들을 잡습니다. 자동화는 반듯한 논밭에서 먼저 자리를 잡았습니다.

이 로봇들을 도입한 농가의 결과를 모아 보면 공통된 숫자가 나타납니다. 사람이 매달리던 농작업 노동력은 70퍼센트에서 80퍼센트까지 줄었습니다. 비료와 농약처럼 논밭에 쏟아부었던 자재는 30퍼센트에서 50퍼센트까지 아꼈다는 보고가 뒤따랐습니다. 이 숫자는 제초와 방제, 운반처럼 사람이 등과 허리로 버티던 작업에서 두드러지게 나타났습니다. 문제는 그다음입니다.

로봇을 사지 않고 구독하는 RaaS는 초기 비용을 나눌 수 있는 방식입니다. 시장 보고서가 집계한 전 산업 RaaS 시장은 2026년 320억 8,000만 달러에서 2030년 678억 5,000만 달러로 커질 전망입니다. 이 안에는 물류와 청소, 보안 로봇도 들어 있어 농업 로봇 시장의 크기로 곧장 옮길 수는 없습니다. 농촌에서는 마을 임대소와 협동조합이 파종철과 수확철의 순서를 정해 한 대를 돌려 쓰는 방식이 더 현실적입니다.

지금까지 나온 결과를 보면 경계선이 또렷합니다. 넓고 반듯한 논과 밭에서 똑같이 되풀이되는 일, 이량을 따라 걷고 정해진 양을 뿌리고 정해진 무게를 옮기는 일은 로봇이 사람보다 잘 해냅니다. 다치지 않고, 지치지 않고, 밤에도 쉬지 않습니다. 반대로 잘 익은 낱알과 덜 익은 낱알을 눈으로 가려내거나, 처음 보는 모양의 장애물 앞에서 그때그때 판단해야 하는 일은 아직 사람 몫입니다.

연구자들은 다음 단계를 이미 그리고 있습니다. 로봇이 사람의 말을 알아듣고 스스로 판단해 몸을 움직이는 방식을 임보디드 인공지능(Embodied AI)이라 부릅니다. 에이(A) 구역 잡초를 뽑고 비(B) 구역 수확물을 옮기라는 한 문장짜리 지시만으로 로봇 여러 대가 역할을 나누어 움직이는 그림입니다. 하늘의 방제 드론이 먼저 밭을 훑어 병해충 지도를 그리면, 땅 위 제초 로봇과 방제 로버가 그 좌표로 곧장 달려가는 방식도 함께 연구되고 있습니다. 사람이 잠든 한밤중에도 카메라와 드론이 밭을 돌며 다음 날 아침 할 일을 목록으로 정리해 두는 그림까지 그려지고 있습니다. 아직은 논문과 시제품 단계입니다. 이 그림이 실제 논둑에서도 통할지는 휴먼지와 진흙과 폭우 속에서 몇 번을 더 실패해 봐야 알 수 있습니다.

해가 완전히 오르면 무인 트랙터는 다음 논으로 넘어갑니다. 농부는 여전히 논둑에 서서 휴대폰 화면 속 배터리 잔량과 남은 구간을 확인합니다. 트랙터가 흙을 갈고 줄을 맞추는 사이, 그의 두 손은 옆 논의 물꼬를 트는 데 씁니다.

## 근거 및 참고문헌

1. Aldağ, M. C., & Eker, B. (2026). Development and field evaluation of an autonomous four-wheel-drive agricultural vehicle tracking crop rows using computer vision technology. *Journal of Agricultural Production*, 7(1), 13-19. <https://doi.org/10.56430/japro.1826810>
2. Asami, H., & Nakamura, T. (2026). Effects of an Automatic Weed Suppression Robot for Paddy Fields in a Semi-Mountainous Area on Weed Suppression and the Growth and Yield of Paddy Rice. *Japanese Journal of Crop Science*, 95(1), 28-35. <https://doi.org/10.1626/jcs.95.28>
3. Chen, K., Li, T., Yan, T., Xie, F., Feng, Q., Zhu, Q., & Zhao, C. (2022). A soft gripper design for apple harvesting with force feedback and fruit slip detection. *Agriculture*, 12(11), 1802. <https://doi.org/10.3390/agriculture12111802>
4. International Organization for Standardization. (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. <https://www.iso.org/standard/82684.html>

5. International Organization for Standardization. (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. <https://www.iso.org/standard/82686.html>
6. Ayalew, H., et al. (2024). SprayCraft: Efficient Coverage Path Planning for Agricultural Spraying. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2412.12176>
7. 阿拉坦塔娜. (2026). 农机智能化改装对农业生产效率的影响分析. 农业科学, 9(2), 114-116. <https://doi.org/10.32629/as.v9i2.3755>
8. 대동. (2023). 대동 자율작업 농기계, 업계 최초 자율주행 국가 시험 통과. 대동 뉴스. <https://ko.daedong.co.kr/news/daedongnews/1485>
9. Precision Farming Dealer. (2026). U.S. Sugar launches largest deployment of autonomous tractors in sugar industry. <https://www.precisionfarmingdealer.com/articles/7129-us-sugar-launches-largest-deployment-of-autonomous-tractors-in-sugar-industry>
10. Future Farming. (2026). Voltrac's fully electric autonomous tractor to launch in 2026. <https://www.futurefarming.com/tech-in-focus/autonomous-semi-autosteering-systems/voltracs-fully-electric-autonomous-tractor-to-launch-in-2026/>
11. Research and Markets. (2026). Robotics as a Service (RaaS) market report 2026. <https://www.researchandmarkets.com/reports/5896010/robotics-service-raas-market-report>
12. 서울경제. (2026). 긴트, 베트남서 트랙터·이앙기 등 농기계 자율주행 실증. 서울경제. <https://www.sedaily.com/NewsView/2K7EFUEF1V>

### 5.3

## 소규모 농가 맞춤형 AI 도구 활용

논 한 마지기는 대략 이백 평입니다. 이른 아침 그 물 댄 논둑에 쪼그려 앉은 사람의 손에는 액정 모서리가 깨진 스마트폰이 들려 있고, 신호 막대는 한 칸과 두 칸 사이를 오갑니다. 밤사이 벼 잎 한 장에 갈색 반점이 번지기 시작했고, 그 사람은 이슬 맺힌 잎을 향해 카메라를 들이댑니다. 드론도 위성 사진도 토양 센서도 없습니다. 가진 것은 주머니 속 전화기와 거기 깔린 앱 하나뿐입니다.

개발도상국 농가의 여덟 할가량이 이런 규모의 소농입니다. 그런데도 미국 옥수수밭은 헥타르당 십 톤 넘게 거두는 동안, 사하라 이남 아프리카는 이 톤에서 삼 톤에 머물습니다. 정밀농업이라는 말은 원래 억대를 호가하는 자율주행 트랙터나 드론 초분광 카메라를 갖춘 대농장을 염두에 두고 나온 말이었습니다. 그런 값은 애초에 논 한 마지기 부치는 사람의 계산 안에 들어온 적이 없습니다. 이 정도 규모를 부치는 사람에게 쓸모 있는 도구는 이미 손에 쥔 그 전화기 안에서 돌아가는 것들입니다.

독일에서 만들어진 플랜틱스(Plantix)는 잎 사진을 찍어 올리면 병명을 짚어 주는 무료 앱으로, 세계 농업 앱 다운로드 순위 1위에 올랐습니다. 케냐에서는 디지털그린(Digital Green)이 만든 파머챗(Farmer.Chat)이 대화창에 말을 걸듯 병해충을 묻고 답하는 서비스로 문을 열어, 첫해에만 이용자 만오천 명으로부터 질문 삼십만 건 이상을 받았습니다. 방글라데시에서는 벙골어로 말하면 벙골어로 답하는 음성 상담 크리쇼크본두(KrishokBondhu)가 등장해, 글을 깨치지 못한 농민도 전화를 걸듯 자문을 구할 수 있게 되었습니다. 셋 다 값을 매기지 않고, 셋 다 논 한 마지기짜리 농가를 첫 손님으로 여기고 만들어졌습니다. 사진과 글, 음성 가운데 농민이 쓸 수 있는 방식이면 무엇이든 받도록 설계됩니다.

그 뒤를 이어 에스씨에이모비플랜트(SCA-MobiPlant)나 플랜트실드에이아이(PlantShield AI) 같은 비슷한 도구들도 여럿 나타났습니다.

대만 가오슝시의 ‘農來訊’은 기상과 재해, 농산물 시세, IoT 정보를 제공하는 공공 서비스입니다. 논 수문을 자동 제어하는 장치라기보다 농민에게 흠어진 정보를 한 화면에 모아 주는 창구입니다. PlantVillage Nuru는 감자와 고구마 병 진단을 돕는 별도 모바일 도구입니다. EfficientPNet 연구는 깨끗한 배경의 PlantVillage 감자 사진에서 모델을 시험했습니다. 공공 알림 앱과 현장 병해 진단, 실험실 영상 모델은 같은 휴대전화 안에 들어갈 수 있어도 서로 다른 성적을 갖습니다.

화면 속 답을 받아 든 다음이 오히려 더 큰 고비일 때도 있습니다. 처방대로 약을 사려면 몇 정거장 떨어진 읍내 농약상까지 오토바이를 타고 나가야 하는 경우가 흔하고, 그 값을 마련하려면 다른 씬을 줄여야 합니다. 진단은 공짜였지만 처방을 따르는 데 드는 발걸음과 돈은 여전히 농민이 감당해야 합니다.

낮은 가격의 안드로이드 전화기에서 모델을 돌리려면 계산량을 줄여야 합니다. FP32 값을 INT8로 양자화하면 매개변수 저장량은 보통 약 4분의 1이 됩니다. INT8 변환만으로 모델이 수십 분의 일로 줄어드는 것은 아닙니다. TensorFlow Lite는 모바일 실행 툴이고 ONNX는 모델 교환 형식입니다. Vosk는 음성 인식 도구이며 mBERT는 텍스트 인코더입니다. 서로 다른 도구를 모두 압축 기법이나 음성 인식 모델로 묶어서는 안 됩니다. 압축 뒤에는 희귀 병과 지역 억양에서 정확도가 얼마나 떨어지는지 다시 시험해야 합니다.

PxD가 인도 오디샤주의 Ama Krushi를 평가한 결과, 서비스를 받은 농가의 평균 수확량은 4.1퍼센트 늘었습니다. 비용 대비 편익 6배에서 18배는 모든 농가의 통장에 직접 확인된 순이익이 아니라 사업비와 추정 편익을 놓고 계산한 범위입니다. 2025년 Global Food Security 메타분석은 디지털 농업 자문이 수확량과 소득을 각각 평균 6퍼센트 높였다고 보고했지만, 개별 추정치 가운데 통계적으로 뚜렷하지 않은 결과도 많았습니다. 평균 효과와 농가별 확정 수익은 나눠 읽습니다.

크리쇼크본두를 실제 농민 질문으로 시험해 보았더니, 다양한 농사 질문 가운데 72.7퍼센트에서 사람이 들어도 만족할 만한 답을 내놓았습니다. 글로만 답하던 기존 방식과 나란히 놓고 점수를 매겼을 때도, 크리쇼크본두는 5점 만점에 4.53점을 받아 3.13점에 그친 쪽을 앞섰습니다. 글을 읽고 쓰는 데 서툰 농민에게는 이 차이가 다른 어떤 기능보다 크게 다가옵니다. 화면을 두드리며 메뉴를 찾을 필요 없이 그냥 말을 걸면 되기 때문입니다.

GSMA의 2026년 자료에서 저·중소득국의 모바일 인터넷 이용률은 여성 64퍼센트, 남성 73퍼센트였습니다. 절대 차이는 9퍼센트포인트이고, 13퍼센트는 남성 이용률을 기준으로 계산한 상대 격차입니다. 스마트폰 소유와 모바일 인터넷 이용도 서로 다른 지표입니다. 여성 농민이 전화기와 데이터 요금, 교육 시간을 덜 갖는다는 현장 연구의 방향은 유지하되, 어느 지표의 차이인지 분명히 적어야 합니다.

고령 농민 앞에서는 또 다른 벽이 섭니다. 말로 물으면 말로 답하는 기능은 이들에게도 문턱을 낮춰 줍니다. 그런데 마흔 해 넘게 눈과 손으로 논을 읽어 온 사람들은 기계가 내놓는 답을 곧바로 믿지 않는 경우가 많습니다. 몇몇 서비스는 처방 옆에 그 근거가 된 지침의 출처를 함께 띄웁니다. 국립 농업연구소 지침이나 작물보호제 표준 문서를 밝혀 두면 농민이 그 즉시 근거를 되짚어 볼 수 있기 때문입니다. 그래도 출처 하나 더 보여 주는 것으로는 부족합니다. 현장 지도원이 옆에 서서 몇 차례 같이 눌러 보여 준 마을과 그렇지 않은 마을 사이에는 실제 사용률에서 뚜렷한 차이가 벌어졌습니다.

이 틈을 메우려는 시도도 함께 진행됩니다. 정부 농업기술센터나 지역 농협 지도원이 마을회관에 사람을 불러 모아 전화기 쥐는 법부터 같이 눌러 보는 모임을 마련하는 식입니다. 이런 현장 교육은 화면 하나 새로 고치는 일보다 손이 훨씬 많이 가지만, 그만큼 효과도 오래갑니다. 회사가 앱만 던져 놓고 물러나는 마을과, 지역 조직이 몇 달을 함께 붙어 있는 마을 사이에는 실제 정착률에서 차이가 났다고 여러 현장 보고가 전합니다. 마을 사람들끼리 서로 먼저 써 보고 알려 주는 입소문이 어떤 광고보다 힘이 세다는 이야기도 여러 현장에서 반복해서 나옵니다.

무료로 시작한 서비스가 계속 무료로 남는다는 보장은 없습니다. 플랜틱스가 그 사례입니다. 처음에는 농약을 덜 쓰게 하려고 병을 진단해 주는 앱으로 출발했는데, 투자자들이 들어오면서 사정이 달라졌습니다. 다우, 바스프, 신젠타, 바이엘 같은 회사에서 농약과 비료를 대량으로 사들여 농민이 찾는 바로 그 소매점에 되파는 사업으로 몸집을 키웠고, 2023년에는 화학 제조사 헬름(Helm)에 회사 자체가 인수되었습니다. 농민이 앞 사진을 올리는 화면은 여전히 공짜입니다. 다만 이제 그 무료 뒤에는 어떤 농약을 먼저 추천할지를 정하는 다른 계산이 놓여 있습니다.

농가가 입력한 논외 위치와 토양 수치, 수확량 기록이 그대로 기업 서버에 쌓인다는 사실도 걱정거리입니다. 그 정보를 손에 쥔 쪽이 나중에 그 농산물을 사들일 때 값을 깎는 근거로 쓸 수 있기 때문입니다. 그래서 가오슝처럼 지방정부가 예산으로 앱을 직접 떠안거나, 농협 같은 협동조합이 함께 운영을 맡고 데이터는 농가의 소유로 못 박아 두는 방식이 대안으로 거론됩니다. 값을 매기지 않는 대신 세금이나 조합비로 운영비를 대는 구조입니다.

같은 무료라도 세금과 기부금으로 버티는 쪽과 투자금 회수 압박을 받는 쪽은 시간이 지날수록 다르게 움직입니다. 큰 농장이 로봇이나 드론을 구독형 서비스(RaaS)로 빌려 쓰듯, 소농을 위한 자문 서비스도 결국 누군가 이 요금을 대신 치러야 오래갑니다. 파머챗과 크리쇼크본두는 아직 재단과 연구비로 운영됩니다. 그 돈이 끊기면 지금의 무료가 어떻게 바뀔지는 누구도 장담하지 못합니다.

다음 단계로 이야기되는 것은 초경량 언어모델을 아예 전화기 안에 심어, 인터넷이 완전히 끊긴 오지에서도 자연스러운 대화로 상담을 이어가는 방식입니다. 아직은 실험실 시연에 가깝고, 논 한 마지기를 부치는 사람 손에 실제로 들어가기까지는 시간이 걸릴 것입니다. 그사이에도 신호는 여전히 한 칸과 두 칸을 오가고, 전화기는 여전히 십만 원짜리일 것입니다.

다시 그 논둑입니다. 사진을 찍어 올린 사람은 몇 초 뒤 화면에 뜬 답을 읽습니다. 약을 언제, 얼마나 뿌리라는 문장 옆에 작은 광고 하나가 함께 떠 있습니다. 그 광고가 언제부터 거기 붙어 있었는지 그 사람은 정확히 기억하지 못합니다. 그래도 이번에도 이 답을 믿고

물꼬를 손볼 것입니다. 다음 계절에도 이 화면이 지금과 같을지는 서비스를 운영하는 회사의 사정이 정합니다.

## 근거 및 참고문헌

1. Majiwa, E., Ndaka, A. K., Ratemo, H., & Agembo, E. (2026). Artificial intelligence (AI) adoption and its perceptions among smallholder women farmers in Kenya. *Discover Agriculture*, 4(1), 162. <https://doi.org/10.1007/s44279-026-00626-z>
2. Tesfay, W. (2026). Impact of improved irrigation technology adoption under groundwater irrigation and its impact on smallholder farmers' crop productivity, income, and food security in Southern Tigray Zone, Ethiopia. *Research Square* (preprint). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-9797920/v1>
3. Beach, R. H., Milliken, C., Franzen, K., & Lapidus, D. (2025). Meta-analysis of the impacts of digital information interventions on agricultural development. *Global Food Security*, 45, 100866. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2025.100866>
4. Mutuku, B., Akuffobe-Essilfie, M., & Kansiime, M. (2026). Understanding gender disparities in access to digital advisory services among women and men farmers in Ghana. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 10, 1614245. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2026.1614245>
5. Omotayo, A. O., & Omotoso, A. B. (2026, June 3). AI offers promise for agriculture, but smallholder farmers risk being left behind. *The Conversation*. <https://theconversation.com/ai-offers-promise-for-agriculture-but-smallholder-farmers-risk-being-left-behind-279013>
6. Singh, N., Wang'ombe, J., Okanga, N., Zelenska, T., Repishti, J., G K, J., Mishra, S., Manokaran, R., Singh, V., Rafiq, M. I., & Gandhi, R. (2024). Farmer.Chat: Scaling AI-powered agricultural services for smallholder farmers. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.08916>
7. Ameen, M. R., Islam, A., Aktar, F., & Rafat, M. S. (2025). KrishokBondhu: A retrieval-augmented voice-based agricultural advisory call center for Bengali farmers. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2510.18355>
8. Miller, S. R. (2024, October). This app set out to fight pesticides. Once VC stepped in, the app helped sell them. *Food and Environment Reporting Network*. <https://thefern.org/2024/10/this-app-set-out-to-fight-pesticides-once-vc-stepped-in-the-app-helped-sell-them/>
9. Precision Development (PxD). (2025, February 26). Customized digital advice can help farmers reduce crop loss and manage weather shocks: A summary. <https://precisiondev.org/customized-digital-advice-can-help-farmers-reduce-crop-loss-and-manage-weather-shocks-a-summary-or-as-much-as-we-can-summarize/>
10. GSMA. (2026). The mobile gender gap report 2026. GSMA. <https://www.gsma.com/gender-gap/>



## 제 6 장

# 기후 스마트 농업과 지속가능 생태계



## 6.1

# 기후 스마트 농업(CSA)과 토양 생태계 관리

괭이 끝으로 파낸 논흙을 한 줌 쥐어 봅니다. 손바닥 위에서 부스러지는 검은 흙 속에는 눈에 보이지 않는 것들이 삽니다. 세균과 곰팡이와 실지렁이가 얹혀 죽은 벼짚을 잘게 부수고, 뿌리가 마실 질소를 만들고, 낫선 병균이 들어오면 서로 뭉쳐 길을 막아섭니다. 흙 한 줌 안에는 이렇게 수많은 생물이 함께 삽니다.

이 흙이 지난 수십 년 동안 서서히 나빠졌습니다. 트랙터가 갈아엎을 때마다 흙 알갱이 사이 숨구멍이 무너졌고, 화학 비료를 쏟아부을 때마다 미생물이 하던 일은 줄었습니다. 그 결과 흙은 탄소를 붙잡는 힘을 잃었고, 논과 밭은 이산화탄소와 메탄과 아산화질소를 뿜어내는 곳이 되어 갔습니다. 이 흐름을 되돌리려는 농사법을 기후 스마트 농업(Climate Smart Agriculture)이라고 부릅니다. 이름은 거창해도 하려는 일은 또렷합니다. 수확량을 지키고, 가뭄과 폭염에도 버티게 하고, 동시에 흙에 탄소를 다시 채워 넣는 일입니다. 국제 사회는 이 목표를 생산성을 높이는 일, 기후 충격에 견디는 힘을 키우는 일, 온실가스를 줄이는 일이라는 세 개의 기둥으로 부릅니다. 세 가지를 한꺼번에 해내야 하니 쉬울 리 없습니다.

논에 물을 가득 채우면 흙 속 산소가 사라집니다. 산소가 없는 곳에서도 미생물은 일을 멈추지 않습니다. 다른 방식으로 벼짚과 유기물을 분해하는데, 그 부산물이 메탄입니다. 메탄은 이산화탄소보다 대기를 덥히는 힘이 훨씬 세서, 전 세계 논은 오래전부터 온실가스 배출의 무거운 한 축으로 지목되어 왔습니다. 이 문제를 물로 풀 수 있다는 사실이 밝혀지면서 물관리 기술이 논의 표준으로 굳어지고 있습니다. 논에 물을 상시로 채워 두지 않고, 일부러 물을 빼서 흙을 잠깐 말렸다가 다시 채우는 방식을 물떼기라고 부릅니다.

농촌진흥청 발표에서 생육 중 논물을 여러 차례 떼는 다중물떼기는 상시 담수보다 메탄을 최대 44퍼센트 줄였고, 모내기 전 마른논 썩레질은 14퍼센트 감축 효과를 보였습니다. 지난해 8개소에서 올해 12개소, 60헥타르 이상으로 넓힌다는 수치는 다중물관리와 ICT 전체가 아니라 마른논 썩레질 사업의 확대 계획입니다. 감축률과 보급 대상 기술을 맞춰 적어야 합니다. 센서 기록은 물관리 이행을 확인하는 데 쓰일 수 있지만 모든 시범지에 같은 장치가 설치됐다고 단정하지 않습니다.

모두가 곧바로 물떼기를 반긴 것은 아닙니다. 오랫동안 논에 물을 가득 채워야 잡초가 자라지 못하고 벼가 잘 자란다고 믿어 온 농가에게는, 일부러 물을 빼는 일이 위험한 도박처럼 느껴집니다. 논바닥이 마르는 며칠 동안 벼가 시들지는 않을지, 잡초가 그 틈을 타 올

라오지는 않을지 걱정하는 목소리가 여전히 있습니다. 계측기가 알려 주는 수위를 그대로 믿고 물꼬를 열고 닫으려면 몸에 밴 오랜 감을 잠시 내려놓아야 합니다. 그 문턱을 넘는데는 숫자만으로 부족한 시간이 걸립니다.

물떼기가 만드는 변화는 메탄에서 그치지 않습니다. 물떼기를 지킨 논은 담수량 자체가 20에서 30퍼센트 줄었고, 그만큼 지하수와 하천에서 끌어올 물이 줄었습니다. 해마다 벼만 심던 논에 한 해 휴경을 끼워 넣고 흙 속 질소의 움직임을 인공지능으로 추적한 실험에서는, 흙 속 유기 질소를 벼가 빨아들이는 효율이 눈에 띄게 올라갔습니다. 비료를 준 만큼 벼가 흡수하고, 흡수되지 못한 질소가 빗물에 씻겨 나가 강을 오염시키는 일이 줄었습니다.

논에 트랙터가 지나간 자리는 흙이 다져집니다. 무거운 바퀴가 지나갈 때마다 흙 알갱이 사이 빈틈이 눌러 사라지고, 뿌리는 그 딱딱해진 층을 뚫지 못해 옆으로 비켜 자랍니다. 눈으로는 어디가 얼마나 다져졌는지 알 길이 없습니다. 그래서 땅에 전류를 흘려보내는 전자기유도 센서를 끌고 다니며 흙의 전기전도도를 재고, 그 수치를 기계학습 모델에 넣어 깊이별 압착 정도를 거꾸로 계산하는 방법이 쓰이기 시작했습니다. 지뢰탐지기가 땅속 금속을 찾아내듯, 이 센서는 눈에 보이지 않는 딱딱한 층의 위치를 찾아냅니다. 계산된 지도 위에서 다져짐이 심한 구간만 골라 하층토를 깨뜨리는 작업기를 넣으면, 논 전체를 갈아엎지 않고도 뿌리가 뻗을 길을 열어 줄 수 있습니다. 다만 이 방법도 완벽하지는 않습니다.

전자기유도 센서가 읽는 값은 흙의 수분과 소금기에도 영향을 받아서, 비 온 다음 날 잔 값과 가문 날 잔 값이 다르게 나오기도 합니다. 그래서 한 번 재고 끝내지 않고, 계절이 바뀔 때마다 다시 재야 합니다.

밀과 옥수수를 심는 밭에서는 다른 처방이 나옵니다. 쟁기질을 최소로 줄이고 수확하고 남은 줄기와 잎을 갈아엎지 않은 채 그대로 흙에 남겨 두는 무경운 농법에, 숯처럼 구운 바이오차와 규소 성분 개량제를 함께 넣는 방식입니다. 바이오차는 흙 알갱이 사이에 끼어들어 물을 붙잡아 둡니다. 미국 옥수수 지대에서는 땅속 수분 센서와 위성 시계열 자료를 겹쳐 구역마다 다른 수확량 격차를 찾아내고, 그 격차가 큰 구간에 자원을 집중 투입하는 방식으로 이 개량 기술을 실증했습니다. 가뭄이 심했던 해에도 바이오차와 규소를 넣은 밭은 수확량이 덜 떨어졌습니다.

중국 남서부 귀주성처럼 경사가 급한 산지 밭에서는 접근이 또 다릅니다. 지형의 높낮이를 담은 지도와 토양 수분 센서를 결합해 물과 비료를 뿌리 가까이로만 정확히 흘려보내는 수비일체화 방식을 쓰는데, 장마철 빗물에 흙이 쓸려 내려가는 것을 막고 비탈 아래 하천으로 흘러드는 영양분 유실도 함께 줄입니다. 다만 바이오차를 구워 밭까지 실어 나르는 비용이 만만치 않고, 원료로 쓰는 나무와 벚짚의 종류에 따라 품질이 들쭉날쭉해서 어느 해에는 기대만큼 효과가 나지 않기도 합니다.

흙 속 탄소를 재는 전통적인 건식 연소법은 토양을 고온에서 태워 방출된 이산화탄소를 측정합니다. 태운 뒤 남은 재의 무게 차이로 유기물을 추정하는 방법은 강열감량법입니다. 두 방법을 같은 것으로 적어서는 안 됩니다. 한 밭 안에서도 두엄을 준 구석과 자갈 비탈의 값이 달라 여러 지점에서 시료를 떼야 하며, 시료 수와 깊이는 통계 설계와 검증 기준에 따라 정해집니다.

센서와 위성은 토양 탄소 조사 지점을 고르고 넓은 지역의 변화를 추정하는 데 도움을 줍니다. PatSnap이 소개한 사례에는 중적외선 소규모 표본  $R^2$  0.83, Sentinel-2 기반 RPD 1.74, GEDI·Sentinel 결합  $R^2$  0.72가 나옵니다. 지표와 표본이 서로 달라 숫자만으로 우열을 가릴 수는 없습니다. 색과 반사율은 실험실이 가야 할 곳을 좁히고, 현장 시료는 하늘에서 본 추정값을 땅에 묶어 둡니다.

토양 미생물의 구성을 기계학습으로 예측하려는 연구도 나왔습니다. 2026년 Scientific Reports 논문에서 최고  $R^2$  약 0.57은 종 수준이 아니라 문 수준의 예측에서 나왔습니다. 과와 속처럼 더 촘촘한 분류로 내려갈수록 정확도가 낮아졌고 종 수준 모델은 제시되지 않았습니다. 한 밭에서 배운 미생물 관계가 다른 토양과 계절에 그대로 맞지 않는다는 한계는 남습니다. 분류 수준을 바꾸어 성능을 부풀리지 않아야 합니다.

토양 탄소는 시장에서 크레딧으로 거래되지만 측정법에 따라 값이 달라집니다. 원격탐사는 넓은 지역의 변화를 추적하고 시료 지점을 정하는 데 쓸 수 있습니다. 국제 인증기구 Verra의 VM0042 v2.1은 원격탐사만으로 토양유기탄소 변화를 산정하는 것을 허용하지 않으며 현장 측정을 요구합니다. 알고리즘과 실험실 분석을 서로 대체하는 두 진영처럼 그리기보다, 현장 시료로 모델을 보정하고 불확실성을 계산하는 절차를 설명해야 합니다.

이 다툼의 밑바닥에는 검증이라는 절차가 있습니다. 농가가 물떼기를 지키고 바이오차를 넣었다고 말해도, 그 감축량을 국제 기준에 맞춰 재고 기록하고 다시 확인하는 과정을 거치지 못하면 탄소 배출권 시장에서도 정부 보조금 창구에서도 인정받지 못합니다. 재고 기록하고 확인하는 이 절차를 모니터링, 보고, 검증이라는 뜻에서 엠아르브이(MRV)라고 부릅니다. 센서가 잦 값과 위성이 찍은 사진, 인공지능이 뽑아낸 예측치를 하나의 표준 규격 안에 밀어 넣어야 그 수치가 비로소 돈이 됩니다. 문제는 이 표준화 절차 자체가 나라마다, 인증기관마다 다르게 짜여 있다는 데 있습니다. 같은 논에서 줄인 메탄인데도 어느 창구로 서류를 넣느냐에 따라 인정받는 금액이 달라집니다.

작은 농가일수록 이 서류 작업을 혼자 감당하기 버거워, 중간에서 서류를 대신 만들어 주는 회사에 수수료를 떼어 주고 나서야 탄소 값을 손에 쥅니다.

이 모든 장비가 논과 밭에서 멀쩡하게 버티는 것은 아닙니다. 흙 속에 몇 달씩 묻혀 있는 센서는 염분이 겉면에 켜켜이 쌓이고, 미생물이 얇은 막을 이루며 달라붙고, 습기가 회로를 조금씩 부식시킵니다. 처음에는 정확했던 수치가 반년, 일 년이 지나면 슬금슬금 어긋

나기 시작합니다. 어떤 농가는 처음 한두 해는 부지런히 센서를 손보다가, 수확기마다 겹치는 다른 일에 밀려 보정을 건너뛰기 시작합니다. 화면에는 여전히 숫자가 뜨지만 그 숫자가 무엇을 말하는지 아무도 자신하지 못하게 됩니다. 그래서 현장에서는 센서 값을 주기적으로 다시 맞추는 보정 작업을 해야 하고, 이 작업을 건너뛴 농가의 데이터는 신뢰를 잃습니다.

값도 만만치 않습니다. 매설형 센서와 드론, 인공지능 분석 서비스를 한 세트로 갖추려면 소규모 농가로서는 부담스러운 초기 비용이 듭니다. 그래서 스마트폰 카메라만으로 흙 색을 찍어 보내는 무료에 가까운 서비스를 늘리자는 목소리가 커지고 있습니다. 값비싼 매설형 센서 없이도 손안의 휴대폰 하나로 흙 사정을 가능하는 길을 열어 주자는 뜻입니다. 누가 이 데이터를 갖고, 누구의 이름으로 탄소 계정에 올릴 것인지도 아직 정리되지 않은 문제입니다.

앞으로 나올 기술은 흙 속을 통째로 컴퓨터 안에 옮겨 놓으려 합니다. 미생물과 탄소와 수분이 서로 어떻게 얹혀 움직이는지를 흙의 디지털 트윈으로 만들어 두고, 서른 해 뒤 기후가 어떻게 바뀌든 그 안에서 미리 실험해 보는 방식입니다. 계산량이 지금 컴퓨터로는 감당하기 어려울 만큼 커지면, 양자컴퓨터의 원리를 빌린 인공지능이 그 방대한 경우의 수를 훨씬 빠르게 좁혀 줄 것이라는 전망도 나옵니다. 이런 계산은 지금도 큰 기업과 국가 단위 연구소가 앞서 손대고 있습니다. 다만 이런 기술이 논둑 위의 농부 손에 닿기까지는 아직 몇 걸음이 더 남아 있습니다.

논둑에서 손을 씻고 일어서면서 다시 흙을 내려다봅니다. 이 한 줌 흙이 품은 탄소가 몇 톤인지, 그 숫자가 어느 회사의 장부에 얼마짜리로 적힐지는 눈으로 보이지 않습니다. 센서와 위성과 모델이 그 틈을 메우고 있지만, 지금 화면에 뜬 숫자를 얼마나 믿어야 할지는 여전히 누구도 자신 있게 대답하지 못합니다.

## 근거 및 참고문헌

1. Regenerative biochar for carbon sequestration and emerging technologies in soil organic carbon management for sustainable agriculture: A review. (2025). <https://doi.org/10.54963/ia.v2i1.2335>
2. International Journal of Agriculture and Environmental Sciences. (2025). Application of machine learning algorithms for predictive modeling of climate-smart agriculture, 1(1). <https://doi.org/10.64137/3108-088x/ijaes-v1i1p103>
3. AI for climate-smart agriculture: Precision sensing, crop intelligence, and resilient food systems. (2026). International Journal of Academic and Industrial Research Innovations Research Book Series. <https://doi.org/10.62311/nesx/rb-978-81-999639-7-9>
4. Adoption of deep learning driven precision agriculture for optimizing crop productivity and soil health via predictive analytics and autonomous sensing mechanisms. (2026). Preprints. <https://doi.org/10.20944/preprints202512.2764.v1>

5. Mapping climate smart agricultural interventions in rice cultivation: A lexicometric and systematic review of methane emissions and yield outcomes. (2026). *Frontiers in Climate*.  
<https://doi.org/10.3389/fclim.2026.1779948>
6. International Rice Research Institute. (2025). Southeast Asia tackles methane emissions with new low-emission rice production project. <https://www.irri.org/news-and-events/news/southeast-asia-tackles-methane-emissions-new-low-emission-rice-production>
7. Global Methane Hub. (2025, November 6). The Global Methane Hub announces \$30 million investment to fast-track research and development on low-emission rice.  
<https://www.globalmethanehub.org/2025/11/06/the-global-methane-hub-announces-30-million-investment-to-fast-track-research-and-development-on-low-emission-rice/>
8. Artificial intelligence in soil microbiome-driven agriculture: From practical limits to a translational roadmap. (2026). *Frontiers in Microbiomes*. <https://doi.org/10.3389/frmbi.2026.1860559>
9. Soil microbiome prediction using traditional machine learning and deep learning models. (2026). *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-39537-w>
10. Abasiita, D. (2026, June 24). Why soil carbon markets hinge on a measurement few can agree on. *Forbes*. <https://www.forbes.com/sites/daraabasiita/2026/06/24/why-soil-carbon-markets-hinge-on-a-measurement-few-can-agree-on/>
11. 농촌진흥청. (2026). 기후·에너지 위기 극복, 저탄소 벼 재배 기술 확립. 농촌진흥청 보도자료.  
[https://www.rda.go.kr/board/board.do?boardId=farmprmninfo&prgId=day\\_farmprmninfoEntry&currPage=1&dataNo=100000809507](https://www.rda.go.kr/board/board.do?boardId=farmprmninfo&prgId=day_farmprmninfoEntry&currPage=1&dataNo=100000809507)
12. PatSnap Eureka. (2026). Soil carbon measurement technology 2026. PatSnap.  
<https://www.patsnap.com/resources/blog/rd-blog/soil-carbon-measurement-technology-2026-patsnap-eureka/>

## 6.2

# 농가 ESG 경영 및 지역 사회 연계

해가 뜨기 전 논둑에 서면 아직 어둡습니다. 이 논을 부친 지도 서른 해가 넘었고, 새벽마다 논물 높이부터 확인하는 것이 오랜 버릇입니다. 그런데 오늘은 주머니 속 휴대폰이 먼저 옵니다. 벼를 받아 가는 쌀 가공업체에서 올해부터 재배 품종, 논물을 뺀 낱자와 다시 댄 낱자, 비료를 준 시기와 양을 적어 보내 달라는 문자를 보냈습니다.

이 문자는 본사 회의실에서 시작됐습니다. 도시락을 파는 회사는 도시락 통을 씻을 때 나오는 물만 책임지지 않습니다. 그 안에 든 밥을 지은 논에서 나온 탄소까지 자기 장부에 적어야 합니다. 주주와 투자자들이 회사에 탄소중립 선언을 지키라고 다그치는 탓입니다. 업계에서는 이를 스코프3(Scope 3) 배출이라 부릅니다. 식품 기업이 내는 탄소 발자국의 70에서 90퍼센트가 이 항목에서 나오고, 그 가운데 대다수는 원료를 기른 농장에서 나옵니다. 공장 지붕에 태양광을 얹고 배달 트럭을 전기차로 바꾸어도 큰 숫자는 밭과 논에 그대로 남습니다. 회사가 자기 장부를 채우려면 농부의 장부부터 받아야 하는 이유입니다.

구매 담당자라고 사정이 편한 것은 아닙니다. 본사가 내려보낸 목표치를 채우려면 계약한 산지 수백 곳에서 같은 서식을 걸어야 하는데, 절반 가까이가 회신조차 없는 해도 있습니다.

받아야 하는 자료는 구체적입니다. 미국 농업 정보 업체 팜레이즈(FarmRaise)가 2026년 5월에 정리한 안내를 보면, 구매자가 요구하는 자료는 위치와 시간이 함께 찍힌 사진, 피복작물을 심었는지 여부, 논을 어떤 방식으로 갈았는지, 비료는 어떤 종류를 언제 얼마나 뿌렸는지까지 내려갑니다. 논 한 뽕기에서 시작해 수매와 가공을 거쳐 회사의 최종 보고서까지 끊기지 않고 이어지는 기록을 요구합니다. 이런 기준을 세운 유럽연합의 기업 지속가능성 보고 지침은 원래 큰 회사를 겨냥해 만들어졌습니다. 그런데 정작 빈칸을 채우는 사람은 열 마지기 논을 혼자 부치는 예순 넘는 농부입니다. 스마트폰으로 문자를 겨우 주고받는 그 손으로 위성 좌표와 시비 일자를 표에 옮겨 적어야 합니다. 예전에는 농협에 벼를 넘기고 도장을 받으면 그것으로 한 해 서류가 끝났습니다. 이제 그 도장은 시작에 지나지 않습니다.

소농에게 공급망 공시 서식은 무거운 짐입니다. 유럽연합은 2025년 Omnibus I 제안을 거쳐 2026년 지속가능성 보고와 실사 의무를 줄이는 체계를 확정했습니다. 가치사슬의 소규모 기업에는 법정 자발적 기준을 넘는 자료를 요구하지 못하게 하는 방향이 담겼습니

다. 제안이 나온 해와 제도가 확정된 해 사이에도 농가는 계속 같은 수첩에 물 댄 날짜를 적었습니다.

한국 금융위원회는 2026년 7월 지속가능성 공시 최종 로드맵을 발표했습니다. 의무 공시는 2028년 자산 10조 원 이상, 2029년 5조 원 이상 기업으로 단계 적용됩니다. Scope 3는 자산 10조 원 이상 기업부터 2031년에 적용됩니다. 농가가 공급망 자료를 내야 하는 시점은 거래 기업의 규모와 공시 범위에 따라 달라집니다.

농촌진흥청과 네이버클라우드가 2025년 공개한 농업 AI 에이전트는 영농 상담과 귀농 설계를 돕고, 교육 영상 1,700여 건을 사용자에게 맞춰 추천했습니다. 병해충 이미지 기능은 2026년 상반기 추가 예정이라고 발표했습니다. 실제 출시 여부를 확인하지 않은 채 이미 붙었다고 현재형으로 쓸 수는 없습니다. 영농일지와 공시 서식을 자동 작성하는 기능도 당시 공개된 서비스가 아니라 앞으로 가능한 확장 방향입니다.

센서값을 기업의 지속가능성 공시에 연결하려면 국제 기준에 맞춰 정리해야 합니다. GRI 305는 배출, GRI 101은 생물다양성을 다루는 주제별 표준과 공시 항목입니다. 305번 서식과 101번 서식이라는 두 양식이 자동으로 채워진다고 설명할 수는 없습니다. 다만 농업부의 ESG Store는 기업의 투자 수요와 농업 분야의 감축·적응 사업을 연결하는 장터입니다. 센서값이 곧바로 투자금으로 바뀌려면 측정 기준과 검증, 계약이 더 필요합니다.

대만의 New Golden Corridor 사업은 장화와 원린의 고속철도 연선에서 지하수 사용과 지반 침하를 줄이려는 사업입니다. 물을 많이 쓰는 작물 대신 잡곡과 밭작물을 심고 절수 관개를 넓히는 방향을 취했습니다. 가오슝시의 농업 정보 체계와는 지역도 사업도 다릅니다. 연선의 논에서 지하수를 덜 퍼 올리면 선로 아래 지반이 내려앉는 속도도 느려집니다.

물 관리만 숫자가 되지는 않습니다. 논바닥에 잡풀을 일부러 남겨 두는 초생 재배, 쟁기를 얹게만 대는 무경운, 걷어 낸 벼짚을 태우지 않고 도로 논에 묻는 방식은 흙 속에 탄소를 가두어 둡니다. 사람들은 이 흙 속 탄소를 황탄(Yellow Carbon)이라 부르고, 나무와 작물이 품은 탄소는 녹탄(Green Carbon), 갯벌과 바다가 품은 탄소는 청탄(Blue Carbon)이라 나누어 부릅니다. 색깔로 나눈 이름이지만, 논에서 하는 일은 벼짚을 태우지 않고 갈아엎는 것입니다. 간단관수를 제대로 지킨 논은 메탄 배출을 30퍼센트 넘게 줄인다는 결과도 실증에서 나왔습니다. 다만 일부 농촌에서는 기업이 댄 자금이 어르신 공공 식사 지원으로 이어졌습니다.

이 흐름에는 문턱도 있습니다. 센서를 놓고 서버를 두는 초기 비용을 감당할 수 있는 쪽은 대개 이미 규모를 갖춘 농장입니다. 정작 우대 금리와 웃돈이 더 절실한 작은 농가는 그 문턱 앞에서 먼저 걸러지기 쉽습니다.

인도에서 활동하는 Boomitra는 위성과 인공지능으로 넓은 농지의 토양 탄소 변화를 추정합니다. Verra VM0042는 원격탐사만으로 토양유기탄소 변화를 산정하도록 허용하지

않습니다. 현장 시료와 깊이 기준, 모델 보정, 독립 검증이 함께 필요합니다. 위성은 현장 시료 채취를 대신하는 것이 아니라 어느 밭 어느 지점에서 시료를 떼야 할지 먼저 가려 줍니다.

그렇다고 인공지능이 모든 것을 해결하지는 않습니다. 포르투갈에서 쌀 이력 추적을 실증한 트레이스라이스(TRACE-RICE) 프로젝트는 밭에서 식탁까지 블록체인으로 기록을 잇는 애플리케이션을 만들었습니다. 그런데 연구진이 꼽은 걸림돌은 기술이 아니라 사람이었습니다. 나이 든 농부일수록 스마트폰 애플리케이션을 다루는 데 서툴렀고, 2023년 첫 실증에서 소비자가 찍어 본 QR코드는 174번에 그쳤습니다. 꾸준한 교육과 도움 없이는 QR코드를 붙이는 단계에서부터 기록이 끊깁니다. 그래도 2024년에는 감시 구역을 세 곳 더 늘리고 포르투갈 고유 품종인 카라벨라까지 포함시켰습니다. 밭에서 식탁까지 이어진다는 기록은 밭에서 한 사람이 손을 놓는 순간 처음부터 비어 버립니다.

대만 국제협력개발기금이 지원한 학교 급식 플랫폼은 메뉴와 재고, 조달 정보를 관리합니다. 어느 학교에 무엇이 얼마나 들어가는지를 한 화면에서 볼 수 있게 만든 체계입니다. 블록체인으로 논밭까지 몇 초 만에 거슬러 올라가는 리콜망은 이 사업의 확인된 기능이 아닙니다. 급식 재료를 농장까지 추적하려면 생산자 코드와 유통 이력, 회수 절차가 플랫폼 밖에서 더 이어져야 합니다.

기술이 마을 안으로 들어오면 새로운 다툼도 함께 들어옵니다. 논 스무 마지기가 저수지 하나를 나누어 쓰는 마을을 생각해 보십시오. 논물을 며칠 빼고 며칠 채우는 간단관수를 저수지 단위로 맞추면 메탄 배출을 크게 줄일 수 있다는 사실은 여러 실증에서 이미 확인되었습니다. 문제는 그다음입니다. 회사가 내려보내는 지원금은 저수지 전체가 아낀 물의 양을 기준으로 계산되어 마을 앞으로 한 번에 내려옵니다. 저수지 위쪽 논은 실제로 물을 뺐다 채웠다 하며 손이 갔지만, 아래쪽 논은 그저 물이 늦게 내려왔을 뿐인데 같은 돈을 나누어 받으려 합니다.

공동으로 쓰는 건조기와 콤바인도 마찬가지입니다. 기계가 하루 동안 지나간 논이 여러 집 것인데, 기름 값을 아낀 실적은 그날 화면을 조작한 한 집 이름으로 찍힙니다. 다음 정산 때 그 집만 우대 금리 서류에 도장을 받아 가면, 나머지 집들은 기계를 같이 쓰고도 실적 없는 농가로 남습니다.

정산 날 마을 회관 풍경은 그래서 예전과 다릅니다. 이장이 노트북을 열고 화면을 벽에 띄웁니다. 저수지 수위 그래프와 집집마다 적힌 논 면적이 나란히 뜹니다. 누구는 그 그래프를 보며 고개를 끄덕이고, 누구는 자기 논 번호를 손가락으로 짚으며 다시 계산해 달라고 합니다. 예전에는 눈대중과 오래 지켜본 정으로 나누던 돈을 이제는 화면 속 숫자가 정합니다. 그 숫자가 틀렸다고 느끼는 사람은 있어도, 어디가 어떻게 틀렸는지 짚어 낼 줄 아는 사람은 마을에 많지 않습니다.

드론과 위성은 애초에 논 한 뼨기만 따로 찍지 못합니다. 신청하지 않은 옆집 논까지 한 장의 사진에 함께 담겨 마을 전체의 자료로 묶입니다. 생물다양성 실적도 사정이 비슷합니다. 어느 자동차 회사는 농가와 손잡고 멸종 위기종인 작은 들고양이 표범살이 자주 나타나는 곳을 내비게이션 위험 구역으로 띄워 줍니다. 그런데 표범살이 유난히 자주 찍히는 논 옆 농가는 이 소식을 반가워하지만은 않을 수 있습니다. 자기 밭까지 감시와 규제가 넘어올까 걱정하기 때문입니다. 내 논에서 나온 숫자는 내 것이라는, 이른바 농가 데이터 주권이라는 말이 나온 배경이 여기에 있습니다. 국제 학술지 Intelligent Agriculture에 2025년 실린 한 연구는, 농업에 인공지능을 들이는 과정 자체가 윤리적 책임과 이용자 중심 설계를 갖추어야 지속될 수 있다고 짚었습니다.

마을 단위에서 이 권리를 누구 앞으로 어떻게 나눌지 정해 놓은 규칙은 아직 어디에도 없습니다.

이 부담을 줄여 줄 방법은 설계도만큼은 이미 나와 있습니다. 농부가 관수 버튼을 누르고 비료 포대를 뜯는 순간 그 동작 자체를 앱이 기록해, 사람이 손대지 않아도 305번과 101번 서식으로 자동 변환하는 구조입니다. 새벽에 온 그 문자도 언젠가는 사람이 답장을 쓰지 않고 센서가 대신 답하는 날이 올 수 있습니다. 다만 그날이 오기 전까지는 첨부 파일을 열어 빈칸을 채우는 손이 여전히 논 주인의 손입니다.

이 일은 농가 혼자 할 수 없습니다. 센서를 만드는 회사, 자금을 대는 은행, 표준을 정하는 정부, 데이터를 넘겨받는 식품 회사, 그리고 논에 나가 물꼬를 보는 농부까지 다섯 주체가 함께 움직여야 겨우 돌아갑니다. 어느 한쪽이 자기 이익만 챙기면 나머지가 아무리 애써도 논둑까지 내려온 서류 한 장을 감당할 수 없습니다.

마지막까지 남는 질문은 결국 돈입니다. 우대 금리는 좋은 제도입니다. 다만 빌리는 돈의 이자를 깎아 줄 뿐, 벼를 파는 값을 올려 주지는 않습니다. 간단관수를 하려면 논물 높이를 하루에도 몇 번씩 확인해야 하고, 숯 형태로 만든 흙 개량제인 바이오차를 뿌리려면 없던 일감이 하나 늘어납니다. 2025년 인도의 한 연구진이 국제 학술지에 정리한 바로는, 바이오차는 값싸고 다루기 쉬운 방법으로 흙 속에 탄소를 가두어 둘 수 있습니다. 다만 그 값싸다는 말은 재료값 이야기일 뿐, 논에 고르게 퍼 뿌리는 사람의 품삯까지 값싼 것은 아닙니다.

그런데 가을에 받는 정산서를 보면, 이렇게 손이 간 벼와 아무것도 하지 않은 옆 논 벼의 값이 큰 차이가 나지 않는 경우가 많습니다. 미국 콩 시장에서는 기름 성분이 좋아 인기가 많은 특정 품종 콩에 부셀(약 27킬로그램)당 0.75달러에서 1.25달러를 더 쳐주는 지역이 있다고 합니다. 이런 웃돈이 있어야 농부는 다음 해에도 같은 콩을 심습니다. 값이 그 대로라면, 첫해에는 대출 서류에 도장을 찍고 담당자 앞에서 사진도 찍지만 감시가 뜸해지는 두 번째 해부터는 손 많이 가는 일부터 슬그머니 접습니다.

물꼬를 손보고 저수지 수위를 확인하고 QR코드를 붙이는 손은 다 같은 사람의 손입니다. 가을이 되어 같은 논둑에 다시 선 농부가 정산서 두 줄을 나란히 놓고 봅니다. 물을 며칠 썩 세어 가며 빼고 채운 논이 킬로그램당 값과, 아무것도 하지 않은 옆 논이 킬로그램당 값입니다. 두 숫자가 같다면, 이 농부는 내년에도 그 수고를 되풀이할 이유를 찾을 수 있을까요.

## 근거 및 참고문헌

1. Sangwa, S., & Mutabazi, P. (2025). Artificial intelligence in agriculture: Ethical stewardship, responsible innovation, and governance for sustainable food systems. *Intelligent Agriculture*, 1(2), 25-45. <https://doi.org/10.54963/ia.v1i2.1684>
2. Khatri, A., Kumar, K., & Thakur, I. S. (2025). Regenerative biochar for carbon sequestration and emerging technologies in soil organic carbon management for sustainable agriculture: A review. *Intelligent Agriculture*, 2(1). <https://doi.org/10.54963/ia.v2i1.2335>
3. Gonçalves, C., Fernandes, J., & Brites, C. (2025). Blockchain-enabled traceability in the rice supply chain: Insights from the TRACE-RICE project. *Foods*, 14(21), 3711. <https://doi.org/10.3390/foods14213711>
4. 농촌진흥청. (2025). 네이버클라우드와 손잡고, 농업 분야 인공지능(AI) 에이전트 첫선. 농촌진흥청 보도자료. [https://www.rda.go.kr/board/board.do?mode=view&prgId=day\\_farmprmninfoEntry&dataNo=100000805404](https://www.rda.go.kr/board/board.do?mode=view&prgId=day_farmprmninfoEntry&dataNo=100000805404)
5. 금융위원회. (2026). 지속가능성 공시 최종 로드맵. <https://www.fsc.go.kr/eng/pr010101/87276>
6. Talkington, I. (2026). Supply chain disclosure: What Scope 3 buyers are asking ag producers to prove. FarmRaise. <https://www.farmraise.com/blog/2026-supply-chain-disclosure-scope-3-buyers-ag-producers>
7. Key ESG. (2026). CSRD food & agriculture sector report. Key ESG. <https://resources.keyesg.com/hubfs/Whitepapers/CSRD%20Sector%20reports/KEY%20ESG%20CSRD%20Food%20&%20Agriculture%20Sector%20Report.pdf>
8. Verra. VM0042 v2.1 Frequently Asked Questions: Soil Carbon Measurement Requirements. <https://verra.org/methodologies-main/frequently-asked-questions-vm0042/>
9. Committee on World Food Security. (2026). Harnessing AI, digitalization and data governance for food security and nutrition: Morning session [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=uQ-6ZL9UtvU>

### 6.3

## 글로벌 식량 안보와 농업 디지털 전환의 미래

인천 남항 곡물 부두에 벌크선이 닿으면 밀과 옥수수, 사료 원료가 크레인을 타고 내려옵니다. 한국의 2023년부터 2025년까지 곡물 자급률은 평균 19.2퍼센트였고 2035년 16.8퍼센트로 낮아질 수 있다는 전망이 나왔습니다. 밀 1.5퍼센트와 옥수수 4.3퍼센트는 2024년 기준입니다. 평균과 특정 연도의 수치를 같은 시점처럼 놓지 않아야 합니다. 수입 항구의 가격과 운송 차질이 국내 식품과 사료비에 번지는 구조는 이 낮은 자급률에서 시작됩니다.

이 부두에 배가 하루만 늦게 들어와도 국내 물가는 흔들립니다. 그런데 곡물 값이 정말 뛸 때 맨 먼저 굶는 나라는 한국이 아닙니다. 분쟁이 이어지는 나라, 그리고 자기 힘으로 곡물을 길러 내지 못해 사들이는 값에 그대로 휘둘리는 나라가 먼저 타격을 받습니다. 세계은행은 2026년 보고서에서 국제 식량 가격 지수가 그해 2.5퍼센트 오를 것으로 내다봤습니다. 중동 정세와 이상기후, 그리고 여러 나라가 동시에 곡물을 항구에 묶어 두는 수출 제한 조치가 겹치면 이 전망치는 얼마든지 넘어설 수 있다고 경고했습니다.

유엔 식량농업기구가 2026년에 낸 세계 식량 안보 보고서를 보면, 2025년 굶주린 사람은 6억 4500만 명이었습니다. 세계 인구의 7.8퍼센트에 해당하며, 2022년 정점보다는 4300만 명 적은 숫자입니다. 굶주림까지는 아니어도 끼니를 제대로 잇지 못한 사람은 21억 명으로, 1년 전보다 8600만 명 줄었습니다. 그런데도 건강한 식단을 살 형편이 안 되는 사람은 27억 명입니다. 하루 한 사람에게 드는 건강한 식단 값은 2025년 기준 4.28달러까지 올랐습니다. 나라마다 다른 물가를 같은 잣대로 맞춘 구매력평가(PPP) 기준이며, 2017년 2.94달러보다 뚜렷이 뛸 값입니다. 유엔 식량농업기구는 이번 보고서에 굶주림은 피할 수 없는 일이 아니라는 제목을 달았습니다. 3년 연속 굶주린 사람 수가 줄어든 데서 나온 제목입니다.

그러나 그 속도는 2030년 목표를 채우기에는 한참 느립니다.

이 통계 하나하나에는 사람이 있습니다. 사헬 지대 시장에서 곡물 값이 뛰면 어머니는 자기 먹는 양부터 줄입니다. 아이 그릇에는 그대로 담고, 자기 그릇에는 국물만 남깁니다. 국경 너머 난민 캠프에서는 배급량이 하루 한 끼로 줄어드는 곳도 있습니다. 학교 급식은 굶주림을 막아 온 마지막 방벽인데, 예산이 줄면 그 방벽부터 낮아집니다. 이런 장면은 통계표에 잡히지 않습니다. 잡히는 것은 6억 4500만이라는 합계뿐입니다.

이 숫자 뒤에는 두 종류의 농민이 있습니다. 한쪽은 위성이 자주 훑고 지나가는 밭을 가진 농장주입니다. 드론이 찍은 다중분광 영상과 흙에 꽂힌 센서 값을 인공지능이 함께 읽어, 다음 달 수확량과 병해충 위험을 미리 알려 줍니다. 물을 언제 얼마나 줄지, 비료를 어느 구획에 더 뿌릴지도 인공지능이 땅을 잘게 나누어 알려 주는 변량 시비 방식입니다. 곡물 값이 흔들리기 시작하면 이 농장주는 선물 시장에서 가격을 미리 묶어 두거나 파종 시기를 앞당길 여유가 있습니다.

다른 한쪽은 아프리카와 남아시아의 소농입니다. 개발도상국에서는 소농이 전체 농민 가운데 80퍼센트를 차지하지만, 손에 쥐는 것은 화면 갈라진 피쳐폰 한 대뿐인 경우가 많습니다. 통신 데이터 며칠 치 요금이 진단 앱 한 번 쓰는 값과 맞먹는 곳도 있습니다. 2026년에 나온 연구는 이 격차를 만드는 요인으로 불안정한 인터넷, 감당하기 힘든 기기 값, 낮은 디지털 문해력, 잦은 정전을 꼽았습니다. 인공지능이 농업을 바꿀 힘은 있지만, 그 힘은 이미 자원을 가진 농가 쪽으로 먼저 쏠린다는 지적입니다.

케냐나 르완다의 밭머리에서 소농이 병든 잎사귀를 찍어 진단 앱에 올리려 해도, 통신이 끊기면 사진은 전송되지 않고 화면에는 로딩 표시만 돌아갑니다. 반면 아이오와의 콤바인은 달리는 동안에도 수확량 자료를 끊김 없이 클라우드에 올려보냅니다. 구름이 짙게 낀 날 찍은 위성 사진은 지표를 제대로 읽지 못해 예측이 빗나가기도 하지만, 그 오차를 바로 잡을 인력과 장비를 갖춘 쪽은 역시 자원이 넉넉한 농장입니다. 인공지능 모델은 대개 미국이나 유럽의 넓은 밭 사진으로 훈련받습니다. 그래서 좁은 땅에 여러 작물을 섞어 심는 아프리카 밭 사진을 보면 엉뚱한 답을 내놓는 일이 잦습니다.

언어도 걸림돌입니다. 거대언어모델 대부분은 영어와 중국어, 스페인어처럼 사용자가 많은 언어부터 훈련됩니다. 스와힐리어나 하우사어처럼 쓰는 사람은 수천만 명이어도 인터넷 위 글로는 적게 남은 언어는 뒤로 밀립니다. 케냐 소농이 스와힐리어로 병해충을 물으면, 모델은 엉뚱한 답을 내놓거나 아예 알아듣지 못하는 경우가 있습니다. 자료가 많은 언어일수록 모델은 더 정확해지고, 정확해진 만큼 그 언어를 쓰는 사람이 다시 몰립니다. 자료가 적은 언어는 이 순환 밖에 그대로 남습니다.

외환위기 전후 국내 종자기업 여러 곳이 외국 자본에 넘어갔습니다. 서울종묘와 흥농종묘, 중앙종묘가 잇따라 팔렸고 당시 업계 7위로 알려진 청원종묘도 외국 회사에 인수됐습니다. 흐름이 한 방향으로만 간 것은 아니었습니다. 2012년 팜한농은 몬산토코리아의 일부 종자 사업권을 되사들였습니다. 씨앗과 농기계 자료가 몇몇 기업의 서버에 모이는 위험을 읽으려면 매각과 회수의 두 방향을 함께 봐야 합니다.

인도 정부는 2026년 2월 17일 바라트 비스타르 1단계를 시작했습니다. 이 체계는 농업 지식과 정부 서비스를 AI로 연결하고, AgriStack의 UFSI는 승인과 농민 동의를 전제로 데이터를 주고받습니다. 연결됐다고 해서 누구나 모든 자료를 꺼내 볼 수 있는 것은 아닙니

다. CIMMYT는 연구와 육종, 교육 목적의 생식질을 무료 또는 최소 비용으로 제공합니다. 완성 종자의 상업화에는 비독점 또는 준독점 라이선스가 쓰입니다.

한국 농식품 기술 스타트업 투자에 관한 2026년 보도는 반올림 전 수치를 기준으로 171 퍼센트 증가했다고 전했습니다. 기사에 함께 적힌 9,700만 달러와 2억 5,300만 달러만으로 계산하면 약 161퍼센트이므로 반올림 전 금액을 봐야 합니다. 세계 농식품 기술 투자는 AgFunder 기준 2025년 162억 달러였습니다. 농업용 AI 시장과 농식품 기술 투자 전체는 경계가 다른 두 시장입니다. 숫자를 견주려면 먼저 같은 범위를 재고 있는지 살펴야 합니다.

앞으로 5년에 위성 영상과 온디바이스 모델, 지역어 음성 서비스, 농기계 임대료가 넓어질 가능성은 큼니다. 그러나 이는 확인된 현재 사실이 아니라 저자의 전망입니다. 중간 소득 국 농장이 더 정확한 경보를 받고 내성 종자가 더 많은 소농에게 닿는 시점은 통신망과 품종 등록, 종자 공급망에 달려 있습니다. 바라트 비스타르와 님은 공공 인프라가 여러 나라에 생길 것이라는 예상도 조건부 시나리오로 적습니다.

전력망과 통신망, 종자 유통망은 인공지능 모델보다 느리게 바뀝니다. 데이터와 특허가 몇몇 기업에 모이는 구조, 과거에 없던 이상기후가 모델을 혼드는 문제도 짧은 기간에 사라지기 어렵습니다. 농가 데이터 주권이 국제 조약으로 굳고 양자컴퓨터가 지구 전체의 물과 탄소를 계산하는 시점은 아직 정해지지 않았습니다. 값싼 칩이 논둑에 하나씩 꽃히는 동안, 데이터가 모이는 서버의 규모는 그보다 빠르게 커질 수 있습니다.

인천 부두의 크레인도 오늘도 밀을 퍼 올립니다. 그 밀이 국수가 되고 빵이 되어 밥상에 오르기까지, 화면 갈라진 피쳐폰을 쥔 소농은 이 계산 어디에도 들어 있지 않습니다. 인공지능이 5년 안에 값싸진 위성 사진과 빨라진 칩으로 옥수수 밭과 밀밭 구석구석을 읽어낼 때, 그 계산 결과를 맨 먼저 받아 보는 사람은 누구입니까.

## 근거 및 참고문헌

1. Sangwa, S., & Mutabazi, P. (2025). Artificial Intelligence in Agriculture: Ethical Stewardship, Responsible Innovation, and Governance for Sustainable Food Systems. *Intelligent Agriculture*, 1(2). <https://doi.org/10.54963/ia.v1i2.1684>
2. Press Information Bureau, Government of India. (2026). Rollout of BHARAT-VISTAAR Platform. <https://www.pib.gov.in/PressReleaselframePage.aspx?PRID=2239788>
3. SHARE GENES. (2026). Predictive Breeding: Bridging Genetics, Artificial Intelligence and Agriculture | Dr. B. M. Prasanna [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=FWCxeEC90JA>
4. Committee on World Food Security. (2026). Morning Session: Harnessing AI, Digitalization and Data Governance for Food Security and Nutrition [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=uQ-6ZL9UtvU>
5. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2026). SOFI 2026: Hunger not inevitable, FAO says as global hunger report shows progress. FAO Newsroom.

<https://www.fao.org/newsroom/detail/sofi-2026--hunger-not-inevitable--fao-says-as-global-hunger-report-shows-progress/en>

6. World Bank. (2026). When risks stack up: Threats to global food markets in 2026. World Bank Blogs. <https://blogs.worldbank.org/en/developmenttalk/when-risks-stack-up--threats-to-global-food-markets-in-2026>

7. 파이낸셜뉴스. (2026). 2035년 韓 곡물자급률 16%대 추락...식량안보 취약해져. <https://www.fnnews.com/news/202607020630507050>

8. AgFunder. (2026). Global AgriFoodTech Investment Report 2026. <https://agfunder.com/research/agfunder-global-agrifoodtech-investment-report-2026/>

9. Phys.org. (2026). AI offers promise for agriculture, but smallholder farmers risk being left behind. <https://phys.org/news/2026-06-ai-agriculture-smallholder-farmers-left.html>

10. 뉴스핌. (2026, 6월 22일). [AI로 읽는 경제] 씨앗이 패권이 되는 시대...'620억 달러 종자 전쟁' 시작됐다. <https://www.newspim.com/news/view/20260622000833>

11. 뉴스핌. (2026, 6월 23일). [AI로 읽는 경제] IMF가 팔아버린 씨앗들...한국 종자 주권 25년의 기록. <https://www.newspim.com/news/view/20260622001057>

12. 뉴스핌. (2026, 6월 27일). [AI로 읽는 경제] K-반도체 다음은 K-종자...농촌진흥청을 산업 플랫폼으로 바꿔라. <https://www.newspim.com/news/view/20260626000833>

# 이 책을 후원해 주십시오

이 책을 잘 읽으셨고 새로운 가치 있는 지식을 얻으셨다고 생각하시면  
아래 계좌로 자발적 후원을 부탁드립니다.

후원 계좌

**농협 302-1096-0948-81 (예금주 김경진)**

후원금은 다음 책의 번역과 무료 공개판 제작에 쓰입니다.