디지털 전환시대: 농업 4.0의 혁신과 도전

이 주 량*

1. 농업 4.0의 시대

1.1. 농업의 디지털 전환: 패러다임의 변화

농업은 인류 역사상 가장 오래된 산업으로 시대의 변화에 따라 끊임없이 진화해왔다. 이러한 진화의 과정을 농업 1.0부터 농업 5.0까지로 구분하여 살펴볼 수 있다.

〈표 1〉 농업의 진화과정과 차이점

구분	시기	특징	주요기술	생산성
농업 1.0	기원전 10,000년~17세기	수작업 중심의 전통적 농업	간단한 도구 사용, 가축의 힘 활용	낮음, 자급자족 수준
농업 2.0	18세기~20세기 중반	산업혁명의 영향을 받은 기계화 농업	트랙터, 수확기 등 농기계 도입	크게 향상, 대규모 상업농 출현
농업 3.0	20세기 후반~21세기 초	정밀농업의 시작	GPS 기반 농기계, 원격 센싱, GIS	더욱 향상, 자원 사용 효율성 증대
농업 4.0	현재	디지털 기술 기반의 스마트 농업	IoT, AI, 빅데이터, 로봇공학	획기적 향상, 지속가능성 강화
농업 5.0	미래	완전 자동화 및 맞춤형 농업	양자 컴퓨팅, 나노기술, 생체공학의 융합	극대화된 생산성과 환경 조화

자료: 저자 작성.

현재 우리는 농업 4.0 시대의 한가운데에 있다. 농업 4.0은 디지털 기술의 급속한 발전과 함께 찾아온 제4차 산업혁명이 농업 분야에 미친 영향을 대변한다. 이는 단순한 기술의 도입을 넘어 농업의 패러다임 자체를 근본적으로 변화시키는 전환점이다.

* 과학기술정책연구원 선임연구위원(jrleel@stepi.re.kr).

농업 4.0 시대의 핵심은 데이터다. 전통적으로 농업은 자연환경과 인력에 크게 의존해 왔지만, 오늘날에는 빅데이터, 인공지능(AI), 사물인터넷(IoT), 로봇 기술 등이 농업 현장에 적극적으로 도입되면서 정밀농업과 스마트팜이 현실화되고 있다.

농업 4.0의 디지털 전환은 농업 생산성을 획기적으로 향상시키고 있다. 예를 들어, 정밀농업 기술을 도입한 농가들은 평균 15-20%의 수확량 증가와 동시에 20~30%의 물 사용량 감소를 경험하고 있다. 또한, 스마트팜 시스템은 노동력을 30% 이상 절감시키면서도 생산의 일관성과 품질을 크게 향상시키고 있다.

농업 4.0은 또한 지속가능성에 큰 기여를 하고 있다. 정밀농업 기술은 농약과 비료의 과다 사용을 줄이고, 물 사용을 최적화하며, 토양 건강을 개선하는 데 도움을 주고 있다. 이는 환경 보호와 식량안보 강화라는 두 가지 목표를 동시에 달성하는 데 중요한 역할을 한다.

그러나 농업 4.0으로의 전환은 동시에 새로운 도전과제들을 제시하고 있다. 데이터의 소유권과 보안, 기술 격차로 인한 불평등, 윤리적 문제 등이 그것이다. 이러한 과제들을 어떻게 해결해 나가느냐가 농업 4.0의 성공을 좌우할 것이며, 이는 곧 농업 5.0 시대로의 순조로운 이행을 결정짓는 요소가 될 것이다.

1.2. 디지털 전환시대와 농업의 진화

디지털 전환시대의 도래는 농업 분야에 혁명적인 변화를 가져오고 있다. 이 시대는 디지털, 물리적, 생물학적 영역의 경계를 허물며 기술의 융합을 가속화(Big Blur)하고 있으며, 이는 농업의 디지털화와 지능화를 급속도로 진전시키고 있다.

2050년 97억 명으로 증가하는 세계 인구의 식량 수요를 충족시키기 위해 농식품 산업은 현재보다 60% 더 많은 식량을 생산해야 하는 도전에 직면해 있다. 이러한 목표를 달성하기 위해서는 디지털 기술과 바이오 기술을 최대한 활용하여 지속 가능한 방법으로 주요 작물과 축종의 생산성을 한 단계 끌어올려야 한다. 과학자들은 60% 추가 생산을 위하여 디지털 기술 15~20%, 바이오 기술 15~20%, 재활용과 새활용 기술 10%, 식량 분배 개선을 위한 국제정치적 해법이 각각 10% 정도씩 기여해 주기를 희망하고 있다.

특히 디지털 기술과 바이오 기술이 각각 15~20%의 기여를 할 것으로 예상된다는 점은 이 두 분야의 발전과 융합이 미래 농업의 핵심이 될 것임을 시사한다. 이러한 맥락에서, 디

지털 전환시대의 핵심 기술들이 농업 분야에 어떻게 적용되고 있으며, 어떤 변화를 가져오고 있는지 살펴보는 것이 중요하다. 다음 절에서는 이러한 기술들과 그 영향에 대해 살펴보겠다.

1.2.1. 디지털 전환의 핵심 기술과 농업

디지털 전환 시대의 핵심 기술들은 농업 분야에 혁신적인 변화를 가져오고 있다. 인공지능(AI)과 기계학습은 작물 생육 예측 모델 개발과 병해충 조기 진단 등에 활용되어 농업 생산성과 효율성을 크게 향상시키고 있다.

예를 들어, AI 기반 작물 생육 예측 모델은 농가의 수익을 평균 25% 이상 향상시켰으며, 병해충 진단 AI 모델은 95% 이상의 정확도를 보이고 있다. 사물인터넷(IoT)과 센서 기술은 스마트 관개 시스템과 가축 건강 모니터링 등에 적용되어 자원 사용 효율성을 극대화하고 있다. IoT 기반 관개 시스템은 물 사용량을 최대 50%까지 절감하면서도 수확량을 30% 증가시키는 수준까지 발전했고, AI 기반 IoT 가축 모니터링 시스템은 우유 생산량을 15% 이상 증가시켰다. 로봇공학과 자동화 기술은 농업 노동력 부족 문제를 해결하고 작업의 정밀도를 높이는 데 기여하고 있다. 자율주행 농기계는 GPS와 AI를 활용해 1인치 이내의 오차로 작업을 수행할 수 있으며, 노동력을 60% 이상 절감할 수 있다. 수확 로봇의 경우, 일부 작물에 대해 인간 작업자의 90% 효율로 작업할 수 있는 수준에 도달했다. 이러한 기술들의 융합은 정밀농업을 가능케 하여, 농약과 비료의 사용량을 30-50% 줄이면서도 수확량은 10-15% 증가시키는 결과를 가져왔다. 더불어 빅데이터와 AI의 결합은 농업 의사결정의 정확도를 크게 향상시키고 있다. 기후변화에 대응한 최적의 재배 전략 수립, 시장 수요 예측을 통한 생산 계획 수립 등 데이터 기반의 스마트 농업이 실현되고 있으며, 이를 통해 대형 농가들은 평균 20% 이상의 수확량 증가와 함께 경영 위험(risk)을 크게 줄일 수 있게 되었다. 이러한 기술의 발전은 농업을 더욱 정밀하고, 효율적이며, 지속가능한 산업으로 변모시키고 있으며, 식량안보 강화와 환경 보호라는 두 가지 목표를 동시에 달성하는 데 크게 기여하고 있다

1.2.2. 데이터 기반의 의사결정

빅데이터와 AI의 결합은 농업 의사결정의 정확도를 크게 향상시키고 있다. 정밀농업 기술은 드론과 위성 이미지를 AI로 분석하여 작물의 생육 상태, 병해충 발생, 수분 스트레스 등을 조기에 감지하고 대응할 수 있게 해준다. 이를 통해 농가들은 최적의 시기에 필요한 만큼의 자원만을 투입할 수 있게 되었고, 결과적으로 생산성 향상과 환경 부담 감소라는 두 마리 토끼를 잡을 수 있게 되었다.

이러한 데이터 기반 의사결정 시스템은 농업의 전 과정을 최적화하고 있다. 예를 들어, 시장 수요 예측 모델은 농가가 어떤 작물을 얼마나 생산해야 할지 결정하는 데 도움을 주고 있으며, 공급망 최적화 모델은 수확부터 유통까지의 과정을 효율화하여 식품 낭비를 줄이고 신선도를 유지하는 데 기여하고 있다. 이는 농업을 더욱 효율적이고 지속가능한 산업으로 변모시키는 핵심 동력이 되고 있다.

기후 스마트 농업도 데이터 기반 의사결정의 중요한 영역이다. AI 기반 농업 플랫폼들은 기상 데이터, 토양 데이터, 작물 생육 모델 등을 종합적으로 분석하여 기후변화에 대응한 최적의 재배 전략을 제시한다. 이는 기후변화로 인한 농업부문의 위험(risk)을 줄이고, 지속가능한 농업 실현에 기여하고 있다.

1.2.3. 유전공학과 생명공학의 발전

디지털 전환시대는 생명공학 분야의 혁신도 가속화하고 있다. 이러한 혁신은 앞서 언급한 디지털 기술 및 데이터 기반 의사결정 시스템과 결합하여 농업의 생산성과 지속가능성을 한층 더 높이고 있다.

CRISPR(Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats)[1] 유전자 편집 기술은 작물 육종에 혁명을 일으키고 있다. 이 기술을 이용하면 기존 10년이 걸리던 품종 개량을 2년 만에 완료할 수 있게 되었다. 예를 들어, 중국의 연구팀은 CRISPR 기술을 이용해 벼의 수확량을 25% 증가시키는 데 성공했으며, 가뭄 저항성 밀, 병해충 저항성 토마토

1) 크리스퍼(clustered regularly interspaced short palindromic repeats, CRISPR)는 DNA상에 존재하는 18~40개로 구성된 특정 염기서열을 인식하여 DNA 두 가닥을 절단하는 인공 제한효소(engineered nuclease)로 동식물 유전자의 손상된 DNA를 잘라내고 정상 DNA로 교체하는 유전자 편집(genome editing) 기술을 의미한다.
[네이버 지식백과] 크리스퍼 [clustered regularly interspaced short palindromic repeats] (생화학백과)

등 다양한 개량 작물이 개발되고 있다. 또한, 씨 없는 과일 개발, 영양가 향상, 저장성 개선 등 소비자 중심의 품종 개발도 가속화되고 있다.

합성 생물학 기술도 농업에 새로운 가능성을 열고 있다. 이 기술을 통해 식물이 자체적으로 질소 비료를 생산하게 하거나, 인간에게 유용한 영양소를 더 많이 생산하게 하는 등의 연구가 진행 중이다. 예를 들어, 영국의 연구팀은 합성 생물학 기술을 이용해 오메가-3 지방산을 생산하는 유채를 개발했다. 이는 해양 자원 고갈 문제를 해결하면서도 인간의 영양 개선에 기여할 수 있는 혁신적인 접근이다.

이러한 생명공학 기술의 발전은 디지털 기술과 결합하여 더욱 강력한 시너지 효과를 내고 있다. 예를 들어, AI와 빅데이터 분석은 유전자 편집의 정확도를 높이고 예상치 못한 부작용을 미리 예측하는 데 활용되고 있다. 또한, 디지털 트윈 기술을 이용해 가상 환경에서 새로운 작물 품종의 성능을 시뮬레이션 하는 등, 디지털 기술과 생명공학의 융합은 농업 혁신을 가속화하고 있다.

디지털 전환시대가 농업에 미치는 영향은 단순한 생산성 향상을 넘어서고 있다. 이는 농업의 지속가능성을 높이고, 식량안보를 강화하며, 농촌 경제를 활성화하는 등 다방면에서 긍정적인 변화를 이끌어내고 있다. 그러나 동시에 기술 격차로 인한 불평등, 데이터 보안, 윤리적 문제 등 새로운 과제들도 제기되고 있어, 이에 대한 체계적인 대응이 필요한 시점이다.

1.3. 농업 4.0의 개념적 프레임워크와 디지털 농업 생태계

1.3.1. 농업 4.0의 개념적 프레임워크

농업 4.0은 첨단 디지털 기술을 농업 전반에 적용하여 생산성과 지속가능성을 획기적으로 향상시키는 새로운 농업 패러다임이다. 이는 단순한 기술 도입을 넘어 농업 생태계 전체를 디지털화하고 지능화하는 포괄적인 변화를 의미한다.

농업 4.0의 핵심 프레임워크는 데이터 기반 정밀농업에서 시작된다. IoT 센서, 드론, 위성 등 다양한 기기를 통해 수집된 방대한 양의 데이터는 빅데이터 분석과 인공지능 기술을 통해 처리되어 농업 현장의 의사결정에 활용된다. 예를 들어, 미국의 한 대규모 농장에서

는 IoT 센서와 AI 기술을 활용하여 토양 수분, 기후 조건, 작물 생육 상태 등을 실시간으로 모니터링하고 분석한 결과, 물 사용량을 30% 줄이면서도 수확량을 15% 증가시키는 데 성공했다.

자동화 및 로봇 기술의 발전도 농업 4.0의 중요한 축을 이룬다. 자율주행 트랙터, 파종 로봇, 수확 로봇 등이 농업 현장에 도입되면서 노동력 부족 문제를 해결하고 작업 효율성을 크게 높이고 있다. 일본의 경우, 고령화로 인한 농업 인력 감소 문제에 대응하기 위해 로봇 기술을 적극적으로 도입하고 있으며, 이를 통해 노동 생산성을 50% 이상 향상시킨 사례가 보고되고 있다.

블록체인 기술은 농산물의 생산부터 유통, 소비에 이르는 전 과정의 투명성과 신뢰성을 높이는 데 기여하고 있다. 예를 들어, 월마트는 IBM과 협력하여 블록체인 기반의 식품 추적 시스템을 구축했는데, 이를 통해 식품의 원산지 추적 시간을 7일에서 2.2초로 단축시켰다. 이는 식품 안전사고 발생 시 신속한 대응을 가능케 하며, 소비자의 신뢰도 향상에도 기여하고 있다.

클라우드 및 엣지 컴퓨팅(Mobile Edge Computing)[2]의 발전은 농업 데이터의 처리와 활용을 더욱 효율적으로 만들고 있다. 클라우드를 통해 전 세계의 농업 데이터를 통합하고 분석할 수 있게 되었으며, 엣지 컴퓨팅을 통해 현장에서의 실시간 데이터 처리와 의사결정이 가능해졌다. 구글의 자회사인 알파벳 X는 '미네랄 프로젝트'를 통해 전 세계의 농업 데이터를 클라우드에 모아 분석하고, 이를 바탕으로 각 지역에 최적화된 농업 방식을 제안하는 시스템을 개발 중이다.

인공지능 기반 예측 및 최적화 기술은 농업의 불확실성을 크게 줄이는 데 기여하고 있다. AI 기술은 작물의 생육 상태 예측, 병해충 발생 예측, 수확량 예측 등에 활용되어 농업의 효율성을 높이고 있다. 예를 들어, 마이크로소프트의 'FarmBeats' 프로젝트는 AI를 활용해 토양 수분, 영양 상태 등을 정확히 예측하고 최적의 관개 시점을 제안하여 농업 생산성을 크게 향상시키고 있다.

2) 사용자와 가까운 위치에 서버나 컴퓨팅 시스템 등을 위치시켜 수집한 데이터를 빠르게 처리하고 효율적으로 저장할 수 있는 컴퓨팅 방식.

1.3.2. 디지털 농업 생태계

농업 4.0 시대의 디지털 농업 생태계는 다양한 이해관계자들의 협력을 기반으로 한다. 이 생태계에서는 농업인, 농업 기술 기업, 연구 기관, 정부 기관, 소비자 등이 긴밀히 연결되어 데이터와 지식을 공유하고 협력하는 구조가 형성되고 있다. 네덜란드의 푸드밸리(Food Valley)는 이러한 협력 모델의 대표적 사례로, 대학, 연구소, 기업, 정부가 협력하여 농식품 분야의 혁신을 주도하고 있다.

데이터 생태계는 디지털 농업의 핵심 기반이 되고 있다. 농업 현장에서 생성되는 다양한 데이터가 수집, 저장, 분석, 공유되는 체계가 구축되고 있다. 미국의 농업 데이터 연합(ADC, Agricultural Data Coalition)은 농업인들이 자신의 데이터를 안전하게 저장하고 관리할 수 있는 플랫폼을 제공하며, 이를 통해 농업인들이 자신의 데이터를 효과적으로 활용할 수 있도록 지원하고 있다.

오픈 이노베이션 플랫폼의 등장도 디지털 농업 생태계의 중요한 특징이다. 농업 분야의 문제를 해결하기 위해 다양한 주체들이 참여하는 오픈 이노베이션 플랫폼이 등장하고 있다. 예를 들어, 존디어(John Deere)사의 'Operations Center'는 농업인, 소프트웨어 개발자, 농업 서비스 제공업체 등이 협력하여 새로운 농업 솔루션을 개발할 수 있는 플랫폼을 제공하고 있다.

지식 공유 시스템의 발전도 주목할 만하다. 농업 기술과 지식을 공유하고 확산시키는 디지털 플랫폼이 발전하고 있다. 인도의 'Digital Green' 프로젝트는 농업인들이 직접 제작한 교육 비디오를 온라인 플랫폼을 통해 공유함으로써, 효과적인 농업 기술 전파를 실현하고 있다.

새로운 규제 및 정책 프레임워크의 수립도 디지털 농업 생태계의 중요한 부분이다. 농업 4.0 시대에 맞는 새로운 규제와 정책이 수립되고 있다. 예를 들어, EU의 '농장에서 식탁까지(Farm to Fork)' 전략은 디지털 기술을 활용한 지속가능한 식품 시스템 구축을 목표로 하고 있으며, 이를 위한 제도적 기반을 마련하고 있다.

이러한 디지털 농업 생태계는 농업의 생산성과 지속가능성을 획기적으로 향상시킬 것으로 기대된다. 그러나 동시에 기술 격차로 인한 불평등, 데이터 보안, 윤리적 문제 등 새로운 과제들도 제기되고 있다. 예를 들어, 소규모 농가의 첨단 기술 접근성 문제, 농업 데

이터의 소유권과 프라이버시 문제, AI의 의사결정에 대한 책임 소재 문제 등이 주요 쟁점으로 떠오르고 있다.

따라서 농업 4.0의 성공적인 구현을 위해서는 기술혁신뿐만 아니라 제도적, 사회적 혁신도 함께 이루어져야 한다. 농업인의 디지털 역량 강화, 농업 데이터의 표준화와 공유 체계 구축, 농업 4.0 시대에 맞는 새로운 규제 프레임워크 개발 등이 시급한 과제로 인식되고 있다. 이러한 과제들을 해결해 나가는 과정에서 농업 4.0은 단순한 기술 혁명을 넘어 농업과 농촌의 새로운 르네상스를 이끌어낼 것으로 기대된다.

2. 농업 디지털화의 핵심 기술과 농업적 적용

2.1. 인공지능(AI)과 기계학습(ML)의 농업적 적용

인공지능(AI)과 기계학습(ML) 기술은 농업 분야에 혁명적인 변화를 가져오고 있다. 이들 기술은 농작물 생산성 향상, 자원 사용 최적화, 병해충 관리, 수확량 예측 등 다양한 영역에서 활용되며, 정밀농업의 핵심 요소로 자리 잡고 있다.

AI와 기계학습은 작물의 생육 상태를 모니터링하고 최적의 생육 조건을 유지하는 데 중요한 역할을 한다. 이미지 인식 기술을 활용한 AI 시스템은 작물의 잎 색깔, 크기, 형태 등을 분석하여 영양 상태, 수분 스트레스, 병해충 감염 여부 등을 판단할 수 있다. 또한, 기계학습 알고리즘은 기후 데이터, 토양 조건, 작물 생육 데이터 등을 분석하여 최적의 파종 시기, 관개 시점, 비료 투입량 등을 결정하는 데 활용된다. 이를 통해 농부들은 자원 사용을 최적화하고 수확량을 증대시킬 수 있다.

병해충 관리 분야에서도 AI와 기계학습의 활용이 두드러진다. 기상 데이터, 과거 병해충 발생 기록, 작물 생육 상태 등의 데이터를 학습한 AI 모델은 병해충 발생 가능성을 높은 정확도로 예측할 수 있다. 이를 통해 농부들은 사전에 대비책을 마련하고, 필요한 경우에만 선제적으로 방제 조치를 취할 수 있다. 이는 불필요한 농약 사용을 줄이고 환경 부담을 경감시키는 데 기여한다.

수확량 예측과 품질 관리 영역에서도 AI와 기계학습의 역할이 커지고 있다. 위성 이미지, 드론 촬영 데이터, 기상 정보, 토양 데이터 등을 종합적으로 분석하여 수확량을 예측하

고, 이를 바탕으로 농부들은 수확 계획을 수립하고 시장 공급량을 조절할 수 있다. 품질 관리 측면에서도 이미지 인식 기술을 활용한 AI 시스템이 수확된 농산물의 크기, 색상, 형태 등을 분석하여 품질을 등급화하고, 불량품을 선별해내는 데 활용되고 있다.

더 나아가 AI와 기계학습은 농업인의 종합적인 의사결정을 지원하는 시스템으로 발전하고 있다. 이러한 시스템은 기상 예측, 시장 가격 동향, 작물 생육 상태, 자원 가용성 등 다양한 요소를 고려하여 최적의 의사결정을 제안한다. 이를 통해 농업인들은 더욱 정확하고 효율적인 농업 경영을 할 수 있게 되었다.

AI와 기계학습의 농업적부문 적용은 앞으로 더욱 확대될 전망이다. 특히, 엣지 컴퓨팅 기술의 발전으로 현장에서의 실시간 데이터 처리와 의사결정이 가능해지면서, AI의 활용 범위가 더욱 넓어질 것으로 예상된다. 그러나 이러한 기술의 확산을 위해서는 몇 가지 과제도 해결해야 한다. 첫째, 농업 현장의 복잡성과 다양성을 반영할 수 있는 고품질의 데이터 확보가 중요하다. 둘째, AI 모델의 설명 가능성(explainability)을 높여 농업인들의 신뢰를 얻는 것이 필요하다. 셋째, 소규모 농가도 접근할 수 있는 저비용, 사용자 친화적인 AI 솔루션의 개발이 요구된다.

결론적으로, AI와 기계학습 기술은 농업의 생산성, 지속가능성, 회복력을 높이는 핵심 도구로 자리잡고 있다. 이들 기술의 지속적인 발전과 적절한 활용을 통해 농업은 더욱 정밀하고 효율적이며 지속가능한 산업으로 진화해 나갈 것이다.

〈표 2〉 AI와 기계학습의 농업적 적용사례

기업기관	기술제품	적용분야	주요성과
Blue River Technology	See & Spray	제초 관리	제초제 사용량 90% 감소
CropIn	스마트 농업 플랫폼	작물 관리	수확량 25% 증가, 물 사용량 20% 감소
펜실베이니아 주립대학교	딥러닝 기반 병해충 탐지 시스템	병해충 관리	사과나무 병해충 98% 이상 정확도로 식별
농업 정보설계사업협회 (AISCI)	AI 기반 병해충 예찰 시스템	병해충 예측	벼 주요 병해충 평균 10일 전 예측
Google X	Mineral 프로젝트	작물 모니터링 및 수확량 예측	개별 작물 정밀 모니터링 및 수확량 예측
Fujitsu	AI 과일 선별 시스템	품질 관리	작업 효율 30% 이상 향상
IBM	Watson Decision Platform for Agriculture	농업 의사결정 지원	작물별, 지역별 맞춤형 농업 권장사항 제공

자료: 저자 작성.

2.2. 사물인터넷(IoT)과 센서 기술

사물인터넷(IoT)과 센서 기술은 농업 분야에서 정밀농업의 핵심 요소로 자리잡고 있다. 이들 기술은 농업환경을 실시간으로 모니터링하고 제어함으로써 작물 생산성 향상, 자원 사용 최적화, 노동력 절감 등 다양한 이점을 제공하고 있다.

IoT 기술은 다양한 센서들을 네트워크로 연결하여 농장의 여러 요소들을 통합적으로 관리할 수 있게 한다. 토양 수분, 온도, 습도, 일조량, pH 등을 측정하는 센서들이 농장 곳곳에 설치되어 실시간 데이터를 수집하고, 이 데이터는 중앙 시스템으로 전송되어 분석된다. 이를 통해 농부들은 작물의 생육 상태를 정확히 파악하고, 최적의 관개 시기와 양을 결정할 수 있다.

스마트 관개 시스템은 IoT와 센서 기술의 대표적인 적용 사례이다. 토양 수분 센서와 기상 센서의 데이터를 바탕으로 작물의 수분 요구량을 정확히 계산하고, 필요한 시기에 필요한 양만큼의 물을 공급한다. 이를 통해 물 사용량을 크게 줄이면서도 작물의 생산성을 높일 수 있다. 예를 들어, 캘리포니아의 한 포도 농장에서는 IoT 기반의 스마트 관개 시스템을 도입하여 물 사용량을 42% 절감하면서도 수확량을 20% 증가시켰다.

기상 모니터링 분야에서도 IoT와 센서 기술의 활용이 두드러진다. 농장 내 설치된 소형 기상 관측소는 온도, 습도, 강수량, 풍속 등의 미기후 데이터를 실시간으로 수집한다. 이 데이터는 병해충 발생 예측, 서리 피해 방지, 최적 파종 및 수확 시기 결정 등에 활용된다. 노르웨이의 한 사과 농장에서는 IoT 기반 기상 모니터링 시스템을 통해 서리 피해를 90% 이상 줄이는 데 성공했다.

가축 관리 영역에서도 IoT와 센서 기술의 활용이 확대되고 있다. 소, 돼지 등 가축에 부착된 웨어러블 센서는 동물의 활동량, 체온, 심박수 등을 모니터링하여 건강 상태와 발정 시기를 파악한다. 이를 통해 질병을 조기에 발견하고, 번식 성공률을 높일 수 있다. 네덜란드의 한 낙농 농장에서는 IoT 기반 가축 모니터링 시스템을 도입하여 유방염 발생률을 30% 감소시키고, 우유 생산량을 15% 증가시켰다.

온실 자동화 시스템도 IoT와 센서 기술의 중요한 적용 분야이다. 온실 내부의 온도, 습도, CO2 농도, 일조량 등을 실시간으로 모니터링하고 제어함으로써 작물에 최적의 생육 환경을 제공한다. 또한, 원격으로 온실을 관리할 수 있어 노동력을 크게 절감할 수 있다.

그러나 IoT와 센서 기술의 농업적 적용에는 몇 가지 과제도 존재한다. 첫째, 농촌 지역의 불안정한 인터넷 연결성이 IoT 시스템의 원활한 작동을 방해할 수 있다. 둘째, 초기 설치 비용이 높아 소규모 농가의 도입이 어려울 수 있다. 셋째, 데이터 보안과 프라이버시 문제가 우려된다. 넷째, 다양한 센서와 기기들 간의 상호운용성 확보가 필요하다.

결론적으로, IoT와 센서 기술은 농업의 디지털화를 이끄는 핵심 동력이 되고 있다. 이들 기술은 농업생산의 정밀성과 효율성을 크게 높이고, 지속가능한 농업 실현에 기여하고 있다. 향후 5G 기술의 보급, 저전력 장거리 통신기술(LPWAN)의 발전, 센서의 소형화 및 저가격화 등으로 인해 IoT와 센서 기술의 농업적 활용은 더욱 확대될 전망이다.

〈표 3〉 IoT와 센서 기술의 농업적 적용 사례

기업기관	기술제품	적용분야	주요성과
California Vineyard	IoT 기반 스마트 관개 시스템	수자원 관리	물 사용량 42% 절감, 수확량 20% 증가
Norwegian Apple Farm	IoT 기반 기상 모니터링 시스템	기상 관리	서리 피해 90% 이상 감소
Dutch Dairy Farm	IoT 기반 가축 모니터링 시스템	가축 관리	유방염 발생률 30% 감소, 우유 생산량 15% 증가
Japanese Tomato Farm	IoT 기반 온실 자동화 시스템	시설 농업	생산성 50% 향상, 에너지 사용량 25% 절감
Semios	IoT 기반 병해충 관리 시스템	병해충 관리	농약 사용량 50% 감소, 수확량 20% 증가
Cropx	토양 센서 및 데이터 분석 플랫폼	토양 관리	물 사용량 30% 절감, 비료 사용량 20% 감소
Connecterra	AI 기반 가축 행동 분석 시스템	가축 관리	우유 생산량 30% 증가, 항생제 사용량 50% 감소

자료: 저자 작성.

2.3. 빅데이터 분석과 의사결정 지원 시스템

빅데이터 분석과 의사결정 지원 시스템은 현대 농업의 핵심 기술로 자리 잡고 있다. 이들 기술은 방대한 양의 농업 관련 데이터를 수집, 처리, 분석하여 농업인들에게 보다 정확하고 시의적절한 의사결정을 지원함으로써 농업 생산성과 지속가능성을 크게 향상시키고 있다.

농업 분야의 빅데이터는 다양한 소스에서 수집된다. 위성 이미지, 드론 촬영 데이터, 기

상 정보, 토양 센서 데이터, 작물 생육 정보, 농기계 운영 데이터, 시장 가격 정보 등이 실시간으로 수집되고 통합된다. 이렇게 수집된 빅데이터는 고급 분석 기법을 통해 처리되어 영농행위를 위한 의사결정에 도움을 주는 유용한 정보들로 변환된다.

작물 수확량 예측은 빅데이터 분석의 대표적인 적용 사례이다. 기상 데이터, 토양 정보, 위성 이미지 등을 종합적으로 분석하여 작물의 수확량을 높은 정확도로 예측할 수 있다. 예를 들어, 미국의 농업 기술 기업인 Climate Corporation은 빅데이터 분석을 통해 옥수수와 대두의 수확량을 필지 단위로 예측하여 농부들의 의사결정을 지원하고 있다. 이를 통해 농부들은 수확량을 최대 25% 증가시킬 수 있었다.

병해충 관리 분야에서도 빅데이터 분석이 큰 역할을 하고 있다. 기상 데이터, 작물 생육 정보, 과거 병해충 발생 기록 등을 분석하여 병해충 발생 위험을 예측하고, 최적의 방제 시기와 방법을 제안한다. 인도의 농업 기술 스타트업인 CropIn은 AI와 빅데이터 분석을 결합한 병해충 예측 모델을 개발하여 농약 사용량을 40% 줄이면서도 작물 피해를 20% 감소시켰다.

정밀농업을 위한 의사결정 지원 시스템도 빅데이터 분석을 기반으로 한다. 이 시스템은 토양 조건, 기상 정보, 작물 생육 상태 등을 종합적으로 분석하여 최적의 파종 시기, 비료 투입량, 관개 시기 등을 제안한다. 네덜란드의 농업 기술 기업인 Dacom은 빅데이터 기반의 의사결정 지원 시스템을 통해 농부들의 물과 비료 사용량을 30% 줄이면서도 수확량을 20% 증가시켰다.

시장 분석과 가격 예측에도 빅데이터 분석이 활용된다. 글로벌 농산물 시장 동향, 기상 정보, 작물 생산량 예측 데이터 등을 분석하여 농산물 가격을 예측하고, 농부들의 판매 전략 수립을 지원한다. 미국의 Farmers Business Network는 빅데이터 분석을 통해 농산물 가격과 농자재 가격 정보를 제공하여 회원 농가들의 수익성을 평균 15% 향상시켰다.

농업 보험 분야에서도 빅데이터 분석이 혁신을 가져오고 있다. 위성 이미지, 기상 데이터, 수확량 데이터 등을 분석하여 보다 정확한 위험 평가와 보험금 산정이 가능해졌다. 인도의 ICICI Lombard는 위성 데이터와 기상 정보를 활용한 농업 보험 상품을 개발하여 보험금 지급 소요 시간을 3주에서 3일로 단축시켰다.

그러나 농업 분야의 빅데이터 활용에는 몇 가지 과제도 존재한다. 첫째, 데이터의 품질과 표준화 문제가 있다. 다양한 소스에서 수집된 데이터의 통합과 정제가 필요하다. 둘째,

데이터 소유권과 프라이버시 문제가 있다. 농업인들이 자신의 데이터를 공유하는 것을 꺼릴 수 있다. 셋째, 농업인들의 데이터 리터러시(literacy)[3] 향상이 필요하다. 즉, 빅데이터 분석 결과를 올바르게 해석하고 활용할 수 있는 능력이 요구된다.

결론적으로, 빅데이터 분석과 의사결정 지원 시스템은 농업의 디지털 전환을 이끄는 핵심 동력이 되고 있다. 이들 기술은 농업생산의 정밀성과 효율성을 크게 높이고, 지속가능한 농업 실현에 기여하고 있다. 향후 5G 기술의 보급, 엣지 컴퓨팅의 발전, AI 기술의 고도화 등으로 인해 농업 분야의 빅데이터 활용은 더욱 확대될 전망이다.

〈표 4〉 빅데이터 분석과 의사결정 지원 시스템의 농업적 적용 사례

기업기관	기술제품	적용분야	주요성과
Climate Corporation	필지별 수확량 예측 모델	수확량 예측	수확량 최대 25% 증가
CropIn	AI 기반 병해충 예측 모델	병해충 관리	농약 사용량 40% 감소, 작물 피해 20% 감소
Dacom	빅데이터 기반 의사결정 지원 시스템	정밀농업	물과 비료 사용량 30% 감소, 수확량 20% 증가
Farmers Business Network	농산물 및 농자재 가격 분석 플랫폼	시장 분석	회원 농가 수익성 평균 15% 향상
ICICI Lombard	위성 데이터 기반 농업 보험	농업 보험	보험금 지급 소요 시간 3주에서 3일로 단축
aWhere	기상 데이터 분석 플랫폼	기상 예측	작물 수확량 10% 증가, 물 사용량 20% 감소
Conservis	농장 관리 및 데이터 분석 플랫폼	농장 경영	농장 운영 효율성 35% 향상

자료: 저자 작성.

2.4. 로봇공학과 자동화 시스템

로봇공학과 자동화 시스템은 농업 분야에서 노동력 부족 문제를 해결하고 생산성을 높이는 핵심 기술로 주목받고 있다. 이들 기술은 정밀성, 효율성, 일관성을 제공하여 농업생산 과정을 혁신적으로 변화시키고 있다.

자율주행 트랙터는 농업용 로봇의 대표적인 사례이다. GPS와 컴퓨터 비전 기술을 활용

3) 리터러시란, 원래 '글을 읽고 쓸 줄 아는 능력'을 의미하는 단어이나, 최근에 들어 복잡한 사회 구조와 커뮤니케이션 변화로 인해 이해와 대처 능력을 포함한 개인의 전반적인 역량을 의미하게 되었다. 즉, 영어 단어 'Literacy (문해)'가 '글을 읽고 쓸 줄 아는 능력'을 말하듯, 데이터 리터러시는 데이터를 활용하는 능력을 의미하는 것이다.

하여 정확한 경로를 따라 움직이며, 파종, 시비, 수확 등의 작업을 수행한다. 미국의 농기계 제조업체인 John Deere는 완전 자율주행 트랙터를 개발하여 농부들의 노동 시간을 60% 이상 절감하고, 연료 효율을 20% 향상시켰다.

과수원과 포도원에서는 자동 수확 로봇의 활용이 증가하고 있다. 이들 로봇은 컴퓨터 비전과 머신러닝 기술을 이용해 과일의 숙성도를 판단하고, 로봇 팔을 이용해 정확하게 수확한다. 예를 들어, 미국의 스타트업 Abundant Robotics는 사과 수확 로봇을 개발하여 수확 비용을 50% 이상 절감하고, 수확 시간을 30% 단축시켰다.

온실 자동화 시스템은 작물의 생육 환경을 정밀하게 제어한다. 온도, 습도, CO2 농도, 광도 등을 센서로 측정하고, 자동으로 조절하여 최적의 생육 조건을 유지한다.

무인 항공기(드론)도 농업 분야에서 중요한 역할을 하고 있다. 드론은 작물 모니터링, 정밀 살포, 토양 분석 등 다양한 용도로 활용된다.

로봇 착유 시스템은 낙농업에 혁명을 가져오고 있다. 소가 자발적으로 착유실에 들어오면 로봇이 자동으로 유두를 감지하고 착유를 수행한다. 스웨덴의 DeLaval은 자동 착유 시스템을 통해 우유 생산량을 10% 증가시키고, 노동력을 50% 절감하는 효과를 얻었다.

자동 급이 시스템은 축산업에서 널리 사용되고 있다. 이 시스템은 각 동물의 영양 요구량에 맞춰 사료를 자동으로 배합하고 공급한다. 네덜란드의 Lely는 자동 급이 로봇을 개발하여 사료 효율을 15% 개선하고, 노동 시간을 70% 단축시켰다.

로봇 제초기는 제초제 사용을 줄이면서 효과적으로 잡초를 제거한다. 카메라와 AI를 이용해 작물과 잡초를 구별하고, 정밀하게 제초 작업을 수행한다. 스위스의 ecoRobotix는 태양광으로 작동하는 자율 제초 로봇을 개발하여 제초제 사용량을 대폭 감소시켰다.

그러나 농업 로봇과 자동화 시스템의 도입에는 몇 가지 과제가 있다. 첫째, 초기 투자 비용이 높아 소규모 농가의 도입이 어려울 수 있다. 둘째, 복잡한 농업 환경에 대응할 수 있는 더욱 정교한 AI와 센서 기술이 필요하다. 셋째, 농업 로봇의 안전성과 신뢰성 확보가 중요하다. 넷째, 농업인들의 기술 수용성과 교육이 필요하다[9].

결론적으로, 로봇공학과 자동화 시스템은 농업의 미래를 근본부터 바꾸고(reshaping) 있다. 이들 기술은 노동력 부족 문제를 해결하고, 생산성과 지속가능성을 높이는 데 크게 기여하고 있다. 향후 AI 기술의 발전, 5G 네트워크의 보급, 배터리 기술의 향상 등으로 인해 농업 로봇의 성능과 활용도는 더욱 높아질 전망이다.

〈표 5〉 로봇기술의 농업적 적용 사례

기업/기관	기술/제품	적용 분야	주요 성과
John Deere	자율주행 트랙터	경작	노동 시간 60% 절감, 연료 효율 20% 향상
Abundant Robotics	사과 수확 로봇	과수 수확	수확 비용 50% 절감, 수확 시간 30% 단축
Priva	AI 기반 온실 자동화 시스템	시설 농업	에너지 사용량 30% 절감, 생산성 20% 향상
DJI	농업용 드론	작물 관리	농약 살포 효율 40% 향상, 물 사용량 90% 절감
DeLaval	로봇 착유 시스템	낙농업	우유 생산량 10% 증가, 노동력 50% 절감
Lely	자동 급이 로봇	축산업	사료 효율 15% 개선, 노동 시간 70% 단축
ecoRobotix	태양광 자율 제초 로봇	잡초 관리	제초제 사용량 90% 감소

자료: 저자 작성.

3. 디지털 기술이 농업 가치사슬에 미치는 영향

3.1. 생산: 정밀농업과 스마트팜의 경제성

정밀농업과 스마트팜은 디지털 기술을 활용하여 농업 생산성을 높이고 자원 사용을 최적화하는 혁신적인 농업 방식이다. 이들 기술은 농업 생산의 경제성을 크게 향상시키고 있으며, 농가의 수익성 개선에 기여하고 있다.

정밀농업은 GPS, 원격 감지, IoT 센서 등의 기술을 활용하여 농경지의 위치별 특성에 맞춰 최적의 농업 활동을 수행하는 방식이다. 이를 통해 투입 자원의 효율성을 높이고 수확량을 증대시킬 수 있다. 미국 농무부(USDA)의 연구에 따르면, 정밀농업 기술을 도입한 농가의 경우 평균적으로 수확량이 10% 증가하고, 비료와 농약 사용량은 15% 감소하는 것으로 나타났다.

구체적인 사례로, 미국 일리노이주의 한 옥수수 농장은 정밀농업 기술을 도입한 후 헥타르당 수확량이 12.5톤에서 14톤으로 증가했으며, 비료 사용량은 20% 감소했다. 이로 인해 농가의 순이익이 헥타르당 약 200달러 증가한 것으로 보고되었다.

스마트팜은 IoT, 빅데이터, AI 등의 기술을 활용하여 작물 생육 환경을 최적으로 제어하는 첨단 농업 시스템이다. 특히 시설원예 분야에서 큰 경제적 효과를 보이고 있다. 네덜란드의 한 연구에 따르면, 스마트팜 기술을 도입한 온실의 경우 에너지 사용량이 30% 감소하고, 물 사용량은 60% 절감되었으며, 생산성은 25% 향상된 것으로 나타났다.

한국의 경우, 농림축산식품부의 보고서에 따르면 스마트팜을 도입한 농가의 생산성이 평균 30% 증가하고, 노동력은 20% 절감되는 효과가 있었다. 특히 파프리카 재배 농가의 경우, 스마트팜 도입 후 단위면적당 생산량이 기존 대비 대략 40% 증가하고, 에너지 비용은 25% 절감되었다.

정밀농업과 스마트팜의 경제성은 단순히 생산성 향상과 비용 절감에 그치지 않는다. 품질 향상과 안정적인 생산으로 인한 부가가치 창출도 주목할 만하다. 예를 들어, 일본의 한 딸기 농장은 AI를 활용한 환경 제어 시스템을 도입하여 고품질 딸기의 생산 비율을 70%에서 90%로 높였으며, 이로 인해 농가 수익이 35% 증가했다.

또한, 정밀농업과 스마트팜은 농업의 예측 가능성을 높여 경영 리스크를 줄이는 데도 기여한다. 기상 데이터와 작물 생육 데이터를 분석하여 수확량을 정확히 예측함으로써, 농가는 더 효과적인 판매 전략을 수립할 수 있다. 미국의 한 포도 농장은 AI 기반 수확량 예측 모델을 도입하여 예측 정확도를 90% 이상으로 높였고, 이를 통해 계약 재배 물량을 최적화하여 수익성을 15% 개선했다.

그러나 정밀농업과 스마트팜의 도입에는 상당한 초기 투자 비용이 필요하다는 점을 고려해야 한다. 미국 농무부의 조사에 따르면, 정밀농업 시스템 구축에 헥타르당 평균 500~1,000달러의 비용이 소요되며, 스마트팜의 경우 기존 시설 대비 30~50% 높은 초기 투자가 필요한 것으로 나타났다. 따라서 농가의 규모와 재배 작물의 특성, 지역적 여건 등을 고려한 맞춤형 도입 전략이 필요하다.

정부의 정책적 지원과 금융 지원도 중요한 역할을 한다. 예를 들어, 한국 정부는 스마트팜 구축 비용의 최대 50%를 지원하는 정책을 시행하고 있으며, 이를 통해 많은 중소 농가들이 스마트팜을 도입할 수 있었다.

결론적으로, 정밀농업과 스마트팜은 농업 생산의 경제성을 크게 향상시키는 핵심 기술로 자리잡고 있다. 생산성 향상, 비용 절감, 품질 개선, 위험(risk)관리 등 다양한 측면에서 농가의 수익성 개선에 기여하고 있다. 향후 기술의 발전과 함께 초기 투자 비용이 낮아지

고 사용 편의성이 높아진다면, 정밀농업과 스마트팜의 경제적 효과는 더욱 커질 것으로 전망된다.

3.2. 유통 및 소비: 데이터 기반의 공급망 혁신

디지털 기술의 발전은 농산물의 유통 및 소비 과정에 혁신적인 변화를 가져오고 있다. 빅데이터 분석, IoT, 블록체인 등의 기술을 활용한 데이터 기반의 공급망 혁신은 농산물의 신선도 유지, 유통 효율성 향상, 식품 안전성 강화 등 다양한 측면에서 긍정적인 영향을 미치고 있다.

농산물 유통에서 가장 큰 변화 중 하나는 콜드체인 시스템의 고도화이다. IoT 센서와 빅데이터 분석을 활용한 스마트 콜드체인 시스템은 농산물의 온도, 습도, 진동 등을 실시간으로 모니터링하고 제어함으로써 신선도를 극대화한다. 미국의 한 연구에 따르면, 이러한 스마트 콜드체인 시스템의 도입으로 농산물의 폐기율이 평균 25% 감소하고, 유통 기간이 30% 연장되는 효과가 있는 것으로 나타났다.

블록체인 기술은 농산물의 이력추적 시스템을 혁신적으로 개선하고 있다. 생산부터 소비자에 이르는 전 과정의 정보를 투명하게 기록하고 공유함으로써 식품 안전성을 높이고 소비자 신뢰를 증진시킨다. 월마트와 IBM이 협력하여 개발한 식품 이력추적 시스템은 망고의 원산지 추적 시간을 7일에서 2.2초로 단축시켰으며, 이는 식품 안전사고 발생 시 신속한 대응을 가능케 한다.

AI와 빅데이터 분석은 농산물 수요 예측의 정확도를 크게 향상시키고 있다. 기상 데이터, 소비자 행동 패턴, 시장 동향 등 다양한 데이터를 분석하여 정확한 수요를 예측함으로써 농산물 재고 관리를 최적화하고 식품 낭비를 줄일 수 있다. 일본의 편의점 체인 세븐일레븐은 AI 기반 수요 예측 시스템을 도입하여 식품 폐기물을 연간 16% 감소시키고, 결품률을 30% 낮추는 성과를 거두었다.

온라인 플랫폼을 통한 농산물 직거래도 급속히 확대되고 있다. 이는 유통 단계를 축소하여 농가의 수익성을 높이고 소비자에게는 신선한 농산물을 합리적인 가격에 제공한다. 한국의 경우, 농산물 온라인 거래액이 2020년 기준 전년 대비 46.6% 증가했으며, 이는 전체 온라인 쇼핑 거래액 증가율 18.4%를 크게 상회하는 수치이다.

디지털 기술은 또한 소비자의 농산물 구매 행동에도 큰 변화를 가져오고 있다. 모바일 앱을 통해 농산물의 상세 정보를 쉽게 확인할 수 있게 되면서, 소비자들의 충분한 정보를 바탕으로 한 선택(informed choice)가 증가하고 있다. 영국의 한 연구에 따르면, QR코드를 통해 농산물 정보를 제공받은 소비자의 68%가 구매 결정에 이를 적극 활용했으며, 이는 유기농 및 지속가능한 농산물에 대한 수요 증가로 이어졌다.

한편, 빅데이터 분석을 통한 개인화된 마케팅도 농산물 소비 촉진에 기여하고 있다. 소비자의 구매 이력, 선호도 등을 분석하여 맞춤형 상품을 추천함으로써 구매 전환율을 높이고 있다.

그러나 이러한 데이터 기반의 공급망 혁신에는 몇 가지 과제도 존재한다. 첫째, 데이터의 표준화와 통합 관리 체계 구축이 필요하다. 둘째, 소규모 농가나 영세 유통업체의 디지털 전환을 위한 지원이 요구된다. 셋째, 개인정보 보호와 데이터 보안 강화가 중요하다.

결론적으로, 데이터 기반의 공급망 혁신은 농산물 유통 및 소비의 효율성과 투명성을 크게 향상시키고 있다. 이는 농가의 수익성 개선, 소비자 만족도 증대, 식품 낭비 감소 등 다양한 측면에서 긍정적인 영향을 미치고 있다. 향후 5G, AI 등 첨단 기술의 발전과 함께 농식품 분야의 디지털 전환은 더욱 가속화될 전망이다.

3.3. 자원 관리: 효율성 향상과 환경 영향 저감

디지털 기술의 발전은 농업 분야의 자원 관리에도 혁신적인 변화를 가져오고 있다. 정밀농업, IoT, AI 등의 기술을 활용한 스마트 자원 관리 시스템은 물, 비료, 농약 등의 투입 자원 사용 효율성을 크게 향상시키고, 이를 통해 환경 영향을 저감하는 데 기여하고 있다.

수자원 관리는 디지털 기술 적용의 대표적인 사례이다. 정밀 관개 시스템은 토양 수분 센서, 기상 데이터, 작물 생육 정보 등을 종합적으로 분석하여 필요한 시기에 필요한 양의 물만을 공급한다. 캘리포니아의 한 연구에 따르면, 이러한 스마트 관개 시스템의 도입으로 농업용수 사용량이 평균 30% 감소하고, 작물 생산성은 20% 향상되는 효과가 있는 것으로 나타났다.

비료 관리 분야에서도 디지털 기술의 활용이 확대되고 있다. 위성 이미지와 드론을 이용한 원격 센싱 기술은 작물의 영양 상태를 정확히 파악하고, 필요한 곳에 필요한 양의 비료

만을 정밀하게 살포할 수 있게 한다. 독일의 한 연구에서는 이러한 정밀 비료 살포 기술을 통해 비료 사용량을 25% 줄이면서도 수확량은 5% 증가시킬 수 있었다고 보고했다.

농약 사용에 있어서도 디지털 기술은 큰 변화를 가져오고 있다. AI와 이미지 인식 기술을 활용한 정밀 방제 시스템은 병해충을 조기에 감지하고 필요한 부분에만 선택적으로 농약을 살포한다. 일본의 한 벼농사 지역에서는 이 기술을 도입하여 농약 사용량을 40% 줄이면서도 병해충 방제 효과는 기존과 동일한 수준을 유지할 수 있었다[7].

에너지 관리 측면에서도 디지털 기술의 영향이 두드러진다. 특히 시설 농업에서 IoT 기반의 스마트 에너지 관리 시스템은 큰 효과를 보이고 있다. 네덜란드의 한 대규모 온실 단지에서는 AI 기반의 에너지 최적화 시스템을 도입하여 에너지 사용량을 35% 절감하고, CO2 배출량을 40% 감소시켰다고 보고했다.

토양 관리에 있어서도 디지털 기술은 중요한 역할을 하고 있다. 센서 네트워크와 빅데이터 분석을 통해 토양의 건강 상태를 실시간으로 모니터링하고, 최적의 관리 방안을 제시할 수 있게 되었다. 브라질의 한 대두 농장에서는 이러한 스마트 토양 관리 시스템을 통해 토양 유기물 함량을 15% 증가시키고, 토양 침식을 30% 감소시키는 성과를 거두었다.

바이오매스 및 농업 폐기물 관리에서도 디지털 기술의 활용이 증가하고 있다. IoT 센서와 빅데이터 분석을 활용한 스마트 폐기물 관리 시스템은 농업 폐기물의 수거, 운반, 재활용 과정을 최적화한다. 스페인의 한 연구에서는 이 시스템을 통해 농업 폐기물의 재활용률을 60%에서 85%로 높이고, 관련 비용을 25% 절감할 수 있었다고 보고했다.

그러나 이러한 디지털 기술 기반의 자원 관리 혁신에는 몇 가지 과제도 존재한다. 첫째, 초기 투자 비용이 높아 소규모 농가의 도입이 어려울 수 있다. 둘째, 농촌 지역의 디지털 인프라 구축이 필요하다. 셋째, 농업인의 디지털 역량 강화가 요구된다.

결론적으로, 디지털 기술을 활용한 자원 관리는 농업의 효율성을 크게 향상시키고 환경 영향을 저감하는 데 기여하고 있다. 이는 지속가능한 농업 실현을 위한 핵심 요소로 자리 잡고 있다. 향후 5G, 엣지 컴퓨팅 등 첨단 기술의 발전과 함께 농업 분야의 자원 관리 혁신은 더욱 가속화될 전망이다.

3.4. 인적 자원: 농업 노동력의 변화와 디지털 역량

디지털 기술의 농업 분야 도입은 농업 노동력의 구조와 요구되는 역량에 큰 변화를 가져오고 있다. 자동화와 로봇화로 인한 단순 노동의 감소, 데이터 분석과 디지털 기기 운용 능력의 중요성 증대 등은 농업 인력의 질적 변화를 요구하고 있다.

자동화 기술의 발전으로 농업 분야의 노동 집약적 작업이 크게 줄어들고 있다. 미국 농무부의 연구에 따르면, 자동화 기술 도입으로 인해 2030년까지 농업 분야의 단순 노동 수요가 현재 대비 약 50% 감소할 것으로 예측된다. 반면, 첨단 농업 기계와 시스템을 운용할 수 있는 전문 인력의 수요는 증가하고 있다. 독일의 한 연구에서는 정밀농업 기술 도입 농가의 75%가 관련 전문 인력 확보에 어려움을 겪고 있다고 보고했다.

농업인의 디지털 역량 강화가 중요한 과제로 대두되고 있다. 네덜란드의 한 조사에 따르면, 스마트팜을 성공적으로 운영하는 농업인들은 일반 농업인들에 비해 데이터 분석 능력이 30% 이상 높은 것으로 나타났다. 이에 따라 많은 국가에서 농업인 대상 디지털 교육 프로그램을 확대하고 있다. 예를 들어, 호주 정부는 'Digital Farm Hands' 프로그램을 통해 2020년부터 2023년까지 10,000명의 농업인에게 디지털 기술 교육을 제공할 계획을 발표했다[5].

농업 교육 커리큘럼도 변화하고 있다. 전통적인 농학 지식뿐만 아니라 데이터 과학, IoT, 로봇공학 등 디지털 기술 관련 과목이 농업 대학의 필수 과목으로 자리잡고 있다[6]. 미국의 주요 농과대학들은 '디지털 농업' 또는 '스마트 농업' 전공을 신설하고 있으며, 이들 프로그램의 졸업생 취업률은 평균 95%를 상회하는 것으로 보고되고 있다.

한편, 농업의 디지털화는 새로운 직업을 창출하고 있다. 농업 데이터 분석가, 농업 로봇 엔지니어, 정밀농업 컨설턴트 등의 직종이 새롭게 등장하고 있다. 유럽연합의 한 보고서에 따르면, 2025년까지 농업 관련 ICT 분야에서 약 25만 개의 새로운 일자리가 창출될 것으로 예측된다.

농업의 디지털화는 청년층의 농업 유입에도 긍정적인 영향을 미치고 있다. 일본의 한 조사에 따르면, 스마트팜을 도입한 농가의 경영주 평균 연령이 일반 농가에 비해 15세 가량 낮은 것으로 나타났다. 한국의 경우도 스마트팜 청년 창업 지원 사업을 통해 2018년부터

2020년까지 약 1,000명의 청년 농업인을 육성했고, 이들의 5년차 생존율은 90%로 일반 창업 농의 62%보다 크게 높은 것으로 나타났다.

그러나 농업의 디지털화로 인한 노동력 변화에는 몇 가지 과제도 존재한다. 첫째, 기존 농업 인력의 디지털 전환 적응을 위한 지원이 필요하다. 둘째, 농촌 지역의 고령화로 인한 디지털 격차 문제의 해결이 시급하다. 셋째, 농업 부문의 데이터 과학자, SW 엔지니어 등 고급 인력 유치를 위한 전략이 필요하다.

결론적으로, 농업의 디지털화는 농업 노동력의 구조와 요구되는 역량에 큰 변화를 가져오고 있다. 이는 농업 인력의 질적 향상과 청년층 유입 등 긍정적 효과를 창출하고 있지만, 동시에 기존 인력의 적응과 새로운 인재 육성이라는 과제도 제시하고 있다. 향후 농업 분야의 지속가능한 발전을 위해서는 이러한 변화에 대응한 체계적인 인력 양성 및 교육 시스템 구축이 필요할 것이다.

4. 디지털 농업의 도전과 미래 전망

4.1. 데이터 표준화, 공유, 보안의 과제

디지털 농업의 발전과 함께 농업 데이터의 생성, 수집, 분석, 활용이 급증하면서 데이터 표준화, 공유, 보안과 관련된 다양한 과제들이 대두되고 있다. 이러한 과제들을 효과적으로 해결하는 것이 디지털 농업의 성공적인 구현과 지속가능한 발전을 위한 핵심 요소로 인식되고 있다.

데이터 표준화는 디지털 농업의 가장 기본적인 과제 중 하나이다. 다양한 소스에서 생성되는 농업 데이터들이 서로 다른 형식과 구조를 가지고 있어 통합과 분석에 어려움이 있다. 미국 농무부의 조사에 따르면, 농업 데이터의 비표준화로 인해 발생하는 비효율이 연간 약 20억 달러에 달하는 것으로 추정된다. 이에 대응하여 국제적으로 AgGateway, GODAN(Global Open Data for Agriculture and Nutrition) 등의 이니셔티브를 통해 농업 데이터 표준화 노력이 진행되고 있다.

데이터 공유는 디지털 농업의 잠재력을 최대한 발휘하기 위해 필수적이지만, 여러 장애

물이 존재한다. 농업인들의 데이터 공유에 대한 우려, 데이터의 소유권 문제, 적절한 인센티브 부족 등이 주요 장애요인이다. 유럽연합의 한 연구에 따르면, 농업인의 62%가 자신의 농장 데이터를 공유하는 것에 대해 불안감을 느끼는 것으로 나타났다. 이를 해결하기 위해 농업 데이터 공유를 위한 법적, 제도적 프레임워크 구축이 진행되고 있으며, 미국의 'Ag Data Transparent' 인증제도 등이 그 예이다.

데이터 보안은 디지털 농업의 신뢰성과 지속가능성을 위해 매우 중요한 문제이다. 농업 부문의 사이버 공격이 증가하고 있으며, 이는 개인정보 유출, 경제적 손실, 식량안보 위협 등으로 이어질 수 있다. IBM의 보고서에 따르면, 2021년 농업 분야의 사이버 공격이 전년 대비 40% 증가했으며, 평균 피해액은 건당 50만 달러에 달하는 것으로 나타났다. 이에 대응하여 농업 부문의 사이버 보안 강화를 위한 다양한 기술적, 정책적 노력이 진행되고 있다.

〈표 6〉 디지털 농업의 데이터관련 주요 과제와 대응 방안

과제	주요 내용	대응 방안	사례
데이터 표준화	• 다양한 형식과 구조의 데이터 존재 • 데이터 통합과 분석의 어려움	• 국제 표준 개발 • 표준화 이니셔티브 참여	• AgGateway의 ADAPT 프레임워크 • GODAN의 농업 데이터 표준화 프로젝트
데이터 공유	• 농업인의 데이터 공유 우려 • 데이터 소유권 문제 • 공유 인센티브 부족	• 법적, 제도적 프레임워크 구축 • 데이터 공유 인센티브 제도	• EU의 농업 데이터 공유 규정 • 미국의 Ag Data Transparent 인증제도
데이터 보안	• 증가하는 사이버 공격 • 개인정보 유출 위험 • 식량안보 위협	• 사이버 보안 기술 강화 • 보안 인식 제고 교육 • 정책적 지원	• IBM의 농업 부문 블록체인 보안 솔루션 • 미국 농무부의 농업 사이버보안 가이드라인

자료: 저자 작성.

이러한 과제들을 해결하기 위해서는 기술적 혁신뿐만 아니라 제도적, 사회적 혁신도 필요하다. 데이터의 표준화, 공유, 보안을 위한 국제적 협력과 거버넌스 체계 구축이 중요하며, 농업인, 기업, 정부, 연구기관 등 다양한 이해관계자들의 협력이 필수적이다.

또한, 농업 데이터의 특수성을 고려한 법적, 윤리적 프레임워크의 개발도 시급하다. 예를 들어, 캐나다의 '농업 데이터 거버넌스 프레임워크'는 농업 데이터의 수집, 사용, 공유에 대한 윤리적 가이드라인을 제시하고 있다.

결론적으로, 데이터 표준화, 공유, 보안의 과제는 디지털 농업의 성공적인 구현과 지속 가능한 발전을 위해 반드시 해결해야 할 핵심 이슈이다. 이를 위해서는 기술적 해결책과 함께 제도적, 사회적 혁신이 수반되어야 하며, 국제적 협력과 다양한 이해관계자들의 참여가 필수적이다.

4.2. 디지털 격차 해소와 농업인 역량 강화

디지털 농업의 발전과 함께 농촌 지역의 디지털 격차 해소와 농업인의 디지털 역량 강화가 중요한 과제로 대두되고 있다. 이는 디지털 농업 기술의 효과적인 도입과 활용, 그리고 그 혜택의 공평한 분배를 위해 필수적인 요소로 인식되고 있다.

농촌 지역의 디지털 인프라 구축은 디지털 격차 해소의 첫 단계이다. OECD 보고서에 따르면, 2020년 기준 OECD 국가들의 농촌 지역 브로드밴드 보급률은 도시 지역에 비해 평균 10%p 낮은 것으로 나타났다. 이러한 격차를 해소하기 위해 각국 정부는 다양한 정책을 추진하고 있다. 예를 들어, 미국의 'ReConnect Program'은 2019년부터 2023년까지 총 16억 달러를 투자하여 농촌 지역의 브로드밴드 인프라를 확충하고 있다.

농업인의 디지털 리터러시 향상도 중요한 과제이다. EU의 조사에 따르면, 농업인의 디지털 역량은 일반 인구에 비해 낮은 수준이며, 특히 50세 이상 농업인의 70%가 기본적인 디지털 기술이 부족한 것으로 나타났다. 이에 대응하여 각국은 농업인 대상 디지털 교육 프로그램을 확대하고 있다. 호주의 'Digital Farm Grants Program'은 2018년부터 2022년까지 5,000만 달러를 투자하여 농업인의 디지털 기술 교육을 지원하고 있다.

첨단 농업 기술에 대한 접근성 향상도 디지털 격차 해소를 위해 중요하다. 소규모 농가의 경우 고가의 디지털 농업 기술 도입에 어려움을 겪고 있다. 이를 해결하기 위해 공유 경제 모델이나 정부 지원 프로그램이 도입되고 있다. 인도의 'Custom Hiring Center' 프로그램은 농업 기계와 디지털 기술을 공동으로 사용할 수 있게 하여, 소규모 농가의 기술 접근성을 높이고 있다.

농업인의 데이터 활용 능력 강화도 중요한 과제이다. 디지털 농업 시대에는 데이터 기반의 의사결정이 중요해지고 있지만, 많은 농업인들이 데이터 해석과 활용에 어려움을 겪고 있다. 네덜란드의 'Data-Driven Farming' 프로그램은 농업인들에게 데이터 분석과 활용 방법을 교육하여, 농장 경영의 효율성을 높이는 데 기여하고 있다.

〈표 7〉 디지털 격차 해소와 농업 역량 강화를 위한 주요 과제와 대응 방안

과제	주요 내용	대응 방안	사례
농촌 디지털 인프라 구축	도농 간 브로드밴드 보급률 격차, 5G 등 첨단 통신 인프라 부족	정부 주도 인프라 투자, 민관 협력 사업 추진	미국 ReConnect Program, EU의 농촌 디지털화 전략
농업인 디지털 리터러시 향상	농업인의 낮은 디지털 역량, 고령 농업인의 기술 적응 문제	맞춤형 디지털 교육 프로그램, 평생학습 체계 구축	호주 Digital Farm Grants Program, 한국 스마트팜 교육 센터
첨단 농업 기술 접근성 향상	소규모 농가의 기술 도입 어려움, 고가의 장비와 소프트웨어	기술 공유 모델 도입, 정부 지원 프로그램	인도 Custom Hiring Center, 일본 스마트 농업 지원 사업
농업인 데이터 활용 능력 강화	데이터 해석과 활용의 어려움, 데이터 기반 의사결정 역량 부족	데이터 분석 교육 프로그램, 농업 특화 데이터 플랫폼 개발	네덜란드 Data-Driven Farming, 캐나다 농업 데이터 전략

자료: 저자 작성.

4.3. 미래 농업 시나리오와 정책적 제언

4.3.1. 디지털 기술이 지향하는 미래 농업 시나리오

디지털 기술의 급속한 발전은 농업의 미래를 크게 변화시킬 것으로 예상된다. 그리고 미래 농업의 모습은 기술의 발전, 환경 변화, 사회적 요구 등 다양한 요인에 따라 형성될 것이다. 여기서는 세 가지 주요 시나리오를 통해 가능한 미래의 모습을 정리해 본다.

〈표 8〉 디지털 기술이 지향하는 미래 농업 시나리오

구분	주요 특징	핵심 기술	생산 방식	유통 및 소비	환경 영향	사회경제적 영향
시나리오 1: 완전 자동화된 스마트 농업	• AI와 로봇 기술 중심의 고효율 생산 • 정밀 농업 기술 활용 • 도시 농업 확대 • 극한 환경 대응 농업	• 자율주행 농기계 • 드론 및 로봇 • IoT 센서 • AI 기반 의사결정 시스템	• 자동화된 정밀 농업 • 수직 농업 • 실내 제어 농업	• AI 기반 수요 예측 • 자동화된 물류 시스템 • 도시 근교 생산-소비	• 자원 사용 효율화 • 화학물질 사용 최적화 • 도시 열섬 현상 완화	• 농업 노동력 구조 변화 • 고급 기술 인력 수요 증가 • 초기 투자 비용 증가
시나리오 2: 개인화된 농업 생산과 소비	• 소비자 맞춤형 생산과 유통 • 개인 건강 중심 농업	• 유전자 편집 기술 • 블록체인 • 3D 프린팅	• 맞춤형 작물 재배 • 소비자 참여형 농장	• 개인 맞춤형 유통 • 직거래 활성화 • 식품 안전성	• 식품 폐기물 감소 • 맞춤형 생산으로	• 소비자-생산자 관계 변화 • 개인화된 건강관리 확산

구분	주요 특징	핵심 기술	생산 방식	유통 및 소비	환경 영향	사회경제적 영향
	• 투명한 식품 이력 관리 • 지역 기반 식품 시스템	• VR 기술	• 기능성 작물 생산	강화	과잉생산 방지 • 운송 거리 감소	• 식품 관련 새로운 직종 등장
시나리오 3: 생태계 중심의 지속가능한 농업	• 생태계 균형 중심 농업 • 탄소 중립 농업 • 생물다양성 보전 • 자원 순환형 농업	• 생태계 서비스 평가 기술 • 토양 탄소 격리 기술 • 재생에너지 • 물 재사용 기술	• 생태 기반 농법 • 유기농업 • 순환형 농업	• 로컬 푸드 시스템 • 생태계 서비스 가치 반영 • 윤리적 소비	• 생물다양성 증진 • 탄소 배출 저감 • 수질 및 토양 보전	• 농업의 다원적 가치 인식 확대 • 농촌 공동체 활성화 • 생태계 서비스 시장 형성

자료: 저자 작성.

이러한 세 가지 시나리오는 상호 배타적이지 않으며, 실제 미래는 이들의 복합적인 형태로 나타난 것이고 그래야 한다. 각 시나리오의 실현 정도와 시기는 기술 발전의 속도, 환경 문제의 심각성, 사회적 수용도 등 다양한 요인에 따라 달라질 것이다. 중요한 것은 이러한 다양한 가능성을 인식하고, 바람직한 미래를 위해 지금부터 준비하는 것이다.

4.3.2. 디지털 농업 발전을 위한 정책적 제언

디지털 농업의 발전을 위해서는 기술, 인프라, 인력 양성, 제도 등 다양한 측면에서의 정책적 지원이 필요하다. 앞서 살펴본 미래 농업 시나리오를 실현하고 디지털 농업의 잠재력을 최대한 활용하기 위해 다음과 같은 정책적 제언을 제시한다.

첫째, 디지털 농업 인프라 구축이 시급하다. 농촌 지역의 5G 네트워크 및 IoT 인프라 확충은 디지털 농업의 기반이 되는 고속 통신망과 IoT 기기 보급을 위해 필수적이다. 또한, 생산, 유통, 소비 전 과정의 데이터를 수집, 분석, 공유할 수 있는 농업 빅데이터 플랫폼 구축이 필요하다. 새로운 기술의 실험과 검증을 위한 스마트팜 테스트베드 및 실증단지 확대도 중요한 과제이다.

둘째, 농업인의 디지털 역량 강화가 필요하다. 청년부터 고령 농업인까지 다양한 연령대를 고려한 세대별 맞춤형 디지털 교육 프로그램을 개발하고 보급해야 한다. 대학 및 직업 교육기관과 연계하여 ICT 융합형 농업 전문가를 육성하는 디지털 농업 전문인력 양성도

중요하다. 또한, 청년 창업자들의 농업 분야 진출을 촉진하기 위해 멘토링, 자금 지원 등 농업-IT 융합 창업 지원 정책이 필요하다.

셋째, 연구개발 및 기술혁신 지원이 필요하다. 농업 AI, 로봇공학 등 첨단기술에 대한 R&D 투자를 확대하고, 국가 차원의 중장기 연구 프로젝트를 추진해야 한다. 기업, 대학, 연구소 간 협력을 통한 기술 개발 및 실용화를 촉진하는 산학연 협력 강화도 중요하다. 작물 생육 예측, 병해충 감지 등을 위한 농업 특화 AI 및 빅데이터 분석 도구 개발 지원도 필요하다.

넷째, 법제도 정비 및 표준화가 필요하다. 농업 데이터의 수집, 공유, 활용에 대한 명확한 가이드라인을 수립하는 데이터 소유권 및 활용에 관한 법적 기준 마련이 시급하다. 품질과 안전성이 검증된 스마트팜 기술 및 제품에 대한 인증 체계 구축을 위한 스마트팜 인증제도 도입도 필요하다. 또한, 디지털 농업 관련 국제 표준 개발에 적극 참여하여 국내 기술의 해외 진출 기반을 마련해야 한다.

〈표 9〉 디지털 농업 발전을 위한 정책적 제언

정책 분야	주요 내용	세부 정책 (예)
디지털 농업 인프라 구축	농촌 통신 인프라 확충, 데이터 플랫폼 구축	농촌 5G 및 IoT 인프라 확충 농업 빅데이터 플랫폼 구축 스마트팜 테스트베드 확대
농업인 디지털 역량 강화	맞춤형 교육, 전문인력 양성, 창업 지원	세대별 맞춤형 디지털 교육 프로그램 디지털 농업 전문인력 양성 농업-IT 융합 창업 지원
연구개발 및 기술혁신 지원	R&D 투자, 산학연 협력, 특화 솔루션 개발	농업 AI, 로봇공학 R&D 투자 확대 산학연 협력 강화 농업 특화 AI 및 빅데이터 분석 도구 개발
법제도 정비 및 표준화	데이터 법규, 인증제도, 국제 표준화	농업 데이터 소유권 및 활용 법적 기준 마련 스마트팜 인증제도 도입 국제 표준화 활동 참여
지속가능성 및 환경 정책 강화	탄소중립, 순환농업, 생태계 서비스	탄소중립 농업 인센티브 제도 순환농업 모델 개발 및 보급 생태계 서비스 직불제 확대
농업 가치사슬 혁신 지원	이력추적, 유통 혁신, 새로운 비즈니스 모델	블록체인 기반 식품 이력추적제 디지털 기반 농산물 유통 체계 혁신 소비자 참여형 농업 모델 활성화

자료: 저자 작성.

다섯째, 지속가능성 및 환경 정책 강화가 필요하다. 온실가스 감축 효과가 있는 스마트팜 기술 도입 시 보조금을 지급하는 등 탄소중립 농업을 위한 인센티브 제도를 도입해야 한다. 자원 순환형 스마트팜 시스템 구축을 위한 기술개발 및 보급 지원도 중요하다. 디지털 기술을 활용한 생태계 서비스 모니터링 및 평가 체계 구축을 통해 생태계 서비스 지불제(PES)를 확대해야 한다.

마지막으로, 농업 가치사슬 혁신 지원이 필요하다. 생산부터 소비까지 전 과정의 투명한 관리를 위한 블록체인 기반 식품 이력추적제 도입 및 확산을 지원해야 한다. 온라인 직거래 플랫폼, AI 기반 수요 예측 시스템 등 디지털 기술 기반의 농산물 유통 체계 혁신도 지원해야 한다. 크라우드 펀딩, 구독 경제 등 새로운 농업 비즈니스 모델을 발굴하고 지원하는 소비자 참여형 농업 모델 활성화도 필요하다.

이러한 정책들은 상호 연계되어 추진되어야 하며, 농업인, 기업, 연구기관, 소비자 등 다양한 이해관계자들의 참여와 협력이 필수적이다. 또한, 급변하는 기술 환경과 사회적 요구를 반영하여 정책을 지속적으로 평가하고 개선해 나가는 유연한 접근이 필요하다.

■ 참고문헌

Agricultural Data Coalition. 2024. “Empowering Farmers through Data: The ADC Platform.” Journal of Agricultural Informatics.

Ag Data Transparent. 2021. “Ag Data Transparent Certification.” Ag Data Transparent.

Awasthi, M. K., et al. 2020. “Refining biomass residues for sustainable energy and bio-products: An assessment of technology, its importance, and strategic applications in circular bio-economy.” Renewable and Sustainable Energy Reviews.

Brown, A. 2024. “Google’s Mineral Project: Revolutionizing Agriculture with Cloud Computing and AI.” Tech in Agriculture.

Deere, J. & Company. 2023. “Open Innovation in Agriculture: The John Deere Operations Center.” Harvard Business School.

Ehlers, M. H., Huber, R., & Finger, R. 2021. “Agricultural policy in the era of digitalisation.” Food Policy.

European Commission. 2023. “Farm to Fork Strategy for Sustainable Food Systems.” Official Journal of the European Union.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2020. “Digital Technology in Agriculture and Rural Areas.” FAO.

IBM Security. 2022. “Cost of a Data Breach Report 2021.” IBM.

Johnson, L. 2023. “Blockchain in Food Supply Chain: Walmart’s Journey to Enhanced Traceability.” Supply Chain Management Review.

Microsoft Research. 2023. “FarmBeats: AI-Driven Agriculture for Sustainable Food Production.” Microsoft.

Zervas, P., et al. 2020. “Agricultural Data Interoperability: The Global Open Data for Agriculture and Nutrition (GODAN) Initiative.” Information and Communications Technology for Agriculture.

과학기술정보통신부. 2021.「한국형 스마트팜 기술개발 및 성과확산 사업 추진계획」.

농림축산식품부. 2021.「2020년 스마트팜 청년창업 보육사업 성과분석 보고서」.

농림축산식품부. 2022.「스마트팜 확산 및 고도화 전략」.

통계청. 2021.「2020년 온라인쇼핑 동향」. 통계청.