

글로벌 탄소국경조정제도 확대의 농업부문 영향 및 전과정목록 구축 기반 대응 전략

김솔희* · 김미소** · 전정배*** · 김태곤****†

*전북대학교 농업생명과학대학 스마트팜학과 연구조교수, **전북대학교 농업생명과학대학 스마트팜학과 학부연구생,
한국국토정보공사 공간정보연구원 선임연구원, *전북대학교농업생명과학대학 스마트팜학과 조교수/전북대학교 농업생명과학대학
농업과학기술연구소 연구원

Strategy for responding to the extension of global carbon border adjustment mechanisms to the agricultural sector by establishing life cycle inventory databases

Kim, Solhee* · Kim, Miso** · Jeon, Jeongbae*** and Kim, Taegon****†

*Research Assistant Professor, Dept of Smart Farm, College of Agriculture & Life Sciences, Joenbuk National University, Jeonju, Korea

**Undergraduate Student, Dept of Smart Farm, College of Agriculture & Life Sciences, Joenbuk National University, Jeonju, Korea

***Senior Researcher, Spatial Information Research Institute, Korea Land and Geospatial Informatix Corporation, Jeonju, Korea

****Assistant Professor, Dept of Smart Farm, College of Agriculture & Life Sciences, Joenbuk National University, Jeonju, Korea / Researcher, Institute of Agricultural Science & Technology, Joenbuk National University, Jeonju, Korea

ABSTRACT

As global carbon border adjustment mechanisms (CBAM) expand, the agricultural sector faces increasing pressure to manage carbon emissions. This study analyzes global CBAM trends, focusing on the EU implementation starting October 2023, and develops comprehensive response strategies for Korea’s agricultural sector. Through systematic analysis of life cycle assessment (LCA) methodologies for calculating carbon footprints in agricultural production and supply chains, the research evaluates the potential impacts of carbon border taxes on domestic agriculture. While CBAM currently applies to six sectors including steel, aluminum, and fertilizers, its expected expansion to agriculture necessitates proactive measures, as evidenced by Denmark’s pioneering agricultural carbon tax announcement for 2030. The study examines advanced carbon reduction policies and technologies adopted by leading countries, including precision farming, renewable energy systems, and optimized fertilizer usage. Agricultural greenhouse gas emissions, accounting for 10% of total emissions, with livestock contributing another 70%, require systematic management. The findings emphasize the need for internationally standardized LCA for agricultural competitiveness and food security. The research suggests that Korea’s agricultural sector requires both technical and policy support, including the establishment of sustainability criteria and life cycle inventory databases, along with the development of quantitative evaluation methods for carbon reduction measures. Furthermore, the study highlights the need for farmer education and support systems to facilitate the transition to low-carbon agriculture, particularly considering the challenges faced by small-scale and elderly farmers. Carbon certification labels and incentive mechanisms also are recommended to encourage voluntary participation in emission reduction efforts. This study provides fundamental insights for establishing proactive responses to carbon border taxes, ultimately contributing to the carbon neutrality and sustainability of Korea’s agricultural sector in the global market.

Key words : Carbon Border Adjustment Mechanism, Agriculture, Net-Zero, Life Cycle Inventory, Life Cycle Assessment

†Corresponding author : taegon@jbnu.ac.kr (567 Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeonbuk State, 54896, Jeonju, Korea. Tel. +82-63-270-2557)

ORCID 김솔희 0000-0002-0086-6141 김미소 0009-0004-1620-8049

전정배 0000-0001-8156-6951 김태곤 0000-0002-7931-6627

1. 서론

기후변화에 대응하기 위해 2015년 195개국이 모여 파리협정(Paris Agreement)을 체결하고, 많은 국가들이 2018년 IPCC 1.5℃ 특별보고서에서 제안한 2050년 탄소 배출 중립목표를 이루기 위해 노력을 기울이고 있다. 각국의 탄소중립(Net-zero) 선언은 단순한 정책적 목표를 넘어 경제 및 산업 전반에 걸쳐 강력한 구조적 변화를 요구하고 있으며, 국제 무역과 국가 경쟁력에도 큰 영향을 미치고 있다. 주요 산업부문에서 발생하는 탄소배출을 줄이기 위한 노력으로 국가 차원의 규제와 지원이 강화되고 있으며, 개별 국가의 노력을 넘어 국제 사회가 공동으로 추진하는 탄소 저감 정책도 시행되고 있다.

유럽연합(European Union, 이하 EU)은 2019년 유럽 그린딜(European Green Deal, 이하 그린딜)을 발표하며, 2050년까지 탄소중립을 달성하겠다는 목표를 설정하였다(EC, 2019). 이 그린딜 정책은 대기로 방출되는 온실가스의 양과 대기에서 제거되는 온실가스의 양이 균형을 이루게 하여 기후 중립을 달성하는 것을 목표로 한다. 이에 따라 에너지, 농업, 산업 등 다양한 분야에 걸쳐 탄소저감의 혁신을 촉진하면서 동시에 지속가능한 경제 성장을 추구한다. 그린딜은 지속가능한 식량 시스템으로의 전환을 촉진하는 “농장에서 식탁까지(Farm to Fork)” 전략도 포함하고 있으며, 이를 통해 농업 부문에서의 온실가스 감축을 강화하고 있다(EC, 2021a, 2022).

탄소중립 목표 달성을 위해 국가 내에서 발생하는 온실가스뿐만 아니라 국제 무역 활동에서 발생하는 탄소배출도 관리하는 정책이 시행되고 있다. 대표적으로 EU의 탄소국경조정제도(Carbon Border Adjustment Mechanism, 이하 CBAM)는 수입 제품의 생산 과정에서 발생한 탄소배출량에 따라 세금(탄소국경세)을 부과하여 탄소 감축을 유도하고, 동시에 역내 산업의 경쟁력을 보호하는 정책이다(EC, 2023). 탄소국경세는 특정 국가의 엄격한 환경 규제를 회피하기 위해 상대적으로 느슨한 규제를 가진 국가로 생산을 이전하는 탄소 누출(Carbon leakage)을 방지함으로써 무역 상대국의 탄소저감 노력을 유도한다(Branger & Quirion, 2014). 2023년 시범 도입된 CBAM은 대상 산업을 점진적으로 확대되고 있으며, 전 세계적인 경제 구조와 환경 규제의 변화를 이끌고 있다. 2024년 현재 주요 대상 산업에는 철강, 알루미늄, 비료, 시멘트, 전력, 수소 등이 포함된다.

미국 역시 유사한 접근을 취하고 있는데, 캘리포니아주

는 2017년 청정구매법(Buy Clean California Act)을 도입하여 공공 조달 시 특정 건설 자재의 생산 과정에서 발생하는 탄소배출량을 고려하도록 하고 있다(California Department of General Services, 2018). 공공 자금이 저탄소 제품으로 유입되도록 유도하고, 탄소배출 저감 기술의 도입을 촉진하는 효과를 기대하고 있다. 유럽, 미국 등 전 세계적으로 이러한 탄소 조정 제도가 확대됨에 따라, 글로벌 무역 환경에서 탄소배출 관리의 중요성이 증가하고 있다.

탄소국경세 적용 대상 산업에 대해서는 이미 전과정평가(Life Cycle Assessment, 이하 LCA) 기법을 활용하여 제품별 탄소배출량을 정량적으로 평가하고 있다(Chen & Chen, 2024). LCA는 제품의 원재료 채취, 생산, 유통, 소비, 폐기에 이르는 전 과정에서의 탄소배출량을 정량적으로 분석하여 환경영향을 수치화하는 방법이다(Finkbeiner et al., 2006; Hellweg & Canals, 2014). 산업 분야별로 살펴보면, 철강, 시멘트, 화학 등 에너지 집약적 산업 분야에서는 이미 CBAM이 적용되고 있기 때문에, LCA를 기반으로 탄소국경세에 대비하고 있다. 관련 규제를 준수하기 위한 다양한 기술 개발 및 정책적 대응 방안을 마련하고 있다(Lee and Ryoo, 2022). 그러나 아직 CBAM 대상이 아닌 농업 분야는 식량 생산을 위한 필수 산업임에도 불구하고, 이와 같은 체계적 대응이 미흡한 실정이다.

농업에서 발생하는 온실가스 배출은 비료 사용, 가축 사육, 논밭의 토양 관리 등 다양한 요소에서 기인한다. 농업 분야의 주요 온실가스인 메탄(CH₄)과 아산화질소(N₂O)는 축산, 비료 사용, 논이 벼 재배 과정에서 주로 배출되는데, 각각 지구온난화지수(Global Warming Potential, GWP)가 21과 265로 매우 높아 관리가 필요하다. 농업 분야에서 발생하는 온실가스는 다양한 생물학적 과정에서 전지구적으로 발생하여 다른 산업에 비해 발생원을 특정하여 계량하기 어려운 특성이 있다.

탄소국경세는 점차 다른 분야로 확대될 것이며, 농업 분야 역시 예외가 될 수 없다. EU 의회 농업위원회는 2030년까지 농산물도 CBAM에 포함하는 방안을 검토할 것을 제안하고 있다(EP, 2022). 덴마크 정부는 2024년 6월, 세계 최초로 2030년부터 농업 분야에 ‘농업 분야 탄소세’를 부과하기로 발표했다(Rasmussen, 2024). 덴마크는 2030년까지 1990년 수준 대비 온실가스 배출량을 70% 감축하겠다는 목표 아래, 2030년부터 이산화탄소 1톤당 300 크로네(약 6만 원, 세금 공제 후 120크로네)를 시작으로, 5년 후에는 750크로네(약 15만 원, 세금 공제 후 300크로

네)까지 세금을 부과할 예정이다. 비록 현재는 자국 내 축산농가를 대상으로 하는 정책이지만, 덴마크의 축산업 보호를 위해 수입 축산물에도 확대될 가능성이 크다.

농업 분야에 탄소국경세가 적용될 경우, 국내 농산물의 경쟁력에 상당한 영향을 미칠 것으로 예상된다. 농업의 탄소발자국(Carbon Footprint, CF)은 생산단계뿐만 아니라 공급망 전반에서 발생하는 탄소배출을 포함하므로, 신선 농산물과 같이 항공 운송을 통해 수출하는 경우에는 탄소국경세 부과로 인해 가격 경쟁력이 약화될 우려가 크다. 탄소국경세에 대응하기 위한 농업 생산, 유통 과정의 탄소배출 규제 강화는 필연적이다. 이러한 규제는 농가의 경제적 부담 증가로 직결되므로, 농업 분야에서도 탄소국경세에 대한 선제적 대응이 필요하다.

본 연구에서는 글로벌 탄소국경세 동향을 체계적으로 분석하고, 농업 분야의 구체적인 대응 전략을 제시하고자 한다. 먼저 EU의 CBAM과 탄소국경세의 도입 배경 및 최근 동향을 살펴보고, 이러한 제도의 확산이 농업 부문에 미치는 영향을 분석한다. 다음으로 농업 분야의 효과적인 대응 방안 마련을 위해 국내외 주요국의 농업 분야 LCI DB 구축 현황과 최신 동향을 검토한다. 특히 LCA 방법론과 관련 탄소배출 산정 기법의 특징 및 한계점을 분석하여, 농업 특성을 반영한 LCI DB 구축방안을 도출한다. 그리고 농업 분야 LCI DB의 표준화 및 고도화를 위한 구체적인 방안을 제시한다. 마지막으로 원격탐사, 인공지능, 사물인터넷 등 신기술을 활용한 데이터 수집 및 분석 방법론을 검토하고, 국내 농업환경에 적합한 LCI DB 구축 전략을 제안한다.

2. EU의 탄소국경조정제도와 탄소국경세

EU의 CBAM은 수입품의 탄소배출량을 평가하여 탄소세를 부과하는 제도이다. EU는 전 지구적 기후변화에 대응하기 위해 탄소중립이라는 비전하에 CBAM을 도입하여 유럽 기업의 공정한 경쟁과 전 세계 산업의 탈탄소화를 선도적으로 추진하고 있다. 예를 들어, 에너지 집약적 상품에 탄소국경세가 적용되면 수입품의 소비자 가격이 상승하게 되어 수입품에 대한 수요가 감소하고, 이로 인해 역내 상품의 소비를 촉진한다. 또한 상품가격에 온실가스의 비용을 부과함에 따라, 온실가스 배출 비용을 낮추기 위한 상품 생산 과정에서 배출량 감축 연구 및 기술 개발을 진흥할 것으로 기대한다.

EU는 2019년 그린딜을 통해 CBAM 도입을 예고한 후,

2021년 7월 EU 집행위원회가 CBAM 입법안 초안을 제출하였다. 초안에 대해 유럽의회와 EU 이사회, EU 집행위원회의 입장을 확정하고 삼자 협정을 거쳐 2022년 12월에 수정안에 대한 잠정 합의를 완료했다. 이후 2023년 5월 CBAM 입법안이 최종 승인되어 공식 발효됨에 따라 2023년 10월부터 전환 기간이 시작되었다.

2023년 10월부터 발효된 CBAM은 2025년 12월까지 전환 단계(transitional period)로 시행된다. 이 기간에 EU 회원국은 비EU 국가에서 수입하는 상품의 탄소배출량을 보고해야 한다. 2025년 12월까지의 재정적 부담 없이 보고하지만, 2026년부터는 확정 단계(definitive phase)로 전환되어 EU 탄소 배출권거래제(Emission Trading Scheme, ETS)의 기준에 따라 탄소배출량에 대한 비용을 지불해야 한다.

EU는 2023년 8월 17일, 본격적인 탄소국경세 도입까지의 유예 기간 동안 기업들의 대응을 지원하기 위해 적용 상품의 내재된 탄소배출량(Embedded emissions)을 계산하는 방법과 보고 요건을 상세히 규정했다. CBAM은 2026년부터 2034년까지 단계적으로 도입됨에 따라 EU는 기존에 일정량의 탄소배출에 대해 무상으로 제공되던 배출권을 점진적으로 축소하여 모든 기업이 CBAM에 따른 세금을 부과받도록 결정했다. 이에 따라 CBAM 적용 기업은 매년 5월 31일까지 CBAM 인증서(배출권)를 제출해야 하며, 이 인증서는 탄소배출량 1톤당 1개씩 발행되어 인증서 가격이 탄소 비용이 된다(KOTRA, 2023).

3. 농업분야 CBAM 적용 확대 가능성에 따른 영향 예측

3.1. 농업분야 확대 적용 가능성

EU는 2023년 CBAM 제도로 탄소국경세 규정을 채택하여 알루미늄, 시멘트, 전력, 비료, 철강 등 탄소 다배출 산업 제품의 수입에 대해 새로운 기준을 도입했다. 이에 따라 해당 제품이 EU 내에서 생산되었을 경우 지불했을 탄소배출권에 상응하는 비용을 수입업자가 부담하게 된다(Agrinfo, 2022). 현재 농산물과 식품은 CBAM 적용 대상에 포함되지 않았으나, EU 의회 농업위원회는 2030년까지 농산물의 CBAM 포함을 검토할 것을 촉구했다(EP, 2022). 또한 유럽의 농업인 및 농식품 협동조합은 비료에 대한 CBAM 적용이 확정된 만큼 농산물에도 이를 도입할 것을 지지하고 있다(Copa-Cogeca, 2021). 이는 비료에만

탄소국경세가 부과될 경우, 저가 비료로 생산된 수입 농산물이 가격 경쟁력을 확보하여 EU 농업이 이중으로 타격을 받을 수 있다는 우려에서 비롯되었다.

이러한 배경에서 비료와 축산제품 등 간접적 영향까지 고려한 농축산물 국경탄소조정 방안이 검토되고 있다(Fournier Gabela, 2024; Nordin et al., 2024). 다만 식품 공급망의 복잡성으로 인해 수입 농산물의 내재된 탄소량을 정확하게 산정하기 어렵다는 기술적 한계도 지적되고 있다(Matthews, 2022). Nordin et al. (2024)은 농산물에 대한 탄소국경세 도입이 수출국의 농산물 생산과 무역에 직접적인 영향을 미칠 것으로 예측했다. 특히 추가적인 탄소비용 부과로 인한 농산물 수출 단가의 상승과 더불어, 탄소배출 효율이 낮은 국가의 비교열위 심화로 인한 수출 감소가 불가피할 것으로 전망했다.

농업 및 식품 부문은 각국 온실가스 배출의 상당 부분을 차지하고 있으나(Garnett, 2011), 식량 안보 및 생계와 직결된다는 특성으로 인해 지금까지 직접적인 탄소규제 적용이 제한적이었다. 그러나 EU의 기후중립 목표 달성을 위해 장기적으로는 비ETS 부문인 농업에도 탄소비용 부과 압력이 증가할 것으로 예상된다. 특히 CBAM 대상 품목에 포함될 비료는 농업과 간접적으로 연관되어 있어, 2026년부터 EU 수입 비료(예: 요소비료)에 대한 탄소비용이 부과될 예정이다(EC, 2021b). Fournier et al. (2024)는 비료 가격 상승이 유럽 내 농산물 생산 비용을 증가시키고, 이러한 탄소비용이 농산물 생산비에 전가될 경우의 영향을 분석했다. 연구 결과에 따르면, 소고기, 유제품, 곡물 등 탄소집약도가 높은 품목의 가격이 상승할 가능성이 있으며(밀이나 옥수수의 경우 약 7% 상승), 이는 장기적으로 저탄소 인증 식품에 대한 수요 증가로 이어질 수 있다고 전망했다.

3.2. 농업분야 온실가스 감축 효과

CBAM의 핵심 목적은 탄소누출 방지와 역외 물품 생산국가를 대상으로 탄소 감축에 대한 압력 행사를 통한 글로벌 온실가스 감축이다. 이러한 목적의 실효성을 검증하기 위해 CBAM 도입이 실제 온실가스 배출 감소에 미치는 영향에 대한 다양한 모형 분석과 시나리오 평가가 수행되고 있다. Bellora and Fontagne (2023)는 연산가능 일반균형(Computable General Equilibrium, CGE) 모형을 통해 CBAM이 EU의 탄소가격 상승에 따른 제조업 생산의 해외 이전을 억제하여 배출누출을 감소시키는 효과가

있음을 확인했다.

CBAM은 수입품 생산과정에서 발생한 탄소에 비용을 부과함으로써 수출국 기업들의 배출 저감을 유도하는 메커니즘으로 설계되었다. EU로 상품을 수출하는 기업들은 탄소발자국을 산정하여 CBAM 인증서를 구입해야 하므로, 공급망 최적화나 청정 기술 투자 등의 적극적인 대응이 요구된다. Zhang et al. (2024)의 거시모형 분석은 이러한 간접 압력이 실제로 경제 전반의 탄소배출 감소로 이어질 수 있음을 보여주었으며, 특히 주요 교역상대국의 배출 저감을 촉진할 수 있다는 점을 시사했다.

그러나 CBAM의 글로벌 감축 실효성에 대해서는 신중한 평가도 제기되고 있다. Nordin et al. (2024)은 농산물에 대한 탄소국경조정(Carbon Border Adjustment, CBA) 시뮬레이션을 통해, 탄소누출은 감소하지만 EU 내 생산자들의 추가 감축 노력이 약화되어 EU 농업 부문의 전체 순감축 효과가 0.5% 수준에 그칠 것이라고 분석했다.

또한 Hansen-Kuhn (2021)은 비료 부문을 사례로 들어 CBAM이 초래할 수 있는 의도치 않은 탄소누출 가능성을 지적했다. 구체적으로, EU의 비료에 대한 탄소국경세 부과가 비료 수출업자들의 시장 이동을 촉발하여, 환경규제가 상대적으로 느슨한 개발도상국으로의 수출 전환을 야기할 수 있다고 주장했다. 이는 결과적으로 개발도상국에서의 저가 비료 사용 증가로 이어져, 오히려 해외 배출이 증가하는 역효과를 초래할 수 있다는 우려를 제기했다.

4. 세계 농업분야 LCI 구축 현황

미국의 US LCI Database는 국가 차원의 대표적인 전과정목록 데이터베이스이다. 미국 국립재생에너지연구소(National Renewable Energy Laboratory, NREL)가 주도하여 구축한 이 데이터베이스는 미국 내 주요 재료, 제품, 공정들의 gate-to-gate, cradle-to-gate, cradle-to-grave 데이터를 제공한다. US LCI Database는 데이터 품질과 투명성 유지, 최신 LCI 데이터 제공, 국제 DB와의 호환성 확보, 데이터 접근성 향상을 주요 목표로 한다. 특히 국제 LCI 표준과의 호환성을 고려하여 구축되었으며, 미국 연방 LCA Commons를 통해 농무부(United States Department of Agriculture, USDA), 에너지부(Department of Energy, DOE), 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA) 등 유관 기관 간 협력을 통한 데이터 표준화를 추진하고 있다. 농업 분야에 특화된 별도 DB로는

USDA가 주도하는 LCA Commons가 있으며, 이는 옥수수, 대두 등 주요 작물의 재배 데이터를 제공하여 US LCI Database를 보완하고 있다.

EU의 농업 부문 온실가스 배출량은 연간 약 3.8억 톤 CO₂e로, EU 전체 배출의 약 10%를 차지한다(2019년 기준). EU는 이를 감축하기 위해 제품 환경발자국(Product Environmental Footprint, PEF) 등 표준화된 LCA 지침을 개발하여 작물별 탄소발자국 데이터를 정책에 활용하고 있다. 유럽의 대표적인 LCI DB인 스위스의 Ecoinvent는 세계에서 가장 포괄적이고 투명한 범용 LCI 데이터베이스로, 에너지, 자원 채취, 소재, 농업 등 다양한 부문에서 2만 개 이상의 공정 데이터를 포함한다. 2003년 첫 공개 이후 매년 업데이트되어 LCA, 환경성적표지(Environmental Product Declaration, EPD), 탄소발자국 산정 등에 광범위하게 활용되고 있다. 특히 2016년 발표된 Ecoinvent 3.3 버전은 세계 식품 LCA 데이터베이스(World Food LCA Database, 이하 WFLDB) 프로젝트의 데이터를 통합하여 농업 부문의 데이터를 대폭 확충했다.

농업 및 식품 분야 특화 DB로는 네덜란드 Blonk 컨설팅사가 개발한 Agri-footprint가 대표적이다. 이는 사료, 식품, 바이오매스 등 약 11,000개 제품에 대한 일관된 데이터셋을 제공하며, Ecoinvent와 연계하여 배경 시스템을 구성한다. 프랑스 환경에너지관리청(Agence de la transition écologique, 이하 ADEME)이 구축한 Agribalyse는 프랑스 국내 주요 농산물 및 식품의 LCI 데이터베이스로, 지역별 재배 특성과 농업 관행을 상세히 반영한 것이 특징이다. Agribalyse 1.0은 프랑스 기술기관의 작물별 데이터를 수집하고, Ecoinvent v2.2를 배경데이터로 활용하여 데이터의 신뢰성과 호환성을 확보했다. 이 외에도 덴마크의 Food LCA-DK, 스위스 Agroscope의 WFLDB 등을 통해 식품 분야 특화 DB 구축이 진행되고 있다.

중국은 2010년대 초 중국 LCI 데이터베이스(Chinese Life Cycle Database, 이하 CLCD)를 개발하여 약 600개 프로세스에 대한 국가 배경 LCI 데이터를 제공하고 있다. CLCD는 중국 시장의 다양한 기술 조합을 대표하도록 설계되었으며, 에너지, 재료, 수송, 폐기물 관리 등의 데이터를 일관된 핵심 모델을 기반으로 수집한다. 데이터는 산업 통계, 정부 보고서, 학술 연구를 통해 수집되며, 품질관리를 거쳐 ISO 14040/44 표준에 부합하도록 구성되었다. CLCD는 eBalance 소프트웨어를 통해 무료로 제공되어 중국 내 LCA 실무에 활용되고 있다.

일본의 대표적인 DB는 국립산업과학기술원(National

Institute of Advanced Industrial Science and Technology, AIST)과 일본산업환경관리협회(Japan Environmental Management Association for Industry, JEMAI)가 공동 개발한 IDEA (Inventory Database for Environmental Analysis)이다. 2008년부터 개발되어 2010년에 공개된 IDEA는 약 3,000개 이상의 데이터셋을 포함하는 일본의 표준 LCI로 자리잡았다. MiLCA 소프트웨어를 통해 제공되며, 농업/어업, 식품, 화학, 금속 등 광범위한 산업 분야를 포괄한다. 일본의 LCI 데이터는 국내 통계와 산업모형을 기반으로 작성되었으며, ISO/TS 14048 형식에 맞춰 국제적 상호운용성을 고려하고 있다.

한국은 정부와 산업계 주도로 LCI DB 구축을 추진하여 주요 산업 및 농축산 공정 데이터를 축적하고 있다. 환경부는 한국환경산업기술원(Korea Environmental Industry and Technology Institute, KEITI)을 중심으로 전기, 철강 등 산업부문에 대한 311개의 LCI를 구축했으며, 농림부 168개, 산업통상자원부 201개, 국토부 87개, 산림부 25개의 LCI DB가 존재한다. 그러나 환경부와 농림부를 제외한 부처들은 국가 LCI DB 개발을 중단한 상태이다(2025. 2월 기준). 현재 국내 LCI의 대다수가 10년 이상 경과하여 노후화됨에 따라 환경부는 2030년까지 3단계에 걸쳐 약 1,000여 개의 LCI DB 개정 및 신규 개발을 위해 2022년부터 매년 150건의 LCI DB를 제·개정하고 있으며, GLAD (Global LCA Data Access Network)에 등록하여 국제적 통용성을 확보하고자 노력하고 있다. 제·개정 중인 LCI DB는 1단계(2022-2023년)에 산업에서 시급성이 요구되는 물질을 우선적으로 개발하며 에너지 및 연료, 용수, 석유화학, 기초화학물질, 금속 및 비철금속 재활용 및 폐기, 수송 등 300여개가 대상이다. 이후 2단계(2024-2025년)에 플라스틱, 화학물질, 탄소포집 정제, 건축자재 원료, 탄소자원화 및 바이오 원료 등 250개 제개정, 3단계(2026~2030년)에 탄소중립 이행 수단 기술 및 1~2단계 LCI DB 개정 등 500여 개를 목표로 하고 있다. 현재 환경부와 산업통상자원부에서 개발한 LCI DB는 국가 LCI DB 정보망(Korea LCI Database Information Network)에서 제공하고 있다. 이 중 환경성적표지를 위해 사용되는 LCI DB는 한국환경산업기술원의 환경기술산업 원스톱 서비스(ECOSQUARE)에서 확인할 수 있다.

각국의 데이터베이스는 구축 목적, 적용 범위, 방법론에서 차이를 보이며, 지역별 농업 특성과 환경영향 평가에 따른 세부 데이터 제공에 중점을 두고 있다(Table 1). 미국의 US LCI Database는 포괄적인 산업 데이터와 높은

투명성, 정기적 업데이트를 통한 신뢰성 확보가 장점이나, 고해상도 공간 데이터가 부족하고 국제적 비교에 한계가 있다(National Renewable Energy Laboratory, 2025). Ecoinvent는 방대한 데이터셋과 국제 표준 준수로 광범위한 LCA 연구에 활용되고 있으나, 다양한 국가 관행이 혼재되어 데이터 이질성이 존재하며 라이선스가 복잡하다는 제한점이 있다(Ecoinvent Association, 2023). Agri-footprint와 Agribalyse는 지역 특성을 반영한 고해상도 데이터를 제공하지만, 그 범위가 제한적이다(ADEME, 2020; Blonk Consultants, 2019). 중국의 CLCD와 일본의 IDEA는 각국의 산업 특성을 반영하여 구축되었으나, 데이터 투명성이 부족하고 상대적으로 데이터셋 규모가 작

아 국제적 확장이 제한적이다(GHG Protocol, 2025a, 2025b).

5. 국내 농업환경에 적합한 LCI DB 구축 전략

5.1. 국제 통용성 확보를 위한 LCI DB 구축 표준화

CBAM 적용 범위 확대에 대비하여 국내 농업 부문의 정확한 탄소배출량 평가와 감축 전략 수립을 위해서는 체계적인 농업 LCI 구축이 필수적이다. 국가별 농업환경과 생산 특성이 상이한 상황에서 표준화된 LCI는 신뢰성 있는 탄소배출량 산정의 기반이 된다. 국제적으로 인정받을

Table 1. Comparing representative agricultural LCI databases developed in major regions

Region	Database name	Scope and application areas	Key features	Limitations	References
United States	US LCI Database / LCA Commons	LCI data for agriculture, manufacturing, energy, and various other industries within the United States	Developed under the leadership of NREL; maintains high data quality and transparency; regularly updated	Lacks high-resolution spatial data and has limitations for international comparisons	National renewable energy laboratory
Europe	Ecoinvent	Covers all sectors including agriculture, energy, materials, etc. – agriculture is also included	Contains over 20,000 datasets; internationally recognized as a standard database; annually updated	Heterogeneity exists due to mixed practices from different countries; licensing can be complex	Ecoinvent Association (2023)
Europe	Agri-footprint	Specialized in the agriculture and food sectors, including crop and livestock-related data	Provides region-specific data with high-resolution information suitable for food LCA	Primarily limited to European data and has a specialized scope	Blonk Consultants (2019)
Europe	Agribalyse	Based on agricultural and food data from France, reflecting domestic production practices	Offers detailed data for evaluating the environmental impacts of French agriculture	Due to regional specialization, its international applicability is limited; update frequency may be relatively slow	ADEME (2020)
China	Chinese life cycle database (CLCD)	LCI data for agriculture and other industries within China, utilizing government statistics and literature-based sources	Constructed in accordance with ISO standards; data collected through government and academic collaborations	Lacks transparency in the data collection methods and has a relatively smaller dataset scale	GHG Protocol (2025a)
Japan	Inventory database for environmental analysis (IDEA)	LCI data for agriculture, fisheries, food, and various industries within Japan	Compliant with ISO/TS 14048; provides data reflecting Japan's regional characteristics; widely used domestically	Limited to Japan, which makes international expansion difficult; update frequency might be relatively slow	GHG Protocol (2025b)

수 있는 LCI 구축을 통해 향후 발생할 수 있는 통상 분쟁을 예방하고 국내 수출농산물의 국제 경쟁력을 확보하는데 필수적인 요소이다.

LCI DB는 제품의 생산부터 유통까지 전 과정에서 발생하는 환경부하 데이터를 체계적으로 수집한 자료로서, CBAM 적용 시 신뢰성 있는 배출계수 확보에 핵심적 역할을 한다(Quantis, 2015). 현재 Agri-footprint나 WFLDB 등 농식품 부문의 국제적 LCI DB가 존재하지만, 이러한 데이터베이스들은 국가별 고유의 생산방식과 배출 특성을 충분히 반영하지 못한다는 한계가 있다(Spiegel et al., 2024). 각국의 토양 특성, 기후 조건, 농업기술, 에너지 믹스가 상이하여 동일 품목이라도 실제 배출량에 상당한 편차가 발생한다. 따라서 국제 평균치만으로 계산할 경우 부정확한 결과가 도출될 수 있어, 국가 차원의 고유한 LCI DB 구축이 요구되고 있다.

국제 사회는 각국 및 산업체에서 개발한 LCI DB의 상호운용성 확보와 품질 기준 마련을 위한 플랫폼을 구축하고 있다. UNEP(UN Environment Programme)는 2020년부터 글로벌 LCA 데이터 접근 네트워크인 GLAD를 구성하여 데이터의 상호운용성과 품질 기준을 수립하고 있다. GLAD는 각국의 LCI DB를 연계하고 국제 수명주기 데이터(International Life Cycle Data, ILCD) 등 표준화된 형식으로 자유로운 공유를 추진하고 있다. 2024년 7월 기준 GLAD는 총 101,419개(무료 13,311개, 유료 88,108개)의 LCI DB를 제공하고 있다. EU는 2014년부터 수명주기 데이터 네트워크 LCDN (Life Cycle Data Network)를 통해 품질이 검증된 LCI DB를 확보하고, 이를 제품 환경발자국(Product Environmental Footprint, PEF) 제도에 활용하고자 했다. LCDN은 2023년 5월 기준 2,360개의 LCI DB를 보유하고 있으나, 현재는 비공개 상태로 운영되고 있다.

따라서 우리나라 고유의 농업환경을 반영한 LCI DB 구축을 확장하고 국제적으로 통용할 수 있는 수준의 표준화가 필요하다. 국제 데이터베이스인 Agri-footprint나 WFLDB는 각국의 특수성을 충분히 반영하지 못하므로, 우리나라의 토양 특성, 기후 조건, 농업기술(신기술, 저탄소 농업기술 등), 에너지 믹스 등을 고려한 자체 데이터베이스 개발이 필요하다. 이를 위해 국내 농업 생산 시스템에 대한 체계적인 데이터 수집과 함께, 품목별·지역별 특성을 반영한 세분화된 배출계수 개발이 이루어져야 한다. 동시에 구축된 LCI DB의 국제적 통용성 확보도 중요하다. UNEP의 GLAD나 EU의 LCDN과 같은 국제 플랫폼과의 호환성을 고려하여 ILCD 등 국제 표준 형식을 준수

하는 데이터베이스 설계가 필요하다. 또한 데이터의 품질 관리와 검증 체계를 구축하고, 국제 인증을 획득함으로써 한국 농산물의 탄소 배출량 산정 결과에 대한 신뢰성을 높여야 한다.

5.2. 농업 행태 및 특성을 반영한 LCI DB 최신화

농업 분야 LCI는 일반적으로 요람부터 농장 출하까지(cradle-to-farm gate)의 단계를 대상으로 하며, 필요에 따라 가공 및 유통단계까지 확대된다. 이는 토지준비, 파종, 재배관리(관개, 시비, 농약, 노지, 시설), 수확, 건조/저장과 같은 작물 생산 과정과, 축산의 경우 사료 생산, 가축 사육(에너지 사용, 분뇨 관리), 도축 준비 등의 전 과정에서 투입·배출을 포함한다. 주요 투입물로는 토지이용, 물, 비료, 사료, 에너지, 농약, 기계작업이 있으며, 배출물로는 온실가스(N₂O, CH₄, CO₂), 질산염 및 인류 양분의 유출, 대기오염물질, 폐기물 등을 고려한다.

농업의 특성상 재배환경과 방법에 따라 투입재의 사용량과 종류가 상이하여, 최종 산출물의 탄소발자국 범위가 매우 넓게 나타난다(Ryu et al., 2012). Lee et al. (2022)의 국내 과수 16종에 대한 LCA 연구에 따르면, 노지 감귤의 탄소발자국은 417 kg CO₂e/1,000m²인 반면, 비가림 하우스 감귤은 1,027 kg CO₂e/1,000m²로 2배 이상의 차이를 보였다. 이는 시설재배에서의 난방 및 자재 사용 증가에 따른 것으로, 저탄소 인증 기준과 비교 시 품목에 따라 -3%에서 +101%까지의 차이가 나타나 기존 기준과 최신 데이터 간 상당한 괴리가 있음이 확인되었다. 또한 다년생 작물의 경우 탄소 흡수 효과까지 고려한 종합적 평가에 대한 필요성이 제기되고 있다. Lim et al. (2022)의 연구에서 녹차 재배지의 바이오매스 탄소흡수는 순배출량의 최대 59%까지 상쇄할 수 있는 것으로 나타나, 재배면적 유지관리가 탄소중립 달성에 중요한 요소임이 입증되었다.

세계적으로 농업 및 축산 LCI는 적용 범위를 지속적으로 확대하고 있으나, 지역 특이성, 복잡한 배출 메커니즘, 데이터 부족 등의 한계 극복이 과제로 남아있다. World Food LCA DB는 유럽 컨소시엄 주도로 글로벌 데이터를 수집하고 있으며, 농법(관행 vs 유기농), 규모(소농 vs 대농) 등에 따른 세부 데이터셋 개발을 확대하고 있다(Fan et al., 2022). 축산 부문 LCI는 다기능성 문제(예: 젖소의 우유와 송아지 동시 생산)에 직면해 있어, 생산물 단위당 환경부담 산정을 위한 할당 방법 선택이 중요한 과제로

Table 2. Comparison of carbon footprints of major agricultural products

Product	Carbon footprint (kg CO ₂ e/kg)	Conditions	Sources
Rice (paddy)	<p>≈ 1.1–1.6 (conventional)</p> <p>~ 2.6–3.7 (global average)</p>	Varies significantly by region and cultivation method. For example, conventional flooded rice has CF of ~1.14 kg/kg in Europe and ~1.62 kg/kg in the USA. Methane emissions dominate the overall footprint, leading to a global average of ~2.6–3.7 kg/kg. Some reports indicate that organic rice may have approximately 8% higher CF due to increased methane release.	Kim et al. (2018), Klimato (2023)
Maize	<p>≈ 0.2–0.6 (conventional)</p>	Among cereals, corn generally has low emissions. In highly intensive systems, CF can be reduced to ~0.18–0.19 kg/kg (e.g., Polish conventional farms). N ₂ O emissions from fertilizer input are the main contributor. In low-yield conditions or with increased input, CF may rise to ~0.3–0.6 kg/kg. The difference between conventional and organic production is generally minimal.	Holka & Bieńkowski (2020)
Potato	<p>≈ 0.13–0.15 (conventional)</p> <p>~ 0.13 (organic)</p>	Very low emissions per unit. In a Czech case study, conventional potato production yielded ~0.145 kg/kg, while organic production was ~0.126 kg/kg (about a 13% reduction). Low input relative to yield contributes to the lower CF, with fertilizer production and soil N ₂ O as primary factors. Note that long-distance transport of organic potatoes could offset some benefits.	Moudrý et al. (2015)
Tomato	<p>≈ 0.2–0.4 (open-field)</p> <p>≈ 0.8–2.0 (greenhouse)</p>	A stark difference exists based on the growing environment. Open-field or unheated greenhouse tomatoes have CF values of ~0.2–0.4 kg/kg (production phase only), which is relatively low. In contrast, tomatoes grown in heated greenhouses have a production-phase CF of ~1.3 kg/kg, rising to ≥2.0 kg/kg when distribution is included. Fossil fuel use for heating is the major driver of higher emissions in greenhouse production.	Ravani et al. (2024)
Lettuce	<p>≈ 0.3–0.5 (open-field)</p> <p>≈ 2.0–3.0 (greenhouse)</p>	Leafy vegetables typically exhibit low CF. Open-field lettuce is reported at ~0.3–0.5 kg/kg, but in winter, heated greenhouse lettuce can reach up to ~2.8 kg/kg due to the energy required for heating. Seasonal and regional differences in heating practices significantly impact the overall CF.	Klimato (2023)
Sweet Potato	<p>≈ 0.2–0.3 (estimated)</p>	Estimates vary somewhat by study, but sweet potato generally has a CF similar to or slightly higher than that of potatoes. In an intensive farming case from South China, sweet potato production had an emission rate of ~1165 kg/ha—higher than rice or corn under similar conditions but lower than potatoes. Increased yield generally lowers the CF per unit.	Tang et al. (2022)
Beef	<p>≈ 22 (U.S.)</p> <p>~ 40–60 (global average)</p>	The highest among livestock products. Intensive feedlot systems (e.g., U.S. grain-fed beef) can reduce CF to ~22 kg/kg, but the global average—which includes pasture-based and feed-crop production—is typically in the range of 40–60 kg/kg. Major contributors include methane from enteric fermentation and emissions from feed production and land-use change.	Avery and Avery (2008), Johnson et al. (2003), Subak (1999)
Pork	<p>≈ 5.98–7.07</p>	Pork emissions are roughly one-fifth those of beef. Grain-fed pork systems show relatively consistent CF values across regions, typically around 5–7 kg/kg. The majority of emissions arise from feed production (CO ₂ and N ₂ O) and CH ₄ from manure management.	Klimato (2023)

Chicken	<p>≈ 4.0 (U.S.)</p> <p>~ 5.0-6.0 (global average)</p>	<p>Among meat products, chicken has the lowest CF. In factory farming (e.g., U.S. systems), CF is about ~4 kg/kg, with a global average of approximately 5–6 kg/kg. High feed efficiency and minimal methane emissions contribute to its lower CF, although feed production and manure N₂O remain important factors.</p>	<p>University of Michigan Center for Sustainable Systems (2022)</p>
Milk	<p>≈ 2.0-2.8 (Ethiopia)</p> <p>~ 2.5 (global average)</p>	<p>The CF of raw (base) milk is around 2–3 kg/kg. For example, Kenyan dairy systems estimate about 2.0–2.8 kg CO₂e per kg at the farm level, with regional variations. Global mixed systems average approximately 2.5 kg/kg. Main emission sources include feed production, enteric fermentation (CH₄), and manure N₂O.</p>	<p>Balcha et al. (2022), Opio et al. (2013)</p>

* ≈ (approximately equal to) denotes own derived results, while ~ (tilde) indicates values cited from other literature.

대두되고 있다(Balcha et al., 2022). 시스템 경계 설정에 따라 사육단계만 고려할 때와 사료재배 단계까지 포함할 때의 탄소발자국 편차가 크게 나타나며(University of Michigan Center for Sustainable Systems, 2022), 사료 종류(사료작물, 곡물 사료 등)에 따른 축종별 편차도 발생한다(Klimato, 2023).

지역별 편차 역시 농업 LCI의 주요 과제이다. Notarnicola et al. (2016)은 동일 국가 내에서도 지역에 따라 비료 사용량 등이 크게 달라지므로, 높은 지리적 특이성을 갖춘 데이터베이스의 필요성을 강조했다. Ecoinvent와 Agri-footprint는 주요 농산물에 대해 국가별 또는 지역별 프로세스를 구분 제공하고 있으나, 전 세계적 coverage는 여전히 불충분한 상황이다. 국가별 소고기 탄소발자국 비교 연구(Heo et al., 2022)에 따르면, 네덜란드 9.8, 미국 11.9, 한국 13.9 kgCO₂e/kg인 반면, 브라질 34.6, 에티오피아 141.5 kgCO₂e/kg로 나타나 OECD 국가와 개발도상국 간 현저한 차이를 보였다. 수산물의 경우, Ziegler et al. (2013)의 노르웨이 20개 이상 수산물 탄소배출량 연구에서, 노르웨이-모스크바 운송 청어는 0.7 kgCO₂e/kg, 노르웨이-도쿄 운송 연어는 14 kgCO₂e/kg의 배출량을 보여, 어업 방법과 운송 방식에 따른 차이가 확인되었다.

이러한 한계로 인해 농업 LCI에서는 불확실성 분석이 필수적으로 권장된다. Ecoinvent 등은 Pedigree 매트릭스 기반 불확실성 범위를 제공하여 사용자의 민감도 분석을 지원하며, 연구자들은 몬테카를로 시뮬레이션 등을 통해 결과의 신뢰구간을 추정하고 있다. 그러나 근본적으로는 데이터 갱신을 통한 한계 극복이 필요하다. 정밀농업, 유기농 등 새로운 영농 기술과 품종 변화로 인한 배출양상 변화를 반영하기 위해 LCI DB의 정기적 업데이트가 요구된다. 실제로 Ecoinvent는 최신 버전(v3.11)에서 스위스

농업의 관행 변화(유기농 비중 증가 등)를 반영하여 130여 개의 농업 프로세스를 추가했다.

따라서 국내 농업 LCI DB의 효과적인 최신화를 위해서는 빠르게 변화하는 농업 생산 시스템과 기술 발전을 지속적으로 반영할 수 있는 체계적인 갱신 메커니즘이 필요하다. 특히 시설재배와 노지재배 간 탄소발자국이 2배 이상 차이를 보이는 국내 감귤 사례에서 드러나듯, 동일 품목 내에서도 재배 방식에 따른 최신 데이터 확보가 중요하다. 기존 저탄소 인증 기준과 최신 데이터 간에 -3%에서 +101%까지의 상당한 괴리가 확인된 만큼, 농업기술 및 품종 변화에 따른 배출량 변화를 정기적으로 측정하고 LCI DB에 반영하는 시스템 구축이 시급하다.

또한 최신 연구 결과와 농업 트렌드를 LCI DB에 신속하게 통합하는 과정도 강화해야 한다. 다년생 작물의 바이오매스 탄소흡수 효과, 정밀농업과 스마트팜 기술 도입에 따른 투입재 사용 변화, 유기농 비중 증가와 같은 영농 방식의 전환 등을 데이터베이스에 지속적으로 업데이트해야 한다. Ecoinvent의 최신 버전(v3.11)이 스위스 농업의 관행 변화를 반영하여 130여 개의 농업 프로세스를 추가한 사례를 벤치마킹하여, 국내 농업 LCI DB도 최소 1-2년 주기로 체계적인 갱신을 추진함으로써 국내 농산물의 탄소발자국 산정 정확도를 높이고 국제 경쟁력을 강화할 수 있을 것이다.

5.3. 신기술을 활용한 LCI 데이터 고도화

LCI DB 구축을 위한 활동자료 기반의 단위공정 데이터 수집에는 상당한 시간과 자원이 소요된다(Miah et al., 2018). 특히 농업 분야는 연중 생산공정이 비교적 일정한 산업과 달리, 작물 생산의 계절적 변동성과 작물 주기를 고려해야 하므로 LCI 데이터 수집이 더욱 복잡해진다. 또

한 농업 숲, 작물 품종, 기후 조건, 투입재 사용량 등이 지속적으로 변화하므로 데이터의 시계열적 최신성 유지가 중요하다.

농업 환경의 계절적 변동성으로 인한 데이터 수집의 어려움은 여러 연구에서 확인되었다. Cabot et al. (2023)은 우루과이 레몬 생산을 대상으로 한 LCA 연구에서 연도별 기후 차이로 인한 계절 간 변동성이 LCI에 큰 영향을 미침을 밝혔다. 동일한 농법을 적용하더라도 강우량과 기온 등 기후 조건의 변화가 물 사용량과 수확량의 변동을 초래하여, 환경영향 지표에 상당한 차이를 발생시킨다는 것이다. Perrin et al. (2017)은 Benin 지역 채소 재배에 대한 LCA 연구에서 필지(field) 단위 배출량의 변동성이 환경영향 평가 결과를 좌우할 만큼 중요하다고 강조했다. 이러한 변동성은 작물 윤작 체계에서도 관찰되며, 윤작 주기 내 다양한 작물의 투입 및 산출이 달라지므로 모든 주기를 포괄하는 장기간의 데이터 축적이 필요하다.

이러한 데이터 수집의 복잡성과 지속적인 업데이트 필요성을 해결하기 위해 다양한 신기술의 도입이 활발히 연구되고 있다. 먼저 원격탐사(Remote sensing) 기술은 위성 영상이나 드론을 통해 대규모 농지의 작황, 생물량, 토양 상태 등을 파악하는데 활용된다. Yang et al. (2024)은 중국 쓰촨성의 유채 재배지역(18,810 km²)을 대상으로 10 m 해상도의 위성 데이터를 활용하여 필지별 수확량과 재배 특성을 추정하고, 이를 LCA 모델과 통합했다. 이를 통해 농장 단위 탄소발자국의 공간적 변동성을 정밀하게 평가할 수 있었으며, 원격탐사가 LCI의 지역 특이성 향상에 크게 기여할 수 있음을 입증했다.

인공지능(Artificial intelligence, 이하 AI)과 기계학습 역시 LCI 데이터 고도화에 적용되고 있다. AI 기술은 방대한 데이터의 자동 수집·정리와 복잡한 연관성 학습을 통해 데이터의 보완과 갱신을 자동화할 수 있다. Callaghan et al. (2021)은 자연어처리(NLP)를 활용하여 수천 편의 농업 논문에서 질소비료의 환경영향 데이터를 추출했다. 또한 AI는 기존 LCI 데이터의 패턴을 학습하여 결측값을 예측하거나(Balaji et al., 2023), 유사 공정의 데이터로부터 합성 데이터를 생성하는 데 활용될 수 있다. 이는 특히 데이터가 부족한 개발도상국의 농업이나 신규 작물에 대한 LCI 구축에 유용할 것으로 기대된다.

마지막으로 사물인터넷(Internet of things, IoT)과 정밀 농업 기술의 발전은 LCI의 실시간 업데이트를 가능하게 한다. 스마트폰이나 센서를 통해 농장의 연료 사용량, 기계 가동시간, 가축 사료섭취량 등의 데이터가 클라우드

데이터베이스로 수집되고, 이를 LCI DB와 연동하면 실시간에 가까운 LCA 분석이 가능해진다. 이러한 환경이 성숙하면 특정 연도의 기상 조건이나 농업 통계가 즉각 LCI에 반영되어, 연간 변화를 반영하는 동태적 LCI 구축이 가능할 것으로 예상된다.

따라서 농업 분야 LCI DB의 정확성과 시의성을 높이기 위해서는 최신 기술을 활용한 데이터 수집 및 분석 체계 구축이 필수적이다. 농업은 계절적 변동성과 필지별 차이가 크고 작물 주기를 고려해야 하는 복잡성을 지니고 있어, 기존의 활동자료 기반 데이터 수집 방식으로는 시간과 비용이 과도하게 소요된다. 이러한 한계를 극복하기 위해 원격탐사, 인공지능, 사물인터넷 등의 신기술을 적극 도입할 필요가 있다. 특히 중국 쓰촨성 사례에서 볼 수 있듯이 위성영상과 드론을 활용한 원격탐사 기술은 18,810 km² 규모의 대규모 농지에서 필지별 수확량과 재배 특성을 정밀하게 추정할 수 있어, LCI 데이터의 공간적 해상도를 획기적으로 높일 수 있다.

또한 인공지능과 기계학습 기술을 활용하여 방대한 농업 문헌에서 환경영향 데이터를 자동으로 추출하고, 기존 데이터의 패턴을 학습하여 결측값을 예측하거나 합성 데이터를 생성하는 시스템을 구축해야 한다. 이와 함께 스마트팜과 IoT 센서 네트워크를 통해 농장의 연료 사용량, 기계 가동시간, 가축의 사료 섭취량 등의 실시간 데이터를 수집하고 클라우드 기반 LCI DB와 연동하는 체계를 마련할 필요가 있다. 이러한 신기술의 통합적 활용은 기상 조건이나 농업 관행의 연간 변화를 즉각 반영하는 동태적 LCI 구축을 가능하게 하여, 국내 농업환경의 특수성을 정확히 반영한 고품질 LCI DB 구축의 핵심 동력이 될 것으로 사료된다.

6. 결론

본 연구는 EU의 CBAM가 농업 분야로 확대될 가능성에 주목하고, 이에 대한 영향 예측과 더불어 체계적 대응을 위해 국내 농업 분야 LCI DB 구축 방안을 제안했다. EU는 2026년부터 CBAM을 본격적으로 시행할 예정이며, 농업 분야 역시 장기적으로 적용 대상에 포함될 것으로 전망된다. 특히 비료에 대한 CBAM 적용이 결정됨에 따라 농업 생산 비용 상승이 예상되며, 이는 농산물 수출 경쟁력에도 직접적인 영향을 미칠 것으로 예상된다.

농업 분야의 탄소국경세 대응을 위해서는 신뢰성 있는 LCI DB 구축이 핵심 과제이다. 현재 Agri-footprint,

WFLDB 등 국제적으로 활용되는 농식품 LCI DB가 존재하지만, 이들은 국가별 고유의 생산방식과 배출 특성을 충분히 반영하지 못한다는 한계가 있다. 각국의 토양 특성, 기후 조건, 농업기술, 에너지 믹스가 상이하어 동일 품목이라도 실제 배출량에 상당한 편차가 발생하므로, 국가 차원의 고유한 LCI DB 구축이 필수적이다.

농업 분야 LCI DB 구축에 있어 가장 큰 도전 과제는 데이터의 시간적·공간적 변동성이다. 농업은 계절성이 강하고 기후 조건에 따라 투입재 사용량과 수확량이 크게 변동하므로, 단기간의 데이터만으로는 신뢰성 있는 LCI 구축이 어렵다. 또한 같은 작물이라도 재배 지역과 농법에 따라 환경영향이 달라지므로, 이러한 변동성을 반영할 수 있는 데이터 수집 체계가 요구된다.

이러한 문제를 해결하기 위해 원격탐사, 인공지능, 사물인터넷 등 신기술을 활용한 LCI 데이터 수집 및 분석 방법론이 주목받고 있다. 원격탐사 기술은 광범위한 농경지의 작황과 환경 데이터를 효율적으로 수집할 수 있게 하며, 인공지능은 방대한 데이터의 처리와 결측값 추정을 가능하게 한다. 특히 사물인터넷 기술과 정밀농업의 결합은 실시간 데이터 수집을 통한 동태적 LCI DB 구축을 가능하게 할 것으로 기대된다.

국제적으로 통용할 수 있는 국내 농업분야 LCI DB 구축을 위해서는 다음과 같은 정책적 지원이 필요하다. 첫째, 농업 환경 데이터의 표준화된 수집 체계를 구축해야 한다. 농가별 투입재 사용량, 에너지 소비량, 수확량 등의 데이터를 체계적으로 수집하고, 이를 국가 단위 DB로 통합하는 시스템이 요구된다. 둘째, 신기술 기반의 데이터 수집 인프라 구축을 위한 투자가 필요하다. 위성영상, IoT 센서, 스마트팜 데이터 등을 LCI DB와 연계하는 기술 개발이 지원되어야 한다. 셋째, 국제 표준과의 정합성을 확보하면서도 국내 농업 특성을 반영할 수 있는 LCI 방법론을 개발해야 한다.

결론적으로, CBAM이 농업분야에 도입에 대한 선제적인 대응은 국내 농업의 국제 경쟁력 확보를 위해 필수적이다. 특히 신기술을 활용한 LCI DB 구축은 단순한 규제 대응을 넘어, 농업 분야의 지속가능성 향상과 과학적 정책 수립을 위한 기반이 될 것이다. 향후 정부, 연구기관, 농업 현장이 협력하여 체계적인 데이터 수집 체계를 구축하고, 이를 바탕으로 국제적 신뢰성을 갖춘 LCI DB를 발전시켜 나가야 할 것이다. 본 연구의 결과는 국내 농업의 탄소중립 실현을 위한 중요한 기초자료가 될 것으로 기대된다.

사사

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-00517582).

Reference

- ADEME (Agence de la transition écologique). 2020. *Agribalyse methodology: Life cycle assessment of agricultural products in France*. The French Environment and Energy Management Agency. [accessed 2025 Feb 14] <https://www.ademe.fr>
- Avery A, Avery D. 2008. Beef production and greenhouse gas emissions. *Environ Health Perspect* 116(9): A374-A375. doi: 10.1289/ehp.11716
- Balaji B, Vunnava G, Domingo N, Gupta S, Gupta H, Guest G, Srinivasan A. 2023. Flamingo: Environmental impact factor matching for life cycle assessment with zero-shot machine learning. *ACM J Comput Sustainable Soc* 1(2): 1-23. doi: 10.1145/3616385
- Balcha E, Menghistu HT, Zenebe A, Hadush B. 2022. Carbon footprint of cows' milk: A case study of peri-urban and urban dairy farms within Mekelle milk-shed, Ethiopia. *Carbon Manag* 13(1): 55-68. doi: 10.1080/17583004.2022.2039301
- Bellora C, Fontagné L. 2023. EU in search of a carbon border adjustment mechanism. *Energy Econ* 123: 106673. doi: 10.1016/j.eneco.2023.106673
- Blonk Consultants. 2019. *Agri-footprint 5.0 - Part 2: Description of data*. Gouda (Netherlands): Blonk Consultants. [accessed 2025 Feb 14] <https://www.blonk-consultants.com>
- Branger F, Quirion P. 2014. Would border carbon adjustments prevent carbon leakage and heavy industry competitiveness losses? Insights from a meta-analysis of recent economic studies. *Ecol Econ* 99: 29-39. doi: 10.1016/j.ecolecon.2013.12.010
- California Department of General Services. 2018. *Buy Clean California Act*. [accessed 2025 Feb 14] <https://www.dgs.ca.gov/PD/Resources/Page-Content/Procu>

- rement-Division-Resources-List-Folder/Buy-Clean-California-Act
- Callaghan M, Schleussner CF, Nath S, Lejeune Q, Knutson TR, Reichstein M, Hansen G, Theokritoff E, Andrijevic M, Brecha RJ, Hegarty M, Jones C, Lee K, Lucas A, van Maanen N, Menke I, Pflleiderer P, Yesil B, Minx JC. 2021. Machine-learning-based evidence and attribution mapping of 100,000 climate impact studies. *Nat Clim Chang* 11(11): 966-972. doi: 10.1038/s41558-021-01168-6
- Chen CF, Chen SK. 2024. Carbon footprint inventory using life cycle energy analysis. *MRS Energy Sustain* 11: 107-122. doi: 10.1557/s43581-023-00074-y
- Copa-Cogeca. 2021. The future of our arable farmers will (also) depend on a carbon adjustment mechanism with realistic borders. Brussels: European Farmers European Agri-Cooperatives.
- EC (European Commission). 2019. The European Green Deal. [accessed 2025 Feb 14] https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- EC (European Commission). 2021a. 2030 Climate Target Plan: Agricultural methane reduction. [accessed 2025 Feb 14] https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en
- EC (European Commission). 2021b. Proposal for a regulation of the European Parliament and of the council establishing a carbon border adjustment mechanism (COM/2021/206 final). [accessed 2025 Feb 14] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021PC206>
- EC (European Commission). 2022. Farm to fork strategy – for a fair, healthy and environmentally-friendly food system-. [accessed 2025 Feb 14] https://food.ec.europa.eu/horizontal-topics/farm-fork-strategy_en
- EC (European Commission). 2023. Carbon border adjustment mechanism. Available from: https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en
- Ecoinvent Association. 2023. About the ecoinvent database. [accessed 2025 Feb 14] <https://ecoinvent.org/database/>
- EP (European Parliament). 2022. Procedure 2021/0214/COD on COM (2021) 564: Proposal for a regulation of the European parliament and of the council establishing a carbon border adjustment mechanism. European Parliament; 2022. [accessed 2025 Feb 14] https://eur-lex.europa.eu/procedure/EN/2021_214
- Fan J, Liu C, Xie J, Han L, Zhang C, Guo D, Niu J, Jin H, McConkey BG. 2022. Life cycle assessment on agricultural production: A mini review on methodology, application, and challenges. *Int J Environ Res Public Health* 19(16): 9817. doi: 10.3390/ijerph19169817
- KOTRA (Korea Trade-Investment Promotion Agency). 2023. Q&A for carbon border adjustment mechanism. KOTRA 23-074. [accessed 2025 Feb 14] <https://okfta.kita.net/upload/downAtch?atchGbn=NTT&atchId=4326>
- Fournier Gabela JG, Spiegel A, Stepanyan D, Freund F, Banse M, Gocht A, Söder M, Heidecke C, Osterburg B, Matthews A. 2024. Carbon leakage in agriculture: When can a carbon border adjustment mechanism help? *Clim Policy* 24(10): 1410-1425. doi: 10.1080/14693062.2024.2387237
- Finkbeiner M, Inaba A, Tan R, Christiansen K, Klüppel HJ. 2006. The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044. *Int J Life Cycle Assess* 11: 80-85. doi: 10.1065/lca2006.02.002
- Garnett T. 2011. Where are the best opportunities for reducing greenhouse gas emissions in the food system (including the food chain)?. *Food Policy* 36: S23-S32. doi: 10.1016/j.foodpol.2010.10.010
- GHG Protocol. 2025a. Chinese Life Cycle Database (CLCD). [accessed 2025 Feb 14] Available from: <https://ghgprotocol.org/Third-Party-Databases/CLCD>
- GHG Protocol. 2025b. Inventory Database for Environmental Analysis (IDEA). [accessed 2025 Feb 14] <https://ghgprotocol.org/third-party-databases/IDEA>

- Hansen-Kuhn K. 2021. Carbon tariffs and fertilizers: Wrong fit for purpose. Institute for Agriculture & Trade Policy. [accessed 2025 Feb 14] <https://www.iatp.org/carbon-tariffs-and-fertilizers-wrong-fit-purpose>
- Hellweg S, Canals M. 2014. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. *Science* 344(6188): 1109-1113. doi: 10.1126/science.1248361
- Heo J, Baek S, Lee H. 2022. Impact of beef self-sufficiency improvement in Korea on global greenhouse gas emission reduction. *J Anim Breed Genet* 6(1): 1-9. doi: 10.12972/jabng.20220001
- Holka M, Bieńkowski J. 2020. Carbon footprint and life-cycle costs of maize production in conventional and non-inversion tillage systems. *Agronomy* 10(12): 1877. doi: 10.3390/agronomy10121877
- Johnson DE, Phetteplace HW, Seidl AF, Schneider UA, McCarl BA. 2003. Management variations for U.S. beef production systems: Effects on greenhouse gas emissions and profitability. Proceedings of the 3rd International Methane and Nitrous Oxide Mitigation Conference; 2003 Nov 17~Nov 21; Beijing, China: China Coal Information Institute. pp. 953-961.
- Klimato. 2023. Understanding the carbon footprint of food ingredients. [accessed 2025 Feb 14] <https://klimato.com/klimato-insights/greenhouse-gas-emission-analysis-of-food-components>
- Kim S, Kim T, Smith TM, Suh K. 2018. Environmental implications of eco-labeling for rice farming systems. *Sustainability* 10(4): 1050. doi: 10.3390/su10041050
- Lee YK, Ryoo SW. 2022. Analysis of trade benefit through EU Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) target item's footprint tracking process and calculation—LCA (ISO 14040) analysis of steel products based on EU PAS 2050 and product category rules (PCR). *Korea Trade Rev* 47(6): 355-375. doi: 10.22659/KTRA.2022.47.6.355
- Lee J, Jung S, Noh H, Choi J, Jeon M, Choi E. 2022. Study on the life cycle assessment of domestic agricultural products (fruits) using the statistics data (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 13(6): 805-816. doi: 10.15531/KSCCR.2022.13.6.805
- Lim NH, Lee Y, Lee J, Kim J. 2022. Carbon footprint study of Korean green tea industry using the methods of the life cycle assessment and calculating carbon absorption in agricultural land. *Adv Environ Eng Res* 3(4): 1-22. doi: 10.21926/aer.2204047
- Matthews A. 2022. Trade policy approaches to avoid carbon leakage in the agri-food sector. Brussels: The Left in the European Parliament. <https://www.left.eu/content/uploads/2023/02/GUE-Study-TRADE-Carbon-leakage.pdf>
- Miah JH, Griffiths A, McNeill R, Halvorson S, Schenker U, Espinoza-Orias N, Morse S, Yang A, Sadhukhan J. 2018. A framework for increasing the availability of life cycle inventory data based on the role of multinational companies. *Int J Life Cycle Assess* 23(9): 1744-1760. doi: 10.1007/s11367-017-1391-y
- Moudrý J, Jelínková Z, Jarešová M, Plch R, Moudrý J, Konvalina P. 2015. Assessing greenhouse gas emissions from potato production and processing in the Czech Republic. *Outlook on Agric* 42(3). doi: 10.5367/oa.2013.0138
- National Renewable Energy Laboratory. 2025. U.S. Life Cycle Inventory Database. [accessed 2025 Feb 14] Available from: <https://www.nrel.gov/analysis/lci.html>
- Nordin I, Wilhelmsson F, Jansson T, Fellmann T, Himics M. 2024. Border carbon adjustments in agri-food markets: Not as effective as one might think. *Q Open* 4(1): qoae015. doi: 10.1093/qopen/qoae015
- Notarnicola B, Sala S, Anton A, McLaren SJ, Saouter E, Sonesson U. 2017. The role of life cycle assessment in supporting sustainable agri-food systems: A review of the challenges. *J Clean Prod* 140(2): 399-409. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.06.071
- Opio C, Gerber P, Mottet A, Falcucci A, Tempio G, MacLeod M, Vellinga T, Henderson B, Steinfeld H. 2013. Greenhouse gas emissions from ruminant supply chains - A global life cycle assessment. *Food and*

- Agriculture Organization of the United Nations. [accessed 2025 April 22] <http://www.fao.org/3/i3461e/i3461e.pdf>
- Perrin A, Basset-Mens C, Huat J, Gabrielle B. 2017. The variability of field emissions is critical to assessing the environmental impacts of vegetables: A Benin case study. *J Clean Prod* 153: 104-113. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.159
- Ravani M, Georgiou K, Tselempi S, Monokrousos N, Ntinis GK. 2023. Carbon footprint of greenhouse production in EU—How close are we to Green Deal goals? *Sustainability* 16(1): 191. doi: 10.3390/su16010191
- Ryu JH, Jung SC, Kim GY, Lee JS, Kim KH. 2012. LCA (life cycle assessment) for evaluating carbon emission from conventional rice cultivation system: Comparison of top-down and bottom-up methodology (in Korean with English abstract). *Korean J Soil Sci Fertil* 45(6): 1143-1152. doi: 10.7745/KJSSF.2012.45.6.1143
- Rasmussen LL. 2024. Denmark is the first country in the world to introduce carbon tax on livestock farming. Ministry of Foreign Affairs of Denmark. [accessed 2025 Feb 14] <https://investindk.com/insights/denmark-is-the-first-country-in-the-world-to-introduce-carbon-tax-on-livestock-farming>
- Subak S. 1999. Global environmental costs of beef production. *Ecol Econ* 30(1): 79-91. doi: 10.1016/S0921-8009(98)00100-1
- Tang C, Lu Y, Mo X, Yang Y, Wang Z. 2022. Energy, economic, and environmental assessment of sweet potato production on plantations of various sizes in South China. *Agronomy* 12(6): 1290. doi: 10.3390/agronomy12061290
- Quantis. 2015. World Food LCA Database (WFLDB) – project overview. [accessed 2025 Feb 14] <https://www.quantis-intl.com>
- University of Michigan Center for Sustainable Systems. 2022. Carbon Footprint Factsheet. [accessed 2025 Feb 14] <https://css.umich.edu/publications/factsheets/sustainability-indicators/carbon-footprint-factsheet>
- Spiegel A, Heidecke C, Fournier JG. 2024. Climate change mitigation in agriculture beyond 2030: Options for carbon pricing and carbon border adjustment mechanisms. *EuroChoices* 23(1): 19-27. doi: 10.1111/1746-692X.12345
- Yang X, Dong X, Bezama A, Liu Y. 2024. Improving rapeseed carbon footprint evaluation via the integration of remote sensing technology into an LCA approach. *Sci Total Environ* 946: 174262. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.174262
- Ziegler F, Winther U, Hognes ES, Emanuelsson A, Sund V, Ellingsen H. 2013. The carbon footprint of Norwegian seafood products on the global seafood market. *J Ind Ecol* 17(1): 103-116. doi: 10.1111/j.1530-9290.2012.00485.x
- Zhang K, Yao YF, Qian XY, Zhang YF, Liang QM, Wei YM. 2024. Could the EU carbon border adjustment mechanism promote climate mitigation? An economy wide analysis. *Adv Clim Chang Res* 15(5): 557-571. doi: 10.1016/j.accre.2024.05.002