

전과정평가법을 활용한 고구마 및 풋옥수수의 탄소배출량 산정

진주현* · 최은정**† · 이선일** · 권효숙** · 이형석** · 박혜란** · 정순철*** · 노훈**** · 이지선*****

*국립농업과학원 농업환경부 기후변화평가과 석사과정학생, **국립농업과학원 기후변화평가과 농업연구사, ***에코네트웍(주) 컨설팅부문 본부장, ****에코네트웍(주) 컨설팅부문 팀장, *****에코네트웍(주) 컨설팅부문 선임

Analysis of Greenhouse Gas Emissions for Sweet Potato and Corn Based on Life Cycle Assessment

Jin, Ju Hyeon* · Choi, Eun Jung**† · Lee, Sun Il** · Gwon, Hyo Suk** · Lee, Hyoung Seok** · Park, Hye Ran** · Jung, Soon Chul*** · Noh, Hun**** and Lee, Ji Seon*****

*Master student, Climate Change Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, Korea

**Researcher, Climate Change Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, Korea

***General Manager, Consulting Division, Econetwork Co., Ltd, Seongnam, Korea

****Team Leader, Consulting Division, Econetwork Co., Ltd, Seongnam, Korea

*****Consultant, Consulting Division, Econetwork Co., Ltd, Seongnam, Korea

ABSTRACT

In this study, we calculated the carbon emissions of sweet potato and corn production systems using Life Cycle Assessment methodology with the national Life Cycle Inventory database and the latest Korean statistics for agricultural products. Previous calculations of carbon emissions for sweet potato and corn were not accurate because they did not reflect current statistics and cultivation management. Fertilizer and electricity consumption are the highest among the materials input to 1 kg for sweet potato production, with fertilizer amount of 2.94E - 01 kg/kg and electricity consumption of 1.32E - 01 kWh/kg. Also, fertilizer amount is the highest among the materials input to 1 kg for corn production, with fertilizer amount of 9.16E - 01 kg/kg. Direct emission of greenhouse gases showed a carbon footprint of 2.70E - 01 kg CO₂-equivalent (eq.)/kg for sweet potato and 1.98E - 01 kg CO₂-eq./kg for corn. Also, the result of Life Cycle Impact Assessment for sweet potato and corn production systems, Global Warming Potential for characterization value was 2.70E - 01 kg CO₂-eq./kg for sweet potato and 1.98E - 01 kg CO₂-eq./kg for corn. The results of this study will be able to contribute to improving accuracy and reliability of carbon footprint of agricultural products.

Key words: LCI, LCA, Carbon Footprint

1. 서론

산업화 이후 화석연료 사용이 많아짐에 따라 대기 온실 가스 농도가 높아지고, 지구 평균온도가 상승하는 온난화 현상이 나타나고 있다. 지구온난화가 가속화되면서 기후변화가 발생하기 시작하였으며, 전 세계 각국은 이러한 기후 변화에 대응하기 위해 수많은 노력을 하고 있다. 우리나라

도 기후변화 방지를 위한 노력에 동참하기 위해 1993년 유엔 기후변화협약(UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change)에 가입하였다. 이러한 흐름 속에 2020년 정부는 2050년까지 온실가스 배출량을 줄이고, 흡수 및 저장량을 증대시켜 순온실가스 배출량을 '0'으로 만든다는 탄소중립을 선언하였다(KLIC, 2022). 2021년 현 정부는 원전과 재생에너지를 사용하여 온실가

†Corresponding author : choiej1@korea.kr (55365, 166 Nongsangmyeong-ro, Wanju, Jeollabuk-do, Korea. Tel. +82-63-238-2486)

ORCID 진주현 0000-0002-7751-1816
최은정 0000-0001-9535-612X
이선일 0000-0002-0519-3150
권효숙 0000-0003-4030-1134
이형석 0000-0002-7459-0643

박혜란 0000-0001-8249-2149
정순철 0000-0002-0666-7178
노훈 0000-0002-5688-9940
이지선 0000-0003-4429-8788

스 감축하고 지역 주도 탄소중립 이행체계를 구축하는 등 저탄소 산업구조 및 순환경제로 전환하는 전략을 세웠다(MOTIE, 2022). 2022년 탄소중립이 본격적으로 시행되었고 이와 같은 움직임은 국외 사례를 통해서도 알 수 있는데, EU의 ‘유럽 그린딜(European Green Deal)’이 그것이다. 유럽 그린딜은 2050년까지 유럽연합 내 탄소중립을 달성하고 더 나아가 오염물질 배출 감소, 친환경재배를 통한 생태계 보존 및 생태계다양성 확보와 같은 지속 가능한 농업 정책을 말한다(Lee, 2020). 뿐만 아니라 EU는 온실가스 감축 목표 달성을 위해 2021년 7월에 ‘탄소국경조정제도(CBAM, Carbon Border Adjustment Mechanism)’의 입법 초안을 공개하였다(Lee and Kim, 2021). 탄소국경조정제도 중 탄소국경세(CBT, Carbon Border Tax)는 온실가스 배출 규제가 약한 나라에서 강한 나라로 수출할 때 적용되는 관세를 말하며 수출국에서 제품을 수출할 때 온실가스 배출량이 많을수록 높은 세율을 지불해야 한다(Kim and Son, 2021). 우리나라 수출 비중이 높은 일부 품목들은 탄소국경세 대상 품목에 포함되기 때문에 수출 경쟁에서 뒤떨어질 가능성이 있다. 이러한 유럽 그린딜의 온실가스 감축 및 탄소국경세를 적용하기 위한 온실가스 평가는 전과정평가(LCA, Life Cycle Assessment) 방법을 통해 이루어진다. 전과정평가는 제품의 전과정(원료 채취, 생산, 사용, 폐기)에서 투입·배출되는 물질과 관련된 환경영향을 평가하고 정량화하기 위한 방법론이다(Ryu et al., 2011; Lee, 1998). 전과정평가를 실행하기 위해 환경부와 산업통상자원부에서 2019년도까지 약 400건 이상의 데이터베이스를 개발하였다(Son et al., 2019).

2012년부터 농림축산식품부도 전과정평가를 통해 관행 재배 대비 온실가스를 감축한 농산물에 대해 저탄소 농축산물 인증 마크를 부여하는 ‘저탄소 농축산물 인증제’를 운영하고 있다. ‘저탄소 농축산물 인증제’는 저탄소 농업기술을 활용하여 원료채취, 농자재 제조, 재배까지 제품의 전과정에서 온실가스 배출을 줄인 농축산물에 부여하는 제도이다. 현재 환경에 대한 소비자들의 인식이 개선됨에 따라 인증을 획득한 농가수 뿐만 아니라 농산물 품목 수도 증가하고 있다. 그러나 농가들의 재배기술 및 관련 통계가 변화하고 있음에도 불구하고, 저탄소 농축산물 인증의 베이스라인이 되는 주요 농산물 표준 탄소배출량(2010년 ~ 2015년)은 산정된 이후 갱신이 이뤄지지 않고 있다. 따라서 과거 시점의 데이터를 기반으로 산정한 탄소배출량은 현재 통계를 기준으로 했을 때 정확도를 신뢰할 수 없어, 최신의 재배현황을 반영한 농산물별 표준 탄소배출량의 재산정이 필요하다.

그러므로 본 연구는 최근 재배 형태를 반영한 농산물별 표준 탄소배출량의 산정을 위해 수행되었으며, 농작물 중 인증면적이 가장 넓은 고구마와 간식용 옥수수인 풋옥수수를 대상으로 하였다. 2021년 저탄소 농축산물 인증통계에 따르면 식량작물 중 고구마는 31 ha, 풋옥수수는 23.6 ha로 1,565.2 ha 다음으로 인증면적 비중이 가장 큰 작물이다(Smart Green Food, 2022). 인증면적 비중이 가장 큰 벼는 2020년에 표준 탄소배출량이 이미 갱신되었으므로 이번 연구에서는 제외하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 방법론

고구마와 풋옥수수 재배과정의 전과정평가는 국제표준화기구(ISO, International Organization for Standardization)에서 제정한 14040과 14044 규격에 의거하여 제품의 환경성을 정량적으로 평가하는 방법론을 사용해 수행하였다(ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006).

전과정평가는 목적 및 범위 설정, 전과정 목록분석, 전과정 영향평가, 해석으로 4가지 단계로 구성되어 있다. 목적 및 범위 설정은 전과정평가를 수행하는 이유와 해당 대상, 제품시스템의 경계, 기능단위(Functional Unit) 등을 설정하는 단계이다. 전과정 목록분석은 제품시스템 경계가 설정되면 각 단위공정별 투입물과 산출물의 데이터를 수집한 후 단위 질량으로 표준화하여 제품의 전과정에서 발생하는 환경부하를 정량화하는 단계를 말한다(ISO 14040, 2006). 전과정 영향평가는 전과정 목록분석의 결과를 바탕으로 환경부하를 해당 영향범주에 상응인자를 곱하여 제품에 의해서 발생하는 환경영향을 평가하는 단계이다(Son et al., 2019).

2.2. 목적 및 범위정의

목적은 과거의 저탄소 인증기준을 최신 데이터베이스(DB, Data Base)와 국가 통계를 활용하여 갱신하고 적용하는 것으로 설정하였다. 국내 통계법 시행령 제9조에 의한 일반통계에 의거하여, 농산물 재배면적을 고려하고 농산물별 목표 오차를 정하여 전국표본 수를 결정하였다. 농산물별로 도별 재배면적과 소득의 표준편차를 고려하여 전국자료의 표본오차를 최소화할 수 있게 도별 표본을 선정하였다. 선정된 표본을 기준으로 국가 승인 통계자료인 농촌진흥청 농산물소득자료집의 2014년부터 2018년도

자료를 활용하였다(Nongsaro, 2014 ~ 2018). 일부 전국적 생산 데이터가 미비한 경우 지역 단위의 데이터를 수집하였으며, 복수의 지역 데이터 활용 시에는 지역 데이터 간 가중치 부여를 위해 지역별 재배면적 비율에 따른 가중평균값을 활용하였다.

JRC technical report는 최소 3년의 평가 기간을 사용하여 기후, 병해충 등 수년간의 재배 조건 변동과 관련된 농작물 수확량 차이를 평균화해야 한다고 제시하고 있다(Fazio et al., 2020). 그러나 본 연구에서는 평균 대비 이상치를 보정하고, 고품질 결과값을 확보하기 위해 5년간(2014 ~ 2018)의 자료를 활용하였다. 전과정평가 대상 작물인 고구마와 풋옥수수의 기능은 식품 원료의 농산물 생산이며 기능단위는 농산물 생산량 1 kg으로 설정하였다. 그러나 농촌진흥청 농산물소득자료집의 1000 m²(10a) 당 투입량을 고려하여 기준흐름을 10a로 판단하였다. 이러한 판단의 이유는 실제 농업 현장에서는 농산물 생산(kg) 단위가 아닌, 면적(10a) 단위 기준으로 영농활동 및 생산이 이뤄지고 있기 때문이다. 따라서 기능단위는 기준흐름에

따라 ‘생산량(kg)/재배면적(10a)’을 곱하여 적용하였다. 또한 전과정평가 결과값의 신뢰도를 얻기 위해 데이터 품질요건을 Table 1에 제시하였다(Nongsaro, 2014 ~ 2018).

2.3. 시스템경계

고구마와 풋옥수수의 원료물질로 투입되는 비료, 작물보호제, 기타자재의 생산과정, 투입되는 에너지의 생산과정 및 제조 단계에 포함되는 기타자재의 폐기과정과 두작물의 재배공정을 시스템경계에 포함하였다. 고구마와 풋옥수수에 대한 시스템경계를 Fig. 1에 나타내었다. 정확한 결과 도출을 위해 국가 LCI DB (Life Cycle Inventory DataBase) 개발 기준(95%) 및 국제 표준(80%)보다 높은 누적질량 97% 이상의 제외기준(Fazio et al., 2020)에 따라 제품의 생산과정에서 사용되는 원부자재(비료, 작물보호제, 기타자재) 전체 값에 대해 정의된 질량기준으로 누적으로 기여하는 모든 투입물 데이터를 포함하는 것을 원칙으로 하였다. 단, 작물보호제 경우 환경적 기여도를 고려하여 데이터 산정에 포함하였다.

Table 1. Data quality requirement of sweet potato and corn production systems

Category	Target agricultural products (sweet potato, corn)				
Time-related coverage	Recent data in the past 5 years (2014 ~ 2018)				
Geographical coverage	2014	2015	2016	2017	2018
	Korea				
Technology coverage	Domestic agricultural products (sweet potato, corn) cultivation process				

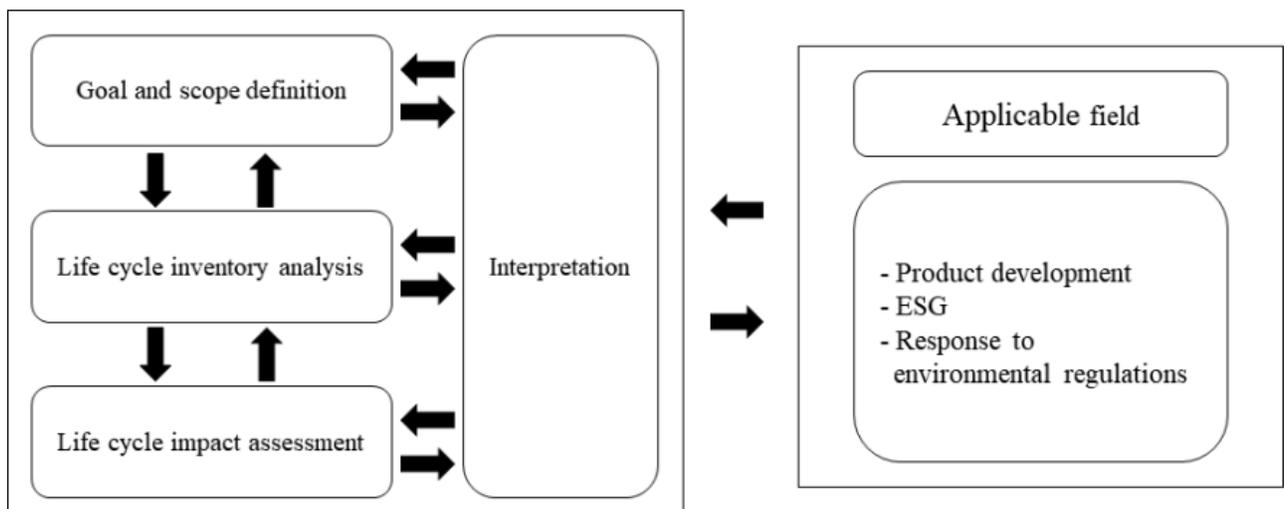


Fig. 1. ISO 14040 Phases of Life Cycle Assessment

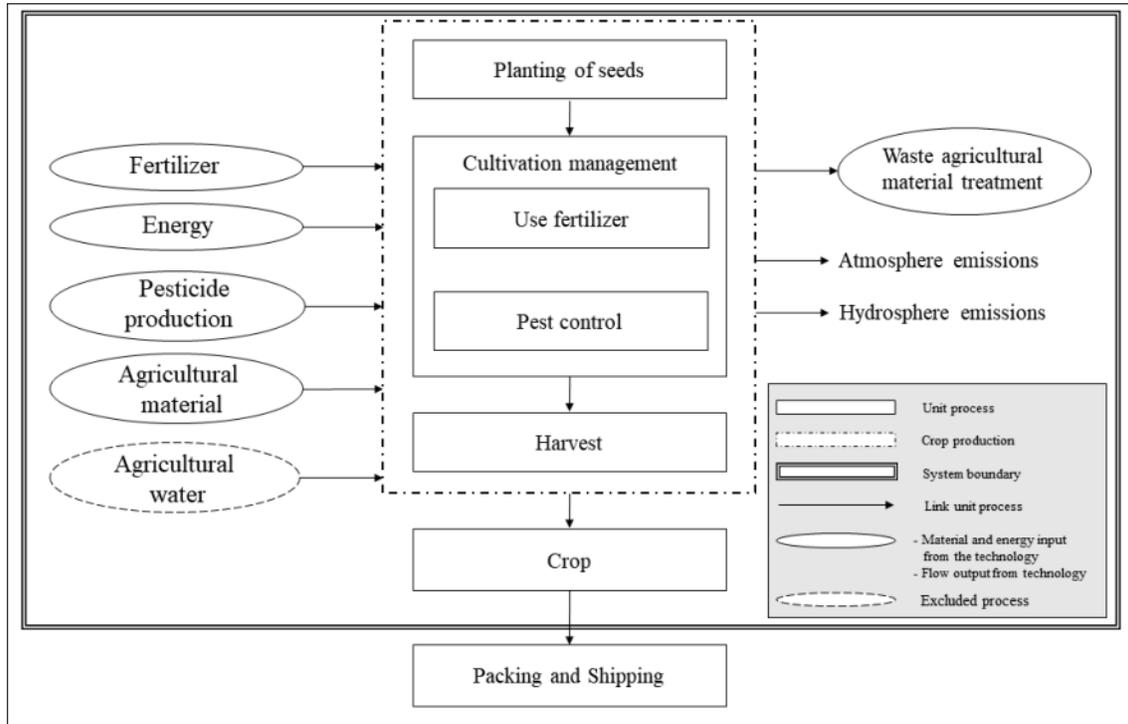


Fig. 2. Process flow diagram for sweet potato and corn production systems

2.4. 전과정 목록분석

‘저탄소 농축산물 인증제’에서 사용되고 있는 「농산물 온실가스 배출량 산정을 위한 개별지침」에 기재된 전과정 단계를 근거로 데이터 수집의 용이성, 공정 특성, 부산물의 발생 여부 등을 고려하여 단위공정 결정을 위해 Fig. 2와 같이 공정흐름도를 작성하였다.

전과정 목록분석을 위한 데이터 수집 및 계산은 농촌진흥청의 연간 전국 농산물소득자료집 통계데이터(2014 ~ 2018년)를 활용하였다. 데이터 수집이 어려울 경우 논리적인 계산 및 추정을 통하여 데이터를 수집/보완하였다. 국가 평균 데이터베이스의 사용은 원료물질, 보조물질, 에너지 등의 상위흐름 및 하위흐름 연결을 위한 데이터베이스를 활용하였고 환경부와 산업통상자원부, 농촌진흥청에서 개발한 LCI DB를 활용하였다.

2.4.1. 데이터 계산

전과정 목록분석을 할 때 사용한 데이터베이스는 원료물질에 대한 상·하위흐름 자료에 대해서 최신 LCI DB를 사용하는 것을 원칙으로 하였다. 데이터베이스의 선택은 우선적으로 ①과거 농산물 탄소발자국(Carbon Footprint)

을 산정했을 때 활용된 데이터베이스, ②동일한 공정의 국가 LCI DB, ③동일한 공정의 해외 LCI DB, ④유사한 공정의 국가 LCI DB, ⑤유사한 공정의 해외 LCI DB 순으로 활용하였다. 데이터 계산은 기능단위를 기준으로 한 데이터 전환 및 합산은 일반원칙을 따라 수행되었다. 전국이 아닌 지역 통계데이터 합산 시 재배 실정을 반영하기 위해 농산물별 지역 재배면적을 기준으로 가중 평균하였다. 투입되는 에너지(경유, 등유, 휘발유 등)의 연소에 의한 대기배출물의 직접배출량은 IPCC 2006의 배출계수 및 식 (1)과 같은 계산식을 적용하여 산정하였다(IPCC, 2006).

- 경유사용에 따른 대기배출량(CO₂, CH₄, N₂O)
= 경유사용량(L) × 발열량(MJ/L) × 배출계수(kg/MJ)

투입되는 비료에 의한 대기배출물(N₂O)의 직접배출량은 ‘저탄소 농축산물 인증제도’에서 활용하는 산정방법을 사용하여 식 (2)와 같이 산정하였다. 수계배출물(PO₄³⁻)의 직접배출량은 JRC Technical Report를 활용하여 식 (3)으로 산정하였다(Fazio et al., 2020; Luca and Rana, 2019).

- 비료사용에 의한 직접배출산정(N_2O)
 $= \text{비료사용량(kg)} \times \text{비료의 유효성분질소함유율(\%)} \times \text{비료의 건조중량율(\%)} \times \text{비료 1kg 당 } N_2 \text{의 토양배출계수(kg } N_2/\text{kg N)} \times \frac{44}{28}$
 $*44/28 = \text{아산화질소 환산계수(kg } N_2O/\text{kg } N_2)$
- 비료사용에 의한 직접배출산정(PO_4^{3-})
 $= \text{비료사용량(kg)} \times \text{인함유율(\%)} \times \text{수계손실율(\%)} \times \frac{95}{31}$
 $*95/31 = \text{인산염 환산계수(kg } PO_4^{3-}/\text{kgP)}$

2.4.2. 이산화탄소 환산(CO_2 -equivalent) 방법

탄소성적의 산출방법은 전과정 목록분석을 진행하여 산출된 온실가스 배출량에, 교토의정서에서 정한 6대 온실가스(CO_2 , CH_4 , N_2O , HFCs, PFCs, SF_6)의 지구온난화지수(GWP, Global Warming Potential)를 각각 곱하여 나타내었다. 지구온난화지수(GWP₁₀₀)는 온실가스가 배출되어 100년 동안 대기에 머무르면서 직접적으로 온실효과에 영향을 미치는 경우, 이산화탄소(CO_2)가 1의 영향을 미칠 때의 환산된 값을 말한다. 지구온난화지수는 IPCC 제5차 평가보고서에 명시된 메탄(CH_4) 28, 아산화질소(N_2O) 265, 수소불화탄소(HFCs) 4 ~ 12,400, 과불화탄소(PFCs) 6,630 ~ 11,100, 육불화황(SF_6) 23,500의 값을 적용하였다(IPCC, 2014).

2.5. 전과정 영향평가

전과정 목록분석의 결과를 가지고 환경부하를 정량적으로 분석하기 위해 환경부에서 시행하는 환경성적표지(EPD, Environmental Product Declaration)의 총 7가지 영향범주에서 물발자국(Water Footprint)을 제외한 지구온난화(Global Warming), 오존층파괴(Ozone Depletion), 산성화(Acidification), 부영양화(Eutrophication), 광화학적 산화물생성(Photochemical Ozone Creation), 자원소모(Abiotic Resource Depletion)를 평가하였다(Son et al., 2019). 물 발자국(Water Footprint)은 한국농촌경제연구원의 연구 자료인 세계농업 제205호를 참고하여 생산량, 재배방법, 품종 등의 한계점에 따라 대상 영향범주에서 제외하였다(Choi et al., 2017).

전과정 목록분석과 영향평가의 산정은 한국환경산업기술원에서 개발한 TOTAL(ver. 6.6.2) software를 사용하였다.

2.6. 가정 및 제한사항

고구마와 풋옥수수에 관련된 설비생산 및 농지구축의 환경부하는 고려하지 않았다. 농가별 현장데이터는 대표성 있는 자료를 산출하기 위해 실제 농가별 현장데이터가 아닌 국가 통계자료를 수집하여 산정하였다. 경우 등 에너지원 및 기타자재의 중량 환산은 ‘저탄소 농축산물 인증제도’ 내 「농산물 온실가스 배출량 산정을 위한 작성 지침」의 ‘붙임4. 에너지 및 기타자재 단위환산계수’에 기재되어있는 값을 활용하여 계산하였다(KOAT, 2013). 비료로 활용되는 가축분퇴비 및 생짚은 시스템 경계 이전에 발생한 폐기물 재활용에 해당하므로 간접배출량 산정에서 제외하였다. 각 수집데이터가 연구 단위로 구성된 사실과 기존 산정방법론에 의거하여 농산물의 재배에 활용되는 기타자재는 1년으로 가정하였다. 농산물의 재배에 활용되는 원부자재(비료, 작물보호제 등)의 농산물 재배지까지의 수송거리는 원부자재를 생산하는 사업장(이하 원부자재 제조사)으로부터 농산물을 생산하는 재배지(이하 농업경영체)까지의 수송거리를 의미하며, 대표성을 확보할 만한 데이터의 수집이 불가하여 산정에서 제외하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 결과

3.1.1. 전과정 목록분석

고구마 생산에 따른 투입된 물질량과 배출량을 Table 2에 나타내었고 전과정 목록분석 결과 및 주요 원인 공정을 Table 3에 나타내었다. 1 kg 생산 당 투입된 비료와 전기 사용량이 가장 높았다. 비료 중 유기질 비료(가축분퇴비, 유박, 액비)의 투입률은 53.9%로 2.49E - 01 kg/kg이었고, 무기질 비료(복합비료, 농용석회, 황산칼리)의 투입률은 9.9%로 4.57E - 02 kg/kg이었다. 이외 투입률은 전기 28.5%로 1.32E - 01 kWh/kg 투입하였고 화석연료 4.8%, 농자재 2%, 작물보호제는 0.9% 차지하였다. 전과정 목록분석 결과 투입물에서는 비료생산에 의한 원유(Crude Oil)가 7.56E - 02 kg/kg으로 가장 높았다. 배출물에서는 직접배출로 인한 이산화탄소(CO_2)가 2.05E - 01 kg/kg으로 가장 높았다. 직접 대기로 배출된 온실가스(CO_2 , CH_4 , N_2O)는 2.06E - 01 kg/kg이 배출되었다. 탄소성적은 고구마의 생산단계까지 배출되는 온실가스를 이

Table 2. Data of input and output of sweet potato production system

Input/ Output	Quantity		Linked inventory DB
	Unit	Amount	
Input			
Compost			
Manure	kg	1.79E - 01	-
Oil cake	kg	6.16E - 02	^{a)} RDA, 2014
Compound fertilizer	kg	2.64E - 02	RDA, 2009
Agricultural lime	kg	1.29E - 02	ME, 2003
Liquid fertilizer	kg	8.35E - 03	RDA, 2014
Sulphate of potash	kg	6.34E - 03	RDA, 2009
Agricultural materials			
Vinyl	kg	5.16E - 03	^{b)} ME, 2012
Lagging cover (Non-woven fabric)	kg	4.03E - 03	RDA, 2009
Pesticide			
Growth regulator	kg	6.71E - 04	-
Insecticide	kg	3.02E - 03	RDA, 2019
Herbicide	kg	4.11E - 04	-
Germicide	kg	3.90E - 05	-
Energy			
Electricity	kWh	1.32E - 01	^{c)} MOTIE, 2000
Diesel	kg	1.82E - 02	MOTIE, 2001
Kerosene	kg	9.82E - 04	MOTIE, 2007
Gasoline	kg	1.02E - 03	MOTIE, 2001
Gas (LPG)	kg	1.77E - 03	MOTIE, 2007
Heavy fuel oil	kg	1.84E - 06	ME, 2018
Output			
Waste			
Compound plastic landfill	kg	1.99E-03	ME, 2013
Compound plastic incineration	kg	5.47E-03	ME, 2015
Compound plastic recycle	kg	1.73E-03	ME, 2013
Production			
Sweet potato	kg	1,640.2	-

a)RDA: Rural Development Administration, b)ME: Ministry of Environment, c)MOTIE: Ministry of Trade, Industry and Energy

Table 3. Results of life cycle inventory about main parameters for sweet potato

Parameter	Quantity		Major cause process	
	LCI DB	Unit		
Input	Coal	3.55E - 02	kg	Energy, Fertilizer
	Crude oil	7.56E - 02	kg	Fertilizer, Energy
	Natural gas	1.37E - 02	kg	Fertilizer, Energy
Output	NOx	7.07E - 03	kg	Fertilizer, Energy
	BOD	1.15E - 02	kg	Fertilizer
	CO ₂	2.05E - 01	kg	Direct emissions, Energy

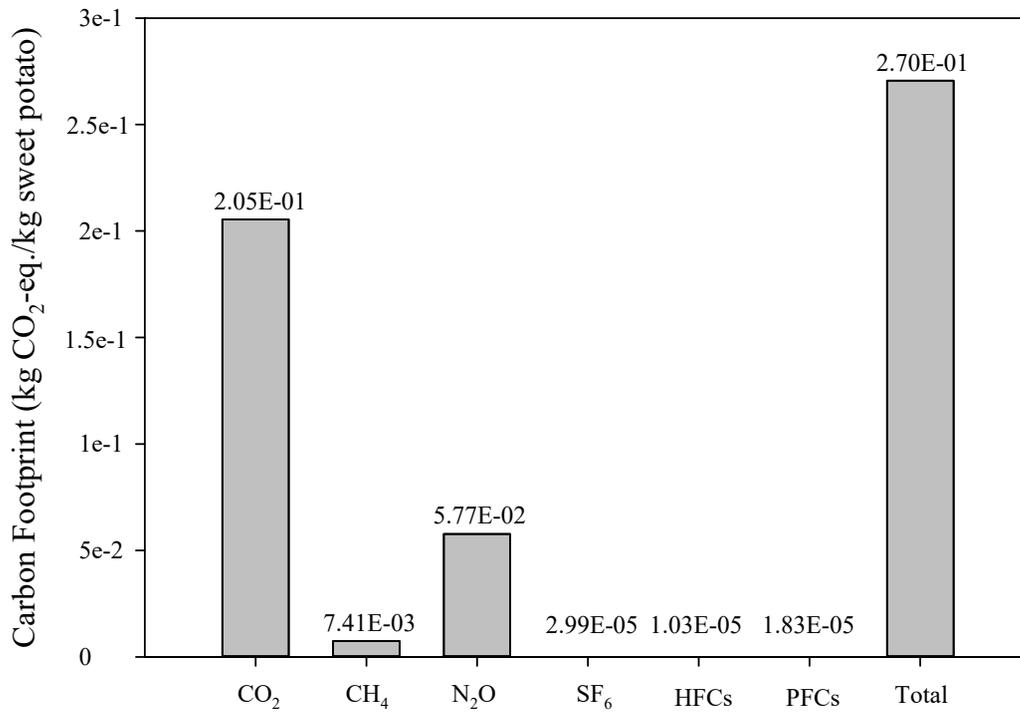


Fig. 3. Carbon footprint compute of sweet potato production system

Table 4. Data of input and output of corn production system

Input/ Output	Quantity		Linked inventory DB
	Unit	Amount	
Compost			
Manure	kg	8.62E - 01	-
Oil cake	kg	3.02E - 02	^{a)} RDA, 2014
Compound fertilizer	kg	2.39E - 02	RDA, 2009
Pesticide			
Growth regulator	kg	1.73E - 03	-
Insecticide	kg	7.26E - 05	-
Herbicide	kg	7.03E - 04	-
Germicide	kg	6.66E - 06	-
Energy			
Electricity	kWh	3.65E - 03	^{b)} MOTIE, 2000
Diesel	kg	4.83E - 03	MOTIE, 2001
Kerosene	kg	3.17E - 04	MOTIE, 2007
Gasoline	kg	3.05E - 04	MOTIE, 2001
Gas (LPG)	kg	6.79E - 05	MOTIE, 2007
Heavy fuel oil	kg	7.43E - 05	^{c)} ME, 2018
Output			
Product			
Corn	kg	2,959.4	-

a)RDA: Rural Development Administration, b)MOTIE: Ministry of Trade, Industry and Energy, c)ME: Ministry of Environment

Table 5. Results of life cycle inventory about main parameters for corn

Parameter	Quantity		Major cause process
	LCI DB	Unit	
Input	Coal	8.75E - 03	Fertilizer, Pesticide
	Crude oil	3.48E - 02	Fertilizer, Energy
	Natural gas	7.60E - 04	Fertilizer, Pesticide
Output	NOx	1.87E - 04	Fertilizer, Pesticide
	BOD	1.03E - 02	Fertilizer
	CO ₂	5.37E - 02	Fertilizer, Direct emissions

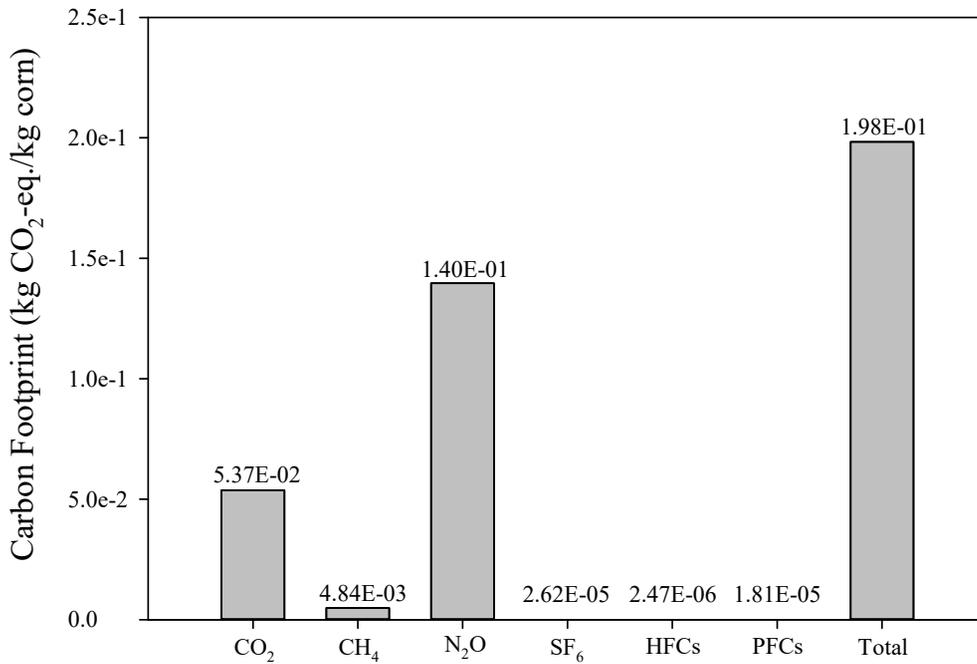


Fig. 4. Carbon footprint compute of corn production system

산화탄소 당량(CO₂-eq.)으로 환산하여 Fig. 3에 나타냈다. 탄소성적은 2.70E - 01 kg CO₂-eq./kg이며 이산화탄소가 2.05E - 01 kg CO₂-eq./kg으로 가장 많이 배출되었고 다음으로 아산화질소가 5.77E - 02 kg CO₂-eq./kg 배출이 많았다.

팥옥수수의 투입된 물질량과 배출량을 Table 4에 나타내었고 전과정 목록분석 결과 및 주요 원인 공정을 Table 5에 나타내었다. 팥옥수수 생산에 따른 투입된 비료량이 가장 많았으며 다음으로 화석연료의 투입량이 많았다. 비료 중 유기질 비료(가축분퇴비, 유박)의 투입률은 96%로 8.92E - 01 kg/kg이 투입되었으며 무기질 비료(복합비료)의 투입률은 2.6%로 2.39E - 02 kg/kg이 투입되었다. 이외 투입률은 화석연료 0.6%, 전기 0.4%,

작물보호제 0.3% 차지하였다. 전과정 목록분석 결과 투입물에서는 고구마와 마찬가지로 원유(Crude Oil)가 3.48E - 02 kg/kg, 배출물에서는 이산화탄소(CO₂)가 5.27E - 02 kg/kg으로 가장 높게 산출되었다. 팥옥수수는 모든 파라미터의 주요 원인은 비료이며 이는 비료의 투입량이 매우 높기 때문이라고 판단된다. 팥옥수수를 재배하면서 직접 배출된 온실가스(CO₂, CH₄, N₂O)의 배출량은 5.44E - 02 kg/kg이었다. 탄소성적은 팥옥수수 재배단계까지 배출되는 온실가스를 이산화탄소 당량(CO₂-eq.)으로 환산하여 Fig. 4에 나타내었다. 탄소성적은 1.98E - 01 kg CO₂-eq./kg이며 아산화질소가 1.40E - 01 kg CO₂-eq./kg 가장 많이 배출되었고, 뒤를 이어 이산화탄소가 5.37E - 02 kg CO₂-eq./kg으로 배출되었다.

Table 6. The results of the characterization value of the life cycle impact assessment for sweet potato and corn production system

Impact category	Abbreviation	Characterization Quantity		Unit
		sweet potato	corn	
Global Warming Potential	GWP	2.70E - 01	1.98E - 01	kg CO ₂ -eq./kg
Ozone Depletion Potential	ODP	1.54E - 08	1.25E - 08	kg CFC ₁₁ -eq./kg
Acidification Potential	AP	9.76E - 04	5.46E - 04	kg SO ₂ -eq./kg
Eutrophication Potential	EP	1.52E - 03	2.86E - 03	kg PO ₄ ³⁻ -eq./kg
Photochemical Ozone Creation Potential	POCP	1.14E - 04	4.29E - 05	kg C ₂ H ₄ -eq./kg
Abiotic resource Depletion Potential	ADP	2.12E - 03	8.65E - 04	kg Sb-eq./kg

3.1.2. 전과정 영향평가

고구마와 풋옥수수의 전과정 영향평가는 전과정 목록 평가의 결과를 토대로 각각 공정별로 나누어 영향범주에 맞는 기여도를 적용하여 산정하였고 그 결과를 Table 6에 나타내었다. 각 영향범주에서 지구온난화와 광화학적산화물생성(POCP)은 포장에서 배출되는 이산화탄소, 메탄, 아산화질소와 직접적인 관련이 있기 때문에 이 두 영향범주를 주로 알아보았다(So et al., 2010; Son et al., 2019). 고구마와 풋옥수수의 생산체계에서 지구온난화 특성화 값은 각각 2.70E - 01 kg CO₂-eq./kg, 1.98E - 01 kg CO₂-eq./kg으로 가장 높게 나타났다. 고구마 생산에서 광화학적산화물생성(POCP)는 1.14E - 04 kg C₂H₄-eq./kg, 풋옥수수 생산에서는 4.29E - 05 kg C₂H₄-eq./kg으로 나타났다. 고구마와 풋옥수수의 생산체계에서 지구온난화 기여도는 직접배출이 각각 45.4%, 79.3%로 가장 높았고 다음으로 고구마 생산체계에서 에너지가 25.1%를, 풋옥수수 생산체계에서 비료가 13.8%로 보였다. 광화학적산화물생성의 기여도는 고구마 생산체계에서 기타자재 생산이 56.0%, 비료가 36.9%이며, 풋옥수수의 생산체계에서는 비료가 55.2%, 작물보호제가 43.0%로 보였다.

3.2. 고찰

고구마 및 풋옥수수에 대한 기존 전과정 목록분석 결과와의 비교를 위해 본 연구와 동일한 기준으로 단위를 전환하였다. 국내 인증제도 기준은 면적(10a당)에 해당되는 결과이나, 본 연구에서 활용한 단위 변환 환산값을 동일하게 적용하여 생산량 당 탄소배출량 값으로 환산하였다. 그 결과 국내 인증제도 기준은 고구마와 풋옥수수 각각

0.172 kg CO₂-eq./kg sweet potato, 0.203 kg CO₂-eq./kg corn이었다(Smart Green Food, 2019). 국내 인증기준 대비 고구마는 0.098 kg CO₂-eq./kg 높게 산정되었고, 풋옥수수는 0.005 kg CO₂-eq./kg 낮게 나타났다. 풋옥수수의 과거 특성화값이 높은 이유는 인구 증가에 따른 식량 증산을 위해 화학비료를 작물 요구량보다 과다 사용했기 때문이다(Chung and Lee, 2008). 반면 고구마의 특성화값은 과거 기준보다 높게 산정되었는데, 이는 에너지 사용량이 과거보다 증가했기 때문이다. 2010년에 수행된 연구논문 에 따르면 고구마 생산과정에서 전기 사용량의 기여도는 이번 연구결과에 비해 차이는 없었으나, 화석연료 사용량의 기여도는 약 2배였다(So et al., 2010). 따라서 고구마 생산과정에 투입되는 화석연료 사용량의 변화가 지구온난화 특성화값에 영향을 주었음을 확인할 수 있었다.

국외 사례와의 비교를 위해 고구마에 대한 해외 LCI DB를 비교해보고자 하였으나, 해외 데이터베이스의 부재로 수행하지 못하였다. 그러나 풋옥수수는 우리나라를 제외한 나머지 국가를 대상으로 Ecoinvent 3.8의 데이터베이스와 비교하였다. 해외 데이터베이스의 투입-배출 목록의 확인이 어렵기 때문에 단순 영향평가 값만으로 비교해보았다. 해외 옥수수 데이터베이스는 0.311 kg CO₂-eq./kg로 우리나라 기존 구축 데이터베이스인 0.852 kg CO₂-eq./kg보다 낮게 나타났다(RDA, 2012). 물론 시스템경계 설정을 해외 기준으로 맞추어 동일한 조건에서 비교해야겠지만, 이번 연구 결과인 0.198 kg CO₂-eq./kg으로 수치만을 고려했을 때 우리나라 농업 여건에서 재배한 풋옥수수가 온실가스 배출 측면에서 다른 국가보다 경쟁력이 있을 것이라 판단된다.

본 연구에서는 고구마와 풋옥수수의 저탄소 농축산물

인증제에 사용되는 LCI DB 기준을 전과정평가를 통해 재산정 및 재구축하였다. LCI DB는 최신 통계에 민감하기 때문에 본 연구 결과를 저탄소 농축산물 인증제도에 적용하면, 신뢰도 및 정확도가 향상될 것으로 기대된다. 뿐만 아니라 환경성 산정 시 과거에는 국가 LCI DB의 부재로 해외 농축산물 LCI DB를 적용했지만, 구축된 국가 LCI DB를 활용한다면 국내 현황에 맞는 정확한 환경성을 평가할 수 있을 것이다.

사사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(PJ01479702)의 지원에 의해 이루어졌습니다.

References

- Choi SK, Hur SO, Hong SC, Choi DH. 2017. Climate Change and Estimation of Water footprint. *World Agriculture* 2017-205. pp.3-20.
- Chung DY, Lee KS. 2008. Role of chemical fertilizer and change of agriculture in Korea. *Korean Journal of Agricultural Science*. 35(1):69-83. (in Korean with English abstract)
- Fazio S, Zampori L, De Schryver A, Kusche O, Thellier L, Diaconu E. 2020. JRC Technical report. Guide for EF compliant data sets.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- ISO 14040. 2006. Environmental management. Life cycle assessment: Principles and framework.
- ISO 14044. 2006. Environmental management. Life cycle assessment: Requirements and guidelines.
- Kim DG, Son IS. 2021. A Study of the Impact on the Global Value Chain of and Domestic Response to the Introduction of Carbon Border Tax in the European Green Deal. Ulsan, Korea: Korea Energy Economics. Policy Report 2021-07.
- KLIC (Korea Law Information Center). 2022. Framework Act on Carbon Neutrality and Green Growth; [accessed 2022 Oct 3]. <https://www.law.go.kr/>
- KOAT. 2013. General Guideline for Calculating GHG Emissions of Agricultural Product. Iksan, Korea: Korea Agricultural Technology Promotion Agency.
- Lee HK. 2020. Trends and Implications of the European Green Deal Discussion. Seoul, Korea: National Assembly Research Service. Policy Report 2020-25.
- Lee JS, Kim SJ. 2021. Major Contents and Effects of the EU Carbon Border Adjustment System (CBAM). Seoul, Korea: Korea Trade-Investment Promotion Agency. Policy Report 2021-027.
- Lee KM. 1998. Theory and Guidelines of Life Cycle Assessment. Seoul: KAB (Korea Accreditation Board).
- Luca Z and Rana T. 2019. Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method. Luxembourg: Publications Office of the European Union. Policy Report JRC115959.
- MOTIE, 2022, Yoon Government Announces Carbon Neutral and Green Growth Vision and Strategy; [accessed 2022 Dec 25]. <https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156532855>
- Nongsaro, Information on Income Agricultural After 2014 ~ 2018; [accessed 2020 Apr]. <https://www.nongsaro.go.kr>
- RDA (Rural Development Administration). 2012. Development of carbon traceability systems for agricultural products in Korea. Wanju, Korea; RDA (Rural Development Administration). Policy Report PJ007262.
- Ryu JH, Kim KH, Kim GY, So KH, Kang KK. 2011. Application of LCA on Lettuce Cropping System by Bottom-up Methodology in Protected Cultivation. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 44(6): 1195-1206. (in Korean with English abstract)
- Smart Green Food. 2019, Low carbon Agricultural and Livestock Product Certification System Guidelines; [accessed 2022 Sep 5]. <http://www.smartgreenfood.org>
- Smart Green Food. 2022, Low carbon Agricultural and Livestock Product Certification System of statistics (standard 2022. Dec 31); [accessed 2022 Aug 28]. <http://www.smartgreenfood.org>
- So KH, Lee GZ, Kim GY, Jeong HC, Ryu JH, Park JA,

- Lee DB. 2010. Estimation of Carbon Emission and LCA (Life Cycle Assessment) From Sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) Production System. Korean Journal of Soil Science and Fertilizer 43(6): 892-897. (in Korean with English abstract)
- Son WL, Lee JS, Seol SH, Jung SC, Lee JS, Lim ST. 2019. Analysis of Greenhouse Gas Emissions for Domestic Pesticide Product Based on Life Cycle Assessment. Journal of Climate Change Research. The Korean Society of Climate Change Research 10(4): 361-370. (in Korean with English abstract)