

고추의 생산과정에서 발생하는 탄소배출량 산정 및 전과정평가

소규호* · 박정아¹ · 허진호¹ · 심교문 · 유종희 · 김건엽 · 정현철 · 이덕배

국립농업과학원 농업환경부 기후변화생태과, ¹에코네트웍스(주)

Estimation of Carbon Emission and LCA (Life Cycle Assessment) from Pepper (*Capsicum annuum* L.) Production System

Kyu-Ho So*, Jung-Ah Park¹, Jinho Huh¹, Kyo-Moon Shim, Jong-Hee Ryu, Gun-Yeob Kim, Hyun-Cheol Jeong, and Deog-Bae Lee

National Academy of Agricultural Science, Suwon, 441-707, Korea

¹Econetwork Co., Ltd. Seoul, 137-888, Korea

LCA (Life Cycle Assessment) carried out to estimate carbon footprint and to establish of LCI (Life Cycle Inventory) database of pepper production system. Pepper production system was categorized the field cropping (redpepper) and the greenhouse cropping (greenpepper) according to pepper cropping type. The results of collecting data for establishing LCI D/B showed that input of fertilizer for redpepper production was more than that for greenpepper production system. The value of fertilizer input was 2.55E+00 kg kg⁻¹ redpepper and 7.74E-01 kg kg⁻¹ greenpepper. Amount of pesticide input were 5.38E-03 kg kg⁻¹ redpepper and 2.98E-04 kg kg⁻¹ greenpepper. The value of field direct emission (CO₂, CH₄, N₂O) were 5.84E-01 kg kg⁻¹ redpepper and 2.81E+00 greenpepper, respectively. The result of LCI analysis focussed on the greenhouse gas (GHG), it was observed that the values of carbon footprint were 4.13E+00 kg CO₂-eq. kg⁻¹ for redpepper and 4.70E+00 kg CO₂-eq. kg⁻¹ for greenpepper; especially for 90% and 6% of CO₂ emission from fertilizer and pepper production, respectively. N₂O was emitted from the process of N fertilizer production (76%) and pepper production (23%). The emission value of CO₂ from greenhouse production was more higher than it of field production system. The result of LCIA (Life Cycle Impact Assessment) was showed that characterization of values of GWP (Global Warming Potential) were 4.13E+00 kg CO₂-eq. kg⁻¹ for field production system and 4.70E+00 kg CO₂-eq. kg⁻¹ for greenhouse production system. It was observed that the process of fertilizer production might be contributed to approximately 52% for redpepper production system and 48% for greenpepper production system of GWP.

Key words: LCI, Carbon footprint, LCIA, LCA, Pepper production system, Redpepper, Greenpepper

서 언

전과정평가 (Life Cycle Assessment)는 농업활동에 의해 환경으로 유출되는 유, 무기태 원소 및 환경 부하 원인을 밝히고, 정량화하여 환경영향을 평가하는 방법이다. 전과정평가는 산업제품 및 공정과정에 응용되고 있지만, 농업부분에서의 활용도 점차 늘어가는 추세이다 (Shin et al., 2003). 또한, 농업활동의 다양한 원료와 에너지의 사용은 천연자원 고갈과 환경오염 및 기후변화에 중요한 영향을 끼친다. 산업화의 결과로 인한 농업

기반시설의 증축과 다양한 농기계의 사용은 농업 산업을 더욱 에너지 집약적으로 만들고 있다 (Kramer et al., 1999; Nonhebel, 2004). 실제로 영국의 Carbon Trust사에서 운영하고 있는 저탄소제품 인증제나 미국의 탄소관리감독위원회 (TCC; The climate Conservancy)에서 운영하고 있는 저탄소제품 등급제 및 일본산업환경관리협회 (JEMAI; Japan Environmental Management Association for Industry)의 기술자문위원회에서 운영하고 있는 Eco-leaf 제도 등은 모두 전과정평가를 활용하고 있다.

우리나라에서는 대체로 고추의 작형을 축성재배, 반축성재배, 억제재배, 터널재배, 노지, 조숙재배 등이 있으며, 고추는 호온·호광성 작물로서 하절기의 환경에서는 대체로 개화 후 40~50일경이면 적숙과가 되는 반면, 동

접수 : 2010. 11. 15 수리 : 2010. 11. 24

*연락처 : Phone: +82312900230

E-mail: khs0@korea.kr

절기에는 저온·단일·약광 등 재배환경이 열악하기 때문에 과실의 적숙과까지는 약 65일 이상이 소요된다 (Jeong et al., 2006). 2005년 전체 조미채소 총 생산면적 131,004 ha 중 붉은 고추의 생산면적은 61,299 ha 이고, 풋고추는 511 ha이었다 (NAQS, 2006). 2007 농산물 소득자료에서 고추의 생산규모는 재배면적이 70,840 ha, 평균생산 292 kg 10 a⁻¹, 총생산 207 ton 이었다.

본 연구는 노지고추 (진고추), 시설고추 (풋고추)를 파종에서 수확기까지 1년 1기작을 기준으로 고추에 대한 1차 농산물 및 농자재의 LCI (Life Cycle Inventory) D/B 구축과 탄소원단위 산정 및 전과정 영향평가를 수행하였다.

재료 및 방법

고추의 전과정평가는 국제표준화기구 (ISO, International Standard Organization)에서 제정한 환경영체제에 관한 국제표준 ISO 14040의 규격에 의거하여 수행하였다 (ISO, 2006).

연구 목적 및 범위 (Goal and Scope definition) 본 연구의 목적은 고추생산체계에 대한 LCI 구축과 전과정 평가를 수행하여 고추생산체계에 대한 탄소성적을 산정

및 환경영향평가를 수행하는 것이다. 이를 위하여 고추의 기능은 식용 및 각종 식품 제조의 원료로 하였으며, 기능 단위는 식품 및 식품 제조의 원료용으로 사용되는 고추 1kg 생산으로 정의하였다. 특히 노지고추의 경우 생산되는 수량의 환산은 진고추 수량 (292 kg 10 a⁻¹)에 수분함량 (15%)을 가정하여 적용하여 고추 1 kg 생산물 (80% 수분기준)의 단위를 적용하였다. 연구 범위의 설정을 위하여 정의된 시스템 경계는 gate to gate (GtG)를 원칙으로 하였으며 농작물 생산단계는 농진청 표준 재배지침을 기준으로 고추생산체계를 설정하였다. 그리하여 고추생산체계의 연구범위를 (육묘, 정식, 재배, 수확)에 사용되는 원료물질 (종자, 묘), 보조물질 (농약, 비료, 농자재 등), 에너지 (전기, 경유 등) 등 농작업에 투입되는 물질과 대기, 수계, 토양으로 부하되는 배출물(상·하위 공정 (sub-system)과 연결하여 규정하였다 (Fig. 1).

전과정 목록분석 (Life Cycle Inventory Analysis) LCI 구축을 위한 영농 투입·배출물과 이에 따른 투입량과 배출량에 대한 자료수집을 위하여 2007 농축산소득자료집 (RDA, 2008)을 중심으로 관련 통계, 문헌자료, 설문조사, 전문가 인터뷰, 현장방문을 통하여 수집하였다. 영농 투입량을 수집할 때 복합비료의 사용량은 유효성분사용량을 바탕으로 추정하였으며, 농약사용량은 작물별 농약 사용가중치를 적용한 지수를 사용하여

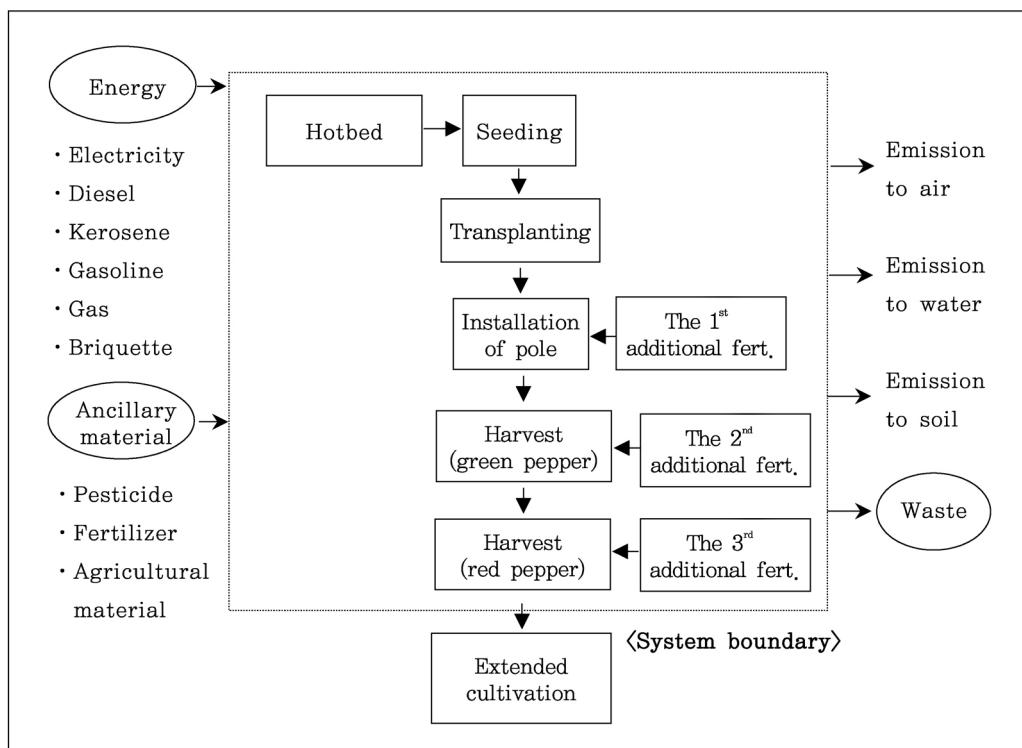


Fig. 1. System boundary (gate to gate) for production of pepper.

Table 1. Impact categories in LCIA (by MKE, Ministry of Knowledge Economy Methodology).

Impact categories	Abbreviation	Unit
Abiotic resource Depletion	ADP	1 yr ⁻¹
Global Warming Potential	GWP	kg CO ₂ -eq. kg ⁻¹
Ozone Depletion potential	ODP	kg CFC-eq. kg ⁻¹
Acidification Potential	AP	kg SO ₂ -eq. kg ⁻¹
Eutrophication Potential	EP	kg PO ₄ ³⁻ -eq. kg ⁻¹
Photochemical Ozone Creation Potential	POCP	kg C ₂ H ₄ -eq. kg ⁻¹
Human Toxicity Potential	HTP	kg 1,4 DCB-eq. kg ⁻¹
Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential	FAETP	kg 1,4 DCB-eq. kg ⁻¹
Marine Aquatic Ecotoxicity Potential	MAETP	kg 1,4 DCB-eq. kg ⁻¹
Terrestrial Ecotoxicity Potential	TETP	kg 1,4 DCB-eq. kg ⁻¹

계산하였고 (KCPA, 2007a, b), 연료 사용 및 비료 사용으로 인한 대기배출물은 IPCC (2006) 1996 배출계수를 통해 배출량을 산출하였다. 영농폐기물 배출 및 처리량은 농업폐기물 통계 (KWA, 2007, MIFAFF, 2004) 등의 자료를 토대로 배출량을 산정하였다. 여기서 농약 병, 비료포대 등의 운부자재 포장에 대한 환경부하는 고려되지 않았으며, 농업폐기물은 비료 사용으로 인한 직접토양배출물은 적합한 배출계수의 부재로 고려하지 않았다. 영구 재사용이 가능한 농자재는 시설로 간주하여 이로 인한 환경영향은 고려하지 않았다.

LCI 분석을 통한 탄소원단위 성적 산정을 위하여 지식경제부 산하 한국인정원에서 개발한 소프트웨어 (PASS 4.1.3)를 사용하였다. 이때 비료와 농약생산 공정 등 현재 농업분야와 관련된 상하위 흐름 LCI D/B가 구축되어 있지 않으므로 시스템 상하위 흐름 D/B는 스위스 Ecoinvent database를 사용하였다. 에너지생산 (전기 및 화석연료)과 폐기물 처리 등 일부 산업공정에 속하는 분야는 국내 환경부와 지경부의 데이터베이스를 연결하여 사용하였다.

탄소성적을 산정할 때 코토의정서에 규정한 6대 온실가스 (GHG, Greenhouse Gases)는 이산화탄소 (CO₂), 메탄 (CH₄), 아산화질소 (N₂O), 수소불화탄소 (HFCs), 육불화황 (SF₆), 과불화탄소 (PFCs)을 중심으로 산정하였다. 고추의 전과정 탄소성적은 식 (1)의 방법으로 산정되었다.

$$\text{전과정 탄소성적 (kg CO}_2\text{-eq.)} = \sum \{\text{온실가스 배출량 (kg GHG)} \times \text{GWP}\} \text{ 식 (1)}$$

여기서, GWP (Global Warming Potential, 지구온난화지수)는 온실가스가 100년 동안에 대기에 머물며 지구에 미치는 온난화 효과를 CO₂를 1로 하였을 때 환산된 값으로 CH₄는 21, N₂O는 310, HFC-134a가 1300, HFC-152a는 140, HFC-23은 11700, SF₆은 23900,

PFCs는 6500의 값을 갖는다 (IPCC 2001).

전과정 영향평가 (Life Cycle Impact Assessment)

전과정 영향평가는 분류화, 특성화, 정규화, 가중화의 4 단계로 구성되며, ISO 14040 규정에 의하면 특성화와 정규화는 의무규정 단계이고 정규화와 가중화는 선택사항으로 되어 있다. 본 연구에서는 의무사항인 분류화와 특성화단계까지 수행하였고, 전과정 영향평가 도구는 지식경제부에서 개발한 PASS (4.1.3) software를 사용하였다. PASS에서 사용하는 방법론으로 구분되는 영향범주는 총 10 가지로 각 영향범주와 단위를 Table 1에 나타내었다.

결과 및 고찰

전과정 목록분석 LCI D/B 구축을 위한 영농 투입, 배출물 자료조사 결과 건고추(노지재배)의 연간 총 생산량은 292 kg 10 a⁻¹고, 풋고추 (시설재배)는 5,275 kg a⁻¹이었다. 고추 1 kg 생산하는데 투입되는 총량은 건고추 (노지고추)가 2.55E+00 kg으로 풋고추 (시설고추) 7.74E-01 kg 보다 높았다. 건고추는 비료의 투입 (유기 58%, 무기 27%)이 가장 많은 비중을 차지하였고 전기와 연료는 각각 6, 7%를 나타내었다. 풋고추는 연료 (40%)와 전기 (27%)의 투입량이 노지재배인 건고추에 비하여 매우 높았고, 비료는 유기비료 29%, 무기비료 3%를 나타내었다. 시설재배에서 에너지의 사용이 노지재배에 비해서 매우 많았고, 비료 사용량은 노지재배가 2.55E+00 kg kg⁻¹ redpepper로 시설재배의 7.74E-01 kg kg⁻¹ greenpepper 보다 많았다. 농약 투입은 노지재배와 시설재배가 각각 5.38E-03 kg kg⁻¹ redpepper, 2.98E-04 kg kg⁻¹ greenpepper으로 노지재배에서의 농약투입량이 훨씬 높았다. 고추생산 중 대기로 배출된 CO₂, CH₄, N₂O의 합은 노지고추 (건고추)가 5.84E-01 kg kg⁻¹ redpepper,

Table 2. Data of inputs and outputs for the production of pepper.

Input/Output	Unit	Quantity		Data source
		Red pepper (field)	Green pepper (greenhouse)	
Input ----- kg ⁻¹ product (pepper) -----				
seed, seedling	kg	1.01E+00	3.85E-01	agro-livestock incomes data (RDA, 2007)
composts	kg	1.75E+00	7.10E-01	incomes data (RDA, 2007)
N fertilizers	kg	2.39E-02	4.59E-03	incomes data (RDA, 2007)
P fertilizers	kg	1.57E-04	4.47E-03	incomes data (RDA, 2007)
K fertilizer	kg	1.97E-03	1.40E-03	incomes data (RDA, 2007)
compound fertilizers	kg	6.53E-01	4.21E-02	incomes data (RDA, 2007; KFIA, 2007)
lime	kg	1.10E-02	8.36E-03	incomes data (RDA, 2007)
Boron	kg	-	7.58E-05	incomes data (RDA, 2007)
silicate fertilizer	kg	1.08E-01	3.03E-03	incomes data (RDA, 2007)
pesticides	kg	5.38E-03	2.98E-04	Agrochemical year book, Agrochemical use guide book (KCPAa, 2007; KCPAb, 2007)
electricity	kw	2.21E-01	6.68E-01	incomes data (RDA, 2007)
fossil fuel	L	1.94E-01	9.86E-01	incomes data (RDA, 2007)
vinyl	m	2.12E-02	3.63E-03	incomes data (RDA, 2007)
felt	m	2.13E-02	2.98E-02	incomes data (RDA, 2007)
straw	kg	-	9.97E-03	incomes data (RDA, 2007)
pot	kg	-	1.27E-03	incomes data (RDA, 2007)
Output				
direct emissions (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O)	kg	5.84E-01	2.81E+00	IPCC 1996
waste treatment	kg	9.55E-03	8.04E-03	KWA, 2007; MIFAFF, 2004
product (pepper)	kg	1.00E+00	1.00E+00	incomes data (RDA, 2007)

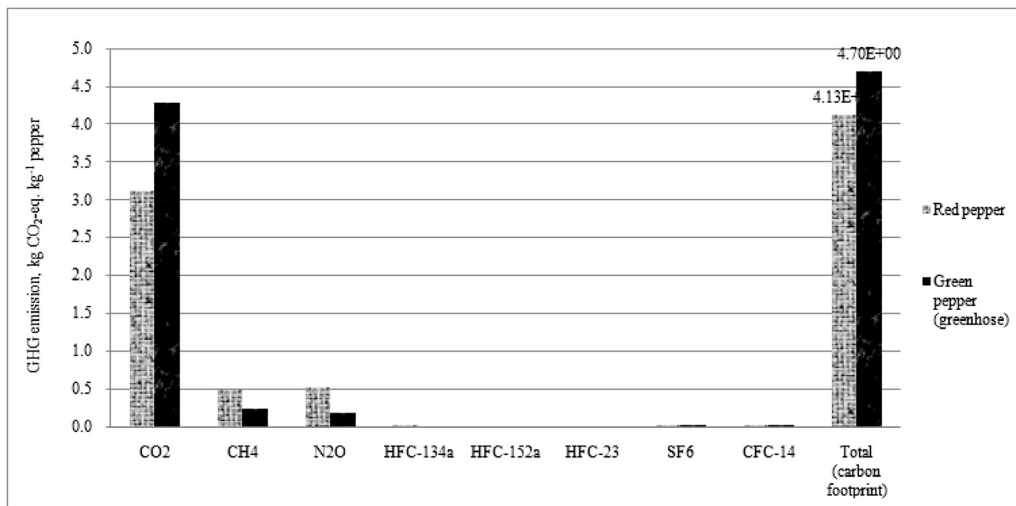


Fig. 2. Carbon footprint calculated by LCI of pepper production system.

2.81E+00 greenpepper로 시설고추(풋고추)가 높았다 (Table 2).

위와 같이 수집된 입출력 데이터를 LCI 평가도구인 PASS software로 분석한 결과를 교토의정서 규정 6대 온실가스의 대기배출값을 CO₂값으로 환산하여 나타내었다 (Fig. 2). 고추 생산체계에 대한 탄소원단위 성적 산정을 위한 LCI 분석 결과 노지재배 건고추가 4.13E+00

kg CO₂-eq. kg⁻¹ redpepper, 시설재배 풋고추가 4.70E+00 kg CO₂-eq. kg⁻¹ greenpepper로 탄소배출성적이 거의 같았으나, 풋고추가 근소하게 높았다. 온실가스별로 구분하면 CO₂의 경우 시설재배 (풋고추)가 높았고, CH₄와 N₂O는 노지재배 (건고추)가 높았다. 이것은 연료사용량이 많은 시설재배에서 이산화탄소가 많이 발생하고, 질소질 비료의 투입이 많았던 노지재배에서 N₂O

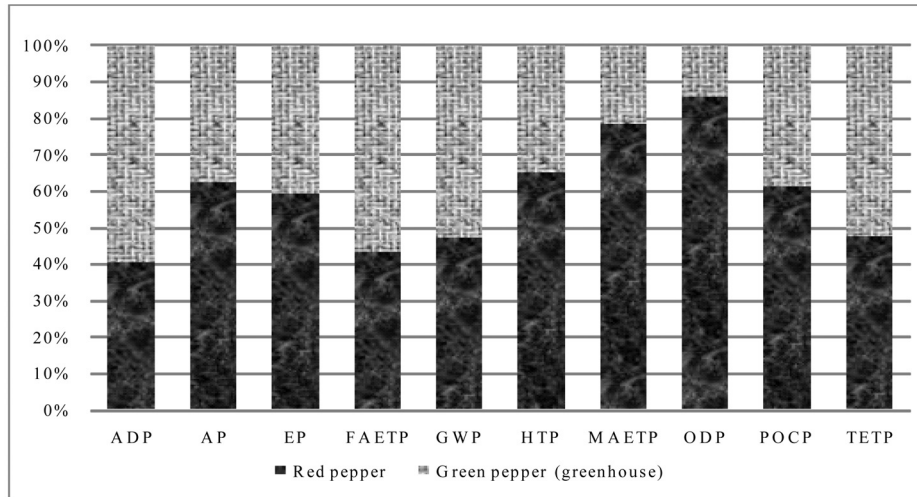


Fig. 3. Comparison of characterization value between red pepper and green pepper production system.

의 발생이 많았기 때문에 판단되었다. CO₂-eq.로 환산한 CO₂, N₂O의 배출량은 노지재배가 각각 3.12E+00, 5.30E-01 kg CO₂-eq. kg⁻¹ redpepper이고, 시설재배가 각각 4.29E+00, 1.75E-01 kg CO₂-eq. kg⁻¹ green-pepper이었다.

전과정 영향평가 전과정 영향평가 결과 지구온난화 (GWP)범주에 대한 기여도는 노지재배 (건고추)가 약 52%, 시설재배 (풋고추) 약 48%로 거의 비슷한 값을 보였고, 질소 투입이 많았던 노지재배가 광화학 산화물생성 영향범주 (POCP)에서 시설재배보다 약 10% 정도 높은 기여도를 보였다. 생태독성 관련범주 중 담수생태독성 (FAETP)과 토양생태독성 (TETP)의 경우 시설재배의 기여도가 높았고, 인간독성 (HTP)과 해양생태독성 (MAETP)는 시설재배가 높은 기여도를 보였다. 이것은 농약투입은 노지재배가 월등히 투입량이 많았고, 화석연료의 투입은 시설재배가 훨씬 많아서 독성관련 영향범주의 경향이 나뉘어 나타난 것으로 판단되었다. GWP의 특성화값은 노지재배가 4.13E+00 kg CO₂-eq. kg⁻¹, 시설재배가 4.70E+00 kg CO₂-eq. kg⁻¹이었다.

해석 (Interpretation) LCI 분석으로 산정된 고추 생산체계의 탄소성적을 비료 생산공정, 농약 생산공정, 에너지 생산공정, 농자재 생산공정, 보리생산공정, 폐기물처리공정으로 구분하여 온실가스 중 밭 작물생산에서 주로 발생하는 CO₂, N₂O를 대상으로 공정간 발생량을 비교하였다 (Fig. 4). 고추생산에서 발생하는 CO₂는 시설재배 (풋고추)에서 훨씬 많이 배출되었고, 비료와 에너지생산과정에서 발생하는 CO₂는 노지재배 (건고추)의 배출량이 많았다. 이런 경향은 노지재배의 비료투입량이

많아 비료생산공정의 이산화탄소배출량을 높였고, 시설재배 이산화탄소 배출량은 고추생산에 투입되는 화석연료량이 많았기 때문에 해석되었다. 고추생산과 비료생산에서 발생하는 노지재배가 발생량이 많았고, 농자재생산 중 발생하는 N₂O는 시설재배의 발생량이 많았다. 노지재배는 질소질 비료의 투입이 시설재배보다 많았으므로 포장에서의 아산화질소 발생과 이산화탄소 발생 경향을 반대로 나타난 것으로 판단되며, 이를 보아 아산화질소의 발생에 가장 큰 발생원은 질소비료인 것으로 해석되었다.

그러므로 환경부하의 주원인을 분석하였을 때, 고추의 노지재배에서는 비료시비 저감에 대한 영농법에 대한 연구가 탄소성적을 줄일 수 있는 효과적인 요인이며, 시설재배는 특히 에너지의 효율적 연료사용에 대한 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

요 약

고추생산체계에 대한 탄소성적을 평가하기 위하여 노지재배 (건고추)와 시설재배 (풋고추)로 구분하여 LCI data-base 구축하고 전과정 영향평가를 통한 잠재적 환경영향을 평가하였다. LCI 구축을 위한 영농 투입량과 배출물 산정결과 고추 1 kg 생산의 비료 사용량은 노지재배가 2.55E+00 kg kg⁻¹ redpepper로 시설재배의 7.74E-01 kg kg⁻¹ greenpepper 보다 많았다. 농약 투입은 노지재배와 시설재배가 각각 5.38E-03 kg kg⁻¹ redpepper, 2.98E-04 kg kg⁻¹ greenpepper으로 노지재배에서의 농약투입량이 훨씬 높았다. 고추생산 중 대기로 배출된 CO₂, CH₄, N₂O의 합은 노지고추가 5.84E-01 kg kg⁻¹ redpepper, 2.81E+00 greenpepper로 시설고추가 높

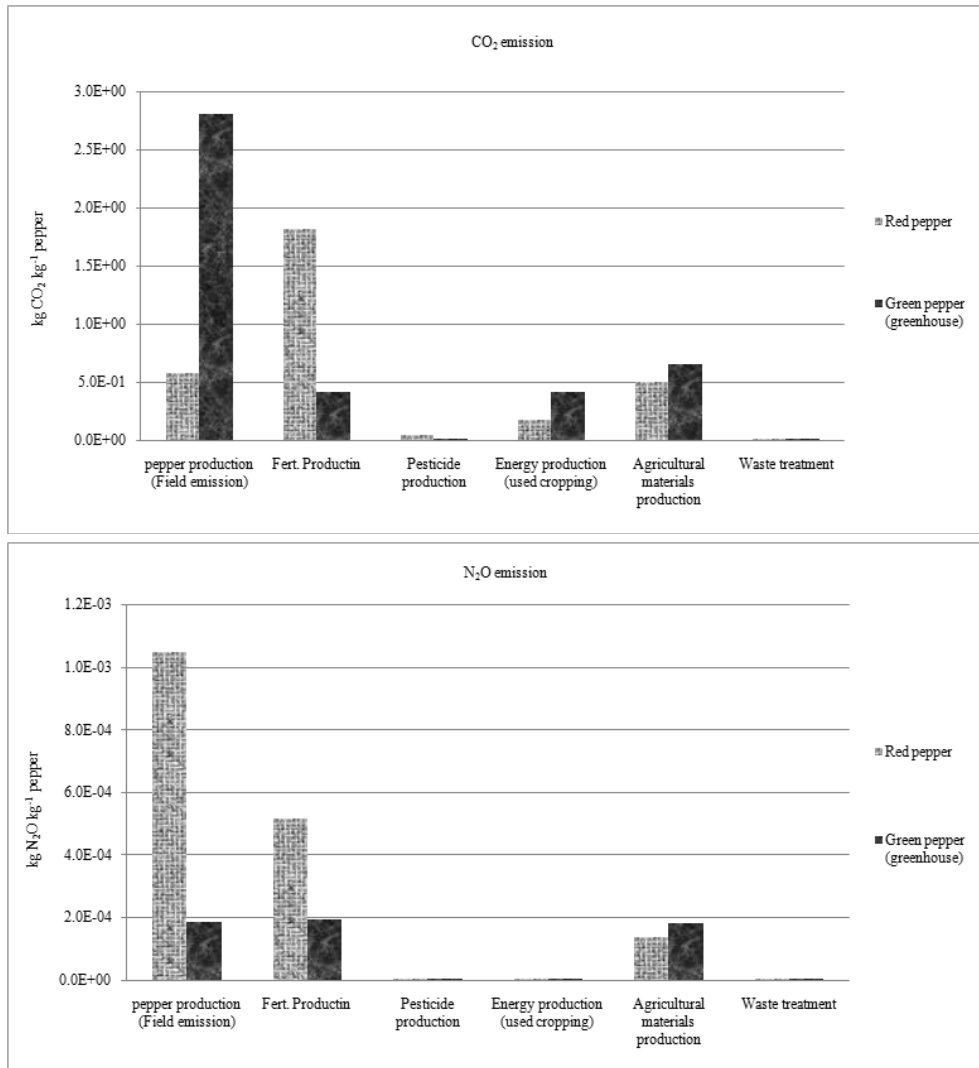


Fig. 4. Comparison of GHG emission (CO₂ and N₂O) between red pepper and green pepper production system.

았다. 고추 생산체계에 대한 탄소원단위성적 산정결과 노지재배가 4.13E+00 kg CO₂-eq. kg⁻¹ redpepper, 시설재배 풋고추가 4.70E+00 kg CO₂-eq. kg⁻¹ greenpepper였다. 시설재배 (풋고추)는 CO₂발생량이 많았고, 노지재배 (건고추)는 CH₄와 N₂O 발생량이 많았다. 전과정 영향평가 결과 GWP의 특성화값은 노지재배가 4.13E+00 kg CO₂-eq. kg⁻¹, 시설재배가 4.70E+00 kg CO₂-eq. kg⁻¹이었고, GWP범주에 대한 기여도는 노지재배가 약 52%, 시설재배 약 48%로 거의 비슷하였다.

인용 문헌

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. Climate change 2001, Radioactive forcing of climate change, The scientific basis. Cambridge University press, UK. pp. 388-390.
 IPCC 2006. 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse

gas inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe (eds). IGES, Japan.
 ISO (International Organization for Standardization). 2006. ISO 14040:2006(E) Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework.
 Jeong, C.S., J.N. Park, J.H. Kyoung, J.P. Kang, and K.W. Kwak. 2006. Development of cropping type and method for marketing of red pepper and red sweet pepper during off-season in winter-time. J. Agr. Sci. 17:169-174.
 KCPA (Korea Crop Protection association). 2007a. Agrochemical use guide book. Korea Crop Protection association. Seoul, Korea.
 KCPA (Korea Crop Protection association). 2007b. Agrochemical year book. Korea Crop Protection association. Seoul, Korea.
 KFIA (Korea Fertilizer Industry Association). 2007. fertilizer production data. Korea Fertilizer Industry Association. Seoul, Korea. www.fert-kfia.or.kr.

- Kramer, K.J., H.C. Moll, S. Nonhebel, and H.C. Wilting. 1999. Greenhouse gas emissions related to Dutch food consumption. *Energy Policy*. 27:203-216.
- KWA (Korea Waste Association). 2007. Agricultural waste data. Korea Waste Association. Seoul, Korea. www.kwaste.or.kr/data/.
- MIFAFF (Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries). 2004. A study on Establishing effective management system for equipped agricultural input wastes. C2004-A1. Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries. Seoul, Korea.
- NAQS (National Agricultural production Quality management Service). 2006. cultivation trend of Major crops.
- Nonhebel, S. 2004. On resource use in food production systems: the value of livestock as 'rest-stream upgrading system'. *Ecological Economics*. 48:221-230.
- RDA (Rural Development Administration). 2008. 2007 Agro-livestock incomes data book. Rural Development Administration. Suwon, Korea.
- Shin, J.D., D.K. Lim, G.Y. Kim, M.H. Park, M.H. Koh, and K.C. Eom. 2003. *Korean J. Environ. Agr.* 22:41-46.