

시설상추 생산체계에 대한 top-down 방식 전과정평가

유종희* · 김계훈¹ · 소규호 · 이길재² · 김건엽 · 이덕배

국립농업과학원 농업환경부 기후변화생태과, ¹서울시립대학교 환경원예학과, ²농업기술실용화재단

LCA on Lettuce Cropping System by Top-down Method in Protected Cultivation

Jong-Hee Ryu*, Kye-Hoon Kim¹, Kyu-ho So, Gil-Zae Lee², Gun-Yeob Kim, and Deog-Bae Lee

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

¹Department of Environmental Horticulture, The University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

²Foundation of Agri. Tech. Commercialization & Transfer Suwon, 441-857, Korea

This study was carried out to estimate carbon emission using LCA (Life Cycle Assessment) and to establish LCI (Life Cycle inventory) DB for lettuce production system in protected cultivation. The results of data collection for establishing LCI DB showed that the amount of fertilizer input for 1 kg lettuce production was the highest. The amounts of organic and chemical fertilizer input for 1 kg lettuce production were 7.85E-01 kg and 4.42E-02 kg, respectively. Both inputs of fertilizer and energy accounted for the largest share. The amount of field emission for CO₂, CH₄ and N₂O for 1 kg lettuce production was 3.23E-02 kg. The result of LCI analysis focused on GHG (Greenhouse gas) showed that the emission value to produce 1 kg of lettuce was 8.65E-01 kg CO₂. The emission values of CH₄ and N₂O to produce 1 kg of lettuce were 8.59E-03 kg CH₄ and 2.90E-04 kg N₂O, respectively. Fertilizer production process contributed most to GHG emission. Whereas, the amount of emitted nitrous oxide was the most during lettuce cropping stage due to nitrogen fertilization. When GHG was calculated in CO₂-equivalents, the carbon footprint from GHG was 1.14E+00 kg CO₂-eq. kg⁻¹. Here, CO₂ accounted for 76% of the total GHG emissions from lettuce production system. Methane and nitrous oxide held 16%, 8% of it, respectively. The results of LCIA (Life Cycle Impact assessment) showed that GWP (Global Warming Potential) and POCP (Photochemical Ozon Creation Potential) were 1.14E+00 kg CO₂-eq. kg⁻¹ and 9.45E-05 kg C₂H₄-eq. kg⁻¹, respectively. Fertilizer production is the greatest contributor to the environmental impact, followed by energy production and agricultural material production.

Key words: LCA, Lettuce (*Lactuca sativa* L.), Protected cultivation, Carbon footprint

서 언

LCA (Life Cycle Assessment, 전과정평가)는 제품의 전과정에서 발생하는 환경영향을 평가하는 도구로 공산품의 환경성 평가에 광범위하게 사용됐으며 (Jensen et al., 1997; Roy et al., 2008) 최근 유럽을 중심으로 식품 생산 시스템의 환경영향평가 도입이 활발해지고 있다. 농작물에 대한 데이터베이스가 가장 체계적이고 다양하게 구축된 국가는 스위스로, 스위스 LCI DB (Life Cycle inventory database) 구축 센터인 에코인벤트 (ecoinvent)가 주축이 되어 농작물, 농업기반시설, 농자재, 농기계 등 농축산 전반에 대한 LCI

DB를 구축하여 제공하고 있다 (Frischknecht and Rebitzer, 2005). 덴마크는 자국의 농경지를 토지 유형, 표준작업시간, 대상작물에 따라 31개로 분류한 후 이를 모델링 하여 31개 농경지에 대한 유형별 LCI DB를 구축하였다 (Dalgaard et al., 2003). 미국은 바이오연료의 주요 원료 물질인 대두, 옥수수 등에 대한 LCA를 수행하되 특히 농약 및 비료 사용에 초점을 두어 N, P, K의 흐름 및 침출 모델을 개발하였고, 영국은 생산 및 수입하고 있는 7가지 주요 농수축산물 (토마토, 사과, 딸기, 감자, 소, 돼지, 닭)에 대한 자원 사용 및 환경부담을 규명하기 위해 LCA를 통한 환경영향평가를 수행하되 특히 시스템 경계를 생산 지역에 국한시키지 않고 농수축산물의 지역분배센터 (RDC; Regional Distribution Center)로 확장하여 평가하였다 (Suan, 2005).

LCA를 적용한 국내 농업환경평가 연구 현황은 미미한 실정이며, 2009년 처음으로 LCA를 적용한 농업 환경영향평가

접수 : 2011. 11. 10 수리 : 2011. 12. 15

*연락처 : Phone: +82312900240

E-mail: soil73@kg21.net

를 위하여 1차 농수축산물 중 식량작물을 중심으로 LCI DB 구축을 시작하였다. 2010년 12월을 기준으로 국내에서 실시되고 있는 탄소성적표지 인증을 받은 301개의 산업제품 중 33%에 해당하는 98개의 제품이 식품류이다. 이들 중에는 두부, 햇반과 같은 1차 농산물 가공 식품류가 다수 포함되어 있으나, 이들의 환경영향평가를 수행하기 위하여 선행되어야 할 1차 농수축산물에 대한 국내 DB 구축은 이제 시작되고 있다. 또한, 우리나라 환경부에서 시행하는 탄소 성적표지 제도는 농업분야의 LCI DB의 부재가 이유로 1차 농수축산물에 대한 탄소 성적표지 제도는 인증대상에서 제외되어 있다 (ME, 2009; KEITI, 2010).

본 연구는 시설 상추생산 체계를 대상으로 이에 대한 LCI DB를 구축하고 탄소배출량을 산정하기 위하여 LCI 분석 (Life Cycle Inventory Analysis, 전과정 목록분석)을 수행하였다. 또한, LCIA (Life Cycle Impact, 전과정 환경영향평가)를 통하여 상추생산체계가 환경에 미치는 환경성에 대하여 평가하였다.

재료 및 방법

LCA는 생산의 전 과정 동안에 투입되고 환경으로 부하되는 물질목록을 구성하고, 환경 전반에 미치는 영향을 평가

하는 도구이다 (Haas et al., 2001). 상추생산체계에 대한 탄소 성적산정과 이를 위한 LCI DB 구축 및 환경영향평가를 위하여 국제표준화기구에서 제정한 환경영향체계에 관한 국제표준 ISO 14040을 기준으로 연구를 수행하였다 (ISO, 1997).

연구 목적 및 범위 (Goal and Scope Definition) LCA 첫 번째 수행은 연구 목적 및 범위를 설정하는 것으로 시작된다. 본 연구의 목적은 상추생산체계에 대한 LCI DB를 구축하여 LCI 분석으로 상추생산체계에서 발생하는 탄소배출량을 산정하고 LCIA를 수행하여 환경영향에 대한 기여도를 평가하는 것으로 정의하였다. 상추의 기능은 식품 및 음식물제조의 원료이며, 기능 단위는 식품 및 식품제조의 원료로 사용되는 상추 1 kg 생산으로 정의하였다. 연구 범위는 전과정평가의 대상 범위를 정의하는 과정으로 상추 생산 과정을 구분하고 시스템경계를 정의하였다 (Fig. 1). 상추의 생산시스템 경계는 농작물 생산단계 (육묘, 정식, 재배, 수확)에 사용되는 원료물질 (종자, 묘), 보조물질 (농약, 비료, 농자재 등), 에너지 (전기, 경유 등) 등, 농작물의 투입물과 대가로 부하되는 배출물 (CO₂, N₂O, CH₄ 등) 및 고형폐기물을 포함하는 Gate-to-gate (GTG)를 원칙으로 설정하였다. 여기서 데이터 수집 및 품질 요건은 시간적 경계를 가급적 최근 5년 이내의 최신데이터를 기준으로 하였다. 지역적 경

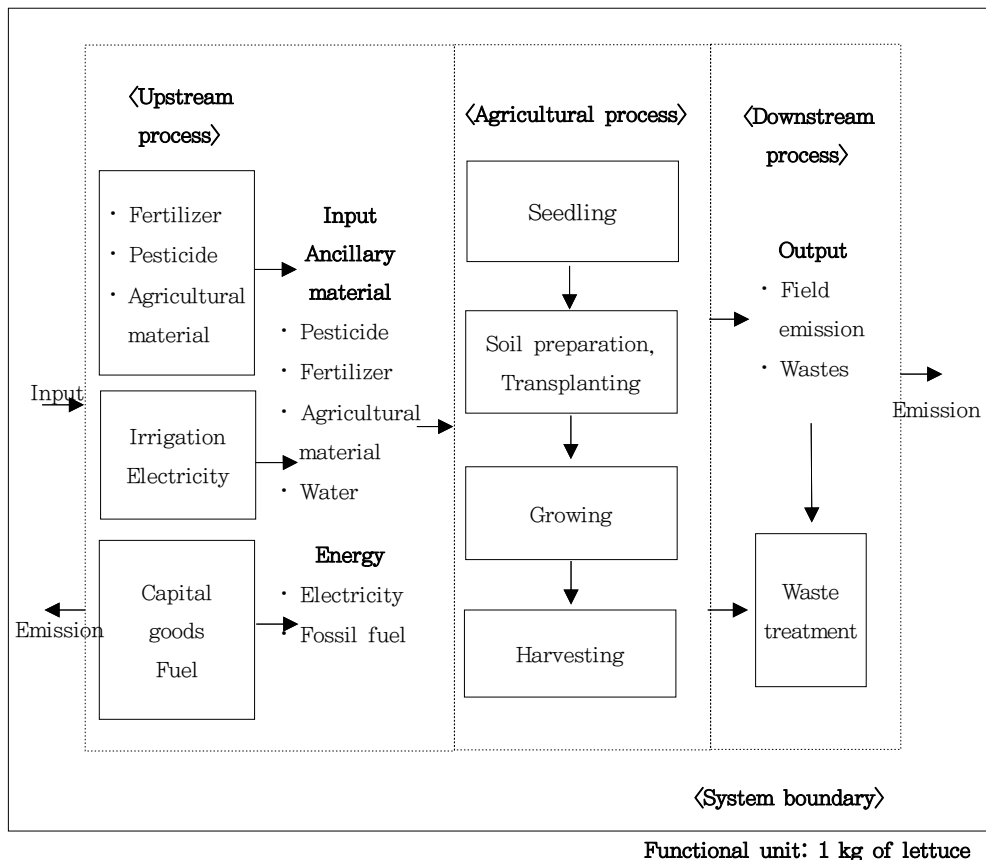


Fig. 1. System boundary, relevant inputs and outputs of lettuce production system (Gate to gate).

계로서 국내 식량작물 생산 시스템을 기준으로 하는 국내 데이터와 국내 데이터가 없으면 국외 데이터를 사용하였다.

전과정 목록분석 (Life Cycle Inventory Analysis) LCI 분석 단계는 데이터를 수집하고 가공하는 단계로 연구 목적에 따라 정의된 시스템 내에 투입되고 배출되는 모든 물질을 물질수지 원칙과 할당 (Allocation)을 통해 기능단위에 맞추어 정량화 한다 (Erwin and Annik, 2008).

투입·산출물의 목록 작성 (gate-to-gate 기준)을 위하여 상추생산 1 작기 당 10 a에 투입되는 원료물질, 농약, 비료, 에너지, 농자재 총 투입량을 조사하고 10 a 당 생산되는 총 생산량으로 나누어 시설재배 상추 (치마 상추) 1 kg 생산할 때 투입되는 양으로 변환하였다. 전력은 kWh로 종자 및 종묘는 L 및 주로 단위를 정하였다. 이 때 연료나 유제농약과 같은 액체의 투입량은 통계자료에 서술된 사용량에 밀도 환산 값을 곱하여 kg 단위로 환산하였고, 원료물질인 종자와 종묘는 질량 단위로 환산할 수 없고, 무의미하다고 판단하여 통용되고 있는 단위 적용하였다. 데이터의 수집은 주로 국가 통계자료와 문헌자료를 투입데이터로 사용하는 top-down으로 진행하였다. 비료, 종자, 에너지, 농자재 투입량은 2007년 농축산물 소득자료집 (RDA, 2008)의 국가 통계자료를 기준으로 투입량을 산정하였고, 농약 투입량은 농약 연보와 농약사용 지침서 (KCPA, 2007a; KCPA, 2007b)를 바탕으로 농약 사용량을 산출하였다. 투입된 영농자재 폐기물 처리 자료는 환경자원공사와 농림수산식품부의 영농폐기물통계 (KWA, 2007; MIFAFF, 2004)를 토대로 산정하였다.

비료 투입량은 유기질비료 (퇴구비), 단일비료, 복합비료로 구분하였고, 복합비료사용량은 단순 투입량이 아닌 유효성분 함량을 고려한 실제 투입량을 산정하였다. LCA 수행을 위한 단위생산과 퇴구비 생산의 LCI DB적용은 국내 DB 부재로 스위스 ecoinvent DB (Simapro software v7.2)를 적용하였다. 단위 유효성분 자체의 생산 공정이 국외와 같다고 가정하여 N, P, K 성분별 제조공정에 따라 ecoinvent LCI DB를 적용하였다. 복합비료 생산공정은 한국 비료공업협회의 2007 비료 생산출하실적 (KFIA, 2007)을 바탕으로 국내 복합비료 원료용 무기질비료 소비 비율을 계산하였고, 국내 무기질비료 소비량을 바탕으로 무기질 비료의 유효성분 함량비를 이용하여 복합비료 제조에 사용된 무기질 비료량을 계산하였다. 복합비료 제조공정에 투입되는 에너지는 국내 비료업체 설문조사를 통하여 산정하였다. LCI DB는 국내DB (지식경제부, 환경부)와 해외 DB (ecoinvent)를 적용하였다.

농약은 농약사용지침서의 작물별 사용약량을 바탕으로 상추재배에 사용되는 농약을 유효성분별로 계통분류하고 사용횟수를 가중치로 적용하여 경지면적 당 연간 농약사용량을 계산하였다. 농약의 유효성분을 생산하는 공정은 국외와

비슷하다고 가정하고 LCA 수행을 위하여 분류된 계통별 농약 제조공정에 대한 ecoinvent LCI DB를 적용하였다.

시설상추 재배에 투입되는 농자재 중 하우스와 멀칭에 사용되는 비닐의 유효성분을 (고밀도, 저밀도폴리에틸렌) 구분하여 투입량을 구하였고, 동절기 하우스의 보온덮개로 사용되는 부직포에 대한 투입량을 산정하였다. 농림수산식품부의 시설농업용 폐영농자재 통계를 바탕으로 추산한 평균 내구수명을 적용하여 (하우스 비닐 (LDPE): 4.80년, 멀칭 비닐 부직포 (HDPE): 1년, 보온덮개 (부직포): 3.15년) 연간 사용량을 추정하였다. 농약병, 비료포대 등 원부자재 포장에 대한 환경부하는 고려하지 않았고, 할축, 지주대 등 영구 사용이 가능한 농자재는 시설로 간주하여 이로 인한 환경영향은 고려하지 않았다. 그 외 농자재는 국내 LCI DB 부재와 폐기물 처리에 대한 자료 부족으로 평가에서 제외하였다. LCA 수행에 사용되는 농자재 LCI DB는 지경부 DB와 ecoinvent를 적용하였다.

상추생산체계에서 시스템경계 밖으로 배출되는 환경부하 물질 중에서 농작업 중에 대기배출되는 직접배출물은 질소비료에 의한 N₂O 발생과 농기계의 연료 연소에 의한 온실가스 (CO₂, CH₄, N₂O) 발생이 있다. 비료사용에 의한 N₂O 발생량 (kg N₂O)은 식 (1)을 적용하여 산정하였다. 현재 질소비료 사용으로 밭에서 배출되는 아산화질소에 대한 배출계수의 국내 값이 정해져 있지 않으므로 배출량 산정에 적용된 배출계수는 IPCC 1996 Tier 1 값을 사용하였다 (IPCC, 1996). 비료 사용으로 인한 토양의 집적이나 수계로의 배출은 본 연구의 목적인 탄소배출량 산정에 직접영향이 미비하고 국내 배출계수의 부재로 평가에서 제외하였다.

$$\begin{aligned} \text{N}_2\text{O emission from fertilizer application (kg N}_2\text{O)} &= \\ & \text{Fertilizer application area (ha)} \times \text{Emission factor kg N}_2\text{O-N kg}^{-1} \text{N} \\ & (\text{IPCC 1996 N}_2\text{O emission factor} = 0.0125 \text{ kg N}_2\text{O ha}^{-1}) \end{aligned} \quad (1)$$

농기계 및 난방에 사용되는 연료 (휘발유, 경유, 등유 등) 연소로 인한 대기배출량 산정은 식 (2)로 구하였다. 연료별 배출계수는 IPCC 1996 Tier 1을 사용하였다 (Table 1).

$$\begin{aligned} \text{Direct air emission from combustin of fossil feul (kg GHG)} &= \\ & \text{Amount of used feul (yr}^{-1}) \times \text{Low heating value (MJ L}^{-1}) \times \\ & \text{Unit conversion factor (10}^{-6}) \times \text{Emission factor (kg GHG TJ}^{-1}) \end{aligned} \quad (2)$$

영농폐기물 (폐비닐과 보온덮개)의 배출과 폐기물 처리는 환경자원공사와 농림수산식품부의 영농폐기물통계자료를 바탕으로 폐기물을 재활용, 매립, 소각처리로 분류하고 이 중 매립과 소각량을 구분하여 배출량을 계산하였다.

LCA 평가도구는 지식경제부 산하 한국인정원에서 개발한 소프트웨어 (PASS 4.1.3)를 사용하였다. PASS 프로그램

Table 1. Impact categories in LCIA (MKE, Ministry of knowledge Economy).

| Impact category | Unit | Characterization model |
|------------------|--|---|
| [†] ARD | 1 yr ⁻¹ | EIA, International Energy Annual 2000, U.S Geological survey (USGS) 2001~2002 |
| GWP | kg CO ₂ -eq. kg ⁻¹ | IPCC 1996 (100 year) |
| ODP | kg CFC-eq. kg ⁻¹ | UNEP Ozone Secretariat, April, 2002~3[Handbook for the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer |
| AP | kg SO ₂ -eq. kg ⁻¹ | CML 1999, Hauschild & Wenzel, 1998 |
| EP | kg PO ₄ ³⁻ -eq. kg ⁻¹ | Heijungs et al 1992, (with some modification) |
| POCP | kg C ₂ H ₄ -eq. kg ⁻¹ | CML 1999, Jenkin & Hayman, 1999; Derwent et al. 1998; high NOx |

[†]ADP, Abiotic resource Depletion Potential; GWP, Global Warming Potential; ODP, Ozone Depletion Potential; AP, Acidification Potential; EP, Eutrophication Potential; POCP, Photochemical Ozone Creation Potential.

을 사용하여 LCI 분석을 수행하여 상추생산체계의 탄소 성적을 산정하였다. 대기로 배출되는 온실가스는 kg CO₂-eq. kg⁻¹ lettuce 단위로 CO₂-eq. 값으로 환산되어 표시되며, 산정 물질은 교토의정서에서 규정한 6대 온실가스 (GHG, Green House Gas)로 이산화탄소 (CO₂), 메탄 (CH₄), 아산화질소 (N₂O), 수소불화탄소 (HFCs), 육불화황 (SF₆), 과불화탄소 (PFCs)이다. 상추의 전과정 탄소성적은 식 (3)의 방법으로 산정되었다.

$$\text{Carbon footprint (kg CO}_2\text{-eq.)} = \sum(\text{GHG emission (kg GHG)} \times \text{GWP}) \quad (3)$$

여기서, 지구온난화지수 (GWP, Global Warming Potential)는 온실가스가 100년 동안에 대기에 머물며 지구에 미치는 온난화 효과로 CO₂를 1로 기준했을 때 환산된 값으로 각 온실가스의 이산화탄소 환산 값은 IPCC (2001) 기준을 따랐다 (IPCC, 2001).

전과정 영향평가 (Life Cycle Impact Assessment) LCIA는 LCI 분석 단계에서 정량화된 투입 및 산출물들을 환경영향과 대응시켜 이들에 대한 각각의 잠재적 환경영향을 평가한다. 전과정 영향평가는 분류화 (classification), 특성화 (characterization), 정규화 (normalization), 가중화 (weighting) 4단계로 구성된다. 분류화 단계에서는 LCI 분석에서 구축된 LCI 데이터를 영향범주에 배정하고, 특성화는 각 영향범주로 분류된 LCI 데이터들의 환경부하량 (배출량)에 특성화 계수를 곱하여 환경부하에 대한 잠재적 기여도를 특징 짓는다. 정규화 단계는 각기 다른 단위값을 갖는 영향범주 값을 일정 지역 및 시간하의 총 환경부하량, 인구수, GNP 등의 공동단위로 나누어 단위를 없게 만들어 환경에 대한 영향범주 간 상대적 기여도 (순위)를 평가한다. 가중화 단계에서는 각 영향범주에 가중치를 곱하여 영향범주들에 상대적 중요도를 반영시킨다. 이 중 분류화와 특성화는 의무수행 단계이고 정규화와 가중화는 선택수행 단계이다. 본 연구에서는 지식경제부 영향평가 방법론 및 특성화 계수를 사용하여 분류화와 특성화까지 의무수행단계를 수행하였다 (Table 3). 무생

물자원고갈 (ADP, Abiotic resource Depletion Potential), 지구온난화 (GWP, Global Warming Potential), 오존층고갈 (ODP, Ozone Depletion Potential), 산성화 (AP, Acidification Potential), 부영양화 (EP, Eutrophication Potential), 광화학 산화물생성 (POCP, Photochemical Ozone Creation Potential) 등 6가지 영향범주에 미치는 환경영향을 PASS 4.1.3. 프로그램으로 수행하였다. 특성화값 산정은 목록분석결과 구축된 각각의 목록이 6 영향범주에 미치는 환경영향을 식 (4)의 지식경제부 영향평가 방법론으로 정량화하였다 (MKE, Software program PASS v4.1)

$$\begin{aligned} \text{Potential contribution rate to impact category (} C_{ij} \text{)} &= \text{Emission (Load } j \text{)} \times \text{Characterization factor (Eqv. } ij \text{)} \\ \text{Characterization value (} C_{total} \text{)} &= \sum C_{ij} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 C_{ij} : 투입/산출물 j 로부터 발생하는 영향범주 i 에 대한 잠재적 기여도; $Load_j$: 목록항목 i 의 환경부하량; $Eqv. ij$: 항목별 상응인자이다.

결과 및 고찰

전과정 목록분석 LCI DB 구축을 위한 데이터 수집결과 시설상추를 시장에 출하하는 농산물 상품으로 1 kg 생산하는데 투입되는 물질 중 유기질비료와 화학비료가 각각 7.85E-01 kg, 4.42E-02 kg로 비료의 투입량이 가장 높았고, 농약의 투입량이 1.32E-04 kg로 가장 작은 값을 나타내었다. 전기 및 화석연료 (경유, 등유, 휘발유)의 투입량은 5.22E-01 kg였고 조사결과 비료와 에너지의 투입이 시설상추 생산에 가장 높은 비중을 차지하는 물질이었다. 영농 단계에서 발생하는 직접 대기배출물 CO₂, CH₄, N₂O 배출량의 합은 3.23E-02 kg이었다 (Table 2).

상추 1 kg 생산하는데 발생하는 지구 온난화가스를 LCI 분석한 결과 시설상추 생산체계 전 과정을 통하여 발생하는 온실가스는 CO₂가 8.65E-01 kg CO₂ kg⁻¹ 로 가장 많았고,

Table 2. Data of inputs and outputs for LCI of lettuce production (gate-to-gate inventory).

| Input/Output | Unit | Quantity | Data source | Linked inventory DB |
|---|------|--------------------------|--|--|
| Input | | | | |
| | | kg ⁻¹ product | | |
| Seed, seedling | L | 4.80E-05 | 2007 Incomes data (RDA, 2008) | Ecoinvent (compost at plant) |
| Composts | kg | 7.85E-01 | Incomes data (RDA, 2008) | Ecoinvent (urea, as N, at regional storehouse (46% N)) |
| N fertilizers | kg | 4.06E-03 | Incomes data (RDA, 2008) | Ecoinvent (ammonium sulphate (21%N)) |
| P fertilizers | kg | 2.16E-04 | Incomes data (RDA, 2008) | MKE [†] thomas meal (P2O5 17%, 32% Ca) |
| K fertilizers | kg | 1.20E-04 | Incomes data (RDA, 2008) | Ecoinvent, MKE, ME [‡] (urea, ammonium sulphate, |
| Compound fertilizers | kg | 2.34E-02 | Incomes data (RDA, 2008; KFIA, 2007) | thomas meal/potassium sulphate, potassium chloride) Ecoinvent (borax) |
| Borax | kg | 1.44E-04 | Incomes data (RDA, 2008) | ME (calcium carbonate, CaCO ₃ _10 _μ) |
| Lime | kg | 1.49E-02 | Incomes data (RDA, 2008) | ecoinvent (stone meal) |
| Silicate fertilizer | kg | 1.32E-03 | Agrochemical year book, | Ecoinvent (benzimidazole-compounds, carbofuran, |
| Pesticides | kg | 1.32E-04 | Agrochemical use guide book (KCPA, 2007) | cyclic N-compounds, pesticide unspecified, phenoxy-compounds, pyreteroid-compound) |
| Electricity | kw | 4.98E-01 | Incomes data (RDA, 2008) | MKE (electricity) |
| Fossil feul | kg | 2.41E-02 | Incomes data (RDA, 2008) | Ecoinvent, MKE (diesel, kerosene, gasoline) |
| Vinyl | kg | 1.48E-03 | Incomes data (RDA, 2008) | MKE (HDPE-film, LDPE) |
| Felt | kg | 2.69E-03 | Incomes data (RDA, 2008) | Ecoinvent (textile, woven cotton, at plant) |
| Output | | | | |
| Direct emissions (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O) | kg | 7.30E-02 | IPCC 1996 | |
| Vinyl wastes | kg | 3.77E-04 | KWA, 2007 | MKE (waste HDPE Incineration, mixed Plastics Landfill) |
| Lagging cover wastes | kg | 5.23E-04 | MIFAFF, 2004 | MKE (waste LDPE Incineration) |
| Product (lettuce) | kg | 1.00E+00 | Incomes data (RDA, 2008) | |

[†]MKE, Ministry of Knowledge Economy, Republic of Korea; [‡]ME, Ministry of Environment.

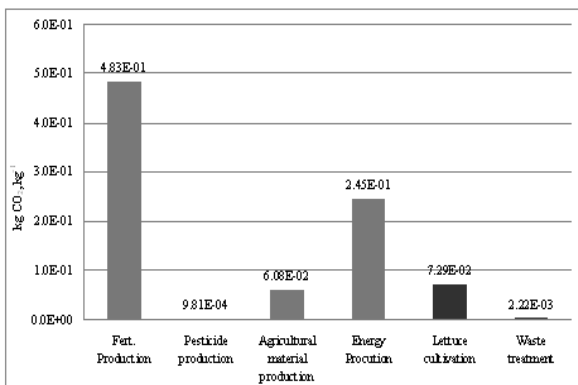


Fig. 2. CO₂ emission from lettuce production system.

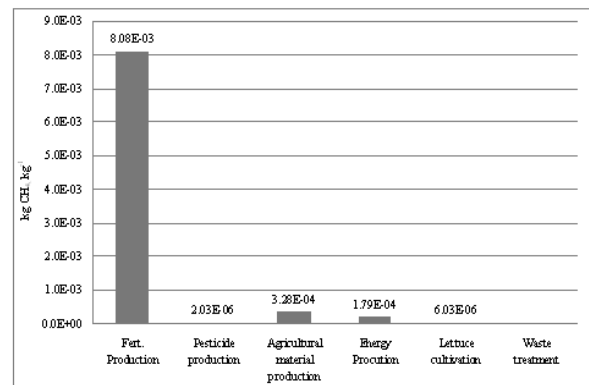


Fig. 3. CH₄ emission from lettuce production system.

CH₄와 N₂O가 각각 8.59E-03 kg CH₄ kg⁻¹, 2.90E-04 kg N₂O kg⁻¹ 였다.

상추생산 전 과정을 비료생산 공정, 농약생산 공정, 에너지생산 공정, 농자재생산 공정, 상추생산 공정, 폐기물처리 공정으로 구분하여 공정별 온실가스 발생량을 분석하였다. 공정별 이산화탄소의 배출량은 Fig. 2에 나타났다. 분석결과 CO₂는 비료생산과정에서 발생하는 양이 가장 많았고, 전체 공정에서 발생된 이산화탄소 발생량의 약 56%를 차지하였다. 다음은 에너지생산 공정 (약 28%), 상추 재배공정(약 9%), 농자재생산 공정 (7%)의 순으로 배출량이 나타났다.

투입요소별 기여도 분석결과 퇴구비 생산은 전체 CO₂ 발

생량의 약 50%를 차지하였고, 전기생산 중 발생하는 이산화탄소가 전체 발생량의 28%였다. 그 밖에 상추재배에서 9%, 부직포 생산에 의해서 7%, 복합비료가 5% 비중을 나타냈다 (Fig. 3).

상추 생산체계에서 발생하는 총 메탄발생량 중 비료생산에서 발생하는 비중이 94%로 매우 높았고, 농자재 생산이 4%, 에너지 생산이 2%로 나타났다. 공정별 메탄 발생량은 Fig. 4에 나타내었다. 특히 퇴비구 생산과정에서 발생하는 메탄가스는 전체의 93%로 메탄 발생의 대부분을 차지하였다. 다음은 부직포 생산에 의한 메탄 발생이 4%, 전기 생산 2%, 복비생산 1%의 비중으로 나타났다 (Fig. 5).

N₂O 역시 비료생산 공정이 아산화질소 총 발생량의 77%로 가장 높은 비중을 차지하였고, 그 다음이 상추생산 공정으로 약 17%의 배출비율을 보였다. 아산화질소 발생에서 상추재배단계가 차지하는 비중이 높게 나타났는데 이것은 질소 비료 사용에 의한 아산화질소의 대기배출 때문으로 판단되었다. Iserman (1994)은 농경지 토양에서 대기로 배출되는 N₂O 중에 81%가 질소질 비료에 의해 배출된다고 하였다. 공정별 아산화질소 배출량은 Fig. 4에 나타났다.

이 중 퇴구비 생산공정은 아산화질소 발생의 76%를 차지하였고, 상추재배과정에서 17%, 부직포 생산공정으로 6%, 복비생산에서 1%가 발생하였다 (Fig. 5). 이산화탄소, 메탄, 아산화질소 모두 퇴구비 생산에서 발생하는 양이 가장 많게 나타났는데, 이것은 상추 1 kg 생산에 투입되는 퇴구비의 투입량이 다른 투입요소에 비하여 월등히 많은 것에 기인하였다. 그 밖에 투입요소 중 전기 투입량도 퇴구비 투입량과 비슷한 값을 나타내었는데, 전기사용에 의한 GHG 발생은 CO₂ 발생에서 영향을 미쳤으나 CH₄와 N₂O 발생에 미치는

영향은 미미한 것으로 나타났다. 즉 상추 생산체계에서 퇴구비와 전기는 투입량이 비슷하였으나 GHG 발생에 대한 영향은 퇴구비 투입이 훨씬 컸다.

전체적으로 온실가스 배출에 가장 크게 기여하는 공정은 비료생산으로 나타났는데 이것은 Table 2의 LCI 작성을 위해 수집된 GTG자료에서 나타난 바와 같이 상추생산에 투입되는 물질 중 비료가 가장 높은 투입비율을 차지하기 때문으로 판단되었다. 그러므로 포장에서의 질소비료의 합리적인 시비관리법이 탄소 배출 감소에 중요한 요인이 될 것으로 판단되었다. 주문 (BB)의 경우 정밀한 시비를 할 수 있는 장점이 있어, 비료 이용률을 증대시켜 비료유실과 환경오염을 줄일 수 있다. 그러나 복비와 주문비료의 정량적 환경부하 비교에 대한 전과정평가가 이루어지지 않아 이에 대한 연구도 탄소배출 감소에 도움을 줄 것으로 판단되었다. 또한, 시비방법도 온난화가스 발생에 영향을 줄 수 있는데, Lee et al. (2009)에 따르면 돈분 퇴비 사용 후 즉시 경운했을 때가 암모니아 휘산량이 적었고, 돈분 액비 사용에서도 토양 접촉면적을 증가시키면 토양에 질소를 고정시켜 암모니아 휘산을 줄일 수 있었다. 그러므로 액비시비 할 때 줄뿌림이나 토양 주입을 하면 표층살포보다 질소의 대기 손실을 줄일 수 있다. 추후 상추생산체계에 투입되는 시비량 변화에 대한 민감도 분석이 적정 시비량과 탄소발생 감소효과에 대한 보다 정량적인 개선안 도출에 도움을 줄 수 있을 것으로 예상되었다.

비료에 의한 온실가스 배출 감소를 위한 직접적이고 적극적인 방법은 비료 생산과정에서의 발생을 억제하는 것이다. 상추 재배에서 투입되는 비료 중 퇴비의 투입량이 매우 많았다. 그러므로 퇴비화 과정에서 온실가스 배출을 억제하는 기법에 대한 연구 및 개발이 필요하다. 보통 퇴비화 과정 중 NH₃, N₂O, CH₄ 등 가스가 발생하며, 볏짚을 첨가하거나 퇴비더미 뒤집기 및 강제 통기로 산소공급량을 늘리

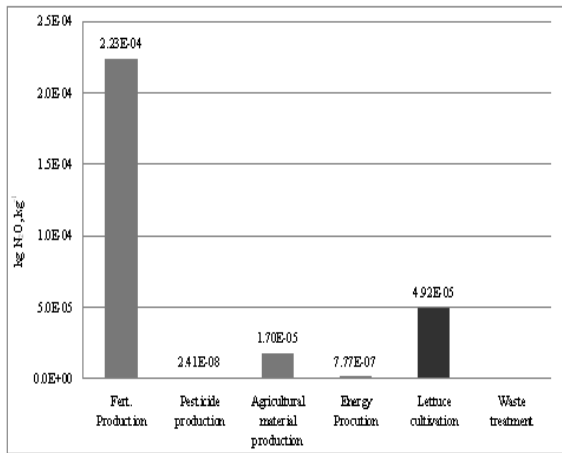


Fig. 4. N₂O emission from lettuce production system.

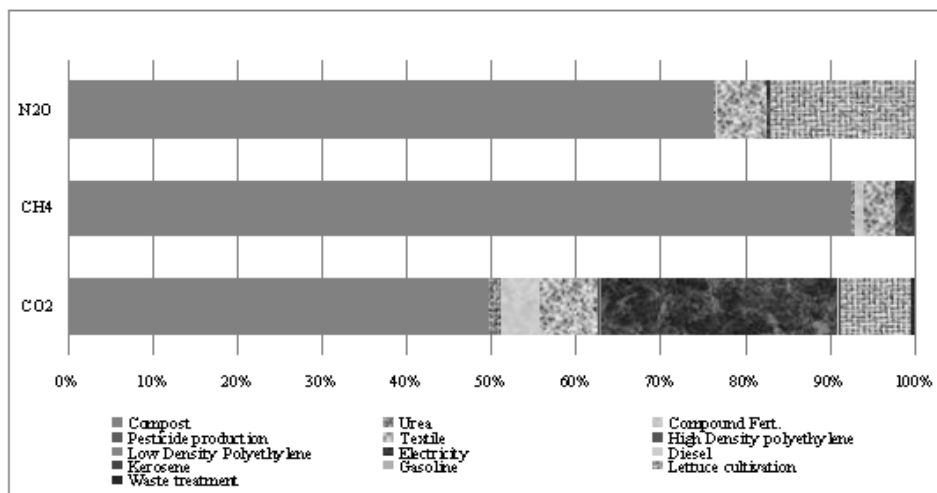


Fig. 5. Contribution rate of lettuce production process to GHG emission.

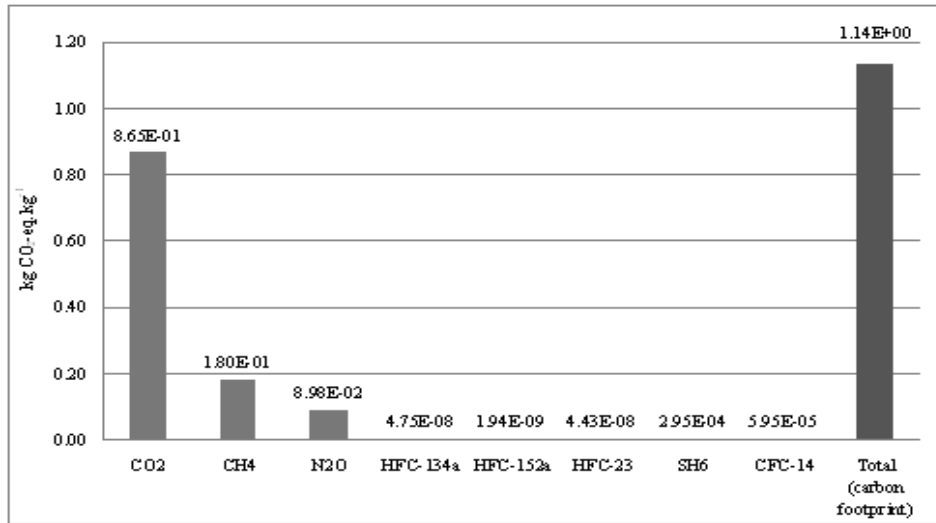


Fig. 6. Carbon footprint of lettuce production system calculated by LCIA (Life Cycle Inventory Analysis).

면 N₂O와 CH₄의 발생은 감소하지만 NH₃ 발생은 증가한다 (Amlinger et al., 2008). 또한 퇴비화 과정 중 질소 손실은 대부분 퇴비화 초기에 발생하는 암모니아 휘산에 의하므로 톱밥이나 파쇄목과 같은 난분해성 유기물은 C/N가 높아 퇴비화 과정에서 질소 부동화를 촉진하여 암모니아 휘산을 저감할 수 있다 (Diaz and Savage, 2007). 퇴비화 동안 CO₂ 발생량은 이분해성 첨가물인 쌀겨처리구가 난분해성 첨가물인 톱밥처리구에 비해 CO₂ 발생량이 많고, 처리량이 증가할수록 CO₂ 발생량도 증가하였다 (Lim et al., 2009).

각 온실가스 발생량을 CO₂-eq.로 환산하여 시설상추 생산체계에 대한 탄소 성적으로 산정하였다. 시설상추 생산체계의 탄소 성적은 1.14E+00 kg CO₂-eq. kg⁻¹였다. 이 중 CO₂가 8.65E-01 kg CO₂-eq. kg⁻¹로 가장 높은 값을 나타내었고, CH₄과 N₂O는 각각 1.80E-01 kg CO₂-eq. kg⁻¹, 8.98E-02 kg CO₂-eq. kg⁻¹였다 (Fig. 6). CO₂-eq.로 환산된 탄소 성적에 대한 기여도는 CO₂가 총 배출량의 약 76%, CH₄는 16%, N₂O는 8%였다.

포장에서 발생하는 직접 대기 배출물은 CO₂, CH₄, N₂O이다. 분석결과 상추재배 공정인 영농작업 단계에서 배출되는 온난화 가스의 주요 원인은 농기계사용으로 인한 화석연료의 연소 중에 발생하는 이산화탄소, 메탄, 아산화질소와 질소비료 사용으로 인한 토양으로부터 대기로의 아산화질소 발생이었다. 앞으로 질소비료와 에너지를 중점으로 한 농가 현장조사를 통한 사례분석과 작부형태 (관행농, 유기농 등)에 따른 탄소성적 산정에 대한 보다 깊이 있는 연구가 진행되어야 할 것으로 판단되었다.

전과정 영향평가 영향범주 중 포장에서 배출되는 CO₂, CH₄, N₂O와 직접적으로 관련된 영향범주는 GWP와 POCP이다. 그러므로 본 연구에서는 GWP 범주를 중심으로 결과

를 해석하였다. 평가결과 GWP의 특성화 값은 1.14E+00 kg CO₂-eq. kg⁻¹이었고, 이 중 가장 기여도가 큰 공정은 비료 공정으로 63% 비중을 차지하였다. 상추 재배 공정은 약 7%였다. 그 밖에 에너지 생산 공정에 의한 지구온난화 기여가 약 23% 농자재 생산공정이 7%로 나타났다. POCP 특성화 값은 9.45E-05 kg C₂H₄-eq. kg⁻¹이었고, 역시 비료생산 공정에 의한 영향이 가장 크게 나타났다. 여섯 개 영향범주에서 ADP를 제외한 모든 영향범주에 가장 큰 영향을 미치는 것은 비료생산이었고, 그 다음으로 농자재생산 공정과 에너지생산 공정이 환경영향에 대한 기여도가 높았다. ADP 범주는 전기생성에 의한 환경영향이 매우 크게 나타났는데, 이것은 화력발전으로 전기를 생산할 때 화석연료의 자원 소모가 많기 때문으로 추측되었다. 상추생산 체계에 대한 LCIA 결과 상추생산 공정은 GWP 범주에서만 기여도가 나타났는데 이것은 연구의 범위설정에 있어서 대기 배출물만 산정했기 때문으로 판단되었다. 공정별 기여도는 영향범주의 특성에 따라 차이는 있지만, 투입량 (Table 2)이 많은 공정이 LCIA 결과에 미치는 영향도 큰 것으로 나타났다 (Fig. 7). 그러므로 농업생산 활동으로 인한 환경영향을 줄이기 위해서는 여러 투입물질들의 적절한 투입량 관리와 합리적인 영농방법과 영농 체계의 개선에 관한 연구가 함께 이루어져야 할 것이다.

한계 및 개선점 상추를 생산할 때 식물잔재나 부산물 발생의 환경영향이나 경제적 가치는 거의 없으므로 이에 대한 할당은 배제되었다. 현재 벧짚 등 작물잔사의 경제적 가치는 정립되어 있지 않으며, 작물잔사에 의한 환경부하는 없는 것으로 간주하고 있다 (Williams et al., 2006).

현재 농기계 동력에서 발생하는 배기 가스량을 직접 측정하여 산정한 국내 배출계수가 없기 때문에 본 연구에서

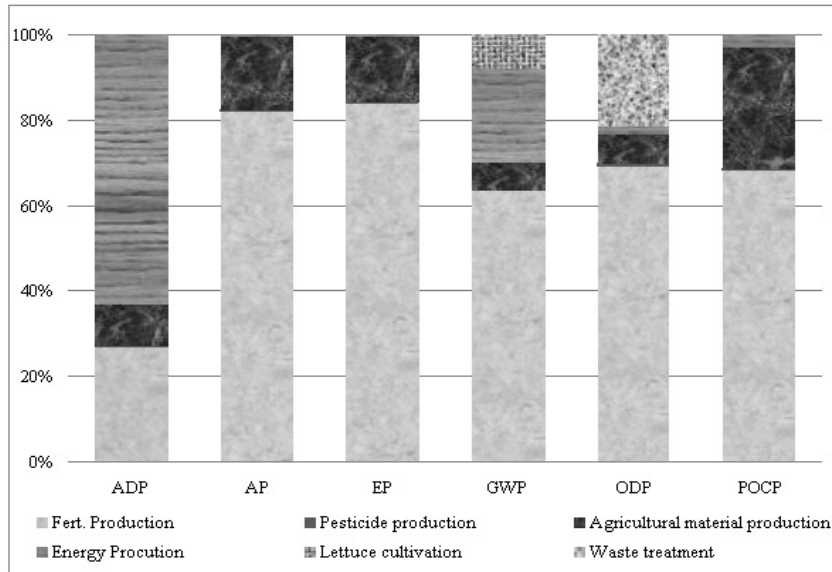


Fig. 7. Rate of contribution to environment impact from lettuce production system by LCIA (Life Cycle Impact Assessment). (ADP, Abiotic resource Depletion Potential; GWP, Global Warming Potential; ODP, Ozone Depletion Potential; AP, Acidification Potential; EP, Eutrophication Potential; POCP, Photochemical Ozone Creation Potential).

농기계 사용에 의한 온난화가스 발생량에 대한 배출계수는 IPCC의 Tier 1 값을 적용하였다. 농기계 디젤기관에서 발생하는 탄소배출 감소를 위하여 미국을 비롯한 선진국에서는 석유계 연료를 대체할 수 있는 바이오디젤유에 대한 많은 연구가 수행되고 있다 (Choi et al., 2006). 특히 바이오디젤유에 대하여 LCA를 수행하면, 화석 연료보다 온실가스 발생 부하가 1/3 감소 효과가 있는 것으로 기대되었다 (Soe and Song, 2010). 그러므로 농기계와 관련된 LCI DB 구축과 LCA를 위하여 농작업 시간과 사용 거리 등의 통계자료를 바탕으로 하는 농기계별, 연료 종류별 배출계수 도출과 더불어 농업용 디젤기관 대체연료로서 바이오 디젤유에 관한 연구가 필요할 것이다.

본 연구는 현재 농진청에서 진행하고 있는 ‘작물별 탄소성적 산정을 위한 top-down 방식의 LCA 방법론 구축’에 준하여 수행하였다. 즉 농축산물소득자료집을 중심으로 그 외 필요한 국가 통가지료가 투입데이터로 사용되었다. 농축산물소득자료집에 의하면 농가평균투입물질량 산정기준이 10 a당 연 1작기 기준으로 조사되었으나 상추와 같이 계절별 수확량이나 가온에 의한 에너지 사용차이가 많은 작물에 대한 계절별 통계치가 구분되어 있지 않고, 상추의 경우 1년 총 4작기의 전체 통계치를 4로 나누어 1년 평균치가 1작기 당 값으로 산정되어있다. 또한, 에너지 사용량도 가온, 용수, 농기계 등 사용목적의 구분이 없고, 전기와 화석연료 사용량 구분을 위하여 통계청에 자료 요청을 하여 추가로 구분을 하였다. 그러므로 현재 진행 중인 top-down 방식의 LCA 수행에서 보다 구체적인 탄소 저감 요인을 구명하기 위해서는 시설재배로 1년 다작을 하는 작물의 경우 계

절에 따른 작기별 통계자료 구축과 계절별 시나리오 분석 등의 추가 수행이 필요할 것으로 보인다. 또한, 전기 사용처를 구분한 좀 더 정확한 전기사용량 측정 방법이 구축되어야 전과정평가 정확도를 향상할 수 있으며, 전력사용량 감소안도 전력사용원별로 구분할 수 있을 것이다. 농기계와 가온에 사용되는 화석연료 사용량에 대한 연료별, 농기계별 자료구축도 요구되었다. 에너지 분야에 대한 자료구축과 LCI 분석이 보완되면, 현재 농작업에서 배출되는 폐기물 및 부산물을 이용한 바이오-열에너지 회수에 관한 연구 등을 접목하여 에너지 사용감소 및 탄소배출 감소를 유도할 수 있을 것으로 예상된다. 예를 들어, 농용기관 배기가스 폐열을 회수하여 농산물 건조에 이용하고, 온풍난방기 배기열을 회수하여 지중 난방용 온수로 전환하거나, 채소 쓰레기나 가축분뇨 발효에서 발생하는 폐열을 회수하여 난방장치에 이용하는 연구 등이다 (Cho and Paek, 2007).

추후 농작물의 인벤토리 구축에서 시스템범위를 최종적으로는 식품산업분야와 연계될 수 있도록 시스템 범위의 확장이 필요할 것으로 판단되었다. 즉, 생산체계를 수확한 후 포장까지 확대하고, 이와 관련한 작업과정 및 유통과정 등에 따른 수송형태와 수송거리의 수송체계를 정립이 필요할 것으로 판단되었다. 이러한 수송체계에 대한 환경부하 모델을 바탕으로 에너지 소모와 환경부하량을 산정한 수송 과정의 추가가 요구되었다.

본 연구를 통하여 전과정평가 도구는 농업분야 전반 즉, 작물별이나 작부형태별 또는 온실가스 배출원의 투입형태 별 등에 따른 배출량을 정량적으로 산정함으로써 농업체계 및 농가차원에서 온실가스를 줄일 수 있는 작부체계를 도입하고 영농기술을 선택하는 데 객관적인 지표로 활용할 수

있는 장점이 있었다. 또한, 배출원의 과잉투입을 제어할 수 있는 정책제안에 대한 과학적인 근거자료로서 활용 기능을 가진다. 그러나 현 시점에서 우리나라 농업분야의 전과정평가와 관련된 제반 자료 및 방법론 구축은 미비하며, 이에 관련된 연구가 시작되고 있다. 또한, 좀 더 효율적인 농업정책을 수행을 위하여 이를 뒷받침할 수 있는 통계자료의 구축과 더불어 지속적 데이터베이스 구축 및 관리가 요구되었다. 이를 위하여 질소비료 투입과 이에 따른 아산화질소 배출계수 및 농기계 연료 사용에 의한 온실가스별 배출계수 등 농업분야 국가 고유 배출계수를 개발하고, 농업분야 생태특성을 반영하는 환경영향 모델링을 개발하고 구축하여 전과정 평가의 농업적 방법론을 구축하는 것이 선행되어야 할 것이다. 나아가 퇴비 및 작물 부산물을 이용한 바이오 에너지 및 열 에너지 회수와 토양 및 자연경관 보전에 대한 환경영향평가 등 농업생산을 통하여 환경 부하를 줄일 수 있는 긍정적 효과에 관한 연구와 이에 관한 전과정평가를 통하여 농업분야의 환경적 역할에 대한 정량적 지표 제시가 가능할 것으로 기대되었다.

요 약

시설재배 상추생산체계에 대한 LCI DB를 구축하고 상추의 탄소성적산정과 전과정 영향평가를 위하여 전과정평가를 수행하였다.

상추재배에 관련된 농작업 투입물과 산출물에 대한 GTG 목록작성결과 시설상추 1 kg 생산하는데 투입되는 물질 중 유기질비료와 화학비료가 각각 $7.85E-01 \text{ kg kg}^{-1}$ lettuce, $4.42E-02 \text{ kg kg}^{-1}$ lettuce로 비료의 투입량이 가장 높았다. 비료와 에너지의 투입이 시설상추 생산에 가장 높은 비중을 차지하는 물질이었다. 영농단계에서 발생하는 직접 대기 배출물 CO_2 , CH_4 , N_2O 배출량의 합은 $3.23E-02 \text{ kg kg}^{-1}$ lettuce이었다.

시설 상추 1 kg을 생산 전과정 중 발생하는 온실가스를 LCI 분석한 결과 시설상추 생산체계 전과정을 통하여 상추 1kg 생산에 발생하는 온난화 가스는 CO_2 가 $8.65E-01 \text{ kg CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ 로 가장 많았고, CH_4 와 N_2O 가 각각 $8.59E-03 \text{ kg CH}_4 \text{ kg}^{-1}$, $2.90E-04 \text{ kg N}_2\text{O kg}^{-1}$ 이었다. 전체적으로 온실가스 배출에 가장 크게 기여하는 공정은 비료생산으로 나타났고, 특히 아산화질소 발생에서 상추재배단계가 차지하는 비중이 높게 나타났는데 이것은 질소 비료 사용에 의한 아산화질소의 대기배출 때문으로 판단되었다. 각 온난화 가스들의 발생량을 $\text{CO}_2\text{-eq.}$ 로 환산하여 시설 상추 생산체계에 발생하는 온실가스 배출량을 탄소 성적값으로 산정하였다. 시설상추 생산체계의 탄소 성적값은 $1.14E+00 \text{ kg CO}_2\text{-eq. kg}^{-1}$ 이었다. $\text{CO}_2\text{-eq.}$ 로 환산된 탄소 성적에 CO_2 는

발생 비중이 총 온실가스 배출량에 약 76%, CH_4 는 16%, N_2O 는 8%를 차지하였다. LCI 분석결과 영농작업 단계에서 배출되는 온난화 가스의 주요원인은 농기계사용으로 인한 화석연료의 연소 중에 발생하는 아산화탄소, 메탄, 아산화질소와 질소비료 사용에 기인한 아산화질소의 대기 발생이었다.

전과정 영향평가 영향범주 중 포장에서 배출되는 CO_2 , CH_4 , N_2O 와 직접적으로 관련된 영향범주는 지구온난화 영향범주와 광화학적 산화물 생성 범주이며, 평가결과 지구온난화 영향범주의 특성화 값은 $1.14E+00 \text{ kg CO}_2\text{-eq. kg}^{-1}$ 이었고, 광화학적 산화물 생성 범주 특성화 값은 $9.45E-05 \text{ kg C}_2\text{H}_4\text{-eq. kg}^{-1}$ 이었다. 대부분 영향범주에서 비료생산에 의한 환경영향 기여도가 가장 높았고, 그다음으로 농자재생산 공정과 에너지생산 공정이 환경영향에 대한 기여도가 높았다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업 (과제번호: PJ007874)의 지원에 의해 이루어진 것임.

인 용 문 헌

- Amlinger, F., S. Peyr, and C. Cuhls. 2008. Greenhouse gas emission from composting and mechanical biological treatment. *Waste Manage. Res.* 26(1):47-60.
- Cho, K.H. and Y. Paek. 2007. Heat recovery effect using vegetable sludge of bio-thermal energy in closed chamber. *J. Kor. Soc. Mechanical Technology* 9(2):39-42.
- Choi, S.H., Y.T. Oh, and J. D. So. 2006. Characteristics of exhaust emission by the application of biodiesel fuel and oxygenates as an alternative fuel in an agricultural diesel engine. *J. Biosystem Eng.* 31(6):457-462.
- Dalgaard, R., N. Halberg, I.S. Kristensen, and I. Larsen. 2003. Proceeding from the 4th International Conference, Bygholm, Denmark, An LC Inventory based on representative and coherent farm types.
- Diaz, L.F and G.M. Savage. 2007. Factors that affect the process, In: Diaz, L et al. (eds) *Compost science and technology*, Elsevier, Amsterdam, Netherlands. pp. 49-66.
- Erwin, M.S. and M.F. Annik. 2008. LCA studies of food products as background for environmental product declarations, *Int. J. Life Cycle Ass.* 13(3):255-264.
- Frischknecht, R. and G. Rebitzer. 2005. The ecoinvent database system: a comprehensive web-based LCA database. *J. Clean. Prod.* 13(2005):1337-1343.
- Haas, G., F. Wetterich, and U. Köpke. 2001. Comparing intensive, extensified and organic grassland farming in

- southern Germany by process life cycle assessment. *Agri. Ecosyst. Environ.* 83:43-53.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1996. IPCC Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories.
- 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.
- Iserman, K. 1994. Agriculture's share in the emissions of trace gases affecting the climate and some cause oriented proposal for reducing this share, *Environ. Pollut.* 83:95-111.
- ISO (International Organization for Standardization), 1997. Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework. International Standard ISO 14040, ISO, Geneva.
- Jensen, A.A., L. Hoffman, B.T. Moller, A. Schmidt, K. Christiansen, J. Eikington, and F. van Dijk, 1997. Life Cycle Assessment (LCA) - A guide to approaches, experiences and information sources; European Environmental Agency.
- 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.
- KEITI (Korea Environmental Industry & Technology Institute). 2010. Certificated Products List of Carbon Footprint. <http://www.edp.or.kr/carbon/data/>
- KFIA (Korea Fertilizer Industry Association). 2007. fertilizer production data. Korea Fertilizer Industry Association. Seoul, Korea. available <http://www.fert-kfia.or.kr>
- KWA (Korea Waste Association). 2007. Agricultural waste data. Korea Waste Association. Seoul, Korea. available from <http://www.kwaste.or.kr/data/>
- Lee, Y.B., H.B. Yun, Y. Lee., and D. Kaown. 2009. Evaluation of ammonia emission from arable soil applied liquid manure and compost. 2009 International Symposium for Improvement of Agro-Food Safety. pp. 329-338.
- Lim, S.S., H.J. Park, S.I. Lee. D.S. Lee, J.H Kwak, and W.J. Choi. 2009. The role of organic amendments with different biodegradability in Ammonia volatilization during composting of cattle manure. *Korean J. of Environ. Agric.* 28(1):20-24.
- ME (Ministry of Environment). Guidelines for draw up on Carbon Footprint Label. Public announcement of Ministry of Environment 2009-86.
- MFAFF (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.
- MKE (Ministry of Knowledge Economy). Software program PASS v4.1.
- RDA (Rural Development Administration). 2008. 2007 Agro-livestock incomes data book. Rural Development Administration. Suwon, Korea.
- Roh, K.A., D.B. Lee, G.Y. Kim, K.M. Shim, H.C. Jeong, and B.G. Ko. 2008. Estimation of GHG emission from agricultural area and development of national inventories in Korea. International Symposium on measures to climate change in agricultural sector. pp. 124-134.
- Seo, B.K. and S.K. Song. 2010. State-of-the-art of life cycle assessment for biodiesel Production from plant biomass. *KSBB Journal* 25:1-10.
- Simapro software v7.2, ecoinvent process system.
- Suan, E.P. 2005. Quantifying cradle-to-farm gate life-cycle impacts associated with fertilizer used for corn, soybean, and stover production, national renewable energy laboratory, Technical Report.
- Williams, A.G., E. Audsley, and D.L. Sandars. 2006. Determining the environmental burdens and resource use in the production of agricultural and horticultural commodities. Main Report. Defra Research Project ISO 205. Bedford: Cranfield University and Defra.