

시설상추 농가를 대상으로 하는 bottom-up 방식 LCA 방법론의 농업적 적용

유종희* · 김계훈¹ · 김건엽 · 소규호 · 강기경

국립농업과학원 농업환경부 기후변화생태과, ¹서울시립대학교 환경원예학과

Application of LCA on Lettuce Cropping System by Bottom-up Methodology in Protected Cultivation

Jong-Hee Ryu*, Kye-Hoon Kim¹, Gun-Yeob Kim, Kyu-ho So, and Kee-kyung Kang

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

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

This study was conducted to apply LCA (Life cycle assessment) methodology to lettuce (*Lactuca sativa* L.) production systems in Namyang-ju as a case study. Five lettuce growing farms with three different farming systems (two farms with organic farming system, one farm with a system without agricultural chemicals and two farms with conventional farming system) were selected at Namyangju city of Gyeonggi-province in Korea. The input data for LCA were collected by interviewing with the farmers. The system boundary was set at a cropping season without heating and cooling system for reducing uncertainties in data collection and calculation. Sensitivity analysis was carried out to find out the effect of type and amount of fertilizer and energy use on GHG (Greenhouse Gas) emission. The results of establishing GTG (Gate-to-Gate) inventory revealed that the quantity of fertilizer and energy input had the largest value in producing 1 kg lettuce, the amount of pesticide input the smallest. The amount of electricity input was the largest in all farms except farm 1 which purchased seedlings from outside. The quantity of direct field emission of CO₂, CH₄ and N₂O from farm 1 to farm 5 were 6.79E-03 (farm 1), 8.10E-03 (farm 2), 1.82E-02 (farm 3), 7.51E-02 (farm 4) and 1.61E-02 (farm 5) kg kg⁻¹ lettuce, respectively. According to the result of LCI analysis focused on GHG, it was observed that CO₂ emission was 2.92E-01 (farm 1), 3.76E-01 (farm 2), 4.11E-01 (farm 3), 9.40E-01 (farm 4) and 5.37E-01 kg CO₂ kg⁻¹ lettuce (farm 5), respectively. Carbon dioxide contribute to the most GHG emission. Carbon dioxide was mainly emitted in the process of energy production, which occupied 67~91% of CO₂ emission from every production process from 5 farms. Due to higher proportion of CO₂ emission from production of compound fertilizer in conventional crop system, conventional crop system had lower proportion of CO₂ emission from energy production than organic crop system did. With increasing inorganic fertilizer input, the process of lettuce cultivation covered higher proportion in N₂O emission. Therefore, farms 1 and 2 covered 87% of total N₂O emission; and farm 3 covered 64%. The carbon footprints from farm 1 to farm 5 were 3.40E-01 (farm 1), 4.31E-01 (farm 2), 5.32E-01 (farm 3), 1.08E+00 (farm 4) and 6.14E-01 (farm 5) kg CO₂-eq. kg⁻¹ lettuce, respectively. Results of sensitivity analysis revealed the soybean meal was the most sensitive among 4 types of fertilizer. The value of compound fertilizer was the least sensitive among every fertilizer input. Electricity showed the largest sensitivity on CO₂ emission. However, the value of N₂O variation was almost zero.

Key words: LCA, Lettuce (*Lactuca sativa* L.), Carbon footprint, Namyang-ju

서 언

전과정평가 (LCA, Life Cycle Assessment)는 제품의 생산, 사용, 폐기 전 과정에 투입·배출되는 모든 물질과 관련

된 환경영향을 평가하기 위한 방법론이다. 전과정평가의 장점은 다양하고 복잡한 환경에 대한 잠재적 영향평가와 그 원인을 정량적으로 분석하므로 이를 근거로 정책결정에 활용되는 것이다 (Hanegraaf et al., 1998). 1993년 국제표준화기구 (ISO, International Organization for Standardization)에서 기술위원회 (TC, Technical Committee)를 구성하고 전과정평가를 포함한 환경경영기법들의 표준규격을 재정하기

접수 : 2011. 11. 10 수리 : 2011. 12. 11

*연락처 : Phone: +82312900240

E-mail: soil73@kg21.net

시작하였다. ISO의 전과정평가 방법론에 따르면 전과정평가는 제 1단계: 목적 및 범위의 설정 (Goal and scope definition), 제 2단계: 목록분석 (Life Cycle Inventory Analysis), 제 3단계: 영향평가 (Life Cycle Impact Assessment), 제 4단계: 해석 (Interpretation)의 순서로 진행 된다 (Shin, 2008).

농업분야의 전과정평가 적용을 위한 방법론 구축과 문제 해결 등을 위한 세미나 및 국제회의가 주로 유럽을 중심으로 1990년대 초반부터 시작되었다. 전과정평가가 농업분야에 적용된 초기인 1996년부터 2000년대까지는 주로 단작에 대하여 전과정평가를 수행하였는데, 특히 겨울 밀을 대상으로 생산과정, 제초관리, 비료생산 등에 관한 전과정평가의 수행이 주를 이루었다. 2000년 이후부터는 관행농과 유기농 우유생산체계 등과 같이 서로 다른 농업 생산체계를 비교하는 전과정평가 수행이 이루어지기 시작하였다 (de Boer, 2003).

우리나라는 농업분야 전과정평가가 도입되는 시점이어서 선형 연구사례가 많지 않으나, 2009년부터 국립농업과학원에서 “농식품부품 탄소이력 추적 기반구축 연구 및 전과정평가 방법론 개발”을 시작하면서 쌀, 고추 등 주요 작물 생산체계에 대한 탄소성적을 산정하고 LCI DB (Life Cycle Inventory Data Base)를 구축하고 있다 (So et al. 2010a; So et al. 2010b) 그러나 국립농업과학원에서 구축하고 있는 전과정평가 방법론은 우리나라 전국을 대상으로 하는 주요 작물에 대한 평균적인 탄소성적의 산정이 목적이므로, 전과정평가를 위한 자료 수집 및 구축이 농축산물소득자료 집을 중심으로 그 외 국가 통계자료 및 문헌자료를 분석을 위한 데이터로 사용하는 top-down 방식으로 진행되고 있다. 현재 국내에서 농가현지의 자료를 직접 수집하여 탄소배출량을 산정하는 bottom-up 방식의 전과정평가는 수행되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 현재 국립농업과학원에서 구축하고 있는 농작물 탄소성적 및 전과정평가 방법론의 현장 적

용을 위하여 상추를 생산하고 있는 남양주지역을 대상으로 사례분석 하였다.

재료 및 방법

본 남양주 상추 농가 사례연구는 2009년 5월~9월 남양주에 있는 상추시설재배 유기 2 농가 (조안리), 무농약 인증 1 농가 (진건읍), 관행 2 농가 (진건읍)을 방문하여 상추재배에 투입되는 물질들에 관한 청취조사를 하였다. 시설재배지 현장에서 수행한 청취조사에 의하면 경작연수는 대략 5년간 동일 작물을 연작하고 5년에 한 번 정도 객토를 하였다.

남양주는 경기도 동북부에 자리하며 수도 서울에서 동으로 26 km 지점에 위치한다. 평지의 지질은 대체로 비옥하며, 연평균 기온 12.5°C, 강수량 1,296 mm로 사계절이 뚜렷한 대륙성 기후이다. 남양주 시설재배지 주요 재배작물은 엽채류로 지역 특성을 살린 도시근교농업을 통하여 서울 시민에게 신선한 채소를 공급함으로써 지역 농업생산액 50% 이상을 차지하고 있다. 2009년 기준 시설채소의 총 재배면적은 1,326.5 ha로 작목별 재배 현황은 상추 323 ha, 시금치 334 ha, 토마토 11 ha, 오이 147 ha, 호박 23 ha, 기타 (쑥갓, 열무, 아욱 등) 591 ha이다. 이 중 유기농산물 재배면적은 4.3 ha, 유기농 인증 20건이며, 무농약 농산물 재배면적은 4.9 ha, 인증 건수는 13건이다 (NAIS, 2009).

연구 목적 및 범위 본 연구의 목적은 1 작기 당 상추 1 kg을 생산하는데 투입되는 비료, 농약, 하우스비닐 및 멀칭비닐의 농자재와 농기계용 연료와 양수용 전기사용으로 발생하는 탄소배출량 산정과 환경영향 평가로 정의하였다. 시스템 범위는 상추 육묘 1개월에서 재배 3개월의 총 4개월을 1 작기로 하였고, 자료 수집과 정량화 단계의 오차를 줄이기 위하여 별도의 냉·온방시설이 필요하지 않은 봄·가을 재배로 가정하였다. 상추 생산 시스템은 육묘, 토양정비 및

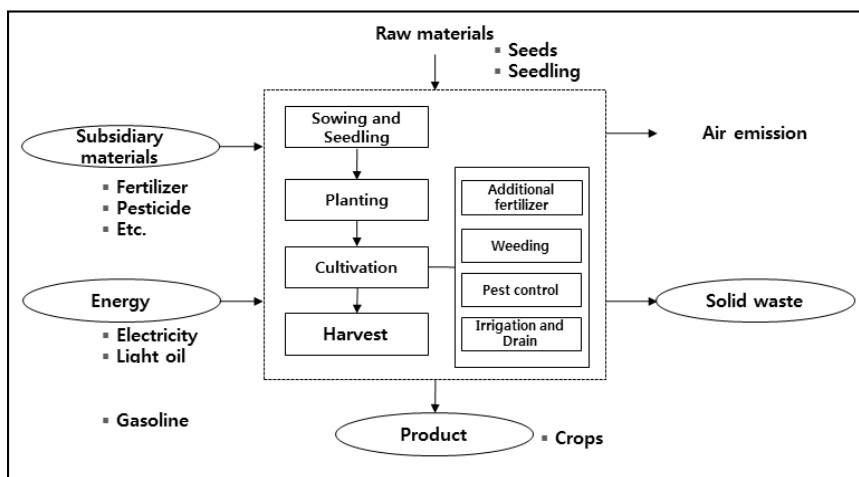


Fig. 1. System boundary of lettuce production system.

정식, 재배, 수확 4단계로 구분하고 시스템경계의 외부에서 각 공정으로 투입되는 물질과 상추 생산과정을 통하여 시스템 경계 외부로 방출되는 환경부하물질 (대기오염물질)과 직접배출량은 농가방문 청취조사를 위주로 부족한 자료는 통계자료 등을 이용하여 산정하였다. 이 과정에서 공정 중 수송부문은 농업분야에서 구축된 자료 및 방법론 부재로 제외하였다. 시스템의 기능단위는 1 작기 당 상추 1 kg 생산을 기준으로 하였으며, 전력은 kWh로 종자 및 종묘의 단위는 L 및 주로 정하였다 (Fig. 1).

전과정 목록분석 상추 재배면적이 조사농가마다 다르므로 10 a (300 m²) 면적을 기준으로 투입 및 생산량을 산정하였다. 비료, 농약, 종자, 에너지, 농자재 투입량은 현장방문 청취조사로 투입량을 산정하였다. 현장 방문하여 청취조사한 다섯 농가의 상추재배 방식을 Table 1에 나타냈다. 유기농과 친환경농업 인증농가는 농법 전환기간 때문에 관행 농가에 비하여 재배 연수가 짧았다. 또한, 공장형 퇴비의 사용 금지로 유기질 비료 공급원으로 유박을 밀거름으로 사용하였고, 옷거름은 사용하지 않았다. 관행 농가는 밀거름으로 복합비료 (21-17-17)와 퇴비를 사용하고, 옷거름으로 요소비료를 사용하였다. 농가 1를 제외한 모든 농가에서 육묘 후 정식을 하였고, 농가 1은 종묘에서 묘를 구매하여 정식하여 육묘 단계가 생략되었다. 농약사용 유형은 관행농은 화학농약을 사용하였고, 유기농과 친환경농가는 미생물제를 사용하였다. 관수는 모두 양수기로 지하수를 이용하여 점적관수 하였다. 농가1은 멀칭 없이 재배하였고 나머지 농가는 비닐멀칭을 하였다. 농가마다 재배형태에 차이가 있었

으며, 수확량은 1,680 Kg 10 a⁻¹ ~ 4,410 Kg 10 a⁻¹였고, 유기농이 관행농에 비해 수확량이 적었다.

농가별 투입 에너지 종류 및 투입방법은 Table 2에 나타났다. 육묘공정에서 투입되는 에너지는 전기에너지로 10 a 당 관수를 위한 전기 사용량을 산정하였다. 토양정비 및 정식에 투입되는 경우는 농업용 범용트랙터의 연료로서 사용자에 따라서 투입시간이나 사용량에 차이가 있었고, 사용하는 트랙터의 마력도 각각 달랐다. 작기 당 1회씩 정식 전 토양정비를 위하여 트랙터에 탈부착 할 수 있는 날을 바꾸어 토양정비 10~20분, 경운 10~20분씩 운용하였다. 재배 공정에서 투입되는 에너지는 관수를 위한 전기 사용으로 농가별로 4~5일에 1회씩 지하수를 이용하여 관수하였다.

수집된 데이터의 계산은 다음과 같다.

국내 복합비료는 기존 단일비료를 블렌딩하여 제조하므로 한국비료공업협회의 2007 비료 생산출하실적 (KFIA, 2007)을 활용하여 복합비료 제조에 투입된 무기질 비료의 양을 계산하였다. 모든 비료생산 공정의 LCI (Life Cycle Inventory) DB 적용은 국내 DB 부재로 스위스 ecoinvent DB (Simapro software v7.2)를 적용하였고, 복합비료 제조공정에 투입되는 에너지 관련 LCI DB는 지식경제부와 환경부 LCI DB (MKE, Software program PASS v4.1)를 적용하였다.

농약 투입량은 현장조사를 통하여 1 작기 당 사용되는 농약사용량과 농약종류를 수집하여 유효성분을 계통 분류하였다. 농약제조 공정에 대한 LCI DB는 ecoinvent 자료를 적용하였다. 유기농에서 사용하는 미생물제는 계통분류 및 유효성분함량 산정에 관한 자료와 방법론이 없어 평가에서 제외하였다.

Table 1. Agricultural practice for lettuce cultivation in the study locations during one cropping season.

	Farm 1 (Conventional farming)	Farm 2 (Conventional farming)	Farm 3	Farm 4	Farm 5
Fields (m ²)	5,280	13,200	4,950	825	1,584
Framing period (year)	9	11	2	4	4
Seedling	No	Yes	Yes	Yes	Yes
Fertilization	- Basal application of fertilizer were applied 1 time per one cropping season: Compost, Compound fert. (21-17-17) - Additional fertilizer was applied 6 times per one cropping season: Urea	- Basal application of fertilizer were applied 1 time per one cropping season: Compost, Compound fert. (21-17-17) - Additional fertilizer was applied 7 times per one cropping season: Urea	- Basal application of fertilizer were applied 1 time per one cropping season: Compost, Compound fert. (21-17-17) - Additional fertilizer was applied 6 times per one cropping season: Urea	- Basal application of fertilizer were applied 1 time per one cropping season: Soybean meal	- Basal application of fertilizer were applied 1 time per one cropping season: Soybean meal
Pesticide	Pesticide (Emamectin benzoate) was applied 8-9 times per one cropping season	Pesticide (Copper oxychloride dimenthomorph) was applied 8-9 times per one cropping season	Biotic pesticide was applied 7-8 times per one cropping season	Biotic pesticide was applied 6-7 times per one cropping season	Biotic pesticide was applied 9-10 times per one cropping season
Irrigation	Drip-watering	Drip-watering	Drip-watering	Drip-watering	Drip-watering
Mulching	No	YES (HDPE)	YES (HDPE)	YES (HDPE)	YES (HDPE)
Heating	No	No	No	No	No
Cropping system	Greenhouse (LDPE)	Greenhouse (LDPE)	Greenhouse (LDPE)	Greenhouse (LDPE)	Greenhouse (LDPE)
Yield (kg 10 a ⁻¹)	4,410	4,310	2,910	1,680	3,680

농자재 중 하우스와 멀칭에 사용되는 비닐의 유효성분을 고밀도폴리에틸렌 (HDPE), 저밀도폴리에틸렌 (LDPE)으로 구분하여 투입량을 구하였다. 현장조사 결과 하우스 비닐 (LDPE)은 4-5년을 주기로 교체하였고, 이를 고려하여 투입량을 계산할 때, 내구연한을 4년으로 가정하여 사용량을 산정하였다. 멀칭용 비닐 (HDPE)은 내구연한을 1년을 기준으로 사용량을 계산하였다. 농자재 LCI DB는 지식경제부 DB를 사용하였다.

상추 재배를 위해 투입되는 에너지는 정식 전 토지정비에 사용되는 농용 트랙터에 쓰이는 경유와 파종기용 휘발유, 육묘 및 재배단계에서 사용되는 관수용 지하수의 양수 펌프 동력원인 전기의 사용 등이다. 이 중 파종기용 휘발유는 조사대상 농가 중 1농가만이 사용하고 사용량도 적은 조건을 고려하여 평가에서 제외하였다. 전기사용량은 kWh를 기준으로 한 적산 데이터를 얻을 수 없었으므로 월 전기료를 농용전기의 비용 기준으로 환산하여 kWh 단위의 사용량을 구하였다. LCI DB 적용은 지식경제부 LCI DB를 사용하였다.

농작업 중에 대기로 배출되는 직접배출물은 CO₂, CH₄, N₂O이다. 직접 대기 배출량 산정을 위하여 질소비료와 화석연료 연소의 IPCC (1996) 온실가스 (GHG, Greenhouse Gas) 배출계수를 적용하였다. 투입된 영농자재 폐기물 처리 자료는 환경자원공사와 농림수산식품부의 영농폐기물통계 (KWA,

2007; MIFAFF, 2004)를 토대로 산정하였다. 폐기물 처리는 매립과 소각으로 구분하여 배출량을 계산하였다. LCI DB는 지식경제부와 환경부 DB를 사용하였다.

그 외 시스템 경계 내 물질수지에 관한 전제 조건을 다음과 같다. 농산물은 원료물질 투입량과 제품생산량 간 질량 보존 법칙이 성립하지 않으므로 원료물질인 상추 종자와 종묘는 kg 기준으로 단위환산이 무의미하다고 판단하여, 농가 통용 단위인 L를 사용하였다. 영구 재사용이 가능한 농자재는 시설로 간주하여 환경영향을 고려하지 않았다. 농약병, 비료포대 등 농자재 포장에 대한 환경부하도 고려하지 않았다.

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

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

Table 2. General information of input energy.

Trial farm	Energy	Input spot	Input method	Tractor type (Power)
----- One cropping season -----				
Farm 1 (Conventional farming)	Diesel	Soil preparation	20 minutes (by tractor)	21HP (self-propelled machine)
	Diesel	Plowing	20 minutes (by tractor)	
	Electricity	Irrigation	Every fourth day (after planting)	
Farm 2 (Conventional farming)	Diesel	Soil preparation	15 minutes (by tractor)	Rotary-30HP Plough-25HP (self-propelled machine)
	Diesel	Plowing	15 minutes (by tractor)	
	Electricity	Irrigation	Twice a day (seedling), every fourth day (after planting)	
Farm 3 (Farming without agricultural chemical)	Diesel	Subsoiling	40 minutes (by tractor)	Subsoiling & Rotary-38HP Plowing-10HP (self-propelled machine)
	Diesel	Soil preparation	10 minutes (by tractor)	
	Diesel	Plowing	10 minutes (by tractor)	
Farm 4 (Organic farming)	Electricity	Irrigation	Twice a day (seedling), every fourth day (after planting)	35HP (self-propelled machine)
	Diesel	Soil preparation	20 minutes (by tractor)	
	Diesel	Plowing	20 minutes (by tractor)	
Farm 5 (Organic farming)	Electricity	Irrigation	Twice a day (seedling), every fifth day (after planting)	Rotary-35HP Plough-10HP (self-propelled machine)
	Diesel	Soil preparation	20 minutes (by tractor)	
	Diesel	Plowing	20 minutes (by tractor)	

Table 3. Comparison of lettuce productivity between cropping season.

Cropping season	Spring	Summer	Fall
Growth duration (Month)	Feb. ~May	May ~Aug.	Sep. ~Dec.
Frequencies of leaf harvesting	7~9	3~5	7~9
Yield (kg 10a ⁻¹)	4,410 (Farm 1)	1125 (Farm 1)	4,410 (Farm 1)
	4,310 (Farm 2)	1313 (Farm 2)	4,310 (Farm 2)
	2,910 (Farm 3)	960 (Farm 3)	2,910 (Farm 3)
	1,680 (Farm 4)	776 (Farm 4)	1,680 (Farm 4)
	3,680 (Farm 5)	1080 (Farm 5)	3,680 (Farm 5)

민감도 분석 및 시나리오 분석 민감도 분석은 전과정 목록분석 및 영향평가 단계에서 할당방법, 투입데이터의 불확실성 및 가정 등이 분석결과에 미치는 영향을 분석하는데 사용된다 (Ahn, 2005). 민감도 분석은 비료와 전기의 사용이 온실가스 발생에 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위하여 공적기여도를 각각 1로 하여 각각 사용량이 -40~40% 까지 10% 간격으로 변할 때의 환경부하의 변화량을 구하였다.

상추는 호랭성 작물이므로 봄·가을 작기와 여름 작기 생산량 차이가 매우 컸다 (Table 3). 본 연구는 가을에 상추를 재배하는 1작기를 기준으로 전과정평가를 수행하였다. 여름 작기와 가을 작기 탄소 성적 비교에 대한 시나리오 분석을 수행하였다. 이 때 계절별 투입·배출 물질의 차이는 크지 않으므로 다른 요소는 동일한 조건으로 수확량 차이만을 기준으로 분석하였다.

결과 및 고찰

전과정 목록분석 인벤토리 목록분석을 위한 데이터 수집결과 (GTG, gate-to-gate)를 기능단위인 시설상추 1 kg 생산하는데 투입되는 물질량 및 배출량을 산정하였다 (Table 4). 비료와 에너지가 상추 생산에 가장 높은 투입 비중을 차지하였고, 농약이 가장 낮은 투입 비중을 차지하는 물질이었다. 각 농가별 비료 투입량은 2.58E+02 (농가 1), 2.85E+02 (농가 2), 4.00E+02 (농가 3), 3.60E+02 (농가 4), 4.50E+02 kg kg⁻¹ lettuce (농가 5)이었다. 특히 투입물질 중 육묘단계가 없어 육묘용 관수에 의한 전기사용이 없었던 농가 1을 제외한 모든 농가에서 전기의 투입량이 가장 높게 나타났다. 각 농가별 전기투입량은 4.33E-01, 5.92E-01, 5.63E-01, 1.65E+00, 1.00E+00 kwh kg⁻¹ lettuce이었다. 상추 1 kg 생산하는데 영농작업 단계에서 포장에서 대기로 배출되는 직접 대기배출물 CO₂, CH₄, N₂O의 합은 농가별 각각 6.79E-03, 8.10E-03, 1.82E-02, 7.51E-02, 1.61E-02 kg kg⁻¹ lettuce이었다.

전과정 목록분석 결과 시설상추 1 kg 생산하는데 발생하는 온실가스 발생량은 CO₂가 배출량의 대부분을 차지하였고, 그 다음이 N₂O, CH₄ 순으로 나타났다. 농가별 CO₂ 배출

량은 각각 2.92E-01 (농가 1), 3.76E-01 (농가 2), 4.11E-01 (농가 3), 9.40E-01 (농가 4), 5.37E-01 kg CO₂ kg⁻¹ lettuce (농가 5)이었다. N₂O 배출량은 농가별로 각각 1.07E-04, 6.96E-04, 3.58E-04, 3.90E-04, 2.21E-04 kg N₂O kg⁻¹ lettuce이었다. CH₄의 발생량은 농가별로 각각 6.97E-04, 8.17E-04, 4.69E-04, 6.74E-04, 4.04E-04 kg CH₄ kg⁻¹ lettuce이었다.

상추 생산체계 전과정을 비료생산 공정, 농약생산 공정, 에너지생산 공정, 농자재생산 공정, 상추생산 공정, 폐기물처리 공정으로 구분하여 공정별 온실가스발생량을 분석하였다. 분석결과 CO₂는 에너지생산과정에서 발생하는 양이 가장 많았다. 유기농가 4, 5는 에너지 생산 공정이 이산화탄소 배출에 차지하는 비중이 높았고, 관행농가 1, 2는 에너지생산에 의한 배출비중이 유기농 보다 적었고 대신 복비생산에 의한 배출비중이 그 차이만큼 늘었다 (Fig. 2). CH₄은 유기질 비료만을 사용하는 농가 4, 5의 경우 에너지 생산에 의한 발생이 약 87%, 비료생산 공정 중 발생이 약 12.5%의 비중을 차지하였고, 단비 (요소)와 유기질비료를 사용한 농가 3은 에너지생산 공정이 43%, 비료생산 공정이 57%를 차지했다. 복합비료와 요소, 퇴비를 사용하는 농가 1, 2는 에너지생산에 의한 발생량이 약 24%이고 비료생산 공정이 약 76%였다. N₂O 역시 비료 투입형태별로 공정별 배출경향이 뚜렷한 차이를 보였다. 농가 4, 5는 비료생산에 의한 아산화질소 배출이 총 발생량의 64%를 차지하였고, 상추 재배 공정으로부터 약 35%의 배출량이 산정되었다. 무기질 비료 투입이 많아질수록 상추재배공정이 아산화질소 발생에 차지하는 비중이 높게 나타났는데, 이것은 유기질 비료보다 무기질비료가 비료 내 유효성분 즉, 질소함유량이 많기 때문으로 판단하였다.

비료 종류별 이산화탄소 발생량은 농가 1, 2 모두 요소생산에 의한 발생량이 각각 전체 공정 중 9%, 8%를 차지하였고, 퇴구비 생산이 각각 8%와 7%, 복비 생산이 각각 9%와 6%를 나타냈다. 현장수집 GTG 목록에 의하면 농가 1, 2가 모두 상추 1 kg 생산에 투입되는 비료량은 퇴비가 가장 많았고, 그다음이 복비, 요소였으나, LCI 분석 결과 비료생산 공정에서 발생하는 이산화탄소량은 요소가 가장 많았고 그

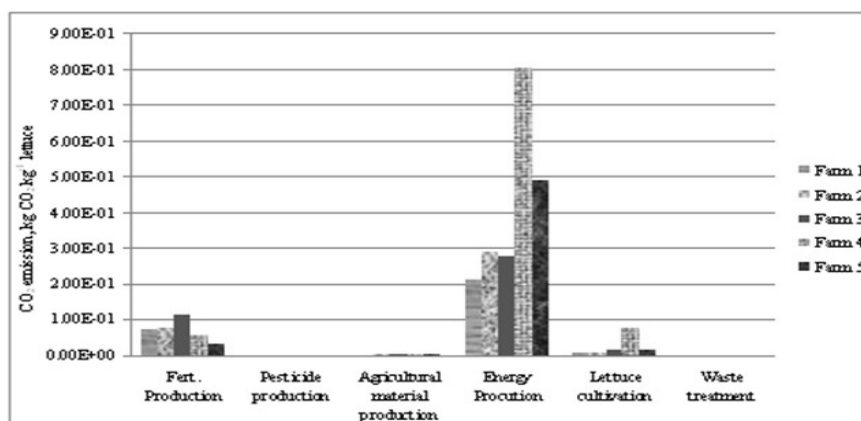


Fig. 2. CO₂ emission from lettuce production system.

Table 4. Data of input and output for LCI of lettuce production (GTG).

Input/Output	Unit	Quantity	Data source	Linked inventory DB
Farm 1				
Input		kg ⁻¹ product		
Seedling	hill	5.10E+00	Survey	
Composts	kg	4.24E-02	Survey	Ecoinvent (compost at plant)
Urea	kg	7.65E-03	Survey	Ecoinvent (urea, as N, at regional storehouse (46% N))
Compound fertilizers (21-17-17)	kg	1.53E-02	Survey, KFIA 2007	Ecoinvent, MKE [†] , ME [‡] (urea, ammonium sulphate, thomas meal, potassium sulphate, potassium chloride)
Pesticides	kg	1.36E-04	Survey	Ecoinvent (pesticide unspecified)
Electricity	kw	4.33E-01	Survey	MKE (electricity)
Fossil fuel	kg	2.19E-03	Survey	MKE (diesel)
Vinyl (LDPE)	kg	7.78E-04	Survey	MKE (HDPE)
Output				
Direct emissions (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O)	kg	6.79E-03	IPCC 1996	
Vinyl wastes	kg	1.98E-04	KWA, 2007 MIFAFF, 2004	MKE (waste LDPE Incineration, mixed Plastics Landfill0)
Product (lettuce)	kg	1.00E+00		
Farm 2				
Input		kg ⁻¹ product		
Seed	L	6.10E+00	Survey	
Composts	kg	4.83E-02	Survey	Ecoinvent (compost at plant)
Urea	kg	9.15E-03	Survey	Ecoinvent (urea, as N, at regional storehouse (46% N))
Compound fertilizers (21-17-17)	kg	1.57E-02	Survey, KFIA 2007	Ecoinvent, MKE, ME (urea, ammonium sulphate, thomas meal, potassium sulphate, potassium chloride)
Pesticides	kg	5.23E-05	Survey	Ecoinvent (pesticide unspecified)
Electricity	kw	5.92E-01	Survey	MKE (electricity)
Fossil fuel	kg	2.62E-03	Survey	MKE (diesel)
Vinyl (HDPE)	kg	7.97E-04	Survey	MKE (LDPE)
Vinyl (LDPE)	kg	3.98E-04	Survey	MKE (HDPE)
Output				
Direct emissions (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O)	kg	8.10E-03	IPCC 1996	
Vinyl wastes	kg	3.05E-04	KWA, 2007 MIFAFF, 2004	MKE (waste HDPE, LDPE Incineration, mixed Plastics Landfill0)
Product (lettuce)	kg	1.00E+00		

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

Table 4. Data of input and output for LCI of lettuce production (continued).

Input/Output	Unit	Quantity	Data source	Linked inventory DB
Farm 3				
Input		kg ⁻¹ product		
Seed	L	1.03E+01	Survey	
Composts	kg	1.10E-01	Survey	Ecoinvent (compost at plant)
Urea	kg	2.75E-02	Survey	Ecoinvent (urea, as N, at regional storehouse (46% N))
Electricity	kw	5.63E-01	Survey	MKE [†] (electricity)
Fossil feul	kg	5.91E-03	Survey	MKE (diesel)
Vinyl (HDPE)	kg	7.71E-04	Survey	MKE (LDPE)
Vinyl (LDPE)	kg	4.33E-04	Survey	MKE (HDPE)
Output				
Direct emissions (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O)	kg	1.82E-02	IPCC 1996	
Vinyl wastes	kg	3.07E-04	KWA, 2007 MIFAFF, 2004	MKE (waste HDPE, LDPE Incineration, mixed Plastics Landfill)
Product (lettuce)	kg	1.00E+00		
Farm 4				
Input		kg ⁻¹ product		
Seed	L	1.79E+01	Survey	
Organic fert.	kg	2.14E-01	Survey	Ecoinvent (soybean at plant)
Electricity	kw	1.65E+00	Survey	MKE (electricity)
Fossil feul	kg	2.46E-02	Survey	MKE (diesel)
Vinyl (HDPE)	kg	1.31E-03	Survey	MKE (LDPE)
Vinyl (LDPE)	kg	6.53E-04	Survey	MKE (HDPE)
Output				
Direct emissions (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O)	kg	7.51E-02	IPCC 1996	
Vinyl wastes	kg	8.40E-01	KWA, 2007 MIFAFF, 2004	MKE (waste HDPE, LDPE Incineration, mixed Plastics Landfill)
Product (lettuce)	kg	1.00E+00		
Farm 5				
Input		kg ⁻¹ product		
Seed	L	1.22E+01	Survey	
Organic fert.	kg	1.22E-01	Survey	Ecoinvent (soybean at plant)
Electricity	kw	1.00E+00	Survey	MKE (electricity)
Fossil feul	kg	5.27E-03	Survey	MKE (diesel)
Vinyl (HDPE)	kg	6.60E-04	Survey	MKE (LDPE)
Vinyl (LDPE)	kg	3.30E-04	Survey	MKE (HDPE)
Output				
Direct emissions (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O)	kg	1.61E-02	IPCC 1996	
Vinyl wastes	kg	2.52E-04	KWA, 2007 MIFAFF, 2004	MKE (waste HDPE, LDPE Incineration, mixed Plastics Landfill)
Product (lettuce)	kg	1.00E+00		

[†]MKE, Ministry of Knowledge Economy, Republic of Korea.

다음은 퇴비, 복비 순으로 나타났다. 요소와 유박을 투입하는 농가 3에서는 총 이산화탄소 발생량 중 요소생산 공정이 22%, 유박생산 공정이 7%의 점유율을 보였다. 유박만을 투입하는 농가 4, 5는 각각 7%와 6%의 발생 비중을 나타냈다 (Fig. 3).

비료종류별 메탄 발생 비율을 보면 농가 1, 2는 퇴구비 생산에서 각각 62%와 60%의 발생 비율을 보였고, 요소비료

생산 단계는 두 농가 모두 9%로 나타났고, 복합비료 생산은 각각 7%와 5%를 나타내었다. 이를 볼 때 메탄 발생의 주요 발생 요인은 퇴구비 생산으로 나타났다. 요소와 유박을 사용하는 농가 3의 경우 요소공정은 총 메탄발생량의 48%를 차지하였고, 유박공정에서 9%가 발생하였다. 농가 4, 5는 전체 공정 중 유박공정에서 발생하는 메탄 가스가 각각 13%와 12%였다 (Fig. 4).

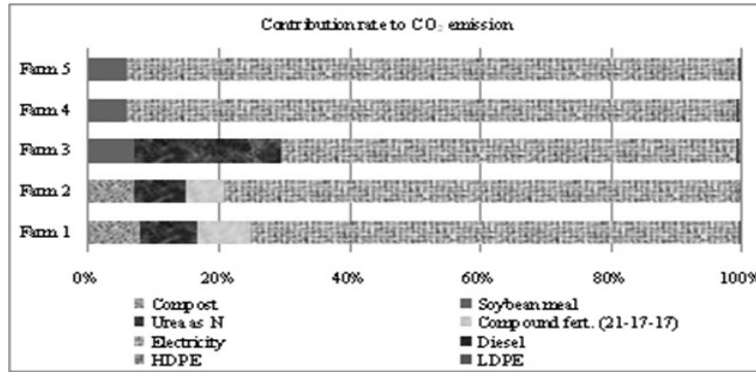


Fig. 3. Contribution rate of lettuce production process to CO₂ emission.

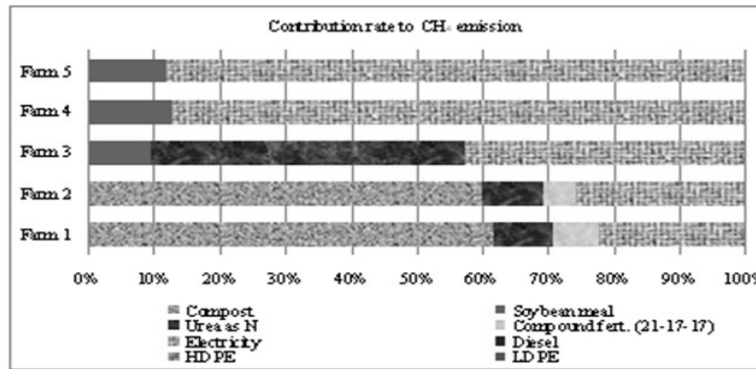


Fig. 4. Contribution rate of lettuce production process to CH₄ emission.

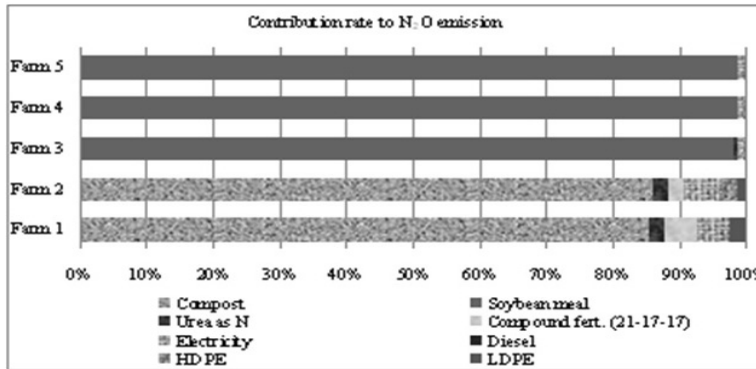


Fig. 5. Contribution rate of lettuce production process to N₂O emission.

아산화질소는 농가 1, 2에서는 퇴구비 생산에 의한 발생이 각각 85%와 86%였고, 요소생산 공정은 두 농가 모두 발생량 2%였고, 복비생산에서 각각 5%와 3%의 발생량을 보였다. 농가 3, 4, 5는 아산화질소 발생의 대부분이 유박생산 공정 중에 발생하는 것으로 나타났으며, 전체 발생량의 98~99%를 차지하였다 (Fig. 5).

사례분석한 농가 모두 상추생산 전체 공정 중 에너지(전기, 경유) 생산공정의 이산화탄소발생 비중이 가장 컸는데, 전기생산 공정에서 이산화탄소 발생이 그 원인이었다. 이산화탄소 발생에 대한 전기생산 공정의 비중은 농가 1, 2가 각각 74%와 79%였고, 농가 3이 70%였다. 농가 4, 5에서는 각각 93%와 94%를 나타내었다. 전기 생산으로 인한 이산화탄

소 발생량은 같은 에너지 투입요소인 경유에 비하여 10⁴ 정도 압도적인 우위를 보여 에너지 투입요소에 의한 발생량의 대부분을 차지하였다 (Fig. 2). 메탄 발생도 이산화탄소와 같이 경유생산에 의한 메탄 발생 비중은 미미하였고, 전기생산에 의한 발생이 대부분을 차지하였고, 전체 발생량에서 전기공정의 점유율이 농가별로 각각 22% (농가 1), 26% (농가 2), 43% (농가 3), 87% (농가 4), 88% (농가 5)였다 (Fig. 3). 아산화질소 발생도 에너지 투입요소(전기, 경유)에 의한 발생은 전기생산에 의한 발생이 대부분을 차지하였고, 전체 공정 중에서 전기공정에 의한 아산화질소 발생량 비중은 농가 1, 2가 각각 5%와 6%였고, 농가 3, 4, 5 모두 1%로 나타났다 (Fig. 5).

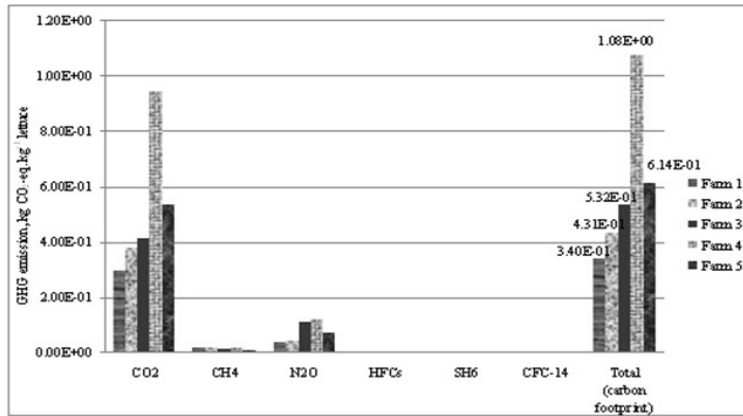


Fig. 6. Carbon footprint of lettuce production system calculated by LCIA (Life Cycle Inventory Analysis).

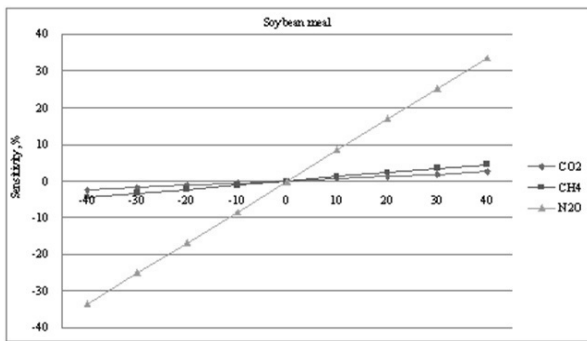


Fig. 7. Mean of sensitivity analysis on soybean meal input.

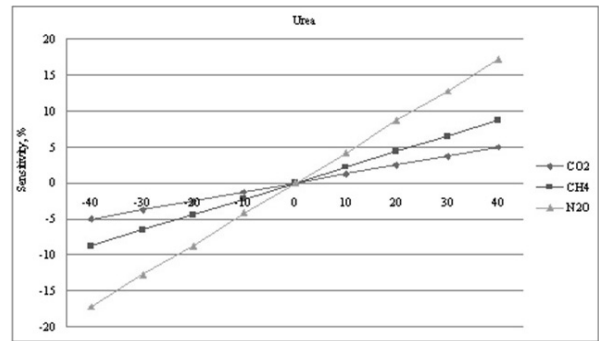


Fig. 8. Mean of sensitivity analysis on urea input.

농자재 (LDPE, HDPE)의 경우 GHG 발생량이 극히 미미하였다. 상추 1 kg 당 투입량은 하우스용 비닐 (LDPE)이 모든 농가에서 다소 많은 값을 나타냈으나, GHG 발생량은 HDPE 공정이 많았다. HDPE 생산이 LDPE 생산 공정보다 이산화탄소, 메탄, 아산화질소 발생량이 약 10~20% 많았고 모든 농가가 유사한 경향을 나타냈다.

전과정 목록분석으로 산정된 각 온난화 가스 발생량을 CO₂-eq.로 환산하여 탄소 성적 값을 계산하였다 (Fig. 6). 시설 상추 생산체계의 탄소 성적 값은 농가별로 각각 3.40E-01 (농가 1), 4.31E-01 (농가 2), 5.32E-01 (농가 3), 1.08E+00 (농가 4), 6.14E-01 (농가 5) kg CO₂-eq. kg⁻¹ lettuce였다. 이 중 CO₂가 탄소 성적에 차지하는 비중은 농가 1, 2는 각각 86%, 87%였고, 농가 3은 77%, 농가 4, 5는 88%였다. CH₄의 비중은 농가 1, 2는 4%, 농가 3은 2%, 농가 4, 5는 1%였다. N₂O는 농가 1, 2에서는 각각 10%, 9%의 비중을 나타냈고, 농가 3은 21%, 농가 4, 5는 11%로 나타났다. 복비를 사용하는 농가 1, 2는 복비생산 중 발생하는 CH₄의 영향으로 탄소 성적에서 CH₄가 차지하는 비중이 다른 농가에 비하여 다소 높게 나타났다. 농가 3의 경우 N₂O가 차지하는 비중이 높게 나타났는데 이는 요소비료 투입이 농가 3에서 가장 많았기 때문이다. 그러므로 포장에서 질소 비료 사용에 의하여 발생하는 아산화질소 발생은 요소비료 사용에 의한 영향이 다른 비료에 비하여 클 것으로 판단되었다. 이것은 뉴질랜드

사과생산체계에서 투입되는 질소비료종류 중 요소비료 투입에 의한 아산화질소 발생에 가장 큰 기여도를 보인 연구 결과 (Mià i Canals et al., 2006)와 같았다.

민감도 분석 민감도 분석은 수집된 자료의 투입량 조사에서 발생하는 불확실성이 결과에 미치는 정도를 알아보기 위해 수행하였다. 본 연구에서는 목록분석 결과 상추생산체계에서 가장 큰 환경부하 요인으로 나타났으므로, 비료 투입과 전기 투입량의 변화가 온실가스 (CO₂, CH₄, N₂O) 발생량 변화에 어느 정도 영향을 주는지 알아보았다.

유박사용량 변화에 따른 온실가스별 민감도 경향을 Fig. 7에 나타내었다. 유박 투입농가 3, 4, 5의 민감도 분석결과 사용량 변화에 따라 아산화질소 발생량이 가장 민감하게 변화하였다. 이것은 유박을 사용한 토양에서의 아산화질소 발생으로 이산화탄소와 메탄 발생보다 유박 사용량 변화의 민감도 분석에서 가장 큰 영향을 주었기 때문으로 판단하였다. 이산화탄소와 메탄 발생량 변화율은 매우 미미하였다. 이것을 시나리오 분석으로 해석하면, 유박사용량을 10% 줄이면 아산화질소 발생량이 약 8.5% 정도 감소할 것으로 예상되었다. 또한, 유박 사용량을 10% 줄일 때 메탄발생량은 약 1.2% 이산화탄소는 0.6% 줄일 수 있을 것으로 예상되었다.

요소를 사용하는 농가 1, 2 3을 대상으로 요소사용량에 대한 민감도를 분석한 결과 아산화질소의 민감도가 가장 높

게 나타났고, 그 다음이 메탄, 이산화탄소로 나타났다. 농가별 요소사용량 변화에 대한 각 온실가스별 민감도 경향은 모두 같았다. 요소의 민감도 분석에서도 요소 사용량 변화에 의한 토양에서 배출되는 아산화질소 발생량 변화가 민감도에 가장 큰 영향을 준 것으로 판단되었다. 유박 민감도와 비교하면 아산화질소는 요소 사용량 변화에 대한 민감도가 유박의 1/2 정도로 낮았고 반면, 메탄의 민감도는 요소사용이 유박에 비하여 2배 정도 높았다. 분석결과 요소 사용량을 10% 줄이면 아산화질소는 약 4.1%, 메탄 2.1%, 이산화탄소 1.2% 감소 효과를 볼 수 있을 것으로 나타났다 (Fig 8).

퇴비 사용량 변화에 대상 농가 1, 2의 온실가스발생량 변화는 메탄이 가장 높았고, 다음이 아산화질소였고, 이산화탄소 발생 변화율이 가장 낮았다 (Fig. 9). 요소나, 유박에

비하여 퇴비 사용량 변화에 대한 민감도 값이 작았다. 농가별 민감도 경향은 모두 같았고, 메탄발생량의 민감도가 가장 높게 나타난 것은 퇴비 생산 공정 중 부숙 과정에서 발생하는 메탄 발생이 매우 많으므로 이것이 민감도 분석에 가장 큰 영향을 주었기 때문으로 판단되었다 (Amlinger et al., 2008). 분석결과 퇴비사용을 10% 줄였을 때, 메탄발생량은 약 6%, 아산화질소 약 3.5%, 이산화탄소 0.7% 감소효과가 나타났다.

복비를 사용하는 대상 농가 1, 2의 민감도 분석결과를 Fig. 10에 나타내었다. 분석된 4가지 비료 중에서 복합비료의 민감도가 가장 낮았다. 분석결과 농가별 경향은 모두 같았고, 아산화질소의 민감도가 가장 높았고, 메탄과 이산화탄소의 민감도는 거의 같은 값을 나타냈다. 아산화질소의 민감도가 가장 높게 나타난 것은 복비 사용량 변화에 따른 토양에서의 아산화질소 직접배출량 변화가 가장 큰 요인일 것으로 판단되었다 (Peterson et al., 2006). 또한 복비투입을 10% 줄이면 실험 농가의 상추생산체계에서 아산화질소 발생량이 약 1.9%, 메탄이 0.6%, 이산화탄소가 0.7% 줄어드는 것으로 분석되었다.

전기 사용량 변화에 따른 민감도 값은 이산화탄소가 가장 높았고, 다음이 메탄이었고, 아산화질소는 민감도가 0에 가까워 전기 사용에 의한 아산화질소 발생은 거의 영향이 없었다. 이것은 목록분석결과 전기 생산 공정에서 이산화탄

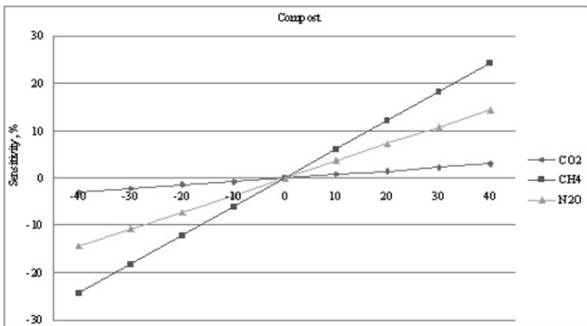


Fig. 9. Mean of sensitivity analysis on compost input.

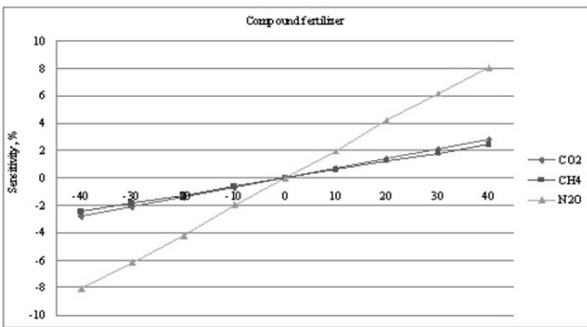


Fig. 10. Mean of sensitivity analysis on compound fertilizer input.

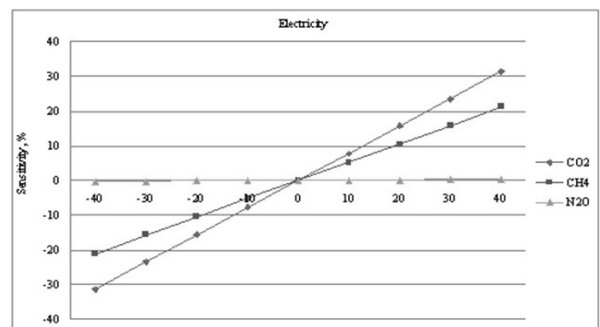


Fig. 11. Mean of sensitivity analysis on electricity input.

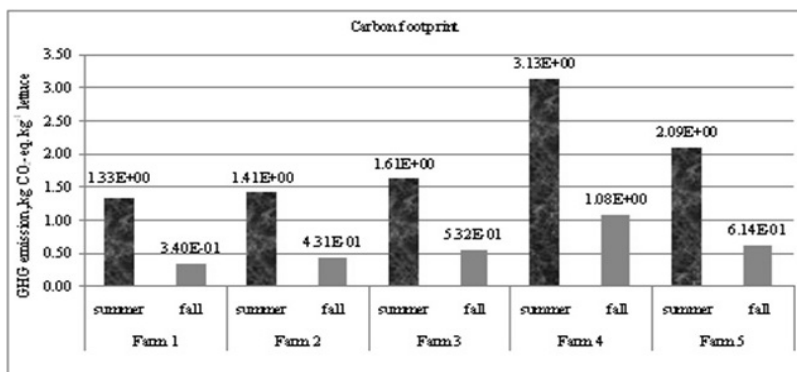


Fig. 12. Comparison of carbon footprint on lettuce production system in summer and fall cropping season.

소가 메탄 발생에 비하여 약 1,000배 이상 매우 많은 배출량을 보였고, 아산화질소는 거의 발생하지 않았던 결과와 일치하였다. 다섯 농가 모두 같은 경향의 민감도를 나타냈고, 아산화질소를 제외한 메탄과 아산화탄소 발생량만 보면, 전기 사용에 대한 민감도가 비료 사용에 대한 민감도보다 높은 값을 나타내었다. 본 연구에서 수집된 전기사용량은 관수를 위한 전기 동력 사용량이었다. 그러므로 관수시스템 개선으로 인한 배출량 감소의 기여가 클 것으로 예상되었다. 분석결과 전력 수요를 10% 줄인다면 아산화탄소는 7.8%, 메탄은 5.2%, 아산화질소 0.1%의 배출량 감소가 산정되었다 (Fig. 11).

상추 재배에서 여름 작기에 대한 탄소 성적 시나리오 분석결과를 가을 작기와 비교하여 Fig. 12에 나타냈다. 상추를 여름에 수확할 때 생산량이 봄이나 가을에 비하여 약 1/2~1/3 정도 작았고, 이에 따라 탄소성적도 30~40배 높은 값을 보였다. 전과정평가를 할 때, 평가의 기준이 상추 1 kg 생산할 때 배출하는 탄소성적이므로 생산성 효율은 매우 중요한 탄소 배출량 감소의 요인이다. 그러므로 상추처럼 연중 재배되며, 계절별 생산성 편차가 심한 작물을 전과정평가 할 때는 작기 별 구분과 함께 연중 평균치에 대한 고려가 필요할 것으로 판단되었다.

한계 및 개선점 사례분석을 기초로 하는 bottom-up 방식으로 전과정평가를 수행한 본 연구에서는 전기 생산 공정이 가장 큰 부하 요인으로 나타났다. 또한 전기 생산에 의한 온실가스 발생량은 우리나라 전체 온실가스 발생량의 31%를 차지하여 단일공정으로는 탄소배출에 가장 큰 기여도를 보인다. 그러므로 투입물질 종류가 단순하고, 전기 투입 비중이 큰 조건에서는 본 사례연구와 같이 전기 생산에 의한 기여가 매우 크게 나타나는 경향을 나타낼 수 있을 것으로 판단되었다. 독일 시설원에 생산 전과정평가에서는 연료 연소에 의한 CO₂ 발생으로 인한 온난화 범주의 기여도가 가장 높게 나타났으나, 네덜란드 전체 농업을 대상으로 전과정 수행하였을 때는 LCA의 평가대상인 농업분야와 농업 생산을 위한 상위 흐름에 포함되는 자재투입 단계의 산업 생산 분야의 기여도 비율이 9:1이었다 (Pluimers et al., 2000). 이것은 시스템 경계와 평가 대상의 규모 설정에 따라서 평가대상과 상·하위 흐름 생산공정 단계의 환경부하 기여도가 변화할 수 있음을 의미한다. 그러므로 연구의 목적과 범위에 맞는 시스템경계의 설정과 평가대상의 선정이 평가의 정확도에 매우 중요한 요인이 될 것으로 판단되었다.

1 kg의 동일 생산량 단위로 부하량을 평가했을 때, 유기농보다 관행농에서 상추 생산효율이 높으므로 농가별 전과정 목록분석 결과는 GHG 배출량은 유기농이 많았고, 친환경(무농약 인증)농과 관행농이 낮았다. 이처럼 투입물질이 단순하고 생산량 차이가 많은 다소 극적인 조건의 수집 자

료로부터 전과정평가 결론을 도출하기에는 한계가 있었다. 특히 에너지 투입량은 작부 유형별 특성보다는 사용자의 농업 행태에 의한 영향에 직접적 영향을 받는다. 그러므로 농업 생산형태가 상추 생산체제와 같이 투입물질이 적고, 재배기간이 짧아서 작부형태에 따른 투입량 차이가 크게 나타나지 않는 작물의 생산체제는 농작업 수행방법과 생산 효율성이 환경성 평가에 영향을 많이 줄 수 있는 것으로 나타났다. 그러므로 추후 계절별 투입량 변화에 의한 환경성 평가와 대상 농가의 확대를 통한 보다 정확한 bottom-up 데이터 구축 및 산정에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

노지 및 시설재배 고추에 대한 전과정평가 결과 시설재배에서 가장 큰 에너지 투입요소가 겨울 난방이었다 (Park et al. 2010). 물론 작물별 가온형태는 차이가 있으나, 작물의 재배기간이 짧고, 연작하는 시설재배 작물의 경우 계절적 요인을 고려한 투입-배출물의 산정에 대한 자료 수집과 구축이 필요하며, 이를 위하여 각 작물의 생산지별 온도관리 자료와 냉난방 에너지 투입량 등에 대한 조사가 이루어져야 할 것이다.

요 약

남양주의 실제 상추재배 농가를 대상으로 전과정평가를 적용하여 bottom-up 방식의 사례분석을 수행하였다. 사례분석을 위하여 현장을 방문하여 청취 조사를 하였고, 대상 농가는 유기농가 2곳, 무농약 인증 농가 1곳, 관행농가 2곳이었다. 현장자료 수집과 산정에서 데이터 값의 오차범위가 넓어지는 것을 고려하여 추가의 냉난방이 없는 가을 1 작기를 기준으로 평가하였고, 민감도 분석과 시나리오 분석을 추가하였다. 전과정 목록분석과 영향평가는 'PASS(4.1.3)' 소프트웨어를 사용하였다.

GTG 목록작성 결과 상추 1 kg 생산하는데 투입되는 물질 중 비료와 에너지 투입이 가장 높은 비중을 차지하였고, 농약이 가장 작은 값을 나타냈다. 특히 육묘단계가 없었던 농가 1을 제외한 모든 농가에서 전기의 투입량이 가장 높게 나타났다. 상추 1 kg 생산하는데 영농작업으로 말미암아 포장에서 직접 배출되는 CO₂, CH₄, N₂O는 각각 6.79E-03 (농가 1), 8.10E-03 (농가 2), 1.82E-02 (농가 3), 7.51E-02 (농가 4), 1.61E-02 (농가 5) kg kg⁻¹ lettuce이었다.

전과정 목록분석 결과 시설 상추 1 kg 생산하는데 발생하는 온실가스 발생량은 CO₂가 배출량 대부분을 차지하였고, 그 다음이 N₂O, CH₄ 순으로 나타났다. 농가별 CO₂ 배출량은 각각 2.92E-01 (농가 1), 3.76E-01 (농가 2), 4.11E-01 (농가 3), 9.40E-01 (농가 4), 5.37E-01 kg CO₂ kg⁻¹ lettuce (농가 5)이었다. 공정별 온실가스 발생량을 분석한 결과, CO₂는 에너지생산 과정에서 발생하는 양이 가장 많았다. 관행농은 에너지생산에 의한 배출 비중이 유기농보다 적었고

대신 복비 생산에 의한 CO₂ 배출 비중이 그 차이만큼 늘었다. 또한, 무기질 비료 투입이 많아질수록 아산화질소 발생에서 상추재배 공정이 차지하는 비중이 높게 나타났는데 농가 1, 2는 87%, 농가 3은 64%를 나타냈다.

시설 상추 생산체계의 탄소성적 값은 농가별로 각각 3.40E-01 (농가 1), 4.31E-01 (농가 2), 5.32E-01 (농가 3), 1.08E+00 (농가 4), 6.14E-01 (농가 5) kg CO₂-eq. kg⁻¹ lettuce였다.

민감도 분석 결과 유기질 비료 민감도가 무기질 비료 민감도 보다 높았고, 이 중 유박의 민감도가 가장 높았고, 복합비료의 민감도가 가장 낮았다. 또한, 온실가스 변화량 중 아산화질소 발생량이 가장 민감하게 변화하였다. 전기 사용량 변화에 따른 민감도 분석은 이산화탄소의 민감도가 가장 높았고, 다음이 메탄이었고, 아산화질소는 민감도가 0에 가까웠다. 따라서 시설재배 상추생산에서 탄소배출량 감소를 위하여 질소비료 종류와 시비방법 및 시설내 전기사용에 대한 합리적 영농법에 대한 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

상추 재배에서 여름 작기에 대한 탄소 성적 시나리오 분석결과 생산량이 봄이나 가을에 비하여 약 1/2~1/3정도 작았고, 이에 따라 탄소성적도 30~40배 높은 값을 보였다.

사 사

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

인 용 문 헌

- Ahn, S.J. 2005. Stochastic analysis for uncertainty of life cycle assessment with Monte-Carlo simulation. M.S. University of Ajou, Korea. pp. 7-9, 29-30.
- Amlinger, F., S. Peyr, and C. Cuhls. 2008. Greenhouse gas emission from composting and mechanical biological treatment, *Waste Manage Res* 26(1):47-60.
- de Boer, I.J.M. 2003. Environmental impact assessment of conventional and organic milk production. *Livestock Production Science* 80:69-77.
- Hanegraaf, M.C., E.E. Biewinga, and G. van der Bul. 1998. Assessing the ecological and economic sustainability of energy crops. *Biomass and Bioenergy* 15(4/5):345-355.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1996. IPCC Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories.
- KFIA (Korea Fertilizer Industry Association). 2007. fertilizer production data. Korea Fertilizer Industry Association. Seoul, Korea.
- KWA (Korea Waste Association). 2007. Agricultural waste data. Korea Waste Association. Seoul, Korea.
- MAFF (Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries). 2003. Development of Life Cycle Assessment methodology for environment impact assessment. National Institute for Agro-Environmental Sciences, Japan.
- Mià i Canals, L., G.M. Burnip, and S.J. Cowell. 2006. Evaluation of the environmental impact of apple production using life cycle assessment: case study in New Zealand. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 114:226-238.
- 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.
- MKE (Ministry of Knowledge Economy). Software program PASS v4.1.
- NAIS (Namyangju-si Agricultural Technology Center). 2009. The status of local agriculture. <http://www.nais.or.kr>
- Park, J.A., S.C. Jung, J.H. Huh, K.H. So, and K.A. Roh. 2010. Life Cycle Assessment for open field and greenhouse peppers. *Journal of the Korean society for life cycle assessment* 11(1):91-102.
- Peterson, S.O., K. Regina, A. Pöllinger, E. Rigler, L. Valli, S. Yamulki, M. Esala, C. Fabbri, E. Syäsalo, and F.P. Vinther. 2006. Nitrous oxide emissions from organic and conventional crop rotation in five European countries. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 112:200-206.
- Pluimers, J.C., C. Kroeze, E.J. Bakker, H. Challa, and L. Hordijk. 2000. Quantifying the environmental impact of production in agriculture and horticulture in The Netherlands: which emissions do we need to consider? *Agricultural Systems* 66:167-189.
- RDA (Rural Development Administration). 2009. Rice cropping technology for greenhouse gas reduction. National Institute of Animal Science. pp. 11.
- Shin, S.M. 2008. Life cycle assessment and improvement of green-roof considering materials for maintenance. master's thesis, KAIST, Korea. pp. 19, 28-30, 40-41.
- Simapro software v7.2, ecoinvent process system.
- So, K.H., J.A. Park, G.Z. Lee, K.M. Shim, J.H. Ryu, and K.A. Roh. 2010. Estimation of Carbon Emission and Application of LCA (Life Cycle Assessment) from Rice (*Oryza sativa* L.) Production System. *Korean J. Soil. Sci.* 43(5):716-721.
- So, K.H., J.A. Park, J.H. Huh, K.M. Shim, J.H. Ryu, G.Y. Kim, H.C. Cheol, and D.B. Lee. 2010. Estimation of Carbon Emission and LCA (Life Cycle Assessment) from Pepper (*Capsicum annuum* L.) Production System. *Korean J. Soil. Sci.* 43(6): 904-910.