

전과정평가를 통한 시설작물의 온실가스배출량 산정연구* -오이, 토마토, 파프리카를 중심으로-

김태훈** · 윤성이***

Life Cycle Assessment (LCA) for Claculation of the Greenhouse Gas Emission Amount of Facility House -With Cucumber, Tomato, Paprika-

Kim, Tae-Hoon · Yoon, Sung-Yee

Climate change is rapidly getting worse. In Korea, the average temperature has increased by 1.5°C over the last 100 years. In terms of global warming, it causes regional climate change, extreme weather phenomena and change of cultivated area. moreover, Global Warming brings both direct and indirect damage to agricultural cultivation. Global warming was accelerated by the greenhouse gas emissions which is by industry. In addition, Greenhouse gas emissions are increasing. In agriculture Thus we need to figure out how to analyze and to reduce greenhouse gas emissions and its cause. This study assumes that it is the introduction of the bio-energy using compost to facility house and it analyzes that there is the difference between in the future in utilizing compost due to the introduction of bio-energy facility houses; Environmental effect and Environmental effect which are generally used. This research is a previous step for resource-circulating, farming, utilizing a variety of by-products of the agricultural sector as an environmental assessment studies for the future completion of resource-circulating agriculture.

Key words : *agriculture, facility house, life cycle assessment, fossil fuel*

* 이 논문은 농림부 “지역단위 농산부산물을 활용한 바이오매스 청정에너지 농업시스템 개발 및 실증”에 의하여 이루어졌음.

** 동국대학교 식품산업시스템전공

*** Corresponding author, 동국대학교 식품산업관리학과(syoon@dongguk.edu)

I. 서 론

지난 100년동안 지구의 평균기온은 0.74°C 상승하였고(IPCC, 2007), 같은 기간 동안 우리나라도 기온이 1.7°C 상승하였다. 이러한 세계적인 기후변화는 점점 가속화되고 있으며 극심한 기상변화와 기상재해의 발생빈도 및 그 규모가 확대되고 있다. 무엇보다 농업은 타 산업에 비해 기후에 의해 직·간접적인 영향을 많이 받으며 기상재해로 인한 농산물의 피해는 농가 및 농업인의 소득에 직접적인 타격을 가져오기 때문에 농민들은 동절기 기온에 상당히 예민할 수밖에 없다.

우리나라에서는 동절기 시설하우스 적정온도 유지에 대한 연구들이 대부분 시설이나 농자재를 개발하여 보온성을 높이는 것에 초점이 맞추어져 있다. 하지만 시설이나 농자재의 개발과 개량을 통한 연구들은 열에너지의 손실을 최소한으로 하는 것에 초점이 맞추어져 있기 때문에 시설하우스의 온실가스배출량을 감축하는 것에는 한계가 존재한다. 때문에 지금도 국내외의 전문가들이 농업에서 발생하는 온실가스를 감축하기 위한 연구를 진행하고 있으며, 유럽과 같은 선진국에서는 이미 바이오매스를 통한 지속가능한 농업방식이 시행되고 있다. 하지만 국내에서는 유기농자재(Yoon and Yang, 2012; Yoon and Son), 유기질비료(Yoon and Kwon, 2011), 마늘(Yoon et al., 2012), 무경운재배 고추(Lee et al., 2012) 등의 농작물, 농자재와 같은 몇몇 품종과 농자재에 국한되어 있어 유럽과 비교해 봤을 때 아직도 걸음마 단계이다. 국내외의 사례를 비교할 때, 국내농업의 온실가스를 감축하기 위한 연구들이 시급한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 다음과 같은 연구들을 진행하고자 한다. 첫째, 겨울철 중부지방의 시설하우스를 대상으로 1년 동안 주요 시설작물(토마토, 오이, 파프리카) 1kg 생산에 투입되는 요소들을 조사하고, 조사한 자료를 통해 전과정평가를 진행하여 온실가스배출량을 산정하고자 한다. 둘째, 본 연구는 축분을 활용한 바이오에너지를 시설하우스에 도입하려는 것을 전제로 향후 축분을 활용한 바이오에너지 도입에 따른 시설작물의 환경성과 현재 일반적으로 사용되고 있는 시설작물의 환경성을 비교분석하고, 농업부문의 다양한 부산물을 활용한 자원순환형 농업을 위한 전단계를 연구하고자 한다.

또한 유통 및 소비단계를 제외한 시설하우스 제작단계와 생산(재배 및 수확)단계를 대상으로 별도의 제외 기준을 설정하지 않고 작물별 1kg 생산에 투입되는 원료(종묘), 보조물질(유기질비료, 무기질비료, 농약), 에너지, 농자재 등 모든 투입물과 산출물로서 제품인 시설작물과 대기배출물의 온실가스배출량을 산정하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상

본 연구에서는 시설하우스의 제작에서부터 국내의 시설작물 중 오이, 토마토, 파프리카를 대상으로 작물별 1kg을 생산하는 과정의 온실가스배출량 산정과 전과정평가를 수행하고자 한다. 국내의 중부지방(안성, 평택, 화성)에 위치한 농가들을 대상으로 2012년 1월부터 12월까지 1년간 사용된 모든 투입물(농자재, 에너지 등)을 대상으로 사례조사를 진행하였고, 직접조사에서 얻을 수 없었던 자료는 농촌진흥청 사이트에 있는 2012년 소득자료집을 참고하였다. 직·간접적으로 얻은 자료에 의거해 작물 1kg을 생산하는데 배출되는 온실가스를 지식경제부 산하 한국인정원에서 개발한 소프트웨어(PASS 4.1.1)를 이용하여 분석하였다.

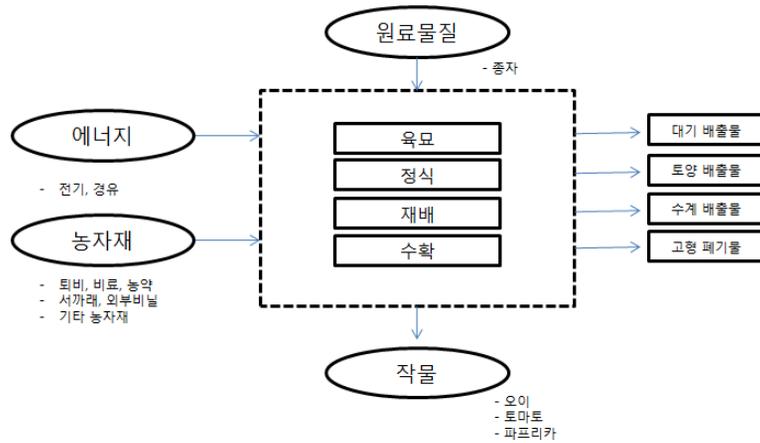
2. 온실가스배출량 평가 방법

전과정평가(LCA)의 연구방식은 국제표준화 기구인 ISO-14040s에서 정의되고 있으며 대상시스템의 모든 과정에 걸쳐서 소모되는 자원과 발생되는 배출물의 양을 정량화하여, 이로 인한 잠재적인 환경영향을 종합적으로 평가하는 환경성평가 방법론이다.

1) 시스템 경계

전과정평가는 제품의 제조부터 폐기까지의 모든 과정을 포함하지만 본 연구에서는 원료물질인 종자, 종묘를 투입하여 최종생산단계에서 작물 1kg을 수확하는 과정까지를 시스템 경계로 규정하였다. 폐기물부분에서는 투입되는 모든 투입물(화석연료, 전기 등 에너지와 농약, 비료, 농기계, 농자재 등)의 투입으로 인하여 발생하는 온실가스와 같은 대기배출물, 수계배출물, 토양배출물, 고형폐기물 등과 같은 모든 폐기물을 다루어야 하지만 온실가스 배출과 관련한 본 연구에서는 대기 배출물 부분을 제외한 다른 배출물은 다루지 않기로 규정하였다.

또한 본 연구에서 동절기 시설작물의 난방에 사용되는 에너지 및 온실가스배출에 대한 연구를 다루지만 설문조사를 통한 농가들의 직접조사로 데이터를 수집하였고, 경유와 전기의 경우 농협과 한국전력공사에서 특정 기간 동안의 총 사용량과 같은 포괄적인 데이터밖에 얻을 수 없는 한계가 존재하여 난방용 에너지와 농기계용 에너지의 구분을 따로 하지 못하였다.



〈그림 1〉 작물별 공정과정

2) 적용배출계수

농자재 투입량에 따른 온실가스 배출량 산출에 적용된 배출계수는 농촌진흥청의 ‘농식품 부문 탄소이력추적 기반구축 연구’ PJ0072622012)의 연구 성과 및 관련연구(So et al., 2010; Jung et al., 2011)에 근거하여 적용되었으며, 유류의 제조 및 사용관련 배출계수는 IPCC (2006) 가이드라인(Table 1), 비닐 등 기타 화학제품 등은 지경부 및 환경부의 LCI(Life Cycle Inventory) DB를 적용하였다.

Table 1. Conversion coefficient and Carbon emission coefficient of energy

	Classification	Conversion coefficient	Unit	Emission coefficient by energy production (kg CO ₂ /kg)	Emission coefficient by energy use (kg CO ₂ /L or Nm ³ or kg)
Energy	Diesel oil	0.860	kg/L	0.068	2.67
	Kerosene	0.840	kg/L	0.253	2.52
	Heavy oil	0.950	kg/L	0.325	3.04
	Volatile oil	0.750	kg/L	0.083	2.2
	LPG	0.579	kg/L	0.596	3.65
	LNG	0.805	kg/m ³	0.595	2.58
	Briquette	3.750	kg/장	0.480	1.91
	Electricity	-	kg/kWh	0.495	-

* IPCC (2006)

3) 주요 배출원의 온실가스 배출량 계산식

작물을 위한 주요 투입물의 온실가스배출량 계산 및 재배활동에 따른 토양의 온실 가스 배출은 다음의 수식에 의해서 계산된다.

(1) 비료의 온실가스배출량

작물 재배시 사용된 비료의 온실가스 배출량은 비료사용량 및 비료사용에 따른 탄소배출계수에 의해서 계산된다(수식 (1)). 비료의 탄소배출량 산출은 해당 비료의 제조 및 원료 채취에 따르는 온실가스 배출이 포함되며, 해당계수는 비료의 종류에 따라 각각 다르다.

$$F_{i-Production} = \sum_i (M_i \times E_i) \tag{1}$$

$F_{i-Production}$: 비료 i의 생산 시 발생하는 온실가스 배출량(kgCO₂)

M_i : 비료 i의 사용량(kg)

E_i : 비료 i의 탄소배출계수(kgCO₂/kg)

(2) 농약의 온실가스배출량

사용된 농약의 온실가스 배출량은 농약사용량, 해당 농약의 유효성분 함유율(%), 해당 유효 성분의 탄소배출계수에 의해서 산출된다(수식 (2)). 농약의 탄소배출계수는 해당 농약의 제조 및 원료채취에 따르는 온실가스배출량을 포함하고 있으며, 배출계수는 농약의 유효성분에 따라 서로 다르다. 또한 농약의 경우 제품의 다양성으로 인하여 사용된 제품의 유효성분에 따라 서로 다르다. 또한 농약의 경우 제품의 다양성으로 인하여 사용된 제품의 유효성분 함유율을 분석하기 어려운 경우가 많기 때문에 이러한 경우에는 농약의 분류에 따라 평균 유효성분 함유율 및 배출계수를 적용하여 온실가스 배출량을 구한다.

$$P_{i-Production} = \sum_{ij} (M_i \times AI_{ij} \times E_i) \tag{2}$$

$P_{i-Production}$: 농약 i의 생산 시 발생하는 온실가스 배출량(kgCO₂)

M_i : 농약 i의 사용량(kg)

AI_{ij} : 농약 i의 탄소배출계수(kgCO₂/kg, 살균제, 살충제, 제초제)

(3) 기타 농자재의 온실가스배출량

비닐, 비닐끈 및 시설하우스 제작에 필요한 철재 등 기타농자재의 온실가스 배출량은 농

자재의 사용량, 해당농자재의 단위환산 계수 및 탄소배출계수에 의해서 산출된다(수식 (3)). 해당 농자재의 단위환산 계수는 농자재 사용단위를 kg단위로 변환시키기 위한 계수로 해당 농자재의 밀도 등을 고려하여 작성된다. 본 연구에 사용된 농자재의 단위환산 계수는 각각 멀칭비닐은 0.00925(kg/m), 비닐끈은 1.5(kg/타) 등이 사용되었으나, 해당 농자재의 사용무게(kg)를 알 수 있는 경우에는 농자재 사용량에 이를 직접 대입하여 계산하여도 무관하다.

$$A_{i-Production} = \sum_i (M_i \times C_i \times E_i) \quad (3)$$

$A_{i-Production}$: 기타 농자재 i의 생산 시 발생하는 온실가스 배출량(kgCO₂)

M_i : 농자재 i의 사용량(kg)

C_i : 농자재 i의 단위환산계수

E_i : 농자재 i의 탄소배출계수(kgCO₂/kg)

(4) 에너지 생산 및 사용단계에 따른 온실가스 배출량

화석연료의 경우 온실가스배출은 에너지 생산단계뿐만 아니라 사용단계에서도 온실가스 배출이 이루어진다. 때문에 전기를 제외한 화석연료 에너지는 생산단계의 배출계수와 사용단계의 배출계수를 구분하여 적용한다(수식 (4)). 전기에너지는 사용단계의 온실가스배출이 없으므로 생산단계의 온실가스배출만을 평가한다.

$$En_i = \sum_i [(M_i \times C_i \times E_{i-Production}) + (M_i \times C_i \times E_{i-Use})] \quad (4)$$

En_i : 에너지 i의 생산 및 사용 시 발생하는 온실가스 배출량(kgCO₂)

M_i : 에너지 i의 사용량(L or M³ or kWh)

C_i : 에너지 i의 단위환산계수(부속서 D 참조)

$E_{i-Production}$: 에너지 I의 생산 탄소배출계수(kgCO₂/kg or kWh)

E_{i-Use} : 에너지 i의 사용 탄소배출계수(kgCO₂/kg)

(5) 질소비료 시비에 따른 토양 아산화질소(N₂O) 배출량

비료 시비로 인하여 인위적인 질소성분이 토양으로 투입되게 되면 토양미생물의 작용에 의하여 아산화질소(N₂O)가 배출되며, 인위적 요인에 의한 토양에서의 아산화질소 발생은 온실가스 배출로 평가된다. 토양의 아산화질소 배출은 비료사용량, 질소성분 함유율, 건중

량, 토양배출계수, 지구온난화지수를 고려하여 산출된다. 질소시비로 인한 토양의 아산화질소 배출계수는 유기비료의 경우 0.018(kgN₂O/kg). 무기비료의 경우 0.019(kgN₂O/kg)를 차등 적용하여 산출한다(수식 (5)).

$$S_{N_2O} = \sum_i (1.5714 \times M_{i-Fert} \times AI_{i-N} \times WI_{i-Dry} \times E_{N_2O-Soil} \times GWP_{N_2O}) \quad (5)$$

S_{N_2O} : 질소 시비로 인한 아산화질소 토양 온실가스 배출량(kgCO₂)

1.5714 : N₂O 분자량/N₂ 분자량

M_{i-Fert} : 비료 i의 사용량

AI_{i-N} : 비료 i의 질소 유효성분 함유율

WI_{i-Dry} : 비료 i의 건조 중량율

$E_{N_2O-Soil}$: 비료 1kg당 N₂O의 토양배출 계수(kgN₂O/kg)

GWP_{N_2O} : N₂O의 지구온난화지수 310(kgCO₂/kgN₂O)

Table 2. The percentage of active ingredient and dry weight in nitrogenous fertilizer

Classification		Items	Active ingredient of nitrogen (%)	Dry weight (%)
Organic matter	Organic fertilizer	Compost	1.49	56.93
Inorganic matter	Single fertilizer	Urea	0.46	Dry weight is treated as 100% at the case of inorganic fertilizer
		Ammonium sulfate	0.20	
		Potassium nitrate	0.132	
		Calcium nitrate	0.155	
		Phosphate of ammonium	0.12	
	Composite fertilizer	21-17-17	0.21	
		17-21-17	0.17	
Etc		0.177		

* RDA reserch results (PJ0072622012)

3. 목록분석

Table 3의 모든 투입재는 작물별 농가가 1년 동안 총 투입하는 종묘, 비료, 농약, 에너지, 농자재에 대한 데이터를 확보한 뒤 총 생산량(kg)으로 나눈 값을 산정하였다. 비료는 토양 정비 때 밀거름과 정식 및 재배단계의 웃거름 투입으로 나눌 수 있다. 종묘는 작물별 농가

가 작물 1kg을 생산하는데 오이농가는 0.2564개/kg의 종묘가 필요하고 토마토농가는 0.4357개/kg의 종묘, 파프리카농가는 0.2941개/kg의 종묘가 필요하다는 것을 나타낸다. 유기질 비료의 경우 3개의 농가 중 오이농가만 퇴비를 사용하였고 나머지 토마토와 파프리카 농가는 무기질 비료만을 사용 하였다. 요소와 용과린, 황산칼린의 경우 주요 3작물 모두 비슷한 양을 사용하였지만, 석회의 경우 토마토는 오이의 45배, 파프리카의 1.8배 정도로 눈에 띄게 차이가 난다.

Table 3. Input of Facilities crops on 1kg production

Classification		Items	Cucumber	Tomato	Paprika	Unit	Data source
Input	Nurseries		0.2564	0.4357	0.2941	number/kg	DI
	Organic fertilizer	Compost	0.0533	-	-	kg	DI
	Mineral fertilizers	Lime	0.0002	0.0091	0.0058	kg	DI
		Urea	0.2949	0.0008	0.0005	kg	DI
		Fused superphosphate	0.0002	0.0015	0.0046	kg	DI
		Sulfuric acid Carlin	0.0003	0.0033	0.0021	kg	DI
	Pesticide	①	0.0051	0.0059	0.0050	kg	RDA
		②	0.0051	0.0294	0.0250	kg	RDA
		③	0.0038	0.0094	0.0080	kg	RDA
		④	0.0026	0.0024	0.0020	kg	RDA
	Energy	Electricity	0.4003	1.5445	2.5903	kWh	DI
		Diesel	0.3519	0.2643	0.8348	l	DI
	Agricultural	Vinyl HDPE	0.0190	0.0291	0.0248	kg	DI
		Vinyl String	0.0029	0.0044	0.0038	kg	DI
		Carbon Steel	0.0243	0.3718	0.3160	kg	DI
Output	Crops	Cucumber	1	-	-	kg	DI
		Tomato	-	1	-	kg	DI
		Paprika	-	-	1	kg	DI

* DI (Direct Investigated), RDA (Rural Development Administration)

** Marked as ①, ②, ③, ④ times because of different crops Name of pesticides.

Cucumber ① Indoxacarb ② Difenoconazole ③ Fluquinconazole ④ Lufenuron

Tomato ① Iprovalicarb ② Napropamide ③ Napropamide ④ Spinetoram

Paprika ① Tetraconazole ② Tebufenpyrad ③ Fluazinam ④ Zoxamide

전기사용 투입량의 경우 파프리카 2.59kWh, 토마토 1.54kWh, 오이 0.4kWh 순서로 전기를 많이 사용하였다. 경유 사용의 경우 파프리카 0.8348kg, 오이 0.3519kg, 토마토 0.264kg 순으로 경유를 많이 사용하였는데, 이는 토마토 농가가 경유보일러와 전기보일러를 혼용하여 난방을 했기 때문에 토마토 농가가 상대적으로 경유의 사용량이 다른 두 농가보다 경유의 사용량이 적게 나타났다. 농자재 부분의 경우 비닐HDPE, 비닐끈, 철재 총 3가지로 규정하였는데 이 중 비닐HDPE는 외부비닐과 멀칭비닐 두 가지의 총량을 나타낸다. 비닐끈은 농가에서 사용하는 소모품이고, 철재는 시설하우스를 구성하는 철재를 나타낸다. 작물별 농자재의 투입량을 알아보면 토마토 0.7kg, 파프리카 0.34kg, 오이 0.04kg 순으로 농자재를 투입하였다.

투입요소의 직접조사결과 농약의 총 사용량과 사용횟수는 조사하였지만 정확한 농약의 명칭 확보에 한계가 있어 명칭에 대한 자료는 농진청과 한국작물보호협회에서 지도하는 농약사용지침서에 의거하여 농약명칭을 확보하였고 실제 사용량 수치를 산정하였다. 농약은 살충제, 살균제, 제초제로 나누었고, 각 농약들이 포함하고 있는 성분을 산정하였다. 하지만 농약은 품목명과 상표명이 광범위하고 유효성분량이 소량, 미량으로 표시되는 성분들이 많아 농약명칭을 선택할 때 표시 성분들이 정확히 표기된 데이터로 선정하였다. 비료 및 농약은 총 사용량에 따라 연구를 진행하였고, 작물별 농법상 차이를 반영하지 않았다. 에너지의 종류는 오이농가가 사용하는 보일러의 종류에 따라서 정해지는데 경유보일러를 사용하고 있어 전기와 경유 두 가지의 에너지원이 투입되었다. 농자재의 투입요소는 시설하우스를 구성하는 비율이 높은 순으로 비닐HDPE, 비닐끈, 철재 총 3가지로 분류하였고 이 외에 농약병이나 비료부대 등 부자재에 대한 환경부하는 고려하지 않았다. 비닐HDPE의 경우 2년 주기로 구입하기 때문에 구입량을 2로 나누어 1년 동안 사용하는 양을 산정하였고 비닐 끈의 경우는 소모품이기 때문에 구입량으로 산정하였다. 철재의 경우 시설하우스의 사용가능한 년수를 10년으로 정하였고 건설에 필요한 철재의 양을 농촌진흥청의 원예 특작시설 내재해형 규격설계도(2010)를 참고하여 구하였다.

4. LCI D/B

전과정평가를 진행하기 위해서는 투입요소들을 LCI D/B화 시킬 필요가 있다. 작물별로 D/B화 시킨 LCI D/B목록은 표로 만들어서 정리하였다(Table 4). Tabel 3에서 Input항목에 작물별 종묘에 관한 LCI D/B가 아직 구축되어 있지 않아서 LCI D/B에서 제외하였다. 전과정 영향평가는 크게 3가지의 순서 분류화(classification), 특성화(characterization), 정규화(normalization), 가중화(weighting)로 구성되어 있다. 분류화와 특성화는 ISO 14040 규정에 의한 의무규정인데 분류화는 전과정 목록분석에서 구축된 인벤토리 데이터를 영향범주에 배정하는 단계이고 특성화는 각 영향범주의 특징에 맞는 영향정량화 인자(특성화 계수)를 산정

한 후 배출량 혹은 사용량을 곱해 환경부하에 대한 잠재적 기여도를 특징짓는 것이다. 또한 정규화는 특성화된 환경영향을 정규화 인자로 나누어 계산하는 것이고, 가중화는 각각의 영향범주들이 환경전반에 미치는 영향을 고려하여 영향 범주간의 중요도를 결정하는 과정이지만 본 연구에서는 작물별 1kg 생산할 때에 온실가스배출량을 분석하는 것을 목적으로 하기 때문에 분석의 범위에서는 제외하였다.

Table 4. LCI D/B of Facilities Crops

Classification	Items	Available component	System	The application of D/B	Source	Year
Organic fertilizer	Compost			Compost, at plant	Ecoinvent	2003
Mineral fertilizers	Lime			Lime from carbonation, at regional storehouse	Ecoinvent	2003
	Urea			<Solfony> Urea-compounds, at regional storehouse	Ecoinvent	2010
	Fused superphosphate	Phosphate 20% Lime 275		Thomas meal, as P ₂ O ₅	Ecoinvent Ecoinvent	2003 2003
	Sulfuric acid carlin				Ecoinvent	2003
Pesticide	Deltamethrin	Deltamethrin 3.7%			Ecoinvent	2010
	Dinotefuran · Spinetoram	Dinotefuran 8% Spinetoram 2%			Ecoinvent	2010
	Kasugamycin · Polyoxin D	Kasugamycin 9% Polyoxin D 4%			Ecoinvent	2010
	Difenoconazole	Difenoconazole 10%	Triazol		Ecoinvent	2010
Energy	Electricity			Electricity	MKU	1998
	Diesel			Diesel	MKU	2000
Agricultural materials	Vinyl HDPE			Polyethylene resin (low Density)(LDPE)	APME	1989
	Vinyl string			Nylon66	APME	1995
	Carbon steel			Carbon steel	ME	2003

* Cucumber D/B

Classification	Items	Available component	System	The application of D/B	Source	Year
Organic fertilizer	Compost			Compost, at plant	Ecoinvent	2003
Mineral fertilizers	Lime			Lime from carbonation, at regional storehouse	Ecoinvent	2003
	Urea			<solfony> Urea-compounds, at regional storehouse	Ecoinvent	2010
	Fused superphosphate	Phosphate 20% Lime 275		Thomas meal, as P ₂ O ₅	Ecoinvent Ecoinvent	2003 2003
	Sulfuric acid carlin				Ecoinvent	2003
Pesticide	Dazome	Dazome 98%			Ecoinvent	2010
	Kasugamycin · Thiophanate-methy	Kasugamycin 4.35% Thiophanate-methy 45%			Ecoinvent	2010
	Spinetoram	Spinetoram 5%			Ecoinvent	2010
	Napropamide	Napropamide 5%	Amaid		Ecoinvent	2010
Energy	Electricity			Electricity	MKU	1998
	Diesel			Diesel	MKU	2000
Agricultural materials	Vinyl HDPE			Polyethylene resin (low Density)(LDPE)	APME	1989
	Vinyl string			nylon66	APME	1995
	Carbon steel			Carbon steel	ME	2003

* Tomato D/B

Classification	Items	Available component	System	The application of D/B	Source	Year
Organic fertilizer	Compost			Compost, at plant	Ecoinvent	2003
Mineral fertilizers	Lime			Lime from carbonation, at regional storehouse	Ecoinvent	2003
	Urea			<Solfony> Urea-compounds, at regional storehouse	Ecoinvent	2010
	Fused superphosphate	Phosphate 20% Lime 275		Thomas meal, as P ₂ O ₅	Ecoinvent Ecoinvent	2003 2003
	Sulfuric acid carlin				Ecoinvent	2003

Classification	Items	Available component	System	The application of D/B	Source	Year
Pesticide	Tetraconazole	Tetraconazole 3.7%			Ecoinvent	2010
	Tebufenpyrad	Tebufenpyrad 4.5%			Ecoinvent	2010
	Fluazinam	Fluazinam 14%			Ecoinvent	2010
	Zoxamide	Zoxamide 8%			Ecoinvent	2010
Energy	Electricity			Electricity	MKU	1998
	Diesel			Diesel	MKU	2000
Agricultural materials	Vinyl HDPE			Polyethylene resin (low Density)(LDPE)	APME	1989
	Vinyl string			Nylon66	APME	1995
	Carbon steel			Carbon steel	ME	2003

* Paprika D/B

Ⅲ. 시설작물 전과정평가 및 분석

1. 환경영향

작물별 온실가스 배출량은 Table 5에서 지구온난화 부분을 보면 알 수 있다. 오이의 지구 온난화에 대한 영향이 6.98kgCO₂/kg라는 것은 오이 1kg을 생산할 때 온실가스를 6.98kg이 배출된다는 것을 나타낸다. 토마토의 경우 토마토 1kg을 생산할 때 9.07kg의 온실가스가 배출되고, 파프리카의 경우 파프리카 1kg을 생산할 때 13.908kg의 온실가스가 배출된다. 여기서 파프리카 1kg을 생산하는데 발생하는 온실가스가 오이 1kg를 생산함에 있어 발생하는 온실가스의 약 2배에 이르는데, 이는 온실가스배출량이 작물재배에 투입되는 투입요소보다 작물별 재배특성에 의한 차이가 크다는 것을 의미한다.

Table 5. Global warming point and proportion of the greenhouse gas

	Global warming (kg Co2 eq.)	Carbon dioxide (CO ₂)	Methane (CH ₄)	Nitrous dioxide (N ₂ O)
Cucumber	6.98	19.40%	3.00%	77.60%
Tomato	9.07	60.70%	1.30%	38.00%
Paprika	13.908	76.80%	1.50%	21.70%

온실가스 비중은 동절기 에너지 사용이 많은 중부지방의 시설하우스를 대상으로 진행하

였기 때문에 노지재배방식보다 많은 온실가스가 배출될 것이라고 예상하였는데, 실제로 지구온난화의 원인중 하나인 온실가스의 함유량을 분석해보면 오이 1kg 생산 할 때 발생하는 온실가스 중 CO₂가 19.4%, CH₄, N₂O가 각각 3%, 77.6%씩 차지하였고, 토마토의 경우 CO₂가 60.7%, CH₄ 1.3%, N₂O 38%를 차지하였다. 가장 화석에너지를 많이 투입하였던 파프리카의 경우 CO₂가 76.8%로 가장 높은 비중을 차지하였고 CH₄, N₂O가 각각 1.5%, 21.7%를 차지하였다.

Table 6. Emission of greenhouse gases and Proportion of agriculture materials

(Unit : Kg CO₂/Kg or KWh)

Classification	Items	Cucumber	Ratio	Tomato	Ratio	Paprika	Ratio
Production	Diesel	0.024	0.00	0.018	0.00	0.05693	0.00
	Electricity	0.1982	0.03	0.2125	0.02	0.3562	0.03
	Pesticide	0.1053	0.02	0.3284	0.04	2.836	0.20
	Herbicide	0.01821	0.00	0.0142	0.00	0.00142	0.00
	21-17-17	0.001121	0.00	0.01428	0.00	0.01365	0.00
	Fertilizer etc.	0.00025	0.00	0.00319	0.00	0.00403	0.00
	Nylon 66	0.02192	0.00	0.03039	0.00	0.02887	0.00
	HDPE	0.03923	0.01	0.05975	0.01	0.0511	0.00
	Carbon steel	0.05689	0.01	0.8705	0.10	0.7395	0.05
	Organic fertilizer	0.00179	0.00	-	-	-	-
Energy use	Diesel	1.112	0.16	4.122	0.45	6.802	0.49
Soil emission of N ₂ O	-	5.4	0.77	3.4	0.37	3.008	0.22
Emission of crops		6.979		9.07		13.908	

투입요소별 온실가스 배출비중은 오이 농가의 경우 비료생산과 토양사용에 의한 온실가스 배출량이 77%로 가장 높은 비중을 차지하였고 화석연료 16%, 전기 2.8%, 농약 1.8%, 시설하우스 제작 1.7% 순으로 나타났다. 토마토의 경우 화석연료사용에 의한 온실가스 배출량이 45.6%로 가장 높은 비중을 차지하였고, 비료생산과 토양사용 37.7%, 시설하우스 제작 10.6%, 농약 3.8%, 전기 2.3% 순으로 나타났다. 파프리카 농가의 경우 화석연료 사용에 의한 온실가스 배출량이 49.3%로 가장 높은 비중을 차지하였고, 비료생산과 토양사용에 의한 온실가스 배출량이 21.8%, 농약 20.4%, 시설하우스 제작 5.9%, 전기 2.6% 순으로 나타났다. 오이의 경우 비료생산과 토양사용에 의한 사용량이 77.4%로 가장 높았고, 토마토와 파프리카의 경우는 45.6%, 49.3%로 각각 나타났다. 3작물 중에서 오이작물만 비료에 의한 온실가스 배출량이 가장 많았는데 이는 사례조사를 한 시설하우스 중에 유일하게 오이 농가만 유기

질비료를 사용하였는데, 유기질 비료에 시비에 따른 토양이산화질소(N₂O)에 의한 배출량이 무기질 비료에 의한 배출량 보다 많다는 것을 나타낸다. 또한 유기질 비료를 사용하지 않는 농가의 경우는 농산물을 재배에 투입되는 투입요소 중 화석연료의 투입으로 인한 온실가스배출량이 가장 많은 영향을 끼친다는 것으로 나타났다.

Table 7. Greenhouse gas emissions by three criteria (Weight, Area, Income)

Classification	Items	Cucumber		
		Emission rate on weight (kgCO ₂ /Kg or KWh)	Emission rate on area (kgCO ₂ /10a)	Emission rate on income (kgCO ₂ /won)
Production	Diesel	0.0240	3,744	3.94E-05
	Electricity	0.1982	30,919	3.25E-04
	Pesticide	0.1053	16,427	1.73E-04
	Herbicide	0.0182	2,841	2.99E-05
	21-17-17	0.0011	175	1.84E-06
	Fertilizer etc.	0.0003	40	4.18E-07
	Nylon 66	0.0219	3,420	3.60E-05
	HDPE	0.0392	6,120	6.44E-05
	Carbon steel	0.0569	8,875	9.34E-05
	Organic fertilizer	0.0018	279	2.94E-06
Energy use	Diesel	1.1120	173,472	1.83E-03
Soil emission of N ₂ O		5.4000	842,400	8.87E-03
Total		6.9790	1,088,711	1.15E-02
Classification	Items	Tomato		
		Emission rate on weight (kgCO ₂ /Kg or KWh)	Emission rate on area (kgCO ₂ /10a)	Emission rate on income (kgCO ₂ /won)
Production	Diesel	0.0180	1,836	6.92E-06
	Electricity	0.2125	21,675	8.17E-05
	Pesticide	0.3284	33,497	1.26E-04
	Herbicide	0.0142	1,448	5.46E-06
	21-17-17	0.0143	1,457	5.49E-06
	Fertilizer etc.	0.0032	325	1.23E-06
	Nylon 66	0.0304	3,100	1.17E-05
	HDPE	0.0598	6,095	2.30E-05
	Carbon steel	0.8705	88,791	3.35E-04
	Organic fertilizer	-	-	-
Energy use	Diesel	4.1220	420,444	1.59E-03
Soil emission of N ₂ O		3.4000	346,800	1.31E-03
Total		9.0700	925,467	3.49E-03

Classification	Items	Paprika		
		Emission rate on weight (kgCO ₂ /Kg or KWh)	Emission rate on area (kgCO ₂ /10a)	Emission rate on income (kgCO ₂ /won)
Production	Diesel	0.0569	6,832	1.14E-05
	Electricity	0.3562	42,744	7.12E-05
	Pesticide	2.8360	340,320	5.67E-04
	Herbicide	0.0014	170	2.84E-07
	21-17-17	0.0137	1,638	2.73E-06
	Fertilizer etc.	0.0040	483	8.06E-07
	Nylon 66	0.0289	3,464	5.77E-06
	HDPE	0.0511	6,132	1.02E-05
	Carbon steel	0.7395	88,740	1.48E-04
	Organic fertilizer	-	-	-
Energy use	Diesel	6.8020	816,240	1.36E-03
Soil emission of N ₂ O		3.0080	360,960	6.02E-04
Total		13.9080	1,667,724	2.78E-03

Table 7은 중량별, 단위면적별, 소득단위별 온실가스 배출량을 나타낸 표이다. 중량별 온실가스배출량의 기준단위는 1kg으로 산정하였다. 단위면적당 온실가스배출량의 경우 사례 조사를 진행하였던 오이, 토마토, 파프리카 농가의 면적이 각각 1,500평, 3,000평, 5,000평으로 다르기 때문에 3,000평으로 산정하였다. 때문에 1,500평인 오이농가의 경우 3,000평이 될 경우 생산량이 2배가 된다는 가정을 세웠고 파프리카 농가의 경우도 3/5배가 된다는 가정으로 기준면적의 생산량을 산정하고 그 생산량을 통한 전과정평가를 수행하였다.

소득단위별 온실가스 배출량의 경우 3개의 농가 모두 동일한 면적(10a)과 각각의 농가의 2012년 총 소득량(10a 기준 오이농가 190,000,000만원, 토마토농가 265,200,000만원, 파프리카농가 600,000,000만원)을 기준단위로 정하였다. 소득단위별 온실가스배출량을 분석해보면 오이작물이 1.15E-02Kg CO₂/Kg으로 온실가스배출량이 가장 높았으며 파프리카 2.78E-03Kg CO₂/Kg, 토마토 3.49E-03Kg CO₂/Kg 순으로 온실가스를 많이 배출하였다. 파프리카작물의 경우 3작물중 절대적인 온실가스배출량은 가장 많지만 소득 또한 오이농가의 3배, 토마토농가의 2.2배 정도가 되어 소득단위별 온실가스배출량에서는 가장 적은 배출량을 나타내는 것을 알 수 있다. 중량별 온실가스배출량에서는 오이작물이 가장 온실가스배출량이 적었으며, 단위면적당 온실가스배출량에서는 토마토, 소득단위별 온실가스배출량에서는 파프리카가 가장 적은 온실가스를 배출했다. 온실가스배출량은 일정하지만 기준을 어떻게 정하는가에 따라서 고탄소농업과 저탄소농업이 달라지게 된다는 것을 나타낸다. 농가들의 면적이 모두 다르기 때문에 가정을 세워 정확하지는 않지만 앞으로의 전과정평가의 연구의 도움이 될 것이라고 생각한다.

IV. 결 론

본 연구에서는 대상 작물들의 시스템 경계 내에 모든 과정에 걸쳐서 소모되는 자원과 발생하는 배출물의 양을 정량화하여, 이로 인한 잠재적인 환경영향을 종합적으로 평가하였다. Table 6에서 나타나듯이 우리나라 중부지방의 시설하우스에서 재배되는 시설작물들은 비료와 농약뿐만 아니라 동절기 난방으로 인한 화석연료를 많이 투입해 환경적으로 부하가 생기는 고탄소농업이다. Table 6의 데이터로 인하여 투입요소 별로 온실가스 배출비중을 파악할 수 있기 때문에 시설작물의 온실가스배출량을 저감하기 위해서는 가장 많은 온실가스배출량을 나타내었던 화석연료와 비료시비에 의한 아산화질소의 배출과 같은 온실가스배출을 저감하면서 지속가능한 농업을 진행할 수 있는 대책과 연구가 시급하다. 무엇보다 본 연구에서 온실가스배출량을 분석함에 있어서 가장 중요하였던 부분은 파프리카 1kg을 생산하는데 발생하는 온실가스가 오이 1kg를 생산함에 있어 발생하는 온실가스의 2.2배에 이른다는 사실이다. 이는 시설작물 뿐만 아니라 농업에서의 온실가스의 배출량이 어떤 투입요소를 사용하였는가 보다 어떤 작물을 재배하는가에 따라서 온실가스의 배출량이 극명한 차이가 발생한다는 것을 의미한다. 따라서 농업에 있어서 온실가스 감축을 하기 위해서는 작물별 전과정평가를 진행하여 고탄소배출 작물과 저탄소배출 작물을 나누고 고탄소배출의 작물은 탄소배출량을 감축하기 위한 연구를 진행하고 저탄소배출 작물은 재배를 권장하고 소비를 촉진시킬 수 있는 방안들을 검토하여야 할 것이다. 이러한 방식으로 농업에 온실가스를 감축시킨다면 많은 비용을 들이지 않고서 원하는 만큼의 온실가스 배출량을 감축시킬 수 있을 것이라고 생각한다. 하지만 단위면적당 온실가스 배출량의 경우에서도 파프리카는 가장 많은 온실가스를 배출하였지만 오이와 토마토 농가의 경우에는 중량별로 온실가스배출량을 산정하였을 때와는 다르게 토마토 농가가 더 적은 온실가스배출량을 나타냈다. 이로 인하여 고탄소작물과 저탄소작물을 나누기 위해서는 절대적인 온실가스배출량 뿐만 아니라 단위면적당, 소득단위당, 중량별 3가지를 모두 어우를 수 있는 기준방식을 확립한다면 보다 정확하고 높은 수준의 연구들이 진행 될 수 있다고 생각한다. 또 다음 연구에서 진행하고자 하는 시설하우스의 축산분뇨를 활용한 바이오에너지 도입에 따른 환경성 개선이 어느 정도 있는가를 비교 분석한다면 향후 기후변화 대응을 위한 농업정책의 방향을 제시하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

아직까지 국내에서는 농업분야에 대한 전과정평가를 진행함에 있어 다양한 선행연구들과 LCI D/B가 많이 부족한 실정이고, 본 연구에서 LCI D/B중 절반 이상이 스위스의 Ecoinvent사의 데이터를 사용하였다. 때문에 국내와 환경적인 조건이 다른 나라의 데이터를 사용하기 때문에 데이터의 정확성이 떨어질 수밖에 없다. 이러한 문제점들 때문에 국내에서 전과정평가를 위하여 유기농자재, 농산물 LCI D/B 구축과 같은 기본적인 데이터를 구축하는데 많은 투자가 이루어지고 있으며, 많은 D/B들이 구축되어 국내 데이터들로 전과정평가를

진행한다면 좀 더 정확한 연구가 가능할 것이다.

[논문접수일 : 2013. 5. 18. 논문수정일 : 2013. 6. 18. 최종논문접수일 : 2013. 6. 24.]

Reference

1. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. IPCC guidelines for national greenhous gas inventories.
2. Kim, S. Y., I. H. Hu, and S. D. Lee. 2010. Impacts of Temperature Rising on Changing of Cultivation Area of Apple in Korea, Konkuk University.
3. Lee, G. J., Y. S. Choi, S. G. Yang, J. H. Lee, and S. Y. Yoon. 2012. Analysis of Consumption of Homemade Organically Processed Food Analysis of the Carbon Emission Reduction Effect from No-Tillage in Pepper (*Capsicum annum* L.) Cultivation.
4. Lee, K. M., T. Hu, and S. D. Kim. 1998. Environmental life cycle assessment (LCA) theory and guidelines.
5. RDA (Rural Development Administration). 2011. 2010 Agro-livestock incomes data book. Rural Development Administration, Korea.
6. RDA (Rural Development Administration). 2011. 2010 Income Kit agricultural and livestock products(www.rda.go.kr).
7. Son, M. Y. 2009. The Effect of Climate Change on Agricultural Damage caused by Meteorological disasters, Kyungpook National University.
8. Yoon, S. Y. and D. W. Yang. 2012. Life Cycle Assessment (LCA) for Calculation of the Carbon Emission Amount of Organic Farming Material - With Oyster-shell, Expanded Rice Hull, Bordeaux Mixture Liquid -. Dongguk University.
9. Yoon, S. Y. and H. J. Kwon. 2011. A Study on the Amount of Carbon Emission of Organic Materials through Life-Cycle Assessment (LCA), Dongguk University.
10. Yoon, S. Y., J. U. Jo, T. H. Kim, K. H. Kim, and B. H. Son. 2011. Domestic organic agriculture sector building and the carbon source unit LCI D/B calculated. Rural Development Administration continue to a challenges a report, RDA.
11. Yoon, S. Y., Y. R. Kim, T. H. Kim, J. H. Park, and S. W. Ahn. 2012. Study of Garlic's Carbon Footprint though LCA, Dongguk University.