

# 관행농 쌀 생산체계의 탄소배출량 평가를 위한 전과정평가: top-down 방식의 국가평균값과 bottom-up 방식의 사례분석값 비교

유종희\* · 정순철<sup>1</sup> · 김건엽 · 이종식 · 김계훈<sup>2</sup>

국립농업과학원 농업환경부 기후변화생태과, <sup>1</sup>에코네트워크(주) <sup>2</sup>서울시립대학교 환경원예학과

## LCA (Life Cycle Assessment) for Evaluating Carbon Emission from Conventional Rice Cultivation System: Comparison of Top-down and Bottom-up Methodology

Jong-Hee Ryu\*, Soon chul Jung<sup>1</sup>, Gun-Yeob Kim, Jong-Sik Lee, and Kye-Hoon Kim<sup>2</sup>

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

<sup>1</sup>Eco-Solution Business Division, Econetwork Co, Ltd, Seoul, 137-888, Korea.

<sup>2</sup>Department of Environmental Horticulture, The University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

We established a top-down methodology to estimate carbon footprint as national mean value (reference) with the statistical data on agri-livestock incomes in 2007. We also established LCI (life cycle inventory) DB by a bottom-up methodology with the data obtained from interview with farmers from 4 large-scale farms at Gunsan, Jeollabuk-do province to estimate carbon footprint in 2011. This study was carried out to compare top-down methodology and bottom-up methodology in performing LCA (life cycle assessment) to analyze the difference in GHGs (greenhouse gases) emission and carbon footprint under conventional rice cultivation system. Results of LCI analysis showed that most of CO<sub>2</sub> was emitted during fertilizer production and rice cultivation, whereas CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O were mostly emitted during rice cultivation. The carbon footprints on conventional rice production system were 2.39E+00 kg CO<sub>2</sub>-eq. kg<sup>-1</sup> by top-down methodology, whereas 1.04E+00 kg CO<sub>2</sub>-eq. kg<sup>-1</sup> by bottom-up methodology. The amount of agro-materials input during the entire rice cultivation for the two methodologies was similar. The amount of agro-materials input for the bottom-up methodology was sometimes greater than that for top-down methodology. While carbon footprint by the bottom-up methodology was smaller than that by the top-down methodology due to higher yield per cropping season by the bottom-up methodology. Under the conventional rice production system, fertilizer production showed the highest contribution to the environmental impacts on most categories except GWP (global warming potential) category. Rice cultivation was the highest contribution to the environmental impacts on GWP category under the conventional rice production system. The main factors of carbon footprints under the conventional rice production system were CH<sub>4</sub> emission from rice paddy field, the amount of fertilizer input and rice yield. Results of this study will be used for establishing baseline data for estimating carbon footprint from 'low carbon certification pilot project' as well as for developing farming methods of reducing CO<sub>2</sub> emission from rice paddy fields.

**Key words:** Carbon footprint, LCA, Conventional rice production system

### 서 언

전과정평가 (LCA, Life Cycle Assessment)는 제품의 원료 채취, 생산, 사용, 폐기 등 전 과정에 투입·배출되는 모든 물질과 관련된 환경영향을 평가하기 위한 방법론이다. 전과정평가가 농업분야에 적용된 초기인 1996년부터 2000년

대까지는 주로 단작 1 기작에 대한 생산과정과 농자재 투입 및 배출에 관한 전과정평가를 수행하였는데, 2000년 이후부터는 관행농과 유기농 우수생산체계 등과 같이 서로 다른 농업 생산체계를 비교하는 전과정평가가 시작되었다 (de Boer, 2003).

2007년 현재 우리나라 총 온실가스 배출량은 6천 2백억 kg CO<sub>2</sub> yr<sup>-1</sup>로 2000년 대비 4.3% 가량 증가하는 등 꾸준한 증가 추세를 보이고 있다. 농업부문은 전체의 3%인 180억 4

접수 : 2012. 10. 23 수리 : 2012. 11. 28

\*연락처 : Phone: +82312900238

E-mail: soil73@kg21.net

천만 KG CO<sub>2</sub> yr<sup>-1</sup>로 2020년까지 온실가스 배출전망치 BAU (Business As Usual) 대비 30% 온실가스 감축 목표를 설정하는 등 모든 분야에서 온실가스 저감을 이뤄내야 한다 (Jung et al., 2011). 지구온난화를 효과적으로 억제하기 위하여 전체 온실가스의 80%를 차지하고 있는 이산화탄소 배출을 저감, 회수, 저장하는 것이 필요하다 (Huh et al., 2008).

‘탄소발자국 (carbon footprint)’이란 인간의 활동과정에서 발생하는 온실가스 총 배출량을 의미하며 제품에 탄소발자국을 부착하는 ‘탄소라벨링 (carbon labelling)’제도를 통하여 탄소 소비량을 줄이기 위해 노력하고 있다. 탄소라벨링 제도는 환경정보를 공개함으로써 소비자와 적극적 커뮤니케이션 시스템을 구축할 수 있는 수단이며, 제품의 원료 채취부터 폐기까지 전과정평가 기법을 활용하여 제품의 환경성 정보를 계량화한다는 특징을 갖고 있다. 일례로 미국의 다국적 대형 유통업체인 Walmart는 녹색경영을 위해서 ‘지속가능성 공급자 평가 질문지 (sustainability supplier assessment question)’를 고안하고 공급자들을 대상으로 평가를 실시하여 온실가스 배출량을 측정하지 않는 공급자는 “Below Target”, 온실가스 배출량을 측정하여 감축 작업을 수행하는 공급자는 “On Target”, 온실가스 배출량에 대한 감축 목표를 달성한 공급자는 “Above Target”의 범주에 넣어 분류하고 있다 (Walmart, 2011). 현재 탄소발자국 표지는 소비자에게 제품의 친환경성을 비교하고 선택하여 제품을 구매할 수 있도록 유도하는 수준이지만, 이것은 향후 공급자에게 부적합한 제품의 공급을 제한할 수 있는 기준으로 작용할 수 있기 때문에 주목할 필요가 있다 (Deurer et al., 2011). EU 등 선진국에서는 이미 탄소세 도입논의와 함께 탄소배출량이 많은 제품에 대한 수입규제 움직임을 보이고 있어 이에 대한 대응이 농업분야에서도 요구된다 (Yoon et al., 2012).

우리나라에서도 농축수산물 온실가스 배출량 산정 및 생산과정에서의 온실가스 저감을 위한 기초 연구가 시작되고 있다. 이러한 연구의 일환으로 현재 국립농업과학원에서 우리나라 주요 작물에 대한 평균적인 탄소성적 산정을 목적으로 작물별 전과정 목록 (LCI, Life Cycle Inventory) DB를 구축하는 top-down 방식의 전과정평가 방법론을 개발하고 있다. Top-down 방식의 전과정평가는 우리나라 전국을 대상으로 국가 전체 평균량을 산정하므로 농축산물소득자료집을 중심으로 그 외 국가 통계자료와 문헌자료를 분석 데이터로 사용한다. 그러나 현재 국내에서 농가 현지의 활동 자료를 직접 수집하여 탄소배출량을 산정하는 bottom-up 방식의 전과정평가는 수행되지 않고 있다. (Ryu et al., 2011). 농림수산물소득자료에서는 온실가스 감축을 목표로 일반 농축산물에 비해 생산과정에서 온실가스 배출을 줄인 농축산물에 저탄소 인증을 부여하는 시장 기반형 온실가스 감축 프로그램인 ‘저탄소 농축산물 인증제 도입을 확정하고

2013년 시범사업을 추진하고 있다. 실제 쌀 생산 농가를 대상으로 저탄소 인증사업을 시작했을 때, 인증의 기준이 되는 값이 필요한데, 현재 국립농업과학원에서 구축하고 있는 국가평균 값에 보정치를 보완한다면 인증 기준치 역할을 할 수 있을 것이다.

따라서 본 연구에서는 국립농업과학원에서 구축한 쌀에 대한 국가 평균 탄소배출량을 기준으로 관행농법으로 쌀을 재배하는 농가를 대상으로 사례 분석하여 탄소배출량을 비교 분석하고 이를 통하여 저탄소 인증사업의 현장 농가 적용성을 평가하고 사업을 진행할 때에 고려되어야 할 사항 등을 고찰하였다.

## 재료 및 방법

관행농 쌀 생산체계에 대한 전과정평가 (LCA, Life Cycle Assessment)는 국제표준화기구 (ISO, International Organization for Standardization)에서 제정한 환경경영체계에 관한 국제표준 ISO 14040의 규격에 의거하여 수행하였다 (ISO, 1997).

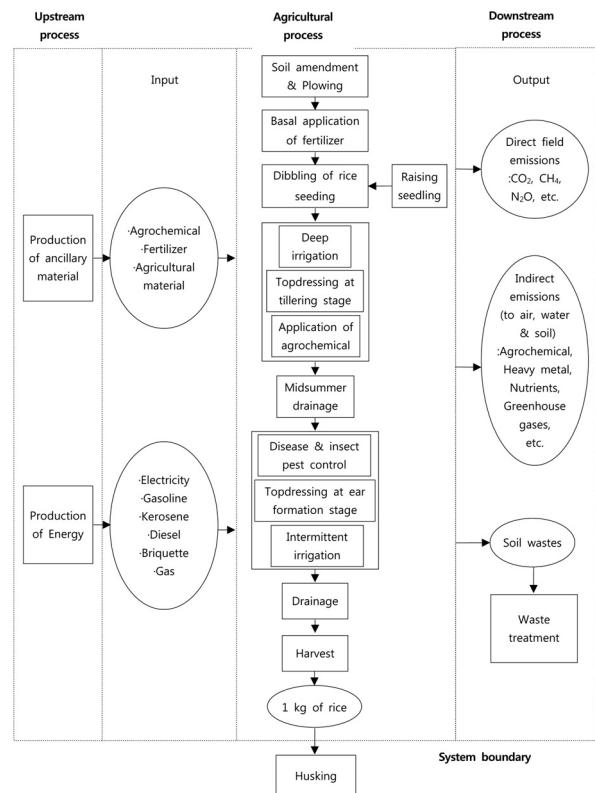
**연구 대상** 본 연구에서는 2007년 농진청과 통계청에서 수집한 농축산물소득자료 통계 값으로 국가평균 탄소성적을 산정하는 top-down 방식의 자료수집 방법과 2011년 전북 군산 지역 관행농 쌀 생산 농가 중 벼 평균 재배면적이 3.3 ha인 대규모 생산농가 총 4농가를 섭외하여 면적조사하는 방법으로 사례를 분석하는 bottom-up 방식의 전과정 목록 (LCI, Life Cycle inventory)을 구축하였다. 국가평균 전과정평가는 국립농업과학원에서 구축한 방법론과 값을 기준으로 적용하였다. ‘농축산물 소득 자료집’은 정부통계 제 14302호 승인을 통하여 공식자료로 공인받았으며, 도별 재배면적과 소득 표준편차를 감안해 도별로 표본을 배정한 후 확률비례추출에 의거하여 조사 시군을 선정하고 유의 표본 추출에 의해 조사 농가를 선정한다. 소득자료집의 평균 쌀 생산량 산정은 통계청 자료가 인용되는데, 2007년 통계청 농산물생산비 (논벼) 원자료는 표본농가 1,171개였다. 2007년 10 a당 국가평균 생산량 (조곡)은 630 kg이었다 (RDA, 2008). 그러나 국가통계 자료는 지역 간 환경이나 농사방법 간 차이는 크게 반영하지 못하고 전국 평균에 의거해 분석 자료를 작성한다. 사례분석 대상 농가 특성은 전북 군산 지역에서 쌀을 관행농법으로 재배하고, 전체 벼 재배면적이 13.3 ha의 대규모 벼 재배단지이다. 재배 벼 품종은 ‘신동진벼’로 2011년 사례분석 농가 평균 생산량 (조곡)은 10 a당 742 kg이었다 (Table 1). 신동진벼는 호남농업시험장에서 육성된 초다수성 품종으로 중만생종이며 벼알은 다소 긴 편이고, 충남 이남 내륙평야지 1,2 모작지대에 알맞은 품종이다.

**Table 1. Source of collected data for conventional rice cultivation.**

Item	Source and reference of data	
	Top-down (Reference)	Bottom-up (Case-study)
<b>Basic information</b>		
Location	Incomes data (RDA, 2008)	Gunsan, Jeonbuk
No. of research subjects	Incomes data (RDA, 2008)	4 farms
Cultivation area (ha)	Incomes data (RDA, 2008)	13.3
Cultivation method	Conventional farming	Conventional farming
Cultivation periods (days)	150	139
Variety	Incomes data (RDA, 2008)	'Shindongjin'
<b>Input/output data (kg 10a<sup>-1</sup>)</b>		
Fertilizers	Incomes data (RDA, 2008) and †KFIA, 2007	Survey
Agrochemical	Agrochemical year book and Agrochemical use guide book (KCPA, 2007)	Survey
Agricultural materials	Incomes data (RDA, 2008)	Survey
Direct field emissions	IPCC 1996	IPCC 1996
Vinyl wastes	‡KWA, 2007	Survey
Lagging cover wastes	§MIFAFF, 2004	Survey
Product (kg 10a <sup>-1</sup> )	630	742
(unhulled rice)	Incomes data (RDA, 2008)	Survey

†KFIA, Korea Fertilizer Industry Association; ‡KWA, Korea Waste Association; §MIFAFF, Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries.

**연구 목적 및 범위** 전과정평가 수행을 위해서는 연구 대상이 제공하는 본래의 기능이 무엇인지 구명하고, 분석기준인 기능단위 및 기준흐름을 결정해야 한다. 본 연구의 목적은 관행농 쌀 생산체계에 대한 탄소배출량 산정 및 전과정 영향평가로 정의하였다. 쌀의 기능은 식용 및 각종 식품 제조의 원료이며, 기능 단위는 식품 및 식품제조의 원료용으로 사용되는 쌀 (조곡) 1 kg 생산으로 정의하였다. 연구 범위는 Fig. 1과 같이 쌀 생산체계에 대한 전과정을 생산 전 (前)단계, 생산단계, 생산 후 및폐기 단계로 나누어 정의하였다. 생산 전 단계에는 벼 재배에 투입되는 농자재 및 비료, 농약, 에너지 등을 생산하는 공정이 포함된다. 생산단계는 표준재배지침을 기준으로 논갈이, 육묘부터 벼 수확까지로 농가에서 이루어지는 쌀 생산관련 일련의 농작업 과정을 포함하며, 주로 지역 미곡처리장에서 작업하는 도정은 연구 범위에서 제외되었다. 그러므로 본 연구에서 정의한 기능단위인 쌀 1 kg 생산은 조곡 생산으로 정의하였다. 생산 후 단계는 생산 전 단계를 포함하는 관행농 쌀 생산체계에서 배출되는 대기배출물 (온실가스)량 산정과 투입된 농자재들의 폐기물 처리단계를 포함한다.



**Fig. 1. System boundaries for conventional rice production system.**

**전과정 목록분석** 실질적인 전과정평가를 수행하기 위해서는 현장에서 발생하는 생산 활동에 대응하는 전과정 목록 구축과 그에 따른 에너지 효율, 온실가스 배출 등에 대한 계수 (coefficients)들의 설정이 필요하다. 모든 투입-산출량 자료는 벼는 10 a를 기준으로 수집하였다 (Table 2).

비료 사용량은 국가평균은 소득자료집 투입량을 적용하

고 사례분석은 농가 면접조사 결과를 적용하였다 (Table 2). 질소비료에 의한 벼는 아산화질소 발생량을 계산할 때 비료 투입량은 유효성분사용량을 계산하고 배출계수는 IPCC

**Table 2. Inventories of fertilizer inputs for conventional rice cultivation.**

Entries of fertilizer	Quantity		Linked inventory DB
	Top-down (Reference)	Bottom-up (Case study)	
	----- kg 10 a <sup>-1</sup> -----		
Compost	3.18E-01	8.42E-01	Ecoinvent
Urea	1.25E-02	-	RDA <sup>†</sup>
Ammonium sulphate	6.48E-04	-	Ecoinvent
Thomas meal as P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.03E-04	-	Ecoinvent
Fused phosphate	9.94E-06	-	Ecoinvent
Potassium chloride	1.83E-04	-	ME <sup>‡</sup>
Potassium sulphate	1.42E-05	-	RDA
Compound fertilizer 21-17-17	1.42E-02	-	RDA
Compound fertilizer 17-21-17	1.06E-03	-	RDA
Compound fertilizer 15-15-15	1.17E-05	-	RDA
Compound fertilizer 21-13-9	-	1.01E-02	-
Compound fertilizer 22-10-8	-	5.02E-02	-
Compound fertilizer 17-10-7	-	2.09E-02	-
Compound fertilizer 17-0-7	-	7.41E-03	-
Other compound fertilizer	6.85E-02	-	RDA
Calcium carbonate	1.82E-03	-	ME
Silicate fertilizer	2.76E-02	3.37E-02	RDA

<sup>†</sup>RDA, Rural Development Administration; <sup>‡</sup>ME, Ministry of Environment.

1996 Tier 1을 적용하였다 (Ryu et al., 2011). 메탄배출량은 재배면적에 IPCC 1996 Tier 1값을 적용하고 유기물사용 및 담수의 유·무와 재배일수, 담수일수를 변수로 하여 산출하였다 (Jeong et al., 2011). 농약투입량 조사의 경우 국가평균치는 농약연보와 농약사용침서 (KCPA, 2007)를 바탕으로 작물별 농약 사용기중치를 적용한 지수를 사용하여 계산하였고, 사례분석에는 농가 조사 결과를 적용하였다. 조사된 농약투입량은 제초제, 살균제, 살충제, 생조전착제로 구분하고 유효성분별로 구분하였다 (Table 3). 에너지 및 농자재 투입에 대한 자료 수집은 국가평균치는 소득자료집으로, 사례분석은 현장자료로 이루어졌다 (Table 4). 농작업 중 에너지 사용으로 배출되는 온실가스 (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 등) 산정은 IPCC 1996 Tier 1 배출계수를 적용하였다 (Ryu et al., 2011). 농자재 폐기물 처리 국가평균값은 환경자원공사와 농림수산식품부의 영농폐기물 통계 (KWA, 2007; MIFAFF, 2004) 자료를 이용하였고, 사례분석 값은 현장자료를 사용하였다 (Table 5).

전과정 목록분석을 위하여 지식경제부에서 보급하는 전과정평가 수행 프로그램 PASS (v.4.1.3)를 사용하였고, 상·하위 흐름 DB는 환경부, 지경부, 현재 국립농업과학원에 구축 중인 농자재 DB 등 국내자료를 우선 적용하고, 국내 DB가 없는 경우 ecoinvent DB를 사용하였다 (MKE: Ministry of Knowledge Economy methodology, Software program PASS v4.1.3). 탄소성적 산정은 전과정 목록분석결과 산출된 교토의정서 규정 6대 온실가스 (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFCs, SF<sub>6</sub>,

PFCs) 배출량에 지구온난화지수를 곱하여 이산화탄소 당량 (kg CO<sub>2</sub> eq. kg<sup>-1</sup>)으로 정량화하였다 (Ryu et al., 2011).

**전과정 영향평가** 전과정 목록분석 결과를 10 범주로 구분하고 지식경제부 영향평가 방법론의 특성화계수 및 특성화 모델을 적용하여 (Table 6), 각 범주별 기준물질 대한 관련 물질들의 상응값 (특성화 계수)과 발생량을 곱하여 영향범주별 환경영향 기여도를 평가하였다 (Ryu et al., 2011b). 열개의 영향범주는 무생물자원고갈 (ADP), 지구온난화 (GWP), 오존층고갈 (ODP), 산성화 (AP), 부영양화 (EP), 광화학산화물생성 (POCP), 인간독성 (HTP), 담수생태독성 (FAETP), 해수생태독성 (MAETP), 토양생태독성 (TETP)이며, PASS 4.1.3. 프로그램을 사용하였다 (MKE: Ministry of Knowledge Economy methodology, Software program PASS v4.1.3).

**가정 및 제한사항** 본 연구에서는 국립농업과학원에서 개발 중인 전과정평가법에 준하여 농기계 제조 및 시설 (육묘용 하우스 및 저장시설 등) 구축, 운송에 따른 환경부하는 고려하지 않고, 물리적인 투입·배출물만 정량화하였다. 단 보통 3년에 1회 정도로 수행되는 석회 사용 등의 경종작업은 온실가스배출량을 당년 수확물에 전부 할당하는 것은 온실가스 과산정의 위험이 있으므로 1기작 기준으로 나누어 할당하였다. 농약병, 비료포대 등 원부자재 포장에 대한 환경부하는 고려하지 않았고, 대상 시스템에서 발생한 부산물

**Table 3. Inventories of agrochemical inputs for conventional rice cultivation.**

Entries of agrochemical	Associated chemical class in coinvent (linked inventory DB)	Quantity	
		Top-down (Reference)	Bottom-up (Case-study)
		----- kg 10 a <sup>-1</sup> -----	
Germicide	(thio)Carbamate-compounds	6.64E-06	1.68E-05
	Benzimidazole-compounds	1.17E-06	-
	Cyclic N-compounds	8.86E-06	4.88E-07
	Organophosphorus-compounds	1.46E-04	-
	Pesticide unspecified	1.52E-04	3.24E-05
	Acetamide-anillide-compound	2.32E-07	-
Insecticide	(thio)Carbamate-compounds	2.19E-04	3.03E-05
	Organophosphorus-compounds	6.50E-05	1.69E-05
	Pyretroid-compounds	1.21E-06	-
	Pesticide unspecified	1.31E-04	2.73E-04
Herbicide	(sulfonyl)Urea-compounds	7.57E-06	3.97E-05
	(thio)Carbamate-compounds	6.75E-05	-
	Benzo[thia]diazole-compounds	2.47E-05	-
	Dinitroaniline-compounds	2.44E-06	-
	Diphenylether-compounds	3.60E-06	4.42E-05
	Organophosphorus-compounds	5.16E-07	-
	Phenoxy-compounds	5.89E-06	-
	Triazine-compounds	6.32E-07	-
Pesticide unspecified	2.09E-04	4.76E-05	
Spreader	(sulfonyl)urea-compound	6.73E-11	
	(thio)Carbamate-compounds	9.39E-08	
	Bipyridylium-compounds	3.26E-07	
	Cyclic N-compounds	8.07E-07	
	Pesticide unspecified	3.32E-04	

**Table 4. Inventories of energy and agricultural material inputs.**

Entries of inputs inventories	Quantity		Linked inventory DB
	Top-down (Reference)	Bottom-up (Case-study)	
		----- kg 10 a <sup>-1</sup> -----	
<b>Energy</b>			
Electricity	4.11E-03	6.13E-03	MKE <sup>†</sup>
Diesel	5.18E-03	2.26E-02	MKE
Kerosene	7.61E-04	1.05E-02	MKE
Gasoline	2.03E-03	6.82E-03	MKE
<b>Agricultural materials</b>			
vinyl (HDPE-film)	1.86E-05	-	MKE
vinyl (LDPE)	2.30E-05	-	MKE
Lagging cover (Non-woven fabric)	2.92E-03	7.97E-03	RDA <sup>‡</sup>

<sup>†</sup>MKE, Ministry of Knowledge Economy, Republic of Korea; <sup>‡</sup>RDA, Rural Development Administration.

(벚짚 등)은 기술계 (technosphere)로부터 투입된 물질들의 배출이 아닌 자연적인 물질순환의 일부로 시스템 내부에서 다시 분해된다고 가정하였다 (van Zeijts et al., 1999). 전과정평가는 평가 단위를 동일한 품질의 생산물을 기준으로 단위를 통일하여 지역적, 시간적 영향에 독립성을 갖는 특

성을 근거 (Tukker, 2000)로, 본 연구는 평가 대상이 2007년 소득자료와 2011년 전북 군산 관행 쌀 생산 농가로 수집 자료가 동일 연도가 아니지만 각각의 생산량을 나누어 동일 단위 쌀 생산 1 kg을 기준으로 하여 비교 평가하였다. 이는 전과정평가가 두 가지 이상의 독립적 제품의 잠재적 환경성

Table 5. Inventories of product (rice) and outputs.

Entries of outputs inventories	Quantity		Linked inventory DB
	Top-down (reference)	Bottom-up (case-study)	
	----- kg 10 a <sup>-1</sup> -----		
Direct field emission (GHGs: CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O)	1.19E-01	1.38E-01	-
Waste			
Vinyl wastes	1.06E-05	-	MKE <sup>†</sup>
Lagging cover wastes	5.68E-04	1.55E-03	ME
Product			
Rice (unhulled)	1.00E+00	1.00E+00	-

<sup>†</sup>MKE, Ministry of Knowledge Economy, Republic of Korea; <sup>‡</sup>ME, Ministry of Environment.

Table 6. Impact categories in LCIA (Life Cycle Impact Assessment).

Impcat categories <sup>†</sup>	Unit	Characterization models
ADP	1 yr <sup>-1</sup>	EIA, International Energy Annual 2000, USGS 2001~2002
GWP	kg CO <sub>2</sub> -eq. kg <sup>-1</sup>	IPCC 1996 (100 year)
ODP	kg CFC-eq. kg <sup>-1</sup>	UNEP 2002
AP	kg SO <sub>2</sub> -eq. kg <sup>-1</sup>	CML 1999, Hauschild & Wenzel, 1998
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -eq. kg <sup>-1</sup>	Heijungs et al. 1992
POCP	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq. kg <sup>-1</sup>	CML 1999, Jenkin & hayman, 1999; Derwent et al. 1998
HTP	kg 1,4 DCB-eq. kg <sup>-1</sup>	Huijbregts, 1999 & 2000
FAETP	kg 1,4 DCB-eq. kg <sup>-1</sup>	Huijbregts, 1999 & 2000
MAETP	kg 1,4 DCB-eq. kg <sup>-1</sup>	Huijbregts, 1999 & 2000
TETP	kg 1,4 DCB-eq. kg <sup>-1</sup>	Huijbregts, 1999 & 2000

<sup>†</sup>ADP, Abiotic resource Depletion; GWP, Global Warming Potential; ODP, Ozone Depletion Potential; AP, Acidification Potential; EP, Eutrophication Potential; POCP, Photochemical Ozone Creation Potential; HTP, Human Toxicity Potential; FAETP, Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential; MAETP, Marine Aquatic Ecotoxicity Potential; TETP, Terrestrial Ecotoxicity Potential.

을 비교하는 환경영향 평가기법으로 자주 사용되는 이유이다.

## 결과 및 고찰

**전과정 목록분석** 자료 수집 결과 국가 평균자료 (reference)는 퇴구비 투입량이 가장 높았고, 요소와 복합비료 투입량도 높은 값을 보였다. 사례분석 (전북 군산 관행농가) 역시 퇴비가 가장 높았고 쌀 1 kg 당 투입량이 8.42E-01 kg로 평균값 3.18E-01 kg 보다 두 배를 상회하였다. 복비 사용량은 평균자료가 8.38E-02 kg, 사례분석 농가가 8.86E-02 kg로 거의 동일하였다 (Table 2). 농약사용량은 국가평균이 사례분석 보다 투입종류 및 사용량이 더 많았고, 두 경우 모두 벼 재배 투입물 중 가장 낮은 비중을 차지하였다 (Table 3). 전기와 화석연료 등 에너지 사용량은 국가평균과 사례분석이 각각 1.21E-02, 4.61E-02 kg로 사례분석 농가가 약 4배 높았는데, 특히 건조에 사용되는 등유 사용량이 1.05E-02 kg로, 국가 평균값 7.61E-04 kg 보다 매우 높게 나타났다 (Table 4).

전과정 목록분석 결과 CO<sub>2</sub>은 무기질 비료 생산과 벼 재배 과정에서 배출량이 가장 많았다. 무기질 비료 생산 중 배출량은 국가평균 (reference) 값이 1.13E-01 kg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>, 사례분석 (Gunsan) 값이 1.54E-01 kg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>였다. 국가 평균 값이 더 높았던 농약 투입량을 제외하면 모든 생산단계에서 사례분석 값의 CO<sub>2</sub> 배출량이 많았다. 특히 벼 재배 공정에서 국가평균 2.39E-02 kg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>, 사례분석 (Gunsan) 1.20E-01 kg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>로 분석 대상 간 차가 가장 컸다 (Fig. 2). 벼 재배 중 이산화탄소 발생 요인은 사례분석 농가의 연료 사용량이 국가평균 값보다 매우 높았기 때문으로 (Table 4) 이는 농기계 화석연료 사용 중 불완전 연소에 의한 것으로 판단된다.

쌀 생산 전과정 중 CH<sub>4</sub>은 벼 재배과정에서 대부분 배출되었고, 국가평균 값은 9.42E-02 kg CH<sub>4</sub> kg<sup>-1</sup>, 사례분석은 1.73E-02 kg CH<sub>4</sub> kg<sup>-1</sup>였다 (Fig. 3). 메탄발생 배출량 산정에서 유기물시용과 담수의 유·무 및 재배일수, 담수일수 등이 변수이다. 본 연구에서 유기물퇴비 사용량은 사례분석이 국가평균에 비해 두 배를 상회했으나 (Table 2), IPCC 1996

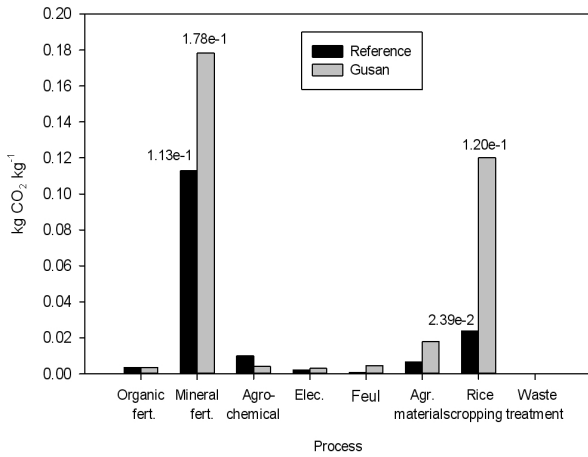


Fig. 2. Comparison of CO<sub>2</sub> emission from conventional rice production system between reference and case study.

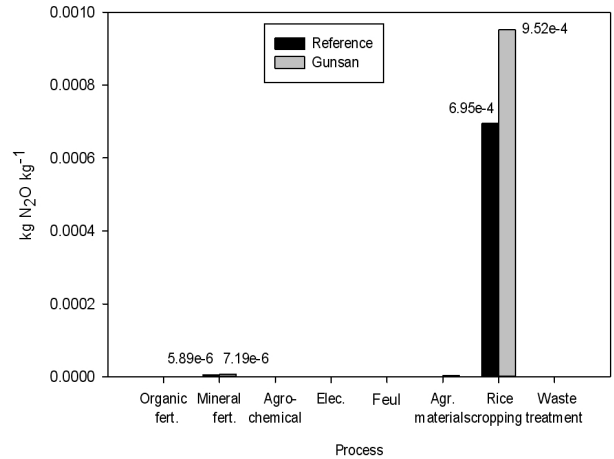


Fig. 4. Comparison of N<sub>2</sub>O emission from conventional rice production system between reference and case study.

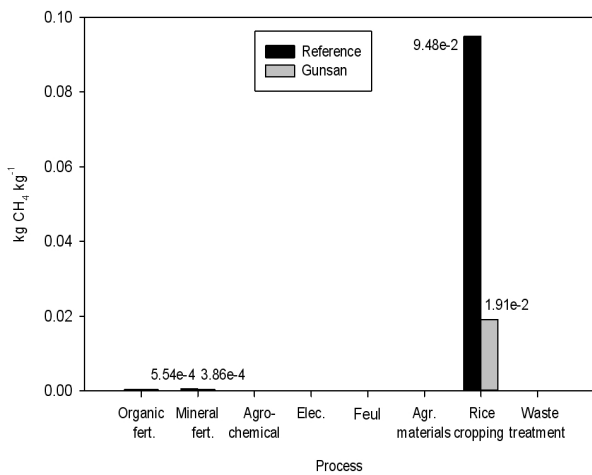


Fig. 3. Comparison of CH<sub>4</sub> emission from conventional rice production system between reference and case study.

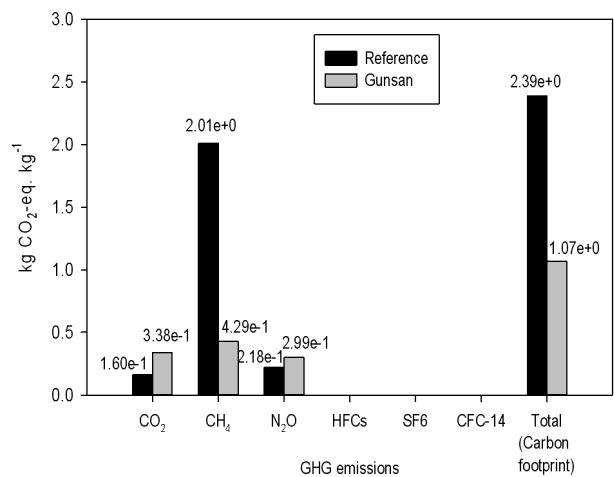


Fig. 5. Comparison of carbon footprint of conventional rice production system between reference and case study.

가이드라인의 경우 물관리 방법과 유기물 사용 유·무만 고려하므로 메탄발생량의 결정적 요인으로 볼 수 없었다. 전과정 목록분석 결과 재배일수가 적고 생산량이 더 높은 사례분석의 경우가 메탄발생량이 적었다. 한편, 2006 IPCC 가이드라인에는 작기 전후 물관리 방법, 유기물 사용량 및 종류 등의 세부항목이 추가되었고, 계수 값도 일부 변경되었으므로 (Jeong et al., 2011), 유기물 종류와 사용량에 의한 메탄배출량 차이 등을 나타낼 수 있는 좀 더 정확한 배출량 산정을 위해서 자료수집의 정확성과 더불어 배출계수 적용에 있어서 현재 구축하고 있는 탄소성적 산정을 위한 전과정 평가 방법론에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

N<sub>2</sub>O 역시 벼 재배과정에서의 배출량이 대부분이었고, 그 값은 국가평균이 6.95E-4 kg N<sub>2</sub>O kg<sup>-1</sup>, 사례분석은 1.73E-02 kg N<sub>2</sub>O kg<sup>-1</sup>였다 (Fig. 4). 농작업에서 질소배출량은 토양에 투입된 퇴비 및 화학비료 중 질소함량에 배출계수를 곱하여 구하는데, 본 연구에서 N<sub>2</sub>O 배출 주요인은 퇴비 사용으로 나타났다. 복비 투입량은 국가평균과 사례분석이 거의

같았고, 퇴비의 사례분석 값이 약 두 배 많았다. 이러한 경향은 IPCC 1996 배출계수를 적용한 2009년 우리나라 논토양 질소 투입원별 N<sub>2</sub>O 직접배출량 산정결과, 축분 퇴비 사용이 화학비료 사용으로 인한 N<sub>2</sub>O 발생량 보다 많은 연구결과와 같았다 (Jeong et al., 2011).

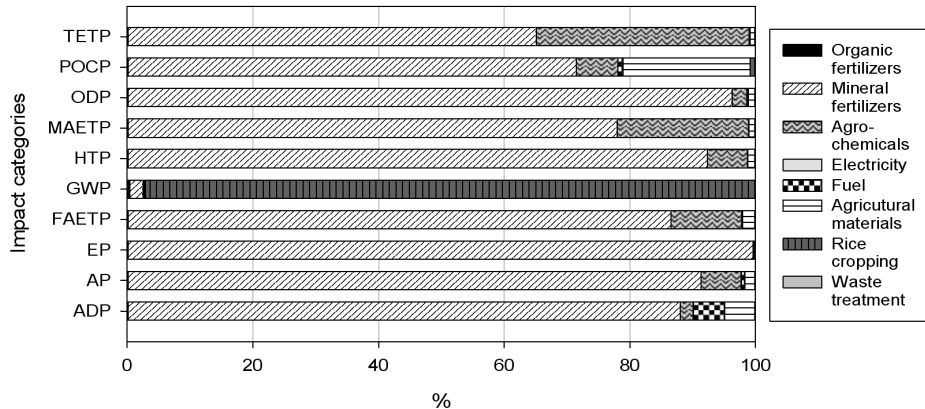
관행농 쌀 1 kg 생산을 기준으로 하는 탄소성적은 국가평균 값이 2.39E+00 kg CO<sub>2</sub>-eq. kg<sup>-1</sup>, 사례분석이 1.04E+00 kg CO<sub>2</sub>-eq. kg<sup>-1</sup>였다 (Fig. 5). 전과정 목록분석 결과 논 토양에서 배출되는 온실가스 중 CO<sub>2</sub>가 가장 많았으나, 탄소성적 산정에서 CO<sub>2</sub> 1을 기준으로 하는 CH<sub>4</sub>의 CO<sub>2</sub>-eq. 환산등가가 21이므로, 메탄가스가 쌀 생산과정 중 탄소성적에 차지하는 값이 가장 컸다. 또한 국가평균 탄소성적이 사례분석보다 높은 결정적 이유는 생산량 차이 때문이었다 (Table 1). 쌀 생산 전과정에 투입되는 농자재량은 국가평균과 사례분석이 유사하거나 오히려 사례분석이 더 높게 나타났다. 작기 당 수확량이 높아 사례분석에 유리한 결과가 나타났다. 이러한 결과는 일본과 이태리에서 선행 연구된

쌀 생산체계에 대한 전과정평가에서 영농방법에 따라 온실 가스 직접발생량은 적으나, 상대적으로 수확량이 적은 경우 결과적으로 환경부하 효과가 감소 상쇄되는 결과를 보인 것과 같은 경향을 보였다 (Blengini and Busto, 2009; Hokazono and Hayashi, 2012).

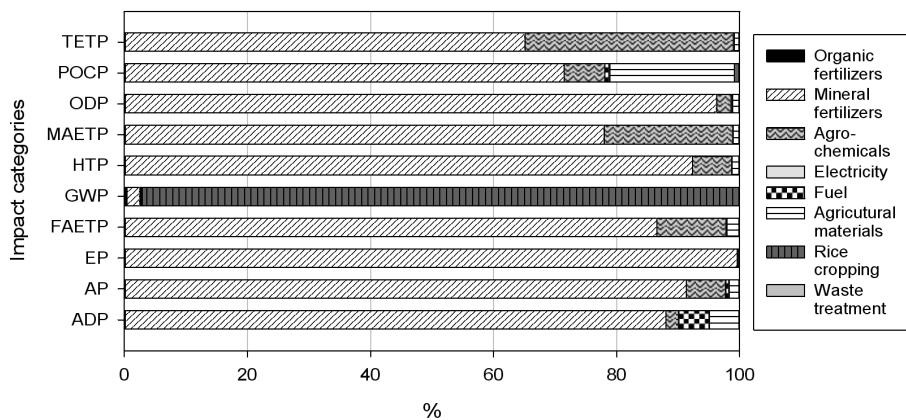
**전과정 영향평가** 논토양에서 배출된 온실가스와 직접적으로 관련된 환경영향범주는 지구온난화 범주 (GWP)와 광화학적 산화물 생성 (POCP)범주이다. 관행농 쌀 생산체계에서 각 생산공정별 환경영향을 분석한 결과 화학비료 생산단계가 대부분의 환경영향범주에 미치는 영향이 가장 크게 나타났으나, GWP 범주는 벼 재배에 의한 환경영향 기여도가 가장 컸다. GWP에 대한 환경영향 기여도에서 국가평균은 벼 재배단계가 96%, 화학비료 생산공정이 2%였고, 사례분석에서는 벼 재배공정이 74%, 화학비료 생산이 19%였

다. 탄소성적 산정에서 나타났듯이 온실가스 배출의 비중이 가장 높았던 벼 재배 단계의 기여도가 가장 높았으며, 벼 재배 중 메탄발생량과 온실가스 탄소성적이 더 높았던 국가평균이 벼 재배단계에 대한 기여도가 더 높게 나타났다. 그러므로 쌀 생산체계에서 온실가스에 대한 환경영향을 줄이기 위해서는 논토양 메탄발생 저감에 대한 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

POCP에 대한 환경영향 기여도는 국가평균은 벼 재배단계가 1%, 화학비료 생산이 71%, 농자재 생산이 20%였고, 사례분석의 경우 벼 재배단계가 58%, 화학비료 생산이 23%였다. 벼 재배공정이 사례분석에서 기여도가 높았던 이유는 POCP와 관련있는 N<sub>2</sub>O이 벼 재배 중 사례분석에서 발생량이 많았기 때문이다. 화학비료 생산이 국가평균에서 기여도가 높은 이유는 국가평균은 사례분석과 복비투입량은 비슷하였으나 그 외 다양한 단비의 투입이 있어 전체 투입량이



**Fig. 6. Contribution of conventional rice system to environment impacts (Reference: The value of national average).** (ADP: Abiotic resource Depletion Potential; GWP: Global Warming Potential; ODP: Ozone Depletion Potential; AP: Acidification Potential; EP: Eutrophication Potential; POCP: Photochemical Ozone Creation Potential; HTP: Human Toxicity Potential; FAETP: Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential; MAETP: Marine Aquatic Ecotoxicity Potential; TETP: Terrestrial Ecotoxicity Potential).



**Fig. 7. Contribution of conventional rice system to environment impacts (Case study: Gusan province).** (ADP: Abiotic resource Depletion Potential; GWP: Global Warming Potential; ODP: Ozone Depletion Potential; AP: Acidification Potential; EP: Eutrophication Potential; POCP: Photochemical Ozone Creation Potential; HTP: Human Toxicity Potential; FAETP: Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential; MAETP: Marine Aquatic Ecotoxicity Potential; TETP: Terrestrial Ecotoxicity Potential).



많았기 때문이다. 투입량이 매우 적었던 농약과 전기는 환경영향 부하가 거의 없었고, 유기질비료 (퇴비) 생산 공정은 모든 영향범주에서 환경영향 부하가 거의 없었다. 생태독성과 관련된 범주에서는 농약에 대한 환경영향 기여도가 국가평균은 10~30%, 사례분석은 1~5%였다. 국가평균에서 기여도가 높게 나타난 이유는 국가평균이 농약종류와 투입량이 더 높았기 때문이다 (Fig. 6, Fig. 7).

분석결과 쌀 생산체계에서 환경영향 기여도에 가장 중요한 요인은 농자재 투입량이었다. 따라서 본 연구를 바탕으로 환경영향 기여도가 가장 높았던 비료 사용량의 적정 수준에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

## 요 약

본 연구진은 2007년 농진청과 통계청에서 수집한 농축산물소득자료 통계 값으로 국가평균 탄소성적을 산정하는 top-down 방식의 자료수집 방법을 구축하였다. 또한, 본 연구진은 2011년 전북 군산 지역 관행농 쌀 생산 농가 중 벼 평균 재배면적이 3.3 ha인 네 곳의 대규모 생산농가를 섭외하여 면접조사로 사례를 분석하는 bottom-up 방식의 전과정 목록 (LCI, life cycle Inventory)도 구축하였다. 본 연구는 관행농 쌀 생산체계에 대한 전과정 평가를 국립농업과학원에서 구축한 top-down 방식과 사례분석을 통한 bottom-up 방식으로 수행한 결과를 비교하기 위하여 수행되었다. 전과정 목록분석 결과 CO<sub>2</sub>은 무기질 비료 생산과 벼 재배과정에서 배출량이 가장 많았고, CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O는 대부분 벼 재배과정에서 배출되었다. 관행농 쌀 1 kg 생산을 기준으로 하는 탄소성적은 국가평균값이 2.39E+00 kg CO<sub>2</sub>-eq. kg<sup>-1</sup>, 사례분석이 1.04E+00 kg CO<sub>2</sub>-eq. kg<sup>-1</sup>으로 국가평균 탄소성적이 사례분석보다 높았다. 쌀 생산 전과정에 투입되는 농자재량은 국가평균과 사례분석이 유사하거나 오히려 사례분석이 더 높게 나타났으나 작기 당 수확량이 높아 사례분석의 탄소성적이 유리한 결과가 나왔다. 관행농 쌀 생산 체계에서 각 생산공정별 환경영향을 분석한 결과 화학비료 생산단계가 대부분의 환경영향범주에서 기여도가 가장 높게 나타났으나, GWP 범주는 벼 재배에 의한 환경영향 기여도가 가장 컸다. 관행농 쌀 생산에서 탄소성적을 결정하는 주요 요인은 논토양에서 발생하는 메탄가스와 비료투입량 및 벼 수확량이었다. 본 연구 결과는 향후 ‘농산물 저탄소인증’ 시범사업에서 배출량 산정을 위한 기초자료와 벼에서 온실가스를 줄이기 위한 영농법 개발에 활용될 것으로 기대된다.

‘저탄소 농산물 인증제도’ 시범사업의 성공을 위해서 쌀을 포함한 농작물에 대한 실제 농가를 대상으로 하는 사례분석 연구가 더욱 늘어나야 할 것이다. 현 단계에서는 자발

적인 참여 농가를 대상으로 하여 활동 데이터 수집을 늘리고, 자료의 일관성과 대표성 보안을 위하여 농가의 활동데이터를 수집할 때 모집단 선별과 수집기간 등에 대한 논의가 필요하다. 또한 현재 국립농업과학원에서 구축하고 있는 DB는 2007년 소득자료를 기준으로 하므로 인증사업 시행 시 사례분석을 적용할 때 몇 가지 한계와 보완사항이 요구되었다. 첫째, 국가평균 통계와 실제 대상농가 간 품종 및 생산연도에 의한 생산량 차이를 보완하기 위한 가중치 적용 등이 필요할 것으로 판단되었다. 둘째, 현재 국가평균 DB를 기준으로 설정된 시스템 경계에서 육묘 용 상토와 벚짚 및 쌀겨 등 부산물과 수확 후 도정 및 포장 등에 대한 시스템 경계 확장 연구 및 이에 관한 LCI DB 구축이 요구되었다.

## 사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업 (과제번호: PJ007874032012)의 지원에 의해 이루어진 것입니다.

## 인 용 문 헌

Bllengini, G.A., and M. Busto. 2009. The life cycle of rice; LCA of alternative agri-food chain management system in Vercelli (Italy). *J. Environ. Manag.* 90:1512-1522.

de Boer, I.J.M. 2003. Environmental impact assessment of conventional and organic milk production. *Livestock Production Science* 80:69-77.

Deurer, M., B. Clothier, K.Y. Huh, G.I. Jun, I. Kim, and D. Kim. 2011. Trends and interpretation of life cycle assessment (LCA) for carbon footprinting of fruit products: focused on kiwifruits in gyeongnam region. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 29(5):389-406

Hokazono, S., and K. Hayashi. 2012. Variability in environmental impacts during conversion from conventional to organic farming: a comparison among three rice production systems in Japan. *J. Cleaner Prod.* 28:101-112.

Huh, K.Y., M. Deurer, S. Sivakumaran, K. McAuliffe, and N.S. Bolan. 2008. Carbon sequestration in urban landscapes: The example of a turfgrass system in New Zealand. *Austral. J. Soil Res.* 46:610-616.

ISO (International Organization for Standardization), 1997. Environmental management-life cycle assessment-principles and framework. International Standard ISO 14040, ISO, Geneva.

Jeong, H.C., G.Y. Kim, D.B. Lee, K.M. Shim, and K.K. Kang. 2011. Assessment of greenhouse gases emission of agronomic sector between 1996 and 2006 IPCC guidelines. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(6):1214-1219.

- Jeong, H.C., G.Y. Kim, D.B. Lee, K.M. Shim, S.B. Lee, and K.K. Kang. 2011. Assessment on nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emission of Korea agricultural soils in 2009. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(6):1207-1213.
- Jung, S.H., J.A. Park, J.H. Huh, and K.H. So. 2011. Estimation of greenhouse gas emission of complex fertilizers production system by using life cycle assessment. *Korean J. Soil. Sci. Fert.* 44(2):256-262.
- KWA (Korea Waste Association). 2007. Agricultural waste data. Korea Waste Association. Seoul, Korea.
- 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 v 4.1.3.
- RDA (Rural Development Administration). 2008. 2007 Agro-livestock data book. Rural Development Administration. Suwon, Korea.
- Ryu, J.H., K.H. Kim, G.Y. Kim, K.H. So, and K.K. Kang. 2011. Application of LCA on lettuce cropping system by bottom-up methodology in protected cultivation. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(6):1195-1206.
- Ryu, J.H., K.H. Kim, K.H. So, G.Z. Lee, G.Y. Kim, and D.B. Lee. 2011. LCA on lettuce cropping system by top-down method in protected cultivation. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(6):1185-1194.
- Tukker, A. 2000. Life cycle assessment as a tool in environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review* 20:435-456.
- van Zeijts, H., H. Leheman, and A.W. Sleswijk. 1999. Fitting fertilisation in LCA: allocation to carops in a cropping plan. *J. Cleaner Prod.* 7:69-74.
- Walmart. 2011. [www.walmartstores.com](http://www.walmartstores.com).
- 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. *Korean J. Org. Agri.* 20(2): 161-172.