

## Carbon Footprint and Mitigation of Vegetables Produced at Open Fields and Film House using Life Cycle Assessment

Lee Deog Bae\*, Jung Sun Chul<sup>1</sup>, So Kyu Ho, Kim Gun Yeob, Jeong Hyun Cheol, and Sonn Yeon Gyu

*Dept. of Agro-environment, National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration*  
<sup>1</sup>*Enbinus*

(Received: September 30 2014, Revised: November 15 2014, Accepted: November 16 2014)

This study was carried out to find out major factors to mitigate carbon emission using Life Cycle Assessment (LCA). System boundary of LCA was confined from sowing to packaging during vegetable production. Input amount of agri-materials was calculated on 2007 Income reference of white radish, chinese cabbage and chive produced at open field and film house published by Rural Development Administration. Domestic data and Ecoinvent data were used for emission factors of each agri-material based on the 1996 IPCC guideline. Carbon footprint of white radish was 0.19 kg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> at open fields, 0.133 kg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> at film house, that of chinese cabbage was 0.22 kg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> at open fields, 0.19 kg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> at film house, and that of chive was 0.66 kg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> at open fields and 1.04 kg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> at film house. The high carbon footprint of chive was related to lower vegetable production and higher fuel usage as compared to white radish and Chinese cabbage. The mean proportion of carbon emission was 35.7% during the manufacturing byproduct fertilizer; white radish at open fields was 50.6%, white radish at film house 13.1%, Chinese cabbage at outdoor 38.4%, Chinese cabbage at film house 34.0%, chive at outdoor 50.6%, and chive at film house 36.0%. Carbon emission, on average, for the step of manufacturing and combustion accounted for 16.1% of the total emission; white radish at open fields was 4.3%, white radish at film house 15.6%, Chinese cabbage at open fields 6.9%, Chinese cabbage at film house 19.0%, chive at open fields 12.5%, and chive at film house 29.1%. On the while, mean proportion of carbon footprint for the step of N<sub>2</sub>O emission was 29.2%, white radish at open fields was 39.2%, white radish at film house 41.9%, Chinese cabbage at open fields 34.4%, Chinese cabbage at film house 23.1%, chive at open fields 28.8%, and chive at film house 17.1%. Fertilizer was the primary factor and fuel was the secondary factor for carbon emission among the vegetables of this study. It was suggested to use Heug-To-Ram web-service system, <http://soil.rda.go.kr>, for the scientific fertilization based on soil testing, and for increase of energy efficiency to produce low carbon vegetable.

**Key words:** White radish, Chinese cabbage, Chive, Life Cycle Assessment, Carbon footprint

**Proportion of CO<sub>2</sub> emission from the steps of production of white radish, Chinese cabbage, and chives cultivated at open fields and film house.**

CO <sub>2</sub> emission step	Items	White radish		Chinese cabbage		Chives	
		Open fields	Film house	Open fields	Film house	Open fields	Film house
Manufacturing agro-materials	Byproduct fertilizer	50.6	13.1	38.4	34.0	42.5	36.0
	Single fertilizer	1.4	1.4	2.0	1.9	0.8	0.5
	Composite fertilizer	12.0	26.2	13.5	7.5	12.8	5.6
	Agricultural chemicals	0.0	0.1	0.0	12.6	0.0	0.0
	Fuel	0.3	7.9	3.4	15.5	9.1	17.1
	Other agro-materials	1.3	1.4	3.1	1.4	1.6	1.1
Vegetable cultivation	Fuel combustion	4.0	7.7	3.5	3.5	3.4	22.0
	N <sub>2</sub> O emission	30.2	41.9	34.4	23.1	28.8	17.1
Disposal of agro-materials	Vinyl, PVC et al	0.3	0.3	1.4	0.5	1.0	0.6
	CO <sub>2</sub> emission (kg CO <sub>2</sub> -eq. kg <sup>-1</sup> )	1.90E-01	1.33E-01	2.21E-01	1.87E-01	6.56E-01	1.04E+00
	Crop yield (Mg ha <sup>-1</sup> )	59.2	69.6	63.5	93.0	37.4	58.5

\*Corresponding author : Phone: +82632382421, Fax: +82632383822, E-mail: ledb419@korea.kr

§Acknowledgement: This study was carried out with the support of Cooperative Research Program for Agricultural Science and Technology Development (Project No. PJ0078742012), Rural Development Administration, Republic of Korea.

## Introduction

주어진 기후와 토양조건에서 농작물의 생산성은 품종과 종묘, 비료, 농약, 냉난방 시설 등 농자재와 시설의 사용에 따라 결정된다. 이들 농자재의 투입 대비 편익 효과는 농가 경영비에 직접적인 영향을 주며, 농경지에 투입된 비료와 농약, 물, 벚짚 등은 수질, 대기질, 토양질에 직·간접적으로 영향을 미치고 있다. 전과정평가법이란 산업 활동이 환경에 미치는 영향을 평가하기 위해 발전되었으며, 산업 활동에 따른 지구온난화, 인체에의 영향, 산성비에의 영향, 고갈성 자원의 소비, 호소에서 부영양화, 생태계의 생물다양성에 미치는 영향, 오존층 파괴에의 영향 등의 모든 과정을 대상으로 분석하는 방법이다 (Hwang, 2003). 이중 농업부문 전과정평가 (LCA, Life Cycle Assessment)는 농작물의 생산량 대비 투입된 농자재의 사용량을 산정하고 이들 농자재가 제조되는 단계와 농자재가 농경지에 투입된 다음 발생하는 환경 부하를 평가하는 방법이다. 따라서 LCA를 농업분야에 적용할 때에는 농자재의 생산과 폐기라는 산업적인 공정과 더불어 물, 햇볕, 토양과 같은 자연자원을 활용하는 공정이 포함되므로 농작물 재배과정에서 투입되는 농기계, 종자, 농약, 비료 등의 생산과 행적에 따른 모든 환경영향을 고려하여야 한다.

2011년도 기준으로 우리나라 농업부문 온실가스 배출량은 21,993 Gg CO<sub>2</sub>-eq이며, 이중 벼 재배 6,813 Gg CO<sub>2</sub>-eq, 농경지 토양 5,759 Gg CO<sub>2</sub>-eq, 잔사소각 43 Gg CO<sub>2</sub>-eq이었다 (Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea, 2013). 농림축산식품부에서는 농업부문 온실가스 감축 목표달성을 위해 저탄소 농축산물 인증제를 도입하였고 2012년부터 2014년까지 시범사업을 실시하고 2015년부터 본격 실시하고자 저탄소 농축산물 인증제 운영규정을 2013년 11월 제정하였고 2014년 3월 확정하였다.

농산물에 대한 탄소성적 산정은 시설재배 상추 생산시스

템간 전과정 평가 (Ryu and Kim, 2011), 콩에 대한 탄소발생량의 전과정 평가 (So et al, 2010), 전과정 평가법을 이용한 고추의 탄소발생량 산정 (So et al, 2010), 감자 생산과정에서 탄소발생량 산정 (So et al, 2010), 고구마 생산과정에서 탄소발생량 평가 (So et al, 2010), 벼 생산 단계에서 탄소발생량과 감축요소 평가 (Lee et al, 2012) 등이 있다. 농산물의 탄소성적은 단위면적당 온실가스 배출량을 농작물 생산량으로 나눈 값을 말한다. 따라서 농자재의 제조와 폐기에 따라 온실가스가 발생하는 점을 볼 때 농자재의 사용량을 줄이는 한편, 생산성을 증대시키면 저탄소 농산물을 생산할 수 있다.

본 연구는 전과정평가법을 이용하여 노지와 시설재배지에서 무, 배추, 부추의 생산과정에서 투입된 농자재의 제조와 폐기, 화석연료 소비 과정에서 이산화탄소 발생량, 질소 질 비료 사용량에 따른 아산화질소 발생량을 산정하여 저탄소 채소생산을 위한 주요 재배요소를 제시하고자 수행되었다.

## Materials and Methods

**분석대상 채소와 전과정 평가 범위** 본 연구는 채소의 탄소발생 주요요소를 분석하고자 대상작물로 노지와 시설재배지에서 생산된 무, 배추, 부추를 선정하였다. 채소 생산 전과정 동안 투입되어 환경으로 부하되는 물질의 목록을 구성하고 환경 전반에 미치는 영향평가는 국제표준화기구 (ISO, International Standard Organization)에서 제정한 환경경영체제에 대한 국제표준규격인 ISO 14040에 의거하여 수행하였다.

대상 농산물의 전과정 평가 대상범위는 경운, 정지, 파종, 육묘, 양분관리, 병해충 및 잡초관리, 관개배수, 수확 및 포장, 재활용과 폐기 작업으로 한정하였고 (Fig. 1), 이러한 채소 생산과정 중에 투입되는 농자재 물량은 2007년 농촌진흥청 표준소득자료집 (Rural Development Administration, 2008)을 근거로 하여 산출하였다. 또한 농자재 운송, 비료

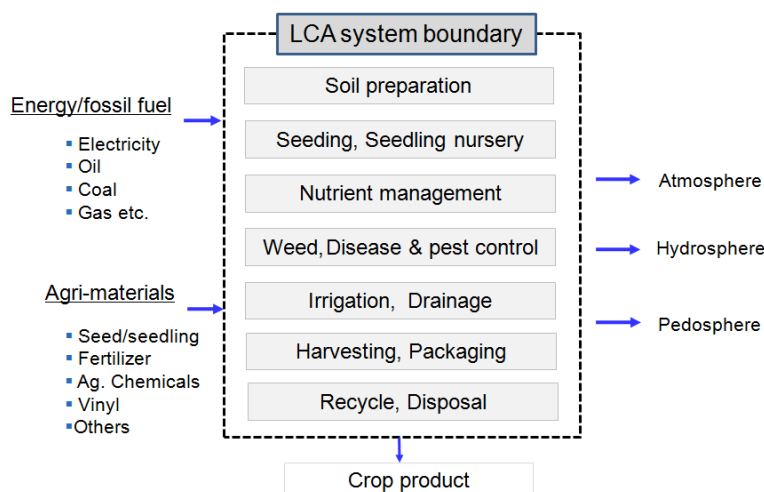


Fig. 1. Framework for life cycle assessment in production of subjected vegetables.

와 농약살포, 기계 제조작업 과정 중 사용된 화석연료량과 농경지에 투입된 다양한 질소원에 의한 N<sub>2</sub>O발생량, 농자재의 폐기에 따른 대기로의 배출물량도 분석하였다.

**전과정 평가에서 가정과 제한사항** 본 연구에서 수집된 자료에 제시된 원료물질들은 질량단위로 환산하였으며 복합비료는 실중량을 바탕으로 유효성분 사용량을 산정하였다. 농약병, 비료포대 등 원부자재 포장에 대한 환경부하는 고려하지 않았으며, 관수시설 등 장기 사용이 가능한 농자재는 기반시설로 간주하여 이로 인한 환경영향은 고려하지 않았다. 데이터베이스가 존재하지 않는 파라미터의 경우 상위 흐름을 연결할 수 없기 때문에 이를 elementary flow라고 가정하여 향후 데이터베이스 구축 시 적용할 수 있도록 하였다. 마지막으로 원부자재의 운송에 대한 환경부하는 관련자료 부재 및 데이터 평균화의 어려움 등으로 배제하였다.

**전과정 목록분석** 본 연구서 노지와 시설재배지 무, 배추, 부추 생산시스템에서 투입과 배출되는 모든 물질들을 물질수지와 할당원칙을 통해 기능단위별로 정량화하였다. 목록분석은 데이터를 수집하고 가공하는 단계로서 본 연구에서 투입량과 배출량은 생체중 1 kg 단위로 산정하였다. 농약투입량은 농촌진흥청의 생산비, 농약연보 (Kor. Crop Protection Association., 2007A)와 농약사용지침서 (Kor. Crop Protection Association., 2007B)를 기준으로 작물별 농약사용 가중치를 적용한 지수를 사용하였다. 과실 생산단계에서 발생하는 비닐, 부직포 등 폐기물량은 영농폐기물 조사자료 (Korea Environment Cooperation, 2007; Ministry of Agriculture and Forest, 2001)에 따라 산정하였다. 여기서 데이터 수집 및 품질 요건은 시간적 경계를 가급적 최근 5년 이내의 최신 데이터와 지역적 경계로서 국내 식량작물 생산 시스템을 기준으로 하는 국내 및 국외 데이터를 이용하였고, 현재 국내에서 상용화된 기술을 기준으로 하는 동일 시스템이나 유사 시스템에 관한 데이터를 이용하였다. 전과정 목록분석 (Life Cycle Inventory Analysis)은 지식경제

부 산하 한국인정원에서 개발한 소프트웨어 PASS (4.1.3)를 사용하였다. 부산물 비료에 대한 탄소발생계수는 윤 등 (2011)의 자료를, 기타 농자재에 대한 탄소발생계수는 Ecoinvent사의 데이터베이스 (Thomas & Thomas, 2007)를 이용하였다.

전과정 목록분석결과 과실 생산단계에서 발생하는 온실가스를 바탕으로 한 탄소성적은 식 (1)의 방법으로 산정하였으며 각각의 인자에 대한 산출식은 식 (2), (3)과 같다.

$$\text{채소의 탄소발생량 (kg CO}_2\text{-eq kg}^{-1}\text{)} = \Sigma(\text{AM, VC, WT}) \tag{1}$$

- AM (Agro-materials Manufacture) : 농자재 제조단계에서 탄소발생량
- VC (Vegetable Cultivation) : 채소 재배단계에서 탄소발생량
- WT(Waste Treatment) : 농자재 폐기과정에서 탄소발생량

$$\text{AM} = \Sigma (\text{FE, VC, FF, CB}) \tag{2}$$

- FE (Fertilizer) : 비료제조단계에서 탄소발생량 (부산물비료, 단일비료, 복합비료)
- AC (Agrichemical) : 농약제조단계에서 탄소발생량
- FF (Fossil Fuel) : 농업용 화석연료 제조단계에서 탄소발생량
- CB (Coverage/Binding) : 피복재, 포트, 비닐 끈 등 농자재의 제조단계에서 탄소발생량

$$\text{VC} = \Sigma (\text{FF comb.}, \text{N}_2\text{O emission}) \tag{3}$$

- Fossil Fuel Combustion : 농작업중 화석연료 연소에 의한 탄소발생량.
- N<sub>2</sub>O Emission : 과수원에서 아산화질소 발생에 따른 탄소발생량

**연료사용에 따른 탄소발생량 산정** 화석연료 연소에 따른 직접적인 대기 배출물은 1996 IPCC 배출계수를 적용

**Table 1. Emission factors and low-heating values of agricultural energy.**

Fuel	Emission factor (kg TJ <sup>-1</sup> )			Low-heating value (MJ/L, NM <sup>3</sup> )
	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	
Light oil	74,100	3.9	3.9	35.4
Kerosene	71,900	3	0.6	35
Heavy oil	77,400	3	0.6	39.1
Gasoline(Transfer)	69,300	33	3.2	31
Gas(Butane/LPG)	63,100	1	0.1	45.7
Natural gas	64,200	3	0.6	40
Anthracite	98,300	1	1.5	19.3

Intergovernmental Panel on Climate Change. 1996. The Revised 1996 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories.

하여 계산하였으며, 농업용 연료의 온실가스 배출량은 Table 1과 식 (4)를 이용하여 산정하였다.

$$\begin{aligned} \text{온실가스 직접대기배출량 (kg GHG)} = & \\ \text{연료 사용량 (L yr}^{-1}) \times \text{저위발열량 (MJ L}^{-1}) \times & \\ \text{단위전환계수 (10E-6)} \times \text{배출계수 (kg GHG TJ}^{-1}) & \quad (4) \end{aligned}$$

작물 생산단계에서 발생하는 온실가스는 UNFCCC의 교토의정서에서 규정한 6대 온실가스인 이산화탄소 (CO<sub>2</sub>), 메탄 (CH<sub>4</sub>), 아산화질소 (N<sub>2</sub>O), 수소불화탄소 (HFCs), 육불화황 (SF<sub>6</sub>), 과불화탄소 (PFCs)를 대상으로 발생량을 산정하였다. 여기서 IPCC 1996 가이드라인에 의거한 지구온난화 지수 (GWP, Global Warming Potential)는 온실가스가 100년 동안 대기에 머물면서 지구에 미치는 온난화 효과를 상대적으로 비교한 것인데, CO<sub>2</sub>를 1로 하였을 때 메탄 (CH<sub>4</sub>)은 21, 아산화질소 (N<sub>2</sub>O)는 310, 수소불화탄소중 HFCs-134a는 1,300, HFCs-152a는 140, HFC-23은 11,700, 육불화황 (SF<sub>6</sub>)은 23,900, 과불화탄소 (PFCs)는 6,500의 값으로 환산하였다.

**채소밭에서 발생된 N<sub>2</sub>O 유래 탄소발생량 산정** 채소밭에서의 아산화질소 (N<sub>2</sub>O) 발생량은 채소 재배용으로 투입된 퇴비와 보통 (화학)비료 중 질소성분의 투입량을 기준으로 1996 IPCC 가이드라인에 의거하여 산정하였다. 농경지에 사용된 질소의 아산화질소 배출계수 (Default 값)인 0.0125 ± 0.01 kg N<sub>2</sub>O-N kg N<sup>-1</sup>를 적용하였고, 화학비료는 사용된 질소의 휘산과 휘산된 질소의 아산화질소로의 전환율을 기준으로 아산화질소 간접배출계수는 0.01 kg N<sub>2</sub>O-N kg N<sup>-1</sup>, 수계로 유출된 질소에 의한 간접배출계수는 0.025 kg N<sub>2</sub>O-N kg N<sup>-1</sup>를 적용하였다. 따라서 이를 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{N}_2\text{O배출량} = \text{N kg ha}^{-1} \times \text{N}_2\text{O/N}_2 \times 310^1) \times & \\ [(\text{RNV} \times \text{EF}_1) + (\text{NV} \times \text{EF}_2) + (\text{RNV} \times \text{N}_{\text{run-off}} \times \text{EF}_3)] & \quad (5) \end{aligned}$$

RNV (Remaining Nitrogen after Volatilization) : 투입 질소의 휘산 후 농지에 남은 비율

NV(Nitrogen Volatilization) : 투입질소의 휘산 비율

N<sub>run-off</sub> : 농경지에서 지표수나 지하수로 유출되는 질소 비율

EF<sub>1</sub>(Emission Factor 1) : 농경지 시용 질소의 N<sub>2</sub>O로 전환비율

EF<sub>2</sub>(Emission Factor 2) : 휘산된 질소의 N<sub>2</sub>O로의 전환 비율

EF<sub>3</sub>(Emission Factor 3) : 수계로 유출된 질소의 N<sub>2</sub>O로의 전환비율

**기타 농자재 사용량 및 폐기물 유래 탄소배출량 산정** 기타 농자재 사용량 계산을 위해선 통계에 제시된 항목의 단위와 상위흐름인 LCI (Life Cycle Inventory) 데이터베이스 기준물질의 단위를 통일시켜야 하는데, 이를 위해 전문가 인터뷰와 시장조사를 통하여 표준 제품 및 규격을 선정한 후 각각의 무게를 직접 측정하고 해당 제조사의 확인 절차를 거쳐 표준 무게와 단위를 확정하였다. 다음으로 폐기물 양에 대한 계산은 환경자원공사에서 공개한 영농폐기물 통계자료 (2007)와 농림부의 시설농업용 폐영농 자재의 농가처리실태와 효율적 관리제도 자료 (2001)를 토대로 연간 농자재 사용량 및 폐기물 유래 탄소발생량을 산정하였다.

## Results and Discussion

**채소 생산단계에서 탄소 발생량** Table 2는 노지와 시설재배지 무, 배추, 부추 생산과정 중 이산화탄소 발생량을 산정한 결과이다. 각 채소 생산단계별 이산화탄소 발생비율을 보면, 노지 무에서는 부산물 비료 제조단계에서 50.6%, 복합비료 제조단계에서 12.0%, 단일비료 제조단계에서 1.4%, 연료제조단계에서 0.3%, 연료 사용단계에서 4.0%, 질소비료 유래 아산화질소 발생단계에서 30.2%로서 비료의 제조와 사용에 따른 발생비율이 94.2%였으며, 연료의 제조와 사용에 따른 발생비율은 4.3%였다. 시설재배지 무는 부산물 비료 제조단계에서 13.1%, 단일비료 제조단계에서 1.4%, 복합비료 제조단계에서 26.2%, 아산화질소 발생단계에서 41.9%, 연료제조단계에서 7.9%, 연료 사용단계에서 7.7%로 나타나서 비료의 제조와 사용에 따른 발생비율은 82.6%였으며 연료의 제조와 연소 단계에서는 15.6%로 나타났다.

노지 배추에서 이산화탄소 발생비율은 부산물 비료 제조 단계에서 38.4%, 단일 비료 제조단계에서 2.0%, 복합 비료 제조단계에서 13.5%, 연료 제조단계에서 3.4%, 연료 사용단계에서 3.5%, 아산화질소 발생 단계에서 34.4%로 나타나서, 비료의 제조와 사용에 따른 발생비율은 88.3%였으며, 연료 제조와 사용에 따른 발생비율은 6.9%였으며, 기타 농자재의 제조와 폐기 단계에서 4.5%가 발생되었다. 한편 시설재배지 배추에서는 부산물 비료 제조단계에서 34.0%, 단일비료 제조단계에서 1.9%, 복합비료 제조단계에서 7.5%, 농약제조단계에서 12.6%, 연료 제조단계에서 15.5%, 기타 농자재 제조단계에서 1.4%, 연료 사용단계에서 3.5%, 아산화질소 발생 단계에서 23.1%, 농자재 폐기 단계에서 0.5%로 나타나서, 비료 제조와 사용에 따른 발생비율은 66.5%, 농약제조 단계에서는 12.6%, 연료 제조와 사용단계에서는 19.0%가 발생되었다.

1) N<sub>2</sub>O의 Global warming potentiality (1996 IPCC Guideline)

**Table 2. Proportion of CO<sub>2</sub> emission from the steps of production of white radish, Chinese cabbage, and chives cultivated at open fields and film house.**

CO <sub>2</sub> emission step	Items	White radish		Chinese cabbage		Chives	
		Open fields	Film house	Open fields	Film house	Open fields	Film house
Manufacturing agro-materials	Byproduct fertilizer	50.6	13.1	38.4	34.0	42.5	36.0
	Single fertilizer	1.4	1.4	2.0	1.9	0.8	0.5
	Composite fertilizer	12.0	26.2	13.5	7.5	12.8	5.6
	Agricultural chemicals	0.0	0.1	0.0	12.6	0.0	0.0
	Fuel	0.3	7.9	3.4	15.5	9.1	17.1
	Other agro-materials	1.3	1.4	3.1	1.4	1.6	1.1
Vegetable cultivation	Fuel combustion	4.0	7.7	3.5	3.5	3.4	22.0
	N <sub>2</sub> O emission	30.2	41.9	34.4	23.1	28.8	17.1
Disposal of agro-materials	Vinyl, PVC et al	0.3	0.3	1.4	0.5	1.0	0.6
CO <sub>2</sub> emission (kg CO <sub>2</sub> -eq. kg <sup>-1</sup> )		1.90E-01	1.33E-01	2.21E-01	1.87E-01	6.56E-01	1.04E+00
Crop yield (Mg ha <sup>-1</sup> )		59.2	69.6	63.5	93.0	37.4	58.5

노지 부추에서 이산화탄소 발생비율은 부산물 비료 제조 단계에서 42.5%, 단일 비료 제조단계에서 0.8%, 복합비료 제조단계에서 12.8%, 연료 제조단계에서 9.1%, 기타 농자재 제조단계에서 1.6%, 연료 사용단계에서 3.4%, 아산화질소 발생 단계에서 28.8%, 농자재 폐기단계에서 1.0%로 나타나서, 비료의 제조와 사용에 따른 발생비율은 84.9%, 연료의 제조와 사용에 따른 발생비율은 12.5%가 발생되었다. 시설 재배지 부추에서 이산화탄소 발생비율을 보면, 부산물 비료 제조단계에서 36.0%, 단일 비료 제조단계에서 0.5%, 복합 비료 제조 단계에서 5.6%, 연료 제조단계에서 17.1%, 기타 농자재 제조단계에서 1.1%, 연료 사용단계에서 22.0%, 아산화질소 발생 단계에서 17.1%, 농자재 폐기단계에서 0.6%로 나타나서, 비료 제조와 사용 단계에서 59.2%, 연료 제조와 사용단계에서 39.1%가 발생되었다.

**합리적인 비료사용을 통한 온실가스 감축방안** 기후변화시대에 농업의 경쟁력을 강화하기 위해서는 온실가스 감축법과 적절한 품종과 재배법을 개발하고, 농산물 안정생산을 위한 농경지 확보와 농산물의 수급안정을 위한 기술과 시설가동 등이 필요하다 (Lee and Shim, 2012). 이의 실행방안으로서 농림축산식품부에서는 2012년부터 2014년까지 저탄소농축산물인증제를 시범적으로 운영하고 있으며, 2015년부터 본격적인 시행을 위해 저탄소농축산물인증 운영규정 (Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs, 2014)도 제정하였다. 저탄소 농축산물이란 저탄소 농업기술 등을 통하여 농축산물 생산 전과정에서 발생하는 온실가스량이 해당 품목의 평균값보다 낮은 농축산물을 말한다. 또한 저탄소 농업기술이란 농업부문 온실가스 배출을 줄이고 에너지를 효율적으로 이용하는 영농방법과 관련 기술이라고 정의하고 있다. 농축산물의 탄소 성적이란 농산물 생산

과정에서 발생한 총 탄소량을 농산물 생산량으로 나눈 것을 말한다.

농산물 생산과정 중 온실가스 발생량은 농자재의 제조단계, 사용단계 그리고 폐기단계에 따라 산정될 수 있으며, 본 연구에서 공시된 6종의 채소 생산단계에서 이산화탄소발생량이 가장 많은 요소는 부산물 비료의 제조과정이 평균 35.7%이었고, 두 번째는 질소 비료유래 N<sub>2</sub>O발생과정이 평균 29.2%였으며, 세 번째는 복합비료 제조단계로서 평균 12.9%였으며, 네 번째는 연료제조단계로서 평균 8.8%였으며, 다섯 번째는 연료사용 단계로서 평균 7.3%였다. 이를 다시 농자재 제조와 사용단계별로 종합하면, 비료제조와 사용에 의해 평균 77.8%가 발생되었고, 농업에너지 제조와 사용에 의해 16.1%가 발생되었다는 것을 알 수 있었다. 결국 비료와 연료의 합리적인 사용이 저탄소 농산물 생산의 핵심 요소임을 알 수 있다.

비료를 합리적으로 투입하기 위해서는 먼저 농촌진흥청의 흙토람 웹 시스템 (soil.rda.go.kr)을 통해 비료사용처방서를 활용할 필요가 있다. 비료사용처방서는 농경지가 보유하고 있는 양분함량과 농작물의 안정생산에 필요한 양분요구량을 평가하여 추가로 공급되어야 하는 비료의 성분량을 알려 준다. 농업인들이 비료사용처방서를 발급받기 위해서는 해당 농경지에 재배작물을 결정한 다음 토양을 채취하여 의뢰하면 된다. 이후 농업기술센터와 도 농업기술원에서는 토양검정을 하여 해당 작물재배에 필요한 질소, 인산, 칼리질 비료, 퇴비와 석회소요량 정보가 담긴 비료사용처방서 (Table 3)를 무료로 제공해주고 있다. 2012년 12월 현재 비료사용처방이 가능한 작물은 총 112종이며, 이중 곡물은 7종, 유지류는 3종, 서류는 2종, 과채류는 12종, 근채류는 5종, 인경채류는 2종, 경엽채류는 22종, 산채류는 10종, 과수는 14종, 약용작물 25종, 화훼류 5종, 기타 5종이며 (Lee et

**Table 3. Fertilizer recommendation based on soil testing for vegetable cultivation.**

Items	Contents
Vegetable farm land	Address and area of land
	Kinds and age of crop
	Texture, category, drainage, characteristics of soil
Soil testing and nutrients criteria	Nutrient content of each farmland
	Nutrients managing criteria
Fertilizer Recommendation	Recommended fertilization of nitrogen, phosphate, potassium, compost and lime for each farm address

al, 2013), 매년 대상작물을 확대하고 있다.

둘째는 적절한 비료 종류를 선택하는 것이 중요하다. 질소 비료종류별 논에서 CH<sub>4</sub>의 배출량을 비교한 결과를 보면 요소사용으로 연간 ha당 3.29 kg의 CH<sub>4</sub>가 발생되는데 비해 유안을 사용하면 92.1%, 완효성 비료인 LCU (Latex Coated Urea)를 사용하면 발생량이 80.2% 수준으로 낮았다 (Kim et al, 2009)고 하였다. 또한 벼 밀거름용 맞춤 16호 비료는 단일비료 대비 제조단계에서 탄소발생량이 12.1%나 적어 (Jung et al, 2012) 이를 사용하면 탄소발생량이 낮은 벼를 생산할 수 있게 된다. 또한 동일한 양의 질소 투입조건에서도 보통 (화학)비료 단용이 보통 (화학)비료와 돈분퇴비 병용보다 아산화질소 배출량이 적었고, 부산물 비료인 퇴비의 종류별 아산화질소 배출량도 우분퇴비가 가장 적고 다음으로 계분퇴비 돈분 퇴비 순이었다 (Kim et al, 2011)고 한다.

셋째, 비료의 효과적인 사용방법이 중요하다. 일례로서 완효성 비료인 LCU로 측조시비하면 전층시비 대비 질소사용량을 26%감축하고서도 벼 수량이 증대되었다 (Oh et al, 1989)고 한다. 또한 배추 재배시 국소시비에 의해 질소질 비료 사용량을 30% 절감하고도 수량이 증대되어 농가소득이 18%나 증가되었다고 한다 (Yang et al., 2006).

농촌진흥청 흙토람의 비료사용처방서는 정부3.0사업과 연계하여 2015년부터는 농산물품질관리원의 인증프로그램에 전자문서로 연결되어 친환경 농산물 인증과 우수 농산물 인증 업무용으로 활용될 예정이다. 이같은 전자문서 연결시스템을 이용하면 농업인들은 비료사용처방서의 발급과 제출의 시간을 절약할 수 있는 반면에, 농산물 품질관리원에서는 농업인들의 농경지 비옥도 관리에 대한 이력정보를 파악할 수 있어서 인증업무 효율화에 기여할 수 있게 될 것이며, 금후 저탄소농산물 인증프로그램과의 연계활용도 가능해 질 것이다.

## Conclusions

본 연구는 노지와 시설재배지 채소 생산과정에서 주요 탄소발생요소를 진단하고 대응방안을 설정하고자 수행되었다. 채소생산단계에서 탄소발생량 산정범위는 채소 파종기

부터 수확기까지로 한정하였으며, 이때 투입되는 농자재의 종류와 사용량은 농촌진흥청 2007년도 표준소득자료집에서 산출하였다.

채소 1 kg 생산과정 중 발생된 CO<sub>2</sub>는 노지 무 0.19 kg, 시설재배 무는 0.13 kg, 노지 배추 0.22 kg, 시설 배추 0.19 kg, 노지부추 0.66 kg, 시설부추 1.04 kg이었다.

공시된 채소의 생산단계별 CO<sub>2</sub>의 발생비율을 보면, 부산물 비료 제조단계에서 평균 35.7%가 발생되었는데, 노지 무는 50.6%, 시설 무는 13.1%, 노지 배추는 38.4%, 시설재배지 배추는 34.0%, 노지 부추는 50.6%, 시설재배지 부추는 36.0%이었다. 복합비료 제조단계에서는 평균 12.9%가 발생되었는데, 품목별로는 노지 무는 12.0%, 시설재배지 무는 26.2%, 노지 배추는 13.5%, 시설 재배지 배추는 13.5%, 시설 배추는 7.5%, 노지 부추는 12.8%, 시설재배지 부추는 5.6%였다. 에너지 제조와 사용단계에서 평균 16.1%의 아산화탄소가 발생되었으며, 품목별로는 노지 무는 4.3%, 시설재배지 무는 15.6%, 노지 배추는 6.9%, 시설 재배지 배추는 19.0%, 노지 부추는 12.5%, 시설 재배지 부추는 29.1%였다.

아산화질소 발생단계에서는 평균 29.2%의 아산화탄소가 발생되었으며, 품목별로는 노지 무가 39.2%, 시설 재배지 무가 41.9%, 노지 배추가 34.4%, 시설 재배지 배추가 23.1%, 노지 부추가 28.8%, 시설 재배지 부추가 17.1%였다.

## References

- Blengin, G. A., and M. Busto. 2009. The life cycle of rice: LCA of alternative agri-food chain management systems in Vercelli (Italy). *J. Env. Management*. 90:1512-1522.  
<http://soil.rda.go.kr/soil/sibi/sibiPrescript.jsp>.
- Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea. 2014. Report on Greenhouse Gas Inventory of 2013. 185-213.
- Hwang, S. J. 2003. Practical introduction of LCA (Translated). Sigma Press. 50-51 (In Korean).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1996. The Revised 1996 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories.
- ISO (International Organization for Standardization), ISO 14040: 2006 (E) Environmental management - Life cycle assessment

- Principles and Framework.

- Jung, S.C., D.B. Lee, J.W. Jeong, and J. Huh. 2012. Carbon emission of customized fertilizer (No. 16) and comparison with single fertilizer. *Journal of the Korean Society for Life Cycle Assessment*. 13(1):109-119 (In Korean with English abstract).
- Kim, G.Y., K.A. Rho, G.M. Shim, H.C. Jeong, G.H. So, B.G. Ko, K.B. Lee, and J.Y. Ko. 2009. Paddy rice cultivation practice for mitigation GHGs. National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration. 72-74 (In Korean).
- Kim, G.Y., G.H. So, H.C. Jeong, S.B. Lee, and G.M. Shim. 2011. Upland crop cultivation practice for mitigation GHGs. National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration. 27-29 (In Korean).
- Korea Crop Protection Association. 2007A. Annual report on agro-chemicals (In Korean).
- Korea Crop Protection Association. 2007B. Usage guideline for agro-chemicals (In Korean).
- Korea Environment Cooperation. 2007. Survey on wastes from agricultural materials (In Korean).
- Lee, D.B. and G.M. Shim. 2012. How to strength competence of agriculture to confront climate change. 25 Experts give solution to confront climate change (Book). Geobook. 494-495 (In Korean).
- Lee, D.B., S.C. Jung, G.H. So, J.W. Jeong, H.C. Jeong, G.Y. Kim, and G.M. Shim. 2012. Evaluation of mitigation technologies and footprint of carbon in unhulled rice production. *Climate Change Research*. 3(2):129-142.
- Lee, Y.J., S.S. Kang, and D.B. Lee. 2013. Fertilizer Recommendation Program of Heuk-To-Ram (Book). National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration (In Korean).
- Ministry of Agriculture and Forest. 2001. Survey on wastes of agri-materials in protected agriculture and effective management system (In Korean with English abstract).
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. 2014. Regulation for certification of Low carbon agro-products. 2014-18, Announcement of Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs No. 2014-18 (In Korean).
- Oh, Y.B., Y.D. Yoon, R.K. Park, and Y.H. Kwag. 1989. Effect of sideband placement under rice transplanting cultivation. 1. Effect of sideband placement by fertilizer kind. Report of RDA (Paddy rice) 31(4):49-55 (In Korean with English abstract).
- Rural Development Administration. 2008. Income reference of agro-products in 2007(book). White radish, Chinese cabbage, Chive (In Korean).
- Ryu, J.H. and K.H. Kim. 2011. Application of LCA Methodology on Lettuce Cropping Systems in Protected Cultivation. *J. Kor. Soc. Soil and Fertilizer*. 43(5):583-593.
- So, K.H., G.Z. Lee, G.Y. Kim, H.C. Jeong, J.H. Ryu, J.A. Park, and D.B. Lee. 2010. Estimation of Carbon Emission and LCA (Life Cycle Assessment) from Soybean (*Glycine max L.*) Production System. *J. Kor. Soc. Soil and Fertilizer*. 43(6):898-903.
- So, K.H., J.A. Park, J. Huh, K.M. Shim, J.H. Ryu, G.Y. Kim, H.C. Jeong, and D.B. Lee. 2010. Estimation of Carbon Emission and LCA (Life Cycle Assessment) from Pepper (*Capsicum annuum L.*) Production System. *J. Kor. Soc. Soil and Fertilizer*. 43(6):904-910.
- So, K.H., G.Z. Lee, G.Y. Kim, H.C. Jeong, J.H. Ryu, J.A. Park, and D.B. Lee. 2010. Estimation of Carbon Emission and LCA (Life Cycle Assessment) From Sweet potato (*Ipomoea batatas L.*) Production System. *J. Kor. Soc. Soil and Fertilizer*. 43(6):892-897.
- So, K.H., J.H. Ryu, K.M. Shim, G.Z. Lee, K.A. Roh, D.B. Lee, and J.A. Park. 2010. Estimation of Carbon Emission and Application of LCA (Life Cycle Assessment) from Potato (*Solanum tuberosum L.*) Production System. *J. Kor. Soc. Soil and Fertilizer*. 43(6):606-611.
- Thomas, N. and K. Thomas. 2007. Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems Data v2.0. Ecoinvent report No. 15.
- Yang, C.H., C.H. Yoo, B.W. Shin, and S.W. Kang. 2006. Effect of band spotty fertilization for reduction of nitrogen fertilizer on Chinese Cabbage (*Brassica campestris L.*) in plastic film mulching cultivation. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 39(2):95-101.
- Yun, S.Y., J.E. Jo, T.H. Kim, K.H. Kim, and B.H. Shon. 2011. LCI D/B and calculation of carbon footprint of agro-materials for organic farming. Mid-term Report of research supported Rural Development Administration (In Korean with English abstract).