

## 감자의 생산과정에서 발생하는 탄소배출량 산정과 전과정평가의 적용

소규호\* · 유종희 · 심교문 · 이길재<sup>1</sup> · 노기안 · 이덕배 · 박정아<sup>2</sup>

국립농업과학원 농업환경부 기후변화생태과, <sup>1</sup>농업기술실용화재단, <sup>2</sup>에코네트웍(주)

### Estimation of Carbon Emission and Application of LCA (Life Cycle Assessment) from Potato (*Solanum tuberosum* L.) Production System

Kyu-Ho So\*, Jong-Hee Ryu, Kyo-Moon Shim, Gil-Zae Lee<sup>1</sup>, Kee-An Roh,  
Deog-Bae Lee and Jung-Ah Park<sup>2</sup>

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

<sup>1</sup>Econetwork Co., Ltd. Seoul, 137-888, Korea

<sup>2</sup>Foundation of Agri. Tech. Commercialization & Transfer Suwon, 441-857, Korea

This study was carried out to estimate carbon emission using LCA and to establish LCI database of potato production system. Potato production system was categorized into the fall season potato and the spring season potato according to potato cropping type. The results of collecting data for establishing LCI D/B showed that input of fertilizer for fall season potato production was more than that for spring season potato production. Input of pesticide for spring season potato production was much more than that for fall season potato production. The value of field direct emission (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) were 2.17E-02 kg kg<sup>-1</sup> for spring season potato and 2.47E-02 kg kg<sup>-1</sup> for fall season potato, respectively. The result of LCI analysis focussed on the greenhouse gas (GHG), it was observed that carbon footprint values were 8.38E-01 kg CO<sub>2</sub>-eq. kg<sup>-1</sup> for spring season potato and 8.10E-01 kg CO<sub>2</sub>-eq. kg<sup>-1</sup> for fall season potato; especially for 90% and 6% of CO<sub>2</sub> emission from fertilizer and potato production, respectively. N<sub>2</sub>O was emitted from the process of N fertilizer production (76%) and potato production (23%). It was observed that characterization of values of GWP were 8.38E-01 kg CO<sub>2</sub>-eq. kg<sup>-1</sup> for spring season potato and 8.10E-01 kg CO<sub>2</sub>-eq. kg<sup>-1</sup> for fall season potato.

**Key words:** LCI, Carbon footprint, LCIA, LCA, Potato production system, Spring season potato, Fall season potato

## 서 언

LCA (Life Cycle Assessment, 전과정평가)를 도입한 국내 농업환경영향평가는 출발 단계에 있다. 국내에서는 2009년 처음으로 LCA를 도입한 농업 환경영향평가를 위해 1차 농수축산물 중 식량작물을 중심으로 인벤토리 데이터베이스 구축을 시작하였다. 따라서 농업환경에 있어 주요 인자인 비료 및 농약에 대한 환경영향평가와 이를 위한 국내 비료 및 농약의 흐름 모델링, 방법론 개발이 요구되며, 국내 농업 시스템을 반영한 기타 농자재, 농기계 및 농업기반시설에 대한 환경영향평가 역시 수행되어야 한다. 농업분야에 LCA가 도입되면 이를 바탕으로 현재 탄소성적표지제도를 위한 1차 농축

산물에 대한 탄소성적을 산출할 수 있으며, 그에 따른 저탄소 농산물 인증제의 도입도 가능할 것이다.

LCA를 적용한 농업환경평가에 관한 연구는 주요 선진국에서 이미 다양하게 수행되고 있으며, 농작물에 대한 데이터베이스가 가장 체계적이고 다양하게 구축되어 있는 국가는 스위스로, 스위스 D/B 구축 센터인 에코인벤토리가 주축이 되어 농작물, 농업기반시설, 농자재, 농기계 등 농축산 전반에 대한 LCI D/B를 구축하여 제공하고 있다 (Frischknecht, R. and G. Rebitzer, 2005).

감자는 기후에 따라 작부형태가 크게 영향을 받으며, 비교적 한랭한 연평균 4.5~10°C 온대기후 지역에서 잘 자라고, 특히 감자의 왕성한 성장과 수확기에 저온, 건조한 기후조건이 중요하다. 이 때에 습하고 고온 조건이 되면 감자역병 (*P. infestans*)이 발생하기 쉽다 (Lee, 1999). 우리나라의 재배환경은 기후적으로 계절이 뚜렷하게 구분되므로 이에 따라 작형이 여러 가지로 분화되

접수 : 2010. 9. 30 수리 : 2010. 10. 15

\*연락처 : Phone: +82312900230

E-mail: khs0@korea.kr

어 있다. 2007 농산물 소득자료에 의하면 감자의 생산 규모는 재배면적 26,271 ha, 평균생산 2,106 kg 10a<sup>-1</sup>, 총생산 553 ton이다 (RDA, 2008). 2006년 봄감자의 전국 재배면적은 14,960 ha로 전년대비 25.3% 증가하였고, 가을감자는 총 3,493 ha로 전년대비 42.1% 증가하였다 (NAQS, 2006).

이에 본 연구에서 감자생산체계를 봄감자와 가을감자의 2가지 작부형태로 구분하고 파종에서 수확기까지 1년 1기작을 기준으로 감자에 대한 1차 농산물 및 농자재의 LCI D/B를 구축하여 감자 생산체계의 탄소원단위를 산정하고 전과정 영향평가를 수행하였다.

### 재료 및 방법

국제표준화기구 (ISO, International Standard Organization)에서 제정한 환경경영체제에 관한 국제표준 ISO 14040의 규격에 의거하여 (ISO, 2006) 감자를 작형에 따라 봄감자와 가을감자생산체제로 나누어 전과정평가 (LCA, Life Cycle Assessment)를 수행하였다.

#### 연구 목적 및 범위 (Goal and Scope definition)

본 연구의 목적은 감자생산체계의 탄소배출성적의 산출

과 이를 위한 감자생산체계에 관한 LCI D/B의 구축 및 감자생산체계에 대한 전과정 영향평가로 정의하였다. 감자의 기능은 식용 및 각종 식품 제조의 원료이며, 기능단위는 식품 및 식품 제조의 원료용으로 사용되는 감자 1 kg 생산으로 정의하였다. 감자의 시스템경계를 Fig. 1과 같이 설정하였다. 농업생산시스템에 대한 시스템 경계는 농작물 생산에 사용되는 원료물질의 채취와 농작물 생산단계까지를 고려한 ‘Gate to Gate’를 원칙으로 하였다. 식량 작물을 생산하기 위해서는 기본적으로 원료물질인 종자 및 종묘를 투입하며, 육묘, 정식, 재배, 수확의 단계를 거쳐 농작물이 생산될 때까지 전기, 경유와 같이 다양한 에너지와 농약, 비료 등과 같은 보조물질이 투입된다. 그리고 이러한 과정 중에서 이산화탄소, 메탄, 아산화질소, 폐농자재 등과 같은 배출물이 발생하게 된다. 원료물질, 에너지, 농자재의 투입은 기본적으로 자원고갈이라는 환경영향을 끼치며, 이들의 사용으로 인해 발생하는 배출물은 지구온난화, 생태독성, 산성화, 부영양화 등의 환경영향을 야기하므로 LCA를 통해 이들의 환경영향을 정량적으로 분석하였다 (Brenttrup et al, 2004).

#### 전과정 목록분석 (Life Cycle Inventory Analysis)

감자생산에 대한 인벤토리 목록 구축을 위한 입출력 자

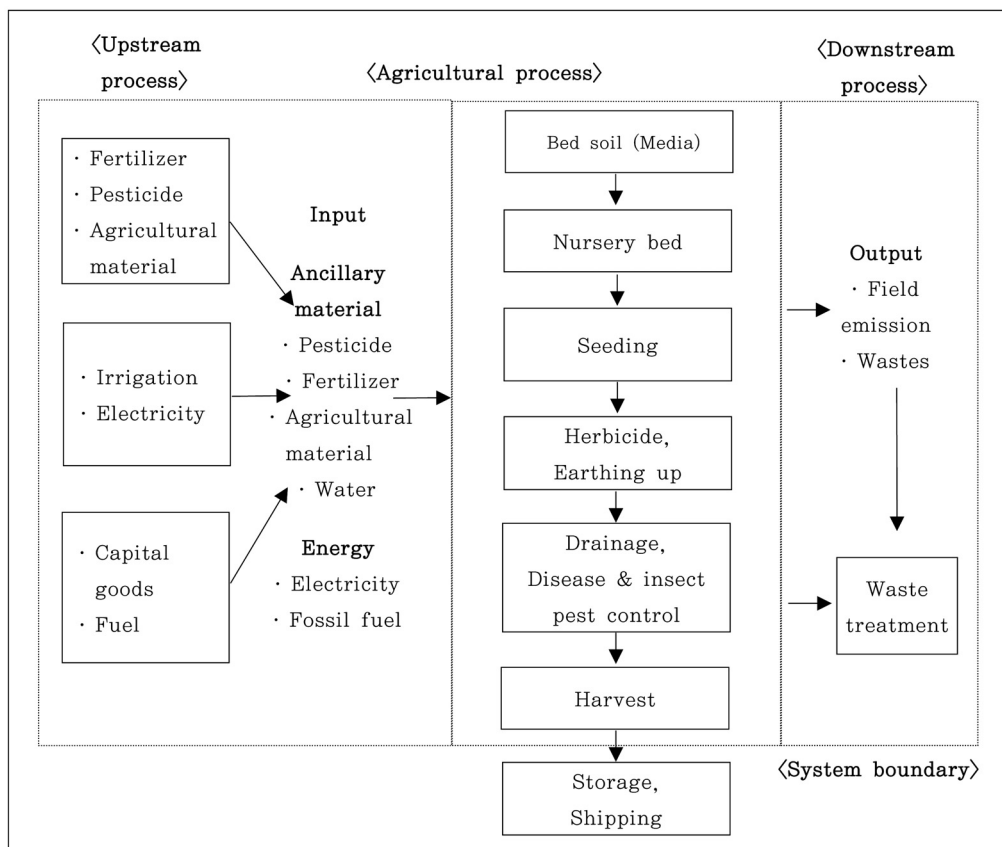


Fig. 1. System boundary (cradle to gate) for production of potato.

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

Impcat categories	Abbreviation	Unit
Abiotic resource Depletion	ADP	l yr <sup>-1</sup>
Global Warming Potential	GWP	kg CO <sub>2</sub> -eq. kg <sup>-1</sup>
Ozone Depletion potential	ODP	kg CFC-eq. kg <sup>-1</sup>
Acidification Potential	AP	kg SO <sub>2</sub> -eq. kg <sup>-1</sup>
Eutrophication Potential	EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3--</sup> -eq. kg <sup>-1</sup>
Photochemical Ozone Creation Potential	POCP	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq. kg <sup>-1</sup>
Human Toxicity Potential	HTP	kg 1,4 DCB-eq. kg <sup>-1</sup>
Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential	FAETP	kg 1,4 DCB-eq. kg <sup>-1</sup>
Marine Aquatic Ecotoxicity Potential	MAETP	kg 1,4 DCB-eq. kg <sup>-1</sup>
Terrestrial Ecotoxicity Potential	TETP	kg 1,4 DCB-eq. kg <sup>-1</sup>

료는 2007 농축산소득자료집 (RDA, 2008)을 중심으로 관련 통계, 문헌자료, 설문조사, 전문가 인터뷰, 현장방문을 통하여 수집하였다. LCI 분석을 통한 탄소원단위 성적 산정을 위하여 지식경제부 산하 한국인정원에서 개발한 소프트웨어 (PASS 4.1.3)를 사용하였다. 이때 시스템 상·하위 흐름 D/B는 국내 환경부, 지경부 D/B와 국내 구축물이 없는 경우 해외 D/B (스위스 Ecoinvent database)를 사용하였다. 영농 투입량을 수집할 때 복합 비료의 사용량은 유효성분사용량을 바탕으로 추정하였으며, 농약사용량은 작물별 농약 사용가중치를 적용한 지수를 사용하여 계산하였고 (KCPA, 2007), 연료 사용 및 비료 사용으로 인한 대기배출물은 IPCC 1996 배출계수를 통해 배출량을 산출하였다. 영농폐기물 배출 및 처리량은 농업폐기물 통계 (KWA, 2007, MIFAFF, 2004) 등의 자료를 토대로 배출량을 산정하였다. 여기서 농약 병, 비료포대 등의 운부자재 포장에 대한 환경부하는 고려되지 않았으며, 농업폐기물은 비료 사용으로 인한 직접토양배출물은 적합한 배출계수의 부재로 고려하지 않았다. 영구 재사용이 가능한 농자재는 시설로 간주하여 이로 인한 환경영향은 고려하지 않았다.

#### 전과정 영향평가 (Life Cycle Impact Assessment)

전과정 영향평가를 위하여 지식경제부 산하 한국인정원에서 개발한 소프트웨어 (PASS 4.1.3)를 사용하였다. 평가된 결과는 분류화와 특성화 과정을 거쳐 각 영향범주와 관련된 잠재적 환경영향을 특성화값으로 각각의 단위로 표시하였다 (Table 1).

## 결과 및 고찰

**전과정 목록분석** LCI 구축을 위한 영농 투입·배출물과 이에 따른 투입량과 배출량에 대한 데이터 값

및 자료 출처를 Table 2에 나타내었다. 조사 결과 투입량이 가장 많은 항목은 비료였고 그 값은 봄감자 9.16E-01 kg<sup>-1</sup> potato, 가을감자 8.62E-01 kg<sup>-1</sup> potato로 봄감자가 약간 높았다. 전체 투입량에서 비료가 차지하는 비율은 봄감자 99%, 가을감자 98%로 투입의 대부분을 차지하였다. 봄감자와 가을감자의 비료투입량 및 전체 영농투입량은 봄감자가 다소 많았으나, 질소비료투입은 가을감자가 다소 많았고, 특히 화학비료 (무기질비료)의 투입량이 봄감자에 비해 매우 높았다. 봄감자는 유기질비료가 가을감자보다 다소 많았다. 유기질 비료 투입량은 봄감자, 가을감자 각각 8.29E-01, 7.19E-01 kg kg<sup>-1</sup> potato였고, 무기질비료는 봄감자와 가을감자가 각각 8.68E-02 kg kg<sup>-1</sup> potato와 1.43E-01 kg kg<sup>-1</sup> potato였다. 감자 재배 중에 포장에서 발생하는 직접대기배출 (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O)은 봄감자와 가을감자가 각각 2.17E-02 kg kg<sup>-1</sup> potato 2.47E-02 kg kg<sup>-1</sup> potato였다.

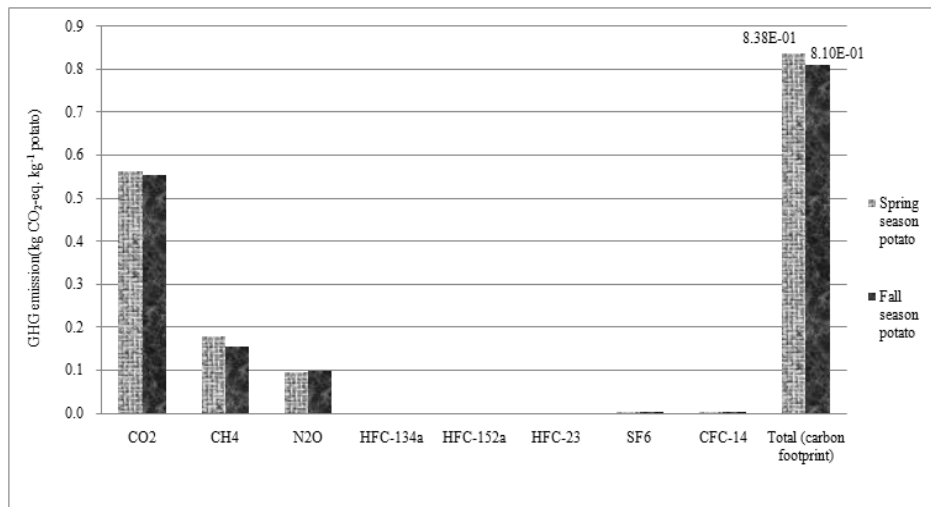
**탄소원단위 성적** 인벤토리 구축을 위한 입출력 자료를 기본으로 전과정 목록분석을 수행하였다. 감자생산체계에서 발생하는 대기배출물 중 교토의정서에서 규정한 6대 온실가스 (GHG, Green House Gas)는 이산화탄소 (CO<sub>2</sub>), 메탄 (CH<sub>4</sub>), 아산화질소 (N<sub>2</sub>O), 수소불화탄소 (HFCs), 육불화황 (SF<sub>6</sub>), 과불화탄소 (PFCs)의 배출량을 CO<sub>2</sub> 상등값으로 환산하여 탄소배출성적을 산정하였다 (Fig. 2).

분석결과 봄감자 생산체계의 원단위탄소성적은 8.38E-01 kg CO<sub>2</sub>-eq. kg<sup>-1</sup> potato고, 가을감자는 8.10E-01 kg CO<sub>2</sub>-eq. kg<sup>-1</sup> potato였다. 전체 투입량이 다소 많고 특히 유기질비료의 투입량이 2배 정도 많았던 봄감자 생산체계가 다소 높은 탄소성적값을 보였으나 차이는 매우 근소하였다.

**전과정 영향평가** 전과정 영향평가 결과를 각 영향

**Table 2. Data of Inputs and outputs for the potato cultivation.**

Input/Output	Unit	Quantity		Data source
		Spring season potato	Fall season potato	
----- kg <sup>-1</sup> product (potato) -----				
<b>Input</b>				
seed	kg	5.86E-02	1.25E-01	2007 incomes data (RDA, 2008)
composts	kg	8.29E-01	7.19E-01	2007 incomes data (RDA, 2008)
N fertilizers	kg	4.76E-04	5.33E-04	2007 incomes data (RDA, 2008)
P fertilizers	kg	1.19E-04	-	2007 incomes data (RDA, 2008)
k fertilizers	kg	2.77E-04	1.95E-03	2007 incomes data (RDA, 2008)
compound fertilizers	kg	7.76E-02	1.35E-01	incomes data (RDA, 2008; KFIA, 2007)
lime	kg	5.91E-03	3.32E-03	2007 incomes data (RDA, 2008)
Boron	kg	1.19E-04	3.55E-04	2007 incomes data (RDA, 2008)
silicate fertilizer	kg	2.34E-03	1.95E-03	2007 incomes data (RDA, 2008)
pesticides	kg	7.66E-04	3.67E-04	Agrochemical year book, Agrochemical use guide book (KCPA, 2007)
electricity	kw	1.03E-03	2.84E-03	2007 incomes data (RDA, 2008)
fossil feul	L	7.15E-03	8.15E-03	2007 incomes data (RDA, 2008)
vinyl	m	3.01E-03	3.24E-03	2007 incomes data (RDA, 2008)
string(HPP)	kg	5.95E-05	-	2007 incomes data (RDA, 2008)
<b>Output</b>				
direct emissions (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O)	kg	2.17E-02	2.47E-02	IPCC 1996
waste treatment	kg	7.84E-04	8.27E-04	KWA, 2007; MIFAFF, 2004
<b>product (potato)</b>	kg	1.00E+00	1.00E+00	2007 incomes data (RDA, 2008)



**Fig. 2. Carbon footprint calculated by LCI of potato production system.**

범주별로 나타내었다 (Fig. 3). 평가 결과 봄감자의 GWP 특성화값은 8.38E-01 kg CO<sub>2</sub>-eq. kg<sup>-1</sup>이고, 가을감자는 8.10E-01 kg CO<sub>2</sub>-eq. kg<sup>-1</sup>이었다. 비료생산 및 시용에 의한 환경영향범주에 속하는 영향범주 (GWP, POCP, AP, EP)에서는 봄감자와 가을감자의 환경부하에 대한 기여도가 약 50%로 거의 같았다. 그러나 농약 생산 및 사용과 관련이 깊은 생태독성과에 대한 영향범주들은 봄감자의 기여도가 약 60%로 다소 높게 나타났다. 감자생산의 총 비료 투입량은 두 작형에서 차이가

매우 근소하였으나, 농약의 경우 봄감자의 투입량이 2 배 정도 많았다. 농약과 비료의 투입량이 미치는 환경영향효과에 대한 민감도 분석 및 이들의 환경경로에 대한 기작의 과학적 검증이 필요할 것으로 판단되었다.

**해석 (Interpretation)** 온실가스 중 밭 작물생산에서 주로 발생하는 CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O를 대상으로 공정간 기여도를 분석하기 위하여 탄소배출의 경로를 비료 생산공정, 농약 생산공정, 에너지 생산공정, 농자재 생산공정, 보리

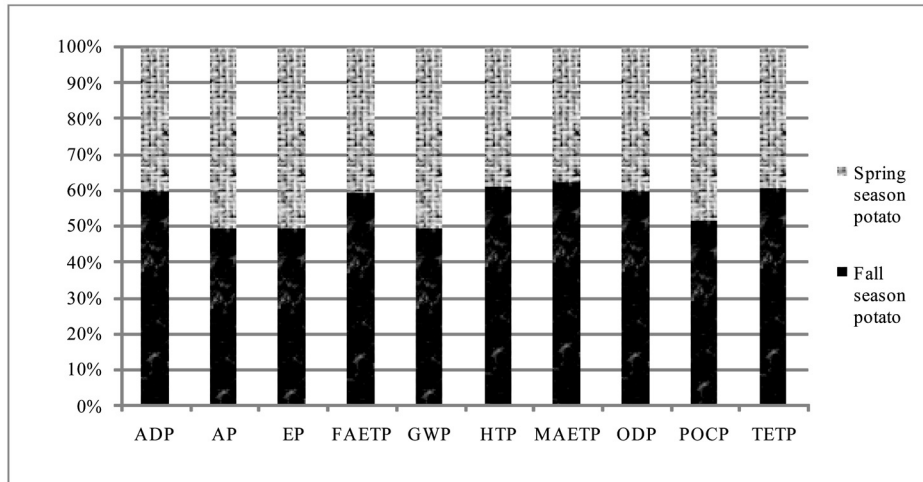


Fig. 3. Comparison of Characterization value between fall season potato and spring season potato production system.

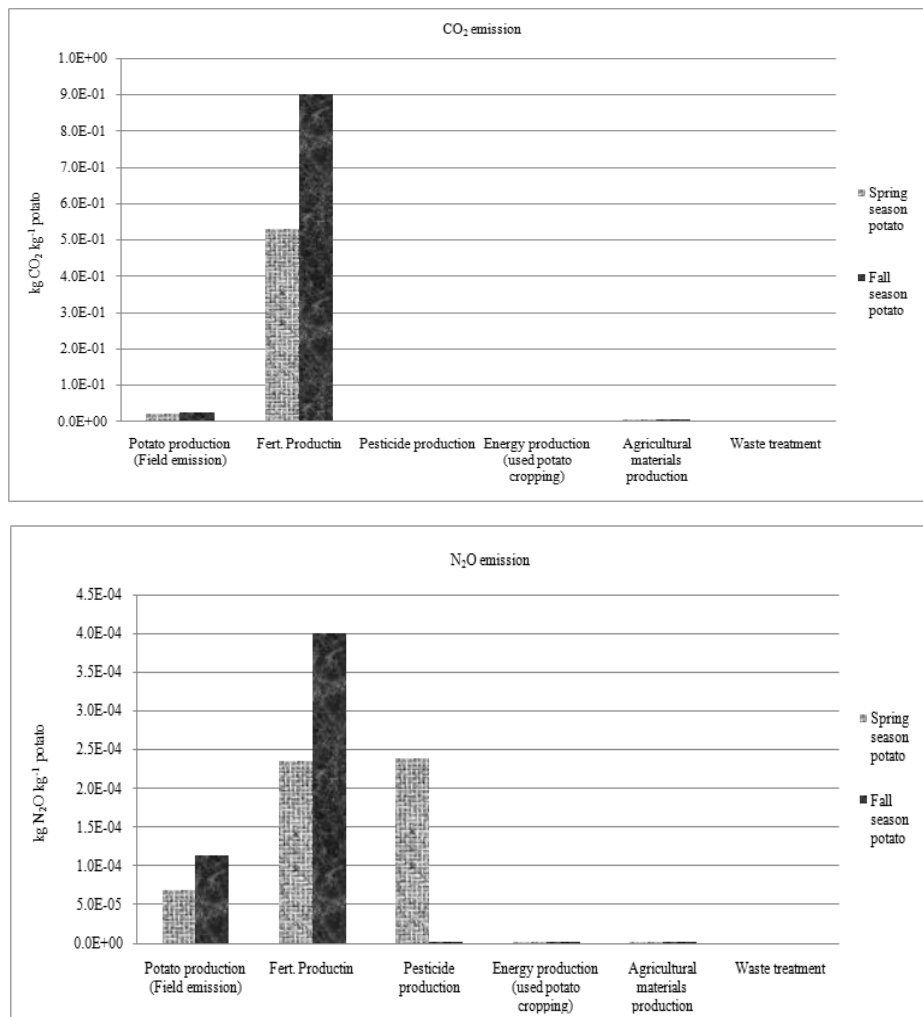


Fig. 4. Comparison of GHG emission (CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O) between fall season potato and spring season potato production system.

생산과정, 폐기물처리과정으로 구분하였다 (Fig. 4). 분석결과 CO<sub>2</sub>의 주요 발생요인은 비료생산공정이었고 (약 90%), 그 다음이 감자생산 (약 6%)이었다. N<sub>2</sub>O는 비료생산이 약 76%, 감자생산이 약 23%였다. 총 CO<sub>2</sub>발생

량은 봄감자와 가을감자가 각각 5.63 kg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>, 5.54E-01 kg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>으로 봄감자가 높았다. 이 중 복합비료 투입이 많은 가을감자가 비료생산과 포장에서의 발생량이 많았고, 봄감자는 다량의 비료투입으로 인

한 농약생산공정에서의 CO<sub>2</sub> 발생이 가장 많았다. 아산화질소의 총 배출량은 봄감자와 가을감자가 각각 3.07E-04 kg N<sub>2</sub>O kg<sup>-1</sup>, 3.21E-04 kg N<sub>2</sub>O kg<sup>-1</sup>이었다. 질소투입량이 많았던 가을감자가 비료생산과 감자생산에서 N<sub>2</sub>O 발생량이 컸고, 농약투입량이 많았던 봄감자는 농약생산에서 N<sub>2</sub>O 발생량이 컸다. LCA 평가 결과 감자생산에서 탄소성적의 주 원인은 봄감자의 경우 가을감자에 비하여 투입량이 매우 많은 농약 때문이었고, 가을감자는 비료투입으로 분석되었다. 봄감자의 경우 생장 및 수확기가 장마철과 겹치기 때문에 감자역병이 발생하기 쉽고, 감자역병이 발생하면 화학농약 살포하여 방제한다 (Park et al., 2008). 그러므로 봄감자생산에서 탄소배출을 줄이기 위해서는 역병에 강한 품종을 개발하여 재배하거나, 적절한 시비와 병해관리 방안에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

## 적 요

작형별로 봄감자, 가을감자로 구분하고 전과정평가를 통하여 감자생산체계를 원단위탄소성적과 이를 위한 LCI database 구축하였다. LCI 구축을 위한 영농 투입물·산출물에 대한 데이터 수집결과 봄감자는 특히 농약투입이 가을감자에 비하여 매우 높은 값을 나타내었고, 가을감자는 무기질비료 투입이 봄감자보다 많았다. 포장에서의 직접대기배출 (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O)은 봄감자와 가을감자가 각각 2.17E-02 kg kg<sup>-1</sup> potato 2.47E-02 kg kg<sup>-1</sup> potato였다. 원단위 탄소성적은 봄감자가 8.38E-01 kg CO<sub>2</sub>-eq. kg<sup>-1</sup> potato고, 가을감자가 8.10E-01 kg CO<sub>2</sub>-eq. kg<sup>-1</sup> potato였다. CO<sub>2</sub>의 주요 발생요인은 비료생산공정이었고 (약 90%), 그 다음이 감자생산 (약 6%)이었다. N<sub>2</sub>O 발생은 비료생산이 약 76%, 감자생산이 약 23%를 차지하였다. 평가 결과 봄감자의 GWP 특성화값은 8.38E-01 kg CO<sub>2</sub>-eq. kg<sup>-1</sup>이고, 가을감자는 8.10E-01 kg CO<sub>2</sub>-eq. kg<sup>-1</sup>였다.

## 인 용 문 헌

Brentrup, F. J., H. Kusters, J. Kuhlmann, and J. Lammel. 2004. Environmental impact assessment of agricultural

- production systems using the life cycle assessment methodology I. Theoretical concept of a LCA method tailored to crop production, Europe. *J. Agronomy* 20:247-264.
- Frischknecht, R. and G. Rebitzer. 2005. The ecoinvent database system: a comprehensive web-based LCA database. *Journal of Cleaner Production* 13:1337-1343.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. Climate change 2001, Radioactive forcing of climate change, The scientific basis. Cambridge University press, UK. pp. 388-390.
- IPCC. 2006. 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H. S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). IGES, Japan.
- ISO (International Organization for Standardization). 2006. ISO 14040:2006(E) Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework.
- KCPA (Korea Crop Protection association). 2007. Agrochemical use guide book. Korea Crop Protection association. Seoul, Korea.
- KCPA (Korea Crop Protection association). 2007. Agrochemical year book. Korea Crop Protection association. Seoul, Korea.
- KFIA (Korea Fertilizer Industry Association). 2007. Fertilizer production data. Korea Fertilizer Industry Association. Seoul, Korea. www.fert-kfia.or.kr.
- KWA (Korea Waste Association). 2007. Agricultural waste data. Korea Waste Association. Seoul, Korea. www.kwaste.or.kr/data/
- Lee, H.W. 1999. Special Issue: In honor of prof. Jae-ki Hwang upon his retirement. The core potato-Growing regions. *Kwangwon-do. Korea Association of Geographic and environment Education*. 7:505-530.
- 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.
- NAQS (National Agricultural production Quality management Service). 2006. cultivation trend of Major crops.
- Park, Y.E., J.C. Jeong, H.M. Cho, and J.H. Cho. 2008. Evaluation of the potential for environment-friendly cultivation of potato cv. 'haryeong'. *Korean J. Breed. Sci.* 40:258-262.
- RDA (Rural Development Administration). 2008. 2007 Agro-livestock incomes data book. Rural Development Administration. Suwon, Korea.