

고구마의 생산과정에서 발생하는 탄소배출량 산정 및 전과정평가

소규호* · 이길재¹ · 김건엽 · 정현철 · 유종희 · 박정아² · 이덕배

국립농업과학원 농업환경부 기후변화생태과, ¹농업기술실용화재단, ²에코네트워크(주)

Estimation of Carbon Emission and LCA (Life Cycle Assessment) From Sweetpotato (*Ipomoea batatas* L.) Production System

Kyu-Ho So*, Gil-Zae Lee¹, Gun-Yeob Kim, Hyun-Cheol Jeong, Jong-Hee Ryu,
Jung-Ah Park², and Deog-Bae Lee

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

¹Foundation of Agri. Tech. Commercialization & Transfer Suwon, 441-857, Korea

²Econetwork Co., Ltd. Seoul, 137-888, Korea

LCA (Life Cycle assessment) was carried out to estimate on carbon footprint and to establish of LCI (Life Cycle Inventory) database of sweetpotato production system. Based on collecting the data for operating LCI, it was shown that input of organic fertilizer was value of 3.26E-01 kg kg⁻¹ and it of mineral fertilizer was 1.02E-01 kg kg⁻¹ for sweetpotato production. It was the highest value among input for sweetpotato production. And direct field emission was 2.47E-02 kg kg⁻¹ during sweetpotato cropping. The result of LCI analysis focussed on greenhouse gas (GHG) was showed that carbon footprint was 4.05E-01 kg CO₂-eq. kg⁻¹ sweetpotato. Especially CO₂ for 71% of the GHG emission and the value was 2.88E-01 kg CO₂-eq. kg⁻¹ sweetpotato. Of the GHG emission CH₄, and N₂O were estimated to be 18% and 11%, respectively. It might be due to emit from mainly fertilizer production (32%) and sweetpotato cultivation (28%) for sweetpotato production system. N₂O emitted from sweetpotato cultivation for 90% of the GHG emission. With LCIA (Life Cycle Impact Assessment) for sweetpotato production system, it was observed that the process of fertilizer production might be contributed to approximately 90% of GWP (global warming potential). Characterization value of GWP and POCP were 4.05E-01 CO₂-eq. kg⁻¹ and 5.08E-05 kg C₂H₄-eq. kg⁻¹, respectively.

Key words: LCI, Carbon footprint, LCIA, LCA, Sweetpotato production system

서 언

농업은 식량을 공급하는 기본 활동으로 인간의 기본적인 욕구를 충족시키는 중요한 산업이다 (Erwin and Annik, 2008). 따라서 농업 생산을 위해 사용되는 종자, 비료, 농약 등의 원료물질에 대한 안정성 및 환경영향 평가뿐만 아니라 농작업 과정에서 사용되는 에너지, 농자재 및 농업기반시설을 포함한 농업부문 전체에 대한 환경영향평가가 요구되고 있다.

전과정평가 (LCA; Life Cycle Assessment)는 제품의 전과정을 고려한 환경영향평가 도구로 공산품의 환경성 평가에 광범위하게 사용되어 왔으며 (Jensen et al., 1997; Roy et al., 2008) 최근 덴마크, 미국 등의

국가에서는 식품 생산 시스템의 환경영향평가에 도입하여 활발히 사용되고 있다. 덴마크의 경우 자국의 농경지를 토지 유형, 표준작업시간, 대상작물에 따라 31개로 분류한 후 이를 모델링 하여 31개 농경지에 대한 유형별 LCI D/B를 구축하였으며, 미국은 바이오연료의 주요 원료 물질인 대두, 옥수수 등에 대한 LCA를 수행하되 특히 농약 및 비료 사용에 초점을 두어 N, P, K의 흐름 및 침출 모델을 개발하였다 (Dalgaard et al., 2003).

고구마는 열대성 작물로 15~35°C에서 재배가능하며, 우리나라에서는 산간 극 고랭지를 제외한 거의 대부분 지역에서 재배가 가능하다 (Kim et al., 2008). 우리나라에서 고구마는 단위면적당 생산효율이 옥수수, 감자 다음 가는 식량작물로 식용, 전분 및 알콜생산 원료용, 가공식품용, 생식 및 채소용, 사료용 등 다양한 용도로 이용될 수 있으나, 현재 대량소비의 가공식품의 이용보다는 고구마, 군고구마, 튀김용, 전분용 등으로 소비되고

접수 : 2010. 11. 15 수리 : 2010. 11. 24

*연락처 : Phone: +82312900230

E-mail: khs0@korea.kr

있다 (Kim et al., 2006). 고구마의 생산규모는 2007 농축산물소득자료를 기준으로 재배면적은 18,779 ha, 평균생산량 1,491 kg 10 a⁻¹, 총생산량 280 ton이다 (RDA, 2008).

본 연구는 우리나라 1차 농산물 및 농자재의 LCI D/B 구축과 탄소원단위 산정 및 전과정 영향평가를 위하여 파종에서 수확까지 1년 1기작을 기준으로 평가를 수행하였다.

재료 및 방법

고구마의 전과정평가는 국제표준화기구 (ISO, International Standard Organization)에서 제정한 환경영역체에 관한 국제표준 ISO 14040의 규격에 의거하여 수행하였다 (ISO, 2006).

연구 목적 및 범위 (Goal and Scope definition) 고구마 생산체계에 대한 LCA 수행을 위하여 연구 목적 및 범위를 설정하였다. 연구 목적은 고구마 생산과정에서 배출되는 탄소배출량을 산정하고 이를 위하여 고구마 생산체계에 대한 전과정평가를 적용하는 것으로 정하였다. 평가 대상인 고구마의 기능은 식용 및 각종 식품 제조

의 원료이며, 기능 단위는 식품 및 식품 제조의 원료용으로 사용되는 고구마 1 kg 생산으로 정의하였다. 연구 범위가 되는 고구마의 생산 시스템 경계는 농작물 생산 단계 (육묘, 정식, 재배, 수확)에 사용되는 원료물질 (종자, 묘), 보조물질 (농약, 비료, 농자재 등), 에너지 (전기, 경유 등) 등 농작업에서 투입되는 물질과 대기, 수계, 토양을 부하되는 배출 물질 및 고형폐기물을 포함하는 gate to gate를 원칙으로 하였다 (Fig. 1).

전과정 목록분석 (Life Cycle Inventory Analysis)

영농 투입·배출물에 대한 자료 수집은 전과정평가와 LCI 구축을 위한 중요한 기초작업이며, 전과정평가 단계에서 가장 시간이 많이 소요된다. 자료의 수집은 2007 농축산물소득자료집 (RDA, 2008)을 중심으로 관련 통계, 문헌자료, 설문조사, 전문가 인터뷰, 현장방문을 통하여 이루어졌다. 복합비료의 사용량은 유효성분사용량을 바탕으로 추정하였으며, 농약사용량은 작물별 농약 사용가중치를 적용한 계수를 적용하여 산정하였고 (KCPA, 2007a, b), 연료 사용 및 비료 사용으로 인한 대기배출물은 IPCC (2006) 1996 배출계수를 통해 배출량을 산출하였다. 영농폐기물 배출 및 처리량은 농업폐기물 통계 (KWA, 2007, MIFAFF, 2004) 등의 자료를 토대로 배출량을 산정하였

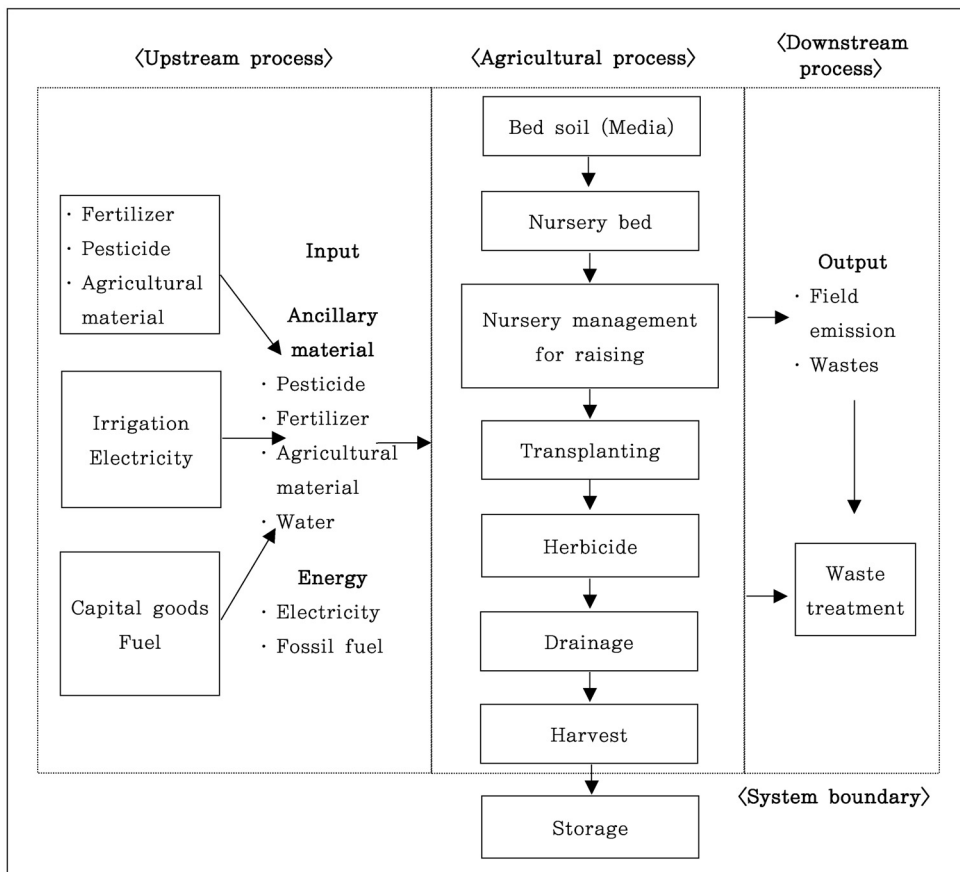


Fig. 1. System boundary (gate to gate) for production of sweetpotato.

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

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

다. 여기서 농약병, 비료포대 등의 운부자재 포장에 대한 환경부하는 고려되지 않았으며, 영구 재사용이 가능한 농자재는 시설로 간주하여 이로 인한 환경영향은 고려하지 않았다. 비료 사용으로 인한 토양의 집적이나 수계로의 배출은 적합한 배출계수의 부재로 제외하였다. LCI 분석을 통한 탄소원단위 성적과 전과정 평가를 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. LCI 분석을 통한 탄소원단위 성적을 산정할 때, 고구마 생산체계에서 발생하는 각각의 온실가스 배출량을 구한 후, 각 온실가스 배출량을 CO₂값으로 환산하여 그 합을 구하였다. 교토의정서에서는 지구온난화에 영향이 큰 오염물질로 6대 온실가스를 규정하였다. 탄소원단위 성적은 대기로 배출되는 물질 중 이 6대 온실가스 (GHG, Greenhouse Gases) 즉, 이산화탄소 (CO₂), 메탄 (CH₄), 아산화질소 (N₂O), 수소불화탄소 (HFCs), 육불화황 (SF₆), 과불화탄소 (PFCs)를 대상으로 산정하였다.

전과정 영향평가 (Life Cycle Impact Assessment)
지식경제부의 영향평가 방법론에 따라서 환경영향범주를 Table 1와 같이 구분하여 전과정 영향평가를 수행하였다. 전과정 영향평가를 위하여 지식경제부에서 개발한 전과정평가 도구인 PASS (4.1.3) software를 사용하였다.

결과 및 고찰

전과정 목록분석 목록분석을 위하여 수행된 고구마 생산에 투입, 배출되는 영농 물질을 조사한 결과와 출처를 Table 2에 나타내었다. 조사 결과 고구마생산에 투입되는 비료는 유기질비료의 투입량이 매우 높았으며

(71%), 화학비료는 22%, 투입되는 에너지 (전기4%, 화석연료 2%)의 비율은 6%였다. 유기질 비료 투입량은 3.26E-01 kg kg⁻¹ sweetpotato, 무기질비료는 1.02E-01 kg kg⁻¹ sweetpotato, 고구마를 재배할 때 발생하는 직접배출 (CO₂, CH₄, N₂O)은 2.47E-02 kg kg⁻¹ sweetpotato였다.

수집된 자료를 바탕으로 전과정 목록분석을 수행하여 고구마생산체계에서 발생하는 탄소성적으로 나타내었다 (Fig. 2). LCI 분석결과 고구마생산 전과정의 탄소성적은 4.05E-01 kg CO₂-eq. kg⁻¹ sweetpotato로 산정되었다. 탄소성적에서 CO₂의 배출량이 차지하는 비중은 71%로 가장 많았고, CH₄ 18%, N₂O가 11%였다. CO₂-eq.로 환산된 배출량은 CO₂, CH₄, N₂O 각각 2.88E-01 kg CO₂-eq. kg⁻¹ sweetpotato 7.12E-02kg CO₂-eq. kg⁻¹ sweetpotato, 4.57E-02 kg CO₂-eq. kg⁻¹ sweetpotato 이었다.

전과정 영향평가 전과정 영향평가를 통하여 고구마생산 전과정을 고구마재배, 비료생산, 농약생산, 에너지 (전기, 화석연료)의 생산, 농자재 생산, 폐기물처리 등 공정별로 나누어 각각의 영향범주에 미치는 기여도를 알아보았다 (Fig. 3). 비료생산은 모든 영향범주에서 가장 큰 기여도를 나타내었다. 그러므로 농업활동에 관한 전과정평가에서 비료는 환경에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 판단되었다. 고구마재배단계의 GWP (지구온난화범주)에 대한 기여도가 약 12% 정도였다. 실제 농작업에서 발생하는 직접배출물 (CO₂, N₂O)은 GWP와 POCP (광화학산화물생성) 범주의 영향평가 인자에 속한다. 고구마생산체계의 GWP와 POCP 특성화 값은 각각 4.05E-01 CO₂-eq. kg⁻¹, 5.08E-05 kg C₂H₄-eq. kg⁻¹이었다. 농약생산은 다른 영향범주에 비하여 FAETP (담수생태독성), HTP (인간생태독성), MAETP (해양생태독성), TETP (토양생태독성) 등 생태독성관련 영향범주에서 기여도 (약 5% 내외)가 높아지는 경향을 보였다.

Table 2. Data of inputs and outputs for the production of sweetpotato.

Input/Output	Unit	Quantity	Data source
Input		kg ⁻¹ product	
seed, seedling	kg	3.44E+00	2007 incomes data (RDA, 2008)
composts	kg	3.26E-01	incomes data (RDA, 2008)
N fertilizers	kg	2.68E-04	incomes data (RDA, 2008)
P fertilizers	kg	6.04E-04	incomes data (RDA, 2008)
K fertilizer	kg	1.01E-03	incomes data (RDA, 2008)
compound fertilizers	kg	6.21E-02	incomes data (RDA, 2008; KFIA, 2007)
lime	kg	3.48E-02	incomes data (RDA, 2008)
Boron	kg	2.01E-04	incomes data (RDA, 2008)
silicate fertilizer	kg	2.68E-03	incomes data (RDA, 2008)
pesticides	kg	2.18E-04	Agrochemical year book, Agrochemical use guide book (KCPA, 2007)
electricity	kw	1.88E-02	incomes data (RDA, 2008)
fossil feul	L	9.66E-03	incomes data (RDA, 2008)
vinyl	m	3.24E-03	incomes data (RDA, 2008)
Output			
direct emissions (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O)	kg	2.47E-02	IPCC 1996
waste treatment	kg	8.27E-04	KWA, 2007 MIFAFF, 2004
product (sweetpotato)	kg	1.00E+00	incomes data (RDA, 2008)

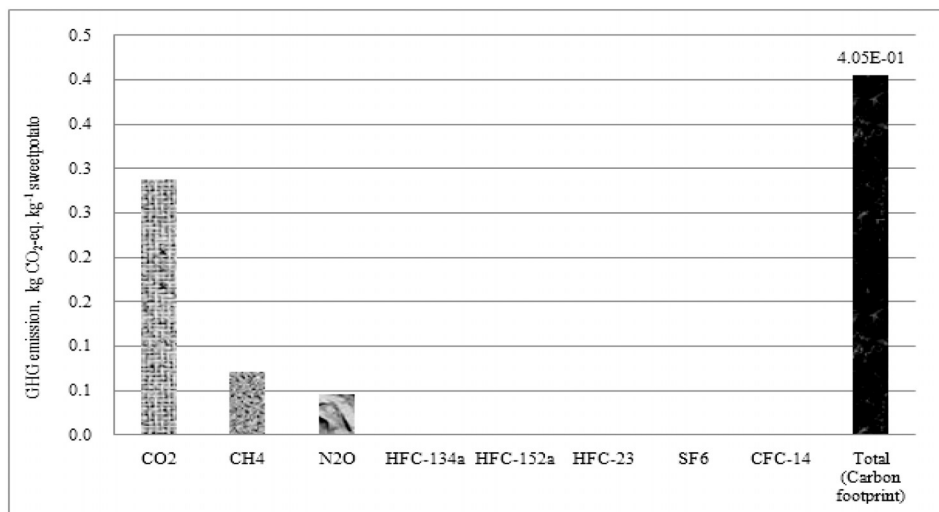


Fig. 2. Carbon footprint of sweetpotato production system calculated by LCI.

해석 (Interpretation) 고구마생산 전과정을 비료 생산공정, 농약 생산공정, 에너지 생산공정, 농자재 생산공정, 보리생산공정, 폐기물처리공정으로 구분하여 온실가스발생의 공정별 기여도를 비교하였다 (Fig. 4). CO₂는 비료생산공정 (약 32%)과 고구마생산 (약 28%)에서 주로 발생하였고, N₂O는 고구마생산공정이 발생량이 가장 많았고, 기여도는 약 90%였다. 비료생산과 농자재생산에 의한 N₂O발생 기여도는 각각 10% 정도였다. 고구마생산 전과정에서 발생하는 CO₂ 총량은 2.88E-01 kg

CO₂ kg⁻¹ sweetpotato이고, 비료생산 중 발생하는 CO₂는 5.26E-02 kg CO₂ kg⁻¹ sweetpotato, 고구마생산에서는 2.93E-02 kg CO₂ kg⁻¹ sweetpotato이었다. N₂O 총발생량은 1.47E-04 kg N₂O kg⁻¹ sweetpotato이고, 비료생산과 고구마생산에서의 발생량은 각각 2.16E-06 kg N₂O kg⁻¹ sweetpotato, 5.18E-05 kg N₂O kg⁻¹ sweetpotato였다.

분석 결과 고구마생산체계는 전과정평가를 수행하고 있는 감자나 보리에 비하여 전체 N₂O발생량 중 재배 중

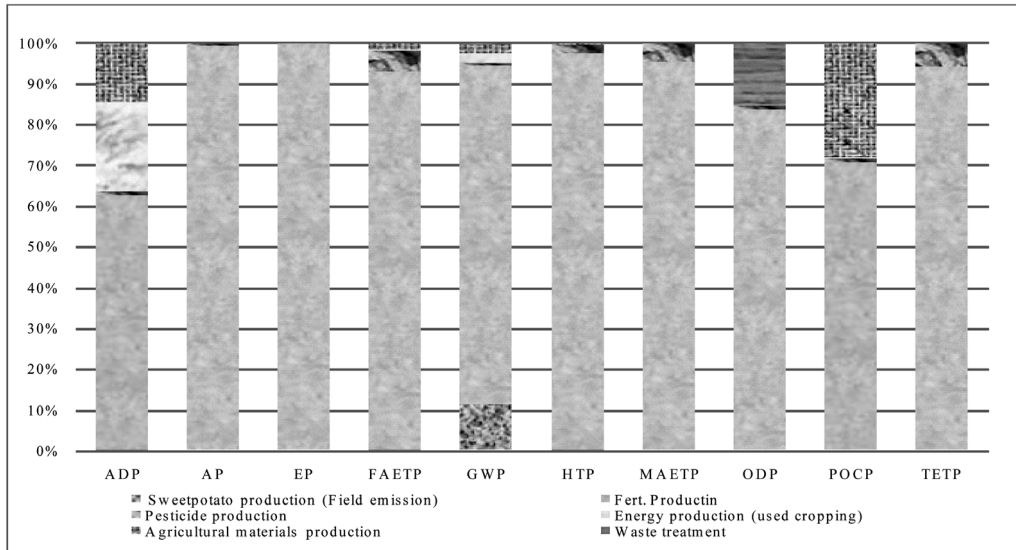


Fig. 3. Rate of characterization value on sweetpotato production system by LCIA.

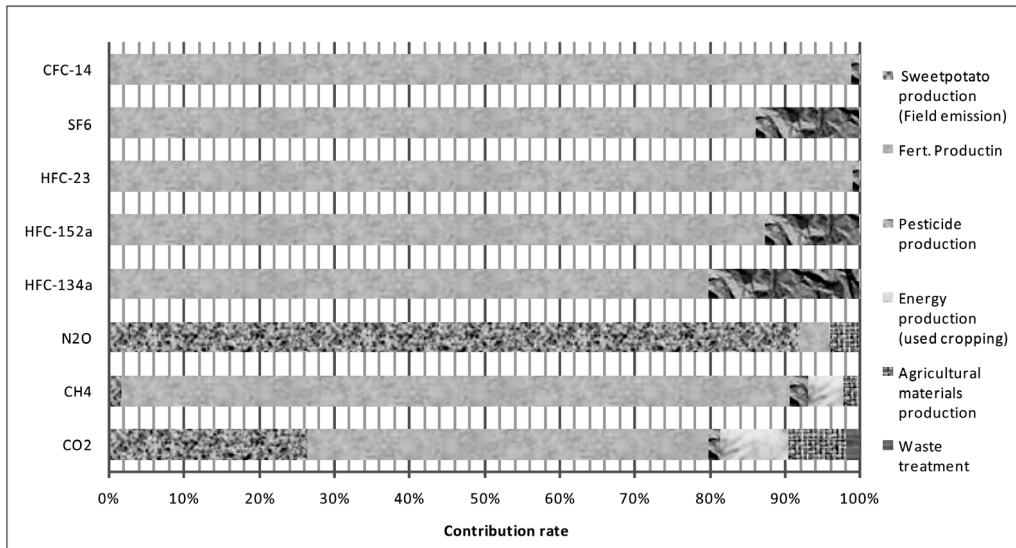


Fig. 4. Contribution to GHG emission of sweetpotato production system.

의 발생비중이 매우 높았다. 그러므로 포장에서의 질소 시비관리법이 탄소배출 저감에 중요한 요인으로 판단되었다. 추후 시비관리변화에 대한 민감도 분석이 적정시비관리 개선에 도움을 줄 수 있을 것으로 예상되었다. 포장에서 발생하는 매우 높은 아산화질소 발생이 고구마생산체계의 높은 유기물비료투입에 기인하는지에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

요 약

고구마 생산체계의 탄소성적을 평가하기 위하여 LCI database 구축하고 전과정 영향평가를 통한 잠재적 환경영향을 평가하였다.

인벤토리 목록구축을 위한 자료 수집 결과 고구마의 투입물 중 유기질비료의 투입비가 71% 매우 높았고, 화학비료는 22%, 투입되는 에너지의 6%의 순이었다. 유기질 비료 투입량은 $3.26E-01 \text{ kg kg}^{-1}$ sweetpotato, 무기질비료는 $1.02E-01 \text{ kg kg}^{-1}$ sweetpotato, 고구마를 재배할 때 발생하는 직접배출 (CO_2 , CH_3 , N_2O)은 $2.47E-02 \text{ kg kg}^{-1}$ sweetpotato였다.

탄소성적은 $4.05E-01 \text{ kg CO}_2\text{-eq. kg}^{-1}$ sweetpotato이며, CO_2 의 배출량이 $2.88E-01 \text{ kg CO}_2\text{-eq. kg}^{-1}$ sweetpotato로 전체 온실가스배출 중 71%를 점유하였고, CH_4 18%, N_2O 가 11%였다. 이들의 공정별 기여도 분석결과 CO_2 는 비료생산공정과 고구마생산에서 주로 발생하였고, 기여도는 약 32%, 28%였다. N_2O 는 고구마를 재배할 때 가장 많이 발생되었고, 기여도는 약 90%였다.

전과정 영향평가 결과 비료생산은 모든 영향범주에서 가장 큰 기여도를 나타내었다. GWP (지구온난화범주)에서 고구마재배에 의한 기여가 약 12% 정도였으며, 비료생산은 약 90%였다. GWP와 POCP (광화학산화물생성) 범주의 특성화 값은 각각 $4.05E-01 \text{ CO}_2\text{-eq. kg}^{-1}$, $5.08E-05 \text{ kg C}_2\text{H}_4\text{-eq. kg}^{-1}$ 이었다.

인 용 문 헌

- Dalgaard, R., N. Halberg, I.S. Kristensen, and I. Larsen. 2003. Proceeding from the 4th International Conference, Bygholm, Denmark, An LC Inventory based on representative and coherent farm types.
- Erwin, M.S. and M.F. Annik. 2008. LCA studies of food products as background for Environmental Product Declarations, International Journal of LCA, 13:255-264.
- IPCC. 2006. 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and T. Tanabe (eds). IGES, Japan.
- ISO (International Organization for Standardization). 2006. ISO 14040:2006(E) Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework.
- Jensen, A.A., L. Hoffman, B.T. Moller, A. Schmidt, K. Christiansen, J. Eikington, and van F. Dijk. 1997. Life Cycle Assessment (LCA) - A guide to approaches, experiences and information sources; European Environmental Agency.
- KCPA (Korea Crop Protection association). 2007a. Agrochemical use guide book. Korea Crop Protection association. Seoul, Korea.
- KCPA (Korea Crop Protection association). 2007b. 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/
- Kim, H.S., Y.H. Moon, M.N. Chung, Y.S. Ahn, J.S. Lee, and J.K. Bang. 2006. Effect of planting date, plant Spacing and harvest time on the production of small-sized sweetpotato in the alpine zone of Korea. Korean J. Crop Science. 51:193-197.
- Kim, J.J., J.S. Lee, K.H. Jeong, and J.K. Bang. 2008. Variation of top part growth and yeild of sweetpotato (*Ipomoea batatas L. Lam.*) in Different cultivation regions. J. Life Csi. and Nat. Res. 30:36-44.
- 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.
- RDA (Rural Development Administration). 2008. 2007 Agrolivestock incomes data book. Rural Development Administration. Suwon, Korea.
- Roy, P., N. Daisuke, O. Takahiro, X. Qingyi, O. Hiroshi, N. Nobutaka, and Takeo. 2008. A review of life cycle assessment on some food products. J. Food Eng. 90:1-10.