

## 전과정평가 도입을 통한 농업환경영향 평가

심교문\* · 정지선 · 소규호 · 임송택<sup>1</sup> · 노기안 · 김건엽 · 정현철 · 이덕배

농촌진흥청 국립농업과학원, <sup>1</sup>고려대학교 식품자원경제학과

### Environmental Impact Assessment of Agricultural Systems Using the Life Cycle Assessment

Kyo-Moon Shim\*, Ji-Sun Jeong, Kyu-Ho So, Song-Tak Lim<sup>1</sup>, Kee-An Roh, Gun-Yeob Kim,  
Hyun-Cheol Jeong, and Deog-Bae Lee

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

<sup>1</sup>Department of Food and Resource Economics, Korea University, Seoul 136-701, Korea

Many policies have been implemented to mitigate the greenhouse gases in atmosphere over all of sectors. With considering the distinct characteristics of the food security, agricultural sector is no exception to this situation. To this regard, total amount of carbon which is emitted through all of the agricultural production process is calculated, and being based on this result, the demand for the introduction of agricultural production system with low carbon has been rising. Case studies on the application of life cycle assessment (LCA) technique to agricultural sector are found in many countries. For example, life cycle inventory (LCI) data bases of crop, farm infrastructure, fertilizer, farm machinery, and etc., have been constructed and provided by Ecoinvent (Swiss centre for life cycle inventories) of Swiss. In Japan, Top-down typed LCA methodology for agriculture is developed based on the inter-industry analysis, and is evaluated according to the productive method of crop. On the other hand, environmental impact assessment of agricultural system using LCA in Korea is just in the beginning stages. So it is required to assess environmental impact on agricultural fertilizer and pesticide, and to develop their flow modeling, and methodology of LCA of agricultural sector. Environmental impact assessment on agricultural materials, machinery, and infrastructure will also be carried out.

**Key words:** Life cycle assessment, Life cycle inventory, Agricultural environment, Environmental impact assessment

## 서 언

농업은 식량을 공급하는 기본 활동으로 인간의 기본적인 욕구를 충족시키는 중요한 산업이다 (Erwin and Annik, 2008). 비록 우리나라에서 농림업 생산액이 2004년 최고치를 기록한 이후 하향 추세를 보이며 점차 축소되고 있는 실정이지만, 농업의 주요 목적인 식량생산과 농업의 다원적 기능을 생각할 때 농업부문은 앞으로 더욱 발전시켜 나가야 할 중요한 산업임에 틀림이 없다 (Kim, 2009).

최근 급증하고 있는 여러 식품안전사고들은 소비자들로 하여금 식품에 대한 품질 및 안전성에 대한 정보 요구를 증가시키고 있으며, 이는 식품의 원료물질에 해당

하는 농식품에 대한 환경성 평가의 필요성을 증대시키고 있다 (Kim, 2000). 또한, 농업활동이 비록 1차 산업이기는 하지만 다양한 원료와 에너지의 사용은 천연자원 고갈과 환경오염 및 기후변화에 중요한 영향을 끼치고 있다. 특히, 산업화의 결과로 인한 농업기반시설의 증축과 다양한 농기계의 사용은 농업 산업을 더욱 에너지 집약적으로 만들고 있다 (Kramer et al., 1999; Nonbebel, 2004; Tukker et al., 2005).

따라서 농업 생산을 위해 사용되는 종자, 비료, 농약 등의 원료물질에 대한 안전성 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

접수 : 2010. 3. 31 수리 : 2010. 4. 13

\*연락처 : Phone: +82312900241

E-mail: kmshim@korea.kr

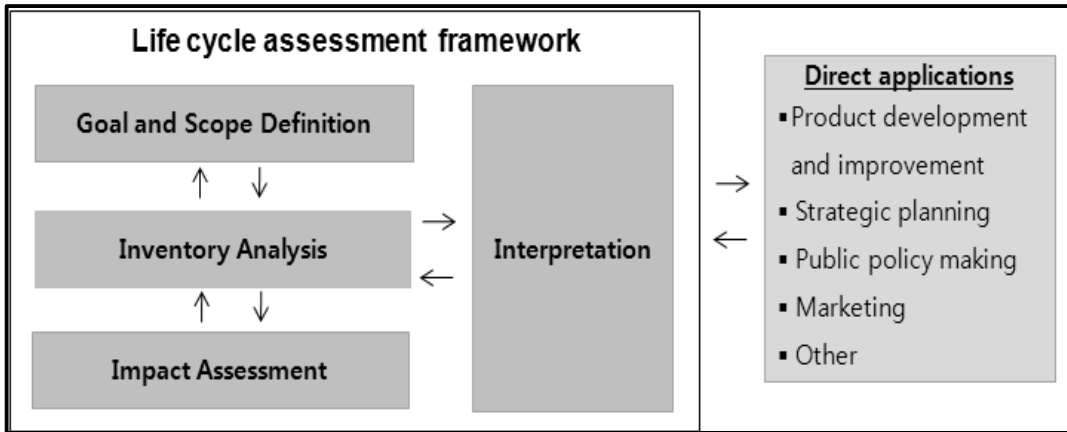


Fig. 1. Phases of Life Cycle Assessment according to the International Organization for Standardization(ISO) 14040.

al., 1997; Roy et al., 2009) 최근 영국, 스위스, 덴마크 등의 국가에서는 식품 생산 시스템의 환경영향평가에 도입하여 활발히 사용하고 있다. ISO 14040에 따르면, 전과정평가의 적용 분야는 제품의 개발과 개선, 전략적 계획, 환경성과지표 및 마케팅 등 다양하며 (ISO, 2006a), 실제로 영국의 Carbon Trust사에서 운영하고 있는 저탄소제품 인증제나 미국의 탄소관리감독위원회 (TCC; The Climate Conservancy)에서 운영하고 있는 저탄소제품 등급제 및 일본산업환경관리협회 (JEMAI; Japan Environmental Management Association for Industry)의 기술자문위원회에서 운영하고 있는 Eco-leaf 제도 등은 모두 전과정평가를 활용하고 있다. 따라서 본 논문에서는 전과정평가 도구를 농업환경평가에 적용한 해외 연구 사례들을 고찰하고, 국내 농업환경에서의 전과정평가 적용 현황과 활용 가능성에 대해 살펴보고자 한다.

### 전과정평가의 개념

전과정평가는 대상제품, 공정, 서비스의 전과정 (원료 채취, 생산, 가공, 사용, 운송 및 폐기)에 걸쳐 발생하는 환경부하와 잠재적 환경영향을 분석하고 평가하는 환경평가 도구로 ‘요람에서 무덤 (cradle to grave)’ 분석으로 잘 알려져 있으며 (Roy et al., 2009; Andersson et al., 1994), ISO 14040s에서는 전과정평가의 구조를 그림 1과 같이 정의하고 있다 (ISO, 2006a).

전과정평가의 첫 번째 단계는 목적과 범위 정의이며 이 단계에서는 연구를 수행하는 목적과 대상 청중 및 연구 적용 분야에 대해서 정의한다. 그리고 연구의 목적에 따라 대상제품과 시스템의 기능을 정량화시킨 기능단위 (functional unit)를 정의하고 시스템 경계 (system boundary)를 설정한다 (ISO, 2006a; Roy et al., 2009). 기능단위는 관련된 인벤토리 데이터의 기준 단

위 (reference unit)를 제공하며, 주로 대상제품의 질량을 기초로 정의되지만, 연구의 목적과 영향범주에 따라 경지 면적, 경제적 가치 등으로 정의될 수 있다. 그리고 이를 통해 대상제품, 시스템과 관련된 모든 투입과 배출물의 정량적 기준이 설정된다 (Cederberg and Mattsson, 2000).

두 번째 단계는 전과정 목록분석으로, 본 단계에서는 연구 목적에 따라 정의된 시스템 내에 투입되고 배출되는 모든 물질들을 물질수지원칙과 할당 (allocation)을 통해 기능단위에 맞추어 정량화한다 (ISO, 1998). 목록 분석 단계는 데이터를 수집하고 가공하는 단계로 이를 위한 단위공정 설정, 공정흐름도 작성, 데이터 계산 및 검증 과정이 요구되며, 전과정평가 단계 중 가장 많은 시간이 소모된다 (Roy et al., 2009).

세 번째 단계는 전과정 영향평가로 목록분석 단계에서 정량화된 투입물과 산출물들을 환경영향과 대응시켜 이들에 대한 각각의 환경영향을 평가한다. 지구온난화, 오존층고갈, 자원고갈, 생태독성, 인간독성, 산성화 등의 여러 환경영향 범주로 분석할 수 있다.

마지막으로, 전과정 해석은 전과정 영향평가 결과를 토대로 주요 이슈를 규명하고 환경성 개선을 위한 대안을 모색하는 단계로 결과의 신뢰성을 평가하고 다양한 시나리오 분석을 통해 개선방안을 마련하여 결론과 권고사항을 제시한다. 그리고 이렇게 수행된 연구 결과는 제품 개발과 개선, 전략 계획, 공공정책 수립 및 마케팅 등 기타 여러 분야에 활용될 수 있다.

### LCA를 적용한 해외 농업환경평가

LCA를 적용한 농업환경평가에 관한 연구는 주요 선진국에서 이미 다양하게 수행되고 있으며, 표 1에 그 현황을 정리하여 나타내었다.

**Table 1. Examples of LCA researches on agricultural production processes in some countries.**

	Swiss	Japan	Denmark	U. S.	U. K.
Institute	Swiss center for life cycle inventories (ecoinvent)	National Institute for Agro-Environmental Sciences, University of Tokyo, Keio technology university	Danish Environmental Protection Agency	National Renewable Energy Laboratory	Department of Environment, Food and Rural Affairs
Product	Agri-food(31), Fertilizer(31), Pesticide(34), Feed(10), Farm Machinery(4)	Agricultural production system & agri-food	Agri-food(42), Food(204)	Corn, Soy bean, Stover (bio-based products)	Tomatoes, Apples, Strawberries, Potatoes, Poultry, Lamb, Beef

농작물에 대한 데이터베이스가 가장 체계적이고 다양하게 구축되어 있는 국가는 스위스로, 스위스 D/B 구축 센터인 Ecoinvent가 주축이 되어 농작물, 농업기반시설, 농자재, 농기계 등 농축산 전반에 대한 전과정목록(LCI; Life Cycle Inventory) D/B를 구축하여 제공하고 있다 (Frischknecht and Rebitzer, 2005). 여기서, LIC는 제품의 원료채취, 생산, 수송, 유통, 폐기 등 모든 과정에 대한 투입 산출물의 목록을 말한다. 세부내용을 살펴보면, 농작물에 대한 환경영향평가 시 다양한 모델을 통해 대기, 수계, 토양 배출물의 환경영향을 평가하였는데, 중금속의 경우 농경지, 지하수, 지표수 각각으로 배출되는 Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, Zn 등 중금속을 SALCA-heavy metal (Freiermuth, 2006) 모델을 통해 계산하였다. 농업기반시설은 소, 돼지와 같은 가축의 사육 시설을 설치, 사용, 폐기 단계로 분류하여 그에 따른 환경 영향을 평가하였으며, 농기계의 경우에는 도로 수송부터 토양 관리, 파종, 수확 등 현장 작업까지의 범위에 사용된 모든 기기에 대하여 이들의 제조, 유지보수, 폐기 처리 단계를 고려하였다. 또한, 농경지(농작물, 농작업 기술), 시비, 파종, 작물 생산, 관수, 수확, 수송에 대한 작업 프로세스를 모델링 하여 농작업에 대한 환경영향평가를 수행하였다 (Ecoinvent Center, 2004).

국내 농업시스템과 유사한 일본 역시 국가기관과 대학 연구소에서 주요 농산물과 농작업 시스템에 대하여 전과정평가를 수행하였다. 일본은 산업연관분석을 이용하여 농업을 위한 Top-down 방식의 전과정평가 수행 방법론을 개발하였으며, 이를 농작물 생산 방식에 따라 평가하고 농업분야에 대한 영향평가 방법론 및 가중치를 개발하였다. 또한, 이렇게 수행된 농작물 및 농작업 시스템의 전과정평가 결과를 기초로 농작물재배의 환경영향평가 실시 매뉴얼을 개발하고 지속가능한 농업생산 시스템 개발 및 작물별 농업생산기술에 적용하였다 (農業環境技術研究所, 2003; 大村道明, 2005).

그밖에 덴마크는 자국의 농경지를 토지 유형, 표준작

업시간, 대상작물에 따라 31개로 분류한 후 이를 모델링 하여 31개 농경지에 대한 유형별 LCI D/B를 구축하였으며, 미국은 바이오연료의 주요 원료 물질인 대두, 옥수수, 경엽 등에 대한 LCA를 수행하였는데, 특히 농약과 비료 사용에 초점을 두어 N, P, K의 흐름 및 침출 모델을 개발하였다. 그리고 영국은 생산하거나 수입하고 있는 7가지 주요 농축산물 (토마토, 사과, 딸기, 감자, 소, 돼지, 닭)에 대한 자원 사용 및 환경부담을 규명하기 위해 전과정평가를 통한 환경영향평가를 수행하면서, 특히 시스템 경계를 생산 지역에 국한시키지 않고 농축산물의 지역물류센터 (RDC; Regional Distribution Center)로 확장하여 평가하였다 (Dalgaard et al., 2003).

### LCA를 적용한 국내 농업환경평가

국내에서 LCA를 적용한 환경평가의 대표적인 사례는 환경부에서 2001년 2월부터 시행한 환경성적표지제도이다. ISO/TR14025로 표준화된 Type III의 환경성적표지제는 자사제품의 환경성을 주장하고자 하는 모든 당사자가 공인된 제3자의 인증을 통하여 제품에 대한 정량적인 환경정보를 소비자에게 알리는 제도로 LCA를 통해 제품의 정량적 환경정보를 도출하게 된다 (ISO, 2006b; 환경부, 2004). 또한, 국가 차원에서 범국민적으로 진행되고 있는 ‘저탄소 녹색성장’ 정책 하에 2009년 2월 시행한 ‘탄소라벨링’제도 역시 LCA를 적용하여 온실가스 배출량과 저감량을 평가하고 있다 (환경부b, 2009).

하지만, 이와 대조적으로 LCA를 적용한 국내 농업환경평가 연구 현황은 미비한 실정이다. 비록, 현재까지 탄소라벨링 인증을 받은 68개의 제품 중 약 60%에 해당하는 40개의 제품이 식품이며 이들 중에는 두부, 햇반과 같은 1차 농산물 가공 식품류가 포함되어 있다. 그러나 이들의 환경영향평가를 수행하기 위해 요구되는 1차 농수축산물에 대한 국내 데이터베이스의 부재로 1차 농

수축산물은 탄소라벨링 인증대상에서 제외되어 있는 실정이다 (환경부, 2009a; 환경부, 2009b). 따라서 이에 대한 연구가 시급하다고 할 수 있다.

국내에서는 2009년 처음으로 LCA를 도입한 농업 환경영향평가를 위해 1차 농수축산물 중 식량작물을 중심으로 인벤토리 데이터베이스 구축을 시작하였다 (Park, 2009). 그림 2는 농작물 생산 과정에서 고려되는 원료물질, 보조물질, 에너지 등의 투입물과 대기, 수계, 토양 등으로의 배출물 즉, 농작물 생산에 대한 시스템 경계를 나타내고 있다 (Park, 2009).

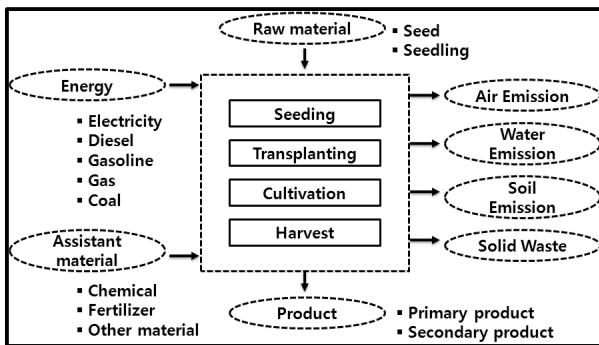


Fig. 2. System boundary, relevant inputs, and outputs, and functional unit of a crop production system.

농업생산시스템에 대한 시스템 경계는 농작물 생산에 사용되는 원료물질의 채취와 농작물 생산단계까지를 고려한 ‘요람에서 문까지 (Cradle to Gate)’를 원칙으로 하며, 기능단위는 식품과 식품 제조의 원료용으로 사용되는 농산물 1kg 생산으로 정의할 수 있다. 쌀, 보리, 콩 등과 같은 식량 작물을 생산하기 위해서는 기본적으로 원료물질인 종자 혹은 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 야기 시키므로 LCA를 통해 이들의 환경 영향을 정량적으로 분석할 수 있다 (Brentrup et al., 2004).

LCA를 도입한 국내 농업환경영향평가는 출발 단계에 있다. 따라서 농업환경에 있어 주요 인자인 비료와 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. 수행된 연구

결과의 활용성은 무한하다. 현재 탄소성적표지제도에서 제외되어 있는 1차 농수축산물에 대한 탄소성적을 산출할 수 있으며, 그에 따른 저탄소 농산물 인증제의 도입도 가능하게 된다. 또한, 유기농 식품에 대한 정량적 환경영향평가도 가능하여 이들의 환경정보를 소비자에게 제공하는 마케팅 등에도 활용할 수 있다.

LCA는 농업 시스템에 대한 환경 영향을 평가하고 나아가서 식품의 안정성을 평가할 수 있는 유용한 도구이다. 따라서 관련분야의 연구와 투자가 활발히 진행될 때 국내 지속가능한 농업시스템 구축에 필수적인 정량적 평가 기준이 될 것으로 기대된다.

## 요 약

전 세계적으로 지구온난화의 원인인 대기 중 온실가스 농도를 감축하는 여러 정책들이 모든 산업을 망라하여 추진되고 있다. 식량안보라는 특수성은 있지만, 농업도 예외는 아니다. 이런 취지에서 최근에 농산물의 전체 생산과정에서 발생하는 탄소배출량을 산정하고, 이를 토대로 탄소배출량이 적은 농산물 생산방식을 도입하고자 하는 요구가 증가하고 있다. LCA 도구를 농업분야의 환경평가에 적용한 해외 연구 사례들을 살펴보면, 스위스는 Ecoinvent가 주축이 되어 농작물, 농업기반시설, 농자재, 농기계 등 농축산 전반에 대한 LCI D/B를 구축하여 제공하고 있고, 우리와 농업시스템이 유사한 일본은 산업연관분석을 이용하여 농업을 위한 Top-down 방식의 LCA 수행 방법론을 개발하였으며, 이를 농작물 생산 방식에 따라 평가하고 농업분야에 대한 영향평가 방법론과 가중치를 개발하였다. 반면에 국내의 LCA를 통한 농업환경영향평가는 출발 단계에 있다. 따라서 농업환경에 있어 주요 인자인 비료 및 농약에 대한 환경영향을 평가하고 이를 위한 국내 비료와 농약의 흐름 모델링, 방법론 개발이 요구되며, 국내 농업 시스템을 반영한 기타 농자재, 농기계 및 농업기반시설에 대한 환경영향평가 역시 수행되어야 한다.

## 인 용 문 헌

- Andersson, K., T. Ohlsson, and P. Olsson. 1994. Life cycle assessment (LCA) of food products and production systems. *Trends Food Sci. Tech.* 5:134-138.
- Brentrup, F., J. Kusters, H. 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. *Eur. J. Agron.* 20:247-264.

- Cederberg, C., and B. Mattsson. 2000. Life cycle assessment of milk production - a comparison of conventional and organic farming. *J. Clean. Prod.* 8:49-60.
- Dalgaard, R., N. Halberg, I. S. Kristensen, and I. Larsen. 2003. An LC Inventory based on representative and coherent farm types Proceeding from the 4th International Conference, Bygholm, Denmark, 98-106.
- Ecoinvent Center. 2004. Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems. Ecoinvent report 15.
- Erwin, M.S., and M.F. Annik. 2008. LCA studies of food products as background for Environmental Product Declarations. *Int. J. LCA*, 13:255-264.
- Freiermuth, R. 2006. Modell zur Berechnung der Schwermetallflüsse in der Landwirtschaftlichen Okobilanz. Report Agroscope FAL Rechenholz, 42p. Online at <http://www.art.admin.ch/themen/00617/00622/index.html?lang=de>.
- Frischknecht, R., and R. Rebitzer. 2005. The ecoinvent database system : a comprehensive web-based LCA database. *J. Clean. Prod.* 13:1337-1343.
- ISO (International Organization for Standardization). 1998. Environmental management - life cycle assessment - goal and scope definition and life cycle inventory analysis. International Standard ISO 14041, ISO, Geneva.
- ISO (International Organization for Standardization). 2006a. ISO 14040 : 2006(E) Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework.
- ISO (International Organization for Standardization). 2006b. Environmental labelling and declarations. Type III environmental declarations, Principles and procedures (ISO 14025). International Standard ISO, Geneva, 25.
- Jensen, A.A., L. Hoffman, B.T. Moller, A. Schmidt, K. Christiansen, J. Eikington, and F. van Dijk. 1997. Life Cycle Assessment (LCA) - A guide to approaches, experiences and information sources. European Environmental Agency.
- Kramer, K.J., H.C. Moll, S. Nonhebel, and H.C. Wilting. 1999. Greenhouse gas emissions related to Dutch food consumption. *Energ. Policy*, 27: 203-216.
- Nonhebel, S. 2004. On resource use in food production systems : the value of livestock as 'rest-stream upgrading system'. *Ecol. Econ.* 48:221-230.
- Park, J.A., J.H. Huh, S.Y. Shin, S.T. Lim, G.Z. Lee, K.M. Shim, and K.A. Rho. 2009. Study on life cycle GHG emission estimation of major food crops, The proceeding of Korean Society for Life Cycle Assessment, 251-257.
- Roy, P., D. Nei, T. Orikasa, Q. Xu, H. Okadome, N. Nakamura, and T. Shiina. 2009. A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. *J. Food Eng.* 90:1-10.
- Tukker, A., G. Huppes, J. Guinee, R. Heijungs, Ad. Koning, Lv. Oers, S. Suh, T. Geerken, M. V. Holderbeke, B. Jansen, and P. Nielsen. 2005. Environmental impacts of products (EIPRO) Analysis of the life cycle environmental impacts related to the total final consumption of the EU25, IPTS/ESTO (European Science and Technology Observatory/Institute for Prospective Technology Studies). 農業環境技術研究所. 2003. 環境影響評価のためのLCA技法の開発, 農業環境技術研究所, 日本.
- 大村道明. 2005. 家畜糞尿の堆肥化利用に対する総合的LCA評価に関する研究, 東北大学大学院農学研究科, 日本.
- 김병률. 2009. 신 농업 비전과 전략, 연구보고서 22, 한국농촌경제연구원.
- 환경부. 2004. 환경성적표지 작성지침 및 인증기준. 환경부고시 제2004-26호.
- 환경부. 2009a. 탄소성적표지 인증제품 현황.
- 환경부. 2009b. 탄소성적표지 작성지침. 환경부고시 제2009-86호.