

쌀의 생산과정에서 발생하는 탄소배출량 산정을 위한 전과정평가 적용

소규호* · 박정아¹ · 이길재² · 심교문 · 유종희 · 노기안

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

Estimation of Carbon Emission and Application of LCA (Life Cycle Assessment) from Rice (*Oryza sativa* L.) Production System

Kyu-Ho So*, Jung-Ah Park¹, Gil-Zae Lee², Kyo-Moon Shim, Jong-Hee Ryu and Kee-An Roh

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

¹Econetwork Co., Ltd. Seoul, 137-888, Korea

²Foundation of Agri. Tech. Commercialization & Transfer Suwon, 441-857, Korea

LCA (Life Cycle Assessment) carried out to estimate carbon footprint and to establish of LCI (Life Cycle Inventory) database of rice production system. The results of collecting data for establishing LCID/B showed that organic fertilizer and chemical fertilizer input to 4.29E-01 kg kg⁻¹ rice and 2.30E-01 kg kg⁻¹ rice for rice cultivation. It was the highest value among input for rice cultivation. And direct field emission was 3.23E-02 kg kg⁻¹ during rice cropping. The results of LCI analysis focussed on greenhouse gas (GHG) was showed that carbon footprint was 8.70E-01 kg CO₂-eq. kg⁻¹ rice. Especially for 80% of CO₂ in the GHG and 7.02E-01 kg of its CO₂-eq. kg⁻¹ rice. Of the GHG emission CH₄, and N₂O were estimated to be 13% and 5%, respectively. With LCIA (Life Cycle Impact Assessment) for rice cultivation system, it was observed that fertilizer process might be contributed to approximately 80% of GWP (global warming potential).

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

서 언

쌀은 우리나라 단일작물로서는 전체생산량 28% (영농면적 58%)를 차지하는 식량작물 (NAQS, 2006)로 벼의 재배방식은 파종에서 수확까지 1년 1기작을 기준으로 대부분 이앙재배하며, 직파재배는 5%의 점유율을 보인다. 논벼 생산규모는 2007 농축산물소득자료에 의하면 재배면적은 950,250 ha, 평균생산량 466 kg 10a⁻¹, 총생산 4,428,000 ton 이다 (RDA, 2008).

논에서는 연간 약 60 Tg의 CH₄가 배출되며, CH₄ 배출량의 5~30%를 차지한다. 메탄은 지구온난화현상을 유발하는 미세기체중 하나로 이산화탄소에 비하여 대기 내 미량으로 존재하나 단위당 열 흡수능이 이산화탄소의 21배에 이르는 온실가스이다 (Ko et al., 1998). 또한 기후변화정부간협의체 (IPCC)는 지구온도가 10년 마다 0.1~0.2°C 상승할 것으로 예측하였으며 1970년 이후 30년간 우리나라의 연평균기온은 0.1~0.5°C 상승하는 등 온난화가

진행되고 있다 (Park et al., 2006). 온난화가 진행되면 벼재배에 있어서도 현재와 같은 시기에 재배할 경우 등숙기간의 고온으로 쌀 수량이 20~30% 감소될 것으로 추정하고 있다 (Yun et al., 2001).

기후변화의 심각성에 대한 관심의 증가에 따라서 국제적으로 이와 관련된 탄소배출에 대한 규제 및 기준의 강화에 대한 요구가 높아지고 있으며, 이에 대한 농업분야의 장기적인 대응 마련이 필요하게 되었다. 이와 더불어 농식품의 안전성 및 환경성 자료공개에 대한 소비자의 요구의 대응 방안으로 탄소성적표지제도의 도입이 영국, 일본 등 선진국을 중심으로 활성화되고 있다. 국내 농업시스템과 유사한 일본의 경우 국가기관 및 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 매뉴얼 개발과 지속가능한 농업생산 시스템 개발 및 작물별 농업생산기술에 적용하였다 (일본 농

접수 : 2010. 9. 30 수리 : 2010. 10. 15

*연락처 : Phone: +82312900230

E-mail: khs0@korea.kr

업환경기술연구소, 2003). 이에 비하여 우리나라 환경부에서 시행하는 탄소성적표지제도는 농업분야의 LCI (Life Cycle Inventory) database의 부재를 이유로 1차 농산물을 제도대상에서 제외하고 있어 농산물 탄소성적표지제도 도입을 위한 농업분야 LCI database에 대한 연구와 구축이 시급한 실정이다. 따라서 본 연구는 쌀의 LCI D/B 구축과 탄소원단위 산정 및 전과정 영향평가를 하기위하여 수행되었다.

재료 및 방법

전과정평가 (Life Cycle Assessment, LCA)는 생산의 전과정 동안에 투입되고 환경으로 부하되는 물질목록을 구성하고, 환경 전반에 미치는 영향을 평가하는 도

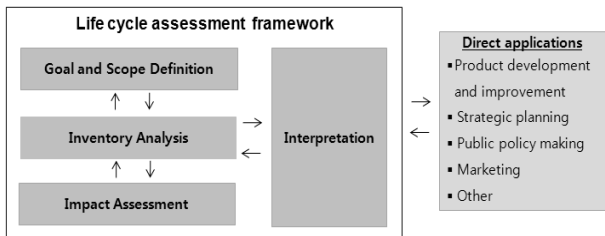


Fig. 1. Framework for life cycle assessment (ISO, 2006).

구이다 (Haas et al, 2001). 쌀의 전과정 평가(LCA, Life Cycle Assessment)는 국제표준화기구 (ISO, International Standard Organization)에서 제정한 환경경영체제에 관한 국제표준 ISO 14040의 규격에 의거하여 수행하였다 (Fig. 1).

연구 목적 및 범위 (Goal and Scope definition) 전과정평가의 첫 번째 단계는 목적 및 범위 정의이며 이 단계에서는 연구를 수행하는 목적과 대상 및 연구 적용 분야에 대해서 정의한다. 그리고 연구의 목적에 따라 대상제품 및 시스템의 기능을 정량화시킨 기능단위를 정의하고 시스템 경계를 설정한다. 본 연구의 목적은 쌀생산체계에 대한 LCI (전과정 목록분석) database 구축하여 전과정 목록분석을 통하여 쌀이 생산되는 과정에서 발생하는 탄소배출량 산정 및 전과정 영향평가를 통한 환경영향 기여도 평가로 정의하였다. 쌀의 기능은 식용 및 각종 식품제조의 원료이며, 기능 단위는 식품 및 식품제조의 원료용으로 사용되는 농산물 1 kg 생산으로 정의하였다. 연구의 범위는 전과정평가의 대상범위를 정의하는 과정으로 쌀을 생산하는 과정을 표준재배지침을 기준으로 작성하고 이에 대한 쌀 생산 시스템경계를 정의하여 결정하였다 (Fig. 2). 쌀의 생산시스템 경계는 농작물 생산단계 (육묘, 정식, 재배, 수확)에 사용되는 원료물질 (종자, 묘), 보조물질 (농약, 비료, 농자재 등), 에

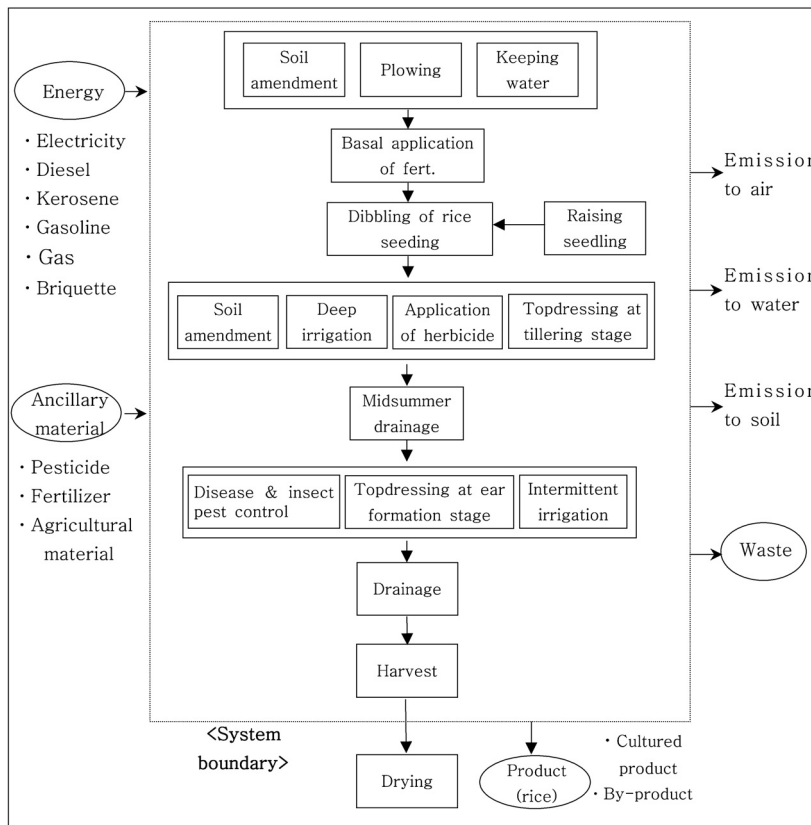


Fig. 2. System boundary, relevant inputs and outputs of a rice production system (Gate to gate).

너지 (전기, 경유 등)농작물의 투입물과 대기, 수계, 토양에 부하되는 배출물 및 고품폐기물을 포함하는 Gate-to-gate (GTG)를 원칙으로 설정하였다.

전과정 목록분석 (Life Cycle Inventory Analysis)

본 단계에서는 연구 목적에 따라 정의된 시스템 내에 투입되고 배출되는 모든 물질들을 물질수지원칙과 할당 (Allocation)을 통해 기능단위에 맞추어 정량화한다. 목록분석 단계는 데이터를 수집하고 가공하는 단계로 이를 위한 단위공정 설정, 공정흐름도 작성, 데이터 계산 및 검증 과정이 요구되며, 전과정평가 단계 중 가장 많은 시간이 소모된다. 투입량과 배출량의 단위는 본 연구의 기능단위인 쌀 1 kg⁻¹로 산정하였다. 비료, 종자, 에너지, 농자재 (비닐과 부직포) 투입량은 농축산물소득자료집 (RDA, 2007)을 기준으로 관련 통계, 문헌자료, 설문조사, 전문가 인터뷰, 현장방문을 통하여 수집하였다. 비료의 경우 사용량은 단순 투입량이 아닌 유효성분사용량을 기준으로 산정하였다. 농약투입량은 농약연보와 농약사용침서 (KCPA, 2007)를 바탕으로 작물별 농약사용가중치를 적용한 지수를 사용하여 계산하였고, 연료 사용 및 비료 사용으로 인한 대기배출물은 IPCC 1996 배출계수를 이용하여 배출량을 산출하였다. 농업폐기물 (폐비닐과 보온덮개)은 영농폐기물 통계 (KWA, 2007, MIFAFF, 2004)등의 자료를 토대로 배출량을 산정하였다. 여기서 데이터 수집 및 품질 요건은 시간적 경계를 가급적 최근 5년 이내의 최신데이터와 지역적 경계로서 국내 식량작물 생산 시스템을 기준으로 하는 국내·외 데이터, 현재 국내에서 상용화된 기술을 기준으로 하는 동일시스템이나 유사시스템에 관한 데이터의 기술적 경계를 기준으로 하였다. LCI (전과정 목록분석)평가도구는 지식경제부 산하 한국인정원에서 개발한 소프트웨어 PASS (4.1.3)를 사용하였다. 비료와 농약생산 공정 등 현재 농업분야와 관련된 상·하위 흐름 LCI D/B 가 구축되어 있지 않으므로 시스템 상·하위 흐름 D/B는 스위스 Ecoinvent database를 사용하였다. 에너지생산 (전기

및 화석연료)과 폐기물 처리 등 일부 산업공정에 속하는 분야는 국내 환경부와 지경부의 데이터베이스를 연결하여 사용하였다. 전과정 목록분석결과 쌀 생산을 통하여 대기 중으로 배출되는 온실가스는 kg CO₂-eq. kg⁻¹ rice 단위로 산출한 탄소성적으로 표시되며, 대상 물질은 교토의정서에서 규정한 6대 온실가스 (GHG, Green House Gas)는 이산화탄소 (CO₂), 메탄 (CH₄), 아산화질소 (N₂O), 수소불화탄소 (HFCs), 육불화황 (SF₆), 과불화탄소 (PFCs)를 중심으로 산정하였다. 농산물의 전과정 탄소성적은 식 (1)의 방법으로 산정되었다.

전과정 탄소성적 (kg CO₂-eq.)

$$= \sum \{ \text{온실가스 배출량 (kg GHG)} \times \text{GWP} \} \quad (1)$$

여기서, GWP (Global Warming Potential, 지구온난화지수)는 온실가스가 100년 동안에 대기에 머물며 지구에 미치는 온난화 효과로 CO₂를 1로 하였을 때 환산된 값으로 CH₄는 21, N₂O는 310, HFC-134a가 1300, HFC-152a는 140, HFC-23은 11700, SF₆은 23900, PFCs는 6500의 값을 갖는다 (IPCC 2001).

전과정 영향평가 (Life Cycle Impact Assessment)

전과정 영향평가는 목록분석 단계에서 정량화된 투입 및 산출물들을 환경영향과 대응시켜 이들에 대한 각각의 잠재적 환경영향을 평가한다. 본 연구에서는 지식경제부 영향평가 방법론 및 특성화 계수를 사용하여 무생물자원고갈(ADP), 지구온난화 (GWP), 오존층고갈 (ODP), 산성화 (AP), 부영양화 (EP), 광화학산화물생성 (POCP), 인간독성 (HTP), 담수생태독성 (FAETP), 해수생태독성 (MAETP), 토양생태독성(TETP)의 10가지 영향범주에 미치는 환경영향을 정량화하였다. 영향범주내 기준물질을 정하여 이를 각 영향범주의 단위로 표시하며 (Table 1), 각각의 기준물질 대한 관련 물질들의 상응값 (특성화 계수)과 발생량의 곱을 합한 특성화값을 구하여 영향범주별 환경영향에 대한 기여도를 공정별로 평가하였다

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

Impcat categories	Abbreviation	Unit
Abiotic resource Depletion	ADP	1 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

Table 2. Data of Inputs and outputs for the rice cultivation.

Input/Output	Unit	Quantity	Data source
kg ⁻¹ product			
Input			
seed, seedling	kg	1.54E-02	2007 incomes data (RDA, 2008)
composts	kg	4.29E-01	incomes data (RDA, 2008)
N fertilizers	kg	1.78E-02	incomes data (RDA, 2008)
P fertilizers	kg	2.79E-04	incomes data (RDA, 2008)
K fertilizers	kg	2.66E-04	incomes data (RDA, 2008)
compound fertilizers	kg	2.30E-01	incomes data (RDA, 2008; KFIA, 2007)
lime	kg	2.45E-03	incomes data (RDA, 2008)
silicate fertilizer	kg	3.74E-02	incomes data (RDA, 2008)
pesticides	kg	1.89E-03	Agrochemical year book, Agrochemical use guide book (KCPA, 2007)
electricity	kw	5.55E-03	incomes data (RDA, 2008)
fossil feul	L	1.08E-02	incomes data (RDA, 2008)
vinyl	m	5.63E-05	incomes data (RDA, 2008)
felt	m	3.95E-03	incomes data (RDA, 2008)
Output			
direct emissions (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O)	kg	3.23E-02	IPCC 1996
vinyl wastes	kg	1.44E-05	KWA, 2007
lagging cover wastes	kg	7.68E-04	MIFAFF, 2004
product (rice)	kg	1.00E+00	incomes data (RDA, 2008)

결과 및 고찰

전과정 목록분석 (Life Cycle Inventory Analysis)

전과정 목록분석을 위한 데이터 수집결과 유기질비료와 복합비료가 각각 4.29E-01 kg kg⁻¹ rice, 2.30E-01 kg kg⁻¹ rice으로 영농단계에서 가장 높은 투입량을 보였고, 영농단계에서 발생하는 직접대기배출물이 3.23E-02 kg kg⁻¹ rice의 배출값을 나타내었다 (Table 2).

비료나 농약 등의 투입물의 원료채취부터 생산까지의 공정과 벼 생산 단계를 거쳐 폐기물의 처리단계까지의 gate to gate를 원칙으로 하는 쌀 생산체계에서 발생하는 온실가스의 전과정 목록분석결과 산정된 탄소성적값은 8.70E-01 kg CO₂-eq. kg⁻¹ rice이었다. 이 중 CO₂가 7.02E-01 kg CO₂-eq. kg⁻¹ rice로 가장 높은 값을 나타내었고, CH₄과 N₂O의 배출량은 각각 1.19E-01 kg CO₂-eq. kg⁻¹ rice, 4.83E-02 kg CO₂-eq. kg⁻¹ rice이었다. 온실가스 발생의 약 80%가 CO₂였고, CH₄는 13%, N₂O는 5%의 비중을 차지하였다 (Fig. 3).

전과정 영향평가 (Life Cycle Impact Assessment)

전과정 영향평가 결과 지구온난화 영향범주의 특성화 값은 8.70E-01 kg CO₂-eq. kg⁻¹으로 쌀 생산 중 재 배포장에서 배출되는 지구온난화가스의 기여도는 약 4%였고, 비료공정에 의한 기여도가 가장 높았다. 즉, 지구 온난화에 기여하는 주요인자는 유기질비료 생산 공정이 42%, 무기질비료 생산이 40%로 비료생산공정에 의한

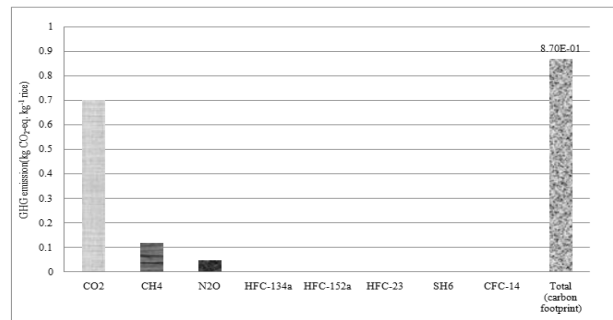


Fig. 3. Carbon footprint of rice production system calculated by LCI.

비중이 가장 높았다. 그 밖에 광화학적산화물생성범주는 1.36.E-04 kg C₂H₄-eq. kg⁻¹, 산성화범주는 3.33E-03 kg SO₂-eq. kg⁻¹, 부영양화범주 특성화값은 1.51E-04 kg PO₄³⁻-eq. kg⁻¹이었다. 대부분의 영향범주에서 비료생산에 의한 환경영향 기여도가 가장 높았고, 농자재 생산공정에서 두 번째 순위의 기여도를 나타내었고, 농약생산공정에 의한 기여도는 크지 않았다 (Fig. 4). 부영양화범주의 특성화값에서 쌀생산단계에서 수계로 배출되는 질산염과 인산염의 값이 배출계수 및 배출모델과 배출량산정에 대한 정립이 미비한 관계로 데이터의 자료수집이 이루어지지 않았다. 추후 쌀 생산단계에서의 질소와 인산비료의 토양 및 수계 유출에 대한 배출량을 산정하여 LCIA를 수행한다면 환경영향 기여도에 변화를 줄 수 있을 것으로 예상되었다.

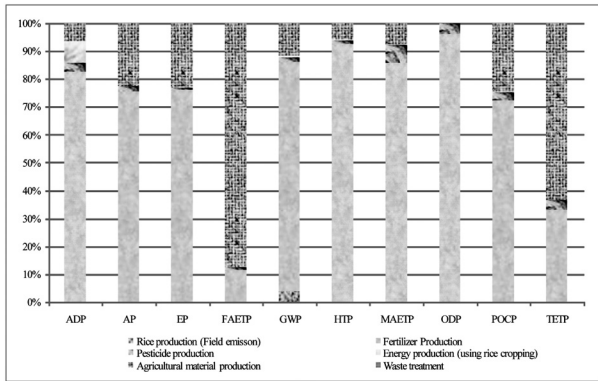


Fig. 4. Contribution of rice production system to environmental effects with one kilogram of rice production by LCIA.

해 석 (Interpretation) 전과정 해석은 전과정 목록 분석 혹은 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.

전과정 목록분석단계에서 쌀 생산과정에서 발생하는 온난화가스 배출량을 CO₂값으로 환산하여 탄소성적을 구하였다. 이를 바탕으로 쌀 생산과정의 생산공정별 온난화가스 발생에 대한 기여도를 분석하였다 (Fig. 5). 온실가스 배출에 가장 큰 기여자는 비료생산 공정이었다 (약 76%). 비료생산 중 CH₄, N₂O의 발생은 유기질 비료생산에 의한 발생이 매우 높게 나타났고 (약 90%), CO₂의 경우 무기질비료와 유기질 비료 생산공정간 발생량이 비슷한 분포를 보였다. 영농작업에서 발생하는 포장에서의 온난화가스 직접대기발생량은 약 6%의 기여도를 나타냈다. 그 외 농자재 생산 공정, 농약 생산 공정, 에너지 생산 공정의 기여도는 각각 약 15%, 2%, 1%였다. 이러한 공정별 기여도 차이는 쌀 생산에 투입되는 비료, 농약 등의 투입량 (Table 1)의 차이가 전과정 환경영향평가 (LCIA) 결과에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 즉, 공정별로 환경범주에 미치는 기여도가 투입량과 유사한 경향으로 나타나는 것으로 판단되었다. 포장에서 온난화가스 발생 (CO₂, CH₄, N₂O)의 주요원인은 농기계사용으로 인한 화석연료의 연소와 질소비료 사용에 기인한 대기로의 아산화질소의 발생이었다.

LCA 평가 결과 쌀 생산체계에서 환경영향부하에 대한 가장 주요한 인자는 비료생산공정으로 나타났다. 그러므로 환경성 개선을 위하여 적절한 시비관리로 비료 투입량을 합리적으로 감소시킬 수 있다면 쌀 생산체계에서 발생하는 탄소배출량을 저감시킬 수 있을 것으로 판단되었다. 이와 더불어 담수 논의 경우 혐기조건에서의 CH₄ 발생에 대한 추가적인 연구와, (Lee and Suh,

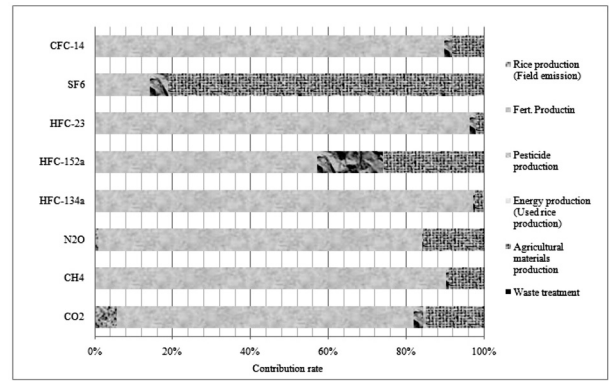


Fig. 5. Contribution to GHG emission in the rice production system.

1993), 질소비료 시비체계 차이에 따른 환경영향평가가 필요할 것으로 판단되었다 (Shin et al., 2003).

LCA 수행과정에서 단계별 민감도 분석이나, 불확실성 분석과 시나리오 분석을 통한 정량화된 대안제시 등이 이루어지지 않았다. 그러므로 LCA 평가의 신뢰성 재고를 위한 추가적인 분석 작업 및 자료의 수집이 요구된다.

한계 및 개선점 쌀은 다양한 과정을 통하여 상업적 생산물인 쌀과 부산물, 잔류물 등을 생산한다. 전과정 목록분석 단계에서는 연구 목적에 따라 정의된 시스템 내에 투입되고 배출되는 모든 물질들을 물질수지원칙과 할당(Allocation)을 통해 기능단위에 맞추어 정량화한다 (Erwin and Annik, 2008). 이 때 할당은 쌀 생산에 관련된 상·하위 공정 사이의 환경부하를 배분하기 위해 적용되며, 부산물의 환경부하에 대한 할당은 상대적인 경제적 가치에 기초하여 수행한다. 현재 볏짚 등 작물잔사의 경제적 가치는 정립되어있지 않으며, 작물잔사에 의한 환경부하는 없는 것으로 간주되고 있다 (Williams et al, 2006). 그러므로 작물잔사의 시스템 범위 포함 여부 및 이에 대한 할당의 필요성 및 방법론의 정립에 대한 연구가 필요할 것으로 판단되었다. 본 연구에서는 농가 전력사용량을 기준으로 농업용수의 사용량을 추산하였으나, 좀 더 정확한 관개용수량에 관한 조사가 필요할 것으로 사료된다. Blengini and Busto (2009)의 쌀에 대한 LCA 수행 연구의 경우, 지역 통계와 기타 문헌자료 등을 통하여 자연담수량과 비작물에 소요되는 관개량과 용수의 재사용량 등을 조사하고 이에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 또한 쌀 생산체계에 대한 국가 인벤토리 구축을 목적으로 하는 본 연구의 목적에 부합하기 위한 시스템 범위의 정의에 대한 논의가 필요할 것으로 보인다. 즉 LCA 수행의 시스템범위를 최종적으로는 식품산업분야와 연계될 수 있도록 쌀의 경우 생산체계를 벼를 수확한 후 건조 및 저장, 도정 및

포장까지 확대하고, 이와 관련하여 작업공정 및 유통과정 등에 따른 수송형태와 수송거리의 수송체계를 정립하고 이에 의한 환경부하 모델을 바탕으로 에너지 소모와 환경부하량을 산정한 수송 공정의 추가가 요구된다.

적 요

농산물 탄소성적표지제도 도입을 위한 농업분야 LCI database에 대한 연구를 위하여 쌀의 생산체계를 대상으로 전과정평가를 수행하였다.

LCI 구축을 위한 영농 투입물과 산출물에 대한 데이터 결과 유기질비료와 복합비료가 각각 4.29E-01 kg kg⁻¹ rice, 2.30E-01 kg kg⁻¹ rice으로 영농단계에서 가장 높은 투입량을 보였고, 영농단계에서 발생하는 직접대기배출물이 3.23E-02 kg kg⁻¹ rice의 배출값을 나타내었다. 쌀 생산체계에서 발생하는 온실가스를 중심으로 전과정 목록 분석을 수행한 결과 탄소성적값은 8.70E-01 kg CO₂-eq. kg⁻¹ rice이었다. 이 중 CO₂가 7.02E-01 kg CO₂-eq. kg⁻¹ rice로 온실가스 발생의 약 80%가 CO₂였고, CH₄과 N₂O의 배출량은 각각 13%, 5%의 비중을 차지하였다. 전과정 영향평가 결과 지구온난화에 기여하는 주요인자는 유기질비료 생산 공정이 42%, 무기질비료 생산공정이 40%로 비료생산공정에 의한 비중이 가장 높았다.

인 용 문 헌

일본 농업환경기술연구소. 2003. 환경영향평가를 위한 LCA 기법의 개발.

Blengini, G.A. and M. Busto. 2009. The life cycle of rice: LCA of alternative agri-food chain management system in Vercelli (Italy). *Journal of Environmental Management*. 90:1512-1522.

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.

Haas, G., F. Wetterich, and U. Köpke. 2001. Comparing intensified and organic grassland farming in southern Germany by process life cycle assessment. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 83:43-53.

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.

Ko J.Y., H.W. Kang, U.G. Kang, H.M. Park, D.K. Lim, and K.B. Park. 1998. The effects of nitrogen fertilizers and cultural patterns on methane emission from rice paddy fields. 17:227-233.

KWA (Korea Waste Association). 2007. *Agricultural waste data*. Korea Waste Association. Seoul, Korea. www.kwaste.or.kr/data/

Lee, S.K. and J.S. Suh. 1993. Emission of Greenhouse in the agricultural environment. 1. The cropping system and emssion of the greenhouse -CO₂, CH₄, N₂O- under different cropping system. *Journal of Korean soc. soil sci. fert.* 26:49-56.

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, H.K., M. Xu, K.B. Lee, W.Y. Choi, M.G. Choi, S.S. Kim, and C.K. Kim. 2006. Comparison of rice growth under subtropical and temperate environments. *Korean journal of agricultural and forest meteorology*. 8(2): 45-53.

RDA (Rural Development Administration). 2008. *2007 Agro-livestock incomes data book*. Rural Development Administration. Suwon, Korea.

Shin, J.D., D.K. Lim, G.Y. Kim, M.H. Park, M.H. Koh, and K.C. Eom. 2003. Application of the life cycle assessment methodology to rice cultivation in relation to fertilization. *Korean J. of Environmental Agriculture*. 22:41-46.

Williams, A.G., E. Audsley, and D.L. Sandars. 2006. Determining the environmental burdens and resource use in the production of agricultural and horticultural commodities. Main Report. Defra Research Project ISO 205. Bedford: Cranfield University and Defra.

Yun, S.H., J.N. Im, J.T. Lee, K.M. Shim, and K.H. Hwang. 2001. Climate change and coping with vulnerability of agricultural productivity. *Korean journal of agricultural and forest meteorology*. 3:220-227.