

전과정평가(Life Cycle Assessment)를 이용한 관행농과 유기농 쌀의 환경성 및 외부비용 분석*

임송택** · 이춘수*** · 양승룡****

Environmental Impact and External Cost Analysis by LCA : Conventional vs. Organic Rice

Lim, Song-Tak · Lee, Choon-Soo · Yang, Seung-Ryong

This paper evaluates potential environmental impacts and external costs on rice production of Korea. The investigation is based on LCA in agricultural area which estimates inputs and outputs of rice production system in quantitative way. The results show that environmental impacts on organic rice(4.49E-08 DALY/kg) is level on 4.5% out of conventional rice(9.97E-07 DALY/kg). The external costs of organic and conventional rice are 4.04won/kg and 89.52won/kg respectively. The balance of both organic and conventional rice which is 85.48won/kg represents monetary value on improvement of environmental effects as producing organic rice.

Key words : *rice, life cycle assessment, external cost, environmental labeling*

I. 서 론

1960년대 화학비료와 농약사용을 통해 식량 증산에 성공한 ‘녹색혁명’은 근래 들어 병충해의 내성 강화, 인간건강 및 생태계 독성, 토양산성화 등 다양한 환경문제를 낳으면서 그 지속가능성을 의심받고 있는 상황이다. 농업은 가장 기본적인 인간 활동의 하나로 환경측

* 이 연구는 2007년도 산학협동재단의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

** 고려대학교 일반대학원 식품자원경제학과 박사과정

*** 고려대학교 일반대학원 식품자원경제학과 박사과정

**** 교신저자, 고려대학교 식품자원경제학과 교수(sryang@korea.ac.kr)

면에서 홍수조절, 수자원 확보, 토사 유실 방지 등의 순기능과 더불어 여러 가지 환경문제를 유발시키고 있다. 농업이 환경에 미치는 부정적 영향으로는 에너지 소비, 비료 및 농약 등에 의한 지표수·지하수 오염, 농약사용에 따른 생태독성, 토양의 질 저하(유실, 오염, 침식 등), 생물종 다양성의 감소 등이 있다.

한편, 농산물 시장개방화가 확대되면서 우리 농업의 활로로서 친환경농업의 중요성이 부각되고 있다. 친환경농산물 생산은 1990년대 후반 이후 매년 급속한 성장세를 보이고 있으며, 소득수준이 높아짐에 따라 건강에 대한 관심도 크게 증가하여 참살이(웰빙) 식품과 친환경 유기농산물에 대한 수요도 지속적으로 증가하고 있는 것이다. 국내 친환경농산물의 생산량은 2005년도 798천톤(전체 농산물 대비 4.4%)에서 2008년 2,188천톤(전체 농산물 대비 11.9%)으로 급속히 증가하고 있으며, 재배면적은 2008년 현재 174,107ha로 전체 면적 대비 9.9%의 비중을 차지하고 있다(농림수산식품부, 2009).

하지만 친환경농업육성법에 따라 현재 우리나라에서 실시하고 있는 친환경인증은 화학비료와 농약의 사용 여부에만 초점을 맞추고 있어, 농산물의 종합적인 환경성을 평가하기에는 여러 가지로 부족한 것이 사실이다. 예를 들면, 농약과 화학비료를 투입하지 않고 재배된 국내 유기농산물과 해외에서 수입된 유기가공식품의 환경측면의 차별화가 어렵다. 장거리 이동에 따른 유통 및 수송과정에서 적지 않은 화석연료를 사용하고 또 온실가스를 배출하며 국내로 유입되는 수입 농수산물 및 식품의 환경성을 평가함에 있어서 안전성 외에도 에너지 소비, 온실가스 배출량 등 보다 다양한 평가기준들이 마련될 필요가 있다. 이는 기존의 국내 유기농산물과 일반 관행농산물의 환경성을 비교, 평가하는데도 동일하게 적용될 수 있는 문제이다.

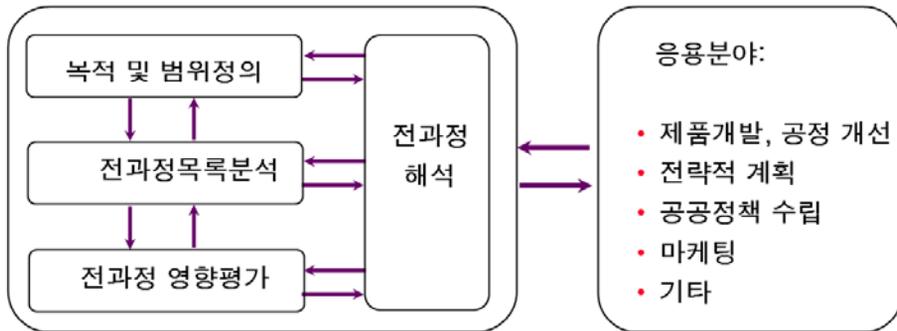
본 연구는 국제표준화기구(ISO)에 의해 규격화된 제품 환경성평가도구인 전과정평가(life cycle assessment, LCA) 방법론을 이용하여 일반 관행농 및 유기농 쌀 생산에 대한 환경영향과 그에 따른 외부비용을 평가하였으며, 이를 위해 농업분야에 적합한 전과정평가 방법론 개발, 전과정목록분석, 전과정영향평가 및 외부비용 평가를 수행하였다. 본 연구 결과는 향후 농식품기업의 마케팅, 농업분야의 환경성 평가, 친환경농업직접지불제 등 농업정책의 기초자료 제공, 환경/탄소라벨링제도의 보급 확산, 방법론 개선 등에 활용될 수 있을 것이다.

II. 이론적 배경

1. 전과정평가 방법론

전과정평가(life cycle assessment, LCA)는 제품 또는 서비스의 전과정 즉, 제품의 원료 채취, 생산, 사용, 운송 및 폐기단계에 걸친 환경영향을 평가하는 기법이다. 전과정평가의 궁

극적인 목적은 환경적으로 건전하고 지속가능한 발전을 실현하기 위하여 제품, 재료 등의 전과정을 통한 자원/에너지 소비 및 환경오염 부하를 최소화시키고 개선방안을 모색하는데 있다. 오늘날 각종 환경문제에 직면하고 있는 기업체 및 행정기관, 소비자(단체)들은 보다 효과적인 환경보전 방안을 모색하기 위한 수단으로 전과정평가의 활용범위를 넓혀가고 있다. 전과정평가는 환경영향평가(environmental impact assessment, EIA), 위해성평가(risk assessment, RA) 등과 함께 널리 사용되는 환경평가도구 중 하나로, 국제표준화기구에 의해 방법론이 규격화되어 연구결과에 대한 객관성을 확보할 수 있다는 장점을 지니고 있다. ISO 국제기구는 전과정평가를 목적 및 범위 정의(goal and scope definition), 전과정목록(life cycle inventory, LCI) 분석, 전과정영향평가(life cycle impact assessment, LCIA) 및 전과정해석(life cycle interpretation)의 4가지 단계로 구분하고 있다(ISO, 2006).



〈그림 1〉 전과정평가의 단계

첫번째 단계인 목적 및 범위 정의의 설정은 연구의 목적, 기능단위(functional unit), 범위(scope), 데이터 수집 방법 등을 설정하는 단계로서 연구의 전체적인 방향을 설정한다. 두번째 전과정목록분석 단계는 전과정평가를 위하여 필요한 데이터를 수집, 정리하는 단계로서 연구범위에서 선정한 시스템을 대상으로 모든 환경부하(투입물과 배출물)를 정량화한다. 세 번째 전과정영향평가는 목록분석의 결과의 영향범주별 분류화(classification), 분류된 목록 매개변수들이 영향범주에 미치는 잠재적 기여도를 정량화하는 특성화(characterization), 정규화인자(특정시간, 지역 및 인구수 등)를 이용하여 영향범주별 환경영향의 전체 영향 기여도를 파악하는 정규화(normalization), 그리고 영향범주별 상대적인 가중치를 결정하는 가중치부여(weighting) 순으로 실시한다. 전과정평가의 마지막 단계인 해석 과정에서는 목록 분석 및 영향평가 결과를 통하여 주요 환경영향과 인자를 규명, 평가하며, 의사결정권자에게 결론과 권고 형태로 보고하는 과정을 거친다(이건모 등, 1998).

전과정영향평가의 수행 시 대상시스템의 전과정에 걸친 각종 투입, 산출물로 인한 인체 및 생태계의 건강영향과 위해성을 평가하기 위한 종말점(end point) 영향평가방법으로는 네

덜란드의 ‘eco-indicator 99’ 및 일본의 ‘피해산정형영향평가(LIME)’ 방법론(産業環境管理協會, 2005)이 주로 사용되고 있으며, 두 방법론 모두 모두 장애보정손실년수(disability adjusted life years, DALY)¹⁾를 이용하여 각기 다양한 영향범주들의 인간건강에 대한 환경영향을 정량화하고 있다.

2. 농업분야의 선행 연구

농업분야에 전과정평가방법론을 적용한 연구는 1990년대부터 주로 유럽 국가들을 중심으로 수행되어 왔다. 에너지작물(Hanegraaf et al., 1998), 축산물(Cederberg and Mattsson, 2000), 원예작물(Nienhuis and de Vreede, 1996) 등 다양한 농업분야에 대한 전과정평가 연구가 이루어졌으며, 특히 밀(Charles et al., 1998; Brentrup et al., 2004)은 유럽에서 가장 많이 연구된 대표적인 농산물 중 하나다. Niels Halberg et al.(2005)는 가축 생산 시스템의 환경영향 평가를 위해 녹색계정(green accounts), 생태발자국(ecological footprint) 등 모두 6개의 환경성 평가 도구를 비교한 결과, 다양한 환경측면을 가장 많이 고려할 수 있는 방법론으로 전과정평가를 꼽았다. 그러나, 상대적으로 흔히 수행되는 공산품의 전과정평가와 달리 농산물 생산 시스템에 대한 전과정평가 연구는 유통 및 소비단계를 제외한 생산(재배 및 수확) 단계만을 대상으로 하는 경우가 많으며, 자료의 지역화(regionalization), 토양의 질(soil quality), 생물종 다양성(biodiversity), 농약으로 인한 생태 독성 등 농업 특유의 환경성 지표에 대한 제반연구가 방대한 양의 축적된 자료를 필요로 한다는 문제점을 갖고 있기도 하다.

Boer(2003)는 전과정평가 방법론을 이용하여 일반 우유와 유기축산 우유의 온실가스배출량, 산성화, 부영양화 영향 등을 비교하였다. 유기축산 우유가 단위생산량 당 온실가스 배출량이 상대적으로 적는데 비해, 토지면적은 더 많이 필요로 하는 것으로 조사되었다. Sonesson et al.(2000)는 스웨덴 읍살라 지역의 유기성폐기물에 대한 처리방법별 환경성 및 경제성 평가를 수행하였으며, 연구 결과 혐기성소화방식이 환경영향은 가장 적은 반면, 처리비용은 상대적으로 고가인 것으로 나타났다.

쌀을 대상으로 한 전과정평가는 비교적 최근에 연구되고 있다. Blengini et al.(2003)이 유

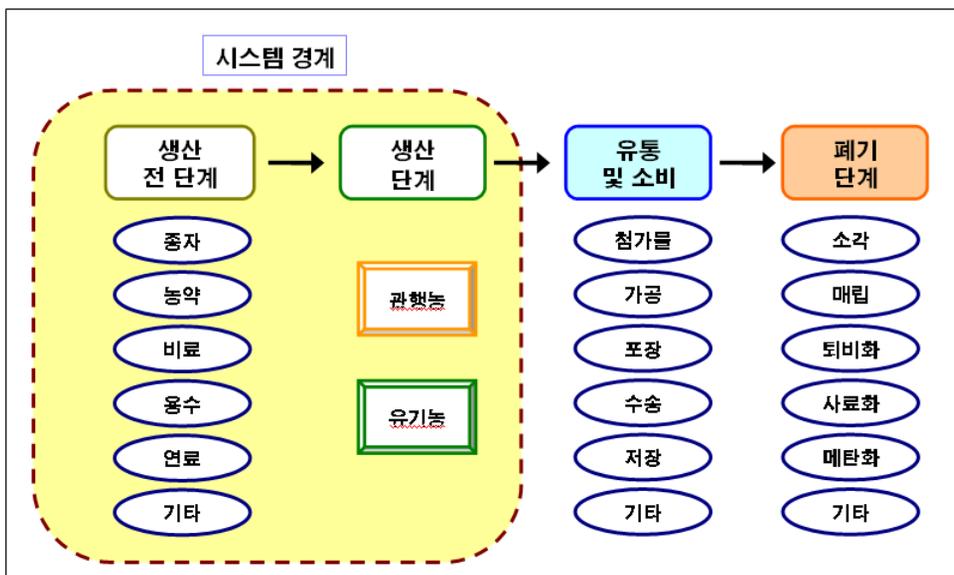
1) 장애보정손실년수(DALY)는 전반적인 질병부담을 계측하기 위해 세계보건기구(WHO)가 추진한 GBD(global burden of disease)연구에서 개발된 건강지표로서, 질병, 장애 등의 이유로 건강하게 생활하지 못한 햇수(조기사망으로 인한 수명손실 포함)가 몇 년인지를 인년(人年, person-year) 단위로 지표화한 것임. 장애보정손실년수(DALY) 지표를 이용하면 사망과 장애로 인한 인간건강의 손실을 하나의 단위로 계측하여 지역 또는 국가단위의 질병부담(burden of disease, BOD)을 정량화하는 것이 가능하기에, 각국의 질병부담 측정, 국제적 비교, 보건정책 의사 결정, 각종 장애 및 질환의 우선순위 결정 등에 널리 활용되고 있음.

립최대의 쌀 생산지인 이탈리아 베르첼리 지역의 쌀 생산 시스템에 대해 수행한 전과정평가가 대표적이다. 이 연구는 논에서 소매점까지의 쌀 전과정에 투입되는 에너지와 용수 및 온실가스 배출량 등을 정량화하였으며, 쌀의 환경성 평가, 개선 방안 마련 및 생산자와 소비자간 의사소통에 전과정평가가 유용하게 활용될 수 있다고 결론짓고 있다. 최근 일본에서 수행한 Roy et al.(2009)의 연구는 다양한 형태로 소비되는 쌀의 종류와 경로를 좇아 각각의 자원과 에너지 소모량을 정량화하였다. 쌀의 종류(백미, 현미, 발아현미, 전쌀 등), 생산단계(재배, 도정, 포장, 수송, 폐기 등), 포장지 소재(종이 및 폴리에틸렌), 수송거리 등을 구분하여 각각의 환경영향을 평가하였으며, 쌀의 생산 및 소비 양식의 개선을 통해 일본의 쌀 전과정에서 발생하는 부정적 환경영향을 2~16% 가량 줄일 수 있다고 주장한다.

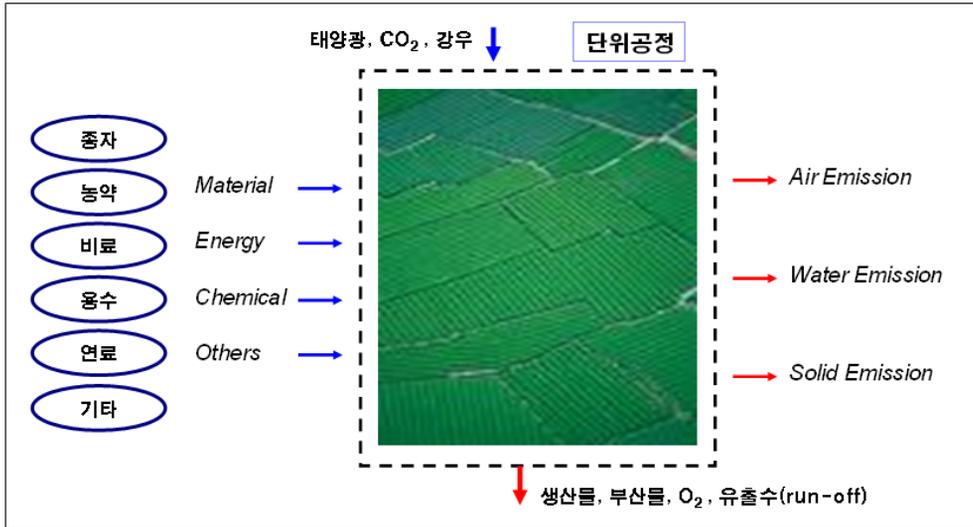
Ⅲ. 쌀 생산의 전과정평가

1. 목적 및 범위 정의

본 연구의 목적은 농업분야 전과정평가 방법론을 개발하여, 관행농 및 유기농 쌀 생산에 따른 전과정목록 작성 및 전과정영향평가를 수행하는 한편, 이를 토대로 주요 이슈를 규명하고, 환경영향(environmental impact)의 외부비용(external cost)을 평가하는데 있다.



〈그림 2〉 본 연구의 시스템 경계 및 쌀의 전과정



〈그림 3〉 쌀 생산 공정 및 주요 투입배출물

쌀의 전과정(life cycle)은 생산 전(前)단계, 생산단계, 소비단계 및 폐기단계로 나눌 수 있다. 생산 전(前)단계란 농약, 비료, 연료 등 쌀 재배 과정의 투입물이 생산되는 과정을 뜻한다. 농약, 비료와 같은 투입물의 생산과정에서 에너지 및 자원의 투입과 각종 환경오염물질의 배출이 일어나며, 이는 쌀의 실제 재배과정에서의 투입 및 배출은 아니지만 쌀의 생산에 따른 환경부하로 인정된다. 생산단계는 종자소독, 논갈이, 모내기, 농약 및 비료 살포, 수확, 건조, 도정까지 쌀을 재배하고 수확하는 모든 과정을 포함한다. 생산된 쌀은 소비단계에서 가공, 포장을 거쳐 유통, 소비되며, 폐기단계는 주로 음식물류폐기물에 포함된 쌀이 사료화, 퇴비화, 메탄화 등의 과정을 통해 처리, 처분되는 단계이다. 본 연구는 관행농 및 유기농 쌀의 생산과정의 환경성과 외부비용에 초점을 맞췄기 때문에 쌀의 전과정 중 생산 전(前)단계와 생산단계를 시스템 경계(system boundary)로 설정하였으며 소비단계와 폐기단계는 분석, 평가에서 제외했다(<그림 2> 참조).

자료수집 단위를 의미하는 단위공정(unit process)과 대상시스템은 벼가 재배되는 ‘논’이다. 논을 기능을 정량화한 기능단위(functional unit)로는 ‘쌀 1kg의 생산’을 설정하여, 쌀 1kg의 생산에 따른 각종 투입물(비료, 농약, 연료 등)과 배출물의 양을 정량화하였다(<그림 3> 참조).

2. 전과정목록분석 과정

전과정목록분석은 연구의 목적 및 범위정의의 내용을 토대로 자료를 수집하고 정량적인 투입배출물 목록을 구축하는 단계로 ISO 14041 규격 절차에 준하여 수행하였다.

관행농 쌀 생산자료는 2007년 통계청 농산물생산비(논벼) 자료 및 표본농가(1,171개)의 원자료를 사용하였고, 유기농 쌀 생산의 경우는 환경농업단체연합 회원 농가를 대상으로 설문조사를 실시하여 회수된 426개의 농가자료를 이용하였다.²⁾ 이외에도 한국작물보호협회, 한국비료공업협회를 비롯하여 국립농산물품질관리원, 농촌진흥청 농업과학기술원, 작물과학원 등 다양한 기관의 자료들이 활용되었다.

농약과 화학비료의 경우 실제 투입량이 아닌 원제 및 유효성분별 투입량과 배출경로(대기, 수계 및 토양)를 분석하였으며(신중두 등, 2003), 에너지는 영농광열비자료를 중심으로 농가당 영농전기 및 유종별(경유, 휘발유, 등유 등) 소비량과 사용(연소) 시 대기배출물량을 조사하였다. 오리, 우렁이 등의 친환경농업자재(손상목 등, 2001)와 유기질비료의 종류별 투입량도 조사하였으나, 해당 항목에 대한 국내 LCI 데이터베이스가 구축되어 있지 않아 상위흐름 연결이 불가능하므로 전과정목록에는 포함시키지 않았다.³⁾

일반적인 전과정평가와 마찬가지로 본 연구에서도 인간의 노동력 투입과 경제적 비용, 농기계 제조 및 인프라(도로, 수로, 농업용 댐 및 기타 토목건축물) 구축에 따른 환경부하는 고려하지 않고, 물리적인 투입배출물만을 정량화하였다. 대상 시스템에서 발생한 부산물(볏짚 등)은 시스템 내부에서 다시 분해된다고 가정하였으며, 벼의 생장 및 바이오매스의 분해에 따른 영양염류의 순환과 대기배출(산소, 이산화탄소 등)은 인위적인 배출이 아닌 자연적인 물질순환의 일부로 취급하여 전과정목록에서 제외하였다. 벼와 같은 초본류에 의한 탄소의 고정과 배출은 그 주기가 짧아 대기 중 이산화탄소 농도에 장기적인 영향을 미치지 않으므로 탄소중립적(carbon neutral)이다.

상기와 같은 자료의 수집, 검증 및 처리과정을 거쳐 쌀 1kg 생산에 대한 투입배출물목록(gate-to-gate)을 작성하였다(<표 1> 참조). 여기서 투입배출물목록이란 데이터수집단위인 대상시스템(단위공정)의 경계(gate-to-gate)를 기준으로 투입물과 배출물의 종류와 양을 기재한 목록을 의미한다. 화학비료, 농약 및 에너지 등 자연계(ecosphere)가 아닌 기술계(technosphere)로부터 투입된 물질들을 상위흐름(upstream)이라 하는데, 이러한 물질 및 에너지의 생

2) 유기농 쌀 생산 자료의 경우, 최대한 지역을 안배하여 경기도 3곳(양평군, 안성군 및 강화군), 충청도 2곳(홍성군, 아산시), 전라도 3곳(영광군, 장성군, 보성군), 경상도 3곳(함양군, 의성군, 상주시) 등 모두 11개 지역의 유기농쌀 생산농가 자료를 수집하였으나, 국내 전체 유기농쌀 생산농가를 대표할 수 있는 경영규모와 유기농업 경력 등을 별도로 고려하지는 않았음.

3) 이 때문에 유기농 쌀 생산의 환경영향 및 외부비용이 과소평가되었을 가능성이 높으나, 본 연구의 환경영향 평가방법이 인간건강 측면에 국한되어 있어 해당 친환경농업자재 및 유기질비료는 연구 결과에 현저한 영향을 미치지 않을 것으로 사료됨. 국내에는 현재 약 400여개의 기초 원부자재(철강, 시멘트, 화학제품, 에너지 등)와 주요공정(성형가공, 수송, 폐기, 재활용공정 등)에 대한 국가 전과정목록(LCI) 데이터베이스가 구축되어 있으며, 농업분야는 2009년부터 농촌진흥청에서 주요 농산물 및 농업자재에 대한 데이터베이스 구축사업을 시작하였음. 2010년 현재 친환경농업자재에 대한 국가 LCI DB를 구축 중에 있으며 향후 이를 고려한 추가연구를 진행할 수 있을 것임.

산과정에서의 투입배출물들을 직접 조사하려면 많은 시간과 인력이 소요되므로, 전과정평가 전용 소프트웨어인 Simapro(ver. 7.1) 및 TOTAL(ver. 3.0.0) 에 구비된 국내외 주요 원부자재 데이터베이스의 해당 항목과 연결하여 전과정목록(life cycle inventory, LCI)을 작성하였다.

〈표 1〉 쌀 1kg 생산에 따른 투입배출물목록(gate-to-gate)

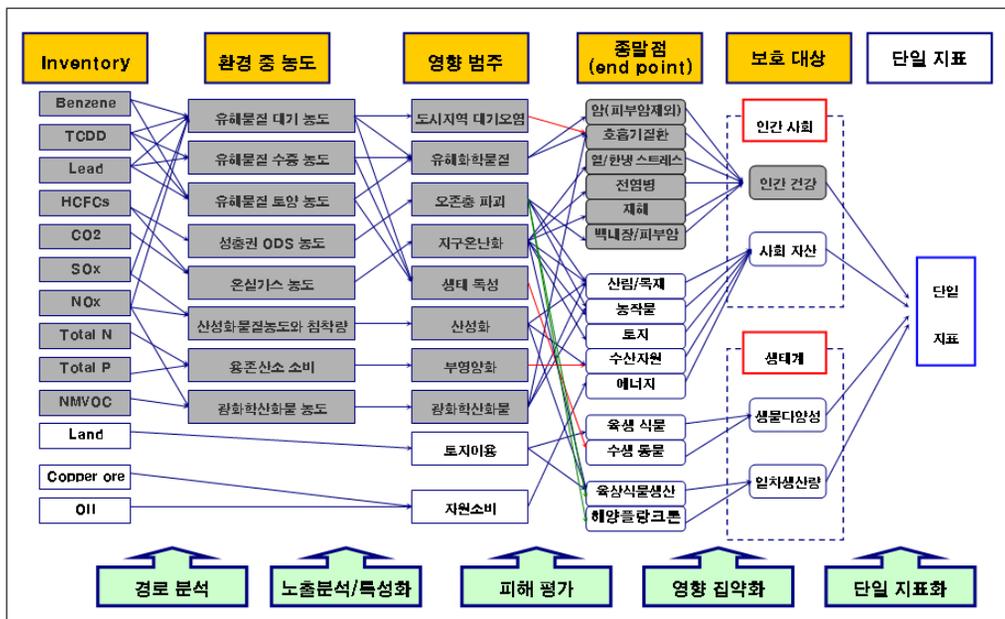
구		분	단위	관행농	유기농	
투입	비 료	질소비료	kg	3.12E-02	0.00E+00	
		인산비료	kg	2.02E-02	0.00E+00	
		칼륨비료	kg	1.97E-02	0.00E+00	
		기타비료	kg	2.48E-02	0.00E+00	
		소 계	kg	9.60E-02	0.00E+00	
	농 약	살 균 제	kg	3.76E-04	0.00E+00	
		살 충 제	kg	4.85E-04	0.00E+00	
		제 초 제	kg	3.71E-04	0.00E+00	
		소 계	kg	1.23E-03	0.00E+00	
	에너지	연 료	kg	2.63E-02	3.06E-02	
		전 기	kwh	8.23E-03	9.57E-03	
	배출	비 료	온실가스	kg	1.70E-02	0.00E+00
		농 약	유해물질	kg	1.23E-03	0.00E+00
		에너지	온실가스	kg	8.04E-02	9.34E-02
소 계			kg	9.86E-02	9.34E-02	

3. 전과정영향평가 과정

본 연구는 한국과 지리적 조건 및 기후가 비교적 유사한 일본의 ‘피해산정형영향평가(LIME)’ 방법론(産業環境管理協會, 2005)을 인구 수 및 국토 면적 등 국내 상황에 맞게 조정하고, 네덜란드의 ‘eco-indicator 99’ 방법론에 이용된 일부 자료를 조합하여 전과정영향평가를 실시하였다.

전과정영향평가는 <그림 4>와 같이 복잡한 일련의 정보처리과정을 통해 수행되며, 전과정목록의 매개변수별로 경로분석과 분류화를 거쳐 도시지역 대기오염, 오존층 파괴, 지구

온난화, 생태독성, 산성화, 부영양화 등 10개 영향 범주에 대한 잠재적 환경영향을 평가하는 특성화단계와 보호대상의 종말점(end point)에 대한 피해평가를 실시하여 최종적으로 화폐단위의 단일지표를 도출하는 정규화단계로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 정보수집의 한계 등으로 인해 인간 건강, 사회 자산, 생물다양성, 일차생산량 등 모두 4개의 보호 대상 중 인간 건강만을 고려하여 영향평가를 수행하였으며, 대상시스템이 인간건강과 관련한 6개 종말점(암(피부암 제외), 호흡기질환, 열/한냉 스트레스, 전염병, 재해, 백내장/피부암)에 미치는 잠재적 환경영향을 장애보정손실년수로 정량화하였다.



〈그림 4〉 전과정영향평가 모식도

IV. 분석결과

1. 환경영향평가 결과

연구 결과, 관행농 쌀 1kg 생산에 따른 인간건강에 대한 잠재적인 환경영향은 9.97E-07 DALY/kg으로 나타났다(<표 2> 참조). 장애보정손실년수(DALY)의 단위가 인년(人年, person-year)이므로, 이 결과값은 관행농 쌀 1kg 생산에 따른 투입배출물로 인해 9.97E-07인년에 해당하는 잠재적인 건강손실이 발생한다는 것을 의미한다. 수치가 너무 작으므로 이를 초 단위로 보다 알기 쉽게 환산하면, 관행농 쌀 1kg 생산에 따른 환경영향으로 인해 한 사람이

31.4초간의 건강손실을 입을 수 있다는 결과가 나온다. 투입배출물별 비중을 살펴보면 투입농약의 대기/수계 배출 및 토양 잔류 영향이 79.8%(7.95E-07 DALY/kg)의 절대적 비중을 차지했으며, 화학비료생산에 따른 환경영향이 14.8%(1.48E-07 DALY/kg), 농기계 사용 시 투입되는 연료 및 전기생산 2.2%(2.18E-08 DALY/kg), 농약 제조 과정 1.2%(1.18E-08 DALY/kg) 등으로 나타났다. 관행농 쌀 1kg 생산이 인간건강에 미치는 영향범주별로는 호흡기질환 67.7% > 기후변화 23.8% > 발암영향 7.6% > 방사능 0.9% > 오존층 파괴 0.0% 순이었다.

〈표 2〉 관행농 쌀 1kg 생산에 따른 환경영향(인간건강)

(단위 : DALY)

구 분		발암	호흡기 질환	기후변화	방사능	오존층 파괴	합 계		
투 입	비 료	질소비료	4.83E-09	5.01E-08	1.91E-08	1.84E-10	1.07E-11	7.42E-08	
		인산비료	1.04E-09	1.44E-08	3.18E-09	3.04E-11	2.06E-12	1.87E-08	
		칼륨비료	2.79E-09	4.53E-08	6.29E-09	1.04E-10	3.48E-12	5.45E-08	
		기타비료	5.95E-12	3.22E-10	6.03E-11	5.22E-13	4.90E-14	3.89E-10	
		소 계	8.66E-09	1.10E-07	2.86E-08	3.19E-10	1.63E-11	1.48E-07 (14.8%)	
	농 약	살 균 제	1.86E-10	1.61E-09	5.34E-10	2.25E-11	4.11E-13	2.35E-09	
		살 충 제	4.51E-10	4.49E-09	1.37E-09	4.29E-11	1.23E-12	6.35E-09	
		제 초 제	2.21E-10	2.16E-09	6.58E-10	2.18E-11	6.20E-13	3.06E-09	
		소 계	8.58E-10	8.26E-09	2.56E-09	8.72E-11	2.27E-12	1.18E-08 (1.2%)	
	에너지	연 료	5.78E-10	1.41E-08	2.86E-09	3.47E-11	1.28E-11	1.76E-08	
		전 기	6.47E-10	2.48E-09	9.99E-10	0.00E+00	3.70E-13	4.12E-09	
		소 계	1.22E-09	1.66E-08	3.86E-09	3.47E-11	1.31E-11	2.18E-08 (2.2%)	
	배 출	비 료	온실가스	0.00E+00	0.00E+00	3.56E-09	0.00E+00	0.00E+00	3.56E-09
		농 약	유해물질	6.52E-08	5.40E-07	1.82E-07	8.27E-09	1.41E-10	7.95E-07
		에너지	온실가스	0.00E+00	0.00E+00	1.69E-08	0.00E+00	0.00E+00	1.69E-08
소 계			6.52E-08	5.40E-07	2.02E-07	8.27E-09	1.41E-10	8.15E-07 (81.8%)	
합 계		7.60E-08 (7.6%)	6.75E-07 (67.7%)	2.37E-07 (23.8%)	8.71E-09 (0.9%)	1.73E-10 (0.0%)	9.97E-07 (100.0%)		

〈표 3〉 유기농 쌀 1kg 생산에 따른 환경영향(인간건강) (단위 : DALY)

구 분		발암	호흡기 질환	기후변화	방사능	오존층 파괴	합 계	
투 입	연 료	6.72E-10	1.65E-08	3.33E-09	4.03E-11	1.48E-11	2.05E-08	
	전 기	7.52E-10	2.88E-09	1.16E-09	0.00E+00	4.31E-13	4.80E-09	
	소 계	1.42E-09	1.93E-08	4.49E-09	4.03E-11	1.53E-11	2.53E-08 (56.3%)	
배 출	비 료	온실가스	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	농 약	유해물질	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	에너지	온실가스	0.00E+00	0.00E+00	1.96E-08	0.00E+00	0.00E+00	1.96E-08
	소 계		0.00E+00	0.00E+00	1.96E-08	0.00E+00	0.00E+00	1.96E-08 (43.7%)
합 계		1.42E-09 (3.2%)	1.93E-08 (43.0%)	2.41E-08 (53.7%)	4.03E-11 (0.1%)	1.53E-11 (0.0%)	4.49E-08 (100.0%)	

반면, 유기농 쌀 1kg 생산에 따른 인간건강에 대한 잠재적인 환경영향은 4.49E-08 DALY/kg인 것으로 나타났다(〈표 3〉 참조). 유기농은 쌀 생산과정에서 화학비료 및 농약 투입이 없으므로 이의 생산 및 사용에 따른 환경영향 또한 존재하지 않는다. 경유 및 휘발유 등 농기계에 투입되는 연료의 생산에 따른 환경영향(2.05E-08 DALY/kg)과 사용전기의 생산에 따른 환경영향(4.80E-08 DALY/kg)을 합하면 모두 2.53E-08 DALY/kg로, 농기계 사용 시 투입되는 에너지의 생산과정에서 발생하는 환경영향이 전체 영향의 56.3%에 이른다. 특성 상 전기는 사용과정에서 배출물이 발생하지 않으므로, 유기농 쌀 생산과정의 배출물은 농기계 투입 연료의 사용(연소)에 따른 대기배출물(이산화탄소)이 유일하며, 이로 인한 환경영향은 1.96E-8 DALY/kg(전체 영향의 43.7%)이다. 영향범주별 비중을 살펴보면 기후변화 53.7% > 호흡기질환 43.0% > 발암영향 3.2% > 방사능 0.1% > 오존층 파괴 0.0% 순으로, 에너지의 사용에 따른 온실가스배출이 주요한 원인임을 알 수 있다.

〈표 4〉는 투입배출물별로 관행농과 유기농 쌀 생산에 따른 환경영향을 비교하였다. 유기농 쌀 생산의 환경영향(4.49E-08 DALY/kg)은 관행농(9.97E-07 DALY/kg) 대비 4.5% 수준으로 화학비료 및 농약에 따른 환경영향이 전혀 없고 농기계에 투입되는 에너지(연료 및 전기)의 생산과 사용에 의한 환경영향이 전부인데 반해, 관행농은 투입농약의 대기/수계 배출 및 토양 잔류 영향이 전체 영향의 79.8%로 절대적 비중을 차지하고 있었다.

〈표 4〉 관행농 및 유기농 쌀 1kg 생산에 따른 환경영향(인간건강) 비교

(단위 : DALY)

구 분			관행농		유기농		
			환경영향	백분율	환경영향	백분율	
투 입	비 료	질소비료	7.42E-08	7.4%	0.00E+00	0.0%	
		인산비료	1.87E-08	1.9%	0.00E+00	0.0%	
		칼륨비료	5.45E-08	5.5%	0.00E+00	0.0%	
		기타비료	3.89E-10	0.0%	0.00E+00	0.0%	
		소 계	1.48E-07	14.8%	0.00E+00	0.0%	
	농 약	살 균 제	2.35E-09	0.2%	0.00E+00	0.0%	
		살 충 제	6.35E-09	0.6%	0.00E+00	0.0%	
		제 초 제	3.06E-09	0.3%	0.00E+00	0.0%	
		소 계	1.18E-08	1.2%	0.00E+00	0.0%	
	에 너 지	연 료	1.76E-08	1.8%	2.05E-08	2.1%	
		전 기	4.12E-09	0.4%	4.80E-09	0.5%	
		소 계	2.18E-08	2.2%	2.53E-08	2.5%	
	배 출	비 료	온실가스	3.56E-09	0.4%	0.00E+00	0.0%
		농 약	유해물질	7.95E-07	79.8%	0.00E+00	0.0%
		에 너 지	온실가스	1.69E-08	1.7%	1.96E-08	2.0%
소 계			8.15E-07	81.8%	1.96E-08	2.0%	
합 계			9.97E-07	100.0%	4.49E-08	4.5%	

2. 외부비용평가 결과

외부효과(external effect)란 한 경제주체가 가격기구를 통하지 않은 채 다른 독립된 경제주체(생산자 또는 소비자)에게 유리 또는 불리한 영향을 끼치는 것이며, 환경영향 외부비용(external cost)은 대가를 치르지 않고 배출된 환경오염물질이 인간건강, 사회자산, 생태계 등에 미치는 (주로 불리한) 환경영향을 화폐가치로 전환한 값을 뜻한다. 외부효과는 시장이 자원배분을 원활하게 수행하지 못하는 ‘시장실패’의 전형이며, 특히 환경문제가 음(-)의 외부효과의 대표적인 예이다(엄영숙, 1999).

구미 선진국들은 에너지, 농업 등 관련 정책의 수립과 파급효과 분석을 위해, 환경영향에 따른 외부비용을 과학적으로 추산하고자 많은 연구를 수행해왔으며, 유럽위원회와 미국 에너지부가 공동연구한 ExternE 프로젝트와 일본의 피해산정형영향평가(LIME) 방법론 연구 등을 꼽을 수 있다(김해인 등, 2007). 이들 방법론들은 기본적으로 손해함수(damage factor) 접근법의 형태를 취하고 있는데, 이는 환경재의 변화(공기 또는 물에 포함된 오염물질농도의 증감)가 사람 또는 생태계에 미치는 물리적 영향(인간 건강 또는 생산량의 변화)의 경제적 가치를 평가하는 기법이다.

본 연구에서는 기후 및 지리적 조건이 우리나라와 상대적으로 유사한 일본의 피해산정형영향평가(LIME) 방법론의 인간건강에 대한 피해계수를 이용하여 외부비용을 평가하였다. 인간건강 피해계수는 오염물질 배출로 인한 인간건강의 피해를 장애보정손실년수(DALY)로 전환한 다음, 이에 따른 생산성 감소와 의료비용 증가, 수명 단축 등에 대한 사용가치 및 비사용가치를 화폐단위로 산출하여 구하며, 최근 5년간(2003~2007년)의 엔화환율평균값(926.06원/100엔)으로 환산한 국내 인간건강 피해계수는 89,270,820원/DALY으로 산정하였다.

환경영향은 인간건강 외에도 사회자산(농작물 피해, 구조물 부식 등 포함), 생물종다양성, 일차생산(primary product) 등에도 외부효과를 발생시키지만, 본 연구는 인간건강에 미

〈표 5〉 관행농 쌀 1kg 생산에 따른 환경영향(인간건강) 외부비용 (단위 : 원)

구 분		밭작	호흡기질환	기후변화	방사능	오존층파괴	합 계	
투	비 료	질소비료	0.43	4.50	1.71	0.02	0.00	6.66
		인산비료	0.09	1.30	0.29	0.00	0.00	1.68
		칼륨비료	0.25	4.07	0.56	0.01	0.00	4.89
		기타비료	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.03
	소 계	0.78	9.89	2.57	0.03	0.00	13.27	
입	농 약	살 균 제	0.02	0.14	0.05	0.00	0.00	0.21
		살 충 제	0.04	0.40	0.12	0.00	0.00	0.57
		제 초 제	0.02	0.19	0.06	0.00	0.00	0.28
		소 계	0.08	0.74	0.23	0.01	0.00	1.06
에너지	연 료	연 료	0.05	1.27	0.26	0.00	0.00	1.58
		전 기	0.06	0.22	0.09	0.00	0.00	0.37
		소 계	0.11	1.49	0.35	0.00	0.00	1.95

구 분		발암	호흡기질환	기후변화	방사능	오존층파괴	합 계	
배출	비료	온실가스	0.00	0.00	0.32	0.00	0.00	0.32
	농약	유해물질	5.86	48.47	16.31	0.74	0.01	71.40
	에너지	온실가스	0.00	0.00	1.52	0.00	0.00	1.52
	소 계		5.86	48.47	18.15	0.74	0.01	73.24
합 계		6.83	60.60	21.29	0.78	0.02	89.52	

치는 환경영향과 그에 따른 외부비용만을 평가하였다. 이는 인간건강의 피해액 산정이 자료의 가용성 측면에서 상대적으로 용이하기 때문이다. 향후 사회자산과 생물종다양성, 일차생산 등 나머지 보호대상을 포함한 연구도 필요하다.

외부비용평가 결과, 관행농 쌀 1kg 생산에 따른 인간건강에 대한 환경영향의 외부비용은 89.52 원/kg으로 산정되었다. 이는 환경영향값(9.97E-07 DALY/kg)에 건강손실에 대한 피해계수(89,827,820원/DALY)를 곱한 값이다(<표 5> 참조). 관행농 쌀 1kg 생산이 인간건강에 미치는 영향범주별 외부비용은 호흡기질환 60.60원 > 기후변화 21.29원 > 발암영향 6.83원 > 방사능 0.78원 > 오존층 파괴 0.02원 순이었다. 투입배출물별로는 투입농약의 대기/수계 배출 및 토양잔류 영향 외부비용이 71.40원(81.8%)으로 절대적 비중을 차지하였으며, 화학비료 생산에 따른 환경영향 외부비용이 13.27원, 농기계 사용에 따른 연료 및 전기 생산 외부비용 1.95원, 농약 제조 과정의 외부비용 1.06원 등으로 나타났다.

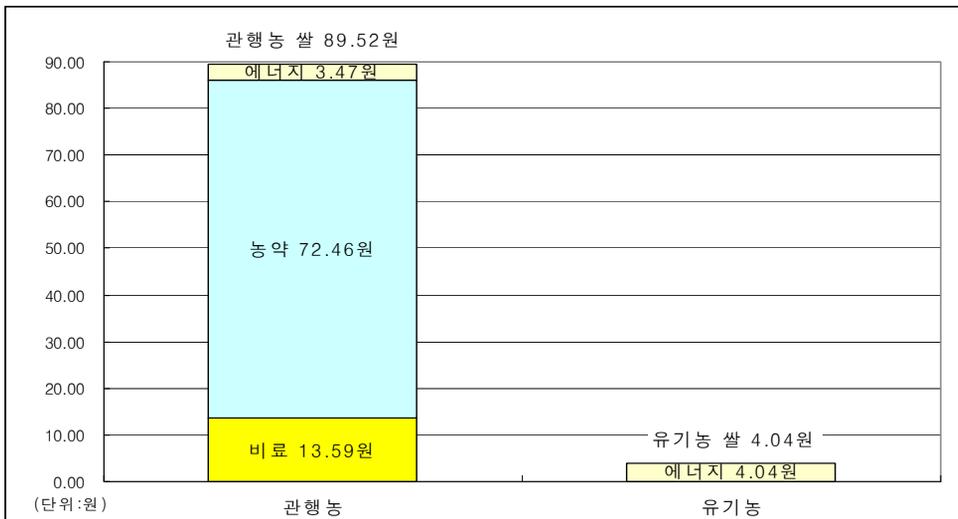
<표 6> 유기농 쌀 1kg 생산에 따른 환경영향(인간건강) 외부비용

(단위 : 원)

구 분		발암	호흡기질환	기후변화	방사능	오존층파괴	합 계	
투입	에너지	연료	0.06	1.48	0.30	0.00	0.00	1.84
		전기	0.07	0.26	0.10	0.00	0.00	0.43
		소 계	0.13	1.74	0.40	0.00	0.00	2.27
배출	비료	온실가스	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	농약	유해물질	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	에너지	온실가스	0.00	0.00	1.76	0.00	0.00	1.76
	소 계		0.00	0.00	1.76	0.00	0.00	1.76
합 계		0.13	1.74	2.17	0.00	0.00	4.04	

<표 6>은 유기농 쌀 생산에 따른 환경영향(인간건강) 외부비용을 나타내고 있으며, 쌀 생산 단위중량당 4.04원/kg의 외부비용이 발생하는 것으로 조사되었다. 화학비료 및 농약 투입에 따른 환경영향 외부비용은 없으며, 농기계 사용 시 투입 에너지(연료 및 전기)의 생산에 따른 외부비용이 2.27원/kg, 농기계 연료 사용(연소)에 따른 대기배출물(이산화탄소)의 환경영향 외부비용은 1.76원/kg이었다.

<그림 5>는 관행농 및 유기농 쌀 생산에 따른 인간건강에 대한 환경영향 외부비용값을 나타내고 있다. 관행농 쌀의 외부비용(89.52원/kg)과 유기농 쌀의 외부비용(4.04원/kg)의 차액은 85.48원/kg이다. 이는 단위중량당 유기농 쌀 생산에 따른 인간건강 측면의 환경영향 개선 효과를 화폐가치로 표현한 것이다.



<그림 5> 관행농 및 유기농 쌀 1kg 생산에 따른 환경영향(인간건강) 외부비용

관행농의 경우, 농약에 의한 외부비용이 72.46원(80.9%), 비료가 13.59원(15.2%), 에너지 외부비용이 3.47원(3.9%)을 차지하는데 반해, 유기농은 에너지에 의한 외부비용 4.04원만 발생하는 것을 볼 수 있다. 한편, 에너지에 의한 환경영향 외부비용의 경우, 유기농(4.04원/kg)이 관행농(3.47원/kg)보다 0.57원/kg 가량 높게 나타나는데, 이는 관행농 대비 유기농의 단수가 86.0% 수준으로 낮기 때문이다.⁴⁾

한편, 지금까지의 쌀 1kg 기준이 아닌 국내 쌀 총생산에 따른 연간 환경영향(인간건강)

4) 본 연구에서는 쌀 1kg 생산에 필요한 재배면적이 관행농은 2.1㎡인데 비해 유기농은 보다 넓은 2.4㎡이 소요되는 것으로 조사되었으며, 각 농법 간 단위면적 당 농기계 투입시간과 연료사용량은 동일하다고 가정하였음.

및 외부비용을 산정해보도록 하자. 2006년도 기준, 정곡 총생산량은 4,679,991톤/년이며 모두 관행농으로 생산되었다고 가정하고, 여기에 관행농 쌀 생산 단위중량당 환경영향값(9.97E-07 DALY/kg)을 곱하면, 쌀 생산에 따른 인간건강에 대한 연간 환경영향값 4,666 DALY/년을 구할 수 있다. 이 값을 2006년도 전국추계인구(48,297,184명)로 나누고 단위를 환산하면, 쌀 생산에 따른 환경영향으로 인해 국민 1인당 연간 0.85시간(약 51분)에 달하는 잠재적 건강손실(장애보정손실)이 발생한다는 결과값을 도출할 수 있다.

V. 요약 및 결론

본 연구에서는 국제표준화기구(ISO)에 의해 규격화된 환경성평가 도구인 전과정평가(Life Cycle Assessment)방법론을 농업분야에 적용하여, 우리나라의 대표적인 농산물인 쌀의 생산에 따른 투입물과 배출물량을 정량적으로 분석하고 잠재적 환경영향과 외부비용을 평가하였다.

연구 결과, 유기농 쌀의 환경영향(4.49E-08 DALY/kg)은 관행농(9.97E-07 DALY/kg)의 4.5% 수준으로 나타났으며, 관행농의 경우 투입농약의 배출 영향이 전체 영향의 79.8%로 절대적 비중을 차지했다. 유기농 쌀의 환경영향 외부비용은 4.04원/kg으로 관행농의 외부비용(89.52원/kg)과 비교 시 쌀 1kg당 85.48원/kg의 차액이 발생하며, 이는 유기농 쌀 생산에 따른 인간건강 측면의 환경영향 개선 효과를 화폐가치로 나타낸 것이다. 본 연구의 자료수집과 검증 및 처리는 현장 조사와 다양한 국내 자료들을 취합하여 이루어졌으나, 영향평가와 관련한 일부 부재한 자료와 피해계수값은 유사공정 및 해외 자료를 이용하였다. 또한 본 연구는 인간건강, 사회자산, 생물 다양성 및 일차생산량으로 대표되는 환경영향에 따른 4가지 보호대상 중 인간건강만을 고려하여 실시하였으므로, 향후 연구범위를 확대하여 4가지 보호대상을 모두 포함하는 환경영향 및 외부비용평가를 수행할 경우, 결과값은 더욱 커질 것으로 예측된다.

단위면적(1ha) 기준 시, 관행농은 4,781.4kg의 정곡이 생산되고 이에 따른 환경영향(인간건강) 외부비용은 428,019원/ha인 반면, 유기농은 4,111.4kg의 정곡이 생산되고 환경영향(인간건강) 외부비용은 16,593원/ha에 불과하다. 두 농법간 환경영향 외부비용의 차액은 411,426원/ha으로, 현재 지급중인 유기농 전환 친환경농업소득보조금 392,000원/ha에 근접한다.⁵⁾ 하지만 본 연구는 환경영향에 따른 4가지 보호대상 중 인간건강만을 고려하였기에

5) 친환경농업직접지불제는 친환경농업을 실천하고 있는 농업인에게 초기 소득 감소분과 생산비 차액을 보전해줌으로서 친환경농업의 확산을 도모하고자 1999년 도입되었으며, 논농사의 경우 2010년 현재 유기농으로 전환 시 국립농산물품질관리원이나 민간인증기관의 친환경인증을 받은 농가를 대상으로 392,000원/ha의 친환경농업소득보조금이 지급되고 있음.

향후 사회자산, 생물다양성 및 일차생산량 등 보호대상을 모두 포함하여 연구범위를 확대할 경우 환경영향의 외부비용 증가로 인해 친환경농업소득보조금 증액의 정량적, 객관적 근거를 제공할 수도 있을 것이다.

한편 제품의 환경성 정보를 소비자들에게 제공함으로써 친환경제품의 개발, 생산 및 소비를 촉진하는 환경라벨링(environmental labelling) 제도 중 「환경기술개발 및 지원에 관한 법률」 제18조에 의거하여 국내에 이미 도입된 환경성적표지제도와 현재 도입 추진 중인 탄소성적표지제도(탄소라벨링)의 경우는 모두 제품의 원료채취부터 폐기까지의 전과정평가 기법을 활용하여 제품의 환경성 정보를 계량화한다는 특징을 갖고 있다. 이 환경라벨링 제도들은 제품의 전과정에 걸친 잠재적 환경영향과 탄소배출량을 정량화하여 객관적이고 투명하게 공개하는 제도로서 소비자가 제품의 종합적인 환경성적을 쉽게 접할 수 있는 장점을 갖고 있다. 하지만 공개되는 정보의 내용이 지나치게 전문적이어서 일반 소비자가 이해하기 어려운 이유로 그동안 이전 및 보급사업이 원활하게 이루어지지 않은 측면이 있다. 이에 본 연구와 같이 농산물을 포함한 각 제품의 환경성을 경제적 화폐단위로 환산할 수 있는 외부비용 평가방법을 환경라벨링제도와 접목한다면, 제품의 환경성 정보에 대한 소비자의 이해를 돕고 친환경제품의 선택적 소비를 늘이는데 일조할 수 있을 것이다.

아직까지 우리나라에서는 농산물을 대상으로 한 전과정평가연구가 거의 이루어지지 않고 있지만, 유럽과 일본의 경우는 1993년 식품 전과정평가 유럽 국제세미나를 시발로 농업분야에 대한 전과정평가연구를 활발히 진행하고 있다. 농업이 가지는 환경측면의 순기능은 보전하되 농업활동에 의한 환경영향을 객관적으로 평가하고 부정적 영향을 줄이기 위해서는 먼저 정량화가 가능해야 하고 전지구적 차원에서 종합적인 접근이 필요한데, 전과정평가가 이에 적합한 분석도구 중 하나인 것이다. 공산품 위주의 기존 전과정평가와 달리 농업분야의 전과정평가는 배출물의 경로별로 인간건강 및 생태계에 미치는 환경영향의 인과관계 분석 자료가 많이 요구되며 지역별 조건에 민감하게 반응하기에 연구 수행에 세심한 주의가 필요하다. 본 연구 또한 전과정영향평가 방법론의 일관성과 완결성이 부족하고, 적정자료의 부재로 인해 자료 수집, 가공 및 처리과정에서 많은 가정들을 포함하고 있기 때문에 결과의 신뢰성을 높이기 위한 추가 연구가 지속적으로 필요할 것이다. 또한 본 연구는 연구 대상인 쌀의 시스템 경계를 생산단계까지만 설정하여 관행농과 유기농을 비교하였는 바, 향후 소비단계(저장, 수송, 조리 및 가공 포함)와 폐기단계를 아우르는 연구범위의 확장이 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 김해인·이영일·윤용범·정영범·김현실. 2007. 전과정 비용 산출을 위한 환경외부비용 평가 사례 연구. 한국전과정평가학회지. 8(1): 29-39.
2. 농림수산식품부. 농림수산식품주요통계. 2009
3. 손상목·임경수·김영호. 2001. 오리제초 수도작의 벼 생육과 수량, 경제성 및 환경친화성 평가. 한국유기농업학회. 9(3): 47-73.
4. 신중두·임동규·김건엽·박문희·고문환·엄기철. 2003. 시비방법별 벼 재배에 따른 전과정평가 방법을 적용한 환경영향 평가. 한국환경농학회지. 22(1): 41-46.
5. 엄영숙. 1999. 환경영향평가제도와 환경영향의 가치평가. 환경경제연구. 8(1): 127-161.
6. 이건모·허탁·김승도. 1998. 환경 전과정평가(LCA)의 이론과 지침. 한국인정원.
7. 社團法人 産業環境管理協會. 2005. 라이프사이클環境影響評價手法.
8. Brentrup, F., J. Küsters, J. Lammel, P. Barraclough and H. Kuhlmann. 2004. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment (LCA) methodology: II. the application to N fertilizer use in winter wheat production systems. European Journal of Agronomy. 20: 265-279.
9. Cederberg, C. and B. Mattsson. 2000. Life cycle assessment of milk production: a comparison of conventional and organic farming. Journal of Cleaner Production. 8: 49-60.
10. Charles, R., O. Jolliet and G. Gaillard. 1998. Taking into account quality in the definition of functional unit and influence on the environmental optimisation of fertilizer level. Proceedings of the International Conference on Life Cycle.
11. Gian Andrea Blengini et al.. 2003. The life cycle of rice: LCA of alternative agri-food chain management systems in Vercelli (Italy). Journal of Environmental Management. 90: 231-248.
12. Hanegraaf, M. C., E. E. Biewinga and G. van der Bijl. 1998. Assessing the ecological and economic sustainability of energy crops. Biomass and Bioenergy. 15: 345-355.
13. Imke J. M. de Boer. 2003. Environmental impact assessment fo conventional and organic milk production. Livestock Production Science. 80: 69-77.
14. ISO 14040. 2006. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework.
15. ISO 14044. 2006. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and Guidelines.
16. Niels Halberg et al.. 2005. Environmental assessment tools for the evaluation and improvement of European livestock production systems. Livestock Production Science. 96: 33-50.
17. Nienhuis, J. K. and P. J. A. de Vreede. 1996. Utility of the environmental life cycle

- assessment methods in horticulture. *Acta Horticulturae*. 531-538.
18. Poritosh Roy et al.. 2009. Life cycle inventory(LCI) of different forms of rice consumed in households in Japan. *Journal of Food Engineering*. 91: 49-55.
 19. P. W. Gerbens-Leenes et al.. 2003. Design and development of a measuring method for environmental sustainability in food production systems. *Ecological Economics*. 46: 231-248.
 20. U. Sonesson et al.. 2000. Environmental and economic analysis of management systems for biodegradable waste. *Resources, Conservation and Recycling*. 28: 29-53.