

쌀 생산체계에 대한 영농방법별 전과정평가: 관행농, 무농약, 유기농법별 탄소배출량 비교

유종희* · 권영립¹ · 김건엽 · 이종식 · 김계훈² · 소규호

국립농업과학원 농업환경부 기후변화생태과, ¹전북농업기술원, ²서울시립대학교 환경원예학과

Life Cycle Assessment (LCA) on Rice Production Systems: Comparison of Greenhouse Gases (GHGs) Emission on Conventional, Without Agricultural Chemical and Organic Farming

Jong-Hee Ryu*, Young-Rip Kwon¹, Gun-Yeob Kim, Jong-Sik Lee, Kye-Hoon Kim², and Kyu-Ho So

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

¹Jeollabuk-Do Agricultural Research and Extension Services, Jeonbuk, 570-704, Korea

²Department of Environmental Horticulture, The University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

This study was performed a comparative life cycle assessment (LCA) among three rice production systems in order to analyze the difference of greenhouse gases (GHGs) emissions and environment impacts. Its life cycle inventory (LCI) database (DB) was established using data obtained from interview with conventional, without agricultural chemical and organic farming at Gunsan and Iksan, Jeonbuk province in 2011. According to the result of LCI analysis, CO₂ was mostly emitted from fertilizer production process and rice cropping phase. CH₄ and N₂O were almost emitted from rice cultivation phase. The value of carbon footprint to produce 1 kg rice (unhulled) on conventional rice production system was 1.01E+00 kg CO₂-eq. kg⁻¹ and it was the highest value among three rice production systems. The value of carbon footprints on without agricultural chemical and organic rice production systems were 5.37E-01 CO₂-eq. kg⁻¹ and 6.58E-01 CO₂-eq. kg⁻¹, respectively. Without agricultural chemical rice production system whose input amount was the smallest had the lowest value of carbon footprint. Although the yield of rice from organic farming was the lowest, its value of carbon footprint less than that of conventional farming. Because there is no compound fertilizer inputs in organic farming. Compound fertilizer production and methane emission during rice cultivation were the main factor to GHGs emission in conventional and without agricultural chemical rice production systems. In organic rice production system, the main factors to GHGs emission were using fossil fuel on machine operation and methane emission from rice paddy field.

Key words: Carbon footprint, LCA, Conventional rice framing, Without agricultural chemical rice farming, Organic rice farming.

서 언

친환경 농업 육성을 유도하는 정책과 더불어 삶의 질 향상으로 우리나라에서도 농산물 소비의 다양화와 고급화 추세가 진행되고 있다. 우리나라 친환경농산물 인증은 2007년부터 저농약, 무농약, 유기농산물의 3가지로 구분하고 있으며, 어떤 경우라도 제초제는 사용하지 못하도록 규정하고 있다. 최근 국민경제 발전으로 웰빙 농산물의 수요 및 환경보전의 중요성 증대로 친환경농산물 인증면적이 2001년

5,000 ha에서 2009년 202,000 ha로 증가하였다 (NAPQMS, 2010).

친환경농업에서 잡초관리는 인력제초에 의존할 수밖에 없어 이에 대한 대응 기술 개발이 필요하다. 친환경 벼농사에서의 잡초관리는 주로 오리, 왕우렁이, 쌀겨, 종이멸칭, EM당밀, 기계제초 등 생물 및 유기자원을 활용하고 있다. 친환경 재배방법 중 왕우렁이농법은 벼논에서 왕우렁이의 초식습성을 이용하여 제초효율을 높이는 재배방식이다 (Lee et al., 2005). 2001년 농림부 조사에 의하면 2000년 179 ha에 비해 1년에 147% 증가한 443 ha로 50개 시·군 714 농가가 친환경 벼 재배에 왕우렁이농법을 이용하였고, 전남지방에서는 2008년 벼 친환경 재배면적 48,686 ha 중 왕우렁이 농법이 친환경농법의 약 89%를 차지하였다 (Lee et al., 2002;

접수 : 2012. 10. 31 수리 : 2012. 11. 27

*연락처 : Phone: +82312900238

E-mail: soil73@kg21.net

Kwon et al., 2010).

이제까지 우리나라 농업분야 환경성 평가는 농업환경 보전 및 안전농산물 생산에 가치를 두고, 기존의 다 투입 증산 위주의 영농성과에 대한 재평가 위주로 발전해 왔다. 그러나 기존 친환경농업육성법은 화학비료와 농약의 사용 여부에 초점이 집중되어 온실가스 배출, 에너지 소비, 비료 및 농약에 의한 생태독성, 수자원 소모 및 지하수 오염 등 농산물 생산과 관련된 종합적인 환경성 평가에 대한 필요성이 대두되었다. 전과정평가 (LCA, Life Cycle Assessment)는 제품의 원료 채취, 생산, 사용, 폐기 등 전 과정에 투입·배출되는 모든 물질과 관련된 환경영향을 평가하기 위한 방법론이다. 최근 우리나라 농업분야에서도 지속가능한 농업의 실현과 환경영향 저감을 위한 과학적이고 객관적인 환경부하의 정량화 도구로 전과정평가 방법을 도입하여 농업분야 LCI (Life Cycle Inventory) DB 구축과 전과정평가 방법론을 개발하고 있다.

온실가스 및 지구온난화에 따른 기후변화가 전 세계적인 주요 환경문제로 대두되면서, 제품을 생산하는 과정 중 발생하는 온실가스 배출량을 산정하고 그 값을 소비자에게 표시하는 탄소라벨링 제도가 영국 등 유럽을 중심으로 시작되었다. 전과정평가는 국제표준화기구 (ISO, International Organization of Standardization)에서 제정한 환경경영체제에 대한 객관적인 평가도구로 탄소라벨링제도 확산과 함께 온실가스 배출량 산정을 위한 국제적인 규격의 평가도구로 부상하였다.

전과정평가가 농업분야에 적용된 초기인 1996년부터 2000년대까지는 주로 단작 1 기작에 대한 생산과정 및 농자재 투입 및 배출에 관한 전과정평가를 수행하였는데, 2000년 이후부터는 관행농과 유기농 우유생산체제 환경영향 비교 평가, 돼지사육의 관행, 유기농법 환경성 비교 등과 같이 서로 다른 농업 생산체제를 비교하는 전과정평가가 시작되었다 (de Boer, 2003; Basset-Mens et al., 2007). 쌀 생산을 대상으로 하는 전과정평가는 이태리 쌀 생산체제 전과정평가, 일본 관행농, 유기농 쌀 생산체제 환경성 비교평가, 우리나라 쌀 생산체제에 대한 탄소배출량 평가 등이 있으나 (Blengini and Busto, 2009; Hokazono and Hayashi, 2012; So et al., 2010.), 현재 우리나라 쌀 생산체제에 대한 영농방법별 환경성 비교 평가에 대한 연구는 없었다. 이에 본 연구에서는

전북 군산 및 익산지역의 관행농, 무농약, 유기농 쌀 생산 농가를 대상으로 전과정평가를 수행하여 영농방법별 환경영향을 평가하고 탄소배출량을 비교 분석하였다.

재료 및 방법

생산체제에 대한 전과정평가는 국제표준화기구 (ISO)에서 제정한 환경경영체제에 관한 국제표준 ISO 14040 규격에 의거하여 연구목적 및 범위 정의, 전과정 목록분석, 전과정 영향평가의 순으로 수행하였다 (ISO, 1997).

연구 대상 본 연구는 2011년 전북 군산과 익산 지역의 관행농, 무농약, 유기농 농가를 대상으로 영농방법별로 쌀 생산 과정 중 투입·배출되는 물질 목록을 면접조사 하였다. 조사에 참여한 관행농가는 전북 군산 지역 쌀 생산 4 농가이며, 이들의 벼 재배 총 재배면적은 13.3 ha였다. 조사 대상 중 친환경농가들은 이 지역 친환경농업지구 친환경인증 농가들로써, 무농약 인증 벼 재배 참여농가는 총 12 농가이며, 전북 군산 지역에서 왕우렁이 농법으로 쌀을 생산하고, 재배면적 총합은 214.3 ha였다. 유기농 인증농가는 전북 익산 지역에서 왕우렁이 농법으로 벼를 재배하며 참여 농가는 총 7농가로 재배면적은 65.5 ha이었다. 농가들이 재배하는 품종은 모두 '신동진벼'였다. 본 연구에 참여한 벼 재배 농가의 2011년 10 a당 평균 쌀 (조곡) 수확량은 관행농은 742 kg, 무농약 692 kg, 유기농 635 kg였다 (Table 1).

연구 목적 및 범위 본 연구의 목적은 쌀 생산체제에 대한 탄소배출량 산정 및 전과정 영향평가로 정의하였다. 쌀의 기능은 식용 및 각종 식품제조의 원료이며, 기능 단위는 식품 및 식품제조의 원료용으로 사용되는 쌀 (조곡) 1 kg 생산으로 정의하였다.

연구 범위는 Fig. 1과 같이 쌀 생산체제에 대한 전과정을 생산 전 (前)단계, 생산단계, 생산 후 (後) 및 폐기단계로 나누어 정의하였다. 생산 전 단계는 벼 재배에 투입되는 농자재 및 비료, 에너지 등을 생산하는 공정이 포함된다. 생산단계는 표준재배지침을 기준으로 논갈이, 육묘부터 벼 수확까

Table 1. Information of collected data for rice cultivation.

Item	Conventional farming	Farming without agr. chemical	Organic farming
Location	Jeonbuk Gunsan	Jeonbuk Gunsan	Jeonbuk Iksan
No. of research subjects	4	12	7
Total cultivation area (ha)	13.3	214.3	65.5
Cultivation periods (days)	139	138	143
Cultivation method	Conventional	Apple snail farming	Apple snail farming
'11 Mean Yield (kg 10a ⁻¹)	742	692	635
Rice variety	'Shindongjin'	'Shindongjin'	'Shindongjin'

지로 농가에서 이루어지는 쌀 생산관련 일련의 농작업 과정을 포함하며, 주로 지역 미곡처리장에서 작업하는 도정은 연구범위에서 제외되었다. 그러므로 본 연구에서 정의한 기능단위인 쌀 1 kg 생산은 조곡 생산으로 정의하였다. 생산 후 단계는 벼 재배단계에서 배출되는 온실가스 (직접배출물) 산정과 생산 전단계를 포함하는 쌀 생산 전과정에서 배출되는 간접배출물 (수계, 대기, 토양)량 및 투입된 농자재들의 폐기물 처리단계를 포함한다. 본 연구에서 농약투입량은 연구 범위에서 제외하였다. 화학비료 생산공정에 대한 상위흐름 LCI DB는 해외 DB가 존재하나, 친환경제재는 현재 LCI DB가 존재하지 않으므로 비교분석이 불가하고, So

et al. (2010)의 쌀 생산체계의 탄소성적 산정 연구결과와 전북 군산 관행농 4농가를 대상으로 전과정평가 수행한 결과에서 농약의 투입량 및 탄소배출 기여도가 1% 미만으로 나타나 본 연구에서는 농약투입은 cut off하였다.

전과정 목록분석 모든 투입·산출량 자료는 벼논 10 a를 기준으로 수집하였다. 질소투입량은 현장 방문하여 수집한 활동자료를 사용하였다 (Table 2).

전과정평가를 수행하기 위해서는 현장에서 발생하는 생산 활동에 자료에 대한 전과정 목록구축과 관련된 에너지 효율, 온실가스 배출 등에 대한 계수 (coefficients)를 설정하였다. 질소비료에 의한 벼논 아산화질소 발생량을 계산할 때 비료 투입량 내 질소 유효성분함량을 적용하고 배출계수는 IPCC 1996 Tier 1을 적용하였다 (Ryu et al., 2011). 메탄 배출량은 재배면적에 IPCC 1996 Tier 1값을 적용하고 유기물시용 및 담수의 유·무와 재배일수 및 담수일수를 변수로 하여 산출하였다 (Jeong et al., 2011). 에너지 및 농자재 투입에 대한 자료 수집은 현장자료로 이루어졌다 (Table 3). 농작업 중 에너지 사용으로 배출되는 온실가스 (CO₂, CH₄, N₂O 등) 산정은 IPCC 1996 Tier 1배출계수를 적용하였다 (Ryu et al., 2011). 농자재 폐기물량은 현장 수집자료를 활용하되, 폐기물처리는 환경자원공사와 농림수산식품부의 영농폐기물 통계 (KWA, 2007, MIFAFF, 2004) 자료를 사용하였다 (Table 4).

전과정 목록분석을 위하여 지식경제부에서 보급하는 전과정평가 수행 프로그램 PASS (v.4.1.3)를 사용하였고, 상·하위 흐름 DB는 환경부, 지경부, 현재 국립농업과학원에 구축 중인 농자재 DB 등 국내자료를 우선 적용하고, 국내 DB가 없는 경우 ecoinvent DB를 사용하였다 (MKE: Ministry of Knowledge Economy methodology, Software program PASS v4.1.3). 탄소성적 산정은 전과정 목록분석결과 산출

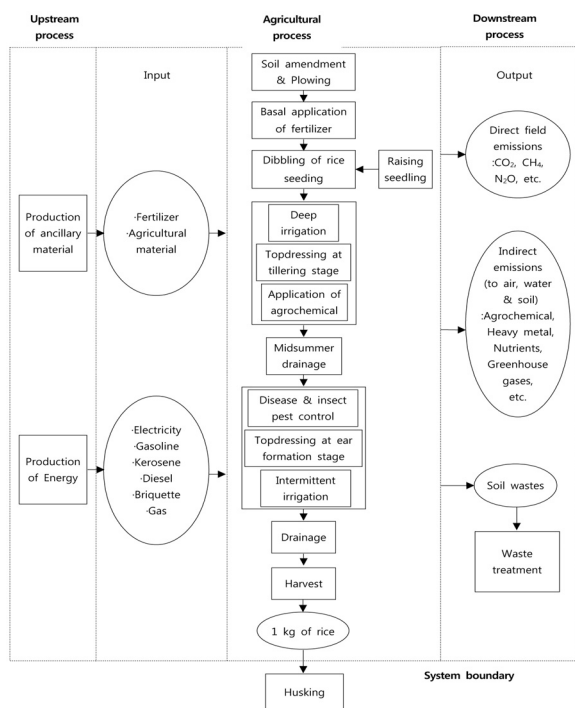


Fig. 1. System boundaries for conventional rice production system.

Table 2. Inventories of fertilizer inputs for rice cultivation.

Entries of fertilizer	Quantity		
	Conventional farming	Farming without agricultural chemical	Organic farming
	kg 10a ⁻¹		
Compost	8.42E-01	-	-
Liquid manure	-	1.04E-01	-
Green manure	-	-	1.24E+00
Oilcake	-	1.05E-01	2.08E-01
Thomas meal	-	2.23E-02	-
Compound fertilizer 21-13-9	1.01E-02	2.11E-03	-
Compound fertilizer 22-10-8	5.02E-02	1.26E-02	-
Compound fertilizer 17-10-7	2.09E-02	1.76E-02	-
Compound fertilizer 17-0-7	7.41E-02	-	-
Silicate fertilizer	3.37E-02	1.76E-02	6.17E-02
Rice straw	1.01E+00	1.20E+00	1.13E+00

Table 3. Inventories of energy and agricultural material inputs.

Entries of inputs inventories	Quantity		
	Conventional farming	Farming without agricultural chemical	Organic farming
	----- kg 10a ⁻¹ -----		
River snail	-	7.11E-03	6.59E-03
Energy			
Electricity	6.13E-03	4.88E-03	4.95E-03
Diesel	2.26E-02	1.83E-02	2.44E-02
Kerosene	1.05E-02	1.10E-02	9.65E-03
Gasoline	6.82E-03	6.13E-03	8.95E-03
Agricultural materials			
Lagging cover (Non-woven fabric)	6.82E-03	6.13E-03	8.95E-03

Table 4. Inventories of product (rice) and outputs.

Entries of outputs inventories	Quantity		
	Conventional farming	Farming without agricultural chemical	Organic farming
	----- kg 10a ⁻¹ -----		
Direct field emission (GHGs: CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O)	1.40E-01	1.14E-01	1.42E-01
Waste			
Lagging cover wastes	1.55E-03	8.10E-04	1.63E-03
Product			
Rice (unhulled)	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00

Table 5. Impact categories in life cycle impact assessment (LCIA).

Impact categories	Unit	Characterization models
ADP	1 yr ⁻¹	EIA, International Energy Annual 2000, USGS 2001~2002
GWP	kg CO ₂ -eq. kg ⁻¹	IPCC 1996 (100 year)
ODP	kg CFC-eq. kg ⁻¹	UNEP 2002
AP	kg SO ₂ -eq. kg ⁻¹	CML 1999, Hauschild & Wenzel, 1998
EP	kg PO ₄ ³⁻ -eq. kg ⁻¹	Heijungs et al. 1992
POCP	kg C ₂ H ₄ -eq. kg ⁻¹ kg ⁻¹	CML 1999, Jenkin & hayman, 1999; Derwent et al. 1998

[†]ADP, Abiotic resource Depletion; GWP, Global Warming Potential; ODP, Ozone Depletion Potential; AP, Acidification Potential; EP, Eutrophication Potential; POCP, Photochemical Ozone Creation Potential.

된 교토의정서 규정 6대 온실가스 (CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, SF₆, PFCs) 배출량에 지구온난화지수를 곱하여 이산화탄소 당량 (kg CO₂ eq. kg⁻¹)으로 정량화하였다 (Ryu et al., 2011).

전과정 영향평가 전과정 목록분석 결과를 6 범주로 구분하고 지식경제부 영향평가 방법론의 특성화계수 및 특성화 모델을 적용하여 (Table 5), 각 범주별 기준물질 대한 관련 물질들의 상응값 (특성화 계수)과 발생량을 곱하여 영향범주별 환경영향 기여도를 평가하였다 (Ryu et al., 2011b). 영향범주는 무생물자원고갈(ADP), 지구온난화 (GWP), 오존층고갈 (ODP), 산성화 (AP), 부영양화 (EP), 광화학산화

물생성 (POCP), PASS 4.1.3. 프로그램을 사용하였다 (MKE: Ministry of Knowledge Economy methodology, Software program PASS v4.1.3).

가정 및 제한사항 본 연구에서 국립농업과학원에서 개발 중인 전과정평가법에 준하여 농기계 제조 및 시설 (육묘용 하우스 및 저장시설 등) 구축, 운송에 따른 환경부하는 고려하지 않고, 물리적인 투입·배출물만 정량화하였다. 비료포대 등 원부자재 포장에 대한 환경부하는 고려하지 않았고, 대상 시스템에서 발생한 부산물 (벼짚 등)은 기술계 (technosphere)로부터 투입된 물질들의 배출이 아닌 자연적

인 물질순환의 일부로 시스템 내부에서 다시 분해된다고 가정하였다 (van Zeijts et al., 1999).

결과 및 고찰

전과정 목록분석 현장자료 수집결과 모든 조사대상에서 유기질 비료 투입량이 화학비료 투입량보다 많았다. 관행농은 퇴비를 유기질비료로 사용하였고, 무농약은 액비와 유박을, 유기농은 녹비와 유박을 사용하였다. 유기질 비료 투입량은 쌀 1 kg 생산하는데 관행농 8.42E-01 kg, 무농약 2.09E-01 kg, 유기농 1.45E+00 kg으로 유기농이 가장 많았다. 복합비료 사용량은 관행농이 1.55E-01 kg, 무농약 3.23E-02이었다 (Table 2). 에너지 사용은 참여 농가 모두 전기 사용보다 화석연료 사용량이 많았고, 전기는 주로 육묘용 관수에 사용되었다. 연료는 주로 경운, 이앙, 비료살포, 수확, 건조에 사용되었으며, 가장 많이 사용된 연료는 경유이고, 그 다음이 등유였다. 영농방법별 연료투입량은 관행농이 3.99E-02 kg, 무농약 3.54E-03 kg, 유기농 4.30E-02 kg이었다. 그 외 투입된 농자재는 육묘에 사용되는 보온덮개로 전기 사용과 함께 사용량이 가장 적었다 (Table 3). 폐기물은 사용된 보온덮개가 전량 회수되어 처리되지 않으므로 투입량보다 배출량이 작았다 (Table 4).

전과정 목록분석 결과 CO₂ 배출은 화학비료 생산과 벼 재배단계에서 가장 많았다. 화학비료 생산 중 이산화탄소 배출량은 관행농 1.78E-01 kg CO₂ kg⁻¹, 무농약 1.07E-01 kg CO₂ kg⁻¹로 복비종류 및 사용량이 많았던 관행농에서 배출량이 더 많았다. 벼 재배에서 발생하는 CO₂는 농기계 사용에 의한 화석연료의 불완전 연소로 발생한다. CO₂ 배출량은 연료 사용량과 비례하여 유기농이 1.29E-01 kg CO₂ kg⁻¹로 가장 많았고, 관행농 1.20E-01 kg CO₂ kg⁻¹, 무농약 1.06E-01 kg CO₂ kg⁻¹ 순이었다 (Fig. 2).

CH₄는 대부분 벼 재배 중에 발생되었고, 벼 재배 중 CH₄ 배출량은 관행농이 1.91E-02 kg CH₄ kg⁻¹, 무농약 6.83E-03 kg CH₄ kg⁻¹, 유기농 1.28E-02 kg CH₄ kg⁻¹이었다 (Fig. 3). 벼논의 메탄 발생 요인은 담수상태의 혐기조건과 유기물량인데, 현재 국립농업과학원에서 구축하고 있는 전과정평가 방법론에서는 1996 IPCC 배출계수를 적용하므로, 유기물은 시용 가·부만을 적용하고 있어 유기물 종류나 사용량 차이가 적용되지 않은 default값이 적용되고 있다. 그러므로 본 연구결과 재배일수가 가장 짧고 농기계 연료 사용량이 가장 적었던 무농약농업에서 메탄배출량이 가장 적었다. 이에 따라 IPCC 1996 배출계수를 적용하여 메탄배출량을 산정할 때, 벼 재배 중 농기계 연료투입량에 따른 메탄 발생량 차이와 담수일수 및 재배일수의 차이가 메탄 발생량 주요 변수로 판단되었다. 따라서 추후 벼논토양 조건을 보다 현실적

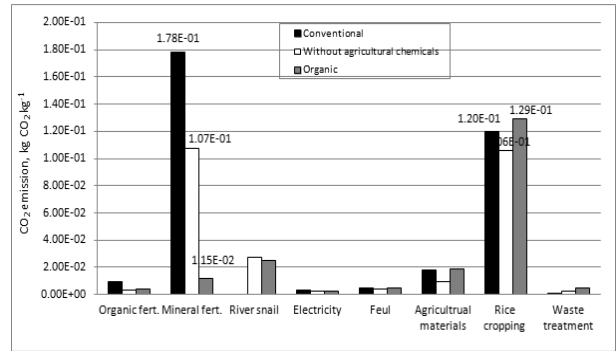


Fig. 2. Comparison of CO₂ emission from conventional rice production system among three rice production systems.

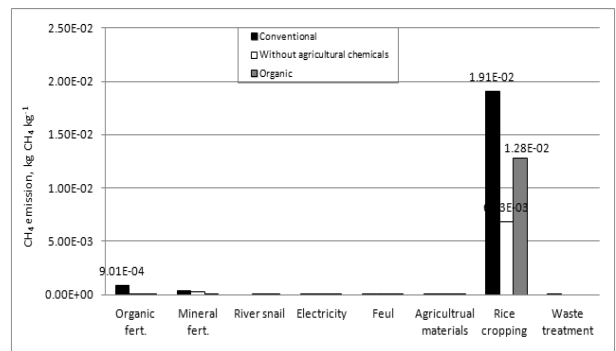


Fig. 3. Comparison of CH₄ emission from conventional rice production system among three rice production systems.

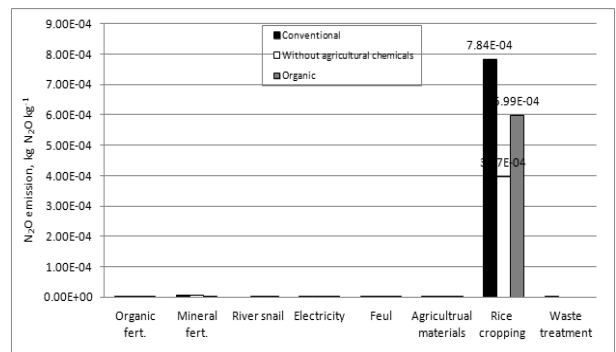


Fig. 4. Comparison of N₂O emission from conventional rice production system among three rice production systems.

으로 반영하여 유기물 사용량이 추가된 2006 IPCC 가이드라인 적용에 대한 논의가 필요할 것이다 (Jeong et al., 2011).

N₂O는 대부분 벼 재배과정에서 배출되었고, 영농방법별 배출량은 관행농이 7.84E-04 kg N₂O kg⁻¹, 무농약 3.97E-04 kg N₂O kg⁻¹, 유기농 5.99E-04 kg N₂O kg⁻¹이었다 (Fig. 4). 시용된 비료의 총량은 유기농이 1.51E+00 kg⁻¹로 관행농 9.64E-01 kg⁻¹보다 많았으나, 유기농에서 사용하는 녹비와 유박의 질소함량은 5% 미만이고 관행농에서 사용하는 복비의 경우 질소함량 17~21%로 N₂O발생량은 관행농에서 가장 많았다. 비료 사용량이 (3.29E-01 kg⁻¹)로 현저히 낮았던

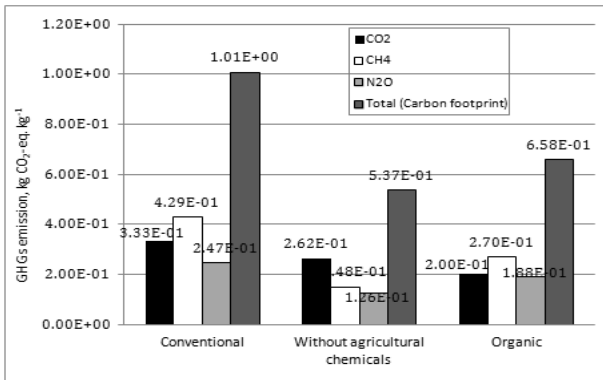


Fig. 5. Comparison of carbon footprint of conventional rice production system among three rice production systems.

무농약농법에서 N₂O 발생량이 가장 적었다.

각 온실가스를 CO₂ 1에 상응하는 환산 등가를 곱하여 CO₂-eq. 단위로 통일하여 탄소성적을 구하였다. 쌀 1 kg 생산을 기준으로 하는 탄소성적은 관행농이 1.01E+00 CO₂-eq. kg⁻¹로 가장 높았고, 무농약이 5.37E-01 CO₂-eq. kg⁻¹, 유기농법이 6.58E-01 CO₂-eq. kg⁻¹였다 (Fig. 5). Ryu et al. (2011)의 시설상추에 대한 탄소성적 산정 연구에서, 상추생산량이 관행농에 비해 무농약이 약 67%, 유기농이 약 50% 수준으로 영농방법별 수확량 차이가 클 경우 탄소성적이 생산량에 비례하여 관행농이 가장 낮은 값을 보이고 다음이 무농약, 유기농 순이었다. 그러나 본 연구에서는 관행농 대비 무농약의 쌀 생산량이 약 93%, 유기농이 약 85% 수준으로 영농방법별 수확량 차이가 크지 않았다. 분석 결과 농자재 투입량이 가장 적었던 무농약 쌀 생산에서 탄소성적이 가장 낮았고, 생산량은 가장 적었지만 복비 투입이 없었던 유기농이 관행농보다 탄소성적이 낮았다. 추후 생산량 차이를 변수로 하는 탄소성적에 대한 시나리오 분석을 통하여 영농방법별 온실가스 감축법에 대한 정량적 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

전과정 영향평가 쌀 생산과 관련된 투입·배출물질 각각의 생산공정을 포함하는 전과정 영향평가하여 지구온난화범주 (GWP)에 대한 환경영향 기여도를 분석하였다. 관행농에서는 벼 재배 단계가 76%, 무기질비료생산 공정이 18%, 유기질 비료 3%, 보온덮개 2% 등 이었다. 무농약 농법에서 GWP에 대한 기여도는 벼 재배 단계가 73%, 비료 생산이 21%, 우렁이양식 5% 등 이었다. 유기농법의 GWP에 대한 기여도 분석결과 벼 재배단계가 88%, 보온덮개 생산이 3%, 우렁이양식이 4% 에너지 생산이 1% 등 이었다. 그 외 환경영향범주에 대한 기여도 경향은 관행농과 무농약이 유사한 경향을 보였는데, N₂O에 영향을 받는 광화학적 산화물생성 (POCP) 범주는 벼 재배단계가 기여도가 가장 높았고, 다음은 비료생산이었다. 그 외 오존층과파괴 (ODP), 산성화 (AP),

부영양화 (EP), 자원결핍 (ADP)에서는 복비생산의 환경영향 기여도가 가장 높았다. 복비 투입이 없었던 유기농의 경우 에너지생산과 농자재 생산 및 폐기물 처리에 대한 기여도가 높아지는 경향이 나타났다.

이태리 쌀 생산체계에 대한 전과정평가에서 GWP에 대한 기여도 분석 결과는 벼 재배단계가 기여도 68%였고, 비료공정에 대한 기여도가 10% 정도로 두 공정의 기여도가 본 연구결과 보다 다소 낮은 값을 보였고, 대신 시스템 범위가 더 넓게 정의되어 농기계 작업 및 수확 후 도정·포장, 운송에 의한 영향이 나타났다 (Billegini and Busto, 2009). 일본의 영농방법별 쌀 생산체계에 대한 연구에서는 벼 재배단계의 GWP 기여도가 72~75%, 농기계 작업 16~18%, 비료생산이 7~10% 등 이었다 (Hokazono and Hayashi, 2012). 또한 Jung et al. (2011)의 복합비료의 온실가스 기여도 구명에 대한 연구에 의하면, 1년간 쌀 생산에 대한 온실가스 배출량은 38억 2천만 kg CO₂ yr⁻¹이었으며 이에 대한 복합비료의 온실가스 배출 기여도는 48.3%였고, 특히 곡물생산에서 복비의 온실가스 기여도가 채소류보다 높았다. 이와 같이 선행 연구들과 본 연구 결과를 비교했을 때, 정의된 시스템 범위가 일치하진 않지만 온실가스 배출에 대한 공통적인 주요 인자로 분석되었다.

전과정평가 결과 관행농과 무농약농법에서는 복합비료 적정량 사용을 위한 맞춤형 비료의 권장 등의 영농법 활용 및 벼논 물관리에 의한 메탄발생 저감방법 등, 온실가스 감축을 위한 영농방법 활용에 대한 연구가 필요할 것으로 판단되었다. 유기농법에서는 수확량 향상을 위한 생산 효율성 증대와 벼 재배 단계에서 농기계 연료 효율성 증대 및 벼논 물관리 영농법 활용에 관한 연구가 요구되었다.

요 약

2011년 전북 군산과 익산 지역의 관행농, 무농약, 유기농 농가를 대상으로 영농방법별로 쌀 생산 과정 중 투입·배출되는 물질 목록을 면접조사하여 전과정평가를 수행하고 쌀 생산체계에 대한 영농방법별 환경영향을 평가하고 탄소배출량을 비교 분석하였다.

전과정 목록분석 결과 CO₂ 배출은 화학비료 생산과 벼 재배단계에서 가장 많았고, CH₄과 N₂O 배출은 대부분 벼 재배 중에 발생되었다. 쌀 (조곡) 1 kg 생산을 기준으로 하는 탄소성적은 관행농이 1.01E+00 CO₂-eq. kg⁻¹로 가장 높았고, 무농약이 5.37E-01 CO₂-eq. kg⁻¹, 유기농법이 6.58E-01 CO₂-eq. kg⁻¹였다. 농자재 투입량이 가장 적었던 무농약 쌀 생산에서 탄소성적이 가장 낮았고, 생산량은 가장 적었지만 복비투입이 없었던 유기농이 관행농보다 탄소성적이 낮았다. 관행농과 무농약 쌀 생산체계에서 온실가스 배출 주요

요인은 복비생산과 벼 재배 중 CH₄ 발생이었고, 유기농에서는 벼 재배 중 농기계 연료사용과 논토양 CH₄ 발생이었다. 그러므로 온실가스 감축을 위한 영농방법 활용으로 복합비료 적정량 사용을 위한 맞춤형 비료의 권장 및 벼논 물관리에 의한 메탄발생 저감방법 등을 제안하며, 더불어 유기농법에서는 수확량 향상을 위한 생산 효율성 증대와, 벼 재배 단계에서 농기계 연료 효율성 증대 활용에 관한 연구가 요구되었다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업 (과제번호: PJ007874032012)의 지원에 의해 이루어진 것입니다.

인 용 문 헌

Basset-Mens, C., H.M.G. van der Werf, P. Robin, Th. Morvan, M. Hassouna, J.M. Paillat, and F. vertès. 2007. Methods and data for the environmental inventory of contrasting pig production system. *J. Cleaner Prod.* 15:1395-1405.

Bllengini, G.A. and M. Busto. 2009. The life cycle of rice; LCA of alternative agri-food chain management system in Vercelli (Italy). *J. Environ. Manag.* 90:1512-1522.

de Boer, I.J.M. 2003. Environmental impact assessment of conventional and organic milk production. *Livestock Production Science* 80:69-77.

Hokazono, S. and K. Hayashi. 2012. Variability in environmental impacts during conversion from conventional to organic farming: a comparison among three rice production systems in Japan. *J. Cleaner Prod.* 28:101-112.

ISO (International Organization for Standardization), 1997. Environmental management-life cycle assessment-principles and framework. International Standard ISO 14040, ISO, Geneva

Jeong, H.C., G.Y. Kim, D.B. Lee, K.M. Shim, and K.K. Kang. 2011. Assessment of greenhpuse gases emission of agronomic sector between 1996 and 2006 IPCC guidelines. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(6):1214-1219.

Jung, S.H., J.A. Park, J.H. Huh, and K.H. So. 2011. Estimation of greenhouse gas emission of complex fertilizers production system by using life cycle assessment. *Korean. J. Soil. Sci. Fert.* 44(2):256-262.

KWA (Korea Waste Association). 2007. Agricultural waste data. Korea Waste Association. Seoul, Korea.

Kwon, O.D., H.G. Park, K.N. An, Y. Lee, S.H. Shin, G.H. Shin, H.R. Shin, and Y.I. Kuk. 2010. Effect of various organic materials on weed control in environment-friendly rice paddy fields. *Kor. J. Sci.* 30(3):272-281.

Lee, S.B., M.H. Koh, Y.E. Na, and J.H. Kim. 2002. Physiological and ecological characteristics of the apple snails. *Korean J. Environ. Agri.* 21(1):50-56.

Lee, S.G., Y.H. Lee, J.S. Kim, B.M. Lee, M.J. Kim, J.H. Shin, H.M. Kim, and D.H. Choi. 2005. Diseases and weeds occurrence and control in organic and conventional rice paddy field. *Korean J. Org. Agri.* 13(3): 291-300.

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.

MKE (Ministry of Knowledge Economy). Software program PASS v.4.1.3.

NAPQMS. (National agricultural product quality management service). 2010. Report of national agricultural products quality management service. Anyang, Korea.

Ryu, J.H., K.H. Kim, G.Y. Kim, K.H. So, and K.K. Kang. 2011. Application of LCA on lettuce cropping system by bottom-up methodology in protected cultivation. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(6):1195-1206.

Ryu, J.H., K.H. Kim, K.H. So, G.Z. Lee, G.Y. Kim, and D.B. Lee. 2011. LCA on lettuce cropping system by top-down method in protected cultivation. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(6):1185-1194.

So, K.H., J.A. Park, G.Z. Lee, K.M. Shim, J.H. Ryu, and K.A. Roh. 2010. Estimation of carbon emission and application of LCA (Life Cycle Assessment) from rice (*Oryza sativa* L.) production system. *Korean J. Soil. Sci.* 43(5): 716-721.

van Zeijts, H., H. Leheman, and A.W. Sleswijk. 1999. Fitting fertilisation in LCA: allocation to carops in a cropping plan. *J. Cleaner Prod.* 7:69-74.