

## A Case Study to Estimate the Greenhouse-Gas Mitigation Potential on Rice Production System in Farming without Agricultural Chemicals

Jong-Sik Lee\*, Jong-Hee Ryu<sup>1</sup>, Hyun-Cheol Jeong, Eun-Jung Choi, and Gun-Yeob Kim

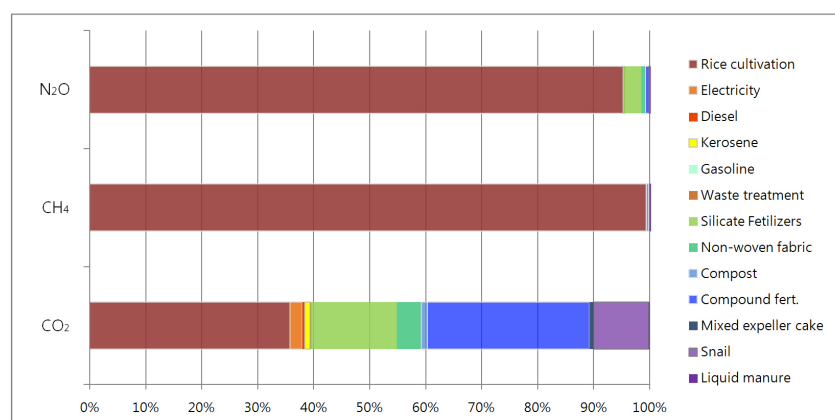
National Academy of Agricultural Science, RDA, Wanju, 565-851, Korea

<sup>1</sup>Konkuk University, Seoul, 143-701, Korea

(Received: October 6 2014, Revised: October 24 2014, Accepted: October 25 2014)

To estimate greenhouse gas (GHG) emission, the inventory of rice cultivation at the farming without agricultural chemicals was established from farmers in Gunsan, Jeonbuk province in 2011~2012. The objectives of this study were to calculate carbon footprint and analyse the major factor of GHGs. To do this, we carried out a sensitivity analysis using the analyzed main factors of GHGs and estimated the mitigation potential of GHGs. Also we suggested agricultural methods to reduce GHGs that can be applied by farmers at this region. At the farming system without agricultural chemicals, carbon footprint of rice production unit of 1 kg was 2.15 kg CO<sub>2</sub>-eq. kg<sup>-1</sup>. Although the amount of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emission was the largest among GHGs, methane (CH<sub>4</sub>) emission had the highest contribution to carbon footprint on rice production system when it was converted to carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-eq.) multiplied by the global warming potential (GWP). Main source of CO<sub>2</sub> emission in the rice farming system without agricultural chemicals was combustion of fossil fuels used by agricultural machinery. Most of the CH<sub>4</sub> was emitted during rice cultivation practice and its major emission factor was flooded paddy field in anaerobic condition. Also, most of the N<sub>2</sub>O was emitted from rice cultivation process. Major sources of the N<sub>2</sub>O emission was application of fertilizer such as compound fertilizer. As a result of sensitivity analysis in energy consumption, diesel had the highest sensitivity among the energy inputs. With the reduction of diesel consumption by 10%, it was estimated that CO<sub>2</sub> potential reduction was about 2.0%. With reducing application rate of compound fertilizer by 10%, the potential reduction was calculated that CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O could be reduced by 0.5% and 0.9%, respectively. At the condition of 10% reduction of silicate and compost, CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> could be reduced by 1.5% and 1.6%, respectively. With 8 days more drainage than the ordinary practice, CH<sub>4</sub> emission could be reduced by about 4.5%. Drainage and diesel consumption were the main sources having the largest effect on the GHG reduction at the farming system without agricultural chemicals. Based on the above results, we suggest that no-tillage and midsummer drainage could be a method to decrease GHG emissions from rice production system.

**Key words:** Farming without agricultural chemicals, LCA, Carbon footprint, GHG reduction



Main source of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O emission in the rice farming system without agricultural chemicals were combustion of fossil fuels used by agricultural machinery, flooded paddy field in anaerobic condition and fertilizer application, respectively.

\*Corresponding author : Phone: +82632382484, Fax: +82632383823, E-mail: jongslee@korea.kr

§Acknowledgement: This study was carried out with the support of "Research Program for Agricultural Science & Technology Development (PJ01003201)", National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Republic of Korea.

## Introduction

기후변화는 현재의 기후계가 자연적인 요인과 인위적인 요인에 의하여 점차 변화하는 것으로 생물다양성 변화, 이상기상에 따른 자연재해, 물부족 등을 일으켜 전지구적인 식량안보 및 사회경제 활동에 심각한 영향을 주게 된다. 주 원인으로는 대기 중 온실가스 농도 증가로 농업분야도 전세계 온실가스 배출량 중 약 10~20%를 차지하고 있다 (Lehugera et al., 2011; Smith et al., 2007). 우리나라의 경우에는 2011년도 농업분야 온실가스 총 배출량은 21,994 천톤 CO<sub>2</sub> eq.으로 국가 총 배출량의 약 3.2%를 차지하고 있다 (GIR, 2014). 이 중에서 벼재배 부문이 약 31% 인 6,813 천톤 CO<sub>2</sub> eq.이다. 이러한 온실가스 배출 저감을 위하여 우리나라도 2020년 국가 온실가스 배출량 전망치 (BAU, Business As Usual) 대비 30% 감축이라는 국가 온실가스 감축목표를 설정 하였다. 아울러 감축목표 달성을 위한 산업 부문별 로드맵을 수립하여 농업부문에서는 BAU 대비 5.2% 감축 할당을 받았다. 이에 따라 농업분야에서 탄소 배출을 줄이기 위한 노력으로 여러 온실가스 감축 정책과 연계 사업이 추진 중이며, 대표적인 것으로 저탄소농축산물인증사업, 자발적 온실가스감축사업을 들 수 있다. 저탄소농축산물인증제도는 친환경, 안심 농산물을 대상으로 온실가스를 줄이는 영농방식 또는 기술 등을 적용하여 생산된 우리농산물에 부여하는 인증제도로써 2015년도 본격 시행을 앞두고 현재 시범 사업이 추진 중이다. 이러한 온실가스 배출 저감을 위한 제도의 안정적 추진을 위하여 여러 기반기술들이 개발 중이다. 탄소배출 저감을 위한 대표적인 영농기술에는 무경운, 대체 에너지 활용, 녹비 시용, 벼논 물관리 등이 있다. 저탄소 인증을 위해서는 대상 시스템에 대한 전과정평가를 통한 정량화와 이에 따른 비교 평가가 이루어져야 한다.

전과정평가 (LCA, Life Cycle Assessment)는 제품의 원료 채취, 생산, 사용, 폐기 등 전 과정에 투입·배출되는 모든 물질과 관련된 환경영향을 평가하기 위한 방법론이다. 농업분야에 대한 전과정평가는 1996부터 2000년대까지는 주로 단작 1 기작에 대한 생산과정과 농자재 투입 및 배출에 관하여 수행하였으며, 2000년 이후에 들어 서로 다른 농업 생산체계를 비교하는 전과정평가가 시작되었다 (de Boer, 2003). 최근 우리나라에서도 참다래 (Deurer et al., 2011), 상추 (Ryu et al., 2011a; 2011b) 및 쌀 생산체계 (Ryu et al., 2012a; 2012b; Ryu et al., 2013)에 대한 전과정평가 연구가 진행되었다. 또한, 농산물 생산과정에서의 온실가스 배출량 산정 및 배출 저감을 위한 연구가 진행되고 있다. 국립농업과학원에서 2009년부터 우리나라 주요 작물에 대한 평균적인 탄소성적 산정을 위하여 작물별 전과정 목록 (LCI, Life Cycle Inventory) DB를 구축하는 top-down 방식의 전과정 평가를 진행하였다. Top-down 방식의 전과정평가는

국가 전체 평균량을 산정하기 때문에 농축산물소득자료집을 중심으로 그 외 국가 통계자료와 문헌자료를 분석 데이터로 사용한다. 국내에서 농가 현지의 활동 자료를 직접 수집하여 탄소배출량을 산정하는 bottom-up 방식의 전과정평가도 일부 지역을 대상으로 진행하였으나 미흡한 상태이다.

본 연구에서는 전북지역에서 무농약 쌀을 생산하는 농가를 대상으로 전과정평가 사례연구를 통하여 온실가스 배출의 주요인을 분석하고, 탄소배출 감소 잠재량을 산출하여 대상지역 농가들이 적용할 수 있는 효과적인 온실가스 저감 영농법을 제안하고자 하였다.

## Materials and Methods

**연구 대상** 본 연구는 2011년과 2012년 전북 군산 지역의 무농약 쌀 재배 36개 농가를 대상으로 쌀 생산 과정 중 투입·배출되는 물질 목록을 현장에서 면접 조사하였다. 그리고 조사 결과에 대한 누적 평균량을 구하여 탄소배출량 산정을 위한 인벤토리를 구축하였다. 조사 농가들이 재배하는 품종은 ‘신동진벼’ 이었다. 조사기간 중 무농약 벼 재배 농가의 ha당 평균 쌀 (조곡) 수확량은 동일 지역 관행농에 비해 적은 6.92 톤 (2011년)과 6.34 톤 (2012년) 이었다 (Table 1). 2012년 수확량이 상대적으로 적었던 것은 이 지역의 수해로 인한 것으로 판단된다.

**연구 목적 및 범위** 본 연구의 대상 시스템 정의는 쌀 생산체계에 대한 탄소배출량 산정 및 온실가스 감축 잠재량 산정으로 하였다. 대상은 Ryu et al. (2013)과 같이 식용 및 각종 식품제조의 원료이며, 기능 단위는 식품 및 식품제조 원료용으로 사용되는 쌀 (조곡) 1 kg 생산으로 정의하였다.

연구 범위는 쌀 생산체계에 대한 전과정을 생산 전 (前) 단계, 생산단계, 생산 후 (後) 및 폐기단계로 나누어 정의하였다. 생산 전 단계는 벼 재배에 투입되는 농자재 와 비료, 에너지 등을 생산하는 공정이 포함된다. 생산단계는 육묘부터 벼 수확 (조곡생산)까지로 농가에서 이루어지는 쌀 생산 관련 일련의 농작업 과정을 포함하며, 주로 지역 미곡처리장에서 작업하는 도정 작업과 수송 과정은 본 연구 범위에서 제외 되었다. 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 포함하였다.

**Table 1. Information of collected data for surveyed farm.**

Item	2011	2012
No. of survey farm	20	16
Total cultivation area (ha)	214.3	86.9
Mean Yield (t ha <sup>-1</sup> )	6.92	6.34
Rice variety	‘Shindongjin’ ‘Shindongjin’	

**전과정 목록 분석** 모든 투입 및 산출량 자료는 벼는 10a를 기준으로 수집하였다. 퇴비, 복합비료, 규산질비료 및 제조용으로 사용하는 우렁이 투입량은 현장 방문하여 수집한 활동자료를 사용하였다.

질소질비료에 의한 벼는 아산화질소 발생량은 비료 투입량과 비료 중 함유된 질소 유효성분 함량에 배출계수를 곱하여 산정하였다. 메탄 배출량은 재배 면적에 메탄 배출계수 값을 적용하였다. 각각의 배출 계수는 IPCC 1996 Tier 1 배출계수 값을 사용 하였다. 또한, 유기물 시용 및 담수의 유·무와 재배일수 및 담수일수를 변수로 하여 산출하였다 (Jeong et al., 2011).

농작업 중 연료 사용으로 배출되는 이산화탄소, 메탄 및 아산화질소 등 온실가스 산정은 IPCC 1996 Tier 1 배출계수를 적용하였다.

농자재 폐기물량은 현장 수집 자료를 활용하되, 폐기물 처리는 Ryu et al. (2013)와 같은 환경자원공사와 농림수산식품부의 영농폐기물 통계 (KWA, 2007, MIFAFF, 2004) 자료를 사용하였다.

전과정 목록 분석을 위하여 지식경제부에서 보급하는 전과정평가 수행 프로그램 PASS v.4.1.3 (Software program PASS v4.1.3)를 사용하였다. 상·하위 흐름 DB는 환경부, 지경부, 현재 국립농업과학원에 구축 중인 농자재 DB 등 국내 자료를 우선 적용하고, 국내 DB가 없는 경우에는 ecoinvent DB를 사용하였다. 탄소성적 산정은 전과정 목록 분석 결과 산출된 교토의정서 규정 6대 온실가스 (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFCs, SF<sub>6</sub>, PFCs) 배출량에 지구온난화지수 (Global warming potential, GWP)를 곱하여 이산화탄소 당량 (kg CO<sub>2</sub> eq. kg<sup>-1</sup>)으로 정량화하였다.

**민감도 분석** 민감도 분석은 전과정 목록 분석 및 영향 평가 단계에서 할당 방법, 투입 데이터의 불확실성 및 가정 등이 분석 결과에 미치는 영향을 평가하는데 사용된다 (Ahn, 2005). 본 연구에서는 비료와 에너지 등의 투입량 변화가 영농활동 과정에서 온실가스 발생에 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위하여 공정기여도를 1로 하여 각각 사용량의 -20~20% 범위에서 5% 간격으로 변화시킴에 따른 온실가스 발생 변화량을 평가하였다.

**가정 및 제한사항** 전과정 평가를 통한 무농약 벼 재배 온실가스 감축 잠재량 산정을 위한 가정 및 제한 사항은 관행농에 대하여 수행한 Ryu et al. (2013)와 동일한 조건으로 하였다. 농기계 제조 및 시설 (육묘용 하우스 및 저장시설 등) 구축, 운송에 따른 환경부하는 고려하지 않고, 물리적인 투입·배출물만을 정량화 하였다. 비료포대 등 원부자재 포장에 대한 환경부하는 고려하지 않았고, 대상 시스템에서 발생한 부산물 (볏짚 등)은 기술계 (technosphere)로부터 투

입된 물질들의 배출이 아닌 자연적인 물질순환의 일부로 시스템 내부에서 다시 분해된다고 가정하였다 (van Zeijts et al., 1999).

## Results and Discussion

**탄소 배출량 산정 및 배출 기여도 평가** 전과정 목록 분석 결과, 무농약 쌀 생산체계에서 온실가스 배출은 화학비료 생산과 벼 재배단계에서 가장 많았다. 전체 이산화탄소 배출량 중 벼 재배과정에서 약 37%가 발생하였다. 벼 재배 중 이산화탄소 발생원은 농작업을 위한 농기계의 화석연료 사용에 의한 연소가스이다. 비료생산 부분에 있어서는 복합비료 생산 공정에서 약 30%가 발생하였고, 규산질비료 생산으로 약 15%가 배출 되었다. Koga et al. (2003)의 연구 결과에서도 작물재배 중 이산화탄소 배출 주요인은 농기계작업에 의한 이산화탄소 배출이었고, 특히 연료 사용이 가장 많은 경운과 수확작업이 이산화탄소 배출 주요 인자였다고 보고하였다. 무농약 쌀 생산체계가 관행농과의 가장 큰 차이는 제조용으로 사용하는 우렁이 투입에 따른 영향으로 이산화탄소 배출의 약 10%를 차지하고 있다. 우렁이 농법은 벼논에서 왕우렁이의 초식 습성을 이용하여 제조 효율을 높이는 방식으로 친환경 재배방법의 하나이다 (Lee et al., 2005). 메탄은 대부분 벼 재배 중에 발생되었으며, 벼논의 메탄 발생 요인은 혐기조건의 담수논이다. N<sub>2</sub>O는 대부분 벼 재배과정에서 배출되었고, 벼 재배 중 주요 아산화질소의 발생 요인은 복합비료, 요소 비료, 퇴비 등의 비료시용이었다 (Fig 1).

쌀 생산체계에서 전체 온실가스 배출량을 탄소성적으로 환산한 결과, 쌀 1 kg 생산할 때 2.15 kg CO<sub>2</sub>-eq. kg<sup>-1</sup>가 발생되었다. 이는 전북지역 관행농 쌀 생산체계에서의 탄소배출량 2.21 kg CO<sub>2</sub>-eq. kg<sup>-1</sup> (Ryu et al., 2013) 보다 적은 양으로 나타났다. 온실가스 중 배출가스 종류별로는 이산화탄소 배출량이 가장 많았으나, Ryu et al.의 보고 (2013)와 같

**Table 2. Estimation of carbon footprint from rice cultivation at the farming without agricultural chemicals.**

Greenhouse gas	Amount (kg)	Global warming potential	Amount (CO <sub>2</sub> -eq.)
	--- kg ---		--- kg CO <sub>2</sub> -eq. ---
CO <sub>2</sub>	0.27	1	0.27
CH <sub>4</sub>	0.084	21	1.76
N <sub>2</sub> O	3.80E-04	310	0.12
HFCs	2.02E-08	1,300	2.62E-05
SF <sub>6</sub>	1.17E-09	23,900	2.80E-05
CFC-14	1.13E-08	6,500	7.33E-05
Total (Carbon footprint)			2.15

이 IPCC GL에서 제시된 지구온난화 지수를 곱하여 이산화탄소 등가 (CO<sub>2</sub>-eq.)로 환산하면 벼 생산체계의 탄소성적 산정에서 메탄 발생이 1.76 kg CO<sub>2</sub>-eq.으로 비중이 가장 컸다 (Table 2). 일반적으로 밭작물 재배의 경우, 시설재배는 이산화탄소, 노지재배는 아산화질소의 비중이 크게 나타나지만 (Kramer et al., 1999), 담수조건의 벼논에서는 메탄 발생량이 증가하면서 메탄의 탄소성적 비중이 가장 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 결과적으로 논 물관리가 논벼 재배에서 온실가스 배출 저감의 주요 인자로 판단되었다.

**민감도 분석 및 온실가스 잠재량 산정** 각 투입물량을 조사 지역 사용량의 -20~20% 범위에서 5%씩 증가하거나 감소시킴에 따른 온실가스 배출량 변화에 대한 민감도 분석을 하였다. 에너지 사용량 변화에 따른 민감도는 이산화탄소의 발생량 변화를 보였으나, 메탄과 아산화질소의 발생량은 변화가 크지 않았다. 이것은 벼 재배에서 농기계 연료 연소 및 전력 발생과정이 주로 이산화탄소 발생원이기

때문이다 (Kramer et al., 1999). 에너지원별로는 경유의 민감도가 가장 높았다 (Fig. 2). 분석 결과, 경유사용량을 10% 줄였을 때 약 2.0%의 이산화탄소 감축 잠재량이 산정되었다. 그 다음으로 등유의 민감도가 높게 나타났으며, 등유 사용량을 10% 줄였을 때, 이산화탄소 감축 잠재량은 약 1.2%로 나타났다. 에너지원별로는 전기 사용의 영향이 상대적으로 가장 낮게 나타났다. 본 연구에서 조사된 경유 사용은 주로 경운 및 수확관련 농기계 사용이었으므로 무경운이나 농기계의 효율적·경제적 운용이 온실가스 저감 개선에 효과적일 것으로 판단되었다. 따라서 저탄소농업의 활성화를 위하여 이에 대한 보다 다양한 조건에서의 영향 평가가 필요할 것으로 판단된다. Harada et al. (2007)의 연구에 의하면 논 토양에서 무경운으로 인한 경운기 무사용으로 에너지 소비 감소 효과를 볼 수 있으며, 이로 인한 온실가스 저감 효과가 약 6%로 보고되었다.

복합비료 사용량 증감에 따른 온실가스 발생 변화는 Fig. 3과 같다. 복합비료의 경우에는 아산화질소에 대한 민감도

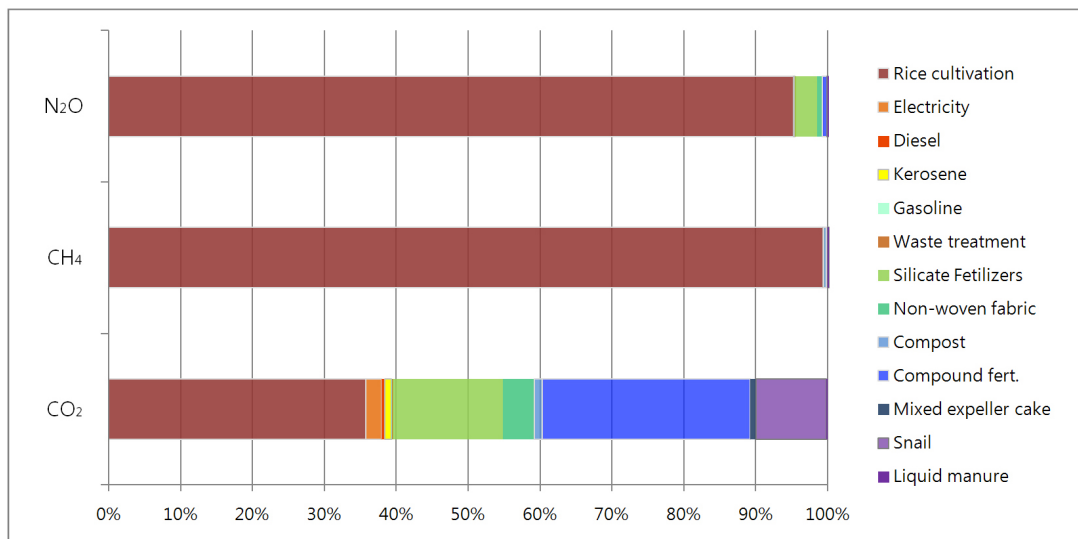


Fig. 1. Contribution rate of the process of conventional rice production to Greenhouse gas emission.

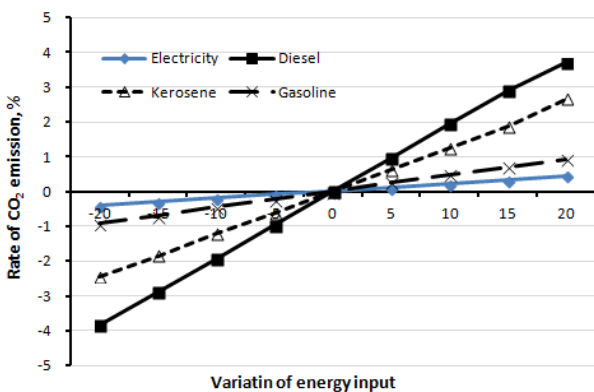


Fig. 2. Sensitivity analysis on variation of energy input.

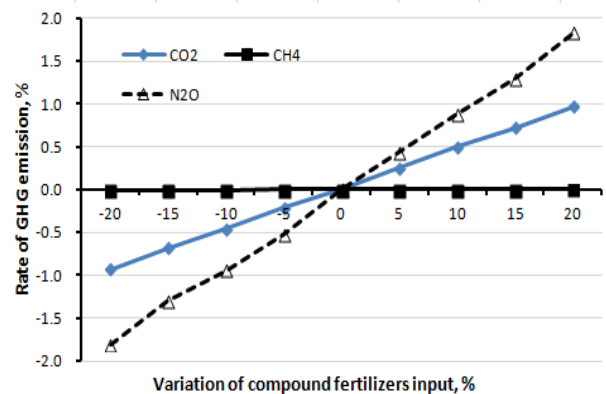


Fig. 3. Sensitivity analysis on variation of compound fertilizer input.

가 이산화탄소 민감도보다 높았으며, 메탄의 민감도는 거의 나타나지 않았다. 이것은 무농약 벼 재배에 있어서 복합비료 민감도는 질소질비료 시비에 의한 아산화질소 발생에 영향을 가장 많이 받는 것을 의미하는 것이다. 복합비료 사용량을 10% 줄였을 때 아산화질소는 약 0.9%의 감축 잠재량을 보였으며, 이산화탄소는 약 0.5%의 감축 잠재량이 산정되었다. 그러므로 토양 검정을 통한 맞춤형 비료처방 등 합리적인 시비관리는 토양의 염류집적 및 수계 부영화 등의 환경부하 감소와 함께 농업부문에서의 탄소 배출을 저감할 수 있는 주요 요인이 될 수 있을 것이다.

규산질비료 사용량 증감에 따른 온실가스 발생량 변화는 Fig. 4에 나타내었다. 벼 재배에 있어 규산질비료 사용 효과는 내병성 증가, 재해 경감 및 쌀의 품질 향상 등과 함께 토양 중 메탄 발생량을 줄이는 것으로 알려져 있다 (Park and Lee, 2010). 민감도 분석 결과, 이산화탄소의 민감도가 가장 컸으며, 그 다음이 아산화질소 민감도로 나타났다. 이것은 민감도가 규산질비료 시비에 의한 아산화질소의 직접적인 발생보다 비료를 생산하는 공정에서 발생하는 이산화탄소의 영향을 더 많이 받는 것으로 평가되었다. 본 사례연구 대상 농가들의 규산질비료 투입량이 비교적 많은 것으로 집계되었으며, 규산질비료 사용량 10%를 감소하면 이산화탄소 발생이 약 1.5% 정도 감소되었다. 반면에 메탄의 민감도는

복합비료의 경우와 마찬가지로 거의 나타나지 않았다. 규산질비료가 직접적인 온실가스 발생원은 아니나, 영농과정에서 수량 및 생육에 큰 영향이 없다면 규산질비료의 적정 사용이 온실가스 발생 저감을 위한 하나의 방안으로 생각된다.

무농약 벼 재배에 있어서 퇴비 사용에 따른 온실가스 발생량 변화는 Fig. 5와 같이 메탄이 가장 높았고, 다음이 아산화질소, 이산화탄소 순이었다. 탄소 발생량의 민감도가 가장 높게 나타난 것은 퇴비 생산 공정 중 부숙 과정에서 발생하는 메탄 발생이 매우 많으므로 이것이 민감도 분석에 가장 큰 영향을 주었기 때문으로 판단된다 (Amlinger et al., 2008). 민감도 분석 결과, 퇴비 사용을 10% 줄이면 약 1.6%의 메탄 발생이 감소하고, 아산화질소는 약 1.1% 감소 효과가 나타났다. 이러한 감소 효과는 동일 지역 관행농에 대한 메탄 및 아산화질소의 민감도 분석 결과에서 각각 1.5% 및 1.0%의 저감 효과를 보인 Ryu et al. (2013)의 결과와 유사하였다. 따라서 퇴비를 통한 메탄 발생량 저감을 위해서는 생산 과정에서의 발생을 억제하는 것이 가장 직접적이고 효과적인 방법으로 판단된다.

벼논의 물떼기 일수를 현행보다  $\pm 20\%$  증감시키는 조건에서 온실가스 변화량을 분석하였다 (Fig. 6). 조사 지역 무농약 쌀 생산 농가들의 평균 물떼기 일수 42일을 기준으로 하여 2일 간격으로 분석한 결과, 물떼기 일수를 8일 증가하면 메탄 발생 감축잠재량이 약 4.5% 감소되었다. 이산화탄소 및 아산화질소 발생량에 미치는 물떼기 영향은 거의 나타나지 않았다. 이미 벼논 물관리는 메탄 발생 감소에 매우 효과적인 영농방법으로 보고되고 있으며 (Mishra et al., 1997; Rath, 1999), 중간낙수 기간에는 메탄이 50%까지 감소된다는 연구 결과도 있다 (Kimura, 1992). 따라서 벼논에서 메탄 발생량은 탄소성적 평가에 매우 중요한 기여 요인이므로 벼논 물떼기는 탄소 저감을 위한 매우 중요한 영농방법으로 판단된다.

현재, 벼 재배에서 적용 가능한 온실가스 감축기술로는 물관리, 경운작업, 유기물 공급, 토양개량, 파종·이앙방법, 무기질비료 대체 및 시비관리 등이 제시되고 있다 (Bhatia

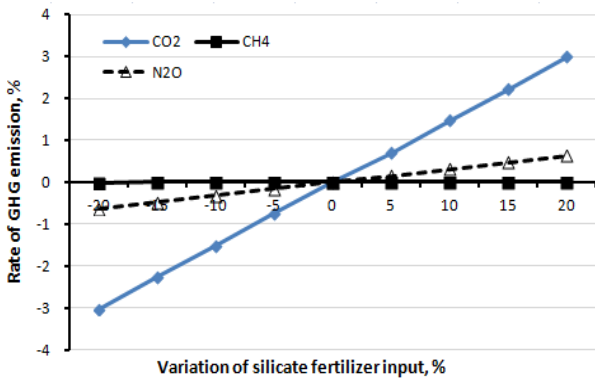


Fig. 4. Sensitivity analysis on variation of silicate fertilizer input.

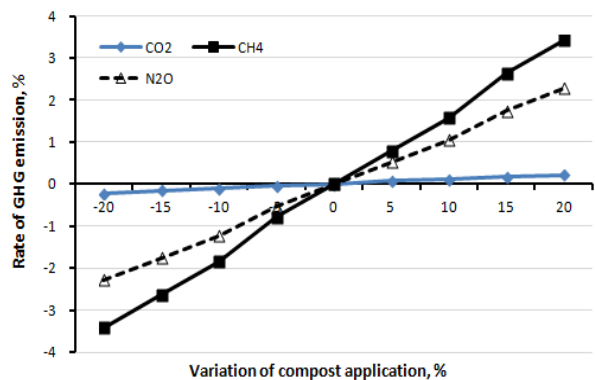


Fig. 5. Sensitivity analysis on variation of compost input.

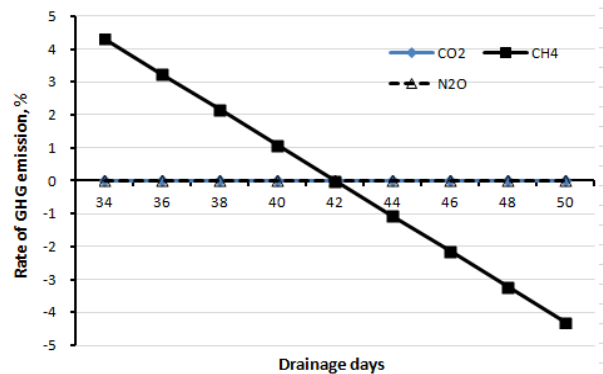


Fig. 6. Sensitivity analysis on variation of drainage days.

et al., 2005; Lehugera et al., 2011; Mosier et al., 2005; Robertson et al., 2004). 본 사례 연구 대상 농가들의 벼 재배방법에 대하여 민감도 분석을 적용한 결과, 투입량 변화에 따른 온실가스 감소 효과가 큰 요인으로는 벼논 물떼기 일수의 증가 및 경운과 수확시 사용하는 농기계용 경유 사용량 감소이었다. 따라서 중간낙수, 무경운과 아울러 농기계 에너지 효율 향상, 비료 사용량 절감 등 보다 다양한 벼 재배방법에 대한 온실가스 발생 저감 효과 분석이 필요할 것이다.

## Conclusion

2011~2012년 2년간 전북 군산 지역의 무농약 벼 재배 농가를 대상으로 온실가스 배출량 산정을 위한 인벤토리 목록을 구축하였다. 2년 누적 평균 데이터를 사용하여 전과정평가를 수행하고, 탄소성적 산출 및 온실가스 배출의 주요 인자를 분석하였다. 또한, 분석된 온실가스 배출 주요 인자들을 대상으로 민감도 분석을 수행하여 온실가스 잠재량을 산정하고, 대상지역 농가들이 적용할 수 있는 온실가스 저감 영농방법을 제안하고자 하였다.

무농약 쌀 생산 농가를 대상으로 전과정 목록분석을 수행한 결과, 탄소성적은 쌀 1 kg 생산을 기준으로 2.15 kg CO<sub>2</sub>-eq. kg<sup>-1</sup>가 발생되었다. 온실가스 중 이산화탄소 배출량이 가장 많았으나, 지구온난화 지수 (GWP)를 곱하여 이산화탄소 등가 (CO<sub>2</sub>-eq.)로 환산하면 벼 생산체계의 탄소성적에서 메탄 발생 기여도가 가장 컸다. 단계별로는 화학비료 생산과 벼 재배단계에서 가장 많았다. 전체 이산화탄소 배출량 중 복합비료 생산 공정에서 30%가 발생하였고, 규산질비료 생산으로 15%가 발생하였다. 벼 재배 중 이산화탄소 발생원으로는 농기계의 화석연료 사용에 의한 연소가스로 약 37%를 차지하고 있다. 메탄은 주요 발생 요인이 벼 재배 중 혐기조건의 담수논이다. 아산화질소는 대부분 벼 재배과정에서 배출되었고, 발생 요인은 비료 시용 이었다.

주요 투입 자재별 민감도 분석 결과, 에너지 사용의 경우, 경유의 민감도가 가장 높았고, 경유 사용량을 10% 줄였을 때 약 2.0%의 이산화탄소 감축 잠재량이 산정되었다. 복합비료의 경우에는 사용량을 10% 줄였을 때 이산화탄소는 약 0.5%, 아산화질소는 약 0.9%의 감축잠재량이 산정되었다. 규산질비료에 대한 민감도는 사용량 10% 감소로 이산화탄소 발생량을 약 1.5% 저감할 수 있을 것으로 평가 되었다. 퇴비는 10% 저감으로 약 1.6%의 메탄 발생이 감소하고, 아산화질소는 약 1.1% 감소 효과가 나타났다. 물떼기 일수가 현행보다 8일 증가하면 메탄 발생량 감소 효과는 약 4.5%로 산정되었다. 결론적으로 무농약 벼 재배 시스템에서 투입량의 변화에 따른 온실가스 배출 저감의 주요 요인으로는 벼논 물떼기 일수 증가 및 경운과 수확시 사용하는 농기계용

경유 사용량 절감으로 평가된다. 따라서 벼 재배시 중간낙수 및 경운횟수 감소 등이 탄소배출 저감을 위한 영농방법으로 제시될 수 있다.

## References

- Ahn, S.J. 2005. Stochastic Analysis for Uncertainty of Life Cycle Assessment with Monte-Carlo Simulation, p.7-30. M.S. University of Ajou, Korea.
- Amlinger, F., S. Peyr, and C. Cuhls. 2008. Greenhouse Gas Emission from Composting, and Mechanical Biological Treatment. *Waste Manage Research* 26(1):47-60.
- Bhatia, A., H. Pathak, N. P. Jain, K. Singh, and A.K. Singh. 2005. Global Warming Potential of Manure Amended Soils under Rice-wheat System in the Indo-Gangetic Plains. *Atmos. Environ.* 39:6976-6984.
- de Boer, I.J.M. 2003. Environmental Impact Assessment of Conventional and Organic Milk Production. *Livestock Production Science* 80:69-77.
- Deurer M., B. Clothier, K.Y. Huh, G.I. Jun, I.H. Kim, and D. Kim. 2011. Trends and Interpretation of LCA for Carbon Footprinting of Fruit Products: Focused on Kiwifruits in Gyeongnam Region. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 29(5):389-406.
- GIR (Greenhouse Gas Inventory Research Center of Korea). 2014. 2013 National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea. p.186.
- Harada, H., H. Kobayashi, and H. Shindo. 2007. Reduction in Greenhouse Gas Emission by no-tilling Rice Cultivation in Hachirogata Polder, Northern Japan: Life Cycle Inventory Analysis. *Soil Science and Plant Nutrition* 53:668-677.
- Jeong, H.C., G.Y. Kim, D.B. Lee, K.M. Shim, and K.K. Kang. 2011. Assessment of Greenhouse Gases Emission of Agronomic Sector Between 1996 and 2006 IPCC Guidelines. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(6):1214-1219.
- Kimura, M. 1992. Methane Emission from Paddy Soils in Japan and Thailand, p. 43-79. In: Batjes, Bridges, E.M. (ed.), *World Inventory of Soil Emission Potentials*. WISE Report 2, International Soil Reference and Information Centre, Wageningen.
- Koga, N., H. Tsuruta, H. Tsuji, and H. Hakano. 2003. Fuel Composition-derived CO<sub>2</sub> Emissions under Conventional and Reduced Tillage Cropping Systems in Northern Japan. *J. of Agric., Ecos. and Environ.* 99:213-219.
- Kramer, K.J., H.C. Moll, S. Nonhebel, and H.C. Wilting. 1999. Greenhouse gas emissions related to Dutch food consumption *Energy Policy*. 27(4):203-216.
- KWA (Korea Waste Association). 2007. *Agricultural Waste Data*. Korea Waste Association. Seoul, Korea.
- 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.
- Lehugera, S., B. Gabrielle, P. Laville, M. Lamboni, B. Loubet, and P. Cellier. 2011. Predicting and Mitigating the

- Net Greenhouse Gas Emissions of Crop Rotations in Western Europe. *Agricultural and Forest Meteorology* 51:1654-1671.
- 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.
- Mishra, S., A.K. Rath, T.K. Adhya, V.R. Rao, and N. Sethunathan. 1997. Effect of Continuous and Alternate Water Regimes on Methane Efflux from under Greenhouse Conditions. *Biol. Fertil. Soils* 24:399-405.
- Mosier, A.R., A.D. Halvorson, G.A. Peterson, G.P. Robertson, and L. Sherrod. 2005. Measurement of Net Global Warming Potential in Three Agroecosystems. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 72:67-76.
- Park, Y.H. and C.S. Lee. 2010. Effect and Fertilization Standard of Silicate fertilizer. *Korean Society of Soil Science and Fertilizer*. p.2.
- Rath, A.K., B. swain, B. Ramakrishna, D. Panda, T.K. Adhya, V.R. Rao, and N. Sethunathan. 1999. Influence of Fertilizer Management and Water Regime on Methane Emission from Rice Fields. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 76:99-107.
- Robertson, G.P. and P.R. Grace. 2004. Greenhouse Gas Fluxes in Tropical and Temperate Agriculture: The Need for a Full-cost Accounting of Global Warming Potentials. *Environ., Dev. and Sustain.* 6:51-63.
- Ryu, J.H., J.S. Lee, K.H. Kim, G.Y. Kim, and E.J. Choi. 2013. A Case Study to Estimate the Greenhouse-Gas Mitigation Potential on Conventional Rice Production System. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 46(6):502-509.
- Ryu, J.H., K.H. Kim, G.Y. Kim, K.H. So, and K.K. Kang. 2011a. 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. 2011b. LCA on Lettuce Cropping System by Top-down Method in Protected Cultivation. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(6):1185-1194.
- Ryu, J.H., S.C. Jung, G.Y. Kim, J.S. Lee, and K.H. Kim. 2012a. LCA (Life Cycle Assessment) for Evaluating Carbon Emission from Conventional Rice Cultivation System: Comparison of Top-down and Bottom-up Methodology. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45(6):1143-1152.
- Ryu, J.H., Y.R. Kwon, G.Y. Kim, J.S. Lee, K.H. Kim, and K.H. So. 2012b. LCA on Rice Production Systems: Comparison of GHGs Emission on Conventional, Without Agricultural Chemical and Organic Farming. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45(6):1157-1163.
- Smith, P., D. Martino, Z. Cai, D. Gwary, H. Janzen, P. Kumar, B. McCarl, S. Ogle, F. O'Mara, C. Rice, B. Scholes, and O. Sirotenko. 2007. Agriculture. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- van Zeijts, H., H. Leheman, and A.W. Sleeswijk. 1999. Fitting Fertilization in LCA: Allocation to Crops in a Cropping Plan. *Journal of Cleaner Production* 7:69-74.