

REVIEW ARTICLE

Analysis of research trends in methane emissions from rice paddies in Korea

Eun-Jung Choi^{1†}, Jae-Han Lee^{2†}, Hyun-Cheol Jeong¹, Su-Hun Kim², Ji-Sun Lim², Dong-Kyu Lee², Taek-Keun Oh^{2*}

¹Division of Climate Change & Agroecology, Department of Agricultural Environment, National Academy of Agricultural Science, Wanju 55365, Korea

²Department of Bio-environmental Chemistry, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

*Corresponding author: ok5382@cnu.ac.kr

[†]These authors contributed equally to this work as the first authors.

Abstract

Climate change is considered as the greatest threat to our future and descendants. The Korean government has set a target for 2030 to reduce emission of greenhouse gases (GHGs) by 37% from the business-as-usual levels which are projected to reach 851 million metric tons of CO₂eq (Carbon dioxide equivalent). In Korea, GHGs emission from agriculture account for almost 3.1% of the total of anthropogenic GHGs. The GHGs emitted from agricultural land are largely classified into three types: carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), and nitrous oxide (N₂O). In Korea, rice paddies are one of the largest agricultural CH₄ sources. In order to analyze domestic research trends related to CH₄ emission from rice paddies, 93 academic publications including peer reviewed journals, books, working papers, reports, etc., published from 1995 to September 2017, were critically reviewed. The results were classified according to the research purposes. CH₄ characteristics and assessment were found to account for approximately 65.9% of the research trends, development of CH₄ emission factors for 9.5%, CH₄ emission reduction technology for 14.8%, and CH₄ emission modeling for 6.3%, etc. A number of research related to CH₄ emission characteristics and assessment have been studied in recent years, whereas further study on CH₄ emission factors are required to determine an accurate country-specific GHG emission from rice paddies. Future research should be directed toward both studies for reducing the release of CH₄ from rice paddies to the atmosphere and the understanding of the major controlling factors affecting CH₄ emission.

Keywords: greenhouse gas, methane, paddy soil, research trend

Introduction

농업부문에서 배출되는 대표적인 온실가스(Greenhouse gas)는 배출원에 따라 분류하면 벼 재배 부분에서의 메탄(CH₄) 발생과 농경지 토양에서의 아산화질소(N₂O) 배출로 구분할 수 있다. 온실가스 배출에 따른 기후변화(Climate change)는 미래 세대를 포함한 우리 사회에 환경 문제를 통한 큰 위협이 되고 있으며, 이러한 위협에 대응하기 위해 국제 사회는 기후변화 핵심 매뉴얼인



click for updates

OPEN ACCESS

Citation: Choi EJ, Lee JH, Jeong HC, Kim SH, Lim JS, Lee DK, Oh TK. 2017. Analysis of research trends in methane emissions from rice paddies in Korea. Korean Journal of Agricultural Science 44:463-476.

DOI: <https://doi.org/10.7744/kjoas.20170055>

Editor: Jwakyung Sung, National Institute of Agricultural Sciences, Korea

Received: October 10, 2017

Revised: October 23, 2017

Accepted: October 24, 2017

Copyright: © 2017 Korean Journal of Agricultural Science.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

교토의정서(Kyoto Protocol, 1998)와 신 기후 체제의 출범을 알린 파리협정(Paris Agreement, 2015)을 이끌어냈다. 우리나라는 2009년 11월에 2020년 온실가스 배출량 전망치(Business as usual) 776.1 백만 톤 CO₂eq. (Carbon dioxide equivalent) 대비 30% 감축을 처음 발표 하였으며, 이후 2015년 6월에는 2030년의 온실가스 배출량 전망치 851 백만 톤 CO₂eq. 대비 37%를 감축하는 것으로 발표하였다.

국가 온실가스 정보센터에서 2016년에 발간한 국가 온실가스 인벤토리 보고서(GIR, 2016)에 의하면 2014년 국내 온실가스 배출량(LULUCF 제외)은 690.6 백만 톤 CO₂eq. 이며, 2013년 대비 0.8% 감소하였지만, 1990년 대비 135.6% 증가한 양이다(Table 1). 2014년 국내 발생 6대 온실가스 각각의 배출량은 CO₂가 628.8 백만 톤 CO₂eq. (91.1%), CH₄이 26.6 백만 톤 CO₂eq. (3.9%), N₂O가 14.9 백만 톤 CO₂eq. (2.2%), HFCs가 8.5 백만 톤 CO₂eq. (1.4%), PFCs는 2.4 백만 톤 CO₂eq. (1.2%), SF₆는 9.4 백만 톤 CO₂eq. (0.4%)의 순으로 나타났다(Fig. 1). 2014년 농업분야 온실가스 배출량은 총 21.2 백만 톤 CO₂eq. 이었으며(Fig. 2), 이는 국내 온실가스 배출량의 약 3.1%를 차지하는 것으로 경종분야(벼재배, 농경지토양, 작물잔사소각)에서 12.4 백만 톤 CO₂eq., 축산분야(장내발효, 가축분뇨처리)에서 8.8 백만 톤 CO₂eq. 발생하였다(Lee et al., 2016b; Hwang et al., 2017). 주로 농업분야 온실가스 배출량 중 가장 큰 비중을 차지하는 것은 벼 재배 시 논에서 발생하는 CH₄이며, 2014년 기준 6.8 백만 톤 CO₂eq. 배출되었다. 이는 전체 농업분야 온실가스 배출량의 32.1%를 차지하며, 농업분야에서의 CH₄ 배출량으로 보면 55.5%의 비중을 차지한다(GIR, 2016). 따라서 본 연구의 목적은 1995년부터 2017년 9월까지 우리나라의 CH₄ 배출계수 개발과 관련된 연구 결과를 중심으로 연구의 시기별과 목적별로 지금까지의 연구동향과 최신 결과를 조사 및 분석을 통하여 향후 국가별 온실가스 배출량 산정을 위한 연구의 기초자료 제공 및 후속 연구의 방향성을 제시하는 데에 있다.

Table 1. Greenhouse gas emission by sector from 1990 to 2014 (Unit: Million tons CO₂eq.).

Sector	Greenhouse gas emissions						Emission changes in 2014 compared to 1990 levels (%)	Emission changes in 2014 compared to 2013 levels (%)
	1990	2000	2010	2012	2013	2014		
Energy	241.4	410.4	565.2	597.7	606.7	599.3	148.3	-1.2
Industrial processes	19.7	49.6	54	51.7	52.0	54.6	177.3	5.0
Agriculture	21.6	21.8	22.4	21.9	21.9	21.3	-1.5	-2.7
LULUCF	-34.1	-58.8	-54.3	-44.7	-42.8	-42.5	24.5	-0.7
Waste	10.4	18.9	15.1	15.8	16.0	15.4	47.8	-3.3
Total (LULUCF ^z except)	293.1	500.6	656.6	687.1	696.5	690.6	135.6	-0.8
Total (LULUCF including)	259.0	441.8	602.3	642.4	653.8	648.1	150.2	-0.9

^zLULUCF: land use, land-use change and forestry.

Sources: GIR, 2016.

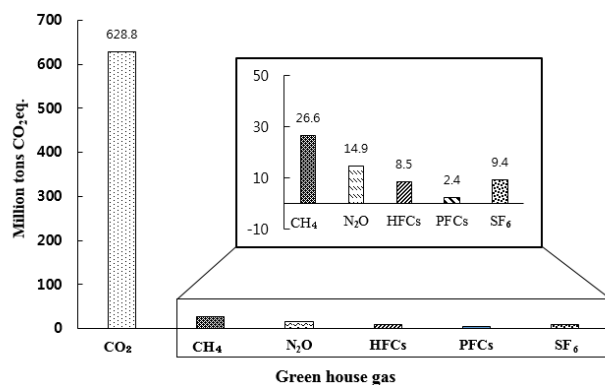


Fig. 1. Korea's greenhouse gas emissions in 2014 (GIR, 2016).

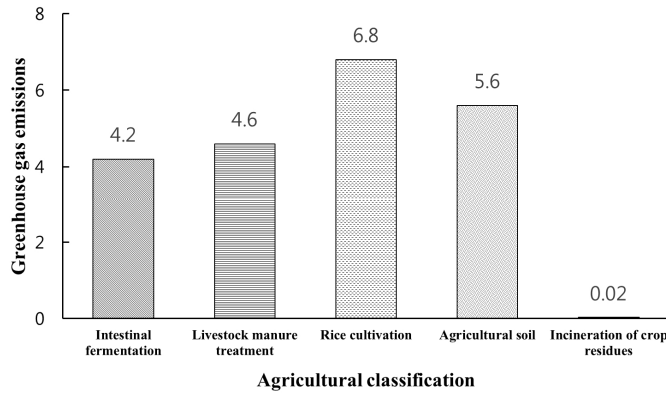


Fig. 2. Greenhouse gas emissions in the Korean agricultural sector in 2014 (GIR, 2016).

Methods for trend analysis

국내 연구 동향을 분석하기 위하여 관련 주요 국내 학회지에 발표된 연구 내용과 국내 대학에서 보고된 학위논문 중심으로 1995년부터 2017년도 9월까지 총 93편의 연구 결과를 수집하여 분석하였다. 연구의 시기별 동향은 우리나라 정부가 처음 온실가스 배출 감축을 발표한 2009년 이전과 이후로 분류하여 분석하였으며, 연구 목적에 따라 논에서 벼짚시용 및 시용시기, 경운방법, 물 관리 등을 통해 CH_4 배출량을 조사한 연구를 ‘ CH_4 배출 특성 및 평가’로 분류 하였으며, CH_4 배출 감소와 관련된 요소들을 이용하여 CH_4 배출량 감소기술 개발을 목적으로 하는 연구를 ‘ CH_4 배출저감기술 개발’로 분류하였다. CH_4 배출량 조사 후 국가 고유계수로 등록하기 위한 배출계수를 산정한 연구를 ‘ CH_4 배출계수 개발’로 분류하였으며, 이전의 연구결과를 토대로 DNDC모델을 활용한 CH_4 배출량 평가한 연구를 ‘ CH_4 배출 모델링 연구’로 분류하여 분석하였다.

Results

Research trend classified by study period

국내 논에서 CH_4 배출 관련 연구를 우리나라 정부가 온실가스 배출 감량을 처음 발표한 2009년 이전과 이후로 나누어 발표 논문의 주제별로 분석하였다(Table 2). 1995 - 2009년까지의 연구는 CH_4 배출 특성 및 평가가 23편(Shin et al., 1995a; Shin et al., 1995c; Ko et al., 1996; Lee, 1997; Lee et al., 1997a; Lee et al., 1997b; Ko et al., 1998; Lee et al., 2000; Ko et al., 2002a; Ko et al., 2002b; Kim et al., 2002; Shin et al., 2003a; Shin et al., 2003b; Shin et al., 2003c; Lee et al., 2003a; Lee et al., 2003b; Lee and Cho, 2004; Ko et al., 2007a; Ko et al., 2008; Ali et al., 2008; Kim et al., 2009a; Kim et al., 2009b; Kim, 2009)으로, CH_4 배출 저감기술 개발이 4편(Ali and Kim, 2006; Ali et al., 2006; Ko et al., 2007b; Ali, 2008)으로 조사되었으며, 2009 - 2017년까지의 연구는 CH_4 배출 특성 및 평가가 39편(Jeong et al., 2010; Lee et al., 2010; Kim et al., 2010a; Won et al., 2010; Seo et al., 2010; Park et al., 2011; Kim et al., 2011a; Kim et al., 2011b; Gutierrez et al., 2011a; Gutierrez et al., 2011b; Seo et al., 2011a; Seo et al., 2011b; Kim et al., 2011c; Ko et al., 2011; Kim et al., 2012a; Kim et al., 2012b; Park et al., 2012; Cho et al., 2012; Lee et al., 2013; Kim, 2013; Haque et al., 2013; Ju et al., 2013a; Lim et al., 2013; Whang, 2013; Kim et al., 2014a; Park et al., 2014; Gwon et al., 2014; Gwon, 2014; Kim et al., 2014b; Lee et al., 2014; Cho et al., 2015; Lee, 2015; Kim et al., 2015; Kim et al., 2016a; Kim et al., 2016b; Park et al., 2016; Kim et al., 2017b; Kim et al., 2017c), CH_4 배출 저감기술 개발이 10편(Lim, 2011; Pramanik et al., 2011; Kim et al., 2012c; Kim et al., 2014c; Ali and Kim 2015; Park and Kim 2015; Kim et al., 2016a; Seo et al., 2016., Kim et al., 2017a), CH_4 배출계수 개발이 9편(Ryu et al., 2012a; Lee et al., 2012; Ryu

et al., 2012b; Ryu et al., 2013; Ju et al., 2013a; Ju et al., 2013b; Kim et al., 2014d; Choi et al., 2016a; Jeong et al., 2016), CH₄ 배출 모델링이 6편(Kim et al., 2013; Jeong et al., 2013; Jeong et al., 2014; Min et al., 2016; Min et al., 2017; Jeong et al., 2017)으로 조사되었다. 1995년부터 2009년 까지 논에서의 CH₄ 배출 관련 연구는 다소 미흡한 실정 이었으나, 우리나라 정부가 온실가스 배출량 감축을 처음 발표한 2009년 이후, 2010년부터 급증하여 활발한 연구가 이어지고 있다(Fig. 3). 2009년 이후 전체적으로 연구가 증가하였고, CH₄ 배출계수 개발과 배출량 저감기술개발 연구가 새롭게 등장하였다. 이는 2009년 이후, 우리나라 정부의 온실가스 관련 연구가 증가하였고, 국가온실가스 배출계수 등록을 위해 배출계수 관련 연구가 이루어진 것으로 판단된다. 향후 온실가스 관련 연구는 2030년 우리나라의 온실가스 감축 목표를 배출량 전량치(BAU) 대비 37%로 확정 감축하겠다는 우리나라 정부의 발표(2015년 6월 30일 국무회의)와, 국제사회에서의 신 기후체제의 기반이 되는 파리협정(Paris Agreement, 2015) 등 국내외 온실가스 관련 연구가 요구됨으로써 지속적으로 증가 할 것으로 판단된다. 또한, 이전의 연구결과를 토대로 농업 부문에서 온실가스 예측에는 대표적으로 사용되는 DNDC와 DAYCENT 모델을 활용한 국내 온실가스 배출량을 예상하는 연구가 필요할 것으로 예상된다.

Table 2. Chronological classification of methane emission research trends during the 1995 - 2017 period.

	CH ₄ emission characteristics and assessment	CH ₄ emission reduction technology	Development of CH ₄ emission factors	CH ₄ emission modeling
1995 - 2008	23	4	0	0
2009 - 2017	39	10	9	6

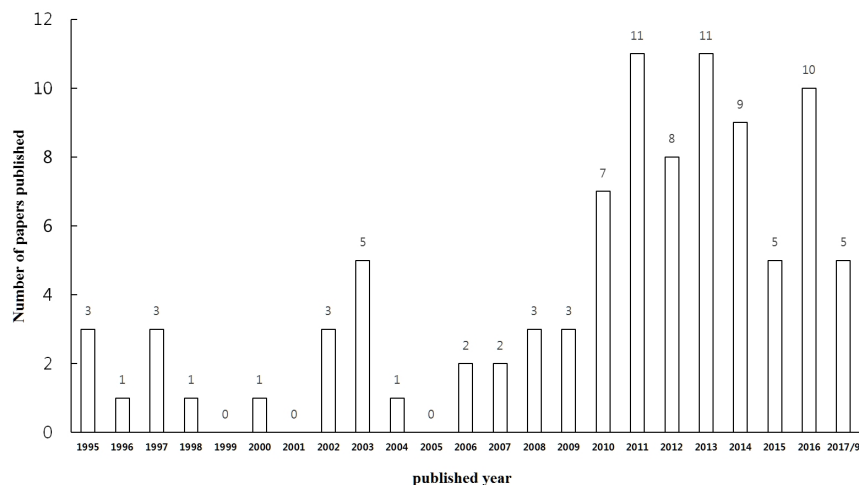


Fig. 3. Papers on methane emissions from rice paddy.

Research trend classified by study topic

논에서 CH₄ 배출에 대한 연구를 주제별로 CH₄ 배출 특성 및 평가, CH₄ 배출 저감기술 개발, CH₄ 배출계수 개발, CH₄ 배출 모델링으로 분류하여 연구 주제별로 분석한 결과(Table 3), CH₄ 배출 특성 및 평가와 관련된 연구가 62편 (65.9%), CH₄ 배출 저감기술 개발과 관련된 연구가 14편(14.8%), CH₄ 배출계수 개발과 관련된 연구가 9편(9.5%), CH₄ 배출 모델링과 관련된 연구가 6편(6.3%), 기타(Shin et al., 1995b; Lee et al., 2016a; Choi et al., 2016b)는 3편 (3.1%)으로 조사되었다. CH₄ 배출특성 및 평가 연구가 가장 많이 이루어진 것은 CH₄배출량 평가를 통하여 국가 온실가스 인벤토리 구축 및 온실가스 감축의 목표 설정을 위한 기본자료로 사용하기 위해 다른 분야보다 많은 연구가 이루어 졌다고 판단되며, CH₄ 배출량 저감 기술개발, CH₄ 배출계수 개발 연구, CH₄ 배출 모델링 연구가 미흡

한 것은 CH₄ 배출 평가 및 특성 연구 이후의 차기 연구로 이루어지기 때문에 아직 많은 연구가 이루어지지 않은 것으로 판단된다.

Table 3. Classification according to methane emission research trends.

Total	CH ₄ emission				Other
	CH ₄ emission characteristics and assessment	CH ₄ emission reduction technology	Development of CH ₄ emission factors	CH ₄ emission modeling	
94 (100%)	62 (65.9%)	14 (14.8%)	9 (9.5%)	6 (6.3%)	3 (3.1%)

Research trend classified by factors influencing the release of GHG emission

논토양에서 CH₄ 배출량 평가를 통한 경종분야 국가 온실가스 배출계수 개발에 관한 연구는 크게 물 관리 방법, 유기물(벼짚, 녹비작물 등) 시용 유·무, 재배방식, 토성, 벼 품종으로 나뉘며, 이러한 연구는 물 관리와 벼짚사용에 따른 CH₄ 배출(Ko et al., 1996), 물과 양분관리에 따른 CH₄ 배출(Kim et al., 2002), 경운 및 재배방식에 따른 CH₄ 배출(Kim et al., 2016c), 질소비중 및 재배양식에 따른 CH₄ 배출(Ko et al., 1998) 등 논에서 CH₄ 발생 및 감소 등에 대한 연구가 복합적으로 이루어지고 있다. 논에서 벼 재배 시 CH₄ 배출 관련 연구를 2015년 까지 경종분야 국가 온실가스 배출계수로 개발된 물 관리, 벼짚사용, 녹비사용으로 분류하여 조사하였으며, 현재 배출계수로 개발되지는 않았지만 CH₄ 배출과 관련 있는 토성과 작물 연구를 추가 조사·분석하였다(Table 4).

Table 4. Research on CH₄ emission in paddy soil.

Classification according to research designs	Content
Water management	<ul style="list-style-type: none"> • Estimation of methane emission by water management and rice straw application in paddy soil in Korea (Shin et al., 1995c). • Effects of water management rice straw and compost on methane emission on dry seeded rice (Ko et al., 1996). • Emission characteristics of methane and nitrous oxide by management of water and nutrient in a rice paddy soil (Kim et al., 2002). • Effects of soil percolation rate by different drainage treatments on CH₄ and N₂O emissions from paddy field (Ko et al., 2007a). • Effects of plowing time and water management in rice cultivation on methane emission (Won et al., 2010). • Mitigation of greenhouse gases by water management of SRI (System of Rice Intensification) in rice paddy fields (Kim et al., 2012a). • Mitigation of greenhouse gas emissions (GHGs) by water management methods in rice paddy field (Kim et al., 2016b).
Rice straw application	<ul style="list-style-type: none"> • Estimation of methane emission by water management and rice straw application in paddy soil in Korea (Shin et al., 1995c). • Effects of water management rice straw and compost on methane emission on dry seeded rice (Ko et al., 1996). • Effects of cultural practices on methane emission in tillage and no-tillage practice from rice paddy fields (Ko et al., 2002a). • Estimation of methane gas emission from paddy field in alpine land and alluvial plain under rice straw application (Lee et al., 2003a). • New estimates of CH₄ emission scaling factors by amount of rice straw applied from Korea paddy fields (Ju et al., 2013b).
Green manure crops application	<ul style="list-style-type: none"> • Effect of Chinese milk vetch (<i>Astragalus sinicus</i> L.) as a green manure on rice productivity and methane emission in paddy soil (Lee et al., 2010). • Effect of green manure and silicate application on CH₄ production in paddy soil (Kim et al., 2010b). • Effects of winter cover crop amendment on methane and nitrous oxide emissions in paddy soil during rice cultivation (Gutierrez et al., 2011a).

Water management

CH₄는 절대 혐기성 세균에 의해 생성되는 최종산물이다(Ko et al., 1996). 논에서 벼 재배 시 담수로 인해 토양은 혐기적 상태가 되며, 혐기성균이 생육하여 CH₄ 발생에 영향을 주는 이유로 물 관리를 통한 논 토양에서의 CH₄ 배출과 관련된 연구가 많이 이루어졌다. 주로 상시담수, 간단관개, SRI (System of Rice Intensification, 물 얇게 대기; 벼 재배기간 동안 담수를 1 - 2 cm로 채운 후 논물이 증발되어 바닥에 실금이 보이면 다시 1 - 2 cm 담수) 방법으로 물관리 조건을 달리한 연구가 진행되었다.

Shin et al. (1995b)은 물 관리 및 볏짚시용이 CH₄ 배출에 미치는 영향에 관한 연구를 하였고, 상시 담수 보다 간단 관개의 NPK구에서 70% 저감효과가 있는 것으로 조사되었으며, 특히 NPK + 볏짚 시용구에서는 47% 저감효과를 확인하였다. Ko et al. (1996)은 건답재배 시 물 관리 및 유기물원별로, 볏짚 시용시기를 달리하여 CH₄ 배출을 평가하였는데 간단관개가 상시담수에 비해 CH₄ 배출량이 약 19% 가량 저감되었다고 하였다. Kim et al. (2002)은 상시 담수와 이앙 35일 이후 중간낙수한 간단관개(중간낙수기간 20일)를 처리하여 CH₄ 배출을 평가하였는데 상시 담수가 간단관개보다 CH₄ 배출이 170 - 208% 높은 것을 확인하였다. Ko et al. (2007b)은 배수 개선처리에 따른 논 토양 물리성의 하나인 토양 투수속도 변화가 논에서 CH₄ 배출에 미치는 영향에 대해 조사하였는데 암거배수 처리 후 CH₄의 배출은 46% 저감되었다고 하였다. Won et al. (2010)은 볏짚 무시용 시 중간낙수가 상시담수에 비해 6.8% 감소하였으며, 상시담수에서 볏짚시용에 비해 무시용이 56.7% 감소하였다고 하였다. Kim et al. (2012a)은 SRI 물 관리 방법을 적용한 온실가스 저감 연구에서 상시담수에 비해 간단관개가 65.5%의 CH₄ 감축효과가 있었으며, SRI 농법은 상시담수에 비해 71.8%의 온실가스 감축 효과가 있다고 보고하였다. Kim et al. (2016a)은 2012년부터 2013년까지 2년간 물 관리를 통한 온실가스 배출연구에서 상시담수, 간단관개, 초기담수 + 물 얇게 대기를 비교한 결과, 초기담수 + 물 얇게 대기 처리하였을 때 상시담수에 비해 69.3% 온실가스 배출량 감축효과를 보고 하였다.

논에서 물 관리를 통한 CH₄ 배출관련 연구는 논을 혐기상태로 만드는 상시담수 보다 간단관개와 SRI (물 얇게 대기)에 의해 많은 감소되는 연구가 있으며, 최근 SRI를 이용한 연구가 진행 중에 있다. SRI는 논에서의 CH₄ 발생량 감소뿐 아니라 농업용수절약, 잡초방제, 생산성증대 효과가 있어 국내 온실가스 감축 및 농사소득에 도움이 될 것 이라고 판단된다.

Straw application

볏짚은 논 토양에 시용 시 유기물로서 탄소함량을 증가시켜 CH₄ 배출원으로 작용할 수 있다(Won et al., 2010). 이에 따라 볏짚 시용 및 경운에 의한 CH₄ 관련 연구가 이루어 졌다.

Shin et al. (1995b)은 물 관리 및 볏짚시용이 CH₄ 배출에 미치는 영향에 관한 연구를 하였고, 상시 담수 보다 간단 관개의 NPK구에서 70% 저감효과가 있는 것으로 조사되었지만, 볏짚이 추가된 NPK + 볏짚 시용구에서는 47% 저감효과가 있었다. 이는 볏짚으로 인한 CH₄이 발생되어 간단관개에서 낮은 저감효과를 보인 것으로 판단된다. Ko et al. (1996)은 건답재배 시 물 관리 및 유기물원별로, 볏짚 시용시기를 달리하여 CH₄ 배출량을 평가하였는데, 유기물 중 볏짚시용구가 가장 높은 CH₄ 배출량을 보였고, 퇴비시용은 NPK 처리구와 비슷한 배출량을 나타내었으며, 볏짚 시용시기는 파종 한 달 전 시용이 파종 직전 처리에 비해 약 40% 배출량이 저감되었다고 하였다. Ko et al. (2002a)은 경운 및 무경운 재배 시 CH₄ 배출 양상을 조사하였으며, 볏짚시용 시에는 무경운에 의한 CH₄ 발생이 경운 대비 10.7% 저감 효과와, 볏짚 5 Mg ha⁻¹ 시용 시 26.6% 저감되었다고 한다. Lee et al. (2003a)은 볏짚 시용 시 고랭지와 평야지 논에서 CH₄ 배출을 평가 하였는데, 고랭지와 평야지 모두 볏짚 무시용구가 시용구에 비해 높은 배출량을 보인다는 것으로 조사되었다. Ju et al. (2013b)에 의하면 볏짚 시용량이 증가되면서 CH₄ 배출도 증가되었고, 무시용구 대비 볏짚 7 Mg ha⁻¹ 처리구에서 190%의 증가량을 확인하였다.

뽕짚을 처리함에 따라 토양 유기물 함량이 높아져 이를 이용하는 영양원으로 CH_4 생성세균의 생육이 활성화되어 CH_4 발생이 증가된다. 뽕짚 시용에 따른 경운방법 및 시기, 물 관리 등의 여러 방면의 CH_4 저감기술에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

Green manure amended paddy soil

경종농가에서 뽕짚판매를 통해 부수입원으로 이용하여 논에 뽕짚이 80% 이상 수거되면서, 토양 유기물이 2010년에는 23 g kg^{-1} 까지 낮아졌으며(Cho et al., 2012), 우리나라 뿐만 아니라, 전 세계적으로 화학비료 절감과 토양의 유기물 공급을 위해 녹비작물에 대한 관심이 증대 되고 있다.

Lee et al. (2010)은 자운영(*Astragalus sinicus* L.)을 논토양에 시용함에 따른 CH_4 발생 및 벼의 수량에 미치는 영향을 조사하였다. 자운영 처리량에 따라 CH_4 의 발생량은 유의적으로 증가하였으며, 녹비작물로 자운영을 시용할 시 10 Mg ha^{-1} 의 양을 사용하는 것이 벼 생장에도 부정적 영향 없이 CH_4 배출량 감소에 적합하다고 하였다. Kim et al. (2010b)은 녹비작물과 규산을 시용하여 CH_4 생성에 미치는 영향을 조사하였다. 녹비가 시용된 토양은 무처리구에 비해 높은 CH_4 배출을 보였으며, 호밀이 시용된 토양은 자운영이 시용된 토양에 비해 높은 CH_4 배출을 보였다. 또한, 규산은 녹비가 적용된 토양에서 CH_4 배출을 감소시키는데 효과적이었다고 밝혔다. Gutierrez et al. (2011a)은 동절기 녹비시용 후 벼 재배 기간 중 CH_4 발생 측정 연구를 진행하였으며, NPK 처리구와는 달리 NPK + 호밀, NPK + 헤어리베치 처리구에서 벼 이식 초기 단계 직후부터 높은 CH_4 배출을 보였으며, CH_4 배출량은 NPK 처리구에 비해 NPK + 호밀처리구에서 87 - 121%, NPK + 헤어리베치에서 28 - 61% 높은 것으로 조사되었다.

이와 같이 동절기 유기물 투입을 위해 논토양에 재배한 녹비작물은 벼 재배 기간 중 CH_4 의 발생량을 증가시켰지만, 규산 혹은 녹비의 최적량 투입은 CH_4 의 발생량을 저감시키거나 적어도 증가시키지는 않는 것으로 밝혀졌다.

Soil texture and rice varieties

Ko et al. (2007b)은 논토양의 토성에 따른 벼 재배기간 중 CH_4 발생량을 조사하였다. 논토양 투수속도가 느리고 유기물 함량이 높았던 습답에서 가장 높은 습답에서 가장 높은 배출량을 나타냈으며, 미숙답, 보통답, 사질답의 순서의 배출량이 조사되었다. Lee et al. (1997a)은 벼 품종별 CH_4 배출을 조사하였다. 중만생종에 비해 조생종이 CH_4 배출이 44.4% 적었으며, 자포니카형 보다는 통일형이 CH_4 배출이 적은 경향을 보였다.

Recent research trend

최근 온실가스 배출량 추정모델인 탈질-분해 모델 (DeNitrification-DeComposition, DNDC)모델을 활용해 기존의 연구결과를 바탕으로 논에서의 배출량 평가와 배출량을 예측하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 모델을 이용하여 녹비작물 및 물 관리 국내 지역별 온실가스 배출량을 비교 연구와 RCP (Representative Concentration Pathways) 시나리오에 따른 논 CH_4 배출량 예측 등의 연구가 이루어지고 있다.

Conclusion

본 연구는 1995년부터 2017년까지의 국내에서 발표된 논에서 벼재배 시 CH_4 배출과 관련된 연구 결과를 조사하여 연구동향에 대해 분석하였다. 연구시기별 연구동향을 전체 관점에서 살펴보면 1995년에서부터 2009년까지의 연구활동은 미약하였지만, 2010년 이후부터 연구가 급증하여 연구가 활발히 이루어졌다. 이러한 추세는 정부가 2009년 온실가스 배출량의 감축 목표를 처음 발표하면서 연구가 활발해 진 것으로 판단된다. 연구 주제별로 분석한 결과, 주로 CH_4 배출 특성 및 평가 분야에 치중되어 연구가 이루어져 왔으며, CH_4 배출계수 개발분야와 CH_4

배출 저감기술에 대한 연구가 부진하였음을 알 수 있다. 이는 배출량 평가를 통한 국가 온실가스 인벤토리 구축 및 온실가스 감축의 목표 설정 기본자료가 되어 많은 연구가 이루어 졌으며, CH₄ 배출량 저감 기술개발, CH₄ 배출계수 개발 연구, CH₄ 배출 모델링 연구는 CH₄ 배출 평가 및 특성 연구 이후의 차기 연구로 이루어지기 때문에 아직 많은 연구가 이루어지지 않은 것으로 판단된다. 시기별 연구 주제를 분석한 결과, 2009년 이전 연구는 CH₄ 배출 특성 및 평가와, CH₄ 배출특성 및 요인 분야가 주를 이루었으며, CH₄ 저감 기술개발 연구가 소수 이루어졌다. 2009년 이후의 연구 또한 CH₄ 배출 특성 및 평가에 대해 주로 연구되었으며, CH₄ 배출특성 및 평가에 대한 연구도 점점 증가하는 경향을 나타내었다. 최근까지 CH₄ 배출 특성 및 평가에 대한 연구가 다수 이루어 지고 있으며, 이를 통한 배출계수 개발, 저감기술 개발, 모델링 연구가 이루어 지고 있다. 논에서의 CH₄ 배출에 대한 정확한 국가별 온실가스 배출량을 산정하기 위한 CH₄ 배출계수에 대한 추가 연구가 필요하다고 생각되며, CH₄ 배출 감소 연구와 CH₄ 배출에 관여하는 주요 영향 요인에 대한 이해의 복합적인 연구를 진행해야 할 것이라고 판단된다.

Acknowledgements

본 연구는 농촌진흥청(Rural development administration)의 공동연구사업(세부과제번호: PJ0118552017)과 충남대학교 자체연구비의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Ali MA, Kim PJ. 2006. Effects of soil amendments on reducing methane emission in rice paddy soil condition. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Suncheon, Korea, May 18, 2006*. p. 237.
- Ali MA, Kim PJ. 2015. Effect of electron acceptor containing silicate fertilizer on reducing methane emission in paddy soil during rice cultivation. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Jeonju, Korea, May 14-15, 2015*. p. 80.
- Ali MA, Lee CH, Kim PJ. 2006. Reducing methane emission from rice paddy soil by silicate fertilizer. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Suncheon, Korea, May 18, 2006*. p. 102.
- Ali MA, Oh JH, Kim SY, Kim PJ. 2008. Evaluation of silicate ion slag amendment on reducing methane emission from flood water rice farming. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Seoul, Korea, September 25, 2008*. pp. 179-180.
- Ali MA. 2008. Effect of soil amendments having electron acceptors for mitigating methane emission during rice cultivation. Ph.D. dissertation. Gyengsang National Univ., Korea.
- Cho HS, Seo MC, Park TS, Kang HW. 2015. Effects of tillage depths on methane emission and rice yield in paddy soil during rice cultivation. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 60:167-173. [in Korean]
- Cho HS, Seong KY, Park TS, Seo MC, Jeon WT, Yang WH, Kang HW, Lee HJ. 2012. Changes in carbon amount of soil and rice plant as influenced by the cultivation of different green manure crops. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 45:1058-1064. [in Korean]
- Choi EJ, Jeong HC, Kim GY, Lee SI, Lee JS. 2016a. Estimation of national greenhouse gas emissions in agricultural sector from 1990 to 2013: Focusing on the crop cultivation. *Journal of Climate Change Research* 7:443-450. [in Korean]
- Choi SW, Kim HY, Kim J. 2016b. Estimation and mapping of methane emissions from the metropolitan paddy field. In *Korean Meteorological Society Workshop. Busan, Korea, October 31-November 2, 2016*. p.418-419. [in Korean]

- Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea (GIR). 2016. National greenhouse gas inventory report of Korea. [in Korean]
- Gutierrez J, Kim SY, Kim TJ, Kim PJ. 2011a. Effect of non-rice cultivation on methane emission in rice paddy soil. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Cheongju, Korea, October 27-28, 2011*. p. 81.
- Gutierrez J, Kim SY, Lee YB, Kim PJ. 2011b. Effects of winter cover crop amendment on methane and nitrous oxide emissions in paddy soil during rice cultivation. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Muju, Korea, May 19-20, 2011*. pp. 160-161.
- Gwon HS. 2014. Changes of methane flux and methanotroph and methanogen abundances in a temperate mono rice paddy soil. M.S. thesis, Gyeongsang National Univ., Jinju, Korea.
- Gwon SH, Hwang HY, Kim PJ. 2014. Regulating factors of rice plant growth components on methanogenesis activity during cropping seasons. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Jangsu, Korea, October 23-24, 2014*. p. 260.
- Haque MM, Kim SY, Kim PJ. 2013. Direct contributions from soil and rice plant on CH₄ emission during rice cultivation in green manure-amended paddy soil. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Seoul, Korea, May 23-24, 2013*. p. 318.
- Hwang KS, Jung S, Kim SC, Chung DY, Park KW. 2017. Occurrence and distribution characteristics of weed species in organic paddy fields. *Korean Journal of Agricultural Science* 44:325-331. [in Korean]
- Jeong HC, Choi EJ, Lee JS, Suh SU, Kim GY, Lee SI. 2017. Comparison of methane emission using model from major paddy fields in 9 local government levels. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Mokpo, Korea, May 18-19, 2017*. p. 188. [in Korean]
- Jeong HC, Kim GY, So KH, Shim KM, Lee SB, Lee DB. 2010. Assessment on greenhouse gas (CH₄) emissions in Korea cropland sector from 1990 to 2008. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 43:911-916. [in Korean]
- Jeong HC, Lee JS, Choi EJ, Kim GY, Seo SU, Jeong HK, Kim CG. 2016. Post-2020 emission projection and potential reduction analysis in agricultural sector. *Journal of Climate Change Research* 2016 3:233-241. [in Korean]
- Jeong HC, Lee JS, Choi EJ, Kim GY, Seo SW, So KH. 2014. Evaluation of greenhouse gas emissions using DNDC model from paddy fields of 16 local government levels. *Journal of Climate Change Research* 5:359-366. [in Korean]
- Jeong HC, Motavalli P, Kim GY, Lee JS, Chio EJ, So KH. 2013. Estimation of CH₄ emission in paddy rice by DNDC model. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Hwaseong, Korea, October 31-November 1, 2013*. p. 38.
- Ju OJ, Lee JH, Choi BR, Won TJ, Cho KR, Seo JS, Kim YS, Park IT. 2013a. Effects of PAA (polyaspartic acid) contained complex fertilizer on rice growth and CH₄ emission from rice cultivation. *Journal of Environmental Impact Assessment* 22:705-711. [in Korean]
- Ju OJ, Won TJ, Cho KR, Choi BR, Seo JS, Park IT, Kim GY. 2013b. New estimates of CH₄ emission scaling factors by amount of rice straw applied from Korea paddy fields. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 32:179-184. [in Korean]
- Kim DG, Cho KR, Bak IT, Yoo GY. 2014a. Changes in crop yield and CH₄ emission from rice paddy soils applied with biochar and slow-release fertilizer. *Korean Journal of Environmental Biology* 32:327-334. [in Korean]
- Kim GW, Gwon HS, Jeong ST, Kim PJ. 2017a. Optimum nitrogen fertilization can reduce global warming impact from rice paddy field. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Mokpo, Korea, May 18-19, 2017*. p. 204.
- Kim GW, Gwon HS, Jung ST, Kim PJ. 2016a. Different reactions of urea fertilization on methane emission in rice plant with and without soils during rice cultivation period. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and*

- Fertilizer Workshop, Seoul, Koera, March 10-11, 2016.* p. 51.
- Kim GW, Hauque MM, Kim PJ. 2013. Evaluation of intermittent irrigation potentials for decreasing greenhouse gases emission by DNDC model in green manure amended paddy soil. In *Proceedings of the Korean Society of Environmental Agriculture Workshop, Jeongsun, Korea, July 4-5, 2013.* p. 290.
- Kim GY, Gutierrez J, Jeong HC, Lee JS, MD. MH. Kim PJ. 2014b. Effect of intermittent drainage on methane and nitrous oxide emissions under different fertilization in a temperate paddy soil during rice cultivation. *Journal of Applied Biological Chemistry* 57:229-236.
- Kim GY, Jeong HC, Ju OJ, Kim HG, Park JH, Gwon HS, Kim PJ. 2014c. Establishment of baseline emission factor of methane in Korean rice paddy soil. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 32:359-365. [in Korean]
- Kim GY, Kim PJ, Lee SB, Lee JS. 2012c. Effective mitigation of greenhouse gas emission impact by intermittent drainage in rice paddy soil. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Naju, Korea, October 25-26, 2012.* p.288.
- Kim GY, Lee SB, Lee JS, Choi EJ, Ryu JH, Park WJ, Choi JD. 2012a. Mitigation of greenhouse gases by water management of SRI (System of Rice Intensification) in rice paddy fields. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 45:1173-1178. [in Korean]
- Kim GY, Park SI, Song BH, Shin YK. 2002. Emission characteristics of methane and nitrous oxide by management of water and nutrient in rice paddy soil. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 21:136-143. [in Korean]
- Kim GY, Park WK, Lee SI, Lee JS, Choi EJ, Na US, Jang HY, Suh SU. 2016b. Mitigation of greenhouse gas emissions (GHGs) by water management methods in rice paddy field. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 48:477-484. [in Korean]
- Kim HG, Kim BH, Kim SK, Kim HW, Park JD, Choi KJ, Jeong HC. 2012b. The evaluation of methane emitted at paddy soil applied to organic matter while rice cultivated organically. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Naju, Korea, October 25-26, 2012.* p. 285-286.
- Kim HS, Cho JS, Park KR. 2009a. Methane production and T-RFLP patterns of methanogenic bacteria dependent on agri-cultural methods. *Korean Journal of Microbiology* 45:17-25. [in Korean]
- Kim MS. 2009. A comparison of methane production and community structure for methanogen in rice paddy soil and dry farm soils. M.S. Thesis, Hannam Univ., Daejeon, Korea. [in Korean]
- Kim SH, Lee JH, Lee DG, Park SY, Oh TK. 2017b. Comparison of methane emissions by soil texture in rice paddy. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Mokpo, Korea, May 18-19, 2017.* p.196.
- Kim SJ, Jo HS, Choi JS, Park KD, Jang JS, Kang SG, Park JH, Kim MT, Kang IJ, Yang WH. 2016c. Changes in methane emissions from paddy under different tillage and cultivation method. *Korean Journal of Crop Science* 61:251-256.
- Kim SY, Gutierrez J, Kim PJ. 2011a. Effect of cultivars on methane emission rice productivity in a paddy soil. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Muju, Korea, May 19-20, 2011.* pp. 154-155.
- Kim SY, Gutierrez J, Lim CH, Kim PJ. 2010a. Effect of transplanting season on CH₄ emission in rice paddy soil. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Hongcheon, Korea, April 29-30, 2010.* p. 327.
- Kim SY, Lee CH, Lee JG, Kim PJ, Oh SH, Song JK. 2017c. Effect of long-term fertilization on soil bacterial communities and methane dynamics in rice rhizosphere and bulk soils. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Mokpo, Korea, May 18-19, 2017.* p. 167.
- Kim SY, Lee SB, Lim CH, Kim PJ. 2009b. Comparison of methane oxidation potential of forest and paddy soils at

- different depth. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Seoul, Korea, May 14, 2009*. pp. 121-122.
- Kim SY, Lim CH, Gutierrez J, Kim PJ. 2010b. Effect of green manure and silicate application on CH₄ production in paddy soil. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Daegu, Korea, October 28-29, 2010*. pp. 285-286.
- Kim SY, Park YK, Lee YB, Kim PJ. 2011b. Comparison of livestock manures on methane emission in paddy soil during rice cultivation. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Cheongju, Korea, October 27-28, 2011*. pp. 84-85.
- Kim SY. 2013. Impact of methanogens originated from cattle manure on methane emission in paddy soil ecosystem during rice cultivation. Ph. D. dissertation, Gyeongsang National Univ., Jinju, Korea. [in Korean]
- Kim TJ, Gutierrez J, Pramanik P, Kim PJ. 2011c. Effect of ammonium sulfate as an electron acceptor on reducing methane emission in paddy soil during rice cultivation. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Cheongju, Korea, October 27-28, 2011*. p. 254.
- Kim TJ, Hwang HY, Hong CH, Lee JJ, Kim GY, Kim PJ. 2014d. Effective Suppression of methane production by chelating nickel of methanogenesis cofactor in flooded soil conditions. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 33:282-289. [in Korean]
- Kim YW, Taluckder M, Kang MS, Kang SG, Shim KM, Kim J. 2015. Changes in methane emissions in rice due to rainfall in interim drafting period. In *Korean Meteorological Society Workshop, Jeju, Korea, October 12-13*. pp.423-425.
- Ko JY, Kang HW, Kand UG, Park HM, Lim DK, Park KB. 1998. The effects of nitrogen fertilizers and cultural patterns on methane emission from rice paddy fields. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 17:227-233. [in Korean]
- Ko JY, Kang HW, Park KB. 1996. Effects of water management rice straw and compost on methane emission in dry seeded rice. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 29:212-217. [in Korean]
- Ko JY, Lee JS, Jung KY, Cho DY, Kim CS, Yun ES, Park ST. 2007a. The effect of field type on greenhouse gases emission from rice paddy. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Daejeon, Korea, October 18-19, 2007*. p. 224. [in Korean]
- Ko JY, Lee JS, Jung KY, Choi DY, Lee DY, Yun ES, Kim CS, Park ST. 2007b. Effects of soil percolation rate by different drainage treatments on CH₄ and N₂O emissions from paddy field. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 40:214-220. [in Korean]
- Ko JY, Lee JS, Jung KY, Choi YD, Ramos EP, Yun ES, Kang HW, Park ST. 2008. Effects of barley straw management practices on greenhouse gases (GHGs) emission during rice cultivation in rice-barley double cropping system. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 41:65-73.
- Ko JY, Lee JS, Kim CS, Kang HW, Shin YG, Kim KY, Lee KB. 2002a. The effects of seeding method on greenhouse gases emission from dry seeded paddy rice field. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Gwangju, Korea, October 31- November 11, 2002*. p. 122. [in Korean]
- Ko JY, Lee JS, Kim MT, Kang HW, Kang UG, Lee DC, Shin YG, Kim KY, Lee KB. 2002b. Effects of cultural practices on methane emission in tillage and no-tillage practice from rice paddy fields. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 35:216-222.
- Ko JY, Lee JS, Woo KS, Song SB, Kang JR, Seo MC, Kwak DY, Oh BG, Nam MH. 2011. Effects of soil organic matter contents, paddy types and agricultural climatic zone on CH₄ emissions from rice paddy field. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 44:887-894. [in Korean]
- Kyoto protocol to the united nations framework convention on climate change. 1998. United nation framework

convention on climate change.

- Lee CH, Park KD, Jung KY, Gutierrez J, Kim PJ. 2010. Effect of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) as a green manure on rice productivity and methane emission in paddy soil. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Hongcheon, Korea, May 6-7, 2010*. pp. 285-286.
- Lee DB, Jung SC, Seo KH, Jeong JW, Jung HC, Kim GY, Sim GM. 2012. Evaluation of mitigation technologies and footprint of carbon in unhulled rice production. *Climate Change Research* 3:129-142. [in Korean]
- Lee DK, Kim HN, Oh TK. 2016a. Analysis of research papers of greenhouse gas emission in Korean paddy soil. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Seoul, Korea, March 10-11, 2016*. p. 177. [in Korean]
- Lee HJ. 2015. Ecological characterization of methanogens and methanotrophs in major methane sources, rumens and rice paddies. Ph.D. dissertation, Jungang Univ., Seoul, Korea.
- Lee JB, Kim GJ, Lee DB, Choi SY, Park HK, NA SY. 2003a. Estimation of methene gas emission from paddy field in alpine land and alluvial plain under rice Straw application. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Suwon, Korea, May 16-17, 2003*. p. 206.
- Lee JH, Cho KH. 2004. Relationships between methane production and sulfate reduction in reclaimed rice field soils. *Korean Journal of Biological Sciences* 8:281-288.
- Lee JI, Nam YK, Kyung KC, Chang KW, Shin YK, Kim GY. 2003b. Effect of swine slurry amendment on emission of methane and N₂O in paddy soils. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Suwon, Korea, May 16-17, 2003*. pp. 214-215.
- Lee JS, Kim GY, Jeong HC, Lee SB, Choi EJ, Soh GH. 2013. Assessment of greenhouse gases emissions of agricultural sector in 2010. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Seoul, Korea, May 23-24, 2013*. p. 318. [in Korean]
- Lee JS, Ryu SH, Jeong HC, Choi EJ, Kim GY. 2014. Estimate the greenhouse-gas emission on rice production in farming without agricultural chemicals. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Jangsu, Korea, October 23-24, 2014*. p. 254. [in Korean]
- Lee KB, Lee DB, Kim JG, Lee SB, Kim JD, Han SS. 2000. Effects of application of nitrogen fertilizers on methane emission in a paddy soil. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 33:212-219. [in Korean]
- Lee KB, Lee DB, Kim YW. 1997b. Seasonal variation of soil entrap ped methane and dissolved methane flux in a paddy soil. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 30:41-45. [in Korean]
- Lee KB, Lee DB, Uhm TY, Kim GJ, Yoo CH, Kim YW. 1997a. Influence of different rice varieties on emission of methane in soil and caudation of carbohydrates in rhizosphere. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 30:257-264.
- Lee KB. 1997. Effect of rice cultivation on methane emission from submerged paddy soil. Ph. D. dissertation, Chonnam National Univ., Gwangju, Korea. [in Korean]
- Lee SB, Lim JE, Lee YJ, Sung JK, Lee DB, Hong SY. 2016b. Analysis of components and applications of major crop models for nutrient management in agricultural land. *Korean Journal of Agricultural Science* 43:537-546. [in Korean]
- Lim CH, Kim SY, Jeong ST, Kim GY, Kim PJ. 2013. Effect of salt concentration on methane emission in a coastal reclaimed paddy soil condition: Pot test. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 32:252-259. [in Korean]
- Lim CH. 2011. Effect of gypsum application on recucing methane emission in a reclaimed coastal paddy soil. M.S. thesis, Gyeongsang National Univ., Jinju, Korea.
- Min HG, Hwang WJ, Kim MS, Lee BJ, Wanjiku KM, Kim JG. 2016. Modelling of methane emission in rice paddy of South Korea by DNDC model and RCP scenario. In *Proceedings Meeting of the Korean Society of Soil Science and*

- Fertilizer Workshop, Busan, Korea, May 23-24, 2016.* p. 180. [in Korean]
- Min HG, Hwang WJ, Kim MS, Wanjiku KM, Kim JG. 2017. Effect of RCP 8.5 scenario and management difference to greenhouse gases emission in rice paddy of South Korea. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Mokpo, Korea, May 18-19, 2017.* p.197.
- Paris agreement. 2015. United nation framework convention on climate change.
- Park JH, Park SJ, Seo YJ, Kwon OH, Choi SY, Park SD. 2014. Effect of byproduct gypsum fertilizer on methane gas emission in paddy field. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Jangsu, Korea, October 23-24, 2014.* p. 255.
- Park JH, Seo YJ, Choi SY, Park SD, Jeong HC, Lee DB. 2012. Effects of alkaline materials on methane gas emission in paddy field. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Naju, Korea, October 25-26, 2012.* p. 276.
- Park JH, Son YK, Kong MS, Zhang YS, Park SJ, Won JG, Lee SH, Seo DH, Park SD, Kim JE. 2016. Effect of by-product gypsum fertilizer on methane gas emissions and rice productivity in paddy field. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 49:30-35.
- Park MH, Kim PJ. 2015. Effective suppression of CH₄ production using pre-season management of green manures under paddy condition. In *Korean Meteorological Society Workshop, Jeju, Korea, October 12-13.* pp.37.
- Park YG, Hwang HY, Kim PJ. 2011. Characterization of methane dynamics in paddy soil condition during rice cultivation. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Cheongju, Korea, October 27-28, 2011.* p. 251-252.
- Pramanik P, Kim TJ, Gutierrez J, Kim SY, Kim PJ. 2011. Application of composted livestock manure to mitigate methane emission from rice field. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Cheongju, Korea, October 27-28, 2011.* pp. 82-83.
- Ryu JH, Jung SC, Kim GY, Lee JS, Kim KH. 2012a. LCA (life cycle assessment) for evaluating carbon emission from conventional rice cultivation system: Comparison of top-down and bottom-up methodology. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 45:1143-1152. [in Korean]
- Ryu JH, Kwon YR, Kim GY, Lee JS, Kim KH, So KH. 2012b. Life cycle assessment (LCA) on rice production systems: Comparison of greenhouse gases (GHGs) emission on conventional, without agricultural chemical and organic farming. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 45:1157-1163. [in Korean]
- Ryu JH, Lee JS, Kim KH, Kim GY, Choi EJ. 2013. A case study to estimate the greenhouse-gas mitigation potential on conventional rice production system. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 46:502-509. [in Korean]
- Seo JY, Park WJ, Park BK, Lee SI, Kim YS, Choi JD. 2016. Analysis on reducing effect of greenhouse gases and irrigation water from paddy by system of rice intensification (SRI). In *Proceedings of the Journal of Korean Society of Water Pollution Research and Control Workshop, Busan, Korea, May 23-24, 2016.* p. 75-76. [in Korean]
- Seo YJ, Kwon TY, Park JH, Choi SY, Park SD, Jeong HC, Roh KA. 2010. The effect of water regimes before the cultivation period and organic amendment on methane emission from flooded rice paddy system. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Daegu, Korea, October 28-29, 2010.* p. 99.
- Seo YJ, Park JH, Choi SY, Park SD, Jeong HC, Lee DB. 2011a. Effects of soil type on methane gas emission in paddy. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer Workshop, Cheongju, Korea, October 27-28, 2011.* p. 250.
- Seo YJ, Park JH, Kim CY, Kim JS, Cho DH, Choi SY, Park SD, Jung HC, Lee DB, Kim KS, Park M. 2011b. Effects of soil types on methane gas emission in paddy during rice cultivation. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 44:1220-1225. [in Korean]
- Shin YK, Kim GY, Ahn JW, Koh MH, Eom KC. 2003a. Effect of rice vegetation and water management on turnover of

- incorporated organic materials to methane in a Korean paddy soil. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 36:50-56.
- Shin YK, Lee BL, Suh JS. 1995a. Influence of soil and air temperature on the diel change of methane emission in a Korean paddy soil incorporated with rice straw. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 28:266-269.
- Shin YK, Lee YS, Ahn JW, Koh MH, Eom KC. 2003b. Seasonal change of rice-mediated methane emission from a rice paddy under different water management and organic amendments. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 36:41-49.
- Shin YK, Lee YS, Koh MH, Eom KC. 2003c. Diel change of methane emission through rice plant under different water management and organic amendment. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 36:32-40.
- Shin YK, Lee YS, Yun SH, Park ME. 1995b. A simplified closed static chamber method for measuring methane flux in paddy soil. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 28:183-190.
- Shin YK, Yun SH, Park ME. 1995c. Estimation of methane emission by water management and rice straw application in paddy soil in Korea. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 28:261-265.
- Whang HY. 2013. Selection of optimum mix-seeding ratio of hairy vetch and barley as a green manure on considering nutrient production and greenhouse gas emission in rice paddy soil. M.S. thesis, Gyeongsang National Univ., Jinju, Korea.
- Won TJ, Cho KR, Lim GJ, Kim SJ. 2010. Effects of plowing time and water management in rice cultivation on methane emission. In *Proceedings of the Korean Society of Soil Science and Fertilizer*. Daegu, Korea, October 28-29. p. 206. [in Korean]