Analysis of Research Trends in Nitrous Oxide Emissions from Upland in Korea

Sun-Il Lee*, Chang-Kyu Lee¹, Gun-Yeob Kim, Hyo-Suk Gwon, Jong-Sik Lee, Eun-Jung Choi, and Joung-Du Shin

National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea

¹Division of Agricultural Environment, Jellabuk-Do Agricultural Research and Extension Services, Iksan 54591, Korea

*Corresponding author: silee83@korea.kr

ABSTRACT

Received: October 23, 2019

Revised: November 25, 2019

Accepted: November 27, 2019

ORCID

Sun-Il Lee

<https://orcid.org/0000-0002-0519-3150>

Global climate change, especially global warming is considered as threat to our future and posterity. Increasing concentrations of greenhouse gas such as carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) are the main causes of global warming. The Korean government has set a goal to cut the carbon emissions by 37% based on business-as-usual levels by 2030. According to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), agricultural sector is an important source of greenhouse gas emissions. In this regard, it is common belief that reducing of such emission is of great significance to global climate change. In Korea, upland is one of the main sources of agricultural N₂O emission. In order to analyze domestic research trends related to N₂O emissions in the upland, 53 academic publications from 2009 to September 2019 were critically reviewed. The results were classified according to the research purposes. Reduction technologies of N₂O emission account for approximately 28.3%. N₂O characteristics and assessment for 24.5%, development of N₂O emission factors for 22.6%, and N₂O inventory assessment for 20.8% etc. Biochar, green manure, no tillage, and inhibitor were studied as a means of reducing N₂O release. The optimum technologies to reduce N₂O emission in Korea were discussed and proposed through the previous researches.

Keywords: Greenhouse gas, Nitrous oxide, Research trend, Upland soil

Main mitigation measures for nitrous oxide emission.

Mitigation measures	Mitigation effects	Data source
Adding biochar	24.6%	Seo et al., 2012
	-23.8% to 41.4%	Park et al., 2014b
	16.4% to 20.6%	Kim et al., 2014c
	-24.6% to 48.3%	Park et al., 2015
	12.3% to 39.3%	Park et al., 2016b
	-74.0% to -9.0%	Lee et al., 2017b
	31.9% to 48.1%	Lee et al., 2017a
	81.8% to 86.9%	Lee et al., 2018b
Adding green manure	19.2% to 71.3%	Kim et al., 2011b
	38.6%	Seo et al., 2012
	4.7% to 17.6%	Yoo et al., 2015
	-17.0% to -3.8%	Yoo et al., 2016
	44.9% to 56.2%	Kim et al., 2018a
No tillage	7.3% to 62.4%	Kim et al., 2011b
	15.2% to 28.6%	Yoo et al., 2015
	5.7% to 35.7%	Yoo et al., 2016
Adding inhibitor	18.4% to 78.5%	Ju et al., 2018
Adding slow release fertilizer	56.2% to 64.3%	Kim et al., 2018a
Water management	13.2% to 40.2%	Kim et al., 2014a

Introduction

대기 중 온실가스 농도는 산업혁명 이후 급격히 증가하였고, 증가된 온실가스에 의해 지구의 평균 대기온도는 지속적으로 상승하였다. 대기온도 상승은 지구환경 변화를 가속화 시켰고 이에 따라 기상이변의 피해 발생 빈도가 증가하였다 (IPCC, 2014). 특히 농업은 환경과 생태계에 의존하기 때문에 기후변화에 크게 영향을 받는다. 기후변화로 식량 생산에 약간의 차질이라도 생기면 인류의 생존까지 위협을 받을 수 있다. 따라서 세계 각국은 지구온난화에 따른 기상 이변의 피해를 최소화하기 위한 온실가스에 대한 배출량 평가 및 저감기술 개발과 감축정책을 추진하고 있다. 유엔 기후변화협약 제 3차 당사국 총회에서 교토의정서 (Kyoto Protocol, 1998)를 체결하여 기후변화의 주범인 주요 온실가스를 정의하고 선진국 중심으로 온실가스 감축 의무를 부여하였다. 그 후 제 21차 유엔 기후변화협약 당사국 총회에서 파리협정 (Paris Agreement, 2015)을 이끌어 모든 당사국에게 온실가스 감축의무를 부여한 신기후체제가 출범하였다. 이에 따라 우리나라는 2030년의 온실가스 배출량 전망치 (BAU, Business as usual) 대비 37%를 감축하는 것을 발표하였다. 농업 재배와 축산분야를 포함한 비에너지 부문은 BAU 대비 7.9%에 해당하는 약 1.6 백만톤 CO₂eq. (Carbon dioxide equivalent) 의 감축 목표가 설정 되었다.

국가 온실가스 정보센터에서 2018년에 발간한 국가 온실가스 인벤토리 보고서 (GIR, 2018)에 의하면 2016년 국내 농업 재배분야 온실가스 배출량은 11.8 백만 톤 CO₂eq.으로, 2015년 대비 0.84% 감소하였고, 1990년 대비 23.4% 감소하였다. 농업 재배분야 온실가스 배출량 중 큰 비중을 차지하는 것은 벼 재배 시 논에서 발생하는 메탄 (CH₄, methane)과 농경지토양에서 비료사용 등에 의해 발생하는 아산화질소 (N₂O, nitrous oxide)이다. 2016년 기준 CH₄과 N₂O은 각각 6.1, 5.7 백만 톤 CO₂eq.이 배출되었다 (Table 1). 벼 재배 시 배출되는 CH₄는 1990년 이후 벼를 재배하는 논 면적 감소로 지속적으로 낮아지는 추세이지만, N₂O 배출량은 1995년 이후 증감을 반복하며 전체적으로 증가하는 경향을 보이고 있다 (Fig. 1). 따라서 농경지에서 발생하는 N₂O에 대한 배출평가 연구가 요구 되었다. 2008년 저탄소 녹색성장 국가비전 선포 이후 국내 농경지에서 N₂O 배출관련 연구가 지속적으로 증가하여 왔다. 하지만 연구결과에 대한 체계적인 분석과 논의는 미미한 실정이다.

따라서 본 연구는 2009년부터 2019년 9월까지 우리나라 농경지에서 N₂O 배출특성 평가 및 감축기술 개발과 관련된 연구 결과를 중심으로 연구의 시기와 목적에 따른 지금까지의 연구동향을 분석하였다. 그리고 N₂O 감축기술의 영향평가를 통해 국내에서 수행된 감축기술별 특성에 대해 논의하고 향후 국가별 온실가스 감축방안 구축을 위한 연구의 기초자료 제공 및 후속 연구의 방향성을 제시하고자 한다.

Table 1. Greenhouse gas emission in agricultural cultivation sector in Korea from 1990 to 2016.

Sector	(Unit : Million tons CO ₂ eq.)								
	1990	1995	2000	2005	2010	2013	2014	2015	2016
Rice cultivation	10.5	9.1	8.7	8.0	7.3	6.4	6.3	6.2	6.1
Cropland	4.9	5.8	5.6	5.4	5.7	5.8	5.7	5.6	5.7
Crop residue incineration	0.033	0.025	0.029	0.027	0.024	0.021	0.021	0.021	0.02
Total	15.4	14.9	14.2	13.4	13	12.4	12	11.9	11.8

Source: GIR, 2018

Fig. 1. Nitrous oxide emission on cropland in the Korea from 1990 to 2016 (Sources: GIR, 2018).

Fig. 2. Number of papers on nitrous oxide emissions from cropland in the Korea from 2009 to 2019.

국내 농경지 N₂O 연구 현황 국내 농경지 N₂O 배출관련 연구 동향을 분석하기 위하여 주요 국내외 학술지에 게재된 논문과 국내 대학에서 작성한 학위논문을 중심으로 2009년부터 2019년도 9월까지 총 53편의 연구 논문을 수집하여 분석하였다. 연구의 시기별 동향은 2008년 저탄소 녹색성장 국가비전 선포 이후인 2009년부터 관련 연구에 대한 논문이 게재되기 시작하였다. 이후 농경지 N₂O 관련 논문은 2012년 까지 증가하는 경향을 보였고 2014년에서 2018년까지 매년 5편 이상 국내외 학술지에 게재되었다 (Fig. 2).

국내 농경지 N₂O 연구 목적별 분류 연구 목적에 따라 농경지에서 토성, 작물재배시기, 재배작물종류, 비료 종류 및 투입량, 멀칭방법, 경운방법 등을 통해 N₂O 배출량을 조사한 연구를 ‘N₂O 배출 특성’으로 분류 하였으며, N₂O 배출 감소와 관련된 요소들을 이용하여 N₂O 배출량 감소기술 개발을 목적으로 하는 연구를 ‘N₂O 배출저감기술 개발’로 분류하였다. N₂O 배출량 조사 후 국가 고유계수로 등록하기 위한 배출계수를 산정한 연구를 ‘N₂O 배출계수 개발’로 분류하였으며, 이전의 연구결과를 토대로 배출계수를 산정하고 이에 활동자료를 적용하여 국내 농경지 N₂O 배출량 평가한 연구를 ‘N₂O 인벤토리 평가 연구’로 분류하여 분석하였다 (Table 2).

Table 2. Classification according to nitrous oxide emission research trend.

Research purpose	Number of article	Source
N ₂ O emission reduction technology	15 (28.3%)	Kim et al., 2011b; Seo et al., 2012; Kim et al., 2014a; Kim, 2014c; Park et al., 2014b; Park et al., 2015; Yoo et al., 2015; Kang et al., 2016; Park et al., 2016b; Yoo et al., 2016; Lee et al., 2017a; Lee, 2017b; Ju et al., 2018; Lee et al., 2018b; Kim et al., 2018a
N ₂ O emission characteristics	13 (24.5%)	Kim, 2009; Kim et al., 2010a; Kim et al., 2010b; Kim and Na, 2011a; Na, 2012; Yang et al., 2012a; Yang et al., 2012b; Yang et al., 2012c; Park et al., 2014a; Jennifer et al., 2015; Cheol et al., 2016; Kim et al., 2017b; Lee et al., 2018a
Development of N ₂ O emission factor	12 (22.6%)	Kim et al., 2014b; Lee, 2014a; Lee et al., 2014b; Kim et al., 2015b; Kim et al., 2015a; Kim et al., 2016; Alam, 2017; Kim et al., 2017a; Hyun et al., 2017; Kim et al., 2018b; Alam, 2019; Kim et al., 2019
N ₂ O inventory assessment	11 (20.8%)	Kim et al., 2011c; Jeong et al., 2011a; Jeong et al., 2011b; Jeong et al., 2012; Jeong et al., 2013; Jeong et al., 2014; Jeong et al., 2014; Choi et al., 2016; Park, et al., 2016a; Jeong et al., 2017; Park, et al., 2018
Others	2 (3.8%)	Hwang et al., 2011; Shin et al., 2015
Total	53* (100%)	

N₂O 배출 저감기술 개발은 15편 (28.3%)으로 가장 많았고, 그다음으로 N₂O 배출 특성이 13편 (24.5%)으로 조사되었다. N₂O 배출계수 개발은 12편 (22.6%)이었고 N₂O 인벤토리 평가연구는 11편 (20.8%)으로 조사되었다. 온실가스 관련 연구에서 N₂O 배출 저감기술 개발이 가장 많이 이루어진 것은 2030년 우리나라의 온실가스 감축 목표를 배출량 전망치 대비 37%로 확정 감축하겠다는 우리나라 정부의 발표와 국제사회에서의 신 기후체제의 기반이 되는 파리협정 등에 의한 것이며, 앞으로도 국내외 온실가스 관련 연구가 요구됨으로써 지속적으로 증가할 것으로 판단된다.

국내 농경지 N₂O 연구 시험조건별 분류 농경지에서 배출되는 N₂O를 직접 측정된 연구논문의 경우 연구 방법, 연구기간, 공시토양의 특성, 재배작물에 따라 농경지 N₂O 배출연구 현황을 분석하였다. 연구방법은 우선 실내의 시험을 구별하였고 실내 시험은 바틀, 컬럼, 포트 시험별로 구별하였으며 각각 시험방법별 시험 수행기간을 평가하였다. 농경지에서 배출되는 N₂O는 농경지 토양의 특성의 영향을 많이 받기 때문에 각각 시험에 사용한 공시토양의 토성, pH, 유기물 함량을 각각 분류하였고, 시험토양에 재배한 작물에 따라 현재까지 수행된 연구현황에 대해 분석하였다.

농경지에서 N₂O 배출에 대한 연구 중 연구방법별 수행기간을 분류한 결과는 Table 3과 같다. 연구방법은 우선 실내의 시험을 구별하고 실내 시험은 바틀, 컬럼, 포트 시험으로 구별하여 각각 시험방법별 시험 수행기간을 분류하였다. 실내 시험의 대부분 연구기간은 1년 이하인 반면 실외 필드에서 수행된 연구는 56.1%가 1년 이상을 거쳐 시험을 수행하였다 (Table 3). 실내 연구는 농경지 토양에서 N₂O 배출 및 감축량과 원인 기작을 분석하기 위해 격리된 조건에서 시험이 수행되었고, 실외 연구는 작물을 재배하면서 작물의 영향을 포함한 N₂O 배출량을 요인에 따라 비교 평가하는 시험이 수행되었다.

Table 3. Number of experiment types and duration.

Experiment type	1 - 3 months	3 - 6 months	6 - 12 months	> 1 year
Bottle	1 [†]	1	-	-
Column	-	1	-	-
Pot	1	1	-	1
Field	3	9	6	23
Total	5	12	6	24

[†]Number of article, which were reviewed in this paper.

Table 4. Number of experimental soils texture, pH and OM in this article.

Soil texture				pH				OM			
Sandy loam	Loam	Silty clay loam	others	(1:5)				g kg ⁻¹			
				< 5.4	5.4 - 6.0	6.1 - 7.0	< 7.0	< 10	10 - 20	21 - 30	< 30
10 [†]	8	7	19	4	18	27	13	7	26	15	10

[†]Number of article, which were reviewed in this paper.

농경지에서 N₂O 배출에 대한 연구 중 공시토양의 특성을 분류한 결과는 Table 4와 같다. 농경지 토양의 토성, pH, 유기물 함량은 농경지에서 배출되는 N₂O에 큰 영향을 주는 요소로 평가되고 있다 (Lal et al., 2011). 공시토양의 토성은 사양토 10편, 양토 8편, 식질양토 7편순으로 연구되었고, pH 대부분 약산성인 5.4 - 7.0 범위에서 72.6% 연구가 수행되었다. 유기물 함량은 10 - 20 g kg⁻¹ 범위에서 44.8% (26편)가 수행되었고 21 - 30 g kg⁻¹ 범위에서 25.9% (15편)가 수행되었다. 공시토양은 다양하면서도 광범위하게 시행되었다.

농경지에서 N₂O 배출에 대한 연구 중 재배작물별 분류한 결과는 Fig. 3과 같다. 재배작물은 고추 재배지에서 15편 (34.9%)으로 가장 많았고, 배추 재배지에서 9편 (20.9%), 콩 재배지에서 6편 (14.0%), 옥수수 재배지에서 4편 (9.3%), 토마토 재배지에서 2편 (4.7%), 고구마 재배지에서 2편 (4.7%) 순으로 나타났다. 그 외 호밀, 브로콜리, 당근, 마늘, 헤어리배치 재배지에서 각각 1편의 연구가 수행되었다. 주로 우리나라에서 재배하는 밭작물 위주로 연구가 수행되었고 토마토 등 일부 시설재배지 작물에 대한 연구도 진행되었다.

Fig. 3. Numbers of experimental crop types. Number of article, which were reviewed in this paper.

국내 농경지 N₂O 배출 감축 연구 N₂O의 지구온난화잠재력 (GWP, Global warming potential)이 298이며, 지구온난화 기여율은 5% 이상인 것으로 알려져 있다 (IPCC, 2007). 농업분야 농경지 토양에서 발생하는 N₂O를 저감하는 기술이 필요한 실정이다. 따라서 국내에서도 2009년 이후 N₂O 배출 저감기술 개발은 15편 이상 연구가 진행되었다. 그리고 농경지에서 N₂O가 배출되는 특성으로 Iserman (1994)은 농경지 토양에서 N₂O는 81%가 질소비료 투입에 의해 배출된다고 하였다. 질소비료로 암모늄태 질소원을 토양에 투입하면 가수분해되어 NH₄⁺ 형태로 변하고 자급 영양생물인 질화균에 의해 질산화과정을 거쳐 질소산화물 형태로 달라지며 탈질균 호흡내의 전자 수용체의 탈질 과정을 통해 N₂가 배출 된다. 그 중 질산화과정과 탈질과정 중 중간 생성물인 N₂O가 생성되는 특성을 갖는다 (Firestone and Davidson, 1989; Davidson et al., 1993). 이러한 특성을 고려하여 농경지에서 N₂O 배출을 감축하고자 바이오차 투입, 녹비작물 투입 등 다양한 연구가 수행되었다 (Table 5).

Table 5. Main mitigation measures for nitrous oxide emission.

Mitigation measures	Mitigation effects	Data source
Adding biochar	24.6%	Seo et al., 2012
	-23.8% to 41.4%	Park et al., 2014b
	16.4% to 20.6%	Kim et al., 2014c
	-24.6% to 48.3%	Park et al., 2015
	12.3% to 39.3%	Park et al., 2016b
	-74.0% to -9.0%	Lee et al., 2017b
	31.9% to 48.1%	Lee et al., 2017a
Adding green manure	81.8% to 86.9%	Lee et al., 2018b
	19.2% to 71.3%	Kim et al., 2011b
	38.6%	Seo et al., 2012
	4.7% to 17.6%	Yoo et al., 2015
	-17.0% to -3.8%	Yoo et al., 2016
No tillage	44.9% to 56.2%	Kim et al., 2018a
	7.3% to 62.4%	Kim et al., 2011b
	15.2% to 28.6%	Yoo et al., 2015
Adding inhibitor	5.7% to 35.7%	Yoo et al., 2016
	18.4% to 78.5%	Ju et al., 2018
Adding slow release fertilizer	56.2% to 64.3%	Kim et al., 2018a
Water management	13.2% to 40.2%	Kim et al., 2014a

농경지에서 N₂O 배출을 저감하기 위해 바이오차를 농경지에 투입하여 N₂O배출량을 비교평가한 연구는 2012년부터 현재까지 총 8편 연구논문이 게재되었다. Lee et al. (2018b)은 농가에서 버려지는 다양한 바이오매스 부산물을 바이오차로 변환한 후 토양에 적용하면 배출되는 N₂O를 80% 이상 감축할 수 있다고 하였고, Lee (2017b) 연구를 제외하면 대부분의 연구에서 배출되는 N₂O의 20% 이상 감축할 수 있다고 하였다. 반면 Lee (2017b)은 농경지 토양에 투입된 바이오차가 질산화반응을 촉진하여 N₂O를 9.0 - 74.0% 증가하였다는 연구결과를 도출했다. 이러한 N₂O 배출량의 차이는 토양의 수분함량의 영향에 의한 것이다. 토양 수분함량은 토양 내 질소순환 과정에 영향을 주며, 토양이

습윤 상태일 때에는 질소순환 과정 중 미생물에 의한 탈질현상이 촉진되어 토양으로부터 N_2O 배출이 증가하지만 (Reay et al., 2012), 건조 상태일 경우 질산화과정이 우세하여 중간생성물로 N_2O 가 배출되기 때문이다. 즉 바이오차는 토양 내 우세한 질소순환 과정에 따라 N_2O 배출량에 영향을 받음을 확인할 수 있다.

화학비료 대체 녹비를 농경지에 투입하여 N_2O 배출량을 비교 평가한 연구는 2011년부터 현재까지 총 5편 연구논문이 게재되었다. Kim et al. (2011b)의 연구결과에 의하면 N_2O 를 최대 71.3% 감축할 수 있지만, Yoo et al. (2016)의 연구결과에서는 N_2O 가 17.0% 증가함을 나타냈다. 농경지 토양에서 N_2O 는 81%가 질소비료 투입에 의해 배출되기 때문에 (Iserman, 1994) 녹비를 투입함으로써 화학비료 사용량을 줄일 수 있어 대체량만큼 N_2O 배출을 저감할 수 있지만, N_2O 배출은 토양의 유기탄소 함량이 높을 때 증가하는데 (Skiba et al., 1998) 이는 녹비 투입에 의해 증가된 유기탄소함량에 의해 일부 N_2O 배출이 증가한 것으로 사료된다.

무경운을 통해 농경지에서 배출되는 N_2O 량을 비교 평가한 연구는 2011년부터 현재까지 총 3편 연구논문이 게재되었다. 3편 연구논문을 분석한 결과 5.7 - 62.4% 까지 농경지에서 배출되는 N_2O 를 감축시킬 수 있었으며, 무경운을 통해 토양 교란을 방지하여 질소순환과정의 가속화를 줄일 수 있어 토양으로부터 배출되는 N_2O 를 저감할 수 있을 것으로 사료된다.

농경지에서 N_2O 배출을 저감하기 위해 요소분해억제제 (Ju et al., 2018), 완효성비료 사용 (Kim et al., 2018a), 물 관리 (Kim et al., 2014a) 통한 연구는 각각 1편씩 연구논문이 게재되었다. 고추와 배추 재배지에서 요소분해효소 억제제 NBPT (N-(n-butyl) thiophosphoric triamide) 함유 비료를 사용하여 작물 생육량은 유지하면서 N_2O 배출을 저감시킬 수 있었다. 고추 재배지에서 LCU (Latex coated urea) 효과 지연성 완효성비료 투입을 통해 작물 수확량과 비료 이용효율을 증진시켰으며 N_2O 배출을 저감시킬 수 있었다. 고추 재배지에서 토양 수분장력을 -50 kPa 으로 점적관수 하였을 때 식양토 및 사양토 모두 작물 수확량이 증가하였고 N_2O 배출은 저감되었다.

농경지 토양에서 고추재배 시 사양토와 식양토에서 토양수분과 토양온도에 따른 N_2O 배출에 대한 상대적 기여도를 평가한 결과 사양토에서는 토양수분이 66.0%, 토양온도가 21.7%로 평가되었고 식양토에서는 토양수분이 47.7%, 토양온도가 6.2%로 평가되었다 Kim et al. (2014a). 일반적으로 토양 수분함량은 토양 내 질소순환 과정에 영향을 주며, 토양이 습윤 상태일 때에는 질소순환 과정 중 미생물에 의한 탈질현상이 촉진되어 토양으로부터 N_2O 배출이 증가하지만 (Reay et al., 2012), 토양 수분함량이 40% 이상 초과할 경우 질소의 탈질과 N_2O 생산 및 확산을 억제된다 (Jian-gang et al., 2007). 토양온도의 증가는 탈질에 관여하는 미생물을 증가시켜 N_2O 배출량을 촉진하지만 30°C 이상의 고온에서는 N_2O 배출이 억제된다 (Renault and Sierra, 1994). 즉 대기온도와 강수량의 변화는 토양 온도와 토양 수분함량에 영향을 주며 이에 따른 농경지 토양에서 배출되는 온실가스도 간접적인 영향을 받기 때문에 추후 장기적인 기상, 기후의 환경영향에 따른 온실가스 배출특성을 파악하는 연구도 필요할 것이다.

Conclusions

본 연구는 2009년부터 2019년까지 국내에 게재된 논문 중 밭에서 N_2O 배출과 관련된 연구 결과를 조사하여 분석하였다. 정부가 2009년 온실가스 배출량의 감축 목표를 처음 발표하면서 연구가 활발해졌으며, 연구목적별로 분석한 결과, 주로 N_2O 배출 저감기술 개발 분야가 많이 이루어져 왔으며, N_2O 배출 특성, N_2O 배출계수 개발, N_2O 배출량 인벤토리 평가 연구가 이루어져 왔다. 농경지에서 배출되는 N_2O 를 감축하기 위해 토양에 바이오차 및 녹비를 투입하거나 무경운 기술을 적용한 연구들이 평가되었다. 이러한 N_2O 감축기술에 대한 연구는 2030년 우리나라의 온실가스

감축 목표를 배출량 전망치 대비 37%로 확정 감축하겠다는 정부의 발표와 국제사회에서의 신 기후체제의 기반이 되는 파리협정 등 국내외 온실가스 관련 연구가 요구됨으로써 지속적으로 증가할 것으로 판단된다. 따라서 추가적인 온실가스 감축기술 개발이 필요하며 개발된 기술들의 온실가스 저감효과를 평가하는 연구와 더불어 농가에 활용 될수 있도록 온실가스 감축사업과 연계할 수 있는 검인증 방법을 포함한 방법론 구축 등이 필요하다. 이후 농업분야 온실가스 감축사업인 배출권거래제 외부사업, 농업농촌 자발적 온실가스 감축사업, 저탄소농축산물 인증제 등과 연계하여 농업현장에서 활용할 수 있도록 해야 한다.

Acknowledgement

This work was carried out by the support of Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (PJ013814022019), Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Alam, M.A. 2017. Reevaluation of nitrous oxide emission factor in temperate upland soil. Master thesis, Gyeongsang National University.
- Alam, M.A., M.I. Khan, S.R. Cho, J.Y. Lim, H.J. Song, P.J. Kim, and S. Das. 2019. Source partitioning and emission factor of nitrous oxide during warm and cold cropping seasons from an upland soil in South Korea. *Sci. Total Environ.* 662:591-599.
- Choi, E.J., H.C. Jeong, G.Y. Kim, S.I. Lee, and J.S. Lee. 2016. Estimation of national greenhouse gas emissions in agricultural sector from 1990 to 2013. *J.Climate Change Res.* 7:443-450.
- Davidson E.A., P.A. Matson, P.M. Vitousek, R. Riley, K. Dunklin, G. García-Méndez and J.M. Maass. 1993. Processes of regulating soil emissions of NO and N₂O in a seasonally dry tropical forest. *Ecology.* 74:130-139.
- Firestone M.K., and E.A. Davidson. 1989. Microbiological basis of NO and N₂O production and consumption in soil. In *Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere*. Andreae and Schimel. (ed.). Wiley, NY, USA.
- Greenhouse gas inventory and research center. 2018. National greenhouse gas inventory report of Korea. Greenhouse gas inventory and research center of Korea. Korea.
- Hwang, W.J., M.S. Park, Y.S. Kim, K.J. Cho, W.K. Lee, and S.H. Hyun. 2015. Analysis of greenhouse gas emission models and evaluation of their application on agricultural lands in Korea. *Ecol. Resil. Infrastruct.* 2:185-190.
- Hyun, J.G., S.Y. Yoo, X.Y. Yang, J.E. Lee, and G.Y. Yoo. 2017. Annual variability in nitrous oxide emission from agricultural field soils. *J.Climate Change Res.* 8:305-312.
- IPCC. 2007. Climate Change. In: Solomon S (ed) The scientific basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge university press, NY. USA.
- IPCC. 2014. Climate change, synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Geneva, Switzerland.
- Iserman K. 1994. Agriculture's share in the emissions of trace gases affecting the climate and some cause oriented proposals for reducing this share. *Environ. Pollut.* 83:95-111.
- Jennifer, P.C., H.Y. Hwang, J. Gutierrez, S.Y. Kim, and P.J. Kim. 2015. Impact of plastic film mulching on increasing greenhouse gas emissions in temperate upland soil during maize cultivation. *Appl. Soil Ecol.* 91:48-57.
- Jeong, H.C., E.J. Choi, J.S. Lee, G.Y. Kim, and K.H. So. 2016. The differences of nitrous oxide (N₂O) emissions as

- crop presence and location of gas sampling chambers in upland. *J. Climate Change Res.* 7:427-432.
- Jeong, H.C., E.J. Choi, J.S. Lee, G.Y. Kim, and S.I. Lee. 2017. The analysis of differences by improving GHG emission estimation methodology for agricultural sector in recent 5 years. *J. Climate Change Res.* 8:347-355.
- Jeong, H.C., G.Y. Kim, D.B. Lee, K.M. Shim, and K.K. Kang. 2011a. Assessment of greenhouse gases emission of agronomic sector between 1996 and 2006 IPCC guidelines. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44:1214-1219.
- Jeong, H.C., G.Y. Kim, D.B. Lee, K.M. Shim, S.B. Lee, and K.K. Kang. 2011b. Assessment on nitrous oxide (N_2O) emissions of Korea agricultural soils in 2009. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44:1207-1213.
- Jeong, H.C., G.Y. Kim, J.S. Lee, E.J. Choi, J.Y. Ko, and K.H. So. 2013. Assessment of nitrous oxide (N_2O) emissions from farmland in 2011 with IPCC guideline methodology. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 46:570-574.
- Jeong, H.C., G.Y. Kim, S.B. Lee, J.S. Lee, J.H. Lee, and K.H. So. 2012. Evaluation of greenhouse gas emissions in cropland sector on local government levels based on 2006 IPCC guideline. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45:842-847.
- Jeong, H.C., J.S. Lee, E.J. Choi, G.Y. Kim, S.U. Seo, and K.H. So. 2014. A comparison of the changes of greenhouse gas emissions to the develop country-specific emission factors and scaling factors in agricultural sector. *J. Climate Change Res.* 5:349-357.
- Jeong, H.C., J.S. Lee, E.J. Choi, G.Y. Kim, S.U. Seo, H.K. Jeong, and C.G. Kim. 2015. Post-2020 emission projection and potential reduction analysis in agricultural sector. *J. Climate Change Res.* 6:233-241.
- Jian-gang H., Z. Yong-li, B. Hong-ying, Q. Dong, C. Jin-yu, and W. Chun-du. 2007. N_2O emissions under different moisture and temperature regimes. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 78:284-287.
- Ju, O.J., G.J. Lim, S.D. Lee, T.J. Won, J.S. Park, C.S. Kang, S.S. Hong, and N.G. Kang. 2018. A study on the mitigation of nitrous oxide emission with the horticultural fertilizer of containing urease inhibitor in hot pepper and chinese cabbage field. *Korean J. Environ. Agric.* 37:235-242.
- Kang, S.W., J.S. Cho, H.T. Kim, D.C. Seo, and S.D. Moon. 2016. Effect of sesame straw biochar application on soil physics and nitrous oxide emission in upland soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49:259-264.
- Kim, D.S., and U.S. Na, 2011a. Soil emission measurements of N_2O , CH_4 and CO_2 from intensively managed upland cabbage field. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.* 27:313-325.
- Kim, G.W., S. Das, H.Y. Hwang, and P.J. Kim. 2017a. Nitrous oxide emissions from soils amended by cover-crops and under plastic film mulching: fluxes, emission factors and yield-scaled emissions. *Atmos.* 152:377-388.
- Kim, G.Y., 2009. Emission and evaluation of green house gas (CO_2 , CH_4 , N_2O) in paddy and upland fields. Doctoral dissertation, Chungbuk National University.
- Kim, G.Y., H.C. Jeong, K.M. Shim, S.B. Lee, and D.B. Lee. 2011b. Evaluation of N_2O emissions with different growing periods (Spring and autumn seasons), tillage and no tillage conditions in a chinese cabbage field. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44:1239-1244.
- Kim, G.Y., H.C. Jeong, M.K. Kim, K.A. Roh, D.B. Lee, and K.K. Kang. 2011c. Evaluation of indirect N_2O emission from nitrogen leaching in the ground-water in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44:1232-1238.
- Kim, G.Y., H.C. Jeong, Y.K. Sonn, S.Y. Kim, J.S. Lee, and P.J. Kim. 2014a. Effect of soil water potential on methane and nitrous oxide emissions in upland soil during red pepper cultivation. *J. Korean Soc. Appl. Biol. Chem.* 57:15-22.
- Kim, G.Y., K.H. So, H.C. Jeong, K.M. Shim, S.B. Lee, and D.B. Lee. 2010a. Assessment of green house gases emissions using global warming potential in upland soil during pepper cultivation, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43:886-891.
- Kim, G.Y., K.H. So, H.C. Jeong, K.M. Shim, S.B. Lee, and D.B. Lee. 2010b. Evaluation of N_2O emissions with changes of soil temperature, soil water content and mineral N in red pepper and soybean field. *Korea J. Soil Sci. Fert.* 43:880-885.
- Kim, G.Y., S.I. Lee, J.S. Lee, H.C. Jeong, and E.J. Choi. 2018a. Evaluation of N_2O emissions by nutrient source in

- soybean and pepper fields. *Korean J. Environ. Biol.* 36:680-686.
- Kim, G.Y., U.S. Na, S.I. Lee, H.C. Jeong, P.J. Kim, J.E. Lee, Y.H. Seo, J.S. Lee, E.J. Choi, and S.U. Suh. 2016. Assessment of integrated N₂O emission factor for Korea upland soils cultivated with red pepper, soy bean, spring cabbage, autumn cabbage and potato. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49:720-730.
- Kim, G.Y., W.K. Park, H.C. Jeong, S.I. Lee, E.J. Choi, P.J. Kim, Y.H. Seo, and U.S. Na. 2015a. A revised estimate of N₂O emission factor for spring chinese cabbage fields in Korea. *Korean J. Agric. Forest Meterol.* 17:326-332.
- Kim, G.Y., W.K. Park, H.C. Jeong, S.I. Lee, P.J. Kim, Y.H. Seo, and U.S. Na. 2015b. Assessment of N₂O emission factor of autumn chinese cabbage fields at three different geographical location in South Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 48:163-169.
- Kim, G.Y., W.K. Park, J.S. Lee, H.C. Jeong, S.I. Lee, E.J. Choi, P.J. Kim and Y.H. Seo. 2014b. Developing N₂O emission factor in red pepper fields to quantify N₂O emission of agricultural field. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 47:598-603.
- Kim, S.U., C. Ruangcharus, H.H. Lee, H.J. Park, and C.O. Hong. 2018b. Effect of application rate of composted animal manure on nitrous oxide emission from upland soil supporting for sweet potato. *Korean J Environ Agric.* 37:172-178.
- Kim, S.U., C. Ruangcharus, S. Kumar, H.H. Lee, H.J. Park, E.S. Jung, and C.O. Hong. 2019. Nitrous oxide emission from upland soil amended with different animal manures. *Appl. Biol. Chem.* 62:8-15.
- Kim, S.U., E.J. Choi, H.C. Jeong, J.S. Lee, and C.O. Hong. 2017b. The influence of composted animal manure application on nitrous oxide emission from upland soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 50:530-537.
- Kim, Y. 2014c. Feasibility study of biochar application as an agricultural management practice-focused on the agricultural utilization. Master thesis, Kyunghee University.
- Kyoto protocol to the united nations framework convention on climate change. 1998. United nation framework convention on climate change.
- Lal R., J.A. Delgado, P.M. Groffman, N. Millar, C. Dell, A. Rotz. 2011. Management to mitigate and adapt to climate change. *J. Soil Water Conserv.* 66:276-285.
- Lee, J.E., 2014a. Development of N₂O emission factors for red pepper, soybean, cabbage, and maize cultivation under different nitrogen fertilization rates in the flat upland soils in chungcheongnam-do. Doctoral dissertation, Chungnam National University.
- Lee, J.E., Y.U. Yun, J.I. Lee, Y.G. Nam, G.Y. Kim, and S.J. Kim. 2014b. Assessment on nitrous oxide (N₂O) emissions different nitrogen application rates during the red pepper cultivation in flat upland. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 47:59-65.
- Lee, S.I., G.Y. Kim, E.J. Choi, J.S. Lee, and H.C. Jeong. 2018a. Nitrous oxide and carbon dioxide efflux of cropland soil during fallow season. *Korean J. Agric. Forest Meterol.* 20:386-396.
- Lee, S.I., G.Y. Kim, E.J. Choi, J.S. Lee, and H.C. Jung. 2017a. Decreases nitrous oxide emission and increase soil carbon via carbonized biomass application of orchard soil. *Korean J. Environ Agric.* 36:73-79.
- Lee, S.I., G.Y. Kim, E.J. Choi, J.S. Lee, H.C. Jung. 2018b. Reduction of carbon dioxide and nitrous oxide emissions through various biochars application in the upland. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association.* 26:11-18.
- Lee, Y. 2017b. Effects of biochar application on N₂O emissions in agricultural field of Korea. Master thesis, Kyunghee University.
- Na, U.S. 2012. A study of GHG's flux measurement and analysis from upland field, fresh wetland and tidal flat. Master thesis, Kunsan National University.
- Paris agreement. 2015. United nation framework convention on climate change.
- Park, J.H., S.J. Park, Y.J. Seo, O.H. Kwon, S.Y. Choi, S.D. Park, and J.E. Kim. 2014a. Effect of mixed treatment of

- urea fertilizer and zeolite on nitrous oxide and ammonia emission in upland soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 47:368-373.
- Park, S.J., C.H. Lee, and M.S. Kim. 2018. The analysis of greenhouse gases emission of cropland sector applying the 2006 IPCC guideline. *J. Climate Change Res.* 9:445-452.
- Park, S.J., C.H. Lee, M.S. Kim, S.G. Yun, Y.H. Kim, and B.G. Ko. 2016a. Calculation of GHGs emission from LULUCF-cropland sector in South Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49:826-831.
- Park, W.K., G.Y. Kim, S.I. Lee, J.D. Shin, H.Y. Jang, and K.H. So. 2014b. Characteristics of greenhouse gas emission in the upland soil applied with agricultural biomass. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 47:381-389.
- Park, W.K., G.Y. Kim, S.I. Lee, J.D. Shin, H.Y. Jang, U.S. Na, and K.H. So. 2015. Effects of biomass application on soil carbon storage and mitigation of GHGs emission in upland. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 48:340-350.
- Park, W.K., G.Y. Kim, S.I. Lee, J.D. Shin, H.Y. Jang, U.S. Na, and K.H. So. 2016b. Effect of carbonized rice hull application on increasing soil carbon storage and mitigating greenhouse gas emissions during chinese cabbage cultivation. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49:181-193.
- Reay D.S., E.A. Davidson, K.A. Smith, P. Smith, J.M. Melillo, F. Dentener, and P.J. Crutzen. 2012. Global agriculture and nitrous oxide emissions. *Nat. Clim. Change.* 2:410-416.
- Renault P., and J. Sierra. 1994. Modeling oxygen diffusion in aggregated soils: II. Anaerobiosis in topsoil layers. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:1023-1030.
- Seo, Y.H., S.W. Kim, S.C. Choi, I.J. Kim, K.H. Kim, and G.Y. Kim. 2012. Effect of green manure crop and biochar on nitrous oxide emission from red pepper field. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45:540-543.
- Shin, M.H., S.I. Lee, J.R. Jang, J.Y. Shin, Y.S. Park, K.J. Lim, and J.D. Choi. 2015. Simulation of the GHG emissions impact on climate change from radish field. *J. Korean Soc. Agric. Eng.* 57:101-112.
- Skiba U.M., L.J. Sheppard, J. MacDonald, and D. Fowler. 1998. Some key environmental variables controlling nitrous oxide emissions from agricultural and semi-natural soils in Scotland. *Atmos. Environ.* 32:3311-3320.
- Yang, S.H., H.J. Kang, S.C. Lee, H.J. Oh, and G.Y. Kim. 2012a. Influence of N fertilization level, rainfall and temperature on the emission of N_2O in the Jeju black volcanic ash soil with potato cultivation. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45:544-550.
- Yang, S.H., H.J. Kang, S.C. Lee, H.J. Oh, and G.Y. Kim. 2012b. Influence of N fertilization level, rainfall, and temperature on the emission of N_2O in the Jeju black volcanic ash soil with carrot cultivation. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45:459-465.
- Yang, S.H., H.J. Kang, S.C. Lee, H.J. Oh, and G.Y. Kim. 2012c. Influence of N fertilization level, rainfall, and temperature on the emission of N_2O in the Jeju black volcanic ash soil with soybean cultivation. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45:451-458.
- Yoo, G.H., D.H. Kim, J.Y., J.H. Yang, S.W. Kim, K.D. Park, M.T. Kim, S.H. Woo, and K.Y. Chung. 2015. Measurement of nitrous oxide emissions on the cultivation of soybean by no-tillage and conventional-tillage in upland soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 48:610-617.
- Yoo, J., S.H. Woo, K.D. Park, and K.Y. Chung. 2016. Effect of no-tillage and conventional tillage practices on the nitrous oxide (N_2O) emissions in an upland soil: soil N_2O emission as affected by the fertilizer applications. *Appl. Biol. Chem.* 59:787-797.