

PLANT & FOREST

Assessment of methane emission with application of rice straw in a paddy field

Eun Jung Choi^{1,†}, Hyun Cheol Jeong^{2,†}, Gun Yeob Kim¹, Sun Il Lee¹, Hyo Suk Gwon¹, Jong Sik Lee¹, Taek Keun Oh^{3,*}

¹Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea

²Office of the administrator, Rural Development Administration, Jeonju 54875, Korea

³Department of Bio-environmental Chemistry, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

*Corresponding author: ok5382@cnu.ac.kr

†These authors equally contributed to this study as first author.

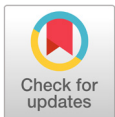
Abstract

A flooded rice field is one of the significant sources of anthropogenic methane (CH₄) with the intensity of the emissions dependent on management practices. Incorporation of rice straw, which is one of the organic amendments, induces the increase of methane emissions during the flooding season. In this study, we measured of methane emission according to applications of rice straw in different soil textures during a cultivation period in 2017 and 2018. The fallow treatments were non application of rice straw (NA), spring plowing after spring spreading of rice straw (SPSA), spring plowing after previous autumn spreading of rice straw (SPAA), and autumn plowing after previous autumn spreading of rice straw (APAA). The SPSA treatment emitted the highest total methane from loam soil in both 2017 (596.7 CH₄ kg ha⁻¹) and 2018 (795.4 CH₄ kg ha⁻¹). The same trend was observed in silt clay loam soil; the SPSA treatment still emitted the highest amount of methane in both 2017 (845.9 CH₄ kg ha⁻¹) and 2018 (1,071.7 CH₄ kg ha⁻¹). The lowest emission among the rice straw incorporated plots came from the APAA treatment for both soil texture types in all the seasons. The conversion factors of the SPAA were 0.79 and 0.65 from the loam and silt clay loam soils, respectively. Relatedly, the conversion factors of the APAA were 0.71 and 0.43 from the loam and silt clay loam soils, respectively. The above observations mean therefore that incorporation of rice straw early in the fallow reduces methane emissions in the main rice growing season.

Keywords: conversion factor, greenhouse gases, methane emission, paddy, rice straw

Introduction

메탄(CH₄)은 벼를 재배하는 과정에서 발생되며(Meijide et al., 2017), 지구온난화지수(global warming potential, GWP)가 이산화탄소(CO₂)의 25배인 주요 온실가스 중 하나이다(IPCC, 2007). 2011년 전세계 농업부문 온실가스 총 배출량은 522 백만톤 CO₂ eq.로 이 중 약 10%가 벼 재배에 의한 메탄 배출이었다(Tubiello et al., 2014). 우리나라도 2016년 기준 메탄 총 배출량이 26.0



OPEN ACCESS

Citation: Choi EJ, Jeong HC, Kim GY, Lee SI, Gwon HS, Lee JS, Oh TK. 2019. Assessment of methane emission with application of rice straw in a paddy field. Korean Journal of Agricultural Science 46:857-868. <https://doi.org/10.7744/kjoas.20190069>

Received: August 14, 2019

Revised: October 07, 2019

Accepted: October 16, 2019

Copyright: © 2019 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.

백만톤 CO₂ eq.으로 이 중 약 23%에 해당되는 6.1 백만톤 CO₂ eq.가 벼 재배지로부터 유래되었다(GIR, 2018).

메탄은 담수 상태인 논에서 메탄 생성균에 의해 유기물이 혐기적으로 분해되면서 발생된다(IPCC, 2006). 토양의 산화환원전위, pH, 지온 등 환경적 요인도 영향을 미치지만 탄소 기질과 양분의 이용성 또한 메탄 발생에 관여하는 중요 인자들이다(IPCC, 1996). Khosa et al. (2010)은 볏짚, 녹비, 가축분 퇴비 등의 유기물 내 탄질비의 차이가 메탄 배출량에 영향을 미치는 것을 확인하였고(Khosa et al., 2010), 특히 볏짚은 탄질비가 높아 녹비나 가축분 퇴비를 투입했을 때보다 메탄 배출을 증가시켰다(Le Mer and Roger, 2001). 이탈리아, 일본, 필리핀 등 여러 나라에서 수행된 연구 결과들에 의하면 논에서 볏짚을 사용했을 때 메탄 배출량이 무시용 대비 2배에서 9배까지 증가함을 보여 주었다(Schütz et al., 1989; Yagi and Minami, 1990; Wassmann et al., 1996). 그러나 같은 볏짚이라도 투입하는 방법에 따라 메탄 배출량이 달라지는데, Bossio et al. (1999)은 볏짚을 소각하여 투입했을 때와 생볏짚을 직접 토양과 혼합했을 때의 메탄 배출량을 비교한 결과 소각해서 투입했을 때의 메탄 배출량이 생볏짚 투입 시보다 4분의 1 수준으로 저감된 것을 확인하였다(Bossio et al., 1999). 또한 볏짚을 투입하는 시기에 따라서도 메탄 배출량이 달라지는데, 벼를 수확 후 볏짚을 토양 표면에 피복하다 벼 재배시작 바로 전에 토양과 혼합했을 때의 메탄 배출량이 수확 후 볏짚을 토양과 바로 혼합하고 다음 해에 벼를 재배했을 때보다 약 1.9배 높았다(Yan et al., 2005). 2006 IPCC 지침에서는 이를 고려해 볏짚 투입 시기에 따른 전환계수를 이용해 유기물 보정계수를 산출하도록 제시하고 있다. 재배 전 30일 미만 기간 중에 볏짚을 토양에 투입했을 때의 기본 전환계수가 1이고, 재배 전 30일 이상 기간 중에 볏짚을 토양에 투입했을 때의 기본 전환계수가 0.29이다(IPCC, 2006).

우리나라는 1995년부터 벼 재배 시 발생하는 메탄에 대한 연구가 많이 이루어져(Choi et al., 2017), 2009년부터 계수 개발을 시작하였다. 현재 볏짚 사용에 따른 유기물 보정계수를 사용해 벼 재배부분의 메탄 배출량을 산정하고 있지만(GIR, 2018), 이는 볏짚 투입량만을 기준으로 하고 있어 우리나라의 다양한 재배 방식을 반영한 전환계수 개발이 필요하다고 판단되었다. 따라서 본 연구는 볏짚 사용 시기 및 투입 방법에 따른 메탄 배출량을 토대로 볏짚 사용 시기별 전환계수를 평가하고자 수행되었다.

Materials and Methods

연구 수행 장소

볏짚 투입 방법에 따른 논에서의 메탄 배출량 측정을 위해 전북 소재 두 지역의 논에서 2년간(2017 - 2018) 연구를 수행하였다. 첫 번째 지역은 전북 완주군 이서면에 위치한 국립농업과학원(35°49'43.76"N, 127°02'39.03"E) 내 논 포장으로 토성은 양토(loam)이며, 다른 지역은 전북 김제시 명덕동에 위치한 논 포장(36°22'23.7"N, 127°19'39.5"E)으로 토성은 미사질 식양토(silt clay loam)이다. 두 지역 모두 과거에도 벼를 재배하던 논이었고, 벼 품종은 신동진으로 재식거리 30 cm × 15 cm로 이앙하여 농촌진흥청 벼 표준재배법에 따라 재배하였다. 화학비료는 작물별 비료사용처방 기준에 따라 질소(N)-인산(P₂O₅)-칼리(K₂O)를 90-45-57 kg ha⁻¹ 시비하였다(NAS, 2017). 2017년 양토와 미사질 식양토에서의 재배기간은 각각 139일과 147일었고, 2018년 재배기간은 두 포장 모두 동일하게 140일로 하였다. 재배 기간 중 물관리는 표면에서 약 5 - 7 cm 깊이로 상시담수하고 수확 한 달 전 배수 처리하였다. 시험 전 토양 화학성 분석 결과는 Table 1과 같다.

Table 1. Chemical properties of rice paddy soils before rice cultivation.

Year	Texture	pH (1 : 5 H ₂ O)	EC (dS m ⁻¹)	O.M (g kg ⁻¹)	T-N (%)	TOC (%)	Av. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Ex. Cation (cmol ⁺ kg ⁻¹)		
								K	Ca	Mg
2017	Loam	7.6	0.59	14.3	0.1	0.8	35.3	0.5	5.2	1.4
	Silt clay loam	6.9	0.70	33.4	0.2	1.9	29.0	0.7	5.0	0.9
2018	Loam	6.2	0.70	12.7	0.1	0.7	45.8	0.5	4.9	1.3
	Silt clay loam	5.7	0.72	32.7	0.2	1.9	46.7	0.6	4.8	0.8

토양의 화학성 분석

토양의 pH는 초자전극법에 의하여 토양 : 물(1 : 5)로, 유기물함량은 Tyurin법, 총질소 함량은 Kjeldahl법, 치환성 양이온 K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺은 1 M NH₄OAc (pH7.0)으로 침출하여 유도결합플라즈마 분광계(inductively coupled plasma, ICP)로 정량하였고, 유효인산의 함량은 Lancaster법을 이용하여 분석하였다.

벼짚 투입 방법 및 처리구

벼짚은 수확한 벼짚을 전량 투입하는 것으로 하여 약 6 Mg ha⁻¹를 투입하였다. 처리구는 벼짚 무시용 + 이앙 전 봄경운(non application, NA), 이앙 전 봄 벼짚 시용 및 경운(spring plowing after rice straw spring application, SPSA), 수확 후 가을 시용 및 이앙전 봄경운(spring plowing and autumn application, SPAA), 수확 후 가을 시용 및 경운(autumn plowing after rice straw autumn application, APAA)으로 구성하였다. 단, SPAA 처리구에서 벼짚 시용은 수확 후 벼짚을 토양 표면에 뿌려놓고 이듬해 이앙 전에 경운하여 토양과 혼합하는 것으로 하였다. 다른 처리구는 벼짚을 시용하면서 동시에 경운하여 토양과 바로 혼합하였다. 2017년 봄경운은 양토와 미사질 식양토에서 각각 5월 10일과 5월 19일에 수행하였다. 가을경운은 전년도에 벼를 수확한 후 벼짚을 처리하였는데, 양토와 미사질 식양토에서 각각 2016년 11월과 12월에 실시하였다. 2018년 봄경운은 양토와 미사질 식양토에서 각각 5월 22일과 5월 19일에 실시했고, 가을경운은 양토와 미사질 식양토에서 각각 2017년 11월과 12월에 실시하였다(Table 2).

Table 2. Rice straw applications and water management in 2017 and 2018 rice growing seasons.

Year	Texture	Irrigation	Fertilizer application	Planting	Autumn plowing	Spring plowing	Harvest
2017	Loam	25 May	22 May	30 May	Mid Nov. 2016	10 May	25 Oct.
	Silt clay loam	28 May	23 May	1 June	Mid Dec. 2016	19 May	26 Oct.
2018	Loam	24 May	24 May	29 May	Mid Nov. 2017	22 May	16 Oct.
	Silt clay loam	22 May	22 May	29 May	Mid Dec. 2017	19 May	16 Oct.

메탄 시료 채취 및 배출량 산정 방법

간이폐쇄정태법(Closed chamber method)에 의해 메탄 배출량을 측정하였다. 60 cm × 60 cm × 140 cm(가로 × 세로 × 높이)의 투명 아크릴 챔버를 처리구당 3반복으로 설치하여 10시에서 12시 사이에 주 1 - 2회 시료를 채취하였다. 밀폐 전 시료를 채취하고, 밀폐 후 30분 뒤의 시료를 채취해 메탄의 농도 변화를 측정하였고 메탄 배출에 영향을 주는 산화환원전위(Eh)와 함께 메탄 배출량 산정을 위한 시료 채취 중의 온도변화 및 챔버 내 체적, 수온 등을 측정하였다. 산화환원전위는 표토로부터 10 cm 지점에 산화환원 전극을 삽입하고 휴대용 Eh 측정기(ORP meter, Lutron, Taipei, Taiwan)를 사용하여 안정된 뒤의 전위값으로 측정하였다. 기온 및 강우량 등의 기상자료는 농촌진흥

청 농업기상정보서비스(<http://weather.rda.go.kr>)를 이용하였다. 채취한 시료의 메탄 농도는 기체크로마토그래피(gas chromatography, GC)의 FID detector를 이용하여 정량 분석하였고, 메탄 배출량은 식(1)을 통해 계산하였다.

$$F = \rho \times V/A \times \Delta c/\Delta t \times 273/T \quad (1)$$

$$F = \text{CH}_4 \text{ Flux (mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}\text{)}$$

$$\rho = \text{gas density (kg m}^{-3}\text{)}$$

$$V = \text{volume of chamber (m}^3\text{)}$$

$$A = \text{surface area of chamber (m}^2\text{)}$$

$$\Delta c/\Delta t = \text{rate of increase of gas concentration (10}^{-6} \text{ h}^{-1}\text{)}$$

$$T = \text{absolute temperature (273 + mean temperature in chamber) (}^\circ\text{C)}$$

전환계수 산정 방법

2006 IPCC 지침에서는 이앙 전 30일 미만 기간 중 볏짚을 혼합하여 투입한 경우를 전환계수 1로 제시하고 있다 (IPCC, 2006). 또한 현재 국가 배출량 산정에 적용되고 있는 볏짚 시용에 따른 국가 보정계수 역시 봄에 시용하고 바로 경운을 한 조건에서 개발되었기 때문에, 처리구 마다 재배기간 중 총 메탄 배출량을 산정하여 SPSA 처리구 배출량 대비 SPAA와 APAA 처리구의 배출량 비율로 전환계수를 산정하였다(식(2)).

$$\text{CFOA} = \Delta F_i/\Delta F \quad (2)$$

$$\text{CFOA} = \text{conversion factor of organic amendment}$$

$$F = \text{CH}_4 \text{ total emission by application and plowing of rice straw on spring before cultivation (kg ha}^{-1}\text{)}$$

$$i = \text{application types of rice straw}$$

통계분석

처리 간 배출량 차이에 대한 통계분석은 Microsoft excel의 XLSTAT (Microsoft, USA)를 이용해 실시하였다. 조사된 자료는 ANOVA 검증을 통해 분석하였고, F-test 결과값이 $p < 0.05$ 의 범위에서 유의한 경우 최소유의차 검정(least significant difference test, LSD)를 실시하였다.

Results and Discussion

기온 및 강수량, 수온의 변화

2017년 벼 재배 기간 중 각 시험 포장의 기온은 7 - 31°C 사이에 분포하였다. 평균기온은 양토와 미사질 식양토 시험 포장 모두 비슷한 추세이나 양토 시험 포장 지역의 강수량과 강우일수가 미사질 식양토 시험 포장 보다 많았다 (Fig. 1). 2018년은 각 시험 포장의 평균 기온이 12 - 31°C 사이에 분포해, 전년보다 다소 높은 경향을 나타냈다. 또한 미사질 식양토 시험 포장의 강수량 및 강우일수가 양토에 비해 극히 낮았다. 수온은 2017년과 2018년 모두 시험 포장에 따른 차이는 있었지만, 처리구별 차이는 크지 않았다(Fig. 2).

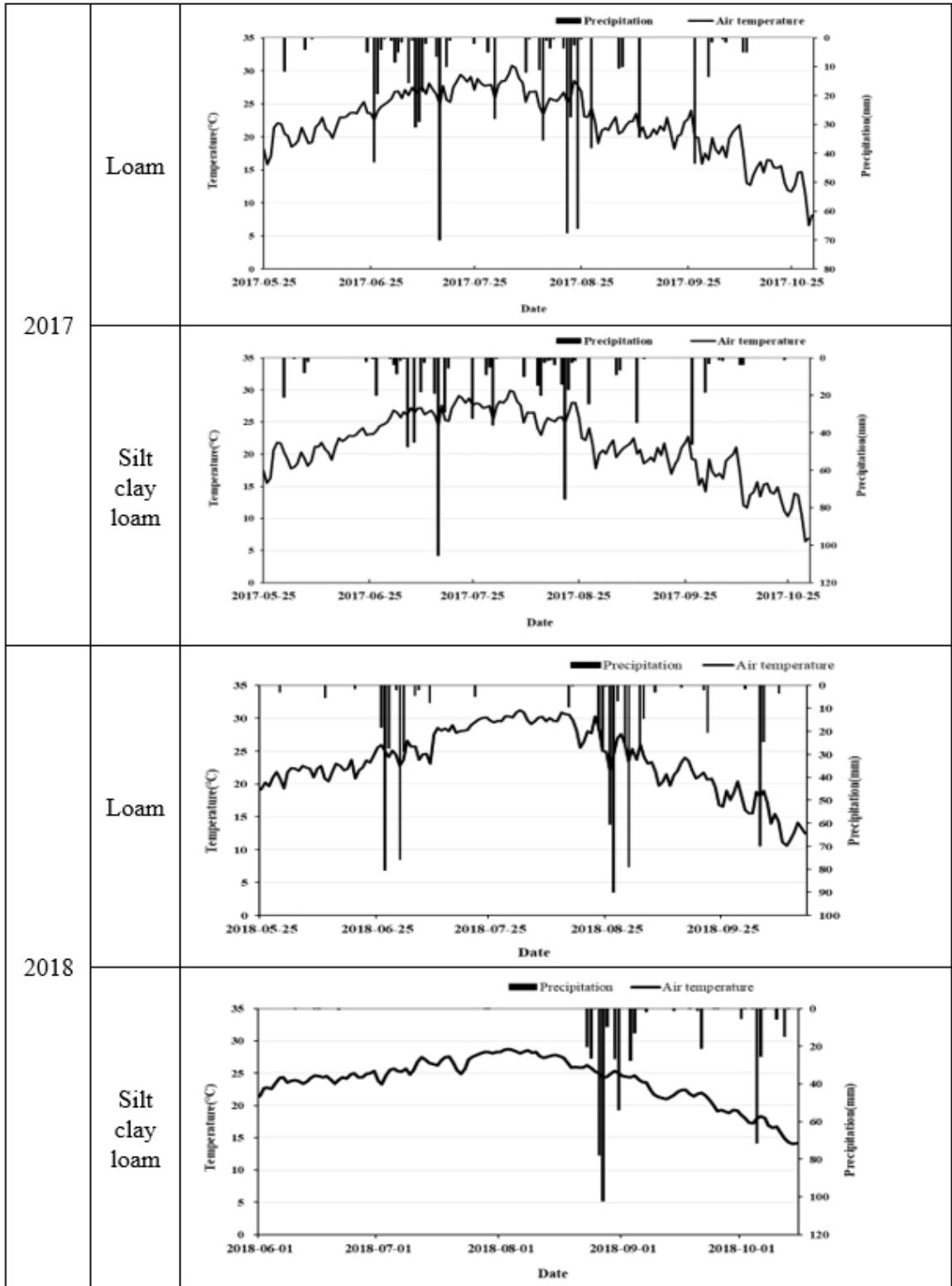


Fig. 1. Changes in daily air temperature and precipitation of each study sites during cultivation in 2017 and 2018.

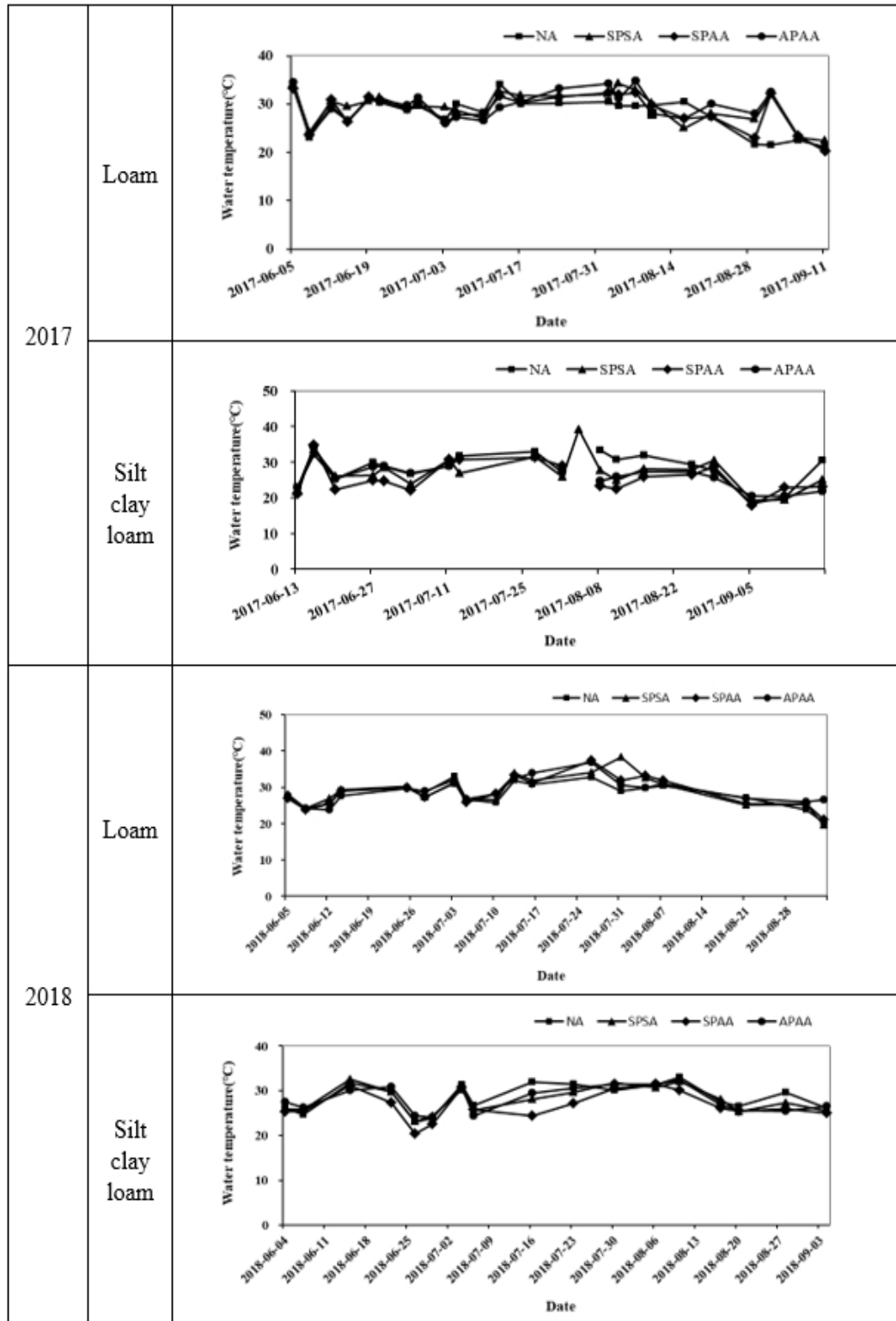


Fig. 2. Changes in water temperature of each study sites during cultivation in 2017 and 2018. NA, non application; SPSA, spring plowing after rice straw spring application; SPAA, spring plowing and autumn application; APAA, autumn plowing after rice straw autumn application.

재배기간 중 산화환원전위 변화

담수 상태에서 토양의 산화환원전위는 메탄 생성뿐만 아니라 작물과의 가스교환까지 영향을 주며(Lc Mer and Roger, 2001), -220 -- -160 mV 범위에서의 Eh 변화는 메탄 생성과 매우 연관성 있음을 선행 연구결과들이 보여준다(Liou et al., 2003). 따라서 논의 담수로 인한 환원 조건에서의 메탄 발생은 Eh 변화에 민감하게 반응한다. 2017년과 2018년 작물 생육기간에 모든 처리구의 Eh가 -300 mV까지 감소하였으며, 배수 이후에는 증가하는 추세를 나타냈다(Fig. 3). 이양 후 15일 이후에 Eh는 평균적으로 -200 mV를 유지하다가 물을 떼고 20일 정도 후에는 양의 값까지 증가하였다.

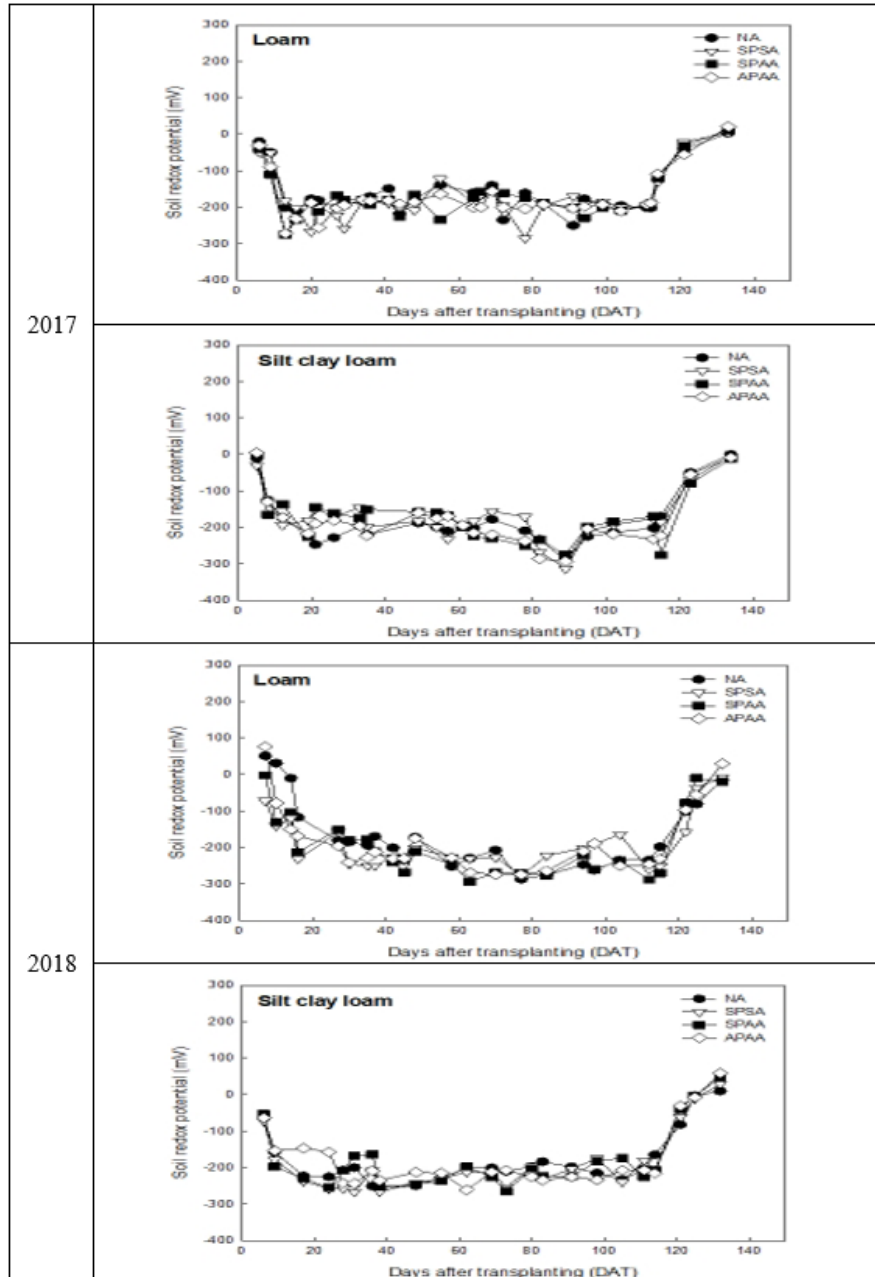


Fig. 3. Changes in daily Eh according to rice straw incorporations during rice cultivations in 2017 and 2018. NA, non application; SPSA, spring plowing after rice straw spring application; SPAA, spring plowing and autumn application; APAA, autumn plowing after rice straw autumn application.

메탄 배출량 평가

2017년 볏짚 처리 방법에 따른 메탄 배출량을 보면, 양토와 미사질 식양토 모두 봄에 볏짚을 사용하고 경운 한 SPSA 처리구에서 배출량이 가장 높게 나타났다(Fig. 4). 메탄 배출량은 양토와 미사질 식양토에서 각각 596.7, 845.9 $\text{CH}_4 \text{ kg ha}^{-1}$ 였다. 양토에서는 SPSA 처리구 다음으로 가을에 사용하고 봄에 경운 한 SPAA 처리구($387.5 \text{ CH}_4 \text{ kg ha}^{-1}$), 가을에 사용하고 가을에 경운한 APAA 처리구($386.5 \text{ CH}_4 \text{ kg ha}^{-1}$), 마지막으로 볏짚을 투입하지 않은 NA 처리구($206.5 \text{ CH}_4 \text{ kg ha}^{-1}$) 순으로 메탄 배출량이 높았다. 볏짚을 사용한 시기에 따라서 배출량이 차이를 보였지만, SPAA와 APAA 처리구처럼 볏짚 투입시기는 같고 경운 시기가 다른 처리구의 배출량은 95% 유의수준에서 유의적인 차이가 없었다. 미사질 식양토도 양토와 같은 순으로 배출량의 차이를 나타냈으며, 양토와 마찬가지로 볏짚을 사용한 시기에는 배출량에 차이가 있었지만 경운 시기에 따른 유의적 차이는 없었다. 미사질 식양토에서의 메탄 배출량은 SPAA, APAA, 그리고 NA 처리구 순으로 각각 387.3, 331.3, 그리고 $328.7 \text{ CH}_4 \text{ kg ha}^{-1}$ 였다. 이와 같이 볏짚을 가을에 미리 사용한 처리구의 메탄 배출량이 적은 이유는 사용되고부터 벼를 재배하기 전까지 볏짚의 무기화(mineralization)와 분해가 진행됐기 때문인 것으로 판단된다. 볏짚 사용 후 온도 변화에 따른 건조토양과 담수토양에서의 $\text{CO}_2\text{-C}$ 전환속도를 비교해보면, 건조토양에서 온도가 증가할수록 $\text{CO}_2\text{-C}$ 의 전환속도 또한 증가하였다(Devêvre and Horáth, 2000). 반면, $\text{CH}_4\text{-C}$ 의 전환속도는 담수토양에서 온도가 증가할수록 빨라졌다. 따라서 벼 수확 후 논이 건조한 상태에서 볏짚을 사용하면 일부가 호기상태에서 분해되어 이산화탄소 형태로 배출되고 이후 남은 유기물이 혐기상태에서 메탄 발생에 영향을 준다고 할 수 있다. 그리고 경운 시기에 따라 메탄 발생량이 다소 차이가 난 이유는 유기물 분해에 관여하는 미생물과의 접촉 면적이 일반적으로 토양 표면에 피복했을 때보다 경운하여 혼합하였을 때 높았기 때문인 것으로 생각된다. Fig. 5와 같이 일별 메탄 배출량 변화를 살펴보면 처리구마다 약간의 차이가 있지만 대체적으로 유기물을 사용한 처리구에서 재배 초기의 배출량이 높았고 미사질 식양토의 경우 낙수를 시작한 직후에 메탄이 증가했다 감소하는 현상이 모든 처리구에서 나타났다(Fig. 5).

2018년도 전년과 동일하게 양토와 미사질 식양토 모두 SPSA 처리구에서의 메탄 배출량이 가장 높았으며 각각 795.4, 1,071.7 $\text{CH}_4 \text{ kg ha}^{-1}$ 를 나타냈다(Fig. 4). 그 뒤로 배출량이 높은 SPAA 처리구의 메탄 배출량은 양토와 미사질 식양토에서 각각 $607.3 \text{ CH}_4 \text{ kg ha}^{-1}$ 와 $495.7 \text{ CH}_4 \text{ kg ha}^{-1}$ 였고, APAA 처리구에서는 $562.8 \text{ CH}_4 \text{ kg ha}^{-1}$ 과 $418.6 \text{ CH}_4 \text{ kg ha}^{-1}$, NA 처리구는 $260.4 \text{ CH}_4 \text{ kg ha}^{-1}$ 과 $352.8 \text{ CH}_4 \text{ kg ha}^{-1}$ 의 메탄이 발생했다. 2018년도 마찬가지로 볏짚 사용 시기에 따른 메탄 배출량의 유의적 차이만 있고 경운 시기에 따른 차이는 없었다. 그러나 동일한 처리를 했음에도 불구하고 토양에 따라 메탄 배출량이 다른 이유는 토성에 따른 투수속도와 pH, 온도 등의 영향에 따른 것으로 판단된다(Yagi and Minami, 1990). 두 토양의 모든 처리구에서 메탄 배출량이 2017년보다 2018년에 높았는데 이는 유기물 축적의 영향 뿐 아니라 적은 강우 일수로 인해 상대적으로 맑은 날이 많아 시료 채취 시 챔버 내 온도변화에 영향을 준 것으로 생각된다. 두 토성이 속한 지역의 재배기간 중 기온변화와 일사량을 비교한 결과, 메탄 배출량이 높은 재배 초기부터 중기까지의 기온과 일사량이 2017년에 비해 2018년이 높게 나타났다(Fig. 5).

일별 메탄 배출량 변화를 살펴보면 양토와 미사질 식양토 모두 유기물을 투입한 처리구의 메탄 배출이 재배 초기에 높았고 수확기가 가까워지면서 배출량이 점차 감소하는 경향을 나타냈다(Fig. 6). 이는 기온, 유기물 분해에 관여하는 미생물 활성도, 토양 산화환원전위 등의 환경적 요인에 의해 유기물을 투입한 논에서 이앙 후 40일부터 약 100일까지의 메탄 배출량이 증가하다 감소한 선행 연구 결과와 비슷하다(Denier and Nene, 1995; Kim et al., 2002; Ju et al., 2013; Kim et al., 2018).

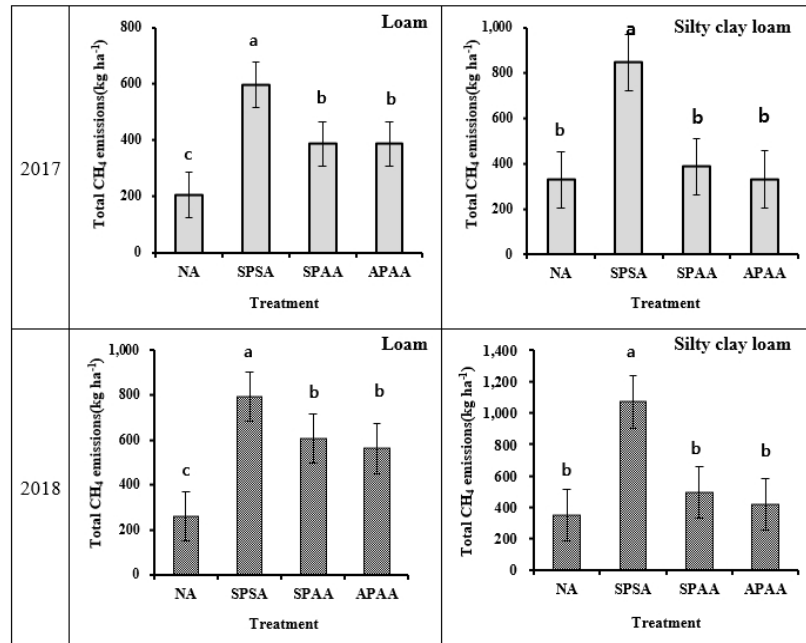


Fig. 4. Total methane emissions under different rice straw application strategies in 2017 and 2018. NA, non application; SPSA, spring plowing after rice straw spring application; SPAA, spring plowing and autumn application; APAA, autumn plowing after rice straw autumn application. a - c: Different letter above bars show significant effect of rice straw application strategies with a significance level of 5%.

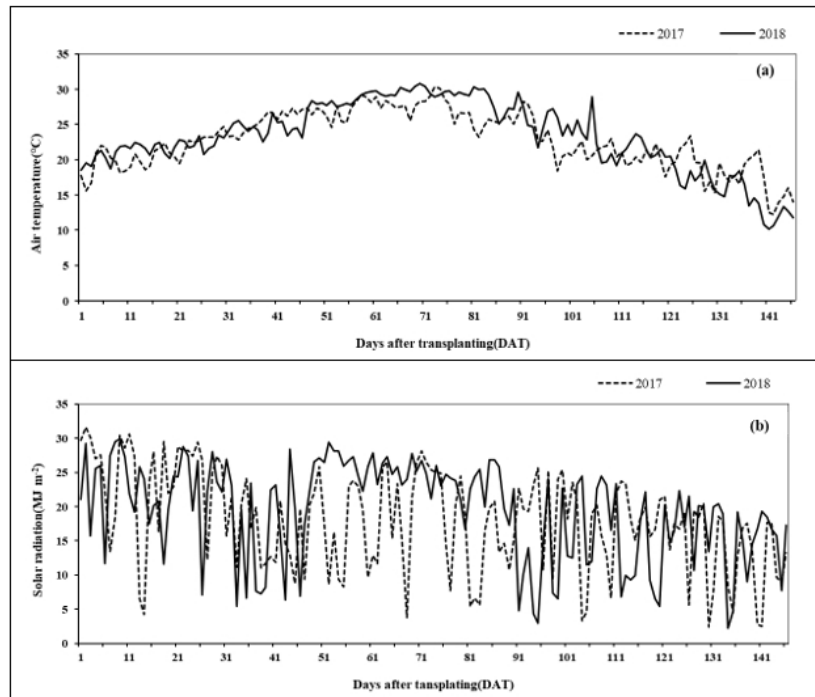


Fig. 5. Changes in daily air temperature and solar radiation during rice cultivation. (a) average air temperatures of two regions which include each soil textures, (b) average solar radiations of two regions which include each soil textures.

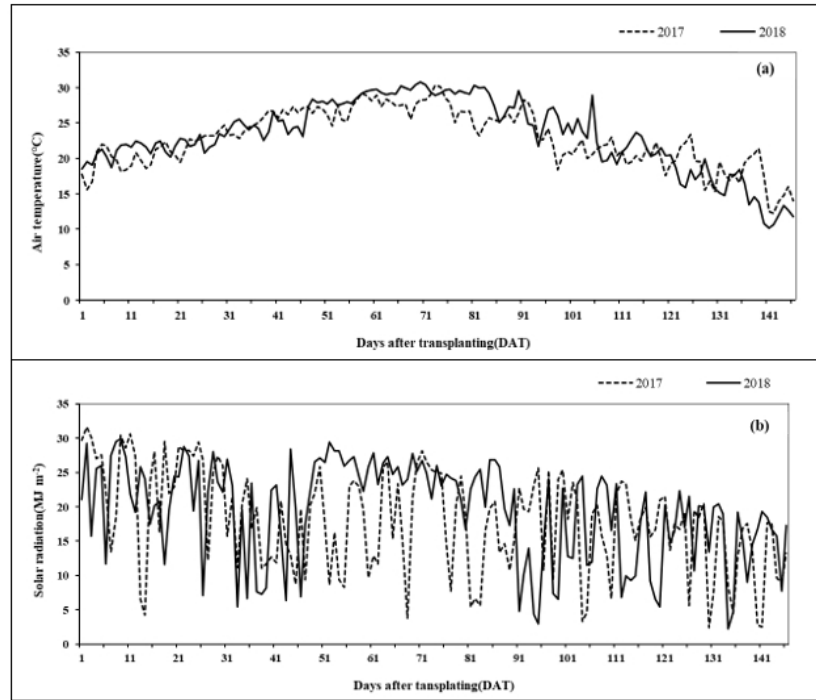


Fig. 6. Changes in daily methane emission according to rice straw incorporations during rice cultivations in 2017 and 2018. NA, non application; SPSA, spring plowing after rice straw spring application; SPAA, spring plowing and autumn application; APAA, autumn plowing after rice straw autumn application.

전환계수 비교

Table 3은 2년간 두 처리지역에서의 메탄 전환계수를 나타낸다(Table 3). 2017년 양토에서 SPAA와 APAA 처리구의 전환계수는 각각 0.65, 0.65이었고, 미사질식양토에서는 각각 0.46, 0.39이었다. 2018년 양토에서의 처리구별 전환계수는 SPAA가 0.93, APAA가 0.76 이었고, 미사질 식양토에서는 SPAA가 0.84, APAA가 0.46 이었다. 처리에 따른 각 토성별 2년간의 전환계수를 평균하여 최종 전환계수를 구한 결과 양토에서의 SPAA와 APAA는 각각 0.79, 0.71 였고, 미사질 식양토에서의 SPAA와 APAA는 각각 0.65, 0.43으로 미사질 식양토에서의 전환계수가 양토보다 낮음을 알 수 있었다.

Table 3. Compare of conversion factors under application of rice straw in each soil textures.

Year	Texture	SPSA ^x	SPAA ^y	APAA ^z
2017	Loam	1	0.65	0.65
	Silt clay loam	1	0.46	0.39
2018	Loam	1	0.93	0.76
	Silt clay loam	1	0.84	0.46
Average	Loam	1	0.79	0.71
	Silt clay loam	1	0.65	0.43

^xSPSA means plowing after rice straw spreading on spring season.

^ySPAA means plowing on spring after rice straw spreading on previous autumn.

^zAPAA means plowing after rice straw spreading on previous autumn.

Conclusion

양토와 미사질 식양토에서 볏짚 시용 및 경운 시기에 따른 메탄 배출량 측정을 통해 전환계수를 비교 한 결과 두 토성 모두 볏짚을 가을에 시용하고 바로 가을에 경운했을 때의 전환계수가 0.71과 0.43으로 가장 낮았다. 2006 IPCC 지침에서 제시하는 재배 전 30일 이상 기간의 볏짚 시용 기본계수 0.29와 비교하면 다소 높지만, 현재 우리나라 벼재배 부문 온실가스 산정에 적용하고 있는 보정계수와 비교하면 본 결과를 적용 했을 때 배출량은 다소 감소할 것으로 판단된다. 국가고유계수로 등록하기 위해선 좀 더 다양한 지역에서 장기적으로 연구한 결과가 필요하지만 배출량 산정의 정확도와 신뢰도 향상을 위한 좋은 기초 자료로 본 연구 결과가 활용될 것으로 기대된다. 또한 온실가스 감축 기술로써 볏짚을 시용 하는 농가에 이양 직전 시용하기보다 수확 후 바로 환원하는 것을 권고한다면 온실가스 감축 목표를 달성하는데 기여할 것으로 생각된다.

Acknowledgements

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술연구개발사업(PJ01185501)의 지원으로 수행되었습니다.

Authors Information

Eunjung Choi, <https://orcid.org/0000-0001-9535-612X>

Gunyeob Kim, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences, Researcher

Hyosuk Gwon, <https://orcid.org/0000-0003-4030-1134>

Hyuncheol Jeong, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences, Researcher

Jongsik Lee, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences, Senior Researcher

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

Taekeun Oh, <https://orcid.org/0000-0003-0215-0427>

Reference

- Bossio DA, Horwath WR, Muters RG, van Kessel C. 1999. Methane pool and flux dynamics in a rice field following straw incorporation. *Soil Biology and Biochemistry* 31:1313-1322.
- 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. [in Korean]
- Denier HAC, Neue HU. 1995. Influence of organic matter incorporation on the methane emission from a wetland rice field. *Global Biogeochemical Cycles* 9:11-22.
- Devêvre OC, Horáth WR. 2000. Decomposition of rice straw and microbial carbon use efficiency under different soil temperatures and moisture. *Soil Biology & Biochemistry* 32:1773-1785.
- GIR (Greenhouse gas Inventory and Research center). 2018. 2018 National greenhouse gas inventory report of Korea (NIR). pp. 45-250. GIR, Seoul, Korea. [in Korean]
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1996. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. pp. 4.53-4.55. IPCC, NY, USA.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. pp. 5.44-5.51. IPCC, NY, USA.

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. AR4 Climate Change 2007: The Physical Science Basis. p. 112. Cambridge University Press, Cambridge, UK and NY, USA.
- Ju OJ, Won TJ, Cho KR, Choi BR, Seo JS, Park IT, Kim GY. 2013. 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]
- Khosa MK, Sidhu BS, Benbi DK. 2010. Effect of organic materials and rice cultivars in methane emission from rice field. *Journal of Environmental Biology* 31:281-285.
- Kim GY, Park SI, Song BH, Shin YK. 2002. Emission characteristics of methane and nitrous oxide by management of water and nutrient in a rice paddy soil. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 21:136-143. [in Korean]
- Kim SH, Lee JH, Lim JS, Shinog Y, Lee CH, Oh TK. 2018. Comparison of methane emissions on soil texture in Korean paddy fields. *Journal of the faculty of agriculture kyushu university* 63:393-397.
- Le Mer J, Roger P. 2001. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *Europe Journal of Soil Biology* 37:25-50.
- Liou RM, Huang SN, Lin CW, Chen SH. 2003. Methane emission from fields with three various rice straw treatments in Taiwan paddy soils. *Journal of Environmental Science and Health, Part B-Pesticides, Food contaminants, and Agricultural Wastes* 38:511-527.
- Meijide A, Gruening C, Goded I, Seufert G, Cescatti A. 2017. Water management reduces greenhouse gas emissions in a Mediterranean rice paddy field. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 238:168-178.
- NAS (National Institute of Agricultural Sciences). 2017. Fertilizer recommendation for Each Crop in Soil Testing. pp. 16-17. NAS, Wanju, Korea. [in Korean]
- Schütz H, Holzappel-Pschorn A, Conrad R, Rennenberg H, Seiler W. 1989. A three years continuous record on the influence of daytime, season and fertilizer treatment on methane emission rates from an Italian rice paddy field. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 94:16405-16416.
- Tubiello FN, Salvatore M, Córdor Golec RD, Ferrara A, Rossi S, Biancalani R, Federici S, Jacobs H, Flammini A. 2014. Agriculture, forestry and other land use emissions by sources and removals by sinks: 1990-2011 Analysis. p. 33. FAO, Rome, Italy.
- Wassmann R, Neue HU, Alberto MCR, Lantin RS, Bueno C, Llenaresas D, Arah JRM, Papen H, Seiler W, Rennenberg H. 1996. Fluxes and organic inputs. *Environmental Monitoring Assessment* 42:163-173.
- Yagi K, Minami K. 1990. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields. *Soil Science and Plant Nutrition* 36:599-610.
- Yan X, Yagi K, Akiyama H, Akimoto H. 2005. Statistical analysis of the major variables controlling methane emission from rice fields. *Global Change Biology* 11:1131-1141.