

Research Article



CrossMark

Open Access

완효성 비료를 사용한 논에서의 물관리에 따른 온실가스 배출량 평가

장은빈^{1,2}, 정현철¹, 권효숙¹, 이형석¹, 박혜란¹, 이종문¹, 오택근^{2*}, 이선일^{1*}

¹농촌진흥청 국립농업과학원 기후변화평가과, ²국립충남대학교 생명환경화학과

Effect of Water Management on Greenhouse Gas Emissions from Rice Paddies Using a Slow-release Fertilizer

Eun-Bin Jang^{1,2}, Hyun-Chul Jeong¹, Hyo-Suk Gwon¹, Hyoung-Seok Lee¹, Hye-Ran Park¹, Jong-Mun Lee¹, Taek-Keun Oh^{2*} and Sun-Il Lee^{1*} (¹Climate Change & Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea, ²Department of Bio-Environmental Chemistry, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea)

Received: 24 May 2023/ Revised: 12 June 2023/ Accepted: 20 June 2023

Copyright © 2023 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID

Eun-Bin Jang

<http://orcid.org/0000-0001-5698-7367>

Hyun-Chul Jeong

<http://orcid.org/0000-0003-2556-0808>

Hyo-Suk Gwon

<http://orcid.org/0000-0003-4030-1134>

Hyoung-Seok Lee

<http://orcid.org/0000-0002-7459-0643>

Hye-Ran Park

<http://orcid.org/0000-0001-8249-2149>

Jong-Mun Lee

<https://orcid.org/0000-0003-1269-8277>

Taek-Keun Oh

<http://orcid.org/0000-0003-0215-0427>

Sun-Il Lee

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

Abstract

Methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) are significant contributors to greenhouse gas (GHG) emissions from rice fields. Mid-summer drainage is a commonly practiced water management technique that reduces CH₄ emissions from rice fields. Slow-release fertilizers gradually release nutrients over an extended period and have been shown to reduce N₂O emissions. However, the combined effect of slow-release fertilizer and water management on GHG emissions remains unclear. This study compared GHG emissions from a rice paddy subjected to mid-summer drainage for 10 days (control)

with that of a rice paddy subjected to prolonged mid-summer drainage for 20 days combined with slow-release fertilizer (W+S). Gas sampling was conducted weekly using a closed chamber method. During the rice cultivation period, cumulative CH₄ and N₂O emissions were reduced by 12.3% and 16.2%, respectively, in the W+S treatment compared to the control. Moreover, the W+S treatment exhibited a 1.9% increase in grain yield compared to the control. Under experimental conditions, slow-release fertilizers, in combination with prolonged mid-summer drainage, proved to be the optimal approach for achieving high crop yield while reducing GHG emissions. This represents an effective strategy to mitigate GHG emissions from rice paddy fields.

* Corresponding author: Sun-Il Lee

Phone: +82-63-238-2483; Fax: +82-63-238-3823;

E-mail: silee83@korea.kr

* Co-Corresponding author: Taek-Keun Oh

E-mail: ok5382@cnu.ac.kr

Key words: Methane, Mid-summer drainage, Nitrous oxide, Rice paddy, Slow-released fertilizer

서론

온실가스(Greenhouse gas: 이하 GHG)는 지구의 온실효과를 유발하는 대기 중의 가스 상태 물질로 GHG 농도 증가로 인한 지구온난화와 그에 따른 기후변화가 심화되고 있다. 기후변화는 농업에 있어서 주요 작물 생산에 영향을 미치기 때문에 지속 가능한 농업 생태계 유지를 위해 기후변화를 완화할 수 있는 기술 개발이 필요하다[1,2]. 농업 부문에서 메탄(CH_4)과 아산화질소(N_2O)는 GHG 배출에 상당량 기여하는 물질들이다. CH_4 과 N_2O 의 지구온난화잠재력(Global Warming Potential: 이하 GWP)은 CO_2 대비 각각 25배, 298배(IPCC, 2007)로 전체 GHG 배출에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 저감기술 개발이 필요하다.

CH_4 은 일반적으로 혐기적인 환경에서 유기물이 분해 시 발생한다(IPCC, 2007). 벼 재배를 위한 담수 상태는 혐기적인 조건을 형성하여 CH_4 배출을 증가시킨다[3]. 또한, 전 세계의 인간활동에 의한 배출량의 11%는 벼 논에서 발생하는 것으로 알려져 있으며(IPCC, 2013), CH_4 배출을 감축하기 위한 효과적인 방법으로 논물 관리기술이 있다[4]. 우리나라는 논물 관리에 의한 CH_4 감축 기술을 개발 및 적용하고 있다(GIR, 2019). [3]은 중간물떼기 시기를 조절하여, 습윤 및 건조과정을 통해 담수 기간을 줄여 CH_4 배출을 줄이는 효과를 평가하였으며 [5]는 일본에서 중간물떼기 기간 연장 시, CH_4 배출이 69.5%만큼 줄었다고 보고하였으나 [6]은 중간물떼기로 인하여 N_2O 배출이 상대적으로 증가한다고 하였다.

N_2O 는 질소순환과정 중 질산화 및 탈질 과정의 중간 산물로[7], 논에서의 벼 재배 과정 중, 중간물떼기 시 토양 내 산소공급이 상대적으로 증가하여 질산화 등에 의해 N_2O 배출이 증가할 수 있다[8]. 중간물떼기로 CH_4 배출은 낮아질 수 있지만, N_2O 배출은 증가할 수 있어 이를 보완하는 연구가 필요하다. 농경지에서 발생하는 N_2O 의 45% ($2.3 \text{ Tg N}_2\text{O-N/yr}$)는 질소질 비료 사용으로부터 유래하는 것으로 알려져 있다[9]. 우리나라에서 주로 사용하는 요소 비료는 속효성으로, 토양에 시용 후 빠르게 질소 공급 효과를 나타내지만 비료 효과를 나타내는 기간이 짧고 손실률이 높다[8]. 반면에 완효성 비료는 전량 기비로 1회 시용 하였을 때 비료에 의한 염의 역작용이 없고 작물의 생육 기간 중 질소양분이 완만한 속도로 용출되어 이용효율이 높다. 따라서 완효성 비료는 시용량과 노동력을 줄일 수 있고, N_2O 배출을 낮출 수 있다[8,10].

[11]에 따르면 일본에서의 벼 재배는 중간물떼기 기간에 따라 CH_4 배출 저감에 영향을 주고, 질소 비료 시비량을 낮춤으로써 N_2O 배출 저감에 영향을 준다고 하였다. 이는 중간물떼기 및 질소질 비료 시용량에 따라 GHG 배출량을 낮출 수 있고, 복합적으로 적용 시 개별적으로 적용하는 것보다 더 효과적인 GHG 배출 저감이 가능할 것으로 생각된다.

국내에서는 중간물떼기 또는 볏짚, 녹비 등의 여러 유기물 시용에 따른 GHG 배출량 비교 평가 및 완효성 비료 투입에 따른 N_2O 배출 저감 평가 연구는 많이 진행되었다 [8, 12-15]. 그러나, 중간물떼기 연장과 완효성 비료를 복합 적용한 GHG 배출 저감 효과 및 작물 수량성에 대한 연구는 미흡한 실정이다[14]. 따라서 본 연구는 벼 재배 시 발생하는 GHG 배출을 낮추기 위해 중간물떼기를 연장하고 이와 함께 완효성 비료 처리에 따른 GHG 감축 효과 및 벼 수량에 대하여 검토하였다.

재료 및 방법

공시토양

본 연구는 20년 이상 벼를 재배한 시험포장을(위도 $35^\circ 48' 38.8''\text{N}$ 경도 $126^\circ 51' 21.0''\text{E}$) 선정하여 실험을 수행하였다. 시험토양은 미사질양토로 수분 보유력이 우수하고 점질 토양에 비해 배수가 양호하기 때문에 논 농사에 유리한 토양이다. 화학성 특성은 Table 1과 같다.

토양의 화학성 분석은 채취한 토양 시료를 풍건 시킨 후, 2 mm 체를 통과시켜 토양화학분석법(NAAS, 2010)을 토대로 실시하였다. 토양 pH는 토양과 증류수를 1:5 (w/v)로 혼합하여 30분 교반한 후, pH meter (Orison 4 star, Thermo, Singapore)을 이용하여 측정하였고, EC는 pH 측정 후 토양 용액을 #42 여과지를 이용하여 여과 후 EC meter (Orison 4 star, Thermo, Singapore)를 이용하여 측정하였다. 총 질소 함량은 CN analyzer (Vario Max CN, Elementar, Germany)를 활용하여 분석하였다. 유효 인산은 Lancaster 법을 이용하여 720 nm 파장에서 비색계(AU/CARY 300, Varian Australia)로 분석하였고, 유효 규산은 700 nm 파장에서 비색계(AU/CARY 300, Varian Australia)를 이용하여 측정하였다. 치환성 양이온은 1M $\text{NH}_4 \text{OAC}$ (pH 7.0) 용액으로 침출 후 여과하여 유도결합플라즈마분광기(Potima 7300 DV, Perkin Elmer, USA)를 이용하여 분석하였다.

Table 1. Chemical properties* of soils in rice paddy field

pH _{water} (1:5)	EC (dS/m)	TC (g/kg)	TN (g/kg)	Av. P_2O_5 (mg/kg)	Av. SiO_2 (mg/kg)	K	Ca	Mg
						Ex. Cation (cmol _c /kg)		
6.8	0.52	20.50	2.04	49.8	581.0	0.23	6.41	1.95

*EC : Electrical conductivity, TC : Total carbon, TN : Total nitrogen, Av. P_2O_5 : Available phosphorus, Av. SiO_2 : Available silicate, Ex. Cation : Exchangeable cation, K : Potassium, Ca : Calcium, Mg : Magnesium

작물 재배 및 물관리

시험에 사용한 벼는 신동진벼(*Oryza sativa* L. var)로, 5월 22일 어린모를 30 × 20 cm 채식거리로 기계 이앙하였다. 대조구(Control)는 이앙 30일 후 무효분얼이 일어나는 시기에 중간물떼기를 10일간 적용하고, 화학비료를 질소, 인산, 칼리를 각각 11.8, 4.5, 5.7 kg/10a 기준으로 투입하였다. 질소는 요소비료를 밀거름, 가지거름, 이삭거름으로 3회 분시하였고, 인산은 용성인비를 밀거름으로 1회, 칼리는 염화가리를 밀거름, 이삭거름으로 2회 분시하였다. 중간물떼기 연장과 완효성비료를 적용한 복합기술(Water management + Slow-release fertilizer: 이하 W+S) 처리구는 Control과 동일한 시점에 중간물떼기를 시작하고 기간은 2배 연장하여 20일간 적용하였다. 비료로는 완효성비료(질소-인산-칼리 : 30-8-8)는 토양에 질소 투입량 9 kg/10a가 되도록 밀거름으로 1회 투입하였다. Control과 W+S처리구에 중간물떼기 기간의 차이를 적용한 이후 벼 수확 작업을 용이하게 하기 위해 수확 한 달 전 완전물떼기를 하고, 벼 수확은 알곡의 수분함량을 측정 한 후 전체 수확 무게를 측정하여 단위면적당 수확량을 산출하였다.

CH₄ 및 N₂O 측정 및 분석

CH₄과 N₂O 배출 측정을 위해 폐쇄형 챔버법을 이용하였다[16]. 챔버의 밑면적이 0.36 m² (0.6 × 0.6), 높이 1.2m의 투명 PVC 소재로 만들어졌다. 벼 재배기간 동안 주 1회 이상 가스 시료를 채취하였다. 채취한 가스 시료는 가스크로마토그래피(Gas Chromatography)를 이용하여 정량 분석하였다. 측정 장비의 자세한 사양은 Table 2와 같다. GHG 하루 배출량과 누적 배출량은 산정식은 각각 식 1과 식 2에 적용하여 산출하였다.

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

$$F = \text{CH}_4 \text{ or N}_2\text{O flux (mg/m}^2 \cdot \text{h)}$$

ρ = gas density (mg/L)

V = volume of chamber (m³)

A = surface area of chamber (m²)

$\Delta c/\Delta t$ = rate of increase of gas concentration (μL/L · h)

T = absolute temperature (273 + mean temperature in chamber)

$$\text{Seasonal CH}_4 \text{ or N}_2\text{O flux} = \sum_i^n (F_i \times D_i) \quad (\text{식 2})$$

F_i = the rate of flux (g/m² · d) in the i^{th} sampling interval

D_i = the number of days in the i^{th} sampling interval

n = the number of sampling intervals

벼 논에서 배출된 CH₄과 N₂O에 식 3을 이용하여 CO₂ 당량으로 환산하여 GWP를 나타냈다.

$$\text{GWP (kg CO}_2\text{eqv/ha)} = 27.2 \times \text{CH}_4 + 298 \times \text{N}_2\text{O} \quad (\text{식 3})$$

GHGI (Greenhouse gas intensity)는 수량 당 GHG 발생량을 의미하며, 식 3을 이용하여 구한 GWP를 식 4에 적용하여 구하였다.

$$\text{GHGI (kg CO}_2\text{eqv/kg grain)} = \text{GWP} / \text{Grain yield} \quad (\text{식 4})$$

시험포장 내 기상

벼 재배기간 동안 일 강수량 및 평균 대기 온도는 Fig. 1과 같다. 강수량은 6월 상순과 하순, 7월 중순과 8월 중순, 9월 상순에 집중되는 계절적 특성을 나타냈다. 월별 강수량을 분석하면 6월, 7월, 8월, 9월 각각 175.0 mm, 134.0 mm,

Table 2. Analytical conditions of gas chromatography measurement for CH₄ and N₂O

Gas		CH ₄	N ₂ O
Detector		FID	μECD
Packing material		Hayesep Q	Hayesep Q
Column	Materials	stainless steel	UltiMetal
	O.D × length	1/8' × 3.66 m	1/8' × 1.83 m
Carrier gas		N ₂	CH ₄ 5.0% / Ar
Flow rate	Carrier	23 ml/min	21 ml/min
	Make up	2 ml/min	2 ml/min
Temperature	oven	60°C	60°C
	Detector	250°C	350°C
Retention time		9 min	9 min
Concentration of calibration gas		1.9 and 60 ppmv CH ₄ in N ₂	0.1 and 0.9 ppmv N ₂ O in N ₂
Loop		2 ml	2 ml

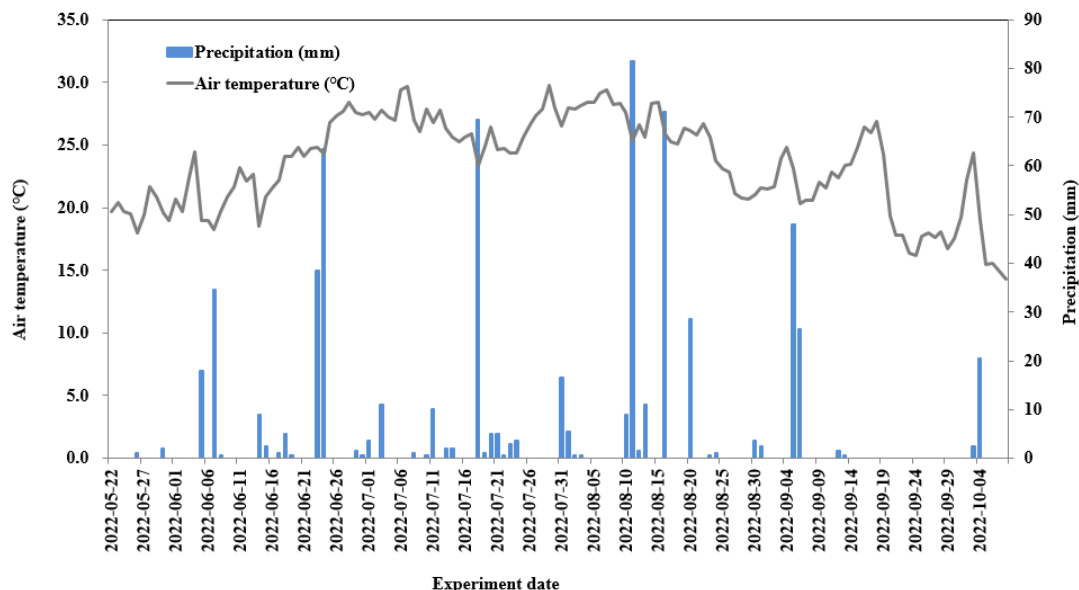


Fig. 1. Rainfall and air temperature during rice cultivation period.

216.5 mm, 76.5 mm를 나타냈고, 지난 10년간 평년대비 6월 강수량은 76.8 mm 증가하였지만 7월 강수량은 118.9 mm 감소하는 경향을 나타냈다.

대기 평균 온도는 벼 재배기간 동안 계절 특성상 7, 8월에 높게 관측되었고, 9월 중순부터 점차 낮아지는 것을 볼 수 있다. 월별 평균 대기온도를 분석하면 6월, 7월, 8월, 9월 각각 23.1°C, 26.6°C, 25.8°C, 21.1°C를 나타냈다. 지난 10년간 평년대비 6월, 7월, 9월 각각 0.9°C, 0.9°C, 0.3°C 증가하였고 8월은 0.2°C 감소하였다. 평년대비 6월과 7월의 대기평균온도가 크게 상승함을 확인할 수 있었다.

통계분석

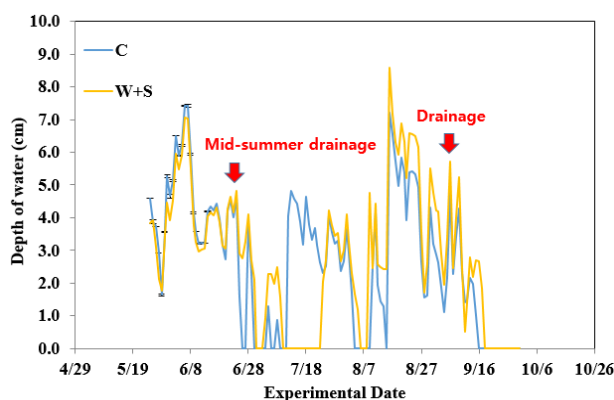
벼 재배 기간 동안 중간물떼기와 완효성 비료의 복합 적용에 따른 GHG 배출량 비교는 XLSTAT BASIC+ (Annual

version : 2023)를 이용하여 통계분석 하였다. 처리 간의 차이와 벼의 생육을 시기별로 활착기, 분얼기, 생장기, 등숙기로 구분하여 이원 분산분석(Two-way ANOVA)을 실시하였다. 또한, F-test 값이 $p < 0.05$ 의 범위에서 유의한 경우에만 Duncan's multiple range test를 실시하였다.

결과 및 고찰

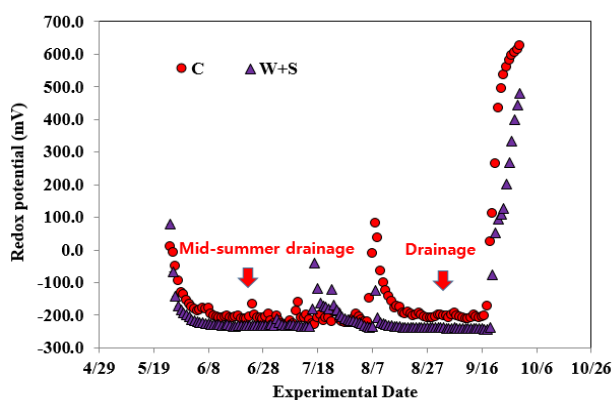
담수위 및 토양환경변화

GHG 발생과 관련 있는 환경인자인 물관리에 따른 담수위 변화와 토양의 산화환원전위(Eh value) 변화를 측정하였다(Fig. 2, 3). 담수위는 중간물떼기, 완전물떼기 등의 물관리와 기상 및 영농 관리의 영향으로 변화가 나타났다. 토양 Eh는 담수위의 영향을 받아 담수위가 2 cm 이상이면 논 토양의



*C : Contol, W+S : Water management + Slow-release fertilizer

Fig 2. Depth of water in the field during rice cultivation period.



*C : Contol, W+S : Water management + Slow-release fertilizer

Fig 3. Redox potential of soil during rice cultivation period.

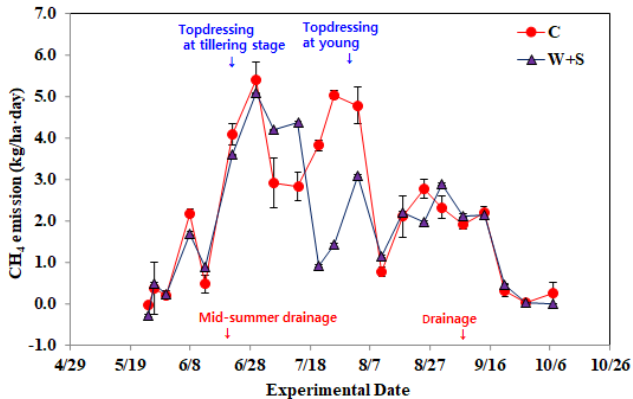
Eh는 -200 mV 이하로 혐기적인 환경이 되어 환원 상태를 나타냈다.

벼 재배 기간 중, 중간물떼기를 10일간 적용한 Control에 비하여 중간물떼기 20일 적용한 W+S 처리구에서 Eh는 증가하는 경향을 나타냈다. 중간물떼기 후 재답수를 하였을 때 토양 Eh는 다시 감소하여 -200 mV 이하의 값을 나타냈다. 8월 10일경 30 mm 이상의 집중 호우가 관측되었으며(Fig. 1), 이를 대비하여 모든 처리구에 낙수를 하였고, 일시적으로 토양 Eh는 82.7 mV까지 증가하였다(Fig. 2, 3). 이는 물관리가 토양 Eh의 값에 영향을 주는 것으로 생각된다.

수확을 위해 모든 처리구에 완전물떼기를 실시하였고 답수위는 감소하여 전체적으로 높은 Eh 값을 나타냈다. 이는 논물 배수 시 토양 Eh는 산화 상태가 되고, 낙수 시에는 환원 상태가 되어 낮은 Eh 값을 나타낸 [17]의 연구와 유사하였다. 벼 재배 기간 중, 중간물떼기로 인한 답수위의 변화는 토양 Eh 값에 영향을 주고, 답수위가 높을수록 토양의 Eh 값은 낮아지는 부의 상관관계를 나타낸다[17,18].

CH₄ 배출 특성

CH₄은 혐기적 환경에서 미생물에 의해 탄소를 포함한 유기물이 분해되어 발생한다[19]. 벼 재배 기간 중의 처리구별 CH₄ 배출량의 변화는 Fig. 4와 같다. 벼 이앙을 위해 답수를 하였으며, 답수 기간 동안 산소 공급이 토양에 차단되어, Eh



*C : Control, W+S : Water management + Slow-release fertilizer

Fig 4. CH₄ emission according to treatment during rice cultivation period. Values are the means of triplicate and vertical bars are standard errors of the means (n=3). Error bars are often too small to be depicted.

는 급격히 감소하여 -200 mV 부근을 나타내었다(Fig. 3). 그에 따라, CH₄ 배출은 증가하였으며, 벼 이앙 후 약 45일경 가장 높은 배출을 나타냈다. 답수에 따른 Eh 변화와 CH₄ 배출을 비교 평가한, [18]의 연구와 유사한 결과를 보였다. 즉, 논 토양이 답수되었을 때 토양 Eh 변화와 그에 밀접하게 영향을 받는 CH₄ 배출양상을 확인하였다.

중간물떼기 기간 중 모든 처리구에서 CH₄ 배출량은 점차 감소하였다. 중간물떼기 이후 재답수를 실시하자 초기 2주 동안 Control과 W+S 처리구에서 각각 $3.8 \sim 5.0$, $0.9 \sim 3.1$ kg/ha·day 범위로 CH₄이 배출되었으나, 중간물떼기 이전처럼 높은 CH₄ 배출량은 보이지 않았다. 전체 벼 생육 기간 동안 CH₄ 배출량은 Control 보다 W+S 처리구에서 낮았다. 이는 중간물떼기를 기간을 연장함에 따라, W+S 처리구는 토양환경이 상대적으로 호기성 상태로 유지되어 CH₄ 생성균의 활성도가 감소하고 CH₄ 산화균의 활성도가 높아져 더 낮게 배출된 것으로 판단된다[20,21].

벼 수확을 위한 완전물떼기 기간 중 토양은 호기성 상태가 되어 1.0 kg/ha·day 이하의 기저 배출 형태를 나타냈다. 이는 [22]의 결과와 유사하였다. 이러한 논물 관리로 토양이 호기성 상태가 되면 토양 Eh의 값은 양의 값을 띄고, 산화 상태가 유지되어 CH₄ 배출을 낮출 수 있다[22]. 이를 통해 토양의 산화환원전위는 CH₄ 배출과 음의 상관관계를 가지고, 중간물떼기 기간을 연장함으로써 CH₄ 배출 저감에 영향을 미치는 것으로 생각된다[23].

벼의 생육 시기별로 분류하여 ANOVA 분석 결과는 Table 3과 같다. CH₄ 배출은 처리구별 생식생장기에 유의미한 차이가 있는 것으로 나타났다. 벼의 분얼기 기간의 중간물떼기로 인해 미생물의 유기물 분해를 억제하여 CH₄ 생성균이 이용하는 유기물의 가용성에 영향을 줄 수 있다[23]. 이에, 분얼기 기간의 중간물떼기를 관행(5~10일)보다 길게 함으로써 생식생장기 기간의 CH₄ 배출 저감에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이는 [24]의 연구 결과와 유사한 것으로 나타났다.

N₂O 배출 특성

물관리 및 비료 관리 복합 적용에 따른 처리구별 N₂O 배출은 Fig. 5와 같다. 벼 재배 초기에 N₂O는 높게 배출되었다. 이는 밀거름으로 투입된 질소원 함량이 높아 N₂O의 배출량이 증가한 것으로 생각된다[15]. N₂O는 Control과 W+S 처리구에서 각각 $0.3 \sim 20.7$, $0.5 \sim 15.8$ g/ha·day 범위로 배출되었다. Control은 질소질 비료로 요소가 투입되었고, 이는

Table 3. CH₄ emission (kg/ha) according to treatment during rice growing stage

Treatment	Rooting stage	Tillering stage	Reproductive stage	Ripening stage
Control	0.06 ± 0.07^a	7.38 ± 1.11^a	22.19 ± 0.88^a	30.06 ± 0.61^a
W+S*	0.02 ± 0.05^a	7.30 ± 1.18^a	18.87 ± 0.61^b	26.21 ± 0.62^a

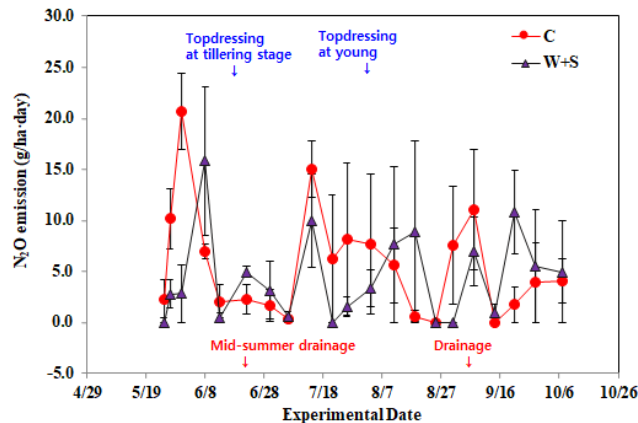
Values are the means with standard errors in parentheses (n=3), and those followed by a different letter are significantly different at $\alpha=0.05$ between treatments.

*W+S : Water management + Slow-release fertilizer

이양 초기에 분해되고 산화되기 때문에 N_2O 배출을 증가시킨 것으로 사료되며, W+S 처리구는 완효성 비료를 1회만 사용하여 질소의 유실이 탈질을 경감시켜, N_2O 배출을 낮춘 것으로 판단된다[10,25].

중간물떼기를 적용함에 따라 초기에 낮은 배출량을 보였지만 후에 일시적으로 높은 배출량을 보였다. 중간물떼기 후 담수 수행 시, N_2O 는 다시 감소하였다. 벼 재배 기간 중, 토양 수분 함량에 따라 질화 및 탈질 과정의 토양 질소순환이 일어난다. 담수 시, 혐기적 환경으로 질소 순환 과정이 줄어들어 N_2O 배출은 상대적으로 낮지만, 중간물떼기 시, 호기적 환경으로 N_2O 배출이 증가한다[26-29]. 벼 수확을 위한 완전물떼기 기간 중, W+S 처리구는 Control에 비하여 상대적으로 높은 배출량을 나타냈다.

완효성 비료는 모든 입자가 코팅되어 있어 토양환경 내에서 질소무기화 과정이 빠르게 진행되지 않아 용출 등의 유실을 줄이며 비료성분이 서서히 녹아 나오기 때문에 작물생육 과정동안 지속적으로 공급되는 특성이 있다. 이에 완전물떼기로 인해 토양이 호기성 상태가 되어, 미생물의 활동에 의해 남아있는 질소가 대기 중의 산소와 반응하여 N_2O 배출이 높아진 것으로 생각된다. 또한, NH_4^{4+} -N 및 NO_3^{-} -N의 농도가 높아 상대적으로 높은 N_2O 배출이 관찰된 [12]의 연구 결과와 유사하게 나타났다. 이에 따라, N_2O 배출의 반응은 질소 비료 시비량과 양의 관계를 가지고[30], 비료 시비량 증가 시,



*C : Control, W+S : Water management + Slow-release fertilizer

Fig. 5. N_2O emission according to treatment during rice cultivation period. Values are the means of triplicate and vertical bars are standard errors of the means (n=3).

비료 효율성이 감소하고 GHG 배출이 증가하는 것으로 나타났다[31,32].

벼의 생육 시기별로 분류하여 ANOVA 분석 결과는 Table 4와 같다. 배출은 처리구별 유의미한 차이가 나타나지 않았다. 완효성 비료는 대기의 온도 및 습도에 영향을 받기 때문에[13], 벼 생육 시기 동안의 고온 및 강우로 인한 습한 대기 조건과 중간물떼기의 영향이 약해짐으로써 질소 및 N_2O 배출에 영향을 준 것으로 생각된다.

벼의 수확량

벼의 수분함량 15% 기준 정조 수량은 Table 5와 같다. 벼 정조 수량은 C 처리구는 738 t/ha, W+S 처리구는 751.0 t/ha로 완효성 비료를 사용한 W+S 처리구가 C 처리구 보다 많았다. 이는 완효성 비료와 요소 비료를 동일한 질소 비율로 시비할 경우, 완효성 비료가 요소 비료보다 벼의 수량이 높고, 완효성 비료를 질소 비율의 50%를 적용하더라도 요소 비료 질소 비율의 100%와 동일한 수량을 유지한 [33]의 결과와 유사한 결과를 나타냈다. 이에 W+S 처리구는 완효성 비료를 사용하여 질소 이용효율이 높아져 작물 수량이 증가한 것으로 판단된다[33].

GWP 및 GHGI

연간 누적 GHG 배출량 및 지구 온난화 지수는 Table 5와 같다. CH_4 는 GWP의 주요 기여자로, 논에 유기 기질이 상대적으로 많을수록 CH_4 생성균의 이상적인 환경이 되어 혐기성 분해를 통해 CH_4 배출이 증가한다. 또한, 무분별한 질소 질 비료 시비는 작물 수확량 감소 및 GHG 배출과 GHGI의 증가 원인이다[34]. 중간물떼기 기간 중 논 토양의 산소 농도가 높아져 호기성 환경이 발달되면 N_2O 의 배출이 증가하고, 반대로 CH_4 배출은 낮아져 GWP는 저감된다[22,23].

본 연구에서 CH_4 및 N_2O 의 누적 합계 배출량을 CO_2 당량으로 환산하여 비교하면, W+S 처리구는 5.99 t CO_2 -eq/ha, Control은 6.84 t CO_2 -eq/ha로 Control 대비 W+S 처리구에서 12.4% 감소하였다. W+S 처리구는 중간물떼기 20일을 수행함으로써 CH_4 배출 저감에 영향을 주었고, 요소 비료 대신 완효성 비료를 1회 시비함으로써 N_2O 배출 저감에 영향을 주어 W+S 처리구에서 GWP가 감소한 것으로 생각된다. 이는 중간물떼기로 N_2O 배출이 약간 증가하였지만 이를 상쇄할 만큼 CH_4 배출이 낮아져 GWP가 감소한 [35], [18]와 유사한 결과를 보였다.

작물 수량 당 GHG 배출량을 나타내는 GHGI는 Table 5

Table 4. N_2O emission (g/ha) according to treatment during rice growing stage

Treatment	Rooting stage	Tillering stage	Reproductive stage	Ripening stage
Control	3.23±1.30 ^a	26.06±1.97 ^a	51.43±3.58 ^a	68.08±4.90 ^a
W+S*	0.56±0.34 ^a	18.07±2.43 ^a	34.86±3.10 ^a	51.57±2.77 ^a

Values are the means with standard errors in parentheses (n=3), and those followed by a different letter are significantly different at $\alpha=0.05$ between treatments.

*W+S : Water management + Slow-release fertilizer

Table 5. Total GWP(Global warming potential), Grain yield according to treatment during rice cultivation period

Treatment	Total GWP (t CO ₂ -eq/ha)	Grain yield (t/ha)	GHGI**
Control	6.84	7.38	0.93
W+S*	5.99	7.52	0.80

*W+S : Water management + Slow-release fertilizer

**GHGI : Greenhouse gas intensity

와 같다. W+S 처리구는 0.80, Control은 0.93으로 W+S 처리구에서 GHGI가 더 낮았다. 이는 GHG 배출 완화를 위해 W+S 처리구에 중간물떼기 20일 적용 및 완효성 비료의 복합 적용으로 낮은 GWP와 높은 수량에 의하여 Control에 비해 GHGI 값이 낮게 나타난 것으로 판단된다. [31]에서도 요소 비료를 시비하였을 때보다, 완효성 비료 시비 시 GHGI가 약 29.8% 감소하였다. 완효성 비료를 통해 효과적인 N₂O 배출 저감과 작물 수량 증가 및 GHGI 저감, 식량 안보 확보를 위해 환경친화적으로 질소 관리를 할 수 있다[31].

본 연구에서는 중간물떼기를 20일 적용함으로써 농업용수 절약 및 CH₄ 배출량 감소에 효과적인 영향을 주는 것으로 나타났다. 그러나, 완효성 비료 사용 시 노동력을 절감하고 작물 수량성이 증가할 수 있지만, N₂O 배출량의 유의미한 차이는 나타나지 않았다. 이는 강우량과 같은 환경적 요인 및 인위적 요인의 영향을 받은 것으로 생각되며 이에 따른 GHG 배출 저감에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Note

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement

This work was carried out by the support of Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (PJ01559201), Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Choi J, Uphoff N, Kim J, Lee S (2019) Greenhouse gas reduction from paddy by environmentally-friendly intermittent irrigation: A review. *Journal of Wetlands Research*, 21, 43-56. <http://doi.org/10.17663/JWR.2019.21.1.043>
- Foley JA, Ramankutty N, Brauman KA, Cassidy ES, Gerber JS, Johnston M, Muller ND, O'Connell C, Ray DK et al. (2011) Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478, 337-342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- Lagomarsino A, Agnelli AE, Linquist B, Adviento-Borbe MA, Agnelli A, Gavina G, Ravaglia S and Ferrara RM (2016) Alternate wetting and drying of rice reduced CH₄ emissions but triggered N₂O peaks in a clayey soil of central Italy. *Pedosphere*, 26, 533-548. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60063-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60063-7)
- Minamikawa K, Sakai N, Yagi K (2006) Methane emission from paddy fields and its mitigation options on a field scale. *Microbes Environment*, 21, 135-147. <https://doi.org/10.1264/jsme2.21.135>
- Itoh M, Sudo S, Mori S, Satio H, Yoshida T, Shiratori Y, Suga S, Yoshikawa N, Suzue Y et al. (2011) Mitigation of methane emissions from paddy fields by prolonging midseason drainage. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 141, 359-372. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.019>
- Haque MM, Kim GW, Kim PJ, and Kim SY (2016) Comparison of net global warming potential between continuous flooding and midseason drainage in monsoon region paddy during rice cropping. *Field Crops Research*, 193:133-142. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.04.007>
- Butterbach-Bahl K, Baggs EM, Dannenmann M, Kiese R, Ze-chmeister-Boltenstern S (2013) Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? *Philosophical Transactions of Royal Society Biological Science*, 368, 20130122. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0122>
- Gwon HS, Kim GY, Lee SI, Lee JS, Choi EJ (2020) Estimation of greenhouse gas emission in rice paddy soil under slow released N fertilizer application: Annual investigation. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 53, 575-588. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2020.53.4.575>
- Syakila A, Kroeze C (2011) The global nitrous oxide budget revisited. *Greenhouse gas Measurement and Management*, 1:17-26. <https://doi.org/10.3763/ghgmm.2010.0007>
- 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.

- The Korean Society of Environmental Agriculture, 21.2.136. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2002.21.2.136>
11. Sawamoto TK, Nishimura S, Akiyama H, Sudo S, Yagi K (2004) Methane and nitrous oxide emissions from a paddy field with Japanese conventional water management and fertilizer application. *Global Biogeochemical Cycles*, 18, GB2017. <https://doi.org/10.1029/2003GB002207>
 12. Kim GY, Lee SB, Lee JS, Choi EJ, Ryu JH (2012) Mitigation of greenhouse gases by water management of SRI (System of Rice Intensification) in rice paddy fields. *Korea Society of Soil Science and Fertilizer*, 45, 1173-1178. <http://doi.org/10.7745/KJSSF.2012.45.6.1173>
 13. Kim GY, Park WK, Lee SI, Lee JS, Choi EJ, Na US, Jang HY, Suh SU (2015) Mitigation of greenhouse gas emissions (GHGs) by water management methods in rice paddy field. *Korea Society of Soil Science and Fertilizer*, 48, 477-484. <http://doi.org/10.7745/KJSSF.2015.48.5.477>
 14. 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, 463-467. <http://doi.org/10.7744/KJOAS.20170055>
 15. Liang XQ, Li H, Wang SX, Ye YS, Ji YJ, Tian GM, Kessel C, Linquist BA (2013) Nitrogen management to reduce yield-scaled global warming potential in rice. *Field Crops Research*, 146, 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.03.002>
 16. Kang NG, Ju OJ, Lim GJ (2020) Closed static chamber methods for measurement of methane fluxes from a rice paddy : A review. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 22, 79-91. <http://doi.org/10.5532/KJAFM.2020.22.2.79>
 17. Kim YH, Kim JS, Jang H (2010) Effect of ponded water on variation of redox potential and phosphorus concentration in a paddy field. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 52, 47-52. <https://doi.org/10.5389/KSAE.2010.52.5.047>
 18. Jiao Z, Hou A, Shi Y and Huang G, Wang Y, Chen X (2007) Water management influencing methane and nitrous oxide emissions from rice field in relation to soil redox and microbial community. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 37: 1889-1903. <https://doi.org/10.1080/00103620600767124>
 19. Conrad R (2002) Control of microbial methane production in wetland rice fields. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 64, 59-69. <http://doi.org/10.1023/A:1021178713988>
 20. Choi J, Kim G, Park W, Shin M, Choi Y, Lee S, Kim S, Yan D (2014) Effect SRI water management on water quality and greenhouse gas emission in Korea. *Irrigation and Drainage*, 63: 263-270. <https://doi.org/10.1002/ird.1843>
 21. Chu G, Wang Z, Zhang H, Liu L, Yang J, Zhang J (2015) Alternate wetting and moderate drying increase rice yield and reduces methane emission in paddy field with wheat straw residue incorporation. *Food Energy Security*, 4: 238-254. <https://doi.org/10.1002/fes3.66>
 22. Meijide A, Gruening C, Goded I, Seufert G, Cescatti A (2017) Water management reduces greenhouse gas emissions in a Mediterranean rice paddy field. *Agriculture and Ecosystems and Environment*, 238, 168-178. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.017>
 23. Bertora C, Matteo P, Pelissetti S, Pullicino DS, Celi L, Miniotti E, Romani M, Sacco D (2016) Greenhouse gas emissions as affected by different water management practices in temperate rice paddies. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 232, 17-28. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.07.021>
 24. Tyagi L, Kumari B, Singh S.N (2010) Water management – A tool for methane mitigation from irrigated paddy fields. *Science of the Total Environment*, 408, 1087-1090. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.09.010>
 25. Shcherbak I, Millar N, Robertson G.P (2014) Global metaanalysis of the nonlinear response of soil nitrous oxide (N₂O) emissions to fertilizer nitrogen. *Biological Sciences*, 111, 9199-9204. <https://doi.org/10.1073/pnas.1322434111>
 26. Davidson EA, Keller M, Erickson HE, Verchot LV, Veldkamp E (2000) Testing a conceptual model of soil emissions of nitrous and nitric oxide: using two functions based on soil nitrogen availability and soil water content, the hole-in-the-pipe model characterizes a large fraction of the observed variation of nitric oxide and nitrous oxide emissions from soils. *Bioscience*, 50, 667-680. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2000\)050\[0667:TACMOS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2000)050[0667:TACMOS]2.0.CO;2)
 27. Haque MM, Kim SY, Ali MA, Kim PJ (2015) Contribution of greenhouse gas emissions during cropping and fallow seasons on total global warming potential in mono-rice paddy soils. *Plant and Soil*, 387, 251-264. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2287-2>

28. Oo AZ, Sudo S, Fumoto T, Inubushi K, Ono K, Yamamoto A, Bellingrath-Kimura SD, Win KT, Umamageswari C et al. (2020) Field validation of the DNDC-rice model for methane and nitrous oxide emissions from Double-Cropping paddy rice under different irrigation Practices in Tamil Nadu, India. *Agriculture*, 2020, 10, 355. <http://doi.org/10.3390/agriculture10080355>
29. Akiyama H, Yagi K, Yan X (2005) Direct N₂O emissions from rice paddy fields: summary of available data. *Global Biogeochemical Cycles*, 19, 1-10. <http://doi.org/10.1029/2004GB002378>
30. Liu C, Wang K, Zheng X (2012) Response of N₂O CH₄ fluxes to fertilizer nitrogen addition rates in an irrigated wheat-maize cropping system in northern China. *Biogeosciences*, 9, 839-850. <https://doi.org/10.5194/bg-9-839-2012>
31. Lyu X, Wang T, Ma ZM, Zhao CY, Siddique KD, Ju XT (2019) Enhanced efficient nitrogen fertilizers maintain yields and mitigate global warming potential in an intensified spring wheat system. *Field crops Research*, 2017624. <http://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107624>
32. Feng J, Chen Cq, Zhang Y, Song Z, Deng A, Zheng CY, Zhang W (2013) Impacts of cropping practices on yield-scaled greenhouse gas emissions from rice fields in Chian: A meta-analysis. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 220-228. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.009>
33. Genga J, Suna Y, Zhanga M, Li a C, Yanga Y, Liua Z, Li S (2015) Long-term effects of controlled release urea application on crop yields and soil fertility under rice-oil seed rape rotation system. *Field crops Research*, 184, 65-73. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.09.003>
34. Guo C, Ren T, Li P, Wang B, Zou J, Hussain S, Cong R, Wu L, Lu J, Li X (2019) Producing more grain yield of rice with less ammonia volatilization and greenhouse gases emission using slow/controlled-release urea. *Environmental Science and Pollution Research*, 26:2569-2579. <http://doi.org/10.1007/s11356-018-3792-2>
35. Liang K, Zhong X, Huang N, Pan J, Tian K, Liu Y (2016) Grain Yield, water productivity and CH₄ emission of irrigated rice in response to water management in south China. *Agricultural Water Management*, 163, 319-331. <http://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.10.015>