Estimation of Greenhouse Gas Emission in Rice Paddy Soil Under Slow Released N Fertilizer Application: Annual Investigation

Hyo-Suk Gwon^{1*}, Gun-Yeob Kim², Sun-Il Lee², Jong-Sik Lee³, and Eun-Jung Choi²

¹Post-doctoral Fellow, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea

²Researcher, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea

³Senior Researcher, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea

*Corresponding author: gwonhs@korea.kr

ABSTRACT

Received: November 2, 2020

Revised: November 28, 2020

Accepted: November 30, 2020

ORCID

Hyo-Suk Gwon

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

Gun-Yeob Kim

<https://orcid.org/0000-0001-8346-895X>

Sun-Il Lee

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

Jong-Sik Lee

<https://orcid.org/0000-0002-9101-6811>

Eun-Jung Choi

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

Intermittent drainage can reduce methane (CH₄) emission from rice paddy soils, but nitrous oxide (N₂O) emission can increase. We believe that the slow released N fertilizer can mitigate N₂O emissions by reducing N lost to the environment. In this study, we tried to assess the influence of slow N fertilizer on effective greenhouse gas (GHG) reduction. We installed three different treatments, urea (U) treatment, controlled release fertilizer (CRF) treatment, and hairy vetch with urea (HV) treatment. The emission rates of CH₄ and N₂O were monitored using the closed chamber method during cropping and fallow season. The grain yield was investigated to calculate yield scaled greenhouse gas intensity (GHGI). Compared with U treatment, CH₄ emission was reduced in CRF but increased in HV treatment. In contrast, N₂O emission was increased in CRF but reduced in HV treatment. Grain yield was increased in CRF and HV treatment than U treatment. The GHGI was the lowest in CRF treatment by high grain yield and low GHG emission. In contrast, GHGI was the highest in HV treatment due to increased CH₄ emission. In conclusion, controlled release fertilizer can effectively reduce GHG emission. However, CRF application increased N₂O emissions during the fallow season, and further investigation is needed to determine whether this is due to the effect of fertilizer residues. In addition, due to field experiments that are easy to be influenced by the environmental condition, it seems necessary to verify the research results through additional investigations over many years.

Keywords: Rice paddy, Nitrogen fertilizer, Controlled release fertilizer, Hairy vetch, Greenhouse gas, Greenhouse gas intensity

Grain yield, total GWP and GHGI during annual season in rice paddy under difference type of nitrogen fertilizer application.

Treatment	Grain yield (kg ha ⁻¹)	CH ₄	N ₂ O	Total GWP	GHGI
		(kg CO ₂ -eq. ha ⁻¹)			
U	4997b	4220b	2092b	6312b	1.3b
CRF	5324ab	2728c	2395a	5124c	1.0c
HV	5682a	6813a	1883b	8696a	1.5a

Note) Different letters within the same column indicate significant differences at $p < 0.05$ level according to Duncan's multiple range test.

U: Urea fertilizer application

CRF: Controlled release fertilizer application

HV: Hairy vetch + urea fertilizer application

Introduction

우리나라 농경지 면적 중 약 53%는 논으로 (Statistics Korea, 2020), 경종분야에서 배출되는 온실가스의 51%에 해당하는 약 600 만톤 CO₂ eq. 의 메탄 (CH₄)이 논에서 유기물의 혐기적 분해에 의해 배출되는 것으로 알려져 있다 (GIR, 2019). 메탄의 지구온난화지수 (Global warming potential, GWP)는 25로 (IPCC, 2007), 논에서 발생하는 메탄 저감은 전체 온실가스 감축에 있어서 중요한 부분이라고 할 수 있다. 메탄 배출량을 줄이기 위한 여러 방법들 중, 우리나라는 논물관리를 중점으로 한 메탄 감축 기술을 개발 및 적용하고 있다 (GIR, 2019). 대표적인 논물관리 기술에는 중간낙수가 있으며, 우리나라 논 면적의 약 87%에 해당하는 지역에서 벼 재배 시 중간낙수를 실시하고 있다 (GIR, 2019). 그러나 낙수에 의해 토양 내로 공급되는 산소 (O₂) 농도가 증가할 경우 아산화질소의 배출이 증가하는 부작용이 있다 (Haque et al., 2016). 아산화질소의 GWP는 298로 (IPCC, 2007), 소량의 아산화질소 일지라도 전체 온실가스 배출에는 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 이에 대한 대책이 필요하다.

전 세계 농경지에서 발생하는 아산화질소의 45% (2.3 Tg N₂O-N yr⁻¹)는 비료 사용으로부터 유래하는 것으로 알려져 있다 (Syakila and Kroeze, 2011). 이는 토양 내 미생물에 의해 이용되어 질소순환 과정 중 아산화질소가 발생하기 때문으로 (Baggs and Phillipot, 2010), 관련 미생물의 활성은 토양 중 산소농도와 반대되는 공극수분함량 (Water filled pore space, WFPS)을 통해 설명된다 (Linn and Doran, 1984). 일반적으로 WFPS가 30 - 60% 일 때 미생물에 의한 질산화 (Nitrification) 과정 중 아산화질소가 배출되지만, 90% 이상으로 높아지면 대부분의 아산화질소가 탈질화 (Denitrification) 과정 중 질소가스 (N₂)로 완전히 환원되어 아산화질소가 거의 배출되지 않는다 (Ussiri and Lal, 2012). WFPS가 100%에 이르는 담수 상태의 논은 아산화질소 배출의 우려가 거의 없으나, 토양 내 산소 확산이 촉진되는 중간낙수 기간 및 낙수 이후 휴경기에는 아산화질소 배출이 증가할 수 있다. 따라서 벼 재배 특성에 따라 토양 환경이 호기적으로 전환되는 조건에서 증가하는 아산화질소 배출을 감축하기 위한 방안이 필요하다.

우리나라에서 주로 사용하고 있는 요소비료는 대부분이 속효성 무기질 비료로써, 토양에 시용한 이후 즉각적인 질소 공급 효과를 볼 수 있는 반면에 비료 효과의 기간이 짧고 비료 손실률이 높은 편이다 (Lee et al., 2002). 식물이 사용하지 못하고 손실되는 질소는 미생물에 의해 이용, 아산화질소 배출을 증가시킬 우려가 있기 때문에 질소 비료의 용출 속도를 지연시켜 환경으로 유출되는 질소 성분을 제어할 필요가 있다. 지연성 비료 중 무기질 완효성 비료 (Controlled release fertilizer, CRF)는 비료효과가 상대적으로 길고 비료 손실률이 낮으며 (Lee et al., 2005), 질소 성분의 유실과 휘산을 경감하여 토양 외부 환경으로 유실 되어 나타날 수 있는 부작용을 줄일 수 있다 (Azeem et al., 2014; LeMonte et al., 2016). 유기질 비료인 풋거름 작물의 재배 및 환원 역시 속효성 비료를 대체하는 지연성 비료로 활용할 수 있다. 대표적인 콩과의 풋거름작물인 헤어리베치 (*Vicia Villosa R.*)는 질소 비료를 대체하며, 지력을 증진시키는 기능이 있다 (Müller, 1987; Sarrantonio and Scott, 1988; Varco et al., 1989; Singh et al., 1990; Utomo et al., 1990). 그러나 논에 헤어리베치를 환원할 경우, 약 90%가 한 달 내로 무기화되어 벼 재배 중후반의 질소 공급에 차질을 줄 수 있으며 (Lee et al., 2002), 유기물 투입에 의한 메탄 배출의 증가 문제가 발생할 수 있다 (Gwon et al., 2019). 따라서 헤어리베치를 질소 비료원으로 사용할 경우 작물 생산 및 온실가스 발생 문제 등을 최소화 할 필요가 있다.

본 연구에서는 벼 재배 시 중간낙수를 실시하는 논에서 속효성인 질소 비료를 대체하는 완효성 질소 비료 투입을 통해 효율적으로 온실가스 배출을 저감 하고 작물 생산성을 보전하는 방안을 탐색하였다. 속효성인 요소비료에 대하여 무기질 비료로는 완효성 비료 처리구를, 유기질 비료로는 헤어리베치 및 요소비료 혼합 처리구를 설치하여 연중 온실가스 (CH₄, N₂O) 배출량 및 벼 수량을 조사하고, 벼 수량 당 배출되는 온실가스 발생량 (Greenhouse gas intensity)

값을 산정하여 나타내었다.

Materials and Methods

시험포장 및 처리구 정보 본 연구는 전라북도 완주군 이서면에 위치한 국립농업과학원 내 벼 재배 시험포장 (위도 35°49'14.0"N, 경도 127°02'13.2"E)에서 수행되었다. 2019년 벼 이앙일 (5월 23일)을 기준으로 2020년 벼 이앙을 위한 답수일 (5월 12일) 이전까지 355일 동안 온실가스 배출 특성을 조사하였다. 대조구로써 관행적인 ①요소 비료 처리구 (U)와 함께 ②완효성 비료 처리구 (CRF), ③헤어리베치 및 요소비료 혼합 처리구 (HV)를 각각 설치하여 조사를 수행하였다. 헤어리베치는 논토양 환원 후 90%가 한달 내 무기화되어 (Lee et al., 2002) 벼 재배 후반 질소부족에 의한 생육 문제가 발생할 우려가 있다. 또한 유기물 시용에 의한 메탄 배출이 증가하는 문제가 발생할 수 있다 (Gwon et al., 2019). 이에 따라 헤어리베치 시용의 부작용을 최소화하기 위해 HV 처리구는 질소비료 투입량 기준 50%는 헤어리베치를 기비로 사용하고, 나머지 50%는 요소비료를 추비로 공급하여 벼를 재배하였다. 시험포장의 토성은 양토 (Loam)로, 토양의 화학적 특성으로 pH (1:5 H₂O)는 6.3, 토양 내 유기물 함량은 12.9 g kg⁻¹, 총 질소 함량은 0.7 g kg⁻¹, 유효인산은 129.3 mg kg⁻¹, 치환성 양이온으로 칼륨, 칼슘, 마그네슘 함량은 각각 0.5, 5.1, 1.4 cmolc⁺ kg⁻¹ 이었다.

작물재배 및 포장관리 시험에 사용한 벼는 신동진벼 (*Oryza sativa* L. var, *Sindongjinbyeo*)로, 어린모를 손이앙 하였으며, 농촌진흥청 작물별 시비처방기준 (NAAS, 2010a)에 따라 모든 처리구에 N-P₂O₅-K₂O를 110-45-57 kg ha⁻¹ 시비하였다. 질소원으로 U 처리구에는 속효성인 요소 비료를, CRF 처리구에는 완효성 비료인 LCU (Latex coated urea)를 동량시비 하였다. HV 처리구는 헤어리베치를 질소원으로 전량 투입할 경우 문제될 수 있는 작물 후반 생육 문제 및 메탄 배출 증가 문제를 고려하여 질소 시비량의 50%는 헤어리베치 (질소함량 4.8%, 건중기준 1146 kg ha⁻¹ 투입)로 대체하여 밑거름으로 토양에 환원하였다. 이때 토양에 환원한 헤어리베치는 휴경기 중에 파종 및 재배하여 답수 2주 전 예초기 및 경운기를 이용해 토양에 환원하여 주었다. 질소 부족분의 50%는 속효성 요소비료로 추비를 공급하였다. 완효성 비료 처리구를 제외하고 작물 생육 수준에 따라 질소비료를 2회에 걸쳐 추비하였으며, 질소비료 외 인산과 칼리 비료는 모든 처리구에서 동일하게 시비하였다.

간단관개는 벼 이앙 후 30일부터 중간낙수를 20일 실시한 뒤, 재답수를 하여 수확을 위한 낙수일 이전까지 6 cm 이상 수위를 유지하여 논물을 관리하였다. 수확 이후 U, CRF 처리구는 이듬해 모내기를 위한 포장관리를 위한 경운을 실시하기 전까지 아무런 처리 없이 방치상태로 두었다. 반면, HV 처리구는 벼 수확 이후 휴경기 논에 헤어리베치를 직접 파종 (90 kg ha⁻¹)하여 재배하였으며, 물대기 2주 전 경운을 하여 헤어리베치를 토양에 환원하여 주었다. 그 외 포장관리 정보는 Table 1과 Supplementary-material 1에 나타내었다.

Table 1. Schedule of management during rice cropping and fallow season.

Cropping season (2019)	Transplanting	Intermittent drainage	Drainage	Harvest
	May 23 th	Jul. 2 th - Jul. 22 th	Set. 20 th	Otc. 18 th
Fallow season (2019 - 2020)	Hairy vetch seeding	Plowing (except HV treatment)	Fertilizer or hairy vetch application	Irrigation for transplanting
	Otc. 30 th	Apr. 7 th	May 8 th	May 22 th

Rice cultivation: 2019. May 23th - Oct. 18th Intermittent drainage: 2019. Jul. 2th - Jul. 22th Drainage: 2019. Sep. 20th Harvest: 2019. Oct. 18th Hairy vetch cultivation: 2019. Oct. 30th - 2020. May 8th Plowing and HV application: 2020. May 8th

Supplementary-material 1. Field management.

가스시료 채취 및 분석 선행연구를 참고하여 일평균 온실가스 배출 농도 관측시간인 10 - 12시 사이에 Closed chamber법을 이용하여 가스시료를 채취하였다 (Jeong et al., 2018). 벼를 이앙하여 수확하기 전까지는 (148일) 온실가스 시료채취는 가로, 세로, 높이가 각각 60 × 60 × 100 cm인 투명 아크릴 챔버를 이용하였다. 재식거리 15 × 30 cm를 기준으로 벼 8주를 챔버 내에 이앙, 재배하면서 온실가스 채취를 실시하였으며, 가스시료 채취를 위해 챔버를 닫을 때를 제외하고는 열린 상태로 챔버를 유지하였다. 벼 재배 기간에는 주 1회, 챔버 뚜껑을 열어둔 상태에서 60 mL 주사기로 초기 가스시료를 채취하고, 뚜껑을 닫고 밀폐한 뒤, 30분 후에 60 mL 주사기를 이용하여 후기 시료를 채취하고 다시 열었다. 이때, 챔버 내 공기 순환을 위해 밀폐한 시간 중에 내부 fan을 가동하였다. 이와 동시에 챔버 내 온도 변화와 수면으로부터 챔버의 높이 측정을 통해 챔버의 부피를 수학적으로 보정하였다. 60 mL 주사기에 포집한 가스 시료는 실험실로 옮겨 가스크로마토그래피 (Gas chromatography: Detector -FID for CH₄ and ECD for N₂O)를 이용하여 정량분석하고, (Eq. 1)과 (Eq. 2)를 이용하여 배출량을 계산하였다 (Rolston, 1986; Haque et al., 2016). 측정 장비의 자세한 사양은 Supplementary-material 2에 나타내었다.

벼 수확 이후부터 207일 동안의 휴경기의 온실가스 시료 채취는 원통형의 지름 25, 높이 50 cm인 불투명 챔버를 이용하였으며 (Haque et al., 2016; Gwon et al., 2019), 마찬가지로 가스시료 채취를 위해 챔버를 닫을 때를 제외하면 열린 상태를 유지하였다. 기본적으로 주 1회 가스시료를 채취하였으나, 온실가스 배출 변화가 적은 동절기에는 2주 1회

Supplementary-material 2. Analytical conditions of gas chromatographic 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 ⁻¹
Flow rate	Carrier	23 ml min ⁻¹	21 ml min ⁻¹
	Make up	2 ml min ⁻¹	2 ml min ⁻¹
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

가스시료를 채취하였다. 그 외에는 작기와 마찬가지로 60 mL 주사기를 이용하여 초기 및 후기 가스 시료를 채취하여 온실가스 농도를 분석하였다.

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

F = CH₄ or N₂O flux (mg m⁻² h⁻¹)

ρ = gas density (mg L⁻¹)

V = volume of chamber (m³)

A = surface area of chamber (m²)

Δc/Δt = rate of increase of gas concentration (μL L⁻¹ h⁻¹)

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

$$\text{Seasonal } CH_4 \text{ or } N_2O \text{ flux} = \sum_i^n (F_i \times D_i) \quad (\text{Eq. 2})$$

F_i = the rate of flux (g m⁻² d⁻¹) in the *i*th sampling interval

D_i = the number of days in the *i*th sampling interval

n = the number of sampling intervals

토양 및 수량 조사 토양의 이화학성 분석은 토양 화학분석법 (NAAS, 2010b)에 준하여 실시하였다. 토양 pH는 토양과 증류수를 1:5 (W V⁻¹)로 혼합하고 30분 교반한 뒤, pH meter (Orison 4 star, Thermo, Singapore)로 측정하였다. 토양 유기물 및 질소 함량은 CN analyzer (Vario Max CN, Elementar, Germany)을 이용하여 분석하였다. 유효 인산은 Lancaster 법으로 침출하여 720 nm 파장에서 비색계 (AU/CARY 300, Varian Australia)를 활용해 분석하였

으며, 치환성 양이온은 1M NH₄ OAC (pH 7.0) 용액으로 침출 후 여과하여 유도결합플라즈마분광기 (Potima 7300 DV, Perkin Elmer, USA)로 분석하였다.

토양 환경은 측정기기를 이용해 온실가스 측정과 동시에 조사를 수행하였다. 전 시기에 걸쳐 온도계를 이용하여 토양 온도 변화를 측정하였다. 작기에는 메탄 배출량과 밀접하게 연관된 토양의 산화환원전위 값 (Eh value)을 측정하기 위해 토양에 백금전극을 설치하고 휴대용 Eh 측정기 (ORP meter, Lutron)를 이용해 산화환원 전위 변화를 조사하였다. 휴경기에는 Trime®-Pico 32 sensor (Eijkelkamp, Germany)를 이용해 토양 수분함량을 측정하고, 이를 (Eq. 3)을 활용해 토양 내 공극수분함량 (Water filled pore space, WFPS)로 나타내었다 (Lin et al., 2013). 이를 위하여 추가적으로 토양의 용적밀도를 조사하였다 (Al-Shammary et al., 2018)

벼 수량 조사는 각각의 처리구 별로 100주를 수확한 후 건조 및 탈곡하여 ha 당 정조 수량을 구하여 GHGI 산정에 활용하였다.

$$WFPS(\%) = SMC/[1 - (BD/PD)] \quad (\text{Eq. 3})$$

SMC = soil moisture content (vol. %)

BD = bulk density (g cm⁻³)

PD = particle density (2.65 g cm⁻³) (Blake, 2008)

Net GWP 및 GHGI 산정 (Eq. 4)를 이용하여 논에서 배출된 메탄과 아산화질소에 지구온난화지수 (Global warming poteintal, GWP)를 각각 곱하여 CO₂ 당량으로 환산하였다 (Eq. 4) (IPCC, 2007). 다음으로, 수량 당 온실가스 발생량을 의미하는 온실가스 강도 (Yield scaled greenhouse gas intensity, GHGI)를 (Eq. 5)를 통해 구하였다 (Van Groenigen et al., 2010; Pittelkow et al., 2014).

$$Total\ GWP\ (kg\ CO_{2-eq.}\ ha^{-1}) = 25 \times CH_4 + 298 \times N_2O \quad (\text{Eq. 4})$$

$$GHGI(kg\ CO_{2-eq.}\ kg^{-1}\ grain) = Total\ GWP / grain\ yield \quad (\text{Eq. 5})$$

기상조사 및 통계분석 조사기간 중 기상조건은 농업날씨 365 (NAAS, 2020)에서 제공하는 기상측정값을 활용하였다. 통계분석은 SPSS (IBM Statistics 25)를 이용하여 Duncan's multiple range test를 실시, 처리구 간 통계적인 차이를 비교하였다. 인자 간 차이를 확인하기 위해 처리 종류, 재배시기 (작기 및 휴경기) 및 상호작용을 기반으로 이원분산분석 (Two-way ANOVA)을 실시하였다.

Results

기상 및 토양 환경 변화 기상 관측값은 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 연중 총 강수량은 1011 mm로, 작기에 678 mm, 휴경기에 333 mm로 관측되었다. 계절적 특성에 따라 대부분의 강수가 벼를 재배하는 작기에 집중된 것을 확인

할 수 있었다. 대기온도는 연 평균 13.7°C 를 기록하였으며, 작기에 22.8°C , 휴경기에 7.4°C 로 관측되었다. 계절적 변화에 따라 대기온도는 6월부터 8월 초중반까지 (DAT 0 - 80) 점진적으로 증가하였으나, 그 이후 다시 감소하기 시작하여 이듬해 2월 초 (DAT 260)에 이르러 다시 증가하였다. 토양온도 역시 대기온도와 유사하게 증감하였다.

온실가스 발생과 관련 있는 환경인자로 작기에는 토양의 산화환원 전위 (Eh value)를, 휴경기에는 토양 공극내수분 함량 (WFPS)를 측정하였으며, 이를 Fig. 2에 나타내었다. 작기의 산화환원 전위는 담수상태에서는 처리구 평균 $-117 \sim -131 \text{ mV}$ 였으나, 중간낙수 또는 수확을 위한 낙수 이후에는 급격히 증가하여 처리구 평균 $114 - 198 \text{ mV}$ 의 값을 나타내었다. 휴경기의 수분함량은 처리구 평균 $59 - 66\%$ 값을 나타냈으며, 잦은 강수 이후 일시적으로 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 1. Changes in rainfall and temperature during cropping and fallow season.

Fig. 2. Changes in Eh value and WFPS in rice paddy soil during cropping and fallow seasons. (Error bar means standard deviation. ▨ means intermittent drainage period. ↘ means plowing).

메탄 및 아산화질소 배출 변화 메탄 및 아산화질소 배출량 변화는 Fig. 3에 나타난 바와 같다. 벼 이앙 이후 메탄 배출량은 모든 처리구에서 증가하는 경향을 나타냈다. 중간낙수 실시 이전 평균 메탄 배출량은 U, CRF, HV 처리구에서 각각 $10.94, 7.91, 33.13 \text{ mg m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 로 헤어리베치를 사용한 처리구에서 확연히 높은 메탄 배출이 관측되었다. 그러나 중간낙수를 실시하자 메탄 배출량은 급감하여 중간낙수 시기의 평균 메탄 배출량은 U, CRF, HV 처리구에서 각각 $0.04, 0.05, 0.15 \text{ mg m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 로 감소하였다. 재답수 이후 평균 메탄 배출량은 U, CRF, HV 처리구에서 각각 $2.48, 3.92, 6.28 \text{ mg m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 로 다시 증가하였으나 중간낙수 이전의 메탄 배출량 수준까지 회복하지 못하였다. 이후 수확을 위한 낙수를 실시하자 평균 메탄 배출량은 U, CRF, HV 처리구에서 각각 $0.07, 0.02, 0.02 \text{ mg m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 로 메탄 배출이 거의 일어나지 않았다. 그러나 답수기간 중 발생한 메탄 배출로 인하여 작기 중 U, CRF, HV 처리구에서는 각각 $168, 109, 272 \text{ kg ha}^{-1}$ 의 메탄이 배출되었으며, 처리구 간에 유의적인 차이를 나타냈다(Table 2). 높은 초기 메탄 농도로 인해 HV 처리구에서 가장 많은 메탄이 배출되었다. 반면, 휴경기의 평균 메탄 배출량은 U, CRF, HV 처리구에서 각각 $0.02, 0.01, 0.01 \text{ mg m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 로 작기와 비교한다면 메탄 발생이 거의 일어나지 않았으며, 오히려 음의 값이 관측됨에 따라 일시적으로 메탄 산화가 일어나는 것을 관찰할 수 있었다. 그 결과 휴경기의 총 메탄 배출량은 모든 처리구에서 0.1 kg ha^{-1} 미만으로 처리구 간에 유의적인 차이가 없었으며, 휴경기 논에서 발생하는 온실가스들 중에서 메탄의 영향력은 미비한 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 3. Changes in CH_4 and N_2O emission rate during cropping and fallow season (Error bar means standard deviation).

작기 중 아산화질소 배출량은 처리구 간에 유사한 경향 없이 증감을 반복하였으며, 평균 아산화질소 배출량은 U, CRF, HV 처리구에서 각각 $31.91, 44.70, 34.71 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ 로 처리구 간에 큰 차이는 없었다. 그 결과 작기의 총 아산화질소 배출량은 U, CRF, HV 처리구에서 각각 $3.7, 3.8, 4.0 \text{ kg ha}^{-1}$ 로 처리구 간에 유의적인 차이는 없었다 (Table 2). 휴경기의 아산화질소 배출량의 경우 전반적으로 모든 처리구에서 유사한 경향으로 증감하였다. 휴경기 평균 아산화질소 배출량은 U, CRF, HV 처리구에서 각각 $72.46, 86.99, 41.39 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ 으로 나타났으며, 특히 경운 실시 이후 아산화질소 배출량이 증가하는 경향이 관찰되었다. 경운을 실시하고 난 다음 U 및 CRF 처리구에서 아산화질소 배출량은 $356.3 - 486.1 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ 까지 증가하였다. 그러나 헤어리베치 재배로 인해 경운을 실시하지 않은 HV 처리구에서의 평균 아산화질소 배출량은 $16.3 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ 로 다른 처리구에 비해 적은 농도를 나타냈다. 그 결과 휴경기 총 아산화질소 배출량 역시 HV 처리구에서 2.3 kg ha^{-1} 로 타 처리구에 비해 약 43 - 87% 유의적으로 적었다 (Table 2).

벼 수량 및 GHGI 처리구 별 벼 수량 및 GHGI 값을 Table 3에 나타내었다. 벼 수량은 HV, CRF, U 순으로 많았다. 연중 총 온실가스 배출량을 CO_2 당량 환산하여 나타낸 Total GWP 역시 HV 처리구에서 가장 컸으며, 다음으로 U, CRF 처리구 순이었다. 그 결과 수량 당 온실가스 배출량을 나타내는 GHGI 값은 HV 처리구에서 가장 컸으며, CRF 처리구에서 가장 낮았다.

Table 2. Seasonal fluxes of CH_4 and N_2O during rice cropping and fallow season.

Season (A)	Treatment (B)	Seasonal CH_4 (kg ha^{-1})	Seasonal N_2O (kg ha^{-1})
Cropping season	U	167.9b	3.7a
	CRF	108.6c	3.8a
	HV	272.0a	4.0a
Fallow season	U	0.9a	3.3b
	CRF	0.5a	4.3a
	HV	0.5a	2.3c
Statistical analysis (Two-way ANOVA)			
Season (A)		***	**
Treatment (B)		**	**
A × B		**	***

Note) Different letters within the same column indicate significant differences in the same season. NS, and *, ** and *** denote not significant, and significance at the 5, 1 and 0.1% levels, respectively.

Table 3. Grain yield, total GWP, and GHGI during annual season in rice paddy.

Treatment	Grain yield (kg ha^{-1})	CH_4	N_2O	Total GWP	GHGI
		(kg $\text{CO}_2\text{-eq. ha}^{-1}$)			
7 U	4997b	4220b	2092b	6312b	1.3b
CRF	5324ab	2728c	2395a	5124c	1.0c
HV	5682a	6813a	1883b	8696a	1.5a

Note) Different letters within the same column indicate significant differences at $p < 0.05$ level according to Duncan's multiple range test.

Discussion

메탄 및 아산화질소 배출 변화 작기 중 담수 상태의 논에서는 혐기적 환경이 발달함에 따라 메탄 배출이 급격히 증가하였으며, 특히 유기질 비료인 헤어리베치를 토양에 환원한 처리구에서 메탄 배출이 급격히 증가하였다 (Fig. 3). 이는 토양에 투입된 유기물이 혐기적인 환경 하에서 분해될 때 나타날 수 있는 현상으로 (Haque et al., 2015), 헤어리베치 뿐만 아니라 유기질 비료를 토양에 사용하는 경우 공통적으로 나타날 수 있는 결과로 판단된다. 그러나 중간낙수를 실시함에 따라 모든 처리구에서 메탄 배출량은 급격하게 감소하였는데, 낙수에 의해 토양 내 산소 유효도가 증가하는 등 토양이 호기적 상태로 전환되기 때문으로 판단된다. 호기적 상태에서는 메탄 생성균의 활성이 감소하고 메탄 산화균의 활성이 증가하여 메탄 배출량이 감소할 수 있으며 (Ma and Lu, 2011), 본 연구에서도 낙수에 의해 토양 산화 환원 전위가 증가하여 토양의 호기적 환경이 발달할수록 메탄 배출량은 감소하는 경향을 확인할 수 있었다 (Fig. 4). 그러나 중간낙수가 끝나고 재담수를 실시하자 토양이 다시 혐기적 환경으로 전환되었음에도 불구하고 메탄 배출량은 중간낙수 이전의 수준까지 회복되지 않았는데, 선행연구에서 (Haque et al., 2016) 말한 바와 같이 중간낙수 수행으로

Fig. 4. CH₄ emission rates related to Eh value during cropping season in rice paddy.

Fig. 5. N₂O emission rates related to soil temperature (a) and WFPS (b) during fallow season in rice paddy.

토양에 공급된 산소농도의 증가하여 유기물의 빠른 무기화가 촉진되어 (Greenwood, 1961) 재답수 이후 유기물원 기질 공급이 제한됨에 따라 메탄 발생을 억제한 것으로 보인다. 작기와 비교하여 휴경기에는 모든 처리구에서 메탄이 거의 배출되지 않았으며, 때때로 음의 배출량이 관측되었다. 이는 호기적인 휴경기 논에서는 메탄 생성균의 활성이 저해될 뿐만 아니라, 저농도의 대기 중 메탄이 메탄 산화균에 의해 소비된 영향으로 보인다 (Cai et al., 2016).

작기의 메탄 배출 경향과는 달리 아산화질소 배출은 모든 처리구에서 뚜렷한 경향 없이 증감을 반복하였다 (Fig. 3). 일반적으로 상시답수 조건에서 벼를 재배하는 경우 답수 상태에서는 아산화질소가 거의 발생하지 않으나, 중간낙수 수행 시 아산화질소 배출이 증가하여 변동 폭도 커진 선행연구와 유사한 결과였다 (Haque et al., 2015; Huang et al., 2019; Oo et al., 2020). 반면, 휴경기의 아산화질소 배출은 모든 처리구 간에 유사한 경향으로 증감 하였다 (Fig. 3). 토양온도가 증가할수록 아산화질소 배출이 증가하는 경향을 확인할 수 있었으며 (Fig. 5a), 토양 온도가 증가함에 따라 토양 미생물의 활성 및 호흡이 증가한 영향으로 보인다 (Andersson and Nilsson, 2001; Lopes de Gerenyu et al., 2005). 반대로 토양의 WFPS가 증가할수록 아산화질소 배출은 감소하는 경향이 나타났다 (Fig. 5b). 토양수분이 증가하면 아산화질소가 발생하는 질산화 (nitrification) 과정에 필요한 산소의 확산이 저해되며 (Schjønning et al., 2003; Skopp et al., 1990; Zhu et al., 2013), 본 연구에서 나타난 바와 같이 WFPS가 60% 이상인 조건에서 아산화질소 배출이 감소할 수 있다. 휴경기 중 아산화질소 배출은 U 및 CRF 처리구에서 경운 (DAT 321th)을 기점으로 일시적으로 증가하였으나, 경운을 실시하지 않은 HV 처리구에서는 큰 변화가 관측되지 않았다. 이는 경운에 의해 토양의 통기 개선 및 유기물 전환 효과에 의해 U 및 CRF 처리구에서 아산화질소 배출이 증가한 것으로 보인다 (Chatskikh and Olesen, 2007).

총 온실가스 배출량 및 GHGI 연 중 메탄 배출의 99% 이상이 작기에 발생하였으며, 작기 중 메탄 저감이 전체 온실가스 감축에 큰 부분임을 설명한다. 선행연구 (Zhou et al., 2014; Anitha and Bindu, 2016)에서도 보고한 바와 같이, 작기 중 완효성 비료를 사용한 CRF 처리구에서 총 메탄 배출량이 가장 적었다 (Table 2). 완효성 비료를 사용하면 벼 뿌리가 발달되며 (Tang et al., 2007; Peng, 2013), 뿌리를 통한 산소공급으로 메탄 산화량이 증가함에 따라 (Gutierrez et al., 2014) 작기 중 총 메탄 배출량이 감소한 것으로 보인다. 반면 호기적인 환경의 휴경기 중에는 메탄이 거의 배출되지 않았으며, 선행 연구도 유사한 결과를 확인할 수 있었다 (Kim et al., 2017; Gwon et al., 2019).

메탄과 달리 연 중 아산화질소 배출의 47 - 63%는 작기에, 36 - 53%는 휴경기에 발생하였다. 완효성 질소비료 사용으로 아산화질소 배출을 저감한 선행 연구와는 (Ji et al., 2013) 달리, 작기의 총 아산화질소 배출량은 처리구 간에 유의적인 차이가 없었다. 그러나 다년간 수행한 Ji et al. (2013)의 연구 결과에서도 나타난 바와 같이 일시적으로 속효성 비료 처리구 보다 완효성비료 처리구에서 아산화질소 배출량이 높게 산정되기도 한 것으로 보아, 본 연구도 다년간의 비료효과 검증이 필요할 것으로 생각된다. 반면, 휴경기의 총 아산화질소 배출은 처리구간에 유의적인 차이를 나타내었다 (Table 2). 경운을 실시하지 않은 HV 처리구에서 총 아산화질소 배출이 가장 적었으며, 이를 바탕으로 휴경기 중 경운을 최소화하는 포장 관리를 통해 아산화질소 배출을 저감할 수 있을 것으로 생각된다. 동일하게 경운을 실시한 U 및 CRF 처리구에서는 완효성 비료를 사용한 CRF 처리구의 총 아산화질소 배출량이 더 많았다. 그러나 이와 관련한 선행연구가 미비하여 작기 중에 시비한 비료의 잔재 영향에 대한 추가 연구가 필요한 것으로 보인다.

정조 수량은 질소 비료의 이용 효율 증대 및 유기물 공급에 의한 토양 환경 개선 효과에 의해 U 처리구와 비교하여 CRF 및 HV 처리구에서 증가하였다 (Table 3) (Tang et al., 2007; Cho et al., 2019). 그러나 유기물 사용에 따른 작기

중 메탄 배출의 증가로 HV 처리구에서 가장 많은 온실가스가 배출되었으며, 상대적으로 큰 GHGI 값으로 인해 온실가스 감축 효율은 떨어지는 것으로 나타났다. 반면, CRF 처리구는 U 처리구와 비교하여 높은 수량 및 적은 온실가스 배출량으로 작은 GHGI 값을 나타내 효율적인 감축 효과가 확인되었다.

Conclusions

본 연구는 논에서 중간낙수에 의해 증가하는 아산화질소 배출을 저감하는 효율적인 온실가스 감축 방법을 제시하기 위하여 수행되었다. 연구 결과 속효성인 요소 비료 처리구(U)와 비교하여 정조 수량은 완효성 비료 처리구(CRF)와 헤어리베치 투입 및 요소비료 혼합 처리구(HV)에서 증가하였다. U 처리구와 비교하여 총 메탄 배출은 CRF 처리구에서 감소하였으나 HV 처리구에서 크게 증가하였다. 총 아산화질소 배출은 CRF 처리구에서 증가하였으나 HV 처리구에서는 다소 감소하였다. 연 중 총 온실가스 배출량은 CRF 처리구에서 감소하였으며, HV 처리구에서 증가하였다. 그 결과 수량 당 온실가스 배출량인 GHGI 값은 CRF 처리구에서 유의적으로 감소하였으며, HV 처리구에서 증가하였다. 따라서 논에서 속효성 요소비료를 대체하는 완효성 비료를 사용한다면 수량을 증대하고 온실가스 배출은 저감하여 효율적인 온실가스 감축이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 완효성 비료 사용으로 후경기 아산화질소 배출이 증가할 수 있으며, 이를 저감할 수 있는 방안에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 환경에 따라 영향을 크게 받는 포장실험의 특성 상, 다년간 추가적인 조사를 통해 본 연구 결과를 검증하는 과정이 필요할 것으로 사료된다.

Acknowledgement

This work was carried out by the support of Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (PJ012614012020), Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Al-Shammary, A.A.G., A.Z. Kouzani, A. Kaynak, S.Y. Khoo, M. Norton, and W. Gates. 2018. Soil bulk density estimation methods: A Review. *Pedosphere* 28:581-596.
- Andersson, S. and S.I. Nilsson. 2001. Influence of pH and temperature on microbial activity, substrate availability of soil-solution bacteria and leaching of dissolved organic carbon in a mor humus. *Soil Biol. Biochem.* 33:1181-1191.
- Anitha, K. and G. Bindu. 2016. Effect of controlled-release nitrogen fertilizer on methane emission from paddy field soil. *Procedia Technology* 24:196-202.
- Azeem, B., K. KuShaari, Z.B. Man, A. Basit, and T.H. Thanh. 2014. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer. *J. Controll. Release* 181:11-21.
- Baggs, E. and L. Philippot. 2010. Microbial terrestrial pathways to N₂O. (Ed.), Springer Netherlands, Dordrecht.
- Blake, G.R. 2008. Particle density. In: Chesworth, W. (Ed.), *Encyclopedia of Soil Science*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 504-505.
- Cai, Y., Y. Zheng, P.L.E. Bodelier, R. Conrad, and Z. Jia. 2016. Conventional methanotrophs are responsible for atmospheric methane oxidation in paddy soils. *Nature Communications* 7:11728.

- Chatskikh, D. and J.E. Olesen. 2007. Soil tillage enhanced CO₂ and N₂O emissions from loamy sand soil under spring barley. *Soil Tillage Res.* 97:5-18.
- Cho, H.S., M.C. Seo, J.H. Kim, W.G. Sang, P. Shin, and J. Baek. 2019. Effect of Organic amendments on rice yield and soil carbon fraction in paddy soil. *Korean J. Soil. Sci. Fert.* 52:448-456.
- GIR (Greenhouse Gas Inventory and Research Center). 2019. National Inventory Report in Korea. Greenhouse Gas Inventory and Research Center. Seoul, Korea.
- Greenwood, D.J. 1961. The effect of oxygen concentration on the decomposition of organic materials in soil. *Plant Soil.* 14:360-376.
- Gutierrez, J., S.L. Atulba, G. Kim, and P.J. Kim. 2014. Importance of rice root oxidation potential as a regulator of CH₄ production under waterlogged conditions. *Biol. Fertil. Soils* 50:861-868.
- Gwon, H.S., M.I. Khan, Y.E. Yoon, Y.B. Lee, P.J. Kim, and H.Y. Hwang. 2019. Unexpected higher decomposition of soil organic matter during cold fallow season in temperate rice paddy. *Soil Tillage Res.* 192:250-257.
- Haque, M.M., G.W. Kim, P.J. Kim, and S.Y. Kim. 2016. Comparison of net global warming potential between continuous flooding and midseason drainage in monsoon region paddy during rice cropping. *Field Crops Res.* 193:133-142.
- Haque, M.M., S.Y. Kim, M.A. Ali, and P.J. Kim. 2015. Contribution of greenhouse gas emissions during cropping and fallow seasons on total global warming potential in mono-rice paddy soils. *Plant Soil* 387:251-264.
- Huang, Y., C. Wang, C. Lin, Y. Zhang, X. Chen, L. Tang, C. Liu, Q. Chen, M.I. Onwuka, and T. Song. 2019. Methane and nitrous oxide flux after biochar application in subtropical acidic paddy soils under tobacco-rice rotation. *Scientific Reports* 9:17277.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Technical summary. In: *Climate change: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Forth Assessment report of the intergovernmental panel on climate change.* In: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), pp. 996-1007.
- Jeong, H.C., E.J. Choi, J.S. Lee, G.Y. Kim, and S.I. Lee. 2018. Comparison of CH₄ emission between auto chamber and manual chamber in the rice paddy. *J. Climate Change Res.* 9(4):377-384.
- Ji, Y., G. Liu, J. Ma, G. Zhang, H. Xu, and K. Yagi. 2013. Effect of controlled-release fertilizer on mitigation of N₂O emission from paddy field in South China: a multi-year field observation. *Plant Soil* 371:473-486.
- Kim, G.W., S.T. Jeong, P.J. Kim, and H.S. Gwon. 2017. Influence of nitrogen fertilization on the net ecosystem carbon budget in a temperate mono-rice paddy. *Geoderma* 306:58-66.
- Lee, J.S., H.J. Lee, and J.H. Seo. 2002. Decomposition and N release of hairy vetch applied as a green manure and its effects on rice yield in paddy field. *Korean J. Crop Sci.* 47:137-141.
- Lee, K.B., C.W. Park, K.L. Park, J.G. Kim, D.B. Lee, and J.D. Kim. 2005. Nitrogen balance in paddy soil of control-release fertilizer application. *Korean J. Soil. Sci. Fert.* 38:157-163.
- LeMonte, J.J., V.D. Jolley, J.S. Summerhays, R.E. Terry, and B.G. Hopkins. 2016. Polymer coated urea in turfgrass maintains vigor and mitigates nitrogen's environmental impacts. *PLoS One* 11:e0146761.
- Lin, S., J. Iqbal, R. Hu, M. Shaaban, J. Cai, and X. Chen. 2013. Nitrous oxide emission from yellow brown soil as affected by incorporation of crop residues with different carbon-to-nitrogen ratios: A case study in central china. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 65:183-192.
- Linn, D.M. and J.W. Doran. 1984. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:1267-1272.
- Lopes de Gerenyu, V., I. Kurganova, L. Rozanova, and V. Kudeyarov. 2005. Effect of soil temperature and moisture on CO₂ evolution rate of cultivated Phaeozem: Analysis of a long-term field experiment. *Plant Soil Environ.* 51.
- Ma, K. and Y. Lu. 2011. Regulation of microbial methane production and oxidation by intermittent drainage in rice

- field soil. FEMS Microbiol. Ecol. 75:446-456.
- Müller, M.M. 1987. Leaching of subterranean clover-derived N from a loam soil. Plant Soil 102:185-191.
- NAAS (National Institute of Agricultural Sciences). 2020. Agricultural weather information service 365. <http://weather.rda.go.kr>.
- NAAS (National Institute of Agricultural Sciences). 2010a. Fertilizer application recommendations for crop plants. National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon, Korea.
- NAAS (National Institute of Agricultural Sciences). 2010b. Method of soil and plant analysis. National Academy of Agricultural Science, NAAS, RDA, Suwon, Korea.
- Oo, A.Z., S. Sudo, T. Fumoto, K. Inubushi, K. Ono, A. Yamamoto, S.D. Bellingrath-Kimura, K.T. Win, C. Umamageswari, K.S. Bama, M. Raju, K. Vanitha, P. Elayakumar, V. Ravi, and V. Ambethgar. 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.
- Peng, Y.J. 2013. Effects of slow/controlled release fertilizers on root morphological and physiological characteristics of rice. Journal of Plant Nutrition Fertilizer.
- Pittelkow, C.M., M.A. Adviento-Borbe, C. van Kessel, J.E. Hill, and B.A. Linquist. 2014. Optimizing rice yields while minimizing yield-scaled global warming potential. Glob. Chang. Biol. 20:1382-1393.
- Rolston, D.E. 1986. Gas flux. Methods of soil analysis. Soil Sci Soc Am J. p. 1103-1119.
- Sarrantonio, M. and T.W. Scott. 1988. Tillage effects on availability of nitrogen to corn following a winter green manure crop. Soil Sci. Soc. Am. J. 52:1661-1668.
- Schjønning, P., I.K. Thomsen, P. Moldrup, and B.T. Christensen. 2003. Linking soil microbial activity to water- and air-phase contents and diffusivities. Soil Sci. Soc. Am. J. 67:156-165.
- Singh, Y., B. Singh, O.P. Meelu, and M.S. Maskina. 1990. Nitrogen equivalence of green manure for wetland rice on coarse-textured soils. Int. Rice Res. Newsl. 15:23.
- Skopp, J., M.D. Jawson, and J.W. Doran. 1990. Steady-state aerobic microbial activity as a function of soil water content. Soil Sci. Soc. Am. J. 54:1619-1625.
- Statistics Korea. 2020. Annual report on the area of arable land statistics 2020. <http://www.kosis.kr/>.
- Syakila, A. and C. Kroeze. 2011. The global nitrous oxide budget revisited. greenh. Gas Meas. Manag. 1:17-26.
- Tang, S.H., S.H. Yang, J.S. Chen, P.Z. Xu, F.B. Zhang, A.I. Shao-ying, and X. Huang. 2007. Studies on the mechanism of single basal application of controlled-release Fertilizers for increasing yield of rice (*Oryza sativa* L.). Agr. Sci. China 6:586-596.
- Ussiri, D. and R. Lal. 2012. Soil Emission of Nitrous Oxide and its Mitigation. Springer Netherlands.
- Utomo, M., W.W. Frye, and R.L. Blevins. 1990. Sustaining soil nitrogen for corn using hairy Vetch cover crop. Agron. J. 82:979-983.
- Van Groenigen, J.W., G.L. Velthof, O. Oenema, K.J. Van Groenigen, and C. Van Kessel. 2010. Towards an agronomic assessment of N₂O emissions: a case study for arable crops. Eur. J. Soil Biol. 61:903-913.
- Varco, J.J., W.W. Frye, M.S. Smith, and C.T. MacKown. 1989. Tillage effects on nitrogen recovery by corn from a nitrogen-15 labeled legume cover crop. Soil Sci. Soc. Am. J. 53:822-827.
- Zhou, W.L., Y.S. Lou, L. Ren, H. Yan, M. Yan, and W. Lei. 2014. Application of controlled-release nitrogen fertilizer decreased methane emission in transgenic rice from a paddy Soil. Water Air Soil Pollut. 225:1-5.
- Zhu, X., M. Burger, T.A. Doane, and W.R. Horwath. 2013. Ammonia oxidation pathways and nitrifier denitrification are significant sources of N₂O and NO under low oxygen availability. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 110:6328-6333.