



## 벼 논에서 양수분 복합관리에 따른 온실가스 (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) 배출 특성 및 수량 변동에 미치는 영향

권효숙<sup>\*\*</sup> · 김건엽<sup>\*\*</sup> · 최은정<sup>\*\*</sup> · 이선일<sup>\*\*</sup> · 이종식<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>국립농업과학원 농업환경부 기후변화생태과 박사후연구원, <sup>\*\*</sup>국립농업과학원 농업환경부 기후변화생태과 연구사,  
<sup>\*\*\*</sup>국립농업과학원 농업환경부 기후변화생태과 연구관

### Evaluation of Greenhouse Gas Emission Characteristics and Intensity by Management of Water and Nutrients in Rice Paddy Soil during Cropping Season

Gwon, Hyo Suk<sup>\*\*</sup> · Kim, Gun Yeob<sup>\*\*</sup> · Choi, Eun Jung<sup>\*\*</sup> · Lee, Sun Il<sup>\*\*</sup> and Lee, Jong Sik<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Postdoctoral Fellow, Department of Climate Change & Agroecology, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Republic of Korea

<sup>\*\*</sup>Researcher, Department of Climate Change & Agroecology, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Republic of Korea

<sup>\*\*\*</sup>Senior researcher, Department of Climate Change & Agroecology, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Republic of Korea

#### ABSTRACT

Intermittent drainage can be used to reduce methane (CH<sub>4</sub>) emission from paddy soils. However, there is a significant increase in nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emission when this water is drained, a significant amount of which originates from N fertilizer. Therefore, to mitigate the side effects of drainage, the source of N fertilizer should be considered. However, water and nutrient management effects during rice cultivation are not well examined in Korea. In this study, effects of water and nutrient management on reducing greenhouse gas (GHG) emissions were investigated in a rice paddy. Three types of water management were conducted: Continuous flooding (CF), intermittent drainage (ID), and low level water management (LL). At 30 days after rice transplant, drainage was carried out for 20 days in the ID treatment, and a low level of water (2~5cm) was maintained in LL treatment. The same amount of fertilizer (N- P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O:110-45-57 kg ha<sup>-1</sup>) was applied in each treatment group, but different types of N sources were used: Urea (NPK), hairy vetch with urea (HV), and slow release fertilizer in the form of latex-coated urea (SRF). To prevent N deficiency in HV treatment, 50% of the N fertilizer was replaced with urea as additional fertilizer. Methane and N<sub>2</sub>O emissions were monitored during rice cultivation, as were growth properties and rice yield. Compared with CF treatment, ID and LL showed significantly decreased CH<sub>4</sub> emission. Despite organic matter application, CH<sub>4</sub> emission was lower in the LL+HV and ID+HV treatments than in the CF+NPK treatment. On the contrary, N<sub>2</sub>O emission was increased in ID and LL treatments. However, due to the CH<sub>4</sub> reduction effect, global warming potential (GWP) was decreased in ID and LL treatments. Rice yield was slightly higher in the SRF than NPK treatment. As a result, yield-scaled greenhouse gas intensity (GHGI) was decreased in water and nutrient managed fields due to the low GWP and high yield. Conclusively, a combination of water and nutrient management might reduce GHG emissions in rice paddies without loss of yield. In particular, low level water management and slow release fertilizer application were effective to reduce CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions and increase rice yield.

**Key words:** Global warming potential (GWP), Greenhouse gas intensity (GHGI), Greenhouse gas, nutrient management, water management

<sup>†</sup> **Corresponding author:** gwonhs@korea.kr (55365, 166, Nongsaengmyeong-ro, Iseo-myeon, Wanju-gun, Jeollabuk-do Republic of Korea, T.+82-63-238-2401)

Received October 23, 2019 / Revised November 8, 2019 / Accepted November 25, 2019

## 1. 서 론

메탄 (CH<sub>4</sub>)은 이산화탄소 (CO<sub>2</sub>)와 비교하여 25배 높은 지구온난화지수 (GWP: Global warming potential)를 지닌 대표적인 온실가스이다. 메탄은 일반적으로 혐기적인 환경에서 유기물 분해 시 발생하며, 전세계 인위적 배출량의 11%가 벼 논에서 발생하는 것으로 알려져 있다 (IPCC, 2007; IPCC, 2013). 논 면적 (844,265 ha)이 전체 경작지 면적 (1,595,614 ha)의 약 53%를 차지하는 우리나라 역시 상당량의 메탄이 벼 논에서 발생하고 있다. 2016년 기준, 벼 재배 시 발생한 메탄 배출량은 6.1 Tg CO<sub>2</sub>-eqv. 이었다. 이는 농업분야 메탄 배출량 (11.41 Tg CO<sub>2</sub>-eqv.)의 53%, 국가 전체 메탄 배출량 (26.3 Tg CO<sub>2</sub>-eqv.)의 23%에 해당하는 양이다 (Statistics Korea, 2018; GIR, 2018).

논에서 메탄 배출을 저감하기 위하여 여러가지 기술들이 국내외에서 연구되고 있으며, 그 중 중간 낙수와 같은 물관리 기술은 메탄 배출을 감축하는 데 효과적인 전략 중 하나이다 (Itoh et al., 2011; Ma & Lu, 2011). 우리나라에서 실시한 물 관리 기술에 의한 메탄 감축 사례에 따르면, Kim et al. (2012)과 Ahn et al. (2014)은 상시담수 농법과 비교하여 간단 관개 수행 시 66%, 논물얹게대기 수행 시 78%까지 메탄 배출량을 감축할 수 있다고 하였다. 이러한 논물 관리 기술은 벼 재배 중 토양 내 산소 투과성을 증대시킴으로써 토양 환경을 호기적으로 만드는 원리를 이용하여 메탄 배출을 저감할 수 있다고 알려져 있다. 그러나 토양 환경이 호기적으로 전환될 경우 논에서의 아산화질소 (N<sub>2</sub>O) 배출이 증가할 우려가 있다(Cai et al., 1997). 아산화질소는 일반적으로 토양 질소의 질산화 및 탈질화에 의한 중간 부산물로 발생한다 (Schreiber et al., 2012). 일반적인 담수 상태의 논 토양은 혐기적 환경으로, 질산화가 억제되어 아산화질소 배출이 적다. 그러나 논에서 실시하는 물관리에 의한 낙수 및 재담수는 토양 환경을 호기적·혐기적으로 전환하며, 그 결과 질산화와 탈질화 과정을 촉진하여 아산화질소 배출을 증가시킨다 (Cai et al., 1997; Hua et al., 1997; Yan et al., 2000). 아산화질소는 GWP가 298로, 소량이더라도 온난화 효과가 크기 때문에 (IPCC, 2007) 논에서 증가하는 아산화질소의 배출을 함께 완화하는 방법에 대한 논의가 필요하다.

농경지에서 발생하는 아산화질소의 상당량은 토양에 사용한 질소비료로부터 유래한다. 질소 비료는 크게 화학비료와 유기질비료 두 가지로 구분할 수 있다. 화학비료의 대표적인 예로 요소 비료가 있다. 일반적으로 사용하는 요소 비료는 속효성으로 비료효과의 기간이 짧고 비료의 손실률이 높아

(Lee et al., 2005), 환경에 유출되어 아산화질소 배출을 증가시킬 우려가 있다. 반면에 완효성 요소 비료 (Slow release fertilizer, SRF)는 상대적으로 비료 효과 지속 기간이 길고, 비료의 손실률이 낮아 (Kim et al., 2009), 질소의 환경 유출을 줄여 N<sub>2</sub>O 배출을 저감할 수 있을 것으로 판단된다. 실제로 Ji et al. (2013)의 선행연구에서 속효성 요소 비료와 비교하여 완효성 비료 사용으로 13%의 아산화질소 배출을 감축한 사례가 있다. 유기질 비료의 경우 유박, 퇴비, 풋거름 작물 등이 있다. 그 중에서도 질소 비료를 대체하는 풋거름 작물 중 하나인 헤어리베치 (*Vicia villosa* R.)는 질소공급 효과 외에도 토양 피복을 통한 토양 유실 방지 등 (Seo et al., 2005)의 이점 때문에 최근 다양하게 활용되고 있다. 그러나 헤어리베치를 논에 사용한 경우 한 달 내로 약 90%가 무기화되어 벼 재배 중후반의 질소 공급에 차질을 줄 수 있으며 (Lee et al., 2002), 유기물 시용 효과에 의해 논에서의 메탄 배출을 증가시킬 우려가 있기 때문에 (Yagi and Minami, 1990; Haque et al., 2016) 이를 해결하기 위하여 추가적인 노력이 필요하다.

논에서 메탄 배출을 저감하기 위한 물관리와 아산화질소 배출 저감을 위한 양분관리 기술을 함께 적용했을 때 각각의 장단점을 보완함으로써 보다 더 효과적인 온실가스 감축이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 온실가스 배출량 저감과 관련된 국내 연구는 물관리 혹은 양분관리 등 한 가지 기술만 적용한 경우가 대부분이며, 복합적인 저감 효과에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다. 또한 최근 활용이 증대하고 있는 헤어리베치의 적절한 활용에 대한 고려 역시 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 논에서 배출되는 온실가스의 효율적인 감축을 위해 간단관개와 논물얹게대기를 적용하는 물관리와 여러가지 질소원을 적용하는 양분관리를 함께 실시하는 복합기술 효과를 조사하였다. 이를 위하여 메탄 및 아산화질소 배출 특성을 분석하고, 수량 당 온실가스 배출량인 GHGI (Greenhouse gas intensity) 산정을 통해 현장 적용 가능성을 평가하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 시험포장 및 처리구 설계

본 시험은 전북 완주군 이서면에 위치한 국립농업과학원 내 벼 시험포장 (위도 35°82'14.5"N, 경도 127°04'136.0"E)에서 2018년에 실험을 수행하였다. 시험 토양은 양토 (Loam)로 물빠짐이 양호하고, pH는 6.7, 유기물 함량은 15.6 g kg<sup>-1</sup>

로서 그 외의 화학적 특성은 Table 1과 같다. 실험적 처리는 물관리와 양분관리 두 가지로 나뉜다. 물관리는 크게 3가지로 상시담수, 간단관개, 논물얇게대기 처리가 있다. 양분관리의 경우 크게 3가지로 속효성 화학비료, 헤어리베치, 완효성 비료 처리를 두었다. 그리고 두 가지 관리법을 바탕으로 다음과 같이 처리구를 설계하였다. ① 상시담수 및 화학비료 처리구 (CF+NPK), ② 간단관개 및 화학비료 처리구 (ID+NPK), ③ 간단관개 및 헤어리베치 처리구 (ID+HV), ④ 논물 얇게 대기 및 헤어리베치 처리구 (LL+HV), ⑤ 간단관개 및 완효성 비료 처리구 (ID+SRF), ⑥ 논물 얇게 대기 및 완효성 비료 처리구 (LL+SRF).

2.2 작물재배 및 물관리, 양분관리 정보

본 시험에 사용한 벼 품종은 신동진 (*Oryza sativa L.*)으로, 어린모를 손 이앙하였다. 벼 재배 시 양분관리는 농촌진흥청 작물별 시비처방기준 (NAAS, 2010a)을 토대로 수행하였다. 벼 재배를 위하여 모든 처리구에서 동량의 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O를 110-45-57 kg ha<sup>-1</sup> 시비하였다. 양분 관리를 위하여 사용한 질소원으로 화학비료 처리구에는 일반적으로 사용하는 요소비료를, 완효성 비료 처리구에는 LCU (Latex coated urea)를 사용하였다. 헤어리베치 처리구에서는 질소 시비량의 50%는 헤어리베치 1141 kg ha<sup>-1</sup> (건중기준, 55 N kg ha<sup>-1</sup>)를 기비로 사용하고, 나머지 50%는 속효성 요소 비료를 추비로 사용하였다. 기비로 사용한 헤어리베치의 이화학적 특성으로 수분함량은 75.7%, 질소함량은 4.82%, 탄소함량은 42.4%, C/N 비는 9였다. 이 때, 헤어리베치 처리구에서 요소비료를 추비로 사용한 것은 헤어리베치를 논에 사용할 시 한 달 내 90% 가까이 무기화되기 때문에 발생할 수 있는 초기 메탄 배출량 증가 및 질소 부족에 의한 수량 감소를 예방하기 위함이었다. 벼 재배 시 완효성 비료 처리구를 제외한 화학비료 및 헤어리베치 사용 처리구에서는 작물의 생육 수준에 따라 질소 비료

와 칼리 비료를 2회에 걸쳐 추비하였으며, 그 외의 벼 재배 및 시험구 관리 정보는 supplementary table 1에 나타내었다.

물관리는 다음과 같이 수행하였다. 상시담수 처리구에서는 벼 이앙 후 벼를 재배하는 동안 6 cm 이상 수위를 유지하였다. 간단관개 처리구에서는 상시담수를 유지하다가 이앙 후 30일부터 중간 낙수를 2주간 수행한 뒤, 재담수를 하여 수확을 위한 낙수 이전까지 6 cm 이상 수위를 유지하는 방식으로 논물을 관리하였다. 논물 얇게 논물 얇게 대기 처리구에서는 이앙 후 30일 이후부터 수위를 2~5 cm로 관개하여 물량이 자연소모 될 때까지 기다렸다가 다시 관개하는 방식으로 논물을 관리하였다. 마지막으로 모든 처리구에서 벼 수확 30일 전에 낙수를 실시하였다.

2.3 가스 시료 채취 및 분석

선행연구에서 보고한 바와 같이 일평균 온실가스 배출 농도 관측 시간인 10~12시 사이에 Closed chamber 법을 이용하여 가스 시료를 채취하였다 (Jeong et al., 2018). 챔버 밑면적이 0.36 m<sup>2</sup> (0.6×0.6 m), 높이 1 m 투명한 polyacrylic plastic의 소재의 chamber를 설치하여 가스 시료를 채취하는 데 이용하였다. 가스 시료는 벼 이앙 후 주 1회, 챔버 뚜껑을 열어둔 상태에서 60 mL 주사기를 이용해 초기 시료를 채취하고, 뚜껑을 닫아 밀폐한 후 챔버 내 온도와 부피를 측정하였다. 챔버 내 공기 순환을 위해 밀폐한 시간 동안 fan을 가동하였고, 챔버 밀폐 30분 후에 60 mL 주사기를 이용해 후기 시료를 채취하고 뚜껑을 열어 다음 채취 일까지 열린 상태를 유지하였다. 채취한 60 mL 주사기에 포집한 가스 시료는 가스 크로마토그래피 (Gas chromatography: Detector-FID for CH<sub>4</sub> and ECD for N<sub>2</sub>O)를 이용하여 정량분석을 하였으며, 메탄 및 아산화질소 배출량은 식 1, 2를 이용해 계산 하였다.

$$F = \rho \times V/A \times \Delta c/\Delta t \times 273/T \tag{eq. 1}$$

Table 1. Chemical Properties of rice paddy soil before experiment

pH (1:5, H <sub>2</sub> O)	EC (dS m <sup>-1</sup> )	Av. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	OM (g kg <sup>-1</sup> )	TOC (g kg <sup>-1</sup> )	T-N (g kg <sup>-1</sup> )	Ex. Cation (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )		
						K	Ca	Mg
6.7	0.5	142.5	15.6	9.1	0.81	0.42	5.43	2.31

Supplementary table 1. Schedule of management during rice cultivation

Plowing	Fertilizer or H.V. application	Irrigation	Transplanting	Intermittent drainage	Harvest
8 May	18 May	27 May	1 June	2 Jul.~17 Jul.	18 Oct.

F = CH<sub>4</sub> or N<sub>2</sub>O flux (mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>)  
 ρ = gas density (mg m<sup>-3</sup>)  
 V = volume of chamber (m<sup>3</sup>)  
 A = surface area of chamber (m<sup>2</sup>)  
 Δc/Δt = rate of increase of gas concentration (μL L<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>)  
 T = absolute temperature (273 + mean temperature in chamber)

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

F<sub>i</sub> = the rate of flux (g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) in the i<sup>th</sup> sampling interval  
 D<sub>i</sub> = the number of days in the i<sup>th</sup> sampling interval  
 n = the number of sampling intervals

### 2.4 GWP 및 GHGI 산정

식 3을 이용하여 벼논에서 배출된 메탄과 아산화질소를 지구온난화지수 (Global warming potential, GWP)를 곱하여 CO<sub>2</sub> 당량으로 환산하였다 (IPCC, 2007).

$$\text{GWP (kg CO}_2\text{-eqv. ha}^{-1}\text{)} = 25 \times \text{CH}_4 + 298 \times \text{N}_2\text{O} \quad (\text{eq. 3})$$

수량 당 온실가스발생량을 의미하는 온실가스 강도 (Greenhouse gas intensity, GHGI)는 앞서 구한 CO<sub>2</sub> 당량을 이용하여 식 4와 같이 산정하였다 (Van Groenigen et al., 2010; Pittelkow et al., 2014).

$$\text{GHGI (kg CO}_2\text{-eqv. kg}^{-1} \text{ grain)} = \text{GWP/grain yield} \quad (\text{eq. 4})$$

### 2.5 토양 조사 및 벼 수량 조사

공시 토양의 이화학성 분석은 토양시료를 채취하여 풍건 후 2 mm 체를 통과시켜 농촌진흥청 토양화학분석법 (NAAS, 2010b)에 준하여 분석하였다. pH는 토양을 증류수와 1:5 (W/V)로 혼합한 후 30분 간 교반하여 pH meter (Orison 4 star, Thermo, Singapore)로 측정하였고, EC는 pH 측정 후 토양 용액을 #42 여과지로 여과 후 EC meter(orison 4 star, Thermo, Singapore)를 이용하여 측정하였다. 유효인산은 Lancaster법 (NAAS, 2010b)으로 720 nm 파장에서 비색계 (AU/CARY 300, Varian Australia)로 분석하였으며, 치환성 양이온은 1M NH<sub>4</sub> OAC (pH 7.0) 용액으로 침출하여 유도결합플라즈마분광기 (Potima 7300DV, Perkin Elmer, USA)로 분석하였다. 총질소는 CN analyzer (Vario Max CN, Elementar, Germany)로 분석하였다.

메탄 배출량과 밀접하게 연관된 토양의 산화환원전위 값 (Eh value)을 조사하기 위해 토양에 백금전극을 설치하고 휴대용 Eh 측정기 (ORP meter, Lutron)으로 주기적으로 측정하고, 동시에 온도계를 이용하여 토양 온도를 측정하였다. 수확기에는 벼의 초장, 분얼수 및 정조 수량을 조사하였다. 이 때, 수량 조사를 위해 각 처리구 별로 100주를 수확한 후 ha 당 수량으로 환산하여 GHGI 산정에 활용하였다.

### 2.6 통계분석 방법

처리간 차이는 SPSS (IBM Statistics 25)를 이용하여 5% 유의수준에서 Duncan's multiple range test (DMRT)를 하여 비교하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 기상 조건, 토양 온도 및 산화환원전위 변화

조사기간 중 강수량과 일 평균 대기 온도 및 토양 온도 변화를 Fig. 1과 Fig. 2 (a)에 나타내었으며, 간단관개를 실시한 기간은 빗금으로 표시하였다. 강우는 6월 말과 8월 후반에 집중되었으며, 낙수 기간을 포함하여 7월 10일 ~ 8월 20일까지는 강우의 횟수와 양이 매우 적었다. 일 평균 대기 온도는 계절적 변화에 따라 8월에 가장 높았으며 이후 점차 감소하였다. 토양 온도 역시 일 평균 대기 온도와 유사한 경향으로 증가하였다. 토양의 산화환원전위 값은 벼논에서 토양의 산화환원 상태를 알아보는 지표로, 조사한 토양의 산화환원전위 변화 결과는 Fig. 2(b)와 같다. 벼 재배를 위해 담수를 실시하자 모든 처리구에서 산화환원전위가 감소하여 음의 값을 나

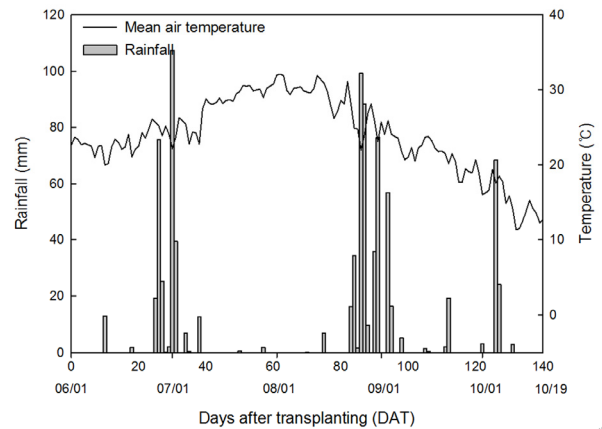


Fig. 1. Daily rainfall and mean air temperature during rice cultivation.

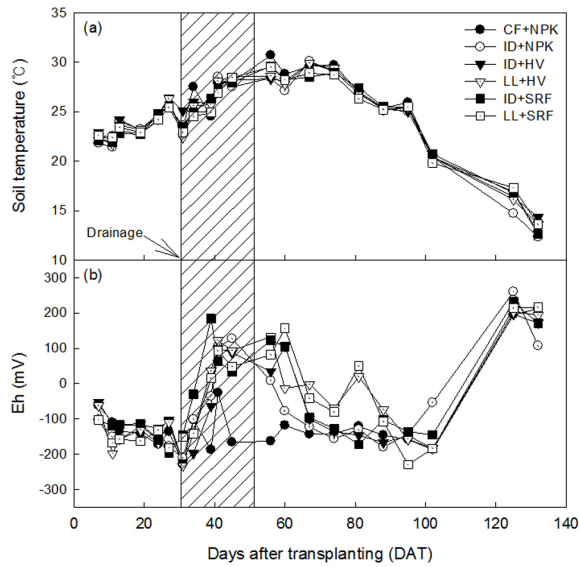


Fig. 2. Changes of soil temperature (a) and Eh value (b) during rice cultivation (▨ means intermittent drainage period).

타냈다. 담수상태의 CF+NPK 처리구에서 산화환원전위는 -150 mV 부근의 값을 나타냈으며, 이를 통해 담수에 의해 토양 환경이 메탄 발생에 적합하게 전환되었음을 확인할 수 있었다 (Masscheleyn et al., 1993; Wang et al., 1993). 반면에 간단관개 및 논물얹게물대기 처리구에서는 초반 담수상태일 때는 음수였던 산화환원전위 값이 낙수 또는 수위조절을 실시하자 최고 93~184 mV까지 증가하였으며, 이로부터 토양 환경이 호기적으로 전환된 것을 확인할 수 있었다. 그러나 간단관개 처리구에서는 다시 관개를 시작하자 산화환원전위 값은 점차 감소하여 다시 음의 값을 나타냈다. 반면에 논물얹게대기를 실시한 처리구에서는 불규칙적으로 산화환원전위가 증감하였는데, 이는 가뭄 및 강우에 의해 담수 효과가 강화 혹은 약화 되었기 때문으로 생각된다. 공통적으로 모든 처리구에서 수확을 위한 낙수를 실시하자, 산화환원전위는 양의 값을 나타냈다.

### 3.2 온실가스 배출 변화

#### 3.2.1 메탄 배출 특성

각각의 처리구 별 메탄 배출량 변화는 Fig. 3(a)와 같다. CF+NPK 처리구에서 메탄 배출량은 상시담수 실시 이후 점차 증가하여 이양 후 50일경에 최고점을 나타냈으며, 80일 이후 등숙기에 이르러 점차 감소하는 경향을 보였다. 이는 메

탄생성균이 토양 온도와 같은 환경적인 영향에 의해 증감하는 경향을 보인 것으로 판단된다. 실제 토양 온도와 메탄 배출량 간의 회귀분석을 실시한 결과 고도의 유의성을 확인할 수 있었다 (supplementary Fig. 1 (d)). 반면에 간단관개를 실시한 처리구들에서 메탄 배출은 낙수 이후로 점차 감소하여 이양 후 40일경 메탄 배출이 거의 일어나지 않았다. 이는 낙수에 의해 토양 환경이 전환되었기 때문으로 판단된다. 실제로 토양의 산화환원 상태를 나타내는 산화환원전위 값과 메탄 배출량 간의 회귀분석을 실시한 결과, 산화환원전위가 낮을수록 메탄 배출량이 늘어나는 경향을 확인할 수 있었다 (supplementary Fig. 1 (a)). 이는 선행 연구들에서와 마찬가지로 간단관개를 위해 실시하는 낙수에 의해 토양 내 기체가 환산, 토양 내 산소 유효도가 증가하는 등 토양이 호기적으로 전환되고, 그 결과 메탄 생성균이 감소하고 메탄 산화균이 증가하여 메탄 배출이 감소한 것으로 보인다 (Ma & Lu, 2011). 논물얹게대기를 실시한 처리구들에서도 간단관개를 실시한 처리구들과 유사한 결과를 보였다. 이는 논물의 담수 깊이가 얹게 유지됨에 따라 토양으로의 산소 확산이 증가한 영향으로 간단관개와 동일한 이유로 메탄 배출량이 감소한 것으로 보인다 (Kim et al., 2012; Ponnampereuma, 1972).

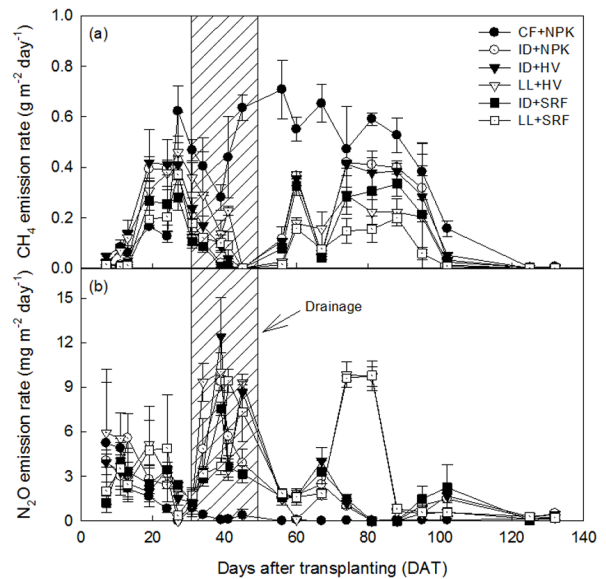
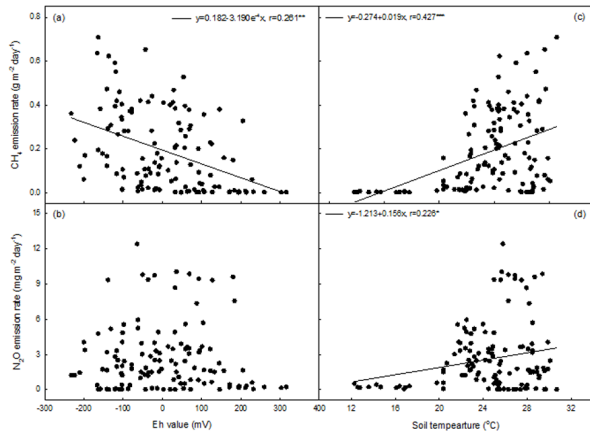


Fig. 3. Changes of CH<sub>4</sub> (a) and N<sub>2</sub>O (b) emission rate during rice cultivation (▨ means intermittent drainage period).

벼 재배 중 총 메탄 배출량은 Table 3에 나타난 바와 같다. CF+NPK 처리구와 비교하여 간단관개 및 논물얹게대기를 실



Supplementary Fig. 1.

Regression analysis between environmental parameters (Eh value and soil temperature) and greenhouse gas emissions (CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O).

시한 처리구들에서 유의적으로 낮은 메탄 배출량이 확인되었다. 총 메탄 배출량은 CF+NPK 처리구에서 가장 많았으며, 이어서 ID+HV, ID+NPK, LL+HV, ID+SRF, LL+SRF 순이었다. 특히 유기질 비료인 헤어리베치를 처리하였음에도 불구하고 간단관개 및 논물얹게대기를 수행하였을 때 총 메탄 배출량이 CF+NPK 처리구에서보다 적었다. 이를 통해 물관리를 실시함으로써 헤어리베치 사용에 따른 메탄 배출 증가를 억제할 수 있음을 알 수 있었다. Haque et al. (2016) 에 따르면 벼 재배 시 실시하는 중간 낙수는 토양 환경을 호기적으로 전환하여, 토양에 사용한 유기물이 메탄이 아닌 이산화탄소의 형태로 분해되고 안정화되어 낙수기간뿐만 아니라 재답수 이후에도 메탄 배출량이 낮게 관측된다고 하였다. 본 연구에서도 동일한 이유로 헤어리베치를 사용한 처리구를 포함한 모든 간단관개 및 논물얹게대기 처리구에서의 총 메탄 배출량이 CF+NPK 처리구에서보다 적게 나타난 것으로 보인다.

### 3.2.2 아산화질소 배출 특성

각각의 처리구 별 아산화질소 배출량 변화는 Fig. 3 (b)와 같다. 가장 낮은 아산화질소 배출량을 보인 CF+NPK 처리구의 경우 아산화질소 배출량은 답수 이후 점차 감소하여 이앙 후 40일경 이후로는 거의 배출되지 않았다. 이는 혐기적인 토양 환경이 발달함에 따라 탈질화 과정 중(NO<sub>3</sub><sup>-</sup> → N<sub>2</sub>O → N<sub>2</sub>) 발생한 아산화질소가 신속하게 N<sub>2</sub>로 전환되고, 상당량의 아산화질소가 물에 녹았기 때문으로 보인다 (Freney et al., 1981; Minami, 1987; Smith and Patrick, 1983). 반면에 이앙

후 30일, 간단관개를 실시한 처리구들에서는 낙수를 실시하고 아산화질소 배출량이 일시적으로 크게 증가하였다. 이는 선행연구들에서 보고된 바와 같이 토양 환경이 호기적 전환됨에 따라 질산화와 탈질화 과정이 촉진되어 아산화질소 배출이 증가한 것으로 판단된다 (Cai et al., 1997; Hua et al., 1997; Yan et al., 2000). 실제로 조사한 토양 산화환원전위 값이 증가 할 때마다 아산화질소 배출이 일시적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 논물얹게대기에서도 간단관개와 마찬가지로 토양 환경의 호기적 조성에 의해 아산화질소 배출이 증가한 것으로 보인다. 그러나 아산화질소 배출과 산화환원 전위 간의 회귀분석을 실시한 결과 유의성을 찾을 수 없었다 (supplementary Fig. 1 (b)). 이는 토양이 일시적으로 산화 되었을 때를 제외하고 아산화질소가 거의 배출되지 않은 영향으로 뚜렷한 경향성이 나타나지 않은 것으로 생각된다. 토양의 산화환원 상태 외에 아산화질소 배출에 영향을 준 환경 인자로 토양 온도와 아산화질소 배출간의 회귀분석 결과 유의성을 확인할 수 있었다 (supplementary Fig. 1 (d)). 이는 토양 온도가 전반적인 미생물 활성에 영향을 미친 결과로 생각된다.

벼 재배 중 총 아산화질소 배출량은 Table 3에 나타난 바와 같다. CF+NPK 처리구와 비교하여 간단관개 및 논물얹게대기를 실시한 처리구들에서 유의적으로 높은 아산화질소 배출량이 확인되었다. 총 아산화질소 배출량은 LL+HV 처리구에서 가장 많았으며, 이어서 LL+SRF, ID+HV, ID+NPK, ID+SRF, CF+NPK 순이었다. 아산화질소 배출량은 메탄 배출량과 상반된 경향을 보였는데, 이는 Cai et al. (1997)의 연구 결과와도 일치하였다. 또한 동일한 양의 질소를 투입하였음에도 불구하고 사용한 질소원의 종류에 따라 아산화질소 배출량의 차이가 나타났다. 특히 헤어리베치를 사용한 처리구에서 아산화질소 배출량이 상대적으로 높은 편이었는데, 이는 헤어리베치로부터 공급된 토양 내 유기 탄소가 탈질화를 위한 전자 공여체로 활용되는 등에 의한 영향으로 생각된다 (Schreibor et al., 2012; Schmidt et al., 2009).

### 3.3 벼 생육 및 수량 특성

수확기 벼의 초장, 분얼수, 정조 수량은 Table 2와 같다. 모든 처리구의 질소 사용량이 동일 하였음에도 불구하고 사용한 질소원의 종류에 따라 생육 특성의 차이가 나타났다. 상대적으로 완효성 비료를 사용한 처리구에서 초장, 분얼수, 수량이 다소 높았다. 이는 소수성 물질로 코팅된 완효성 비료가 질소 손실을 최소화 하면서 작물이 질소를 필요로 하는 때에

Table 2. Growth properties and grain yield under different treatments to rice paddy soil (Different letters following each value in the same column indicate significant differences among treatments)

Treatment	Plant height (cm)	No. of tillers per plant	Grain yield (kg ha <sup>-1</sup> )
CF+NPK	92.3 <sup>b</sup>	9.8 <sup>c</sup>	4,974 <sup>a</sup>
ID+NPK	94.8 <sup>b</sup>	11.5 <sup>b,c</sup>	4,857 <sup>a</sup>
ID+HV	94.6 <sup>b</sup>	12.2 <sup>a,b,c</sup>	4,731 <sup>a</sup>
LL+HV	98.8 <sup>b</sup>	11.1 <sup>b,c</sup>	5,074 <sup>a</sup>
ID+SRF	107.1 <sup>a</sup>	15.4 <sup>a</sup>	5,039 <sup>a</sup>
LL+SRF	109.4 <sup>a</sup>	14.7 <sup>a,b</sup>	5,344 <sup>a</sup>

Table 3. Seasonal fluxes of greenhouse gases, global warming potential (GWP), and yield scaled greenhouse gas intensity (GHGI) as influenced by management of water and nutrient (Different letters following each value in the same column indicate significant differences among treatments).

Treatment	Seasonal flux (kg ha <sup>-1</sup> )		GWP (kg CO <sub>2</sub> -eqv. ha <sup>-1</sup> )	Yield scaled GHGI (kg CO <sub>2</sub> -eqv. kg <sup>-1</sup> grain)
	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O		
CF+NPK	435 <sup>a</sup>	0.78 <sup>c</sup>	11115 <sup>a</sup>	2.23 <sup>a</sup>
ID+NPK	208 <sup>b,c</sup>	2.71 <sup>c,d</sup>	5997 <sup>b</sup>	1.23 <sup>b,c</sup>
ID+HV	225 <sup>b</sup>	3.01 <sup>c</sup>	6531 <sup>b</sup>	1.38 <sup>b</sup>
LL+HV	182 <sup>c,d</sup>	4.40 <sup>a</sup>	5861 <sup>b</sup>	1.16 <sup>c</sup>
ID+SRF	154 <sup>d</sup>	2.45 <sup>d</sup>	4580 <sup>c</sup>	0.91 <sup>d</sup>
LL+SRF	106 <sup>e</sup>	3.88 <sup>b</sup>	3801 <sup>d</sup>	0.71 <sup>e</sup>

질소를 공급하여 질소이용효율을 증대시켜 수량이 증가한 것으로 보인다 (Linqvist et al., 2012; Snyder et al., 2009). 그러나 처리구 간에 유의적인 수량의 차이는 나타나지 않았다.

### 3.4 지구온난화지수 (GWP) 및 지구온난화강도 (yield-scale GHGI)

벼 재배기간 중 복합기술 적용에 따른 GWP 및 GHGI는 Table 3에 나타난 바와 같다. CF+NPK 처리구와 비교하여 양수분 복합기술을 적용한 처리구들에서 유의적으로 작은 GWP 및 GHGI 값을 확인할 수 있었다. CF+NPK 처리구의 GWP 중 메탄이 차지하는 비율은 98%로 배출된 온실가스의 대부분이 메탄이었다. 반면에 간단관개 및 논물얹게대기를 실시한 처리구의 GWP 중 메탄 비율은 76~90%, 아산화질소 비율은 10~24%로 나타났다. 이때, 아산화질소 배출이 증가하였음에도 불구하고 메탄 배출의 감축효과로 인해 GWP가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 메탄과 아산화질소의 맞교환 (trade off) 현상으로, 간단관개 및 논물얹게대기 수행으로 메탄 배출이 감소하고 아산화질소 배출이 증가한 것으로

보인다 (Cai et al., 1997).

작물 수량 당 온실가스 배출량을 나타내는 값인 GHGI는, 본 연구에서는 현장 적용 가능성에 대한 평가의 지표로 활용하였다. Table 3에 나타난 바와 같이 관행적인 처리구인 CF+NPK 처리구에서 GHGI가 가장 높았다. 이는 동일한 양의 벼를 생산하는데 배출되는 온실가스가 CF+NPK에서 가장 많았음을 의미한다. 반면에 간단관개 및 논물얹게대기를 실시한 다른 처리구에서는 산정된 GHGI값은 CF+NPK 처리구에 비해 약 40~70% 낮았다. 특히 완효성비료를 사용한 복합기술 처리구에서 GHGI가 낮았다. 이는 상대적으로 낮은 GWP 및 높은 수량성에 의한 것으로, 간단관개 또는 논물얹게대기와 완효성 비료를 함께 적용하는 복합기술의 현장 적용 시 효과적인 온실가스 감축이 가능할 것으로 생각된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 논에서의 배출되는 온실가스 감축을 위하여 양수분 복합 관리 기술을 적용하였다. 이로부터 메탄 및 아산화질소 배출 특성 및 GHGI 산정을 통한 현장 적용 가능

성을 평가하고자 하였다. 실험결과 관행적인 CF+NPK 처리구와 비교하여 간단관개 및 논물얹게대기를 수행함에 따라 메탄 배출이 유의적으로 감소한 반면에 아산화질소 배출은 증가하였다. 벼 수량의 경우 질소원의 종류에 따라 수량 차이가 다소 있었으며, 완효성 비료를 사용한 처리구에서 상대적으로 수량이 많았다. 현장 적용 가능성 평가를 위해 정조수량 당 GWP 값인 GHGI를 처리구 간에 비교한 결과, CF+NPK 처리구에서 가장 컸으며, 이어서 ID+HV, ID+NPK, LL+HV, ID+SRF, LL+SRF 순 이었다. 특히 완효성 비료를 사용한 LL+SRF와 ID+SRF 처리구에서 GHGI값이 유의적으로 낮았다. 이는 상대적으로 낮은 온실가스 배출량 및 높은 수량성에 의한 것으로, 논물얹게대기와 완효성 비료를 함께 적용하는 복합 기술의 현장 적용 시 가장 효과적인 온실가스 감축이 가능할 것으로 생각된다. 그러나 본 연구의 조사기간이 짧아 다년간의 추가적인 실험이 필요할 것으로 판단되며, 양수분 복합 관리가 토양 내 탄소 농도 변화에도 영향을 줄 수 있는 만큼 추후 CO<sub>2</sub>배출 역시 조사하여 자료에 반영해야 할 것으로 생각된다.

## 사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구 개발사업 (PJ012614) 지원에 의해 이루어진 것임

## REFERENCES

- Ahn JH, Choi MY, Kim BY, Lee JS, Song JK, Kim GY, Weon HY. 2014. Effects of water-saving irrigation on emissions of greenhouse gases and prokaryotic communities in rice paddy soil. *Microb. Ecol.* 68(2): 271-283.
- Cai Z, Xing G, Yan X, Xu H, Tsuruta H, Yagi K, Minami K. 1997. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilisers and water management. *Plant Soil.* 196(1): 7-14.
- Freney J, Denmead O, Watanabe I, Craswell E. 1981. Ammonia and nitrous oxide losses following applications of ammonium sulfate to flooded rice. *Aust. J. Agric. Res.* (1): 37-45.
- Greenhouse Gas Inventory and Research Center (GIR). 2018. National Inventory Report in Korea. Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea (GIR): Seoul, Korea, 2018.
- Haque MM, Biswas JC, Kim SY, Kim PJ. 2016. Suppressing methane emission and global warming potential from rice fields through intermittent drainage and green biomass amendment. *Soil Use and Manag.* 32(1): 72-79.
- Hua X, Guangxi X, Cai Z-C, Tsuruta H. 1997. Nitrous oxide emissions from three rice paddy fields in china. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 49(1): 23-28.
- IPCC. 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* (eds S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor & H.L. Miller), pp. 996 - 1007. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC. 2013. Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Itoh M, Sudo S, Mori S, Saito H, Yoshida T, Shiratori Y, Suga S, Yoshikawa N, Suzue Y, Mizukami H et al. 2011. Mitigation of methane emissions from paddy fields by prolonging midseason drainage. *Agric. Ecosyst. Environ.* 141(3): 359-372.
- Jeong HC, Choi EJ, Lee JS, Kim GY, Lee SI. 2018. Comparison of CH<sub>4</sub> emission between auto chamber and manual chamber in the rice paddy. *J. Climate Change Res.* 9(4): 377-384.
- Ji Y, Liu G, Ma J, Zhang G, Xu H, Yagi K. 2013. Effect of controlled-release fertilizer on mitigation of N<sub>2</sub>O emission from paddy field in south china: A multi-year field observation. *Plant Soil.* 371(1): 473-486.
- Kim GY, Lee SB, Lee JS, Choi EJ, Ryu JH, Park Wj, Choi Jd. 2012. Mitigation of greenhouse gases by water management of sri (system of rice intensification) in rice paddy fields. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45(6): 1173-1178.
- Kim YS, Kim TS, Ham SK, Bang SW, Lee CE. 2009. The effect of compound fertilizer contained slow release nitrogen on turfgrass growth in creeping bentgrass and



- on change in soil nitrogen. *Kor. Turfgrass Sci.* 23(1): 111-122.
- Lee JS, Lee HJ, Seo JH. 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(2): 137-141.
- Lee KB, Park CW, Park KL, Kim JG, Lee DB, Kim JD. 2005. Nitrogen balance in paddy soil of control-release fertilizer application. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 38(3): 157-163.
- Linquist BA, Adviento-Borbe MA, Pittelkow CM, van Kessel C, van Groenigen KJ. 2012. Fertilizer management practices and greenhouse gas emissions from rice systems: A quantitative review and analysis. *Field Crops Research.* 135: 10-21.
- Ma K, Lu Y. 2011. Regulation of microbial methane production and oxidation by intermittent drainage in rice field soil. *FEMS Microbiology Ecology.* 75(3): 446-456.
- Masscheleyn PH, DeLaune RD, Patrick WH. 1993. Methane and nitrous oxide emissions from laboratory measurements of rice soil suspension: Effect of soil oxidation-reduction status. *Chemosphere.* 26(1): 251-260.
- Minami K. 1987. Emission of nitrous oxide(N<sub>2</sub>O) from agro-ecosystems. *Jpn. Agric. Res. Q.* 21: 22-27.
- NAAS. 2010a. Fertilizer application recommendations for crop plants. National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon, Korea.
- NAAS. 2010b. Method of soil and plant analysis. National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon, Korea.
- Pittelkow CM, Adviento-Borbe MA, van Kessel C, Hill JE, Linquist BA. 2014. Optimizing rice yields while minimizing yield-scaled global warming potential. *Global Change Biology.* 20(5): 1382-1393.
- Ponnamperuma FN. 1972. The chemistry of submerged soils. In: Brady NC, editor. *Advances in agronomy.* Academic Press. p. 29-96.
- Schmidt I. 2009. Chemoorganoheterotrophic growth of *Nitrosomonas europaea* and *Nitrosomonas eutropha*. *Curr. Microbiol.* 59: 130-138.
- Schreiber F, Wunderlin P, Udert K, Wells G. 2012. Nitric oxide and nitrous oxide turnover in natural and engineered microbial communities: Biological pathways, chemical reactions, and novel technologies. *Frontiers in Microbiology.* 3(372): 1-24.
- Seo JH, Park JY, Song DY. 2005. Effect of cover crop hairy vetch on prevention of soil erosion and reduction of nitrogen fertilization in sloped upland. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 38(3): 134-141.
- Smith CJ, Patrick WH. 1983. Nitrous oxide emission as affected by alternate anaerobic and aerobic conditions from soil suspensions enriched with ammonium sulfate. *Soil Biology and Biochemistry.* 15(6): 693-697.
- Snyder CS, Bruulsema TW, Jensen TL, Fixen PE. 2009. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment.* 133(3): 247-266.
- Statistics Korea, 2018. Annual report on the area of arable land statistics. <http://www.kosis.kr/>. Accessed August 2018 (in Korean).
- Van Groenigen JW, Velthof GL, Oenema O, Van Groenigen KJ, Van Kessel C. 2010. Towards an agronomic assessment of n<sub>2</sub>o emissions: A case study for arable crops. *European Journal of Soil Science.* 61(6): 903-913.
- Wang ZP, DeLaune RD, Patrick WH, Masscheleyn PH. 1993. Soil redox and ph effects on methane production in a flooded rice soil. *Soil Science of Society of America Journal.* 57(2): 382-385.
- Yagi K, Minami K. 1990. Effect of organic matter application on methane emission from some japanese paddy fields. *Soil Science and Plant Nutrition.* 36(4): 599-610.
- Yan X, Du L, Shi S, Xing G. 2000. Nitrous oxide emission from wetland rice soil as affected by the application of controlled-availability fertilizers and mid-season aeration. *Biology Fertility of Soils.* 32(1): 60-66.