

친환경 벼 재배지에서 물관리 방법별 메탄 배출 일변화에 관한 연구

오승가* · 조영손**†

*경상국립대학교 농업생명과학대학 식물자원학과 박사과정, **경상국립대학교 농업생명과학대학 스마트농산업학과 교수

Diurnal variations of methane emission as effected by water management methods in a rice cultivation paddy field

Oh, Seung Ka* and Cho, Young Son**†

*Ph.D. Candidate, Department of Plant Resources, School of Agricultural Life Sciences, Gyeongsang National University, Jinju, Korea

**Professor, Department of Smart-Agricultural Industry, School of Agricultural Life Sciences, Gyeongsang National University, Jinju, Korea

ABSTRACT

This study was performed to determine the changes in methane emissions under different water management methods during rice cultivation in response to climate change. To study the diurnal variations in methane emissions from July to September 2022, in the Apgok-ri area of Gungryu-myeon, Uiryeong-gun, a closed chamber method was used at 4-hour intervals. The treatments were conventional (CONV), mid-season drainage for 2 weeks with low level water management (2MD-1) and alternate water irrigation (2MD-2), mid-season drainage for 3 weeks with low level water management (3MD-1), mid-season drainage for 4 weeks with low level water management (4MD-1) and alternate water irrigation (4MD-2). From July to August, methane emissions were highest at 14:00 and lowest at 02:00 in all water management treatments. In July, the treatment with the highest average methane emission was the CONV (29.1 mg m⁻² hr⁻¹). The reductions in methane emissions compared to CONV were as follows: 2MD-1 (51.4%), 2MD-2 (53.8%), 3MD-1 (68.5%), 4MD-1 (70.2%), and 4MD-2 (71.8%). Similarly, from August to September, methane emissions were reduced by 31.3% to 70.3% through water management. As the duration of mid-season drainage increased, methane emissions decreased, with alternate water irrigation proving more effective in reducing methane emissions compared to low water management. Therefore, as a method to reduce methane emissions in paddy fields, it is most effective to implement mid-season drainage in July (approximately 40 days after transplanting). After mid-season drainage, alternate water irrigation is expected to reduce methane emissions. Such water management practices in rice cultivation could contribute significantly to mitigating climate change by lowering methane emissions.

Key words : Green House Gas, Methane Flux, Water Management, Rice, Diurnal Change

†Corresponding author : protactiacho@gnu.ac.kr (Gyeongsang National University, Jinju, 52725, Korea. Tel. +82-55-772-3221) ORCID 오승가 0009-0002-0078-6237 조영손 0000-0003-3074-6412

1. 서론

온실가스(GHG)는 지구의 온실효과를 유발하는 대기 중에 존재하는 가스 상태의 물질로 온실가스의 농도의 증가는 지구온난화 및 그에 따른 심각한 기후변화를 유발하였다(Choi et al., 2019; Foley et al., 2011). 농업부문에서 배출되는 온실가스로는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O)가 있으며, 이 중 이산화탄소는 작물의 광합성 작용으로 상쇄되므로 온실가스 배출량 계산에 포함되지 않고, 메탄과 아산화질소에 의한 것만 포함한다(Jeong et al., 2010). IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)는 가이드라인에서 농업부문 배출원은 크게 축산과 경종으로 나누며, 이 중 경종부문은 벼 재배, 농경지토양 및 잔물잔사소각으로 구분하였다. 이 중 벼 재배에서 주로 발생되어지는 메탄은 지구온난화를 유발하는 가장 영향력이 있는 가스 중 하나로, 단위 질량당 지구온난화지수(GWP)는 이산화탄소의 25배에 달한다(Shindell et al., 2009). 복사 강제력에 의한 지구온난화 영향은 온실가스 전체에서 메탄이 이산화탄소 다음으로 많은 약 16%를 차지하고 있다(Butler and Montzka, 2020). 메탄은 이산화탄소와는 다르게 화석연료의 연소가 아니라, 생물적 요인인 메탄생성균의 활동에 의한 발생이 주요 배출원이 된다. 이러한 메탄생성균은 일반적으로 산소가 부족한 혐기적인 조건에서 유기물은 분해하여 메탄을 생성한다(Malyan et al., 2016). 벼는 대부분 논토양에서 담수상태로 재배되기 때문에 대표적 혐기적 조건 중 하나이며(GIR, 2019), 온실가스 배출, 특히 메탄 배출의 주요 원인 중 하나이다(Suepa et al., 2013). 전 세계의 인위적 배출량 중에서 8%가 벼 논에서 발생하는 것으로 알려져 있다(Saunio et al., 2020). 우리나라는 전체 경작지 면적 1,512,145 ha의 약 50%인 763,989 ha를 논 면적이 차지하고, 상당량의 온실가스가 논에서 발생되고 있는 실정이다(KOSIS, 2023). 국내 벼 재배에 따른 메탄 배출량은 6.0 Tg CO₂ep이다. 이는 총 메탄 배출량의 약 22%, 농업에서 발생하는 배출량의 51.2%를 차지한다(GIR, 2019).

현재까지 논에서 메탄 배출을 저감하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있으며, 중간낙수와 같은 물관리 기술이 메탄 배출을 감축하는데 효과가 있는 것으로 보고되었다(Itoh et al., 2011; Lagomarsino et al., 2016; Ma and Lu, 2011; Towprayoon, 2005). 우리나라에서도 이와 같은 연구가 수행되었는데, 상시담수와 비교하여 메탄 배출량이 간단 관개 처리시 66% 저감 가능하였고, 논물알개대기 처

리시 78%까지 감축이 가능하였다(Ahn et al., 2014; Kim et al., 2012). 중간낙수를 통해 토양 상태를 호기 조건으로 유지가 가능하여 메탄 산화를 촉진시켜 배출량을 감소시켰고(Kim et al., 2016), 벼 재배기간동안 토양 수분함량을 포화용수량으로 처리하였을 때 담수 8 cm 및 4 cm보다 메탄 발생량이 적었다(Lee et al., 2005), 논물 수위를 낮게 유지하거나 암거배수를 설치하여 토양 내 산소 확산을 용이하게 함으로써 메탄 배출이 저감되었으며(RDA, 2005), 벼 재배 중 중간물떼기 및 걸러대기(water saving drainage)를 처리하였을 때 상시담수 대비 큰 메탄 배출 저감 효과가 있었다(상시담수 대비 66~72% 저감)(RDA, 2012, 2013, 2017). 중간물떼기 재배방법은 이미 많은 농가에서 수행되고 있으며, 연구분야에서도 다른 메탄 감축 재배기술과 병합하여 복합적인 연구가 이루어지고 있다(RDA, 2020) 하지만, 논물관리 기술은 메탄 배출 저감이 가능하다고 보고되고 있으나, 중간낙수 기간중 강수현상에 따라 메탄 발생량에 큰 영향을 미치거나(Kim et al., 2016), 중간물떼기 이행이 어려운 논들이 다수 존재해 획일적인 물관리는 불가능하며(Gwon et al., 2022), 이에 정확한 가이드가 필요한 실정이다. 칸쿤에서 개최된 제 16차 기후변화당사국총회(COP16, 2016)에서 국가온실가스 인벤토리, 감축행동 등의 내용이 포함된 개도국들의 격년 갱신보고서(Biennial Update Report; BUR) 제출이 결정되었다(KEEI, 2015). 이러한 국제적 요구에 대응 하기 위해서 우리나라는 매년 국가온실가스인벤토리 보고서를 발간하고 있으며, 온실가스 감축목표를 계획하고 이행하기 위해서 주요 온실가스 배출원에 대한 정확한 배출량 조사는 중요하다(Kim, 2007).

국내에서는 농업이 주는 긍정적 영향을 유지하는 환경친화적 지속 농업을 위한 노력이 이루어지고 있고, 토양의 유기탄소 저장 능력을 높일 수 있으며, 소득 증대가 가능한 친환경 농업의 형태로 변화하고 있다. 우리의 주식인 쌀도 예외일 수 없다(Yoon et al., 2007). 하지만, 친환경 벼 재배시 발생할 수 있는 온실가스에 대한 재평가는 미미한 실정이다.

따라서, 본 연구는 친환경 벼 재배지에서의 중간낙수와 알개대기 및 알개걸러대기 등의 물관리 방법에 따른 벼 주요 생육시기별 일일간의 메탄 가스 배출 양상의 변화를 살펴봄으로써, 온실가스 감축이 가능한 벼 재배 방법 개발 및 온실가스 관리에 필요한 기초자료로 활용하고자 본 연구를 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시험포장 및 물관리 처리구 설계

본 시험은 2022년 6월 10일부터 10월 25일 수확까지 경상남도 의령군 공류면 압곡리에 위치한 친환경 벼 재배지 (35.4336866N, 128.2652065E)에서 수행되었다. 시험 토양은 시험 전 10년동안 유기물로 유박(Milti Power Gold, Farmfriend, Korea)을 $N-7.2 \text{ kg } 10a^{-1}$ 사용하였던 곳으로, 토성은 양토(Loam)이며, 물빠짐이 약간 양호하였다. 시험 지역 토양의 화학적 특성은 Table 1과 같다. 토양분석은 챔버 주변에서 오거($\varnothing 50.8 \text{ mm}$, Eijkelkamp, Netherland)를 이용하여 6회 샘플링한 것을 취합하여 분석에 이용하였고, 농촌진흥청 토양 및 식물체 분석법(NAAS, 2000)에 준하여 분석을 실시하였다.

물관리방법별 처리는 주당 평균 분얼수가 15개에 도달한 7월 13일부터 ① 중간낙수 2주 + 알계대기(2MD-1), ② 중간낙수 2주 + 알계걸러대기(2MD-2), ③ 중간낙수 3주 + 알계대기(3MD-1), ④ 중간낙수 4주 + 알계대기(4MD-1), ⑤ 중간낙수 4주 + 알계걸러대기(4MD-2)로 하고, 상시담수(CONV)를 대조구로 설정하였다. 각 처리구의 면적은 600 m^2 이상으로 설정하였다.

2.2. 재배 및 물관리 방법

본 시험에 사용된 유박비료는 벼 이앙 2주전에 $120 \text{ kg}/10a$ 를 트랙터부착형 비료살포기(CH-600J, Cheong Song, Korea)를 이용하여 전량 시비하였으며, 시비후 10 cm 깊이로 마른 로터리 경운을 1회 실시하였으며, 이후 벼 이앙 5일 전 관수를 시작하여 5 cm 깊이로 담수 후 로터리 경운을 실시하였고, 이는 중간낙수 시기까지 담수심을 5~7 cm로 유지하였다.

공시 벼 품종은 새청무(*Oryza sativa* L.)로, 2022년 6월 10일에 30일 육묘한 중모를 주당 5~6본씩 재식거리 조건 30 cm, 주간 15 cm로 기계이앙(TGO660DL, TYM, Korea)하였다. 잡초와 병해충관리 및 기타 재배관리는 농촌진흥청에서 제시한 표준재배법에 준하여 수행하였고, 친환경 인증을 받은 제제를 사용하였다. 중간낙수 처리는 무효분얼기가 시작되는 7월 13일에 시작하였고, 중간낙수 2주 처리구(①, ②)는 7월 27일에, 중간낙수 3주 처리구(③)는 8월 3일에, 중간낙수 4주 처리구(④, ⑤)는 8월 10일에 각각 중간낙수를 종료하고 관수를 시작하였다. 중간낙수 종료 후 알계대기 처리는 물꼬를 열어 담수심 4 cm를 유지하였

고, 알계걸러대기 처리는 일주일 간격으로 담수심 4 cm까지 관수한 후 물꼬를 닫은 후 자연건조 시켰다. 완전물떼기는 등숙기 이후 10월 5일에 실시하였고, 10월 25일에 콤바인(HJ6115, TYM, Korea)을 이용하여 벼를 수확하였다.

2.3. 메탄 발생량 및 Eh 조사

메탄 가스 샘플링은 폐쇄형챔버법(Minamikawa et al., 2015)으로, 가로×세로×높이가 $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm} \times 130 \text{ cm}$ 인 PC (Polycarbonate) 소재인 수동형챔버를 이앙 3일 후 설치하였고, 챔버내 벼를 8본으로 통일하였다. 챔버는 논둑에서부터 5 m 내외에 챔버 하단 기둥을 20 cm 깊이로 토양에 박은 후 움직이지 않게 고정하였고, 태풍을 대비해서 탄성이 있는 줄을 이용하여 발판에 고정하였다. 발판 설치하는 길이 5 m 높이 50 cm 폭 30 cm로 제작하여 설치하였으며, 이는 시료 샘플링시 벼나 토양에 미치는 영향을 최소화하도록 설계되었다. 가스 시료는 생육시기별 변화를 알아보기 위하여 벼의 생육단계를 고려하여 6월 17일(착근기)에는 일중 평균온도인 10시 30분~11시 30분 사이에 1회 샘플링하였으며, 이후 7월 27일~28일(무효분얼기 이후), 8월 25일~26일(출수기 이후)과 9월 16일~17일(호숙기)에 샘플링하였고, 토양 Eh는 PC8500 (APER, China) 사용하여 각 조사날짜별 오전 10시에 메탄 샘플링 시 함께 조사하였다.

일일동안 발생하는 가스 양상의 변화를 알아보기 위해서 4시간 간격으로 시료를 샘플링하여 분석하였다. 대기 시료는 샘플링 시작과 30분 이후에 시험포 중앙 시작점과 끝점에서 각각 샘플링 하였고, 메탄 가스 샘플링은 챔버 하단의 좌·우측 물 이동로($\varnothing 4 \text{ cm}$)를 마개로 막아두고, 챔버를 닫은 후 60 ml 샘플링 주사기를 3회 펌핑하여 초기시료를 샘플링하였다. 이 때 챔버내 100 cm 높이에서 온도를 측정하였고, 챔버 부피를 측정하였다. 챔버 문을 닫고 24분 후 1분간 fan을 돌려 순환시켰고, 4분 후(챔버 문 닫은 후 30분 경과) 60 ml 샘플링 주사기를 3회 펌핑하여 가스를 샘플링하였으며, 동시에 온도를 측정하였다. 샘플링이 끝나면 다음 조사시기까지 문과 물꼬를 모두 열어 두었다. 샘플링한 시료는 실험장소까지 냉장하여 이동하였고, 25 ml 진공된 바이알병(Teledyne Tekmar, USA)에 옮겨 경상국립대학교 칠암캠퍼스 공동실험실습관에서 분석하였다. 샘플 분석은 Gas Chromatography (GC, Teledyne Tekmar, USA)를 이용하였고, FID 검출기로 컬럼은 CP-PoraPLOT Q (Agilent, USA; $27.5 \text{ m} \times 0.32 \text{ mm}$;

40℃, 4.5 min)를 이용하였고, 주입기와 검출기 온도는 120, 200℃로 설정하였다. 분석된 값을 이용하여 식 (1)을 통해 메탄 배출량(Flux)을 계산하였다.

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

F = CH₄ flux (mg m⁻² hr⁻¹)

ρ = gas density (mg m⁻³)

V = volume of chamber (m³)

A = surface area of chamber (m²)

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

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

2.4. 통계 처리

수집된 자료는 SAS프로그램(V.9.2, Cary, NC, USA)의 PROC ANOVA procedure을 이용하여 Duncan의 다중범위검정법(Duncan's multiple range test, DMRT)을 통해 평균값을 5% 유의수준에서 비교하여 나타냈다.

3. 결과 및 고찰

시험 전 토양은 pH가 5.06~5.24였고, OM은 20.9~28.9 mg kg⁻¹이었으며, 유효 규산 함량은 64.4~86.8 g kg⁻¹이었다(Table 1). Table 2와 같이 시험 후 토양 화학성에서는 pH는 물관리 처리별 차이가 없었고, EC는 4MD-1에서 0.40 dS cm⁻¹로 가장 낮았으며, 2MD-2에서 0.60 dS cm⁻¹로 가장 높게 나타났다. OM은 22.3~29.3 g kg⁻¹ 범위로 조사되었다. 시험 후 토양 화학적 특성 조사에서는 물관리 처리에 따른 차이를 확인하기 어려웠다.

벼가 재배된 경상남도 의령군의 기후적 특성은 Fig. 1과 같이, 중간낙수가 시작되는 7월 13일 이후 약 5일간 강우가 없었지만, 중간낙수 기간과 장마기간 겹쳐 7월 18일에 71.1 mm day⁻¹의 많은 비가 내리는 등 4주차가 종료되는 8월 10일까지 약 10일 정도 0.1~22.5 mm day⁻¹가량의 비가 내렸지만, 물꼬 정비를 통하여 중간낙수 처리구는 퇴수로를 확보하여 빠른 배수를 유도하였다. 모든 중간낙수 처리구에서 토양이 건조됨에 따라 논 지표면이 갈라진 것을 확인할 수 있었다. 일평균기온은 23.0~30.8℃로 나타났다으며, 전체 조사기간 일평균기온 중 7월이 26.6~26.7℃로 가장 높았고, 8월과 9월은 24.2~25.5℃로 비슷하게 나타났다.

토양 Eh는 6월 17일과 중간낙수 시작 전 측정된 7월 13일에서 처리간 차이가 없었다. 이는 모든 처리구가 답수상태였기 때문인 것으로 판단된다. 중간낙수 2주 처리

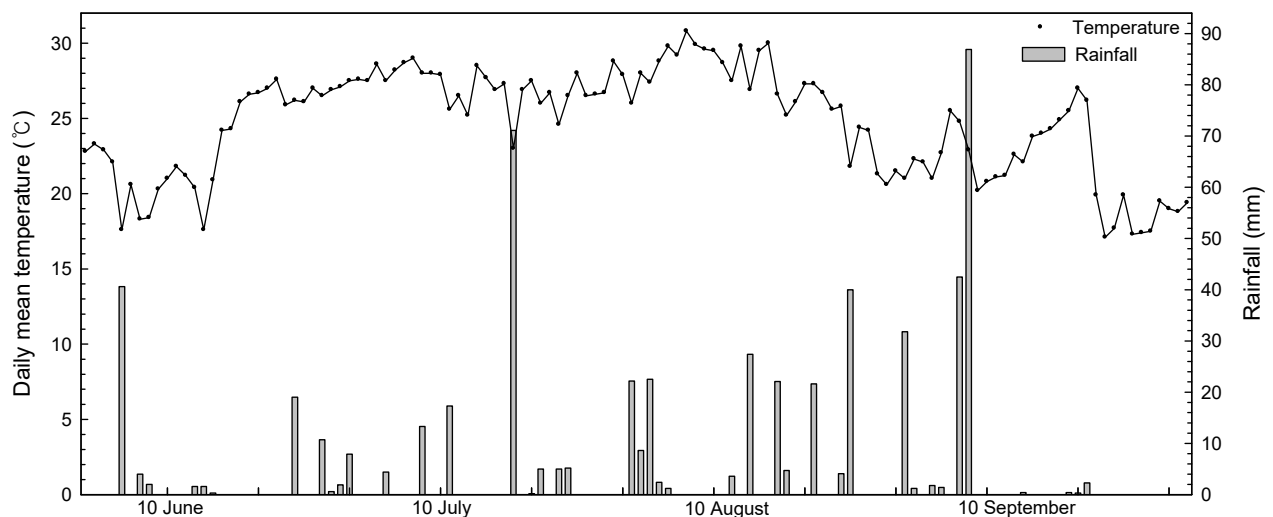


Fig. 1. The changes of climate characteristics in rice cultivation field

Table 1. Soil chemical properties before the experimental of diurnal variation methane emissions in rice field cultivation

Treatment [†]	pH	EC [†] 1:5 dS cm ⁻¹	T-N g kg ⁻¹	T-C	OM	Av. P ₂ O ₅ mg kg ⁻¹	Av. SiO ₂	Ex. Cation			
								K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺
CONV	5.06	0.75	1.80	19.8	28.9	261	68.9	0.13	3.75	0.40	0.40
2MD-1	5.22	0.90	1.70	19.7	26.4	319	64.4	0.18	5.80	1.00	0.50
2MD-2	5.24	0.85	1.80	20.0	26.1	280	73.2	0.19	5.33	0.70	0.65
3MD-1	5.24	0.50	1.60	17.0	20.9	234	75.9	0.15	4.97	0.60	0.55
4MD-1	5.18	1.15	1.90	20.8	24.4	245	86.8	0.14	4.70	0.57	0.55
4MD-2	5.22	0.60	1.40	17.6	24.5	117	84.4	0.17	5.07	0.77	0.75

[†]EC, electrical conductivity (1:5); T-N, total nitrogen; T-C, total carbon; OM, organic matter; Av. P₂O₅, available P₂O₅; Av. SiO₂; available SiO₂; Ex. Cation, exchangeable cations.

[‡]CONV, conventional; MD, mid-season drainage (2, 3, 4 weeks); -1, low level water management; -2, alternate water irrigation.

Table 2. Soil chemical properties after the experimental of diurnal variation methane emissions as influenced by water management methods in rice cultivation

Treatment [†]	pH	EC [†] 1:5 dS cm ⁻¹	T-N g kg ⁻¹	T-C	OM	Av. P ₂ O ₅ mg kg ⁻¹	Av. SiO ₂	Ex. Cation			
								K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺
CONV	5.23	0.50	2.73	15.2	23.5	314	68	0.20	4.33	1.17	0.15
2MD-1	5.90	0.47	2.35	17.9	24.4	337	112	0.20	5.70	1.53	0.28
2MD-2	5.30	0.60	2.83	18.0	24.2	281	90	0.20	5.67	1.47	0.15
3MD-1	5.50	0.43	2.63	15.2	22.3	175	89	0.20	5.20	0.80	0.12
4MD-1	5.57	0.40	3.22	21.1	29.3	275	91	0.33	4.43	0.77	0.16
4MD-2	5.33	0.50	2.97	17.6	25.1	186	100	0.20	7.17	1.70	0.15

[†]EC, electrical conductivity (1:5); T-N, total nitrogen; T-C, total carbon; OM, organic matter; Av. P₂O₅, available P₂O₅; Av. SiO₂; available SiO₂; Ex. Cation, exchangeable cations.

[‡]CONV, conventional; MD, mid-season drainage (2, 3, 4 weeks); -1, low level water management; -2, alternate water irrigation.

Table 3. Soil Eh at different growth stages of rice cultivation in relation to diurnal variations in methane emission

Treatment [†]	17 Jun.	13 Jul.	27 Jul.	25 Aug.	16 Sep.
 mV				
CONV	-301a	-272a	-299c	-254ab	-282ab
2MD-1	-288a	-260a	-133b	-238ab	-214a
2MD-2	-277a	-250a	-101b	-211a	-204a
3MD-1	-281a	-254a	98a	-189a	-213a
4MD-1	-289a	-261a	95a	-197a	-211a
4MD-2	-285a	-257a	96a	-193a	-207a

[†]CONV, conventional; MD, mid-season drainage (2, 3, 4 weeks); -1, low level water management; -2, alternate water irrigation.

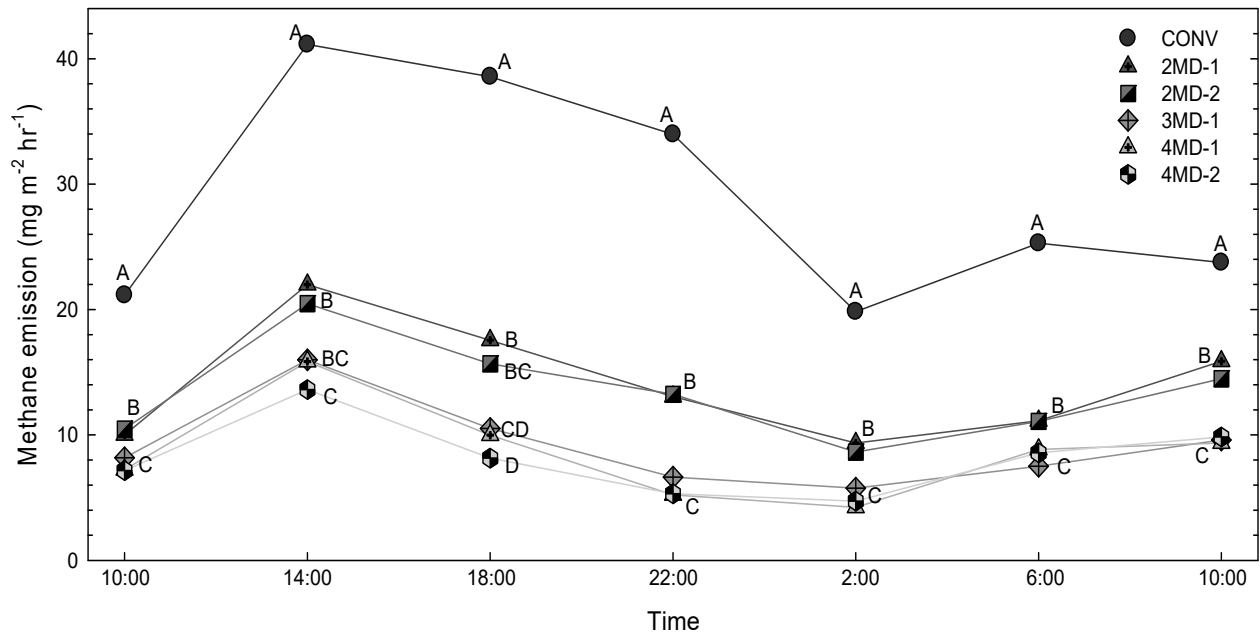


Fig. 2. The diurnal variations of methane emission as effected by water management methods in rice cultivation (July 27 ~ 28, 2022). CONV, conventional; MD, mid-season drainage (2, 3, 4 weeks); -1, low level water management; -2, alternate water irrigation

가 종료되어, 관수한 후 조사 한 7월 27일에서 아직 관수하지 않은 3MD와 4MD에서 95 ~ 98 mV 로 양의 값을 보였으며, 관수하여 담수상태인 CONV은 -299 mV 로 가장 낮았다. 2MD-1은 -101 mV였고, 2MD-2는 -133 mV로 나타나, CONV 보다 각각 -198, 166 mV 더 높았다. CONV와 같이 담수상태였지만, 중간낙수 이행으로 토양에 물이 없는 동안 산화 상태가 유지되었고(Jang et al., 2023), 이후 관수해도 토양 Eh 값이 CONV 보다 더 높게 나타났다. 이후 8월 ~ 9월 조사에서도 알계대기와 알계걸러대기 처리를 위해 관수를 했고, 강우도 있었기 때문에 상시담수를 제외하고 처리간 큰 차이가 없었다.

물관리 방법에 따른 메탄 발생량 일변화를 조사하기 위해 중간낙수 2주 종료 후인 7월 27일 ~ 28일에 2MD에 관수 한 후 조사하였다. 메탄 발생량은 대조구인 CONV이 19.8 ~ 41.1 mg m⁻² hr⁻¹였고, 일 평균 발생량은 29.1 mg m⁻² hr⁻¹였다(Fig. 2). 처리 중 발생량이 가장 적었던 4MD-2는 4.7 ~ 13.6 mg m⁻² hr⁻¹로 나타났고, 일 평균 발생량은 8.2 mg m⁻² hr⁻¹로, CONV 대비 71.8% 감소하였다. 관수한 2MD-1과 2MD-2는 CONV 대비 46.5, 50.4% 감소하였다. 3MD-1은 CONV 대비 61.1% 발생량이 더 적었고, 4MD-1은 CONV 대비 61.3% 감소하였다. 모든 물관리처

리에서 일 평균 메탄 발생량이 CONV 대비 46.5 ~ 71.8% 저감 가능한 것으로 나타나, 중간낙수 처리로 메탄 발생량을 저감할 수 있을 것으로 생각된다. CONV를 포함한 모든 처리구에서 14시에 메탄 발생량이 가장 많았고, 이후 점차 메탄 발생량이 감소하다 2시에 발생량이 가장 적었으며, 그 이후 증가하는 경향을 보였다. 이는 논토양에서 메탄 배출량은 온도에 많은 영향을 받기 때문에 일출 이후 증가하다 이른 오후 절정에 달하며, 밤에는 발생량이 떨어진다는 연구결과(Neue et al., 1994)와 유사한 경향으로 본 실험에서도 메탄 발생량은 온도의 변화에 직접적인 영향을 받은 것으로 판단된다.

8월의 물관리 방법에 따른 메탄 발생량 일변화 조사는 벼의 수잉기 단계로 중간낙수 4주 처리가 모두 완료된 후인 25 ~ 26일에 실시하였다. 시간별 메탄 발생량은 7월 조사에서와 같은 경향으로 모든 처리구에서 14시에 가장 많았고, 2시에 가장 적었다(Fig. 3). 메탄 발생량은 CONV가 14.3 ~ 20.6 mg m⁻² hr⁻¹였다. 발생량이 가장 많은 CONV는 일평균 메탄 발생량이 16.6 mg m⁻² hr⁻¹였고, CONV 대비 2MD-1은 31.3%, 2MD-2는 35.4%, 3MD-1은 32.5% 감소하였다. 가장 발생량이 적었던 4MD-1은 3.4 ~ 13.5 mg m⁻² hr⁻¹였고, 일평균 발생량은 8.1 mg m⁻² hr⁻¹로, CONV

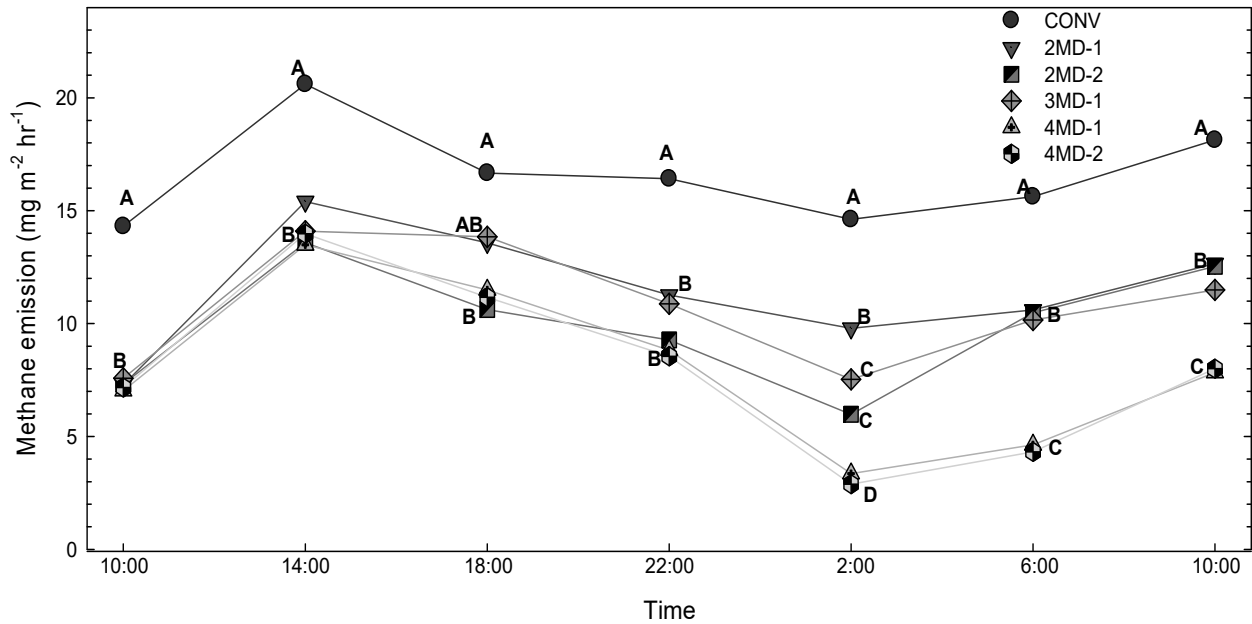


Fig. 3. The diurnal variations of methane emission as effected by water management methods in rice cultivation (August 25 ~ 26, 2022). CONV, conventional; MD, mid-season drainage (2, 3, 4 weeks); -1, low level water management; -2, alternate water irrigation

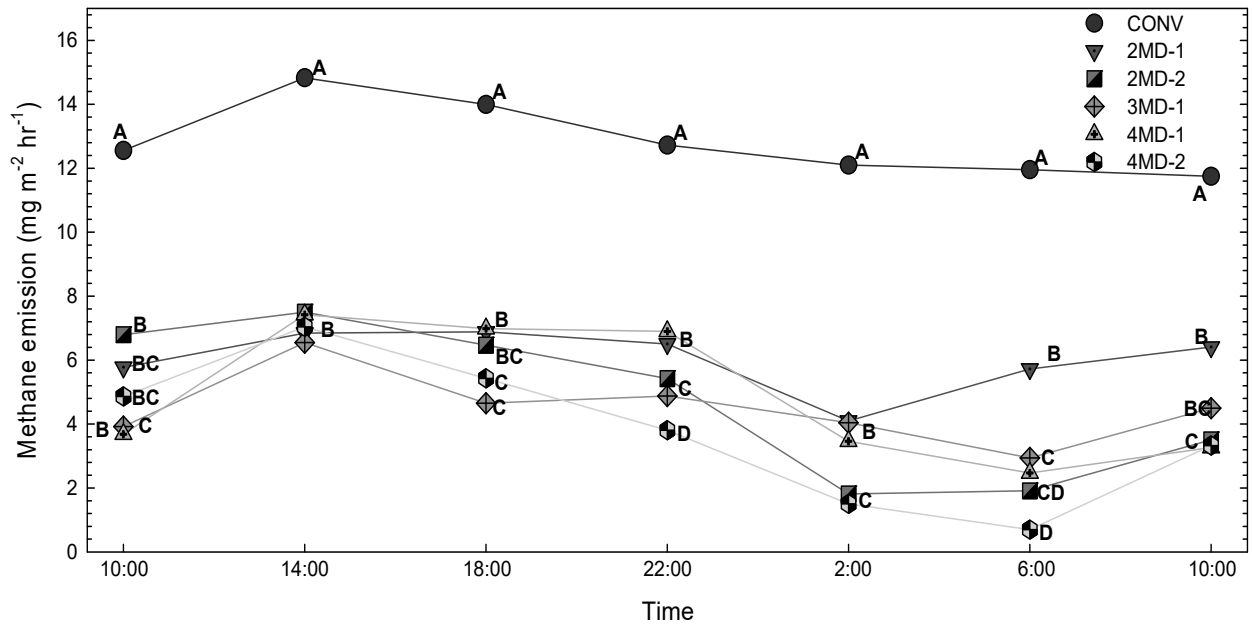


Fig. 4. The diurnal variations of methane emission as effected by water management methods in rice cultivation (September 16 ~ 17, 2022). CONV, conventional; MD, mid-season drainage (2, 3, 4 weeks); -1, low level water management; -2, alternate water irrigation

대비 51.3% 감소했다. 4MD-2에서는 2.9~14.0 mg m⁻² hr⁻¹로, 일 평균 발생량은 8.0 mg m⁻² hr⁻¹였고, CONV 대비 51.8% 감소하는 것으로 나타났다. 이처럼, 모든 처리구가 답수상태였지만 CONV이 가장 메탄 발생량이 많았고, 2MD, 3MD 및 4MD가 메탄 발생량이 더 적게 나타나, 벼 재배시 중간낙수 처리는 중간낙수 이후 답수하여도 메탄 발생량 저감에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이는 중간낙수 완료 후 관수함에 따라 메탄 발생량이 증가하였지만, 중간낙수 이전보다 더 적게 발생하였거나, 적은 상태로 유지되었다는 결과(Cai et al., 1997; Sawamoto et al., 2004)와도 유사한 경향을 보였다.

9월의 물관리 방법에 따른 메탄 발생량 일변화는 벼의 호숙기 단계인 16~17일에 조사하였다. 메탄 발생량은 CONV이 12.0~14.8 mg m⁻² hr⁻¹였고, 일평균 발생량은 12.8 mg m⁻² hr⁻¹로 나타나 가장 많았다(Fig. 4). 2MD-1은 4.4~8.9 mg m⁻² hr⁻¹로, 일 평균 발생량은 7.1 mg m⁻² hr⁻¹이었고, CONV 대비 44.4% 감소하였다. 2MD-2는 1.8~7.7 mg m⁻² hr⁻¹ 범위였고, 일 평균 발생량은 4.6 mg m⁻² hr⁻¹였으며, 상시답수 대비 64.0% 감소하였다. 일 평균 발생량은 2MD-1보다 2MD-2가 19.5% 더 적게 나타났다. 3MD-1은 2.9~7.7 mg m⁻² hr⁻¹범위였고, 일 평균 발생량은 5.0 mg m⁻² hr⁻¹로 CONV 대비 60.7% 감소하였다. 4MD-1은 2.5~9.3 mg m⁻² hr⁻¹로 나타났고, 일 평균 발생량은 5.1 mg m⁻² hr⁻¹로 CONV 대비 59.9% 감소하였다. 4MD-2는 0.7~7.0 mg m⁻² hr⁻¹으로 나타났으며, 일 평균 발생량은 3.8 mg m⁻² hr⁻¹로 CONV 대비 70.3% 감소하였다. 7~8월 일변화 조사에서는 14시에 가장 발생량이 많았고, 2시에 가장 발생량이 적었지만, 9월 조사에서는 일부 처리구에서 다른 경향을 보였는데, 이는 9월에는 메탄 발생량이 적

고, 상대적으로 기온이 낮아지고, 일교차가 크지 않기 때문에 뚜렷한 경향이 나타나지 않았던 것으로 판단된다.

Table 4는 물관리 방법별 메탄 총 발생량을 나타낸 것으로, 7월에는 CONV가 179.9 mg m⁻² day⁻¹로 가장 많았고, 다음으로 2MD가 발생량이 많았으며, 3MD 및 4MD는 가장 적게 발생하였지만, 처리간 차이가 없었다. 모든 물관리 처리구에서 CONV 대비 53.8~73.6% 더 적게 발생하였고, 그 중 4MD-1이 47.6 mg m⁻² day⁻¹로, CONV 대비 73.6% 감소하여 가장 적게 발생하였다. 이처럼 상시답수 보다 중간낙수(2, 3, 4주) 처리구에서 메탄 총 발생량이 감소하였는데, 이는 일본에서 벼 재배 시 중간낙수를 통하여 7월 초 150 mg CH₄ m⁻² d⁻¹였던 메탄 발생량이 거의 0으로 급격히 떨어졌다는 보고(Sawamoto et al., 2004)와, 무효분얼기 또는 출수 시작 시 중간낙수(2주)가 메탄 발생을 억제했다는 보고(Bronson et al., 1992)와 같은 경향을 보였다.

8월 또한 메탄 발생량이 CONV에서 98.2 mg m⁻² day⁻¹로 가장 많았다. 다음으로 2MD 및 3MD > 4MD 순으로 많이 발생하였다. 4MD-1과 4MD-2에서 각각 48.8, 48.1 mg m⁻² day⁻¹로 가장 적게 나타나, 7월과 유사한 경향을 보였다. 3MD와 4MD는 7월에서는 처리간 유의성이 없었지만, 8월에는 차이를 보였다. 이는 7월 조사에서 3MD 및 4MD는 중간낙수가 진행중이었고, 8월에는 모든 처리구가 중간낙수 종료로 답수된 상태였기 때문에 중간낙수의 기간에 따라 발생량에 차이를 보인 것으로 판단된다. 8월에도 물관리를 통하여 메탄 발생량이 CONV 대비 31.6~51.1% 저감 가능하였다. 2MD에서 알계대기와 알계걸러대기 처리간 메탄 발생량의 차이가 없었는데, 이는 관수한지 오래되지 않았고, 중간낙수 기간이 길어짐에 따라

Table 4. Methane emission as influenced by water management methods in rice cultivation

Treat [†]	Jul.	Aug.	Sep.
	mg m ⁻² day ⁻¹		
CONV	179.9 A	98.2 A	78.2 A
2MD-1	83.1 B	67.2 B	41.4 B
2MD-2	79.6 B	62.6 B	28.9 CD
3MD-1	54.6 C	67.1 B	30.8 C
4MD-1	51.4 C	48.8 C	30.9 C
4MD-2	47.6 C	48.1 C	23.3 D

[†]CONV, conventional; MD, mid-season drainage (2, 3, 4 weeks); -1, low level water management; -2, alternate water irrigation.

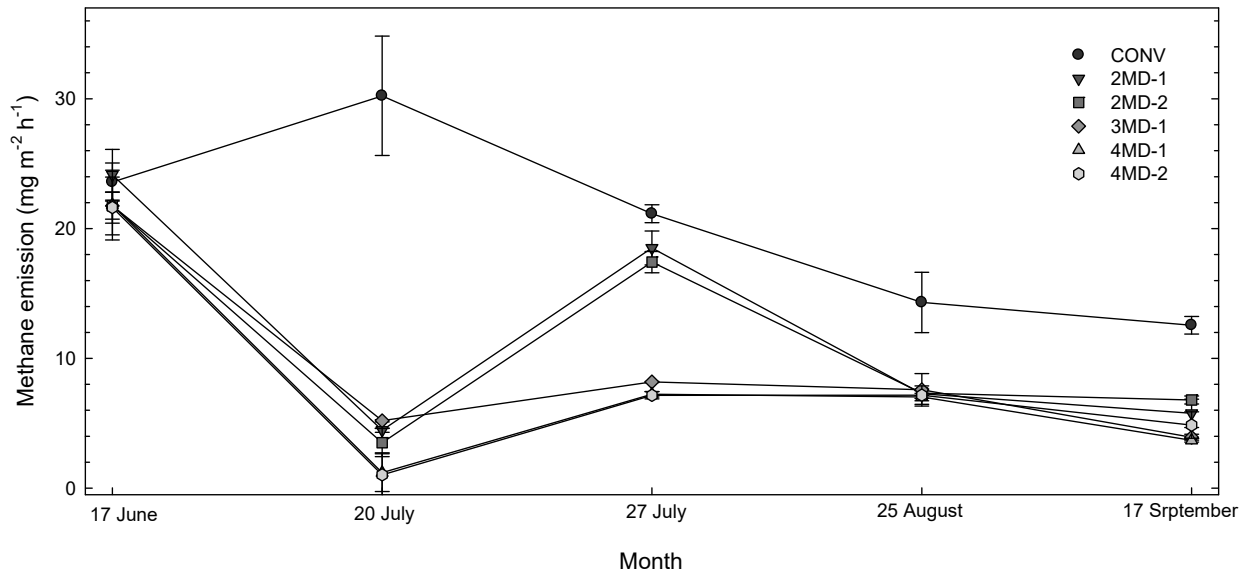


Fig. 5. The diurnal variations of methane emission as effected by water management methods in rice cultivation (June 17, 2022). CONV, conventional; MD, mid-season drainage (2, 3, 4 weeks); -1, low level water management; -2, alternate water irrigation

메탄 발생량이 점점 감소하여 큰 차이를 확인하기 어려웠을 것으로 판단되며, 전 생육과정 동안의 메탄 발생량의 추이를 살펴볼 필요성이 있을 것으로 사료된다.

9월 메탄 총 발생량 또한 CONV에서 78.2 mg m⁻² day⁻¹로 가장 많았고, 2MD-1 > 4MD-1 > 3MD-1 > 2MD-2 > 4MD-2 순으로 많이 발생하는 것으로 나타났다. 모든 물관리 처리구에서 CONV 대비 47.0~70.1% 감소하였고, 4MD-2가 23.3 mg m⁻² day⁻¹로 가장 적게 나타났다. 모든 물관리 처리에서 상시담수 대비 메탄 발생량이 감소하여 중간낙수 및 얇게대기와 얇게걸러대기가 메탄 발생 저감에 효과적인 것으로 나타났다. 또한 중간낙수 기간이 길어짐에 따라 메탄 발생량도 감소하였다. 이는 벼 재배 시 완효성 비료 시용별 중간낙수 효과 실험에서 모든 비료처리에서 중간낙수 기간이 길어짐에 따라 메탄 발생량도 저감되었다는 보고(Jang et al., 2023)와도 일치하였다. 9월에는 얇게대기와 얇게걸러대기 처리간 메탄 발생량의 차이를 보였는데, 2MD-2가 28.9 mg m⁻² day⁻¹로, 2MD-1 대비 30.3% 감소하였고, 4MD-2 또한 4MD-1 대비 24.5% 더 적게 발생하였다. 따라서, 얇게걸러대기가 얇게대기 보다 메탄 저감에 더 효과적인 것으로 판단되며, 이는 담수 심별 메탄 발생량 연구에서, 8 cm 담수 시 포장용수량 수분처리 보다 1.42배 발생량이 많았고, 4 cm 담수 보다

1.27배 발생량이 많게 나타나, 담수높이가 메탄 발생량에 영향을 미친다는 연구결과(Lee et al., 2005)와 유사한 경향으로 나타났다.

6월 조사는 벼의 생육 단계 중 착근기인 17일에 실시하였고, 물 관리 방법별 처리가 시작되기 전이라 일일 1회 조사하였으며, 하루 중 평균 발생량을 보이는 오전 10시 30분~11시30분 사이에 1회 진행하여 분석하였다(Jeong et al., 2018). 동일조건의 비교를 위해 7월~9월은 동시간대 발생량을 비교하여 Fig. 5에 나타났다. 6월 조사에서는 중간낙수가 시작되기 전이고, 전 처리구의 담수심을 5~7 cm로 유지했기 때문에 처리구간 발생량의 차이를 보이지 않았다. 전 처리구에서 21.6~24.1 mg m⁻² hr⁻¹로 메탄 발생량이 나타났다. 이후 중간낙수가 시작된 7월 20일(이양 후 47일)에는 CONV를 제외한 모든 처리구에서 발생량이 감소하였다. 중간낙수 2주 처리가 완료되어 관수한 후인 7월 27일에는 CONV와 2MD-1 및 2MD-2에서 각각 21.1, 17.4, 18.5 mg m⁻² hr⁻¹로 발생량이 증가하였지만, 중간낙수가 시작되기 전인 6월 17일보다 발생량이 적었다. 이는 중간낙수 완료 후 관수함에 따라 메탄 발생량이 증가하였지만, 중간낙수 이전보다 더 적게 발생하였거나, 적은 상태로 유지되었다는 결과(Cai et al., 1997; Sawamoto et al., 2004)와 유사한 경향을 보였다. Cai et al. (1997)은 메탄

발생량이 벼 이앙 후 40일에 최고점에 도달한 후 감소하였다고 보고하였고, Jang et al. (2023) 또한 벼 이앙 후 45일에 메탄 가스가 가장 많은 양이 발생하였다고 하였는데, 본 연구는 가장 발생량이 많은 이앙 40일 이후 중간물떼기를 통하여 상시담수($30.2 \text{ mg m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$) 대비 모든 처리구에서 평균 89.8% 메탄 발생이 저감되었다.

벼 이앙후 메탄 발생량은 15~20일이 지나서 증가한 다음 50~60일까지 상대적으로 높은 수준이 유지되다가 이후 수확시기까지 낮은 수준으로 유지되었는데(Cai et al., 1999), 본 연구에서도 상대적으로 메탄 발생량이 많은 시기인 중간낙수 종료 후 관수시점(이앙후 53~67일)에서 메탄 발생량이 증가하였지만 상시담수 보다 물관리 처리구에서 메탄 발생량이 적었고, 이후 점차 감소하여 일정량이 유지되는 경향을 나타냈다.

본 연구에서는 상시담수 및 모든 물관리 처리방법별 메탄 발생량 일변화는 온도가 점점 높아짐에 따라 증가하다가 14시에 가장 발생량이 많았고, 점차 감소하여 온도가 가장 낮은 2시와 9월 조사에서 일부 처리구에서는 6시에 가장 적게 발생하였다. 이는 토양에서 메탄 배출량은 온도에 많은 영향을 받는다는 연구결과(Neue et al., 1994)와 유사한 경향을 보였다. 7월~9월 조사에서 모두 중간낙수 및 알계대기와 알계걸러대기 처리구에서 총 메탄 발생량도 감소하였는데, 상시담수 대비 물관리 처리구에서 벼 재배에서 상시담수($0.174 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) 대비 간단판개시 33.9% 메탄 발생량이 감소하였다는 보고(Shin et al., 1996)와 일본에서 벼 재배 시 중간낙수를 통하여 메탄 발생량 저감이 가능하였다는 연구결과(Sawamoto et al., 2004)와 유사한 경향을 보였다. 또한, Choi et al. (2014)은 재배 중기 이전 두 번의 배수를 통해 메탄 발생량을 상시담수(458 kg ha^{-1}) 보다 300 kg ha^{-1} 만큼의 저감이 가능했다고 보고하여, 본 실험과 유사한 경향을 보였다. 필리핀의 중부 루손에서도 상시담수의 경우 $269 \sim 503 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 발생하였으나, 중간낙수에서는 $78 \sim 184 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 발생하여 메탄 발생 저감이 가능하였고(Corton et al., 2000), 중국 베이징에서 4년간 메탄 배출을 연구한 결과 상시담수 대비 중간낙수 처리시 23% 저감이 가능하였으며(Wang et al., 2000), 이 외에도 인도, 인도네시아, 태국 및 필리핀에서도 중간낙수를 통하여 메탄 배출량을 20~73% 저감할 수 있었다고 보고된 바 있어(Wassmann et al., 2000), 본 연구와 유사한 경향을 보였다. Jang et al. (2023)은 벼 재배 시 비료 시용별 중간낙수 효과를 실험하였는데 중간낙수 기간이 길어짐에 따라 메탄 발생량이 저

감 되었다고 보고하였다. 본 연구에서도 7~9월 조사에서 모두 중간낙수 기간이 길어짐에 따라 메탄 발생량이 감소하였고, 이는 중간낙수 기간이 길어짐에 따라 상대적으로 토양이 호기성 상태로 유지되어 메탄 생성균의 활성도가 감소하고, 메탄 산화균의 활성도가 높아져 더 낮게 배출되었으며, 물이 없는 동안 토양이 산화 상태가 유지되어 메탄 배출을 저감할 수 있었던 것으로 생각된다(Choi et al., 2014; Chu et al., 2015; Jang et al., 2023). 하지만, 중간낙수가 실시되는 시기가 벼의 영양생장기에서 생식생장으로 넘어가는 중요한 시기이고, 이식시기에 따라 장마 기간과 겹칠 수 있어 벼의 수량 및 품질에 영향을 미치지 않으며, 각 지역의 기후적 특성을 반영한 중간낙수 기간 및 방법의 설정이 필요할 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구는 기후변화대응 벼 중간낙수 이행에 따른 친환경 벼 재배 논에서의 메탄 발생량 변화를 알아보기 위하여 수행하였다. 2022년에 의령군 궁류면 압곡리 일대 6 필지에서 월별로 일중 메탄 발생량을 조사하기 위하여 4시간 간격으로 일별 7회 챔버법을 활용하여 조사하였다. 처리내용은 상시담수(CONV), 중간낙수 2주에 알계대기(2MD-1) 및 알계걸러대기(2MD-2), 중간낙수 3주 알계대기(3MD-1), 중간낙수 4주에 알계대기(4MD-1) 및 알계걸러대기(4MD-2)로 처리하였다. 그 결과, 7월~8월에는 모든 물관리 처리구에서 하루 중 14시에 가장 메탄 발생량이 많았고, 2시에 메탄 발생량이 가장 적었다. 물관리 방법별 월별 비교 시 가장 높은 메탄 발생은 7월이었고, 8월 > 9월 순이었다. 가장 발생량이 많았던 7월에서 일 평균 메탄 발생량이 가장 높은 처리는 상시담수구($29.1 \text{ mg m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$)였으며, 2MD-1 (CONV 대비 51.4% 감소) > 2MD-2 (53.8%) > 3MD-1 (68.5%) > 4MD-1 (70.2%) > 4MD-2 (71.8%) 순으로 나타났다. 8월~9월 또한 중간낙수와 알계대기 및 알계걸러대기 처리를 통하여 메탄 발생량이 31.3~70.3% 저감되었다. 중간낙수 및 물관리 방법이 메탄 발생 저감에 크게 기여하였으며, 중간낙수기간이 길어질수록 메탄 발생량이 낮았고, 알계대기 보다 알계걸러대기가 메탄 발생 저감에 더 효과적이었다. 따라서, 논에서 메탄발생량을 저감하기 위한 방법으로는 메탄 발생량이 가장 많은 7월(이앙 후 약 40일 이후)에 중간낙수를 하는 것이 가장 효과적일 것이다. 중간낙수 이후 알계걸러대기를 하는 것이 메탄 발생 저감이 가능한 벼 재배 물관리 방

법으로 판단된다. 이러한 벼 재배시 물관리를 통하여 메탄 발생량을 저감할 수 있는 재배방법은 기후변화에 크게 기여할 것이다.

사사

본 연구는 “농림축산식품부의 저탄소 벼 논물관리 기술 보급 시범사업(과제번호: B0080420002669)”의 지원으로 수행되었다.

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. doi: 10.1007/s00248-014-0371-z
- Bronson KF, Mosier AR, Bishnoi SR. 1992. Nitrous oxide emissions in irrigated corn as affected by nitrification inhibitors. *Soil Sci Soc Am J* 56: 161-165. doi: 10.2136/sssaj1992.03615995005600010025x
- Butler JH, Montzka SA. 2020. The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI). <https://gml.noaa.gov/aggi/aggi.html>
- Cai ZC, Xing GX, Shen GY, Xu H, Yan XY, Tsuruta H, Yagi K, Minami K. 1999. Measurements of CH₄ and N₂O emissions from rice paddies in Fengqiu, China. *Soil Sci Plant Nutr* 45(1): 1-13. doi: 10.1080/00380768.1999.10409320
- Cai ZG, Xing XY, 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.
- Choi JD, Kim GY, Park WJ, Shin MH, Choi YH, Lee S, Kim SJ, Yun DK. 2014. Effect SRI water management on water quality and greenhouse gas emission in Korea. *Irrig Drain* 63(2): 263-270. doi: 10.1002/ird.1843
- Choi JD, Uphoff N, Kim JG, Lee SI. 2019. Greenhouse gas reduction from paddy by environmentally friendly intermittent irrigation: A review (in Korean with English abstract). *J Wetlands Res* 21(1): 43-56. doi: 10.17663/JWR.2019.21.1.043
- Chu G, Wang Z, Zhang H, Liu L, Yang J, Zhang J. 2015. Alternate wetting and moderate drying increases rice yield and reduces methane emission in paddy field with wheat straw residue incorporation. *Food Energy Secur* 4(3): 238-254. doi: 10.1002/fes3.66
- Corton TM, Bajita JB, Grospe FS, Pamplona RR, Asis CA Jr, Wassmann R, Lantin RS, Buendia LV. 2000. Methane emission from irrigated and intensively managed rice fields in Central Luzon (Philippines). *Nutr Cycl Agroecosyst* 58(1-3): 37-53. doi: 10.1023/A:1009826131741
- Foley JA, Ramankutty N, Brauman KA, Cassidy ES, Gerber JS, Johnston M, Muller ND, O'Connell C, Ray DK, West PC, et al. 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature* 478(7369): 337-342. doi: 10.1038/nature10452
- GIR (Greenhouse Gas Inventory and Research Center). 2019. National greenhouse gas inventory report of Korea.
- Gwon HS, Choi EJ, Lee SI, Lee HS, Lee JM, Kang SS. 2022. Research review of methane emissions from Korean rice paddies (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 13(1): 117-134. doi: 10.15531/KSCCR.2022.13.1.117
- Itoh M, Sudo S, Mori S, Satio 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(3-4): 359-372. doi: 10.1016/j.agee.2011.03.019
- Jang EB, Jeong HC, Gwon HS, Lee HS, Park HR, Lee JM, Oh TK, Lee SI. 2023. Effect of water management on greenhouse gas emissions from rice paddies using a slow-release fertilizer (in Korean with English abstract). *Korean J Environ Agric* 42(2): 112-120. doi: 10.5338/KJEA.2023.42.2.14
- Jeong HC, Choi EJ, Lee JS, Kim GY, Lee SI. 2018. Comparison of CH₄ emission between auto chamber and manual chamber in the rice paddy (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 9(4): 377-384. doi: 10.15531/kscrcr.2018.9.4.377
- Jeong HC, Kim GY, So KH, Shim KM, Lee SB, Lee

- DB. 2010. Assessment on greenhouse gas (CH₄) emissions in Korea cropland sector from 1990 to 2008 (in Korean with English abstract). *Korea J Soil Sci Fert* 43(6): 911-916.
- KEEI (Korea Energy Economics Institute). 2015. To find the effective preparation plan for review procedure of the Korea's 2020 mitigation target: Multilateral Assessment (MA) of annex parties' progress in achieving the mitigation target. Research Paper.
- Kim DS. 2007. Greenhouse gas (CH₄, CO₂, N₂O) emissions from estuarine tidal and wetland and their characteristics (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Atmos Environ* 23(2): 225-241.
- 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 (in Korean with English abstract). *Korean J Soil Sci Fert* 45(6): 1173-1178. doi: 10.7745/KJSSF.2012.45.6.1173
- Kim SY, Gutierrez J, Kim PJ. 2016. Unexpected stimulation of CH₄ emissions under continuous no-tillage system in mono-rice paddy soils during cultivation. *Geoderma* 267: 34-40. doi: 10.1016/j.geoderma.2015.12.021
- KOSIS (Korean Statistical Information Service). 2023. Agricultural land area survey. [accessed 2024 Aug 27]. <https://kosis.kr/index/index.do>
- Lagomarsino A, Agnelli AE, Linquist B, Adviento-Borbe MA, Agnelli A, Gavina G, Ravaglia S, 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(4): 533-548. doi: 10.1016/S1002-0160(15)600.63-7
- Lee KB, Kim JG, Park CW, Shin WK, Lee DB, Kim JD. 2005. Effect of irrigation water depth on greenhouse gas emission in paddy field (in Korean with English abstract). *Korea J Soil Sci Fert* 38(3): 150-156.
- Ma K, Lu Y. 2011. Regulation of microbial methane production and oxidation by intermittent drainage in rice field soil. *EMS Microbiol Ecol* 75(3): 446-456. doi: 10.1111/j.1574-6941.2010.01018.x
- Malyan SK, Bhatia A, Kumar A, Gupta DK, Singh R, Kumar SS, Tomer R, Kumar O, Jain N. 2016. Methane production, oxidation and mitigation: A mechanistic understanding and comprehensive evaluation of influencing factors. *Sci Total Environ* 572: 874-896. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.182
- Minamikawa K, Tokida T, Sudo S, Padre A, Yagi K. 2015. Guidelines for measuring CH₄ and N₂O emissions from rice paddies by a manually operated closed chamber method. Tsukuba, Japan: National Institute for Agro-Environmental Sciences.
- NAAS (National Institute of Agricultural Sciences). 2000. Soils and plant analysis methods. https://www.naas.go.kr/naas_index.do
- Neue HU, Lantin RS, Wassmann R, Aduna JB, Alberto MCR, Andales MJF. 1994. Methane emission from rice soils of the Philippines. In: Minami K, Mosier AR, Sass RL (eds). CH₄ and N₂O - Global emissions and controls from rice fields and other agricultural and industrial sources (NIAES Series 2). Tsukuba, Japan: National Institute for Agro-Environmental Sciences. p. 55-77.
- RDA (Rural Development Administration). 2005. Development of agricultural practices to mitigate greenhouse gases from agricultural sector.
- RDA (Rural Development Administration). 2012. Development of emission factors and assessment of emission for methane at cropland in Korea.
- RDA (Rural Development Administration). 2013. Development of GHGs mitigation technology and their on-site assessment in paddy fields.
- RDA (Rural Development Administration). 2017. A study on greenhouse gas emission and applicative estimation under the IPCC Tier 3 level.
- RDA (Rural Development Administration). 2020. An experimental study for reducing ghgs to counteract new climate change measures in crop fields.
- Saunio M, Stavert AR, Poulter B, Bousquet P, Canadell JG, Jackson RB, Raymond PA, Dlugokencky EJ, Houweling S, Patra PK. 2020. The global methane

- budget 2000–2017. *Earth Syst Sci Data* 12(3): 1561-1623.
doi: 10.5194/essd-12-1561-2020
- 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. *Glob Biogeochem Cycles* 18(2). doi: 10.1029/2003GB002207
- Shin YK, Yun SH, Park ME, Lee BL. 1996. Mitigation options for methane emission from rice fields in Korea. *Ambio* 25(4): 289-291.
- Shindell DT, Faluvegi G, Koch DM, Schmidt GA, Unger N, Bauer SE. 2009. Improved attribution of climate forcing to emissions. *Science* 326(5953): 716-718. doi: 10.1126/science.1174760
- Suepa T, Qi J, Lawawirojwong S. 2013. Integrations remote sensing mapping with the environmental model to quantify emissions from rice paddies in Thailand. *Proceedings of 2013 Second International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics); 2013 Aug 12 ~ Aug 16; Fairfax, VA: Center for Spatial Information Science and Systems, George Mason University.* p. 42-47. doi: 10.1109/Argo-Geoinformatics.2013.6621876
- Towprayoon S, Smakgahn K, Poonkaew S. 2005. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from drained irrigated rice fields. *Chemosphere* 59(11): 1547-1556. doi: 10.1016/j.chemosphere.2005.02.009
- Wang ZY, Xu YC, Li Z, Guo YX, Wassmann R, Neue HU, Lantin RS, Buendia LV, Ding YP, Wang ZZ. 2000. A four-year record of methane emissions from irrigated rice fields in the Beijing region of China. *Nutr Cycl Agroecosyst* 58(1-3): 55-63. doi: 10.1023/A:1009878115811
- Wassmann R, Lantin RS, Neue HU, Buendia LV, Corton TM, Lu Y. 2000. Characterization of methane emissions from rice fields in Asia. III. Mitigation options and future research needs. *Nutr Cycl Agroecosyst* 58(1-3): 23-36. doi: 10.1023/A:1009874014903
- Yoon ST, Park SH, Kim YW. 2007. Study on environment-friendly rice production system by use of effective microorganism (in Korean with English abstract). *Korean J Org Agric* 15(2): 207-218.