The Effects of Ethephon Application on Suppressing Methane Emission and Stimulating Rice Productivity in a Rice Paddy Soil: A Pot Experiment

Seongwoo Choi¹, Juhee Lee¹, Yeomyeong Lee¹, Pil Joo Kim², Ju-Sik Cho³, Yong Hwa Cheong³, Yo-Sup Rim³, and Sang Yoon Kim^{3*}

¹Graduate Student, Department of Bio-Environmental Sciences, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

²Professor, Division of Applied Life Science (BK 21+ Program), Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

³Professor, Department of Bio-Environmental Sciences, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

*Corresponding author: sykim@snu.ac.kr

ABSTRACT

Received: October 12, 2020

Revised: October 28, 2020

Accepted: October 29, 2020

ORCID

Sang Yoon Kim

<http://orcid.org/0000-0003-4914-3080>

Ethephon is one of the chemical stimulator of crop growth that is also considered as a structural analogue of coenzyme M (CoM), having a promising potential for methanogenic inhibitor. However, the effect of ethephon application on greenhouse gas (GHG) emissions under rice cultivation has not been studied yet. In this pot experiment, different levels of ethephon (0, 2.5, 5 and 10 mg L⁻¹) were applied at the presence or absence of manure compost as an organic amendment to study its effect on GHGs emissions in particular CH₄ and rice productivity during the cultivation. Application of ethephon effectively suppressed CH₄ emissions in particular the initial periods (ca. 3 weeks) right after the application as compared with control soil during rice cultivation, but did not significantly affect N₂O emissions. In addition, the maximum CH₄ reduction (82% reduction over control) was found at 10 mg L⁻¹ ethephon application right after its addition for 3 weeks during rice cultivation. Rice productivity and yield properties were mainly affected by ethephon application, enhancing ripened grains and number of grains per panicle. Soil properties were not influenced by ethephon application except for available phosphate, which is probably due to enhanced root growth in rhizosphere soils. Conclusively, ethephon could be a new and pioneering amendment for reducing CH₄ emission in particular at the initial 3 weeks after the application without increasing other GHG emissions and enhancing rice productivity in paddy soils.

Keywords: CH₄, Greenhouse gas emissions, Nitrous oxide, Methanogenic inhibitor, Soil amendment

Ethephon application showed a potential to suppress greenhouse gas emissions in particular methane and to enhance rice productivity by ca. 5 mg L⁻¹.

Introduction

최근 지속적 인구증가와 산업화로 인해 대기 중 이산화탄소 (CO_2) 농도 증가에 의한 지구온난화가 가속화되고 있다 (Cao and Yuan, 2019; Ying et al., 2019). IPCC 보고서에 따르면 대기 중 이산화탄소의 농도는 2100년에 478 - 1099 ppm 수준까지 증가하여, 지구 표면 온도가 0.3 - 4.8°C 까지 상승할 것으로 예측되고 있다 (IPCC, 2013).

메탄 (CH_4)은 이산화탄소, 아산화질소와 더불어 주요 온실 기체로서 지구 전체 온난화가스의 약 20% 이상을 차지하는 것으로 보고되었다 (IPCC, 2007). 특히 메탄은 대기 잔존 기간이 상대적으로 짧음에도 불구하고, 높은 적외선 흡수능으로 인해 이산화탄소가 비해 약 28배 높은 지구온난화지수 (Global warming potential, GWP)를 지니고 있는 중요한 온실가스 중 하나다 (IPCC, 2013). 지구 전체 메탄배출량은 530 Tg year⁻¹로 추정되고 있으며 (Chowdhury and Dick, 2013), 벼 재배와 같은 인위적인 활동에 의해 전체배출량의 약 54 - 72%가 대기로 방출되고 있다 (Bridgham et al., 2013). 세계적으로 벼 논에서 배출되는 메탄은 40 - 100 Tg year⁻¹ 수준으로, 평균 60 Tg year⁻¹이고, 인위적으로 배출되는 메탄 전체의 약 5 - 30%를 차지하는 것으로 추산된다.

현재까지 온실가스 메탄을 저감하기 위해 물 관리 (Kim et al., 2012a; Kim et al., 2014a; Haque et al., 2017), 유기물 선발 (Lee et al., 2010; Kim et al., 2012b; Kim et al., 2013b), 시비 관리 (Ali et al., 2008; Lee et al., 2012; Kim et al., 2015b), 퇴비화 기술 (Kim et al., 2014b; Kim et al., 2018; Jeong et al., 2019), 벼 품종 선발 (Gutierrez et al., 2013), 작부 체계 관리 (Kim et al., 2013a; Lee et al., 2014; Kim et al., 2015a; Kim et al., 2016) 기술을 응용한 다양한 연구가 수행되었으나, 여전히 메탄 배출을 효과적으로 저감하기 위한 새로운 저감 기술에 대한 요구가 증가하고 있다. 비교적 최근 들어서, 메탄 생산과정 및 유기물의 무기화 과정 (organic matter mineralization)을 억제할 수 있는 화학 첨가제 [2-bromoethanesulfonate (BES), 2-chloroethanesulfonate (CES), 2-mercaptoethanesulfonate (MES)] 사용에 관한 연구가 시도된 바 있다 (Chidthaisong and Conrad, 2000; Liu et al., 2011; Waghmode et al., 2015; Kosse et al., 2016). Waghmode et al. (2015)는 벼 논에서 BES를 80 mg kg⁻¹ 수준으로 처리할 경우 재배기간 중 총 메탄배출량을 무처리 대비 약 49% 까지 저감할 수 있다고 보고하였다. 하지만 BES 사용에 따른 추가적인 비용 문제 및 아산화질소 배출량에 대한 평가가 함께 수행되지 않아 메탄 배출 억제제로서 여전히 활용도가 낮은 실정이다.

에테폰 (Ethephon)은 현재 시판중인 생장조절제로서 농업생산성 증대를 위해 농가에서도 이미 이용되고 있는 제 품이다. 에테폰의 화학적 구조가 메탄 생성 전구물질인 CoM (Coenzyme M)과 구조적으로 매우 유사하기 때문에 (Liu et al., 2011), 에테폰의 사용시 메탄 생성의 경쟁적 저해제로서 작용하여 논 토양에서 메탄 생성을 효과적으로 억제할 것으로 예상된다. Szoke (1990)의 연구에서는 벼 논에서 에테폰 사용을 통해 벼 생산성을 무처리 대비 최대 30% 증가시킨 것으로 보고된 바 있어, 온실가스 배출 저감과 동시에 벼 수량 증진을 위한 첨가제로써 충분한 활용가치가 있을 것으로 판단된다. 하지만 현재까지 벼 재배기간 중 에테폰 사용에 따른 메탄 생성 저감 효과에 관한 연구는 국내 외에 전무한 실정이다.

본 연구에서는 논 토양에서 에테폰의 처리가 온실가스 메탄 배출량 저감 및 벼 생산성 증진에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 벼 재배 기간 중 에테폰 처리에 따른 1) 온실가스 메탄 및 아산화질소 저감 효과, 2) 벼 생육 및 생산성 증대, 3) 토양 특성을 종합적으로 조사하여 온실가스 배출 억제제로서 에테폰의 활용가능성을 포트 실험을 통해 평가하고자 하였다.

Materials and Methods

토양시료 채취 및 포트 실험 본 연구에서는 공시토양으로 전라남도 순천시 서면 죽평리 순천대학교 학술연구 포장 내 논 토양을 채취하여 사용하였다. 공시토양의 평균적인 토양 이화학적 특성은 Table 1과 같았으며, 일반적인 논 토양의 특징을 지니고 있었으나, 토양 내 치환성 칼슘의 함량이 다소 낮은 특성을 보였다.

논 토양에서 에테폰 처리에 따른 온실가스 메탄, 아산화질소 배출 특성과 벼 생산성 및 토양 화학성 변화를 조사하기 위하여 포트 실험을 수행하였다. 채취한 공시토양을 자연건조 후 체 통과 (< 10 mm) 시킨 후, 토양 10 kg을 Wagner pot (1/2000a size) 25 cm 높이까지 용적밀도로 약 1.2 g cm^{-3} 의 조건이 되도록 충진하였다. 벼 이앙 전 3일간 담수상태로 포트를 안정화 후 농촌진흥청 표준시비량을 근거로 하여 벼 이앙 1일 전 기비로 질소 (N) - 인산 (P_2O_5) - 가리 (K_2O)를 각각 50-45-40 kg ha^{-1} 로 시비하였다. 새얼미벼 (*Oryza sativa* L.)를 공시작물로 선택하였고, 2019년 6월 17일에 각 포트 당 1포기씩 손 이앙 하였다. 1차 추비 (분얼비)는 이앙 2주 후 질소 20 kg ha^{-1} 를, 2차 추비 (수비)는 이앙 2개월 후 (출수 15일 전)에 질소와 가리를 각각 20, 17 kg ha^{-1} 를 처리하였다 (NIAST, 1999). 실험에 사용된 포트는 무작위 (random)로 배치하였으며, 모든 처리구는 3반복으로 하여 실험을 수행하였다. 생육기간 동안 약 5 - 7 cm 높이로 상시 담수 조건을 유지하였고, 벼는 이앙 후 102일 경과 후 수확하였다.

에테폰 처리 방법 에테폰 (에세폰다, 선문그린사이언스, 39% wt/V) 원액을 증류수로 희석하여 처리하였다. 실제 현장 처리량 및 적용가능성을 고려하여 포트 당 최종 농도가 0, 2.5, 5.0, 10 ppm (mg L^{-1})이 되도록 각각 처리하였으며, 토양 조건은 유기물이 적은 조건 (유기물 무처리)과 많은 조건 (유기물 처리, 퇴비 20 Mg ha^{-1} , 100 g pot^{-1})으로 구분하여 처리하였다. 벼 재배기간 중 총 2회에 처리하였으며, 원액을 희석하여 담수 토양에 용액 상태로 직접 주입하였고, 1차와 2차 처리 일자 는 벼 이앙 후 7일, 56일 후 각각 처리하였다.

온실가스 배출량 평가 및 Net GWP 산정 가스 채취와 분석방법은 Lim et al. (2011)에서 보고된 시료채취 방법을 참고하여 수행하였다. 벼 재배기간 동안 일주일에 1회 온실가스 배출량이 평균값을 보이는 오전 10 - 11시 사이에 실시하였으며, 재배기간 중 배출되는 메탄가스는 폐쇄정태챔버법 (closed chamber method)을 이용하여 시료를 채취하였다. 원통형 아크릴 챔버 내부에 공기를 순환하기 위해 소형팬을 설치하여 시료의 균질성을 확보하였다. 메탄 포집 시간은 30분 동안 실시하였으며, 3 way stopper를 부착한 50 mL 주사기를 이용해 시료를 채취하였다. 이 때 챔버 내부와 토양의 온도를 온도계를 이용하여 각각 측정하였다. 포집한 가스 시료는 가스크로마토그래피 (Gas chromatography)를 이용하여 정량하였으며 (Lim et al., 2011), 메탄 및 아산화질소 배출량은 식 1, 2를 이용해 계산하였다. 재배기간 중 포트로부터 배출되는 메탄배출량은 아래의 식을 이용하여 계산하였다 (Rolston, 1986).

Table 1. Chemical properties of soils used in this study before the pot experiment.

	pH (1:5)	O.M (g kg^{-1})	Av. P_2O_5 (mg kg^{-1})	Ex. cations ($\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$)			Soil texture
				K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	
Soil used	5.7	26	70	0.2	2.6	0.5	Loam
Optimum range	5.5 - 6.5	20 - 30	80 - 120	0.2 - 0.3	5.0 - 6.0	1.5 - 2.0	Loam

[†]Optimum range of soil chemical properties for rice cultivation was reported in RDA (2017).

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

F: 단위시간당 메탄 및 아산화질소 배출량 ($\text{mg m}^{-2} \text{hr}^{-1}$)

ρ : 가스 밀도 (mg m^{-3})

V: 챔버 부피 (m^3)

A: 챔버 표면적 (m^2)

Δc : 시료 채취 전후 농도차 ($\mu\text{L L}^{-1}$)

Δt : 시료 채취 시간 (hr)

T = 273 + 측정시간 중 평균온도 ($^{\circ}\text{C}$)

재배기간 중 발생된 총 메탄 발생량은 아래 수식을 이용하여 도출하였다 (Singh et al., 1999).

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

F_i : i 번째 시료채취 기간 내 일 메탄 발생량

D_i : i 번째 기간 내 시료채취 간격 일수

n: 시료채취 간격

전체 벼 재배기간 중 방출된 총 메탄과 아산화질소 배출량에 지구온난화지수를 곱하여 CO_2 당량으로 환산하였다 (IPCC, 2013).

$$\text{Total GWP (kg CO}_2\text{-eqv.ha}^{-1}\text{)} = 28 \times \text{CH}_4 + 265 \times \text{N}_2\text{O} \quad (\text{Eq. 3})$$

토양 특성 평가 및 벼 생산성 평가 토양시료는 벼 수확 후 채취하여 풍건하여 체 통과(<2 mm) 후 화학성 분석에 이용하였다. 토양 pH는 토양과 물을 1:5 비율로 침출한 후 pH meter (Orion star A212, Thermo Scientific, Indonesia)로 측정하였다. 토양유기물은 Tyurin법을 이용하여 측정하였으며, 유효인산은 토양시료 5 g에 Lancaster 용액 (pH 4.25) 20 mL를 넣은 후 10분간 진탕, 여과 (ADVANTEC, No.2)하여 증류수로 희석하여 UV/VIS Spectrometer (UV1900, Shimadzu, Japan)를 이용해 720 nm 파장에서 흡광도를 측정하였다. 치환성 양이온은 1N NH_4OAc 로 침출하여 ICP-OES (Inductively coupled plasma-optical emission spectrophotometer, Perkin Elmer Model OPTIMA 4300DV, USA)를 이용하여 측정하였다 (NIAS, 1988). 벼 생산성 및 수량 구성 요소는 정조 수확 후 자연 건조 후 농촌진흥청 농사시험연구 기준에 따라 평가하였다 (RDA, 2012).

통계 처리 통계분석은 SAS package (SAS Institute Inc., 1995)를 이용하여 ANOVA 분석을 수행하였다. 처리 간 통계적인 유의성이 인정되는 경우, Tukey test를 이용하여 5% ($p \leq 0.05$) 확률의 유의 수준에서 사후 분석을 수행하여 각 처리 효과를 비교하였다.

Results and Discussion

에테폰 처리에 따른 메탄 배출 저감 효과 벼 재배기간 중 메탄 배출량 변화를 조사한 결과 (Fig. 1A, 1B), 전반적으로 벼 생육초기 배출량은 적었으나, 이앙 후 약 50일 경과 후 가장 높은 배출량 ($25.9 - 39.8 \text{ mg m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$)을 보였으며, 이후 배출량은 점차 감소하는 경향을 보였다. 유기물 무처리에 비해 유기물 처리구에서 전반적으로 메탄 배출량이 높았으며, 벼 생육 초기인 이앙 후 20 - 30일 부근에서 메탄 배출량 증가가 더 뚜렷하게 나타났다. 담수 상태에 투입된 퇴비가 혐기 분해 되면서 메탄생성균이 쉽게 이용 가능한 유기탄소 함량이 크게 증가되었기 때문으로 판단된다 (Le Mer and Roger, 2001; Kim et al., 2012a; Kim et al., 2013b). 에테폰 처리에 따른 메탄 배출 특성을 평가한 결과, 에테폰 처리 유무와 처리량에 따라 메탄 배출 패턴의 차이는 거의 없는 것으로 조사되었다 (Fig. 1A, 1B).

하지만 에테폰 처리 후 약 3주간 메탄 배출량을 비교하였을 때, 에테폰 사용은 무처리 대비 유의한 감소효과가 있는 것으로 나타났으며, 유기물 처리구에서 더 저감 효과가 높은 것으로 조사되었다 (Fig. 2, Fig. 3). 메탄 배출량 저감 효과는 1차 처리에서 더욱 높았으며, 2차 처리에서 효과가 다소 낮은 경향을 보였다.

벼 재배기간 중 방출된 총 메탄 배출량 (total CH_4 flux)을 조사한 결과 (Fig. 4), 유기물 처리와 관계없이, 에테폰 처리에 따른 메탄 배출량 감소효과는 미미했다. Kong et al. (2018)은 에테폰의 잔류 반감기는 콩 경엽에 엽면 살포할 경우 약 21 - 27 시간 정도인 것으로 보고 된 바 있다. 발 토양 조건과 작물이 상이한 점을 감안하더라도 단시간에 처리한 에테폰이 분해될 수 있을 가능성이 충분할 것으로 판단되며, 이로 인해 메탄 저감효과가 장기간 지속되지 않은 것으로 해석된다.

Fig. 1. Changes in CH_4 (A, B) and N_2O (C, D) emission rates under different ethephon applications and O.M conditions during rice cultivation. Bars represent standard deviation ($n=3$) and each arrow indicates the date of ethephon application.

에테폰 처리 직후 3주 동안 총 메탄배출량을 평가한 결과, 에테폰 처리량을 2.5 mg L^{-1} , 5.0 mg L^{-1} , 10 mg L^{-1} 수준으로 증가시킴에 따라 유기물을 사용하지 않은 처리구의 경우 1차 처리시 에테폰 무처리 (0.32 g m^{-2}) 대비 0.25 (22%), 0.16 (49%), 0.06 (82%) g m^{-2} 까지 메탄 배출이 각각 감소되었다. 에테폰 2차 처리 후 약 3주간은 에테폰 무처리 (2.10 g m^{-2}) 대비 1.71 g m^{-2} (19%), 1.89 g m^{-2} (10%), 1.32 g m^{-2} (37%) 까지 각각 메탄배출량이 감소되었다 (Fig. 3). 유기물을 사용한 처리구에서도 유기물 무시용구와 동일한 경향을 보였으나, 더 높은 메탄 저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 1차 처리 후 에테폰 무처리 (4.95 g m^{-2}) 대비 1.12 (77%), 1.28 (74%), 1.16 (77%) g m^{-2} 까지 각각 메탄

Fig. 2. Changes in CH_4 emission rates for 3 weeks right after the 1st (A, C) and 2nd ethephon application (B, D) without O.M addition and with O.M addition. Bars represent standard deviation ($n=3$) and each arrow indicates the date of ethephon application.

Fig. 3. Total CH_4 fluxes in the potted paddy soils amended with different levels of ethephon application and O.M conditions for 3 weeks right after the 1st ethephon addition (A) and 2nd addition (B). Bars represent standard deviation ($n=3$).

방출량이 감소되었다. 에테폰 2차 처리 후 무처리 (1.67 g m^{-2}) 대비 0.65 g m^{-2} (61.7%), 0.98 g m^{-2} (42.2%), 0.58 g m^{-2} (65.9%) 까지 각각 메탄 배출이 감소되었다 (Fig. 3). 결과적으로 에테폰 처리 직후 약 3주 동안 유기물 투입되지 않은 토양에서는 에테폰 무처리 대비 약 10 - 82%, 유기물 처리 토양에서는 약 42 - 77% 메탄 저감효과가 있는 것으로 조사되었다. 에테폰의 시용을 통해 처리 후 약 3주 정도 메탄 배출량 저감 효과가 지속 될 수 있는 것으로 판단되며, 이는 토양 용액 내 에테폰이 잔류하면서 경쟁적 저해제로서 메탄 생성을 억제하였기 때문으로 해석된다. 에테폰을 용액으로 직접 주입을 통해 벼 재배 전 기간에 걸쳐 메탄 배출을 억제하기에는 어려움이 있을 것으로 판단되나, 에테폰의 처리 회수와 처리량 및 용출 속도 조절을 통해 메탄 저감 효과를 개선 시킬 수 있을 것으로 사료된다.

에테폰 처리에 따른 아산화질소 배출 특성을 평가한 결과 (Fig. 1C, 1D), 유기물 처리 유무와 관계 없이 에테폰 처리 효과는 크지 않은 것으로 나타났다. 아산화질소 배출량이 가장 높았던 시기인 이앙 후 약 45일 경과 후 유기물 무처리의 경우 에테폰 처리에 따라 아산화질소 배출량이 다소 감소 되는 것으로 확인 되었으나, 유기물 처리구에서는 감소효과가 거의 없는 것으로 나타났다. 벼 재배기간 중 총아산화질소 배출량을 비교한 결과 (Fig. 4B), 에테폰 처리에 따른 배출량 증가 효과는 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 에테폰의 처리는 다른 온실가스 배출 증가 없이 메탄 배출량을 저감시킬 수 있는 첨가제로서 판단된다.

지구온난화잠재능을 전체적으로 비교하기 위해 총 메탄 배출량과 아산화질소 배출량에 각각 28, 265 배를 곱하여 CO_2 당량으로 환산하였다 (IPCC, 2013) (Fig. 5A). 에테폰 처리량 증가에 따라 지구온난화잠재능은 감소될 수 있을 것으로 추정하며, 특히 유기물 함량이 높은 논 토양에서 온실가스 배출 감소 효과가 높은 것으로 평가되었다.

Fig. 4. Seasonal CH_4 (A) and N_2O (B) fluxes in the potted paddy soils amended with different levels of ethephon application. N.S indicates not significant among treatments. Bars represent standard deviation ($n=3$).

에테폰 처리에 따른 벼 생산성 평가 에테폰 처리에 따른 벼 생산성과 수량구성요소를 평가한 결과 (Table 2, Fig. 5B), 유기물 처리유무와 관계없이 정조수량은 에테폰 처리에 따라 무처리 대비 최대 17 - 22% 증수되는 경향을 보였다. 에테폰 처리 10 mg L⁻¹ 수준을 제외하고, 2.5 - 5 mg L⁻¹ 농도까지 처리시 유의한 수량 증수 효과가 있는 것으로 확인되었다. 에테폰은 식물 생장 호르몬인 에틸렌(C₂H₄)의 전구 물질로 일반적으로 과실 성숙 촉진 또는 후숙을 돕는 생장 조절제로서 알려져 있다 (Zhang et al., 2012). 본 연구에서 생장조절제인 에테폰 처리가 벼 등숙률(ripened grains)과 수당입수(number of grains per panicle)를 효과적으로 증가시켜 수량을 증진 시킬 수 있었던 것으로 해석된다. Szoke (1990)는 에테폰 처리가 벼 등숙률, 천립중, 수당입수를 향상시켜 무처리 대비 약 20-30% 수량을 증수시킬 수 있다고 보고하였고, 본 연구 결과에서도 선행연구 결과와 동일한 결과가 확인되었다.

에테폰 처리에 따라 다른 수량구성요소의 경우 다소 차이를 보이기는 했으나 본 연구에서는 유의한 차이를 나타내지는 않았다. 2차식을 통해 최대 수량을 얻을 수 있는 최적 에테폰 처리 농도를 추정한 결과, 약 4.8 - 5.2 mg L⁻¹ 범위가 최적의 범위 인 것으로 추정되었으며 (Fig. 5B), 과량 처리시에는 수량 증수 효과가 미미해 지는 것으로 나타났다.

Fig. 5. Changes of total GWP (A) and rice grain yield (B) in the potted paddy soils amended with different levels of ethephon application. Bars represent standard deviation (n=3).

Table 2. Effect of ethephon application on rice productivity and yield properties at the harvesting stage.

Parameters		Ethephon application (mg L ⁻¹)			
		0	2.5	5	10
None O.M	Panicle number per hill	18	17	17	17
	Number of grains per panicle	96.1b	104.0ab	115.3a	101.9b
	Ripened grains (%)	76.4c	86.5a	83.3ab	80.2b
	1000 grain weight (g)	21.8	22.8	22.3	21.7
	Grain yield (g pot ⁻¹)	30.5c	33.5ab	35.6a	30.8bc
O.M	Panicle number per hill	22	22	22	23
	Number of grains per panicle	120.9ab	137.8a	125.6ab	113.5b
	Ripened grains (%)	72.9b	74.7ab	76.6a	76.8a
	1000 grain weight (g)	21.0	21.4	21.8	21.6
	Grain yield (g pot ⁻¹)	41.6c	48.3a	44.2b	42.4bc

[†]Different letters for each row are significantly different at $p \leq 0.05$ according to Tukey's test. No letters indicate no significant differences among treatments.

에테폰 처리에 토양 특성 평가 에테폰 처리에 따른 수확 후 토양 특성 변동을 평가한 결과 (Table 3), 유기물 처리 유무와 관계없이 에테폰 처리에 따른 토양 화학성의 변동은 크지 않은 것으로 나타났다. 흥미롭게도 2.5 - 5 mg L⁻¹ 수준으로 처리시 무처리에 비해 유효인산함량이 유의하게 증가하는 경향을 보였다. 이는 생장촉진제인 에테폰 처리를 통해 벼 뿌리 생육이 개선되어, 뿌리 주변 삼출물 배출이 증가되면서 많은 미생물이 근권 (rhizosphere) 주위에 서식하면서 더 많은 인산을 가용화 시킬 수 있었던 것으로 판단된다 (Sharma et al., 2013). 본 연구에서는 에테폰 처리에 따른 벼 뿌리 생육 증진 효과를 조사할 수 없었으나, 추후 벼 생육 등도 함께 인산 유효도 증진에 대해 자세하게 조사해야 할 필요가 있을 것으로 사료된다.

상관관계 에테폰 처리에 따른 메탄 배출, 벼 생산성, 토양화학성 등의 상관관계를 도출한 결과 (Table 4), 주로 온실가스 메탄 배출량 및 토양특성 변동과 상대적으로 상관관계가 높은 것으로 조사되었다. 유기물 무처리 토양의 경우

Table 3. Chemical properties of soils amended with different levels of ethephon application at rice harvesting stage.

Parameters		Ethephon application (mg L ⁻¹)			
		0	2.5	5	10
None	pH (1:5)	6.36	6.36	6.34	6.44
O.M	Av. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	312b	319b	353a	369a
	O.M (g kg ⁻¹)	22.9	23.5	24.2	24.4
	Ex. cations (cmol ⁺ kg ⁻¹)				
	K ⁺	0.20	0.18	0.25	0.32
	Ca ²⁺	3.54	3.62	3.79	3.94
	Mg ²⁺	0.66	0.68	0.76	0.81
O.M	pH (1:5)	7.21	7.23	7.25	7.28
	Av. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	397b	402b	425a	445a
	O.M (g kg ⁻¹)	28.2	28.3	28.9	29.6
	Ex. cations (cmol ⁺ kg ⁻¹)				
	K ⁺	0.33	0.45	0.50	0.63
	Ca ²⁺	5.64	5.66	5.74	5.68
	Mg ²⁺	1.47	1.47	1.63	1.60

[†]O.M: Organic matter content; Av: Available; Ex: Exchangeable; Different letters for each row are significantly different at $p \leq 0.05$ according to Tukey's test. No letters indicate no significant differences among treatments.

Table 4. Correlation between ethephon application and soil properties, yield components at the harvesting.

OM levels	Parameters	Correlation coefficient (r)
None O.M	<i>GHGs emissions</i>	
	Total CH ₄ flux	-0.304
	Total N ₂ O flux	-0.692**
	Total GWP	-0.304
	Total CH ₄ flux after the 1 st application	-0.865***
	Total CH ₄ flux after the 2 nd application	-0.781**
	<i>Yield properties</i>	
	Panicle number per hill	-0.297
	Number of grains per panicle	0.256
	Ripened grains	0.116
	1000 grain weight	-0.201
	Grain yield	-0.026

Table 4. Correlation between ethephon application and soil properties, yield components at the harvesting. (continued)

OM levels	Parameters		Correlation coefficient (r)
None O.M	<i>Soil properties</i>	pH	0.367
		Organic matter	0.607*
		Available P ₂ O ₅	0.915***
		Exchangeable K	0.713**
		Exchangeable Ca	0.712**
		Exchangeable Mg	0.715**
O.M	<i>GHGs emissions</i>	Total CH ₄ flux	-0.359
		Total N ₂ O flux	0.358
		Total GWP	-0.359
		Total CH ₄ flux after the 1 st application	-0.635*
		Total CH ₄ flux after the 2 nd application	-0.650*
	<i>Yield properties</i>	Panicle number per hill	0.309
		Number of grains per panicle	-0.501
		Ripened grains	0.805**
		1000 grain weight	0.367
		Grain yield	-0.160
	<i>Soil properties</i>	pH	0.224
		Organic matter	0.577*
		Available P ₂ O ₅	0.807**
		Exchangeable K	0.115
		Exchangeable Ca	0.482
		Exchangeable Mg	0.689**

[†]O.M: Organic matter amended soil; *, **, and *** denotes significance at the 5, 1, and 0.1 % levels, respectively.

에테폰 처리에 따라 총 아산화질소 배출량, 에테폰 직후 3주간 총 메탄배출량이 유의한 부의상관관계를 보였으며, 토양 내 유효인산, 치환성 양이온 함량 및 유기물 함량 등과도 정의 상관관계가 있는 것으로 조사되었다. 유기물 처리 토양의 경우도 에테폰 1-2차 처리 후 3주간 총메탄배출량이 유의한 부의상관관계를 나타내었으며, 등숙률과 토양 내 유효인산 및 치환성 마그네슘 함량과 높은 정의 상관관계가 확인되었다. 결과적으로 에테폰의 처리는 처리 직후 메탄 배출량 저감과 벼 수량 증수와 직접적인 관련성이 높은 것으로 나타났다.

Conclusions

벼 논에서 에테폰의 처리는 온실가스 배출량 감소에 효과가 있는 것으로 평가되었다. 특히, 처리 후 약 3주 정도 효과가 지속되는 것으로 확인되었으며, 처리 직후 3주 가량은 무처리 대비 약 10 - 82%까지 메탄 배출 저감효과가 있는 것으로 조사되었다. 아산화질소의 경우 에테폰 처리에 따른 배출량 증가 효과는 미미하였으며, 전체 온실가스 배출량 변화에 큰 영향을 주지 않은 것으로 나타났다. 에테폰 처리에 따라 벼 수량 증수 효과(무처리 대비, 최대 16%)가 있었으며, 5.2 ppm (유기물 무처리), 4.8 ppm (유기물 처리) 수준에서 최대 수량을 얻을 수 있을 것으로 추정하였다. 에테폰 처리에 따라 토양 화학적 특성은 큰 차이를 나타내지는 않았으나, 토양 내 유효인산 함량이 무처리에 비해 증가하였다. 벼 논에서 에테폰 처리시 수량 및 토양개선효과 등을 감안할 때 약 5 ppm 수준으로 약 3회 이상 처리한다면, 벼

재배기간 중 메탄 배출량을 효과적으로 저감할 수 있을 것으로 판단된다. 결론적으로, 벼 논에서 온실가스 메탄 배출 억제재로서 에테폰의 농업적 활용가능성이 충분할 것으로 평가되나, 추후 에테폰 처리 효과를 증진하기 위한 최적 제재화 기술 개발 및 현장 적용성 연구 등이 함께 수행되어야 할 것이다. 추가적으로 에테폰 처리 후 토양 내 잔류 기간 및 농도를 모니터링 함으로써 보다 정확한 에테폰 처리 효과가 구명될 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This work was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science and Technology Development (Project No. PJ014205022020)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Ali, M., C. Lee, and P. Kim. 2008. Effect of silicate fertilizer on reducing methane emission during rice cultivation. *Biol. Fertil. Soils*. 44:597-604.
- Bridgham, S.D., H. Cadillo-Quiroz, J.K. Keller, and Q.L. Zhuang. 2013. Methane emissions from wetlands: biogeochemical, microbial, and modeling perspectives from local to global scales. *Global Change Biol.* 19:1325-1346.
- Cao, W., and X. Yuan. 2019. Region-county characteristic of spatial-temporal evolution and influencing factor on land use-related CO₂ emissions in Chongqing of China, 1997 – 2015. *J. Clean Prod.* 231:619-632.
- Chidthaisong, A., and R. Conrad. 2000. Specificity of chloroform, 2-bromoethanesulfonate and fluoroacetate to inhibit methanogenesis and other anaerobic processes in anoxic rice field soil. *Soil Biol. Biochem.* 32:977-988.
- Chowdhury, T.R., and R.P. Dick. 2013. Ecology of aerobic methanotrophs in controlling methane fluxes from wetlands. *Appl. Soil Ecol.* 65:8-22.
- Gutierrez, J., S.Y. Kim, and P.J. Kim. 2013. Effect of rice cultivar on CH₄ emissions and productivity in Korean paddy soil. *Field Crop. Res.* 146:16-24.
- Haque, M.M., J.C. Biswas, S.Y. Kim, and P.J. Kim. 2017. Intermittent drainage in paddy soil: ecosystem carbon budget and global warming potential. *Paddy Water Environ.* 15:403-411.
- IPCC. 2007. Climate Change. The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge university press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA 996, 2007.
- IPCC. 2013. 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, 1535 pp.
- Jeong, S.T., S.R. Cho, J.G. Lee, P.J. Kim, and G.W. Kim. 2019. Composting and compost application: Trade-off between greenhouse gas emission and soil carbon sequestration in whole rice cropping system. *J. Clean Prod.* 212:1132-1142.
- Kim, S.Y., J. Gutierrez, and P.J. Kim. 2012a. Considering winter cover crop selection as green manure to control methane emission during rice cultivation in paddy soil. *Agric. Ecosyst. Environ.* 161:130-136.
- Kim, G.Y., S.B. Lee, J.S. Lee, E.J. Choi, J.H. Ryu, W. Park, and J. Choi. 2012b. 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, S.Y., J. Gutierrez, and P.J. Kim. 2013a. Effect of seedling transplanting date on methane emission from rice paddy soil during cultivation. *Soil Sci. Plant Nutr.* 59:278-288.
- Kim, S.Y., C.H. Lee, J. Gutierrez, and P.J. Kim. 2013b. Contribution of winter cover crop amendments on global warming potential in rice paddy soil during cultivation. *Plant Soil.* 366:273-286.
- Kim, G.Y., J. Gutierrez, H.C. Jeong, J.S. Lee, M.M. Haque, and P.J. Kim. 2014a. Effect of intermittent drainage on methane and nitrous oxide emissions under different fertilization in a temperate paddy soil during rice cultivation. *J. Korean Soc. Appl. Biol. Chem.* 57:229-236.
- Kim, S.Y., P. Pramanik, J. Gutierrez, H.Y. Hwang, and P.J. Kim. 2014b. Comparison of methane emission characteristics in air-dried and composted cattle manure amended paddy soil during rice cultivation. *Agric. Ecosyst. Environ.* 197:60-67.
- Kim, S.Y., C.K. Park, H.S. Gwon, M.I. Khan, and P.J. Kim. 2015a. Optimizing the harvesting stage of rye as a green manure to maximize nutrient production and to minimize methane production in mono-rice paddies. *Sci. Total Environ.* 537:441-446.
- Kim, S.Y., A.J. Veraart, M. Meima-Franke, and P.L.E. Bodelier. 2015b. Combined effects of carbon, nitrogen and phosphorus on CH₄ production and denitrification in wetland sediments. *Geoderma.* 259 – 260:354-361.
- Kim, S.Y., J. Gutierrez, and P.J. Kim. 2016. Unexpected stimulation of CH₄ emissions under continuous no-tillage system in mono-rice paddy soils during cultivation. *Geoderma.* 267:34-40.
- Kim, S.Y., S.T. Jeong, A. Ho, C.O. Hong, C.H. Lee, and P.J. Kim. 2018. Cattle manure composting: Shifts in the methanogenic community structure, chemical composition, and consequences on methane production potential in a rice paddy. *Appl. Soil Ecol.* 124:344-350.
- Kong, S.H., D.Y. Lee, Y.H. Song, K.H. Park, W.D. Seo, D.Y. Lee, and J.H. Kim. 2018. Residue safety on ethephon in soybean leaf by drenching and foliar application. *J. Appl. Biol. Chem.* 61:75-78.
- Kosse, P., M. Lübken, and M. Wichern. 2016. Selective inhibition of methanogenic archaea in leach bed systems by sodium 2-bromoethanesulfonate. *Environ. Technol. Innov.* 5:199-207.
- Le Mer, J., and P. Roger. 2001. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *Eur. J. Soil Biol.* 37:25-50.
- Lee, C., S. Kim, M. Villamil, P. Pramanik, C. Hong, and P. Kim. 2012. Different response of silicate fertilizer having electron acceptors on methane emission in rice paddy soil under green manuring. *Biol. Fertil. Soils* 48:435-442.
- Lee, C.H., K.Do Park, K.Y. Jung, M.A. Ali, D. Lee, J. Gutierrez, and P.J. Kim. 2010. Effect of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) as a green manure on rice productivity and methane emission in paddy soil. *Agric. Ecosyst. Environ.* 138:343-347.
- Lee, J.S., J.H. Ryu, H.C. Jeong, E.J. Choi, and G.Y. Kim. 2014. A case study to estimate the greenhouse-gas mitigation potential on rice production system in farming without agricultural chemicals. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 47(5):374-380.
- Lim, C.H., S.Y. Kim, and P.J. Kim. 2011. Effect of gypsum application on reducing methane (CH₄) emission in a reclaimed coastal paddy soil. *Korean J. Environ. Agric.* 30:243-251.
- Liu, H., J. Wang, A. Wang, and J. Chen. 2011. Chemical inhibitors of methanogenesis and putative applications. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 89:1333-1340.
- NIAS (National Institute of Agricultural Science and Technology). 1988. Methods of soil chemical analysis. National institute of agricultural science and technology, RDA, Suwon, Korea.
- NIAS (National Institute of Agricultural Science and Technology). 1999. Fertilization standard of crop plants. National institute of agricultural science and technology, RDA, Suwon, Korea.
- RDA (Rural Development Administration.). 2012. Standard investigation methods for agriculture experiment. p. 313-756.

- Rolston, D.E., 1986. Gas flux. *Methods of soil analysis: Part 1—Physical and mineralogical methods*. sssabookseries. p. 1103-1119.
- Sharma, S. B., R. Z. Sayyed, M. H. Trivedi, and T. A. Gobi. 2013. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *SpringerPlus*. 2:587.
- Singh, S., J.S. Singh, and A.K. Kashyap. 1999. Methane flux from irrigated rice fields in relation to crop growth and N-fertilization. *Soil Biol. Biochem.* 31:1219-1228.
- Szoke, T. 1990. The effect of ethephon plant growth regulator upon the yield components of rice. *Pest Management in Rice*. Springer. p. 465-473.
- Waghmode, T.R., M.M. Haque, S.Y. Kim, and P.J. Kim. 2015. Effective suppression of methane emission by 2-bromoethanesulfonate during rice cultivation. *PLoS One*. 10:e0142569.
- Ying, N., D. Zhou, Q. Chen, Q. Ye, and Z. Han. 2019. Long-term link detection in the CO₂ concentration climate network. *J. Clean Prod.* 208:1403-1408.
- Zhang, L., S. Li, X. Liu, C. Song, and X. Liu. 2012. Effects of ethephon on physicochemical and quality properties of kiwifruit during ripening. *Postharvest Biol. Technol.* 65: 69-75.