Korean J. Soil Sci. Fert. Vol.57, No.1, pp.63-72, 2024

Korean Journal of Soil Science and Fertilizer

Short communication

https://doi.org/10.7745/KJSSF.2024.57.1.063
pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

Effects of *Bacillus velezensis* strain GH1-13 seed-soaking inoculation on rice productivity and greenhouse gas (CH_4 and N_2O) emissions in a paddy soil during cultivation: A pot experiment

Juhee An[1,2†], Yeomyeong Lee[1†], Jaekyeong Song[3], Sang Yoon Kim[4]*

[1]Graduate Student, Department of Agricultural Chemistry & Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System, Sunchon National University, Suncheon 57922, Korea
[2]Assistant Researcher, Agricultural Microbiology Division, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea
[3]Senior Researcher, Organic Agriculture Division, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea
[4]Professor, Department of Agricultural Chemistry & Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System, Sunchon National University, Suncheon 57922, Korea

***Corresponding author:** Kim SY (Email: sykim@scnu.ac.kr)

[†]These authors contributed equally to this work.

Received: February 1, 2024
Revised: February 22, 2024
Accepted: February 29, 2024

Edited by
Hyo Jung Lee,
Kunsan National University,
Korea

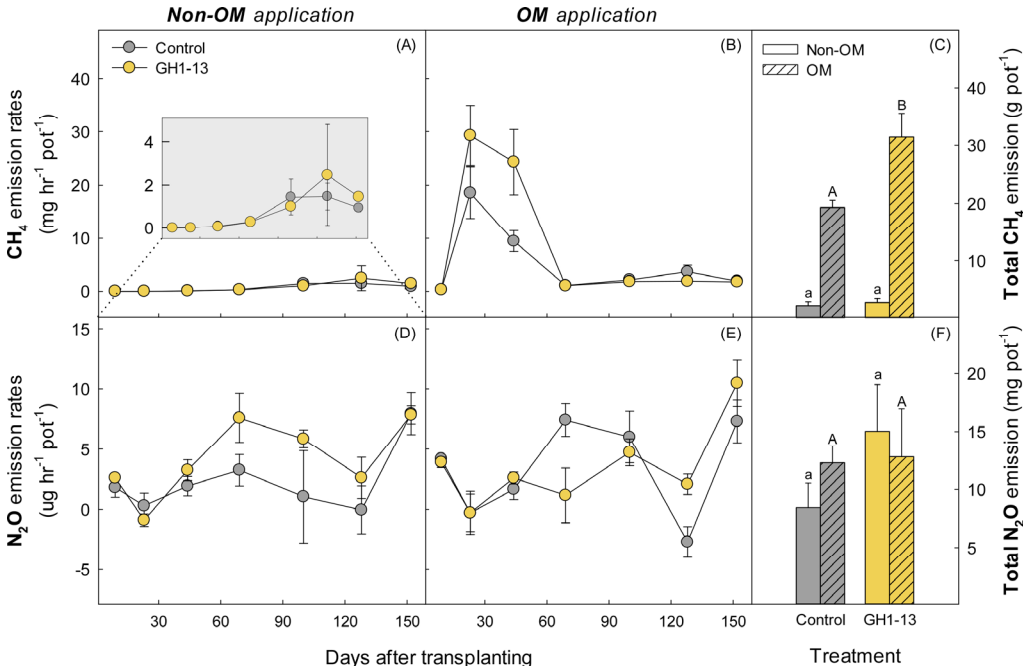
ORCID
An J
https://orcid.org/0009-0005-8612-5617
Lee Y
https://orcid.org/0009-0000-7237-2645
Song J
https://orcid.org/0000-0002-3553-6660
Kim SY
https://orcid.org/0000-0003-4914-3080

A B S T R A C T

In this study, a pot experiment was carried out to evaluate the effect of seed-soaking inoculation of *Bacillus velezensis* (*B. velezensis*) GH1-13 on rice productivity and GHG (greenhouse gas) emissions during the cultivation season in four different treatments (presence or absence of inoculation with organic matter application which was added as rice straw at rates of 0 and 5 Mg ha^{-1}, respectively). Inoculation of *B. velezensis* increased rice productivity, but no significant differences were observed among all the treatments. Global warming potential including CH_4 and N_2O emissions significantly increased with the inoculation (2.7 g CH_4 pot^{-1} and 15.0 mg N_2O pot^{-1}) compared to the control (2.2 g CH_4 pot^{-1} and 8.4 mg N_2O pot^{-1}) in non-OM (organic matter) soils. In OM-amended soils, CH_4 and N_2O emissions increased more than that in non-OM soils with the inoculation (31.4 g CH_4 pot^{-1} and 12.8 mg N_2O pot^{-1}) compared to the control (19.3 g CH_4 pot^{-1} and 12.3 mg N_2O pot^{-1}). Although there is no significant increase in CH_4 emissions, the fluxes increased in both non-OM and OM-treated soils by the inoculation, which might be due to the stimulation of organic matter degradation by producing cellulase enzyme and other metabolites related to carbon cycling from *B. velezensis*, leading to increase global warming potential (789.2 CO_2 eq. pot^{-1}) in the OM treatment soils compared to the control (486.4 CO_2 eq. pot^{-1}) during cultivation. These results suggest that rice seed-soaking of the *B. velezensis* may influence CH_4 and nitrogen cyclings in different OM conditions, which could be a pioneering option for potentially reducing GHG emissions in paddy soils. Conclusively, beneficial micro-organisms, isolated from rice paddy soils which might play a role in CH_4 oxidizers or N_2O reducers, are needed to be screened for mitigating GHG emissions as well as stimulating rice yield for further studies.

Keywords: *Bacillus*, Beneficial microbes, Biostimulator, Global warming, Plant Growth-Promoting Rhizobacterium (PGPR)

© The Korean Society of Soil Science and Fertilizer. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



Changes in CH_4 and N_2O emission rates under different inoculation and organic matter (OM) conditions during rice cultivation (A, B, D, E) and total CH_4 (C) and N_2O (F). Bars represent standard deviation (n = 3). The same letter indicates no significant differences among treatments ($p \leq 0.05$, Tukey's test).

Effects of *Bacillus* sp. inoculation greenhouse gas emissions (CH_4 and N_2O).

Introduction

바실러스 (*Bacillus*)는 작물의 생육 촉진, 병해충 방제 뿐만 아니라 악취 저감, 사료 제조 등 다양한 농업 현장에서 활용되고 있으며 (Velivelli et al., 2014), 다른 미생물에 비해 내생 포자 생성에 유리하기 때문에 다수의 제품들이 상용화되고 있다 (Nicholson, 2002; Cawoy et al., 2011). 특히, *Bacillus velezensis* 그룹 대부분은 생장 촉진 호르몬 생성 뿐만 아니라 다양한 이차 대사산물을 생산할 수 있기 때문에 작물 생육 증진과 병 방제에 동시 효과가 있는 복합기능성 미생물로 알려진 바 있다 (Kim et al., 2016, 2020). Markets and Markets (2020)의 분석 자료에 따르면 세계 생물 제재 시장은 2019년 26억 달러를 달성한 후, 매년 11.2%의 비율로 성장하여 2025년에는 49억 달러의 시장 규모에 달할 것으로 전망하였다. 국내에서도 친환경 농산물의 관심 증대와 농업기술센터의 미생물 공급 확대에 따라 미생물에 대한 수요와 활용은 지속적으로 증가할 전망이다 (Ahirwar et al., 2020).

메탄 (CH_4), 이산화탄소 (CO_2), 아산화질소 (N_2O)는 농경지에서 배출되는 주요 온실가스로 간주되며, 특히 벼 재배에 의한 메탄과 아산화질소의 대기 방출량은 각각 30%, 11%를 차지한다 (Gupta et al., 2021). 메탄은 메탄생성균에 의해 생성되며, 일반적으로 벼 논과 같은 담수환경과 같은 혐기적 조건에서 유기물이 분해되는 과정 중에 생성된다 (Malyan et al., 2016). 특히, 벼 생육과 메탄 배출량 간 밀접한 관계가 있는 것으로 보고된 바 있다 (Le Mer and Roger, 2001). 벼 생육의 증진은 통기조직의 증가로 벼를 통해 배출되는 메탄을 증가시킬 수 있으며, 뿌리 생육의 증대는 뿌리 삼출물 생성을 증가시켜 벼 논에서 메탄 생성 및 배출을 촉진시킬 수 있다 (Bhattacharyya et al., 2019; Chen et al., 2019). 또한 미생물 처리에 따른 토양 내 미생물 군집의 변동은 메탄 및 아산화질소 배출에 관여하는 미생물의 밀도와 활성에도 영향을 끼칠 수 있다. 이와 같이 벼 논에서 미생물의 처리는 벼 생육에 직간접적인 영향을 줄 수 있으며, 토양

내 탄소 기질, 양분 순환, 산소 공급 등 다양한 방식으로 토양 환경에 영향을 줄 수 있다. 따라서 벼 논에서 미생물의 처리는 온실가스 메탄 뿐만 아니라 아산화질소 배출에도 유의한 영향을 줄 수 있을 것으로 판단되나, 이에 대한 체계적인 연구는 국내에서는 거의 시도되지 않고 있는 실정이다.

일반적으로 유용 미생물 처리 방법은 종자를 미생물 희석액에 일정 시간 침지하는 방법과 작물을 심은 토양 및 뿌리에 접종하는 관주 처리 방법이 대표적이다 (Mahmood et al., 2016). 관주 처리방법은 미생물 희석액을 작물 근권에 직접적으로 처리하여 토양 근권 미생물 군집 개선, 작물 생장 촉진 등 긍정적인 효과를 기대할 수 있다. 하지만 외부 환경에 미생물 처리액이 지속적으로 노출되어 건조 등으로 인해 미생물이 사멸할 수 있기 때문에 여러 번 처리해야 하는 번거로움이 있고, 비교적 많은 양의 희석액을 필요로 한다 (Mahmood et al., 2016; Kim et al., 2020). 반면, 종자 침지 방법은 관주 처리에 비해 처리 방식이 비교적 간단하여 편리하게 활용할 수 있는 장점이 있다. 또한 미생물이 종자 발아 과정에서 식물 뿌리에 정착하여 상호 유익한 관계를 형성함으로써 식물의 생장을 증진시키는 식물호르몬의 수준을 조절할 수 있을 뿐만 아니라 작물 생육 초기 생물학적 및 비생물학적 스트레스에 노출시켜 해당 스트레스에 대한 저항성을 유도할 수 있다 (Khan et al., 2020; Lopes et al., 2021; Singh et al., 2023). Moussa et al. (2013)의 연구에서는 밀에 *Bacillus* 및 *Fusarium graminearum*를 종자 침지방법으로 적용했을 때 관주 처리에 비해 발아율, 초장, 총 생체중을 각각 7%, 18%, 34% 증가시켰으며, 밀 뿌리 썩음병을 13% 저감 시켜 종자 침지방법이 생육증진과 병 방제에 더 효과적인 것으로 보고된 바 있으나, 여전히 종자 침지 처리와 관련한 연구는 부족한 실정이다.

벼 논에서 유용 미생물의 처리는 온실가스 배출에 다양한 영향을 줄 수 있다. Prasanna et al. (2002)의 연구에 따르면 벼 논에서 Cyanobacteria와 같은 광합성 세균의 처리는 담수 논 토양에 산소를 공급하여 메탄 산화능을 증가시켜, 메탄 배출을 무처리 대비 57 - 91% 감소시키는 것으로 조사되었다. 반면, *Bacillus*와 같은 미생물의 처리는 Cellulase 효소 및 기타 대사산물의 분비로 토양 내 유기물 분해를 촉진시킬 수 있기 때문에 오히려 온실가스 메탄의 배출을 증가시킬 수 있다 (Weber et al., 2001; Oviedo-Ocana et al., 2022; Zhao et al., 2024). 또한, *Bacillus* 처리로 인한 벼 뿌리 발달의 촉진은 토양에서의 영양소 흡수를 도와 벼의 생육발달에 도움을 주어 수확량에 긍정적인 영향을 미칠 수 있으나 (Win et al., 2018), 뿌리 삼출물 증가로 메탄 생성 및 배출을 증진시킬 가능성이 있다 (Chen et al., 2019). 이렇듯 미생물의 처리는 벼 재배기간 중 온실가스 배출에 복합적으로 영향을 줄 수 있음에도 불구하고, 현재까지의 연구는 미생물 처리에 따른 생육 촉진 및 병 방제 효과만을 주로 다루고 있어 온실가스 배출을 포함한 토양환경 전반에 걸친 영향에 대한 체계적인 평가가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 유용 미생물 처리가 벼 생산성 및 온실가스 배출에 미치는 영향을 종합적으로 평가하기 위해 포트실험을 수행하였다.

Materials and Methods

포트실험 준비 및 벼 재배관리 논 토양에서 미생물 처리에 따른 온실가스 배출 및 벼 생육특성을 평가하기 위해 포트실험을 수행하였다. 전북 완주군 국립농업과학원 논 포장에서 포트 실험용 토양을 채취하여 실험에 이용하였으며, 이때 공시토양의 화학적 특성은 pH 6.0, Total C 9.7 g kg^{-1}, Total N 1.7 g kg^{-1}로 일반적인 논 토양의 특징을 보였다. 채취한 토양은 자연 건조 후 10 mm 체에 통과시킨 다음, 토양 10 kg를 와그너포트 (1/2,000 a size) 에 용적밀도 1.2 g cm^3 (약 18 cm 높이)가 되도록 충진 하였다. 추가적으로 유기물이 많은 조건과 부족한 두개의 조건을 설정하기 위해 유기물 무처리와 유기물 처리구 (볏짚 25 g pot^{-1}, 5 Mg ha^{-1})를 각각 설치한 다음, 12 cm 깊이로 비료 처리 시 혼합하였으며, 전체 포트는 이앙 7일전부터 담수상태를 유지하며 안정화 시켰다. 농촌진흥청 벼 재배 표준시비량을 기

준으로 이앙 전 기비로서 질소 (N) - 인산 (P_2O_5) - 가리 (K_2O)가 각각 45 - 45 - 40 kg ha^{-1}로 시비 되었으며, 이앙 2주 후 분얼비 (1차 추비)로서 질소 19.8 kg N ha^{-1}, 이앙 7주 후 (출수 2주 전) 출수비 (2차 추비)로서 질소 및 가리를 각각 25.2, 17 kg ha^{-1} 처리하였다 (NIAST, 1999). 공시작물로 신동진 벼 (*Oryza sativa* L.)를 선정하여, 2017년 6월 23일에 포트 당 1포기 (20 days after transplanting, DAT)를 손으로 이앙하였으며, 바람이 잘 통하는 온실에서 153일 간 재배하여 2017년 11월 22일에 수확하였다. 생육기간 동안 물관리는 약 5 - 7 cm 높이로 상시 담수 조건을 유지하였으며, 수확 2주전 수확을 위해 배수 후 토양을 건조 시켰다. 모든 처리구는 3반복으로 반복실험을 수행하여 실험결과의 일관성 및 신뢰성을 확보하였다.

미생물 처리 본 연구에서는 논 토양에서 분리되어 작물의 생육 촉진과 생물학적 방제가 가능한 복합기능성 미생물제로 보고된 바 있는 *Bacillus velezensis* 속의 GH1-13 균주를 사용하였다 (Kim et al., 2016, 2017). 균주 처리방법은 종자 침지 방법을 이용하였으며, Tryptic soy broth (TSB) 배지에 배양한 GH1-13을 10^7 cfu mL^{-1} 수준으로 희석한 다음 3시간 동안 종자를 침지 하였고, 미생물을 배양하지 않은 배지에 동일하게 종자를 침지하여 대조구를 준비하였다.

온실가스 배출량 및 Total GWP 산정 벼 재배기간 중 온실가스 메탄 및 아산화질소 배출량을 평가하기 위해 기존 연구와 동일한 방식으로 가스 채취 및 분석을 수행하였다 (Choi et al., 2020, An et al., 2022, 2023). 가스시료는 벼 이앙 후 2 - 3주 간격으로 폐쇄정태챔버법 (closed chamber method)을 이용하여 채취하였다. 하루 중 온실가스 배출량이 평균값을 나타내는 오전 10 - 11시 사이에 30분간 포집 하였으며, 원통형 아크릴 챔버 내부의 공기순환을 위해 소형팬을 가동하여 가스시료의 균질한 조건을 유지했다. 가스시료는 3 way stopper가 부착된 60 mL 주사기를 이용해 채취되었으며, 챔버 체적 변동을 고려하기 위해 챔버 내 온도가 함께 조사되었다. 채취된 시료는 Gas chromatography (Agilent 6890, USA)를 이용하여 정량 하였으며, 재배기간 중 각 처리구에서 배출되는 메탄 및 아산화질소 배출량 및 총 배출량은 선행연구와 동일한 산출방식을 이용하여 계산되었다 (Lim et al., 2011; Choi et al., 2020). 전체 벼 재배기간 중 배출된 메탄에 25배, 아산화질소 배출량에 298배를 곱하여 CO_2 당량으로 환산한 다음 지구온난화 잠재능 (total global warming potential, GWP)을 평가하였다 (IPCC, 2013).

벼 생산성 및 토양특성 평가 벼 생산성 및 수량구성요소는 정조수확 후 70°C에서 3일간 건조하여 농촌진흥청 농사시험연구기준에 따라 평가하였다 (RDA, 2012). 토양시료는 벼 수확 후 채취하여 서늘한 실내에서 풍건 한 후 2 mm 체에 걸러 화학성 분석에 이용하였다. 토양 화학성 분석은 농촌진흥청 토양 및 식물체 분석법 (NIAST, 1988)을 참고하여 토양의 산도 (pH), 총 탄소 (total C), 총 질소 (total N), 유효인산 (available P_2O_5), 교환성양이온 (exchangeable cations)을 분석하였다.

통계분석 통계분석은 SAS software (ver.9.4, SAS Institute Inc., USA)를 이용하여 ANOVA 분석을 수행하였다. 처리 간 통계적인 유의성이 인정되는 경우, Tukey's test를 이용하여 5% ($p \leq 0.05$) 확률의 유의 수준에서 사후 분석을 수행하여 처리 간 효과를 비교하였다.

Results and Discussion

미생물 처리가 온실가스 배출에 미치는 영향 미생물 처리에 따른 벼 재배기간 중 온실가스 메탄과 아산화질소 배출량을 평가하였다 (Fig. 1A, 1B). 미생물 처리에 따라 메탄 배출 패턴의 차이는 거의 없는 것으로 조사되었다. 재배기간 중 총 메탄 배출량을 평가한 결과 (Fig. 1C), 미생물 무처리구 (2.2, 19.3 g pot^{-1})와 비교하여 처리구 (2.7, 31.4 g pot^{-1})에서 전반적으로 높은 메탄 배출량을 나타냈으며 유기물 처리구에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다.

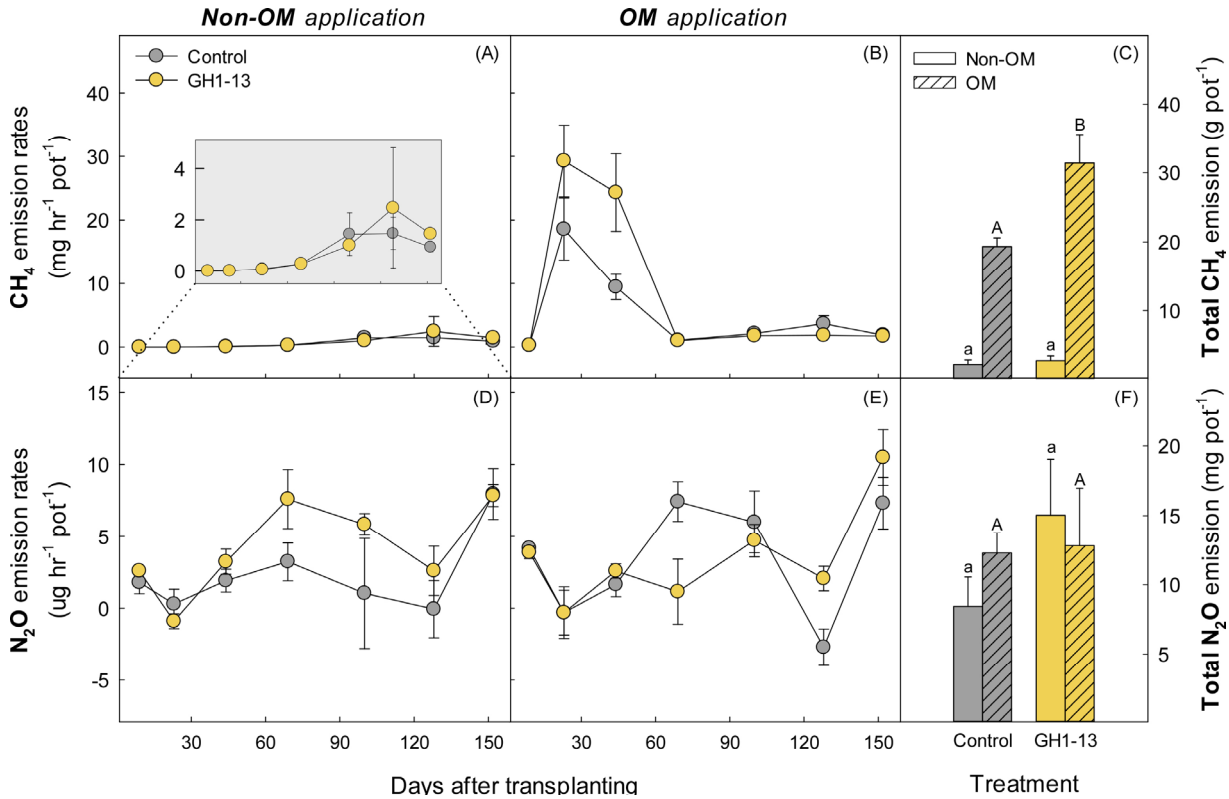


Fig. 1. Changes in CH_4 and N_2O emission rates under different inoculation and organic matter (OM) conditions during rice cultivation (A, B, D, E) and total CH_4 (C) and N_2O (F). Bars represent standard deviation (n = 3). Same letter indicates no significant differences among treatments ($p \leq 0.05$, Tukey's test).

본 연구에서는 뿌리생육 결과를 조사하지 못하였으나, 미생물 침지 처리시 벼 뿌리 생육이 발달 하면서 탄소 기질인 뿌리 삼출이 증가하여, 근권 내 토양 메탄 생성균의 활성이 증가했기 때문에 메탄의 생성 및 배출이 활발하게 진행되었을 것으로 판단된다. Rani et al. (2021)의 연구에서는 식물 생장 촉진 미생물과 메탄 이용 미생물을 동시 접종 시 메탄 배출량을 7 - 12% 가량 저감할 수 있는 것으로 조사되었으며, 이는 미생물 처리가 벼 논에서 메탄 배출에 영향을 미칠 수 있다는 것을 시사한다. 추가적으로 추후 식물생장 촉진 미생물 중에서 메탄 저감능력이 우수한 균주 선발을 통해 논 토양에서 배출되는 메탄 배출량을 효과적으로 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

전반적으로 유기물 무처리에 비해 유기물 처리구에서 배출량이 높은 것으로 조사되었다 (Fig. 1). 유기물 무처리구의 메탄 배출 양상은 생육초반에는 거의 배출되지 않다가 약 70일부터 점차 증가한 후 다시 감소하는 경향인 반면, 유기물 처리구의 경우 이앙 후 큰 폭으로 급격히 증가했다가 약 50일 이후 점차 감소하는 경향으로 유기물 처리 유무에

따라 다른 패턴을 나타냈다. 일반적으로 벼 생육의 중간단계인 유수형성기부터 출수기 사이에서 메탄 배출이 가장 활발하게 나타난다고 알려져 있다 (Lee et al., 2010; Bhattacharyya et al., 2019). 하지만 본 연구에서는 유기물 투입 처리구에서 생육 초기에 다량의 메탄이 배출되는 경향을 확인하였고, 아마도 이는 담수상태의 혐기적 조건 하에서 유기물 처리구의 토양 내 볏짚 투입으로 인해 벼 생육초기에 다량의 유기물이 공급되어 메탄생성균이 이용가능한 탄소기질이 크게 증가되었기 때문에 벼 생육 초기에 메탄 배출량이 크게 증가한 것으로 판단된다 (Le Mer and Roger, 2001; Kim et al., 2012; Hwang et al., 2017).

미생물 처리에 따른 아산화질소 배출 특성을 평가한 결과 (Fig. 1D, 1E) 약 50일 이후 증가하였다가 점차 감소한 뒤 150일 경 다시 큰 폭으로 증가하는 유사한 배출 패턴을 보였다. 미생물 처리에 따른 총 아산화질소 배출량을 평가한 결과 (Fig. 1F) 미생물 무처리구와 비교하여 처리구에서 전반적으로 증가하는 경향을 보였으나 통계적인 유의차는 없었다. 또한, 유기물 처리유무에 따라서는 유의미한 배출량 차이가 없는 것으로 나타났다.

지구온난화 잠재능을 종합적으로 평가하기 위해 벼 재배기간 중 총 메탄 및 아산화질소 배출량에 지구온난화지수로서 각각 28배, 265배를 곱하여 CO_2 당량으로 환산하였다 (IPCC, 2013). 본 연구에서는 메탄이 총 온실가스 배출의 대부분을 차지하는 핵심적인 요인으로 확인되었으며 (Fig. 2), 이는 논 토양 조건에서 온실가스 관리에서는 아산화질소 보다는 특히 메탄 저감을 위한 전략이 더욱 중요함을 강조한다. 그 결과 지구온난화 잠재능은 미생물을 처리함에 따라 전반적으로 증가하는 경향으로 나타났으며, 유기물이 적은 조건보다는 유기물이 많은 조건에서 통계적으로 유의하게 증가하는 것으로 평가되었다. 결과적으로 미생물 처리는 전반적으로 온실가스 배출에 유의한 영향을 줄 수 있는 것으로 조사되었다.

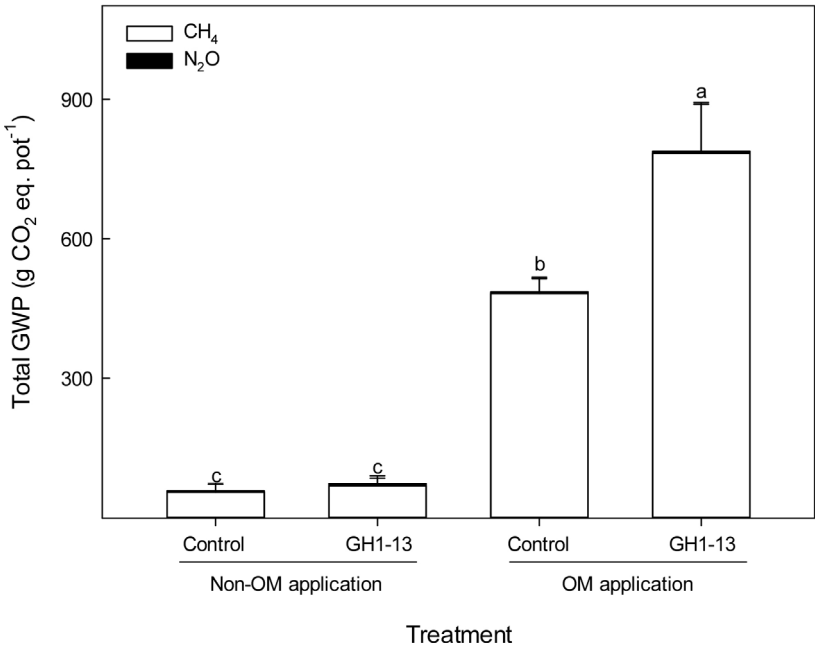


Fig. 2. Total global warming potentials under different inoculation and organic matter (OM) conditions. Bars represent standard deviation (n = 3). The different letters indicate significant differences among treatments ($p \leq 0.05$, Tukey's test).

미생물 처리에 따른 벼 수량 증진 효과 및 토양특성 평가 미생물 처리에 따른 벼 생산성 및 수량구성요소를 평가하였다 (Table 1). 정조수량 (grain yield)의 경우 무처리와 비교하여 미생물을 처리함에 따라 최대 5.3 - 8.3%의 수량 증수효과가 있는 것으로 조사되었으나, 통계적 유의차는 확인할 수 없었다. 선행연구에서 GH1-13 균주는 생육 촉진 호르몬인 Indole-acetic acid (IAA) 생성능을 지닌 것이 검증되었으며 (Kim et al., 2016), 아마도 생육 촉진 효과가 있는 미생물의 처리가 벼 수량 및 생육적인 측면에 긍정적인 영향을 준 것으로 판단된다. 유기물 처리 유무에 따라서는 유의미한 수량차이를 보이지 않았다. 미생물 처리에 따른 수확 후 토양 화학성을 평가한 결과 (Table 1), 미생물 무처리구 대비 처리구에서 토양 pH, Total C, Total N, Available P_2O_5 등 화학적 특성을 전반적으로 개선시키는 것으로 보이나, 본 연구에서는 통계적인 유의차는 없는 것으로 조사되었다. 유기물 무처리에 비해 유기물을 투입할 경우 토양 pH, Total C를 유의하게 개선시키는 것으로 조사되었다. 미생물의 처리는 벼 생육 및 수량적인 측면 뿐만 아니라 토양의 질 적인 측면에서도 유의미한 악영향을 미치지는 않은 것으로 판단된다. 본 연구에서는 종자를 침지시키는 것만으로도 미생물 처리 효과를 얻을 수 있음을 보여주었으며, 추후 미생물 접종 효과를 개선하기 위한 다양한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

Table 1. Soil properties, rice productivity and yield properties after the harvesting.

Parameter	Treatments			
	Non-OM[1] application		OM application	
	Control	GH1-13	Control	GH1-13
Yield component				
Tiller numbers	16.5 a[2]	17.3 a	17.3 a	16.7 a
Number of grains per panicle	162.9 ab	162.7 ab	157.7 b	175.7 a
1,000 grain weight (g)	24.5 a	25.2 a	25.3 a	25.1 a
Ripened grains (%)	95.5 a	96.1 a	96.1 a	95.8 a
Grain yield (g pot^{-1})	63.0 a	68.2 a	66.1 a	69.6 a
Soil characteristics				
pH (H_2O, 1:5)	6.1 b	6.2 b	6.7 a	6.8 a
Total C (%)	1.1 b	1.1 ab	1.2 a	1.3 a
Total N (%)	0.1 a	0.2 a	0.2 a	0.2 a
C/N ratio	10.9 a	5.8 a	6.6 a	6.4 a
Available P_2O_5 (mg kg^{-1})	28.2 a	29.6 a	24.1 a	26.9 a
Exchangable cations ($cmol_c$ kg^{-1})				
Ca^{2+}	4.3 a	4.0 ab	3.6 b	4.0 ab
Mg^{2+}	1.1 a	1.0 a	0.9 a	1.0 a
K^+	0.3 a	0.3 a	0.3 a	0.3 a

[1]OM, organic matter.
[2]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.

Conclusions

종자 침지방법을 이용한 미생물 처리는 벼 생육 및 온실가스 배출에 영향을 주는 것으로 조사되었다. 미생물 처리는 벼 생육 측면에서 긍정적인 영향을 줄 수 있으나, 뿌리 생육 촉진 및 삼출물 생성 증가로 인해 오히려 메탄생성량을 높인 것으로 보인다. 또한 뿌리 삼출물의 증가는 미생물 활성과 유기물 분해를 촉진시켜 벼 재배기간 중 온실가스 메탄과 아산화질소 배출량을 증가시킨 것으로 판단된다. 이는 미생물의 처리가 메탄 및 전반적인 질소 순환에 영향을 미칠 수 있음을 시사하며, 본 연구에서는 논 토양에서 미생물 처리가 잠재적으로 온실가스 배출에 유의미한 영향을 줄 수 있음을 보여주었다. 향후 작물 생육 촉진 및 병방제에 우수한 효과를 보여준 미생물 중에서 온실가스 배출을 효과적으로 감소시킬 수 있는 균주를 선발하거나 논 토양에서 메탄을 이용하는 미생물과의 동시 접종을 통한 온실가스 저감효과 등의 연구가 필요할 것으로 판단되며, 이를 통해 농업 생산과정에서 배출되는 온실가스 배출을 효과적으로 저감 시킬 수 있을 것으로 기대한다. 다만, 미생물의 처리 방법, 미생물 밀도, 토양 내 정착능, 토양 환경 등 다양한 요인에 따라 활성의 차이가 있을 수 있어, 이에 대한 추가적인 연구와 기술 개발이 필요할 것으로 판단된다.

Funding

This work was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science and Technology Development (Project No. PJ015584)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Author Contribution

An J: Investigation, Data curation, Writing-original draft, **Lee Y:** Data curation, Visualization, Writing-original draft, **Song J:** Conceptualization, **Kim SY:** Supervision, Conceptualization, Data curation, Writing-review & editing.

Data Availability

Data will be provided on reasonable request.

References

Ahirwar NK, Singh R, Chaurasia S, Chandra R, Ramana S. 2020. Effective role of beneficial microbes in achieving the sustainable agriculture and eco-friendly environment development goals: A review. Front. Environ. Microbiol. 5:111-123. https://doi.org/10.11648/j.fem.20190506.12

An H, Bae S, Lee Y, Lee J, Jeon SH, Kim SY. 2022. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on mitigating greenhouse gas emissions and improving maize productivity in a field condition. Korean J. Soil Sci. Fert. 55:261-272. https://doi.org/10.7745/KJSSF.2022.55.4.261

An H, Lee Y, Lee J, Yoo S, Park SJ, Hong SC, Kim JH, Kim SY. 2023. Does co-application of compost and mineral fertilizers reduce gaseous nitrogen (NH_3 and N_2O) losses and improve nitrogen use efficiency from maize-growing soil?. Korean J. Soil Sci. Fert. 56:119-125. https://doi.org/10.7745/KJSSF.2023.56.1.119

Bhattacharyya P, Dash P, Swain C, Padhy S, Roy K, Neogi S, Berliner J, Adak T, Pokhare S, Baig M. 2019. Mechanism of plant mediated methane emission in tropical lowland rice. Sci. Total Environ. 651:84-92. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.141

Cawoy H, Bettiol W, Fickers P, Ongena M. 2011. *Bacillus*-based biological control of plant diseases. pp. 273-302. In Stoytcheva M (Ed.) Pesticides in the modern world - Pesticides use and management. InTech, Rijeka, Croatia. https://doi.org/10.5772/17184

Chen Y, Li S, Zhang Y, Li T, Ge H, Xia S, Gu J, Zhang H, Lü B, Wu X. 2019. Rice root morphological and physiological traits interaction with rhizosphere soil and its effect on methane emissions in paddy fields. Soil Biol. Biochem. 129:191-200. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.11.015

Choi S, Lee J, Lee Y, Kim PJ, Cho JS, Cheong YH, Rim YS, Kim SY. 2020. The effects of ethephon application on suppressing methane emission and stimulating rice productivity in a rice paddy soil: A pot experiment. Korean J. Soil Sci. Fert. 53:489-501. https://doi.org/10.7745/KJSSF.2020.53.4.489

Gupta K, Kumar R, Baruah KK, Hazarika S, Karmakar S, Bordoloi N. 2021. Greenhouse gas emission from rice fields: A review from Indian context. Environ. Sci. Pollut. Res. 28:30551-30572. https://doi.org/10.1007/s11356-021-13935-1

Hwang HY, Kim GW, Kim SY, Haque MM, Khan MI, Kim PJ. 2017. Effect of cover cropping on the net global warming potential of rice paddy soil. Geoderma 292:49-58. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.001

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 TF et al. (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 1535 pp.

Khan N, Bano A, Ali S, Babar MA. 2020. Crosstalk amongst phytohormones from planta and PGPR under biotic and abiotic stresses. Plant Growth Regul. 90:189-203. https://doi.org/10.1007/s10725-020-00571-x

Kim SY, An JH, Park KH, Lee SY, Weon HY, Sang MK, Lee JH, Song J. 2020. Effect of *Bacillus* CC112 inoculation on fungal pathogens and soil microbial community in a ginseng-cultivated soil. Korean J. Soil Sci. Fert. 53:128-139. https://doi.org/10.7745/KJSSF.2020.53.2.128

Kim SY, Gutierrez J, Kim PJ. 2012. Considering winter cover crop selection as green manure to control methane emission during rice cultivation in paddy soil. Agric., Ecosyst. Environ. 161:130-136. https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.07.026

Kim SY, Sang MK, Weon HY, Jeon YA, Ryoo JH, Song J. 2016. Characterization of multifunctional *Bacillus* sp. GH1-13. Korean J. Pestic. Sci. 20:189-196. https://doi.org/10.7585/kjps.2016.20.3.189

Kim SY, Song H, Sang MK, Weon HY, Song J. 2017. The complete genome sequence of *Bacillus velezensis* strain GH1-13 reveals agriculturally beneficial properties and a unique plasmid. J. Biotechnol. 259:221-227. https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2017.06.1206

Le Mer J, Roger P. 2001. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. Eur. J. Soil Biol. 37:25-50. https://doi.org/10.1016/S1164-5563(01)01067-6

Lee CH, Do Park K, Jung KY, Ali MA, Lee D, Gutierrez J, Kim PJ. 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. https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.05.011

Lim CH, Kim SY, Kim PJ. 2011. Effect of gypsum application on reducing methane (CH_4) emission in a reclaimed coastal paddy soil. Korean J. Environ. Agric. 30:243-251. https://doi.org/10.5338/KJEA.2011.30.3.243

Lopes MJDS, Dias-Filho MB, Gurgel ESC. 2021. Successful plant growth-promoting microbes: Inoculation methods and abiotic factors. Front. Sustain. Food Syst. 5:606454. https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.606454

Mahmood A, Turgay OC, Farooq M, Hayat R. 2016. Seed biopriming with plant growth promoting rhizobacteria: A review. FEMS Microbiol. Ecol. 92:fiw112. https://doi.org/10.1093/femsec/fiw112

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. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.182

Markets and Markets. 2020. https://ssl.pstatic.net/imgstock/upload/research/industry/1626922861296.pdf

Moussa T, Almaghrabi O, Abdel-Moneim T. 2013. Biological control of the wheat root rot caused by *Fusarium graminearum* using some PGPR strains in Saudi Arabia. Ann. Appl. Biol. 163:72-81. https://doi.org/10.1111/aab.12034

NIAST (National Institute of Agricultural Science and Technology). 1988. Methods of soil chemical analysis. RDA, Suwon, Korea.

NIAST (National Institute of Agricultural Science and Technology). 1999. Fertilization standard of crop plants. RDA, Suwon, Korea.

Nicholson LW. 2002. Roles of *Bacillus* endospores in the environment. Cell. Mol. Life Sci. 59:410-416. https://doi.org/10.1007/s00018-002-8433-7

Oviedo-Ocana ER, Soto-Paz J, Torres VS, Castellanos-Suarez LJ, Komilis D. 2022. Effect of the addition of the *Bacillus* sp., *Paenibacillus* sp. bacterial strains on the co-composting of green and food waste. J. Environ. Chem. Eng. 10:107816. https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107816

Prasanna R, Kumar V, Kumar S, Yadav AK, Tripathi U, Singh AK, Jain M, Gupta P, Singh P, Sethunathan N. 2002. Methane production in rice soil is inhibited by cyanobacteria. Microbiol. Res. 157:1-6. https://doi.org/10.1078/0944-5013-00124

Rani V, Bhatia A, Kaushik R. 2021. Inoculation of plant growth promoting-methane utilizing bacteria in different N-fertilizer regime influences methane emission and crop growth of flooded paddy. Sci. Total Environ. 775: 145826. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145826

RDA. 2012. Standard investigation methods for agriculture experiment. Rural Development Administration, Suwon, Korea. pp. 313-756.

Singh P, Vaishnav A, Liu H, Xiong C, Singh HB, Singh BK. 2023. Seed biopriming for sustainable agriculture and ecosystem restoration. Microb. Biotechnol. 16:2212-2222. https://doi.org/10.1111/1751-7915.14322

Velivelli SLS, De Vos P, Kromann P, Declerck S, Prestwich BD. 2014. Biological control agents: From field to market, problems, and challenges. Trends Biotechnol. 32:493-496. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2014.07.002

Weber S, Stubner S, Conrad R. 2001. Bacterial populations colonizing and degrading rice straw in anoxic paddy soil. Appl. Environ. Microbiol. 67:1318-1327. https://doi.org/10.1128/AEM.67.3.1318-1327.2001

Win KT, Oo AZ, Ohkama-Ohtsu N, Yokoyama T. 2018. *Bacillus pumilus* strain TUAT-1 and nitrogen application in nursery phase promote growth of rice plants under field conditions. Agronomy 8:216. https://doi.org/10.3390/agronomy8100216

Zhao L, Zhao M, Gao W, Xie L, Zhang G, Li J, Song C, Wei Z. 2024. Different *Bacillus* sp. play different roles on humic acid during lignocellulosic biomass composting. J. Cleaner Prod. 434:139901. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139901