

FOOD&CHEMISTRY

Influences of silicate fertilizers containing different rates of iron slag on CH₄ emission and rice (*Oryza sativa* L.) growth

Ji-Hoon Kim, Yun-Gu Kang, Jun-Yeong Lee, Jun-Ho Kim, Ji-Won Choi, Taek-Keun Oh*

Department of Bio-Environmental Chemistry, College of Agriculture and Life Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

*Corresponding author: ok5382@cnu.ac.kr

Abstract

Methane (CH₄) is an important greenhouse gas, with a short-term greenhouse effect 80-fold that of carbon dioxide. Blast furnace slag used as a base ingredient for silicate fertilizer, and contained Fe³⁺, which acts as reduction of CH₄ emissions in flooded rice paddy. This study was evaluated the effects of the silicate fertilizer with different rates of the iron slag on CH₄ emissions and rice growth. In this study, the SF 0.0% was applied with silicate fertilizer containing 0.0% of the iron slag, while the SF 2.5% and SF 5.0% were treated with silicate fertilizer containing 2.5 and 5.0%, respectively. The CH₄ emissions during rice cropping period were assessed using a closed-chamber method and then determined by Gas chromatography. The CH₄ fluxes were reduced by 17% (SF 0.0%), 17% (SF 2.5%), and 8% (SF 5.0%) compared to the treatment with only-inorganic fertilization (control). Conversely, rice grain yield increased by 15 - 30% compared to the control owing to the improvement of soil quality by silicate fertilization. In particular, soil pH, available phosphorus and available silicic acid content were increased with the increase in the iron slag rates from 0.0 to 5.0%. These contributed to a significant increase in rice growth such as 1,000-grains weight and percentage of filled grains. Consequently, these findings were indicated that the application of silicate fertilizer containing 2.5 - 5.0% of iron slag would be the most effective in both CH₄ reduction and rice growth.

Keywords: Fe³⁺, iron slag, methane, rice growth, silicate fertilizer

OPEN ACCESS

Citation: Kim JH, Kang YG, Lee JY, Kim JH, Choi JW, Oh TK. 2024. Influences of silicate fertilizers containing different rates of iron slag on CH₄ emission and rice (*Oryza sativa* L.) growth. Korean Journal of Agricultural Science 51:227-238. <https://doi.org/10.7744/kjoas.510213>

Received: February 14, 2024

Revised: May 19, 2024

Accepted: May 22, 2024

Copyright: © 2024 Korean Journal of Agricultural Science



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://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.

Introduction

인위적 활동에 의해 배출되는 온실가스(greenhouse gases, GHGs)의 종류에는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 육불화황(SF₆), 수소불화탄소(HFC_s), 그리고 과불화탄소(PFC_s)가 있다(Fletcher, 2003). 이러한 GHGs의 배출 증가는 기후변화를 야기하는 주된 원인으로 지목되었으며, 이에 따라 국제적으로 온실가스 저감을 위한 노력이 필요하다는 인식이 확산되고 있다(ME, 2023). 특히, 농업부문에서 주로 배출되는 것으로 알려진 CH₄의 단기 온실 효과는 동일한 양의 이산화탄소에 비해 80배 이상에 달한다(GIR, 2019; IPCC, 2021). 대기 중 CH₄의 농도는 매년 꾸준히 증가하고 있으며, 미국 국립해양대기청(NOAA, 2023)에 따르면 2022년 대기 중 CH₄의 농도는 1,911.8 ppb로 산업화 이전(722 ppb)에 비하여 2.5배 이상

증가하였다. 대기로 배출된 CH₄의 60 - 70%는 인위적 발생원에 의한 것으로 조사되었으며, 그 중 벼 재배 과정 중 발생하는 CH₄의 양은 약 5 - 29%로 추정된다(Le Mer and Roger, 2001; Saunio et al., 2020).

벼 재배과정 중 CH₄은 대부분 메탄생성균(methanogens)의 활동에 의해 배출되며, 메탄생성균은 혐기적 조건에서 유기물을 분해하여 CH₄을 생성하는 것으로 알려져 있다(Malyan et al., 2016). 국내에서는 CH₄ 배출량 감축을 위해 무경운 농법, 논물 관리, 유기물시용, 시비관리, 전자수용체 투입 등 다양한 방법을 통한 연구가 활발히 수행되고 있다(Ali et al., 2009a; 2009b; Seo et al., 2011; Lee et al., 2012; Ju et al., 2013; Lim et al., 2013; Cho et al., 2016; Gwon et al., 2018; Lee et al., 2020). 특히, 규산질비료는 벼 재배과정 중 토양에 규소(Si)를 공급해 작물의 생육을 증진시키기 위해 주로 사용되며, CH₄ 배출량 저감에도 효과가 있다고 보고되었다(RDA, 2005; Ali et al., 2009b; Lee et al., 2012). 규산질비료의 주 구성요소인 Si는 자연에서 다른 원소와 결합한 형태로 존재하며, 규산질비료를 논에 시비하는 경우, 벼의 직립성 및 수광성 향상, 도복 방지 등 수량증대와 품질 향상에 영향을 미친다(Kim et al., 2002; Joo and Lee, 2011). 또한, 규산질비료의 시용은 작물의 질소 이용 효율을 증진시켜 질소 비료의 사용량을 저감할 수 있다고 보고된 바 있다(Lee et al., 2005; Han et al., 2014; White et al., 2017; Steiner et al., 2018).

고로슬래그(blast furnace slag, BFS)는 제철소 고로에서 선철을 제조하는 과정에서 발생하는 부산물로, 규산질비료의 원료로 사용된다. 규산질비료에는 4.8 - 5.4%의 철 산화물이 포함되어 있으며, 철은 식물 성장의 필수 미량원소로 엽록소 합성에 중요한 역할을 한다(Rout and Sahoo, 2015; Lim et al., 2022). 또한, 규산질비료의 CH₄ 배출량 저감 효과는 BFS에 포함된 철 산화물에 의한 것으로, 산화 상태의 철(Fe³⁺)은 혐기성 토양에서 메탄생성균과 경쟁적 관계를 가짐으로써 메탄생성균보다 유기물 분해에 먼저 사용되어 CH₄ 배출량을 감소시킬 수 있다고 알려져 있다(Frenzel et al., 1999; Kumaraswamy et al., 2001; Huang et al., 2009; Gwon et al., 2022).

따라서, 본 연구는 CH₄ 배출량 저감과 벼의 생육 증진을 위한 효율적인 규산질비료의 Fe³⁺ 혼합 비율을 찾기 위해 철의 함량을 달리한 규산질비료의 시용이 CH₄ 배출과 벼 생육에 미치는 영향을 평가하였다.

Materials and Methods

Experimental setup

본 연구는 2022년 5월 25일부터 2022년 10월 8일까지 총 137일간 충남대학교 내 시험포장(36°22'04.5"N 127°21'15.1"E)에서 수행되었으며, 시험 품종은 삼광(*Oryza sativa* L. cv. Samkwang)을 사용하였다. 실험이 진행된 시험 포장의 토성은 사양토(sandy loam)로 모래, 미사, 점토 함량이 각각 67.6, 18.0, 그리고 14.4%이었다.

비료 처리는 농촌진흥청 작물별 시비처방기준에 따라 무기질비료(N - P₂O₅ - K₂O)는 요소, 용성인비, 염화칼륨을 이용하여 90 - 45 - 57 kg·ha⁻¹를 처리하였고, 규산질비료는 ha당 1.5 Mg을 처리하였다(NAAS, 2010b). 실험에 사용된 규산질비료는 규산질비료(silicate fertilizer)와 산화철(Fe₂O₃)의 영문명 첫 자를 따 산화철의 함량(0.0, 2.5, 5.0%)에 따라 각각 SF 0.0, SF 2.5, SF 5.0으로 명명하였다. 처리구는 규산질비료를 처리하지 않은 무처리구(control)를 포함하여 제조한 규산질비료(SF 0.0, SF 2.5, SF 5.0)에 따라 총 4개의 처리구로 구성하였다. 그중 SF 0.0 규산질비료를 처리한 처리구를 SF 0.0%으로 분류하였고, SF 2.5와 SF 5.0 규산질비료를 처리한 처리구를 각각 SF 2.5%와 SF 5.0%로 분류하였다. 실험에 사용한 규산질비료를 분석한 결과는 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Chemical properties of silicate fertilizer used in this experiment.

Samples	pH	Av. Si	T-P	K ₂ O	CaO	MgO
	(1 : 10, H ₂ O)	(mg·kg ⁻¹)			(%)	
SF 0.0	10.37 ± 0.03a	16.74 ± 0.00a	0.42 ± 0.08a	0.08 ± 0.03a	9.59 ± 1.43b	1.26 ± 0.47b
SF 2.5	10.83 ± 0.05a	17.35 ± 0.01a	0.20 ± 0.03b	0.09 ± 0.02a	11.15 ± 0.96a	1.49 ± 0.09a
SF 5.0	10.22 ± 0.03a	15.50 ± 0.01a	0.14 ± 0.02b	0.09 ± 0.01a	11.78 ± 0.92a	1.44 ± 0.15a

SF x.x%, silicate fertilizer containing iron slag x.x%; Av. SiO₂, available silicic acid; T-P₂O₅, total phosphate.

a, b: Mean separation within columns by Duncan's multiple range test, $p < 0.05$.

Analysis of soil and fertilizer

실험에 사용된 토양의 pH는 Benchtop Meter with pH (ORION™ Versa Star Pro™, Thermo Scientific Inc., Waltham, USA)를 이용하여 시료와 증류수를 1 : 5 (w·v⁻¹)의 비율로 혼합하여 측정하였다. 유효 인산(available phosphorus, Av. P₂O₅) 함량은 Lancaster법을 이용하여 분석하였으며, UV/Vis-spectrophotometer (GENESYS 50, Thermo Scientific Inc., Waltham, USA)로 720 nm에서 비색정량하였다. 유효 규산(available silicic acid, Av. SiO₂)은 pH 4.0으로 교정한 1 M NaOAc로 침출하여 UV/Vis-spectrophotometer로 700 nm에서 비색정량하였다. 토양 내 총 탄소 함량(total carbon content, T-C)과 총 질소 함량(total nitrogen content, T-N)은 CHN Analyzer (TruSpec Micro, Leco, USA)를 이용하여 측정하였다. 치환성 양이온(Exchangeable cation, Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺)은 pH 7.0으로 교정한 1 M ammonium acetate (NH₄OAc)로 침출한 용액을 ICP-OES (ICAP 7000series ICP spectrometer, Thermo Scientific Inc., Waltham, USA)를 이용하여 분석하였다.

규산질비료의 pH는 Benchtop Meter with pH를 이용하여 비료와 증류수를 1 : 10 (w·v⁻¹)의 비율로 혼합하여 1시간 동안 방치시킨 후 측정하였다. T-P₂O₅은 Nitric acid와 Perchlorid-Nitric acid를 이용하여 분해한 시료를 이용하여 470 nm에서 UV/Vis-spectrophotometer로 분석하였다. Av. SiO₂와 inorganic matter (CaO, K₂O, MgO) 함량은 시료를 황산과 질산을 이용하여 분해한 후 ICP-OES로 분석하였으며, 무기조성의 경우 규산질비료 내 원소 함량을 ICP-OES로 분석한 후 화학식으로 화합물의 양을 계산하였다.

Analysis of plant growth

규산질비료 처리에 따른 작물의 수량성 변화를 비교하기 위해 이앙 후 137일째에 작물을 수확하여 농촌진흥청 농업과학기술 연구조사분석기준(RDA, 2012)에 따라 초장(plant height), 분얼 수(number of tillers), 볏짚 무게(straw yield)를 처리구당 10주씩 3반복으로 분석하였다. 초장은 지면에서부터 잎 끝의 길이를 측정하였으며, 분얼 수는 완전히 전개된 것을 조사하였다. 볏짚은 건조 전 무게를 측정한 후 온실에서 풍건하여 볏짚의 건조 중량을 측정하였다. 천립중(1,000-grains weight)과 등숙률(percentage of filled grains)은 농촌진흥청 농업과학기술 연구조사분석기준(RDA, 2012)에 따라 분얼 수 측정 후 알곡을 분리 건조하여 분석하였고, 뿌리 무게(root biomass)는 토양과 잔물을 충분히 제거해준 후 건조하여 측정하였다.

CH₄ volatilization

벼 재배 기간 중 CH₄ 배출량은 시험 기간 중 매주 금요일과 우천 후 다음 날에 하루 CH₄ 배출량 평균 시간인 오전 10시 - 오후 12시에 간이폐쇄정태 챔버(W 60 × D 60 × H 120 cm)를 이용하여 CH₄ 시료를 포집하였다(Adhya et al., 1994; Kim et al., 2013). 챔버는 처리구당 3개씩 설치하였으며, 내부에 공기를 혼합하기 위해 소형 팬을 설치하여

시료의 균질성을 확보하였고, 폐쇄 후 30분간 발생한 CH₄를 60 mL 주사기를 이용하여 포집하였다. 또한, 포집 과정에서 CH₄ 배출에 영향을 미칠 수 있는 환경적 요인(기온, 수온, 지온, 챔버 내 온도)은 온도계를 이용하여 처리구당 3반씩 측정하였으며(Fig. 1), 산화환원전위(oxidation-reduction potential, Eh)는 백금 전극과 Eh meter (Eutech™ pH 6+ pH Meter, Thermo Scientific Inc., Waltham, Massachusetts, USA)를 이용하여 측정하였다(Fig. 2). 채취한 CH₄ 시료는 Gas Chromatography - Flame Ionization Detector (GC-FID, The Agilent 7890A Gas Chromatograph, Agilent Technologies, USA)를 이용하여 분석하였다. CH₄ 배출량을 계산한 계산식은 다음과 같다.

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

F, CH₄ 배출량(mg·m⁻²·h⁻¹); ρ, CH₄ 밀도(0.717 mg·cm⁻³); A, 챔버 내 면적(m²); V, 챔버 내 부피(m³); Δc/Δt, CH₄ 농도 증가율(ppmv); T, 챔버 내 온도(°C)

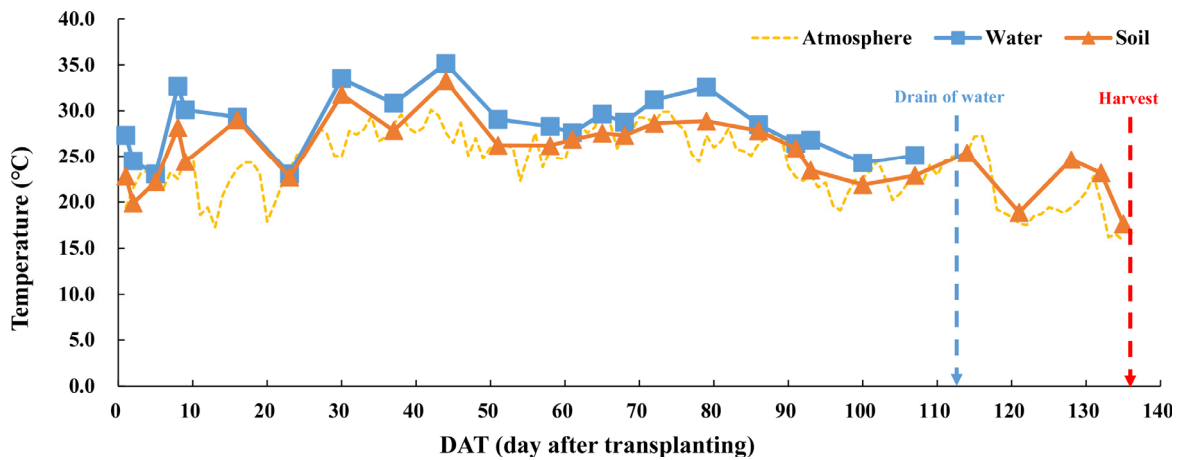


Fig. 1. Change in environmental factors during the cultivation period.

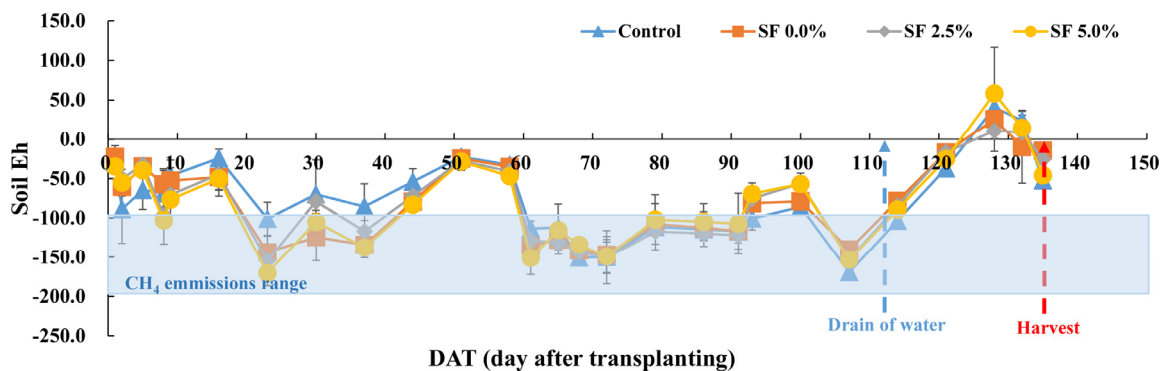


Fig. 2. Change in soil Eh value during the cultivation period. Eh, oxidation-reduction potential; SF x.x%, silicate fertilizer containing iron slag x.x%.

Statistical analysis

본 연구에서 제시한 토양화학성, 생육 조사, CH₄ 배출량 결과값은 3반복하여 나온 값을 모두 평균값으로 계산하여 나타내었다. 처리구 사이의 통계적 유의차는 SPSS (IBM SPSS Statistics version 26, USA) 일원배치분산분석

(one way analysis of variance, ANOVA)을 통해 95% 신뢰수준(p)에서 통계 분석을 수행하였으며, 사후 분석으로 Duncan의 multiple range test를 수행하였다.

Results and Discussion

Soil chemical properties

규산질비료 처리에 따른 토양의 화학적 특성 변화를 분석한 결과는 Table 2에 나타냈다. 실험 후 토양의 pH는 규산질비료를 처리한 모든 처리구(SF 0.0%, SF 2.5%, SF 5.0%)에서 규산질비료의 높은 pH에 의해 실험 전 토양의 pH 5.93에 비해 각각 pH 6.89, 6.75, 6.65로 증가하였으며, 특히 SF 0.0% 처리구에서 가장 높게 증가하였다. 토양 Av. P₂O₅ 함량은 모든 처리구에서 무기질비료(용성인비, 45 kg P₂O₅·ha⁻¹) 시용으로 인해 증가하였다. 예외적으로, 무처리구에서는 65.40 mg·kg⁻¹으로 실험 전 토양(63.35 mg·kg⁻¹)과 통계적 유의차를 보이지 않았으며, 규산질비료 처리구에서는 SF 2.5% 처리구에서 93.95 mg·kg⁻¹로 가장 높게 증가하였다. Av. SiO₂ 함량은 Av. P₂O₅ 함량과 유사한 경향을 나타내어 무처리구를 제외한 모든 처리구에서 실험 전 토양보다 높게 증가하였다. 그 중에서도, SF 0.0% 처리구에서 Av. SiO₂ 함량이 실험 전 토양의 154.61 mg·kg⁻¹에 비해 270.09 mg·kg⁻¹으로 1.75배 증가하였다. 토양 내 T-C 함량은 벼 재배를 통해 CH₄이 배출됨에 따라 실험 전 토양의 1.09%에 비해 모든 처리구에서 감소하였다. 그러나, 0.61%로 가장 낮게 감소한 SF 0.0% 처리구에 비해 산화철이 포함된 SF 2.5%, SF 5.0% 처리구에서 각각 0.73, 0.93%로 감소폭이 줄어드는 모습을 나타냈다. 토양 내 T-N 함량은 실험 전과 후 토양 사이에서 통계적 유의차를 나타내지 않았다. 치환성 양이온의 경우 실험 전 토양의 치환성 K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺은 각각 0.13, 3.19, 0.45 cmol_c·kg⁻¹으로 나타났으며, 실험 후 토양의 치환성 양이온은 모든 처리구에서 증가하였다. 치환성 K⁺은 실험 전 토양의 0.13 cmol_c·kg⁻¹에 비해 무처리구, SF 5.0% 처리구에서 0.24 cmol_c·kg⁻¹로 1.8배 증가해 논 토양 치환성 K⁺ 적정 수준(치환성 K⁺: 0.2 - 0.3 cmol_c·kg⁻¹)에 도달했다(NAAS, 2010a). SF 2.5% 처리구에서 치환성 Ca²⁺은 4.09 cmol_c·kg⁻¹로 1.3배 증가하였지만 통계적 유의차는 없었으며, 치환성 Mg²⁺은 0.63 cmol_c·kg⁻¹로 1.4배 증가하였다. 추가적으로, 치환성 K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ 모두 무처리구와 규산질비료 처리구(SF 0.0%, SF 2.5%, SF 5.0%) 간의 통계적 유의차는 나타나지 않았다.

Table 2. Chemical properties of the soil used in this experiment and the soil after harvest.

Treatments	pH (1 : 5, H ₂ O)	Av. P ₂ O ₅ (mg·kg ⁻¹)	Av. SiO ₂ (mg·kg ⁻¹)	Elemental contents		Exchangeable cations		
				T-C	T-N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
				(%)		(cmol _c ·kg ⁻¹)		
Initial soil	5.93 ± 0.24b	63.35 ± 5.49c	154.61 ± 45.06b	1.09 ± 0.02a	0.17 ± 0.01a	0.13 ± 0.03b	3.19 ± 0.83a	0.45 ± 0.11b
Control	5.65 ± 0.11b	65.40 ± 3.79c	74.12 ± 3.89c	0.74 ± 0.07c	0.14 ± 0.00b	0.24 ± 0.06a	3.45 ± 0.16a	0.51 ± 0.01ab
SF 0.0%	6.89 ± 0.05a	80.88 ± 2.66b	270.09 ± 4.36a	0.61 ± 0.02d	0.15 ± 0.00ab	0.20 ± 0.00a	3.97 ± 0.19a	0.60 ± 0.01ab
SF 2.5%	6.75 ± 0.04a	93.95 ± 7.11a	255.23 ± 7.53a	0.73 ± 0.06c	0.14 ± 0.00b	0.23 ± 0.00a	4.09 ± 0.11a	0.63 ± 0.01a
SF 5.0%	6.65 ± 0.03a	89.24 ± 1.42a	227.72 ± 7.53a	0.93 ± 0.00b	0.16 ± 0.00ab	0.24 ± 0.00a	3.84 ± 0.12a	0.57 ± 0.02ab
Optimum range	5.50 - 6.50	80.00 - 120.00	157.00 ≤	-	-	0.20 - 0.30	5.00 - 6.00	1.50 - 2.00

SF x.x%, silicate fertilizer containing iron slag x.x%; Av. P₂O₅, available phosphorus; Av. SiO₂, available silicic acid; T-C, total carbon content; T-N, total nitrogen content.

a - d: Mean separation within columns by Duncan's multiple range test, p < 0.05.

본 연구에 사용한 규산질비료의 pH는 비료의 종류(SF 0.0, SF 2.5, SF 5.0)에 따라 각각 pH 10.37, 10.83, 10.22로, 규산질비료의 높은 pH에 의한 토양 pH 증가는 많은 선행연구에서 보고된 바 있다(Cho et al., 2004; Lee et al., 2005; Ali et al., 2008a; Joo and Lee, 2011; Kim et al., 2016). 이러한 규산질비료 처리 효과는 주로 산성토양 조건에서 평가

되었으며, 본 연구에서도 실험 전 토양 pH가 5.93으로 선행연구와 유사한 산성토양 조건에서 수행되어 유사한 경향을 나타내었다(Cho et al., 2004; Joo and Lee, 2011).

규산질비료 처리는 시험 토양의 Av. P₂O₅과 Av. SiO₂ 함량을 논 토양 화학성 적정 수준(Av. P₂O₅: 80 - 120 mg·kg⁻¹, Av. SiO₂: ≥ 157 mg·kg⁻¹)까지 높여주었다(NAAS, 2010a). 논 토양에서 벼 재배 중 Si 처리는 토양 내 인산의 가용성, 식물 뿌리의 인산 흡수, 식물 조직 내 인산의 이용성을 개선하여 식물의 인산 영양에 영향을 미친다고 하였다(Etesami and Schaller, 2023). 따라서, 본 연구에서도 규산질비료를 처리한 SF 0.0%, SF 2.5%, SF 5.0% 처리구에서 실험 전 토양 및 무처리구보다 유의하게 Av. P₂O₅ 함량이 증가하여 선행연구와 유사한 결과를 나타내었다.

토양 내 T-C 함량은 토양 pH 증가의 영향을 받으며, Amoakwah 등(2023)은 토양 pH와 토양 내 탄소 함량 사이의 상관관계를 분석하였다. 본 연구에서 SF 0.0% 처리구는 무처리구보다 토양 pH가 증가함에 따라 T-C 함량이 감소하였으며, 이는 선행연구에서 보고된 토양 pH 증가에 따른 용존 유기물 용해도 증가에 기인한 것으로 판단된다(Amoakwah et al., 2023). 또한, Yin 등(2021)의 논 토양에서 Fe와 C 배출 사이의 관계를 분석한 연구 결과에 따르면, 토양 Fe³⁺ 농도와 토양 C 배출량 사이에 음의 상관관계가 있다고 보고하였다. 이에 따라, 본 연구에서 SF 2.5%, SF 5.0% 처리구에서 Fe³⁺ 처리량이 증가함에 따라 토양 C 배출량은 감소하여 토양 내 T-C 함량이 증가한 것으로 판단된다.

토양 내 투입된 Si는 N을 흡착하여 작물이 이용 가능한 형태로 유지시키고, 작물의 질소 이용 효율을 높여준다고 선행연구에서 보고된 바 있다(Matichenkov and Bocharnikova, 2001; Lee et al., 2005). 하지만, Negasa 등(2023)은 규산질비료가 토양 특성 개선과 작물의 생육 증진에 보충적인 역할을 하되, 질소를 대체할 수는 없다고 보고하였다. 본 연구에서는 모든 처리구에 동일하게 무기질비료(요소, 90 kg·N·ha⁻¹)를 시비하였으며, 실험 전·후 토양의 T-N 함량이 통계적 유의차가 없는 것은 규산질비료의 처리가 토양 내 질소 함량에 영향을 미치지 않았기 때문으로 판단된다.

실험 후 토양의 치환성 K⁺, Mg²⁺은 무기질비료 중 염화칼륨(57 kg·K₂O·ha⁻¹)과 용성인비(45 kg·P₂O₅·ha⁻¹)에 포함된 Mg 성분에 의해 증가한 것으로 판단된다. 또한, 치환성 양이온은 규산질비료 내 성분 함량에 영향을 받으며, 규산질비료에 함유되어 있는 양이온이 토양 용액 내로 용해됨에 따라 치환성 양이온 함량도 증가한다고 보고된 바 있다(Lee et al., 2023; Joo and Lee, 2011; Ahn et al., 2014). 하지만 본 연구에서 무기질비료만을 처리한 무처리구와 규산질비료 처리구(SF 0.0%, SF 2.5%, SF 5.0%)간의 치환성 양이온 함량은 통계적 유의차를 나타내지 않았다. 규산질비료 시용에 관한 선행연구에서 사용된 규산질비료의 CaO 함량은 약 40 - 50% 였으며, 이에 따라 실험 후 토양의 치환성 Ca²⁺ 함량이 1.2 - 1.5배 증가하여 통계적 유의차를 나타낸 바 있다(Ali et al., 2008a; 2009b; Joo and Lee, 2011; Galgo et al., 2022; 2024). 본 연구에서 Table 1에 제시한 규산질비료의 양이온 3종(K₂O, CaO, MgO)의 함량은 각각 0.08 - 0.09, 9.59 - 11.78, 1.26 - 1.49%로, CaO의 경우 선행연구와 비교해 약 4배 낮은 수준이며, K₂O와 MgO 또한 낮은 함량을 보이고 있다. 따라서, 무처리구와 규산질비료 처리구 간의 치환성 양이온 함량 차이의 통계적 유의차가 없는 것은 본 연구에서 사용된 규산질비료의 양이온 함량이 치환성 양이온 함량 변화에 영향을 미치지 않은 수준이었기 때문으로 판단된다.

Plant growth

작물의 생육 차이를 비교하기 위해 수행한 생육 조사의 결과는 Table 3에 나타내었다. 벼의 초장은 SF 5.0% 처리구에서 106.13 cm로 가장 높게 나타났으며, SF 0.0% 처리구에서 102.90 cm로 가장 낮았다. 분얼 수는 SF 2.5% 처리구와 SF 5.0% 처리구에서 15.63개로 가장 많았지만, 다른 처리구와 비교 시 통계적 유의차를 나타내지 않았다. 벼짚의 건조 중량은 SF 0.0% 처리구와 SF 5.0% 처리구에서 8.23 Mg·ha⁻¹로 가장 높은 값을 나타냈으며, 규산질비료를 처리한 처리구는 무처리구의 7.34 Mg·ha⁻¹에 비해 모두 증가하였다. 천립중은 SF 0.0% 처리구에서 24.42 g으로가

장 높았고, 24.05 (SF 2.5%), 23.54 (SF 5.0%), 23.06 g (control) 순으로 무처리구에서 가장 낮은 값을 나타냈다. 등숙률의 경우 SF 5.0% 처리구에서 92.57%로 가장 높았지만 SF 2.5% 처리구와는 통계적 유의차를 나타내지 않았다. 뿌리 무게의 경우 규산질비료 처리구 모두 무처리구에 비해 20%가량 증가하는 모습을 보였지만 통계적 유의차를 나타내지 않았다. 알곡 생산량은 규산질비료 처리구가 모두 무처리구의 6.49 Mg·ha⁻¹에 비해 SF 5.0% 처리구에서 최대 29% 증가하여 8.40 Mg·ha⁻¹로 가장 높았다.

철강슬래그를 토양에 사용한 선행 연구에서 철강슬래그의 투입은 작물의 성장을 향상시키고, 작물 성장에 이용 가능한 Fe이 토양에서 증가한다고 하였다(Wang and Cai, 2006; Negim et al., 2010). 위 결과는 Zhang 등(2020)의 연구에서 그 원인을 분석하였으며, 철강슬래그에는 작물 성장에 중요한 요소인 Ca, Mg, Fe가 풍부하게 함유되어 있기 때문에 토양에 철강슬래그의 처리가 Ca, Mg, Fe가 부족한 토양을 개량하여 작물 성장을 향상시켰다고 보고하였다. 또한, 본 연구와 유사한 조건에서 연구를 수행한 Galgo 등(2022)은 철 부산물을 2.5% 포함한 규산질비료를 처리하였을 때 알곡생산량이 높게 증가했다고 보고하였다. 본 연구에서도 철의 비율이 높아짐(0.0 → 5.0%)에 따라 규산질비료의 CaO, MgO의 함량이 증가하였으며, 이에 따라 토양 특성의 개선과 함께 벼의 생육이 증가했다고 판단된다.

Table 3. Growth parameters of rice treated by silicate fertilizers.

Treatments	Plant height (cm)	Number of tillers (ea·plant ⁻¹)	Straw yield (Mg·ha ⁻¹)	1,000-grains weight (g)	Percentage of filled grains (%)	Root biomass (Mg·ha ⁻¹)	Rice yield (Mg·ha ⁻¹)
Control	105.23 ± 3.36ab	15.47 ± 0.67a	7.34 ± 0.04a	23.06 ± 0.19c	83.37 ± 5.25c	4.07 ± 2.10a	6.49 ± 0.37c
SF 0.0%	102.90 ± 2.02b	15.63 ± 0.75a	8.23 ± 0.03a	24.42 ± 0.63a	89.20 ± 0.53b	4.79 ± 3.78a	7.88 ± 0.41b
SF 2.5%	104.73 ± 2.29ab	14.77 ± 0.75a	7.71 ± 0.03a	24.05 ± 0.17ab	90.83 ± 1.67ab	4.90 ± 2.54a	7.41 ± 0.71bc
SF 5.0%	106.13 ± 2.37a	15.63 ± 1.03a	8.23 ± 0.04a	23.54 ± 0.08bc	92.57 ± 1.53a	4.85 ± 2.59a	8.40 ± 1.07a

SF x.x%, silicate fertilizer containing iron slag x.x%.

a - c: Mean separation within columns by Duncan's multiple range test, $p < 0.05$.

CH₄ volatilization

Fig. 3은 재배 기간 중 규산질비료 처리에 따른 CH₄ 배출 경향을 나타냈다. 재배 기간 중 CH₄ 배출량은 이양 후 9일째(9 days after transplanting, DAT 9)부터 CH₄ 배출이 점진적으로 증가하였으며, DAT 91에 일일 최대 CH₄ 배출량을 나타냈다. 특히, 무처리구에서는 CH₄ 배출량(66.22 mg·m⁻²·h⁻¹)이 가장 높았으며, 규산질비료 처리 시 CH₄ 배출은 각각 59.52 (SF 0.0%), 57.42 (SF 2.5%), 56.76 mg·m⁻²·h⁻¹ (SF 5.0%)로 감소하였다. 또한, 일일 CH₄ 배출이 점차 증가함에 따라 토양 Eh는 -100 ~ -150 mV의 범위를 나타냈다(Fig. 2 and 3). DAT 91 이후, 모든 처리구의 CH₄ 배출량이 급격하게 감소하여 DAT 100에는 모든 처리구가 무처리구와 유사한 경향을 나타냈다.

본 연구에서의 CH₄ 배출 감축 경향은 다양한 쌀 재배 국가(한국, 일본, 중국 등)에서 규산질비료를 활용하여 논에서 CH₄ 배출 감축을 실험을 진행한 선행 연구와 유사한 결과를 나타냈다(Das et al., 2022). 일반적으로, 토양의 Eh값은 논과 같은 혐기적 환경이 발달하면 점차 감소하며, 토양의 산화환원전위가 -100 ~ -200 mV의 범위에서 CH₄이 발생한다(Yagi and Minami, 1990; Wang et al., 1993; Dubey, 2005; Ali et al., 2009a). Ali 등(2008b)의 연구에서 토양 Eh 값이 CH₄을 발생시킬 수 있는 범위에 있어도 성숙기에서 최소 수준으로 떨어졌는데, 이는 침수 논 토양에서 벼의 성장과 생리학적 매개변수가 CH₄ 배출에 중요한 역할을 한다고 보고하였다. 이는 벼의 생육단계가 CH₄ 배출에 영향을 미치는 것과 연관이 있으며, 본 연구에서 CH₄ 배출의 감소는 벼의 출수(이양 후 80 - 90일경) 이후에는 광합성량 감소, CH₄ 생성에 필요한 동화산물의 가용도 감소로 CH₄ 배출이 감소하는 경향을 나타내는 것과 일치한다(Sinha, 1995).

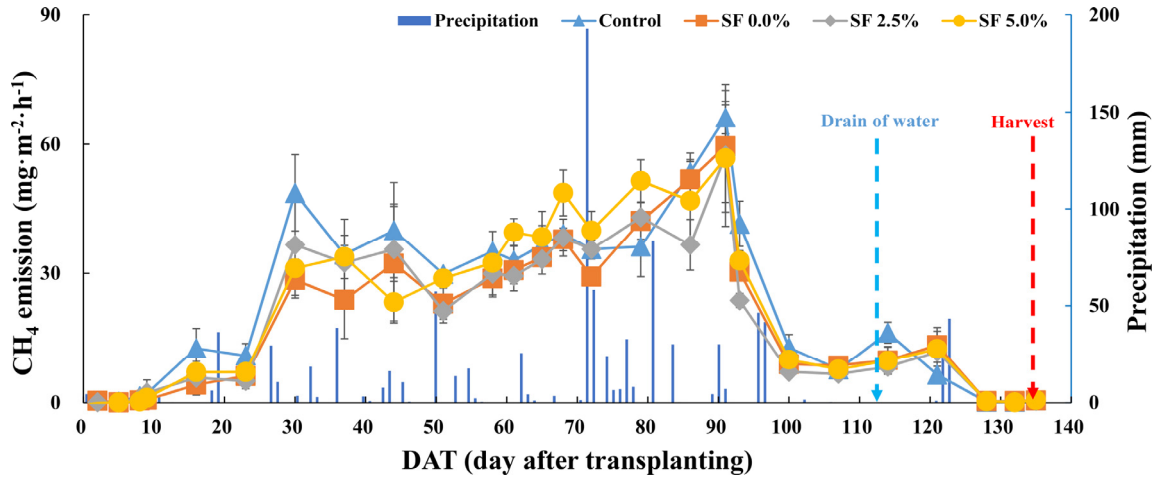


Fig. 3. Daily CH₄ emission change during the cultivation period. SF x.x%, silicate fertilizer containing iron slag x.x%.

벼 재배 기간 중 총 배출된 CH₄는 재배 기간 중 배출된 CH₄를 모두 합하여 계산하였다. 총 CH₄ 배출량은 처리구 (control, SF 0.0%, SF 2.5%, SF 5.0%)에 따라 각각 79.23, 65.68, 65.79, 72.63 g·m⁻²이었다(Fig. 4). 또한, 무처리구에서 배출된 CH₄의 양을 100%로 가정하였을 때, 산화철을 포함한 규산질비료 처리구는 각각 17% (SF 0.0%), 17% (SF 2.5%), 8% (SF 5.0%) CH₄이 낮게 배출되었다. Ali 등(2009a)은 벼 재배 중 철의 투입은 메탄생성균의 활성을 감소시켜 전자수용체 역할을 함으로써 벼 재배 기간 동안 CH₄ 배출을 억제할 수 있다고 보고하였다. 또한, 철 부산물을 이용한 CH₄ 배출 감축 연구를 진행한 Galgo 등(2022)은 철 부산물을 0.0%와 2.5% 포함한 규산질비료를 처리하였을 때, 규산질비료를 처리하지 않은 처리구보다 CH₄ 배출량이 각각 20, 30% 감소하였으나, 철 부산물의 함량이 2.5% 이상으로 증가하였을 때에는 더이상 감소하지 않는다고 보고하였다. 본 연구에서도 선행 연구와 유사하게 철

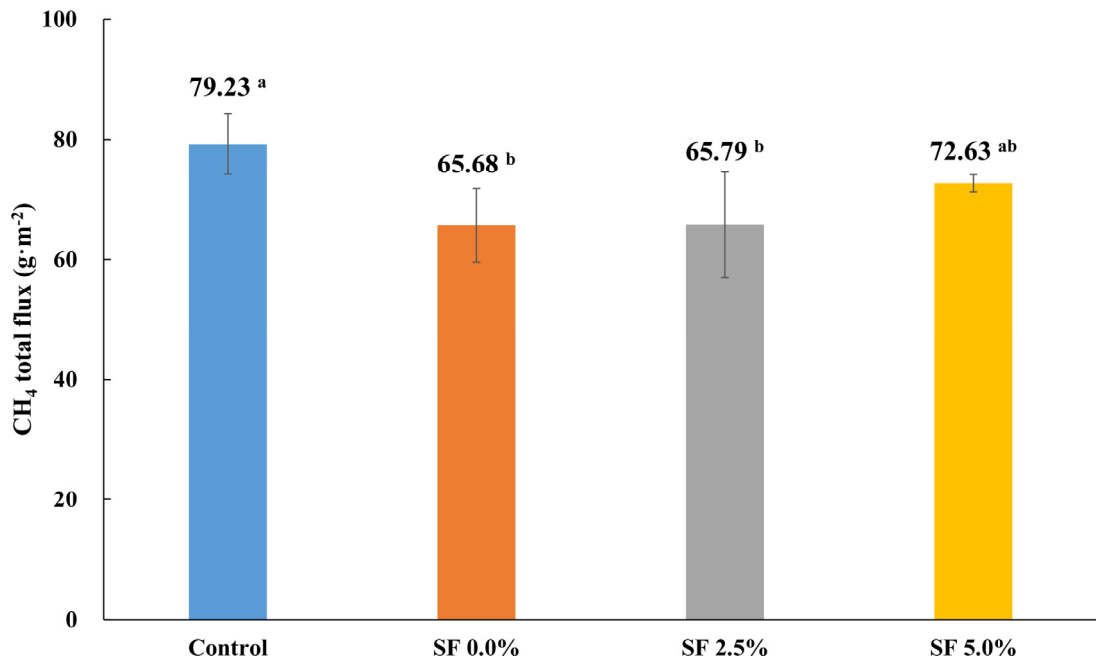


Fig. 4. Total CH₄ emission during the cultivation period. SF x.x%, silicate fertilizer containing iron slag x.x%. a, b: Mean separation within columns by Duncan's multiple range test, p < 0.05.

의 투입을 통해 CH₄ 배출량이 감소하였으며, SF 5.0% 처리구의 CH₄ 배출량에 비해 SF 0.0%와 SF 2.5% 처리구의 CH₄ 배출량이 더 낮게 분석되었다. 철 부산물의 함량이 2.5% 이상으로 올랐을 때의 CH₄ 배출 저감 효과가 증가하지 않은 것은 Fe³⁺와 같은 각 전자수용체가 고유한 수용성을 가지며, 토양 온도, 담수 상태 논의 물의 양, 뿌리 삼출물 등에 따른 철 부산물의 용해도에 따라 CH₄ 생성 억제를 제한할 수 있다고 하였다(Galgo et al., 2022). 이와 같은 여러 요인에 의한 CH₄ 배출량 변화에 관한 기여도는 더 정량적으로 조사되어야 한다고 사료된다.

벼 재배기간동안 총 CH₄ 배출량과 알곡생산량의 처리구에 따른 경향을 Fig. 5에 나타내었다. 알곡생산량의 경우 규산질비료의 처리와 철의 투입에 따라 천립중, 등숙률이 증가하면서 알곡생산량이 증가하는 경향을 보였다. 반면, 총 CH₄ 배출량의 경우, 무처리구에서 SF 2.5% 처리구까지 규산질비료의 처리와 철의 투입에 따라 CH₄ 배출이 감소하는 경향을 보였지만, SF 5.0% 처리구까지 철의 투입량이 더 증가할수록 CH₄ 배출 저감효과는 감소하는 경향을 보였다.

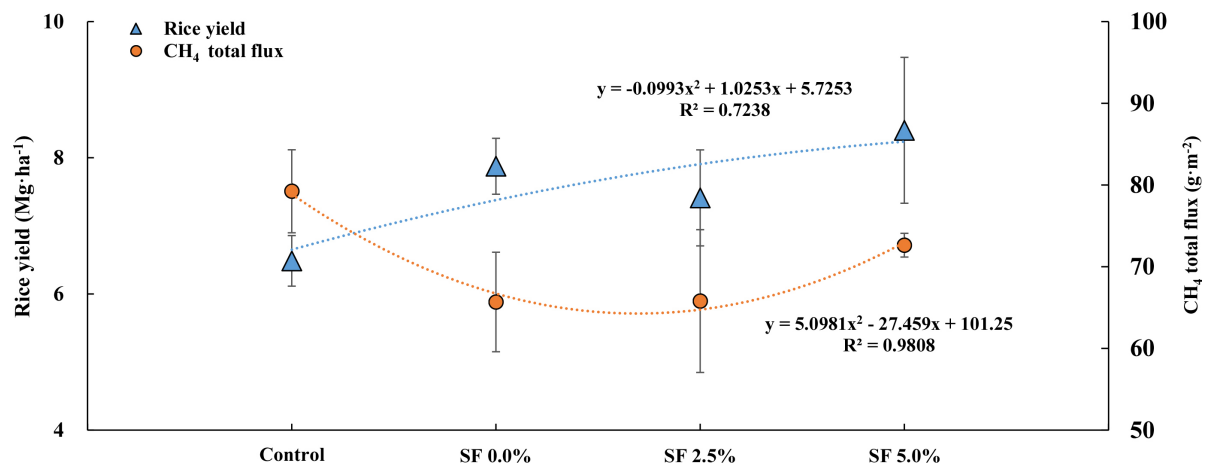


Fig. 5. CH₄ total flux and rice yield during the cultivation period. SF x.x%, silicate fertilizer containing iron slag x.x%.

Conclusion

본 연구는 벼 재배 시 산화철의 함량을 달리한 규산질비료 시용이 CH₄ 배출과 벼 생육에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 벼의 생육조사 결과, 산화철을 5.0% 포함한 규산질비료의 시용은 알곡 생산량을 최대 29%까지 증가시켰으며, 이는 토양의 pH, 유효 인산(Av. P₂O₅) 함량, 유효 규산(Av. SiO₂) 함량, 치환성 양이온 함량과 같은 토양 특성이 개선된 효과로 보인다. 처리구에 따른 CH₄ 배출량은 이앙 후 9일 이후에 차츰 증가하는 경향을 보였으며, 91 일차에 최고 배출량을 나타냈다. 100 일차 이후 CH₄ 배출은 초기 수준으로 감소하며 처리구간 큰 차이를 나타내지 않았다. 재배 기간 중 총 배출된 CH₄의 양은 무처리구에서 79.23 g·m⁻²로 가장 높았으며, SF 0.0% 처리구와 SF 2.5% 처리구에서는 각각 65.68 g·m⁻²와 65.79 g·m⁻²로 두 처리구 모두 무처리구 대비 약 17% 낮게 배출되었다. SF 5.0% 처리구에서는 72.63 g·m⁻²로 무처리구 대비 약 8% 낮게 배출되었다. 결과적으로, CH₄ 총 배출량과 알곡생산량의 경향을 나타낸 그래프(Fig. 5)에 따라 산화철을 2.5% 포함한 규산질비료를 처리하는 것이 CH₄ 배출 저감과 벼의 생육 증진 모두에 가장 효과적인 것으로 나타났다. 하지만, 해당 규산질비료를 제조할 때의 효율성과 CH₄ 배출 저감과 더불어 생산성 향상의 경제적 측면까지 고려하였을 때, 산화철을 2.5 - 5.0%의 범위까지 혼합하는 것이 가장 효율적일 것이라고 판단되며, 철의 CH₄ 배출 저감에 관한 작물기작과 철 함량에 따른 규산질비료의 적용에 관한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

Conflict of Interests

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

- Adhya TK, Rath AK, Gupta PK, Rao VR, Das SN, Parida KM, Parashar DC, Sethunathan N. 1994. Methane emission from flooded rice fields under irrigated conditions. *Biology and Fertility of Soils* 18:245-248.
- Ahn BK, Han SG, Kim JY, Kim KC, Ko DY, Jeong SS, Lee JH. 2014. Influences of silicate fertilizer application on soil properties and red pepper productivity in plastic film house. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 33: 254-261. [in Korean]
- Ali MA, Lee CH, Kim SY, Kim PJ. 2009a. Effect of industrial by-products containing electron acceptors on mitigating methane emission during rice cultivation. *Waste Management* 29:2759-2764.
- Ali MA, Lee CH, Lee YB, Kim PJ. 2009b. Silicate fertilization in no-tillage rice farming for mitigation of methane emission and increasing rice productivity. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 132:16-22.
- Ali MA, Oh JH, Kim PJ. 2008a. Effect of silicate fertilizer on reducing methane emission during rice cultivation. *Biology and Fertility of Soils* 44:597-604.
- Ali MA, Oh JH, Kim PJ. 2008b. Evaluation of silicate iron slag amendment on reducing methane emission from flood water rice farming. *Agriculture, Ecosystem & Environment* 128:21-26.
- Amoakwah M, Shim JH, Kim SH, Lee YH, Kwon SK, Jeon SH, Park SJ. 2023. Impact of silicate and lime application on soil fertility and temporal changes in soil properties and carbon stocks in a temperate ecosystem. *Geoderma* 433:116431.
- Cho HJ, Chung JB, Choi HY, Lee YW, Lee YJ. 2004. Availability of silicate fertilizer and its effect on soil pH in upland soil. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 23:104-110. [in Korean]
- Cho HS, Seo MC, Kim JH, Sang WG, Shin P, Lee GH. 2016. Effect of soil texture and tillage method on rice yield and methane emission during rice cultivation in paddy soil. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 49:564-571. [in Korean]
- Das S, Galgo SJ, Alam MA, Lee JG, Hwang HY, Lee CH, Kim PJ. 2022. Recycling of ferrous slag in agriculture: Potentials and challenges. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 52:1247-1281.
- Dubey S. 2005. Microbial ecology of methane emission in rice agroecosystem: A review. *Applied Ecology and Environmental Research* 3:1-27.
- Etesami H, Schaller J. 2023. Improving phosphorus availability to rice through silicon management in paddy soils: A review of the role of silicate-solubilizing bacteria. *Rhizosphere* 27:100749.
- Fletcher SR. 2003. Global climate change: The Kyoto protocol. Library of Congress. Congressional Research Service, Washington, D.C., USA.
- Frenzel P, Bosse U, Janssen PH. 1999. Rice roots and methanogenesis in a paddy soil: Ferric iron as an alternative electron acceptor in the rooted soil. *Soil Biology and Biochemistry* 31:421-430.
- Galgo SJC, Estrada LJB, Canatoy RC, Song HJ, Turner BL, Kim PJ. 2024. Increase of soil organic carbon stock by iron slag-based silicate fertilizer application in paddy soils. *Agriculture, Ecosystem & Environment* 365:108924.
- Galgo SJC, Lim JY, Canatoy RC, Ha JS, Sohn KM, Kim PJ. 2022. Improving methane mitigating functionality of blast furnace slag by adding electron acceptor. *Science of The Total Environment* 845:157296.
- GIR (Greenhouse Gas Inventory and Research Center). 2019. National greenhouse gas inventory report of Korea. GIR, Cheongju, Korea.
- Gwon HS, Choi EJ, Lee SI, Lee HS, Lee JM, Kang SS. 2022. Research review of methane emissions from Korean rice paddies. *Journal of Climate Change Research* 13:117-134. [in Korean]
- Gwon HS, Khan MI, Alam MA, Das SB, Kim PJ. 2018. Environmental risk assessment of steel-making slags and the potential use of LD slag in mitigating methane emissions and the grain arsenic level in rice (*Oryza sativa* L.).

- Journal of Hazardous Materials 353:236-243.
- Han JJ, Lee KS, Park YB, Bae EJ. 2014. Effect of growth and nitrogen use efficiency by application of mixed silicate and nitrogen fertilizer on zoysiagrass cultivation. *Weed & Turfgrass Science* 3:137-142. [in Korean]
- Huang B, Yu K, Gambrell RP. 2009. Effects of ferric iron reduction and regeneration on nitrous oxide and methane emissions in a rice soil. *Chemosphere* 74:481-486.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2021. *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Joo JH, Lee SB. 2011. Assessment of silicate fertilizers application affecting soil properties in paddy field. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 44:1016-1022. [in Korean]
- Ju OJ, Won TJ, Cho GG, Choi BR, Seo JS, Park IT, Kim GY. 2013. New estimates of CH₄ emission scaling factors by amount of rice straw applied from Korea paddy fields. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 32:179-184. [in Korean]
- Kim CB, Lee DH, Choi J. 2002. Effects of soil improvement on the dependence of rice nutrient contents and grain quality. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 35:296-305. [in Korean]
- Kim GY, Jeong HC, Ju OJ, Kim HK, Park JH, Gwon HS, Kim PJ. 2013. Establishment of baseline emission factor of methane in Korean rice paddy soil. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 32:359-365 [in Korean]
- Kim MS, Park SJ, Lee CH, Ko BG, Yun SG. 2016. Long-term application effect of silicate fertilizer on soil silicate storage and rice yield. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 49:819-825. [in Korean]
- Kumaraswamy S, Ramakrishnan B, Sethunathan N. 2001. Methane production and oxidation in an anoxic rice soil as influenced by inorganic redox species. *Journal of Environmental Quality* 30:2195-2201.
- Le Mer J, Roger P. 2001. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *European Journal of Soil Biology* 37:25-50.
- Lee CH, Kim SY, Villamil MB, Pramanik P, Hong CO, Kim PJ. 2012. Different response of silicate fertilizer having electron acceptors on methane emission in rice paddy soil under green manuring [Article]. *Biology and Fertility of Soils* 48:435-442.
- Lee CH, Yang MS, Chang KW, Lee YB, Chung KY, Kim PJ. 2005. Reducing nitrogen fertilization level of rice (*Oryza sativa* L.) by silicate application in Korean paddy soil. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 38:194-201. [in Korean]
- Lee JH, Lee JG, Jeong ST, Gwon HS, Kim PJ, Kim GW. 2020. Straw recycling in rice paddy: Trade-off between greenhouse gas emission and soil carbon stock increase. *Soil and Tillage Research* 199:104598.
- Lee SH, Cho HJ, Shin HJ, Shin YS, Park SD, Kim BJ, Chung JB. 2023. Effect of silicate fertilizer on oriental melon in plastic film house. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 36:407-416. [in Korean]
- Lim CH, Kim SY, Jeong ST, Kim GY, Kim PJ. 2013. Effect of salt concentration on methane emission in a coastal reclaimed paddy soil condition: Pot test. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 32:252-259. [in Korean]
- Lim JY, Kang YG, Sohn KM, Kim PJ, Galgo SJC. 2022. Creating new value of blast furnace slag as soil amendment to mitigate methane emission and improve rice cropping environments. *Science of The Total Environment* 806:150961.
- 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. *Science of The Total Environment* 572:874-896.
- Matichenkov W, Bocharnikova EA. 2001. The relationship between silicon and soil physical and chemical properties. *Studies in Plant Science* 8:209-219.
- ME (Ministry of Environment). 2023. *Climate change and carbon neutrality*. ME, Sejong, Korea. [in Korean]
- NAAS (National Academy of Agricultural Science). 2010a. *Fertilization standard of crop*. RDA, Jeonju, Korea.
- NAAS (National Institute of Agricultural Sciences). 2010b. *Research and analysis criteria for crops*. RDA, Jeonju, Korea.
- Negasa G, Tadesse K, Gerenfes D, Habte D, Debebe A, Chemed M, Adugna G. 2023. Impact of silicate fertilizer on soil properties and yield of bread wheat in Nitisols of tropical environment. *Heliyon* 9:22933.
- Negim O, Eloifi B, Mench M, Bes C, Gaste H, Motelica-Heino M, Le Coustumer P. 2010. Effect of basic slag addition on

- soil properties, growth and leaf mineral composition of beans in a Cu-contaminated soil. *Journal Soil and Sediment Contamination* 19:174-187.
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). 2023. NOAA index tracks how greenhouse gas pollution amplified global warming in 2022. Accessed in <https://research.noaa.gov/2023/05/23/noaa-index-tracks-how-greenhouse-gas-pollution-amplified-global-warming-in-2022/> on 23 May 2023.
- RDA (Rural Development Administration). 2005. Development of agricultural practices to mitigate greenhouse gases from agricultural sector. RDA, Suwon, Korea.
- RDA (Rural Development Administration). 2012. Agricultural science and technology research and analysis standards. RDA, Suwon, Korea.
- Rout GR, Sahoo S. 2015. Role of iron in plant growth and metabolism. *Reviews in Agricultural Science* 3:1-24.
- 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 System Science Data* 12:1561-1623.
- Seo YJ, Park JH, Kim CY, Kim JS, Cho DH, Choi SY, Park SD, Jung HC, Lee DB, Kim KS, et al. 2011. Effects of soil types on methane gas emission in paddy during rice cultivation. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 44:1220-1225. [in Korean]
- Sinha SK. 1995. Global methane emission from rice paddies: Excellent methodology but poor extrapolation. *Current Science* 68:643-646.
- Steiner F, Zuffo AM, Bush A, Santos DMDS. 2018. Silicate fertilization potentiates the nodule formation and symbiotic nitrogen fixation in soybean. *Pesquisa Agropecuária Tropical* 48:212-221.
- Wang X, Cai QS. 2006. Steel slag as an iron fertilizer for corn growth and soil improvement in a pot experiment. *Pedosphere* 16:519-524.
- Wang ZP, DeLaune RD, Patrick Jr. WH, Masscheleyn PH. 1993. Soil redox and pH effects on methane production in a flooded rice soil. *Soil Science Society of America Journal* 57:382-385.
- White B, Tubana BS, Babu T, Mascagni H, Agostinho F, Datnoff LE, Harrison S. 2017. Effect of silicate slag application on wheat grown under two nitrogen rates. *Plants* 6:47.
- Yagi K, Minami K. 1990. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields. *Soil Science and Plant Nutrition* 36:599-610.
- Yin X, Peñuelas J, Sardans J, Xu X, Chen Y, Fang Y, Wu L, Singh BP, Tavakkoli E, Wang W. 2021. Effects of nitrogen-enriched biochar on rice growth and yield, iron dynamics, and soil carbon storage and emissions: A tool to improve sustainable rice cultivation. *Environmental Pollution* 287:117565.
- Zhang X, Chen J, Jiang JJ, Li J, Tyagi RD, Surampalli RY. 2020. The potential utilization of slag generated from iron-and steelmaking industries: A review. *Environmental Geochemistry and Health* 42:1321-1334.