

간척지 논 토양 개량제로서 석고처리가 메탄 배출량 저감에 미치는 영향

임창현,^{1†} 김상윤,^{1†} 김필주^{1,2*}

¹경상대학교 응용생명과학부 (BK 21 program), ²경상대학교 농업생명과학연구원

Effect of Gypsum Application on Reducing Methane (CH₄) Emission in a Reclaimed Coastal Paddy Soil

Chang Hyun Lim,^{1†} Sang Yoon Kim^{1†} and Pil Joo Kim^{1,2*} (¹Division of Applied Life Science (BK 21 Program), Gyeongsang National University, Jinju, 660-701, South Korea, ²Institute of Agriculture and Life Science, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701, South Korea)

Received: 23 June 2011 / Accepted: 09 September 2011
© 2011 The Korean Society of Environmental Agriculture

Abstract

BACKGROUND: Gypsum(CaSO₄ · 2H₂O) is known as an ideal amendment to improve soil quality of the reclaimed coastal land. Since gypsum has very high concentration of electron acceptor like SO₄²⁻, its application might be effective on reducing CH₄ emission during rice cultivation, but its effect has not been studied well.

METHODS AND RESULTS: The effect of gypsum on CH₄ emission and rice growth characteristics was studied by pot test, which was packed by reclaimed paddy soils collected from Galsa, Hadong, Gyeongnam province. Chemical-grade gypsum was applied in two soils having EC 2.25 and 9.48 dS/m at rates of 0, 0.5, 1.0 and 2.0%(wt/wt). CH₄ emission was characterized a week interval by closed chamber method during rice cultivation. CH₄ emission rate was significantly decreased with increasing salt accumulation and gypsum application levels. With increasing gypsum application, dissolved SO₄²⁻ concentration in the leachate water was significantly increased, which might have suppressed CH₄ production in soil. Total CH₄ flux was dramatically decreased with increasing gypsum application. In contrast, rice yield was

increased with increasing gypsum application and then achieved maximum productivity at 1.0% gypsum application in two soils.

CONCLUSION(s): Gypsum is a very good soil amendment to suppress CH₄ emission in reclaimed coastal paddy soils, and improve rice productivity and soil properties. The optimum application level of gypsum is assumed at ca. 1% to improve soil productivity with reducing effectively CH₄ emission during rice cultivation.

Key Words: Calcium sulfate, CH₄ emission, Gypsum, Reclaimed soil

서론

메탄(CH₄)은 이산화탄소(CO₂)와 더불어 주요한 지구온난화 가스로서, 지구 전체 온난화 가스의 약 20% 이상을 차지하는 것으로 알려져 있다 (IPCC, 2007). 메탄은 약 10년이라는 짧은 대기 잔존시간과 약 1.7 ppmV의 낮은 대기 중 농도에도 불구하고, 높은 적외선 흡수능 때문에 이산화탄소의 약 23배에 달하는 지구온난화지수(Global warming potential, GWP)를 가지고 있다(Blake and Rowland, 1988; Rodhe, 1990; Minami and Neue, 1994). 지구 전체의 메탄 발생량은 515 Tg/year 로 추정되고 있으며 습지와 같은 자연적인 조건에서 약 30%, 나머지 약 70%는 논과 같은 인위적인 요인에 의하여 발생 되는 것으로 알려져 있다. 전 세계적으로 벼 논에서 발생하는 메탄은 20~150 Tg/year으로 평균 60 Tg/year 이고, 메탄 배출량의 약 5~30%를 차지하는 것은

*교신저자(Corresponding author),
Phone: +82-55-772-1966; Fax: +82-55-772-1969;
E-mail: pjkim@gnu.ac.kr

[†]These authors contributed equally to this work.

로 알려지고 있다(Dickinson and Cicerone, 1986; Bronson and Moiser, 1991; Houghton *et al.*, 1992).

세계적으로 논의의 경지면적은 인구증가에 따른 식량 공급문제를 해결을 위해 그 규모가 갈수록 증가하고 있는 추세이다. IRRI(2009)의 조사에 따르면 벼가 재배되고 있는 전 세계 논의 면적은 1960년 120,138,000ha에서 2008년 155,711,000ha로 약 30%가 증가하였다. 국내에서는 특히 전체 경작지 중 약 58% 이상이 논으로 이용되어지고 있으나 세계적인 논 면적 증가의 추세와는 반대로 국내의 논 면적은 산업화와 도로 확장 등으로 시간이 지날수록 감소하고 있다. 국내에서는 1960년 이후부터 간척사업이 활발하게 진행되고 있으며, 축소되어져 가는 농업 용지의 확충을 위하여 간척지내에 대규모 간척농경지를 조성해오고 있다(한국농어촌공사 보고서, 2009).

간척 농경지는 일반 농경지와 달리 치환성 칼리, 마그네슘, 나트륨 함량이 높은 반면 칼슘의 함량이 상대적으로 낮아 이온의 불균형이 존재하고, 염 농도가 상당히 높아 일반적으로 높은 pH를 가지고 있어 식물생육에 매우 불리한 특성을 가지고 있다. 특히 간척지 논 토양은 경반층이 형성되어 용적밀도가 높고 공극률이 낮으며, 경도가 높아 토양의 물리적 성질이 매우 불량하여, 벼 생육 및 수량 그리고 미질 등이 저하되는 것으로 알려져 있다(Jung and Ryu, 2005).

간척지 토양을 개량할 목적으로 다양한 종류의 칼슘 제제가 사용되어지고 있다. 석고(CaSO_4)는 칼슘제제의 일종으로 다량의 칼슘 성분을 함유하고 있어 이온 불균형 및 토양의 물리성을 개량할 뿐만 아니라 다량의 황산염(SO_4^{2-})이 함유되어 있어 간척지 토양의 높은 pH를 저감 시키는 효과가 높은 것으로 알려져 있다. 석고 시용은 황환원균(Sulfate reducer)의 활성증대로 인하여 메탄생성균(Methanogens)과 동일한 기질인 H_2 와 CH_3COOH 를 두고 경쟁하기 때문에 메탄생성균의 활성을 낮추어 메탄 발생을 크게 저감시킬 수 있는 것으로 보고되고 있다(Hori *et al.*, 1990; Ranjan *et al.*, 2009).

Ali 등(2008)은 전자 수용체를 이용하여 벼 재배기간 중 전체 메탄 발생량을 약 28% 까지 저감 할 수 있는 것으로 보고하였다. 따라서 전자수용체인 황산염을 다량 포함하고 있는 석고 시용을 통해 간척지 논 토양에서 메탄발생을 크게 저감시킬 수 있을 것으로 기대된다. 하지만 현재 간척농경지에서 토양개량제로서 석고 처리가 메탄 발생량 저감에 미치는 영향에 관한 연구는 국내에서 실시된 바가 없는 실정이다. 따라서 본 연구는 실제 간척지 논 토양을 대상으로 석고의 처리에 따른 메탄 저감 효과를 평가하고 이에 따른 토양 개량 효과를 평가하고자 하였다.

재료 및 방법

조사대상 토양 선별

본 연구를 위한 공시토양으로 경상남도 하동군 금성면 갈사리(34°57'17"E, 127°47'38"N)에 위치한 갈사 간척지의 토양을 선정하였다. 갈사간척지는 경남 하동군 금성면 가덕리, 갈사리, 고포리 일대에 위치한 간척지로서, 총면적은 약

Table 1. Chemical properties of reclaimed coastal paddy soils collected for pot test from Galsa, Hadong, Gyeongnam province

Parameters	Low salt		High salt	
	Mean	SD	Mean	SD
pH (1:5 with H_2O)	5.37	0.01	6.58	0.07
Electrical conductivity (dS/m)	2.25	0.07	9.48	0.05
Organic matter (g/kg)	20.4	0.35	14.3	0.37
Exchangeable cations (cmol ⁺ /kg)				
K	0.27	0.04	0.47	0.02
Ca	2.56	0.18	4.13	0.11
Mg	1.92	0.13	3.46	0.10
Na	1.55	0.16	6.62	0.34
Water soluble iron (mg/kg)	1.92	0.60	3.46	0.05
Water soluble sulfate (mg/kg)	275	2.14	392	2.30
Sodium adsorption ratio (SAR)	1.04	0.04	4.74	0.10

651ha로 약 403ha가 개답되어 1994년부터 본격적으로 답상태 영농에 이용되어져 왔으며, 갈사간척지의 평균적인 토양 이화학적 특성은 일반적인 간척지 논 토양의 특성과 비슷하였다. 실험 전 갈사간척지 16개 지점에서 토양을 채취하여 토양의 이화학적 특성 분석을 실시하였다. 채취된 간척지 논 토양에서 석고 처리에 따른 메탄발생 저감효과를 평가하기 위하여 분석한 토양들은 염 농도에 따라 크게 두 가지로 분류하였다. 저염도(34°57'15"E, 127°47'47"N)와 고염도(34°57'18"E, 127°47'42"N)로 나누어 토양을 선별하였으며, 이때 선별된 두 지역의 토양의 이화학적 특성은 Table 1과 같다.

포트 실험 및 처리방법

간척 농경지에서 석고의 처리에 따른 메탄 발생 특성과 토양개량 효과를 조사하기 위하여 포트 실험을 실시하였다. 실험 대상으로 선정된 저염도(EC 2.25 dS/m)와 고염도 토양(EC 9.48 dS/m)은 채취 후 자연건조 후 사분(<10mm)한 후 벼 재배를 위한 포트 실험에 사용되었다. 사분된 토양 13.5 kg을 Wagner pot(1/2000a size) 25cm 높이까지 가비중 1.2 g/cm³의 조건으로 충전하였다. 그리고 지상부 10cm 토양(5.4kg)에 분쇄 벼짚 5 Mg/ha 비율로 처리하였다. 토양 개량제로서 사용된 공시제제는 시약급 석고($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 95%)를 이용하였으며, 처리량은 지상부 10cm 토양 무게의 0, 0.5, 1.0, 2.0%(wt/wt)의 비율로 각각 처리하였으며, 완전 혼합 후 3일간 담수상태로 안정화 후 실험에 사용하였다. 농촌진흥청 표준 시비량을 근거로 하여 이앙 1일전 기비로 질소(N)-인산(P_2O_5)-가리(K_2O)를 각각 50-45-40kg/ha로 전층 시비하였으며, 벼는 조생종 품종인 오대벼(*Oryza sativa* L.)를 공시작물로 선택하여 각 포트 당 3포기를 손 이앙 하였다. 1차 추비(분얼비)는 이앙 2주 후 질소(N) 20kg/ha를, 2차 추비(수비)는 이앙 2개월 후(출수 15일 전)에 질소(N)와加里(K_2O)를 각각 20, 17kg/ha를 처리하였다(RDA, 1999). 실

험 포트는 무작위로 배치되었으며, 모든 처리구는 3반복으로 하여 실험을 수행하였다. 생육기간 동안 약 5~7cm 높이로 물 수위를 유지하였으며, 벼는 이앙 후 106일이 경과된 후 수확하였다.

메탄가스 채취 및 정량분석

가스 채취는 벼 재배기간 동안 일주일에 1회, 메탄 발생량이 가장 많은 오후 2~3시 사이에 실시하였다. 벼 재배기간 중 벼를 통해 발생하는 메탄가스는 Closed chamber method (Rolston, 1986)를 이용하여 시료를 채취하였으며, 원통형 아크릴 챔버 내부에 공기를 혼합하기 위해 64cm² (8cm × 8cm) 사이즈의 소형팬을 설치하여 시료의 균질성을 확보하였다. 메탄포집 시간은 30분동안 실시하였으며, 50ml 주사기를 이용해 채취하였다. 이 때 챔버 내부와 토양의 온도를 각각 측정하였다. 메탄가스는 GC(Shimadzu, GC-2010, Tokyo)를 이용하여 측정하였으며, 이 때 Packed Porapak NQ column (80-100mesh)을 이용하였으며 검출기는 Flame ionization detector(FID)를 사용하여 분석하였다. 이때 분석 조건은 column 80 C, injector 100 C, detector 110 C로 설정하였으며, carrier gas로 헬륨(He)을 burning gas로 수소(H₂)를 이용하였다.

재배기간 중 포트로부터 배출되는 메탄배출량은 아래의 식을 이용하여 계산하였다(Rolston, 1986).

$$F = \rho \cdot V/A \cdot \Delta c / \Delta t \cdot 273/T$$

F: 단위시간당 메탄배출량(mg/m²/hr)

ρ : 메탄가스의 밀도 0.714(mg/cm³)

A: 챔버 표면적(가로(m)×세로(m):m²)

V: 챔버 부피(A×h:m³)

Δc : 시료 채취 전후의 농도차(nL/cm³)

Δt : 시료 채취 시간(hr)

T: 273+측정시간 중 평균온도(°C).

재배기간 중 발생된 총 메탄 발생량은 Singh 등(1999)이 도입한 식을 이용하여 도출 하였다.

$$\text{총 메탄발생량 (Seasonal CH}_4 \text{ flux)} = \sum_{i=1}^n (R_i \times D_i)$$

Seasonal flux: 재배기간 중 발생된 총 메탄 발생량 (CH₄ g/m²)

R_i: i번째 샘플링기간 내 일 메탄 발생량(g/m²/day)

D_i: i번째 기간 내 샘플링 간격일수

n: 샘플링 간격

토양 및 침출수의 이화학적 특성 조사

벼 재배 기간 중에 토양의 산화환원전위(Eh)와 온도 변화를 조사하였으며, 토양의 산화환원전위는 토양 표면으로부터 약 5cm 토양 깊이에 Platinum electrode를 설치하여 Eh meter(PRN-41, DKK-TOA Corporation)를 이용하여 측정하였다. 메탄 채취일자와 동일하게 벼 재배 기간 중 포트를 통해 배출되는 침출수의 양을 지속적으로 모니터링 하였으며, 15일 간격으로 수집된 침출수의 황산염함량을 함께 조사하였다. 이때

침출수중 황산염함량 변화는 여과 후 Ion Chromatography System(ICS-3000, Dionex)를 이용하여 측정하였다.

시험 전 공시토양과 수확 후 채취된 토양은 자연 건조 후 사분(<2mm)하여 이화학적 분석에 이용하였다. 토양의 pH와 EC는 토양과 물을 1:5 비율로 침출 후 pH meter(Orion 3 star, Thermo Electron Corporation)와 EC meter (Orion 150A+, Thermo Electron Corporation)로 각각 측정하였다. 치환성 양이온은 1N NH₄OAc로 침출 후 ICP-OES (Inductively coupled plasma-optical emission spectrophotometer Perkin Elmer Model OPTIMA 4300DV, Shelton Connecticut USA)를 이용하여 측정하였다. 토양 내 황산염함량은 토양과 물을 1:5의 비율로 침출 후 여과하여 Ion Chromatography System(ICS-3000, Dionex)을 이용하여 측정하였다. 유기물은 Tyurin 법을 이용하여 측정하였다 (RDA, 1988). 토양 용액 중의 Ca²⁺와 Mg²⁺에 대한 농도비를 이용하여 SAR(Sodium adsorption ratio)을 다음과 같이 계산하였다(Sposito and Mattigod, 1997).

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}}$$

통계 분석

통계 분석은 SAS software(SAS Institute Inc., 1995)를 이용하여 실시하였으며 최소 유의차(least significant difference, LSD)를 이용한 One-way ANOVA 방식으로 각 처리구간의 평균값을 비교하였다.

결과 및 고찰

석고 처리에 따른 메탄 발생 저감 효과

저염도(EC 2.25 dS/m)와 고염도의 토양(EC 9.48 dS/m)에서 벼 재배기간 중 메탄 배출량 변화를 조사한 결과(Fig. 1), 대부분의 메탄은 벼 생육초기인 이앙 후 13~55일 사이에서 집중적으로 발생하는 경향을 나타내었다. 이앙 후 48일 경과 후 저염도와 고염도 토양에서 각각 110.7과 57.9 mg/m²/hr로 가장 높게 메탄이 발생되었다(Fig. 1). 이는 담수 후 메탄 생성균에 적합한 극혐기조건(토양 산화환원전위 -200mV 이하)이 형성되고, 시용된 유기물의 분해로 인하여 메탄생성균의 이용이 가능한 유기탄소함량이 크게 증가되었기 때문으로 판단된다(Denier van der Gon *et al.*, 1994; Yagi *et al.*, 1994). 대부분의 처리구에서 이앙 후 48일 경과 후 염의 농도와 관계없이 메탄발생은 감소하는 경향을 나타내었다.

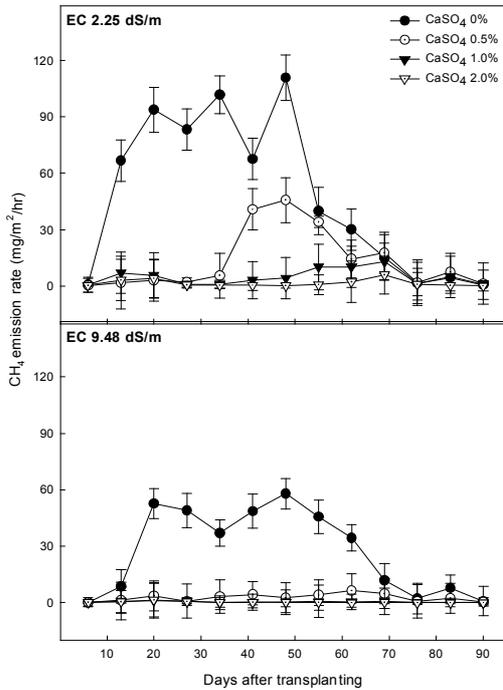


Fig. 1. Changes of CH₄ emission rates in the potted paddy soils amended with different levels of gypsum application.

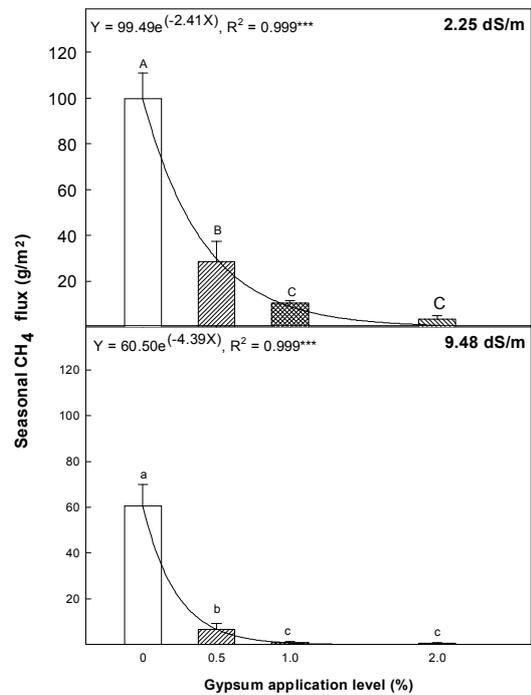


Fig. 2. Seasonal CH₄ fluxes in the potted paddy soils amended with different levels of gypsum application.

며 재배기간 중 방출된 총 메탄발생량을 조사한 결과, 저염도 토양에서는 석고처리량을 0.5%, 1.0%, 2.0%로 각각 증가시킴에 따라 석고 무처리구 99.7g/m² 대비 28.6(71.3%), 10.5(89.4%), 3.4(96.6%)g/m²으로까지 메탄발생이 감소되었고, 고염도 토양에서는 무처리구 60.5g/m² 대비 6.7 (88.9%), 0.9(98.5%), 0.7(98.9%)g/m² 까지 메탄발생이 감소되었다 (Fig. 2). 이러한 석고처리에 따른 메탄 저감효과는 저염도 토양에 비하여 고염도 토양에서 큰 것으로 나타났다. 유사한 결과로서, Lindau 등(1993)은 벼 재배기간 동안 석고 처리에 따라 총 메탄 발생을 29~46% 까지 저감한 것으로 보고하였고, Denier Van der Gon 과 Neue(1994)는 55~70%까지 총 메탄 발생량을 감소시킬 수 있는 것으로 보고하였다. 특히 석고의 처리량이 증가함에 따라 침출수 내 황산염의 함량은 크게 증가하는 경향이었으며, 석고처리량이 가장 높았던 2.0% 처리구에서 침출수 내 황산염 농도가 가장 높은 수준에서 오랫동안 유지되었다. 오랜 기간 높은 농도로 유지되는 황산염은 결국 토양 내에서 전자수용체로 작용하여 황환원균의 활성은 증가시키는 반면 메탄생성균의 활성은 감소시켜 벼 생육 기간 중 메탄발생을 저감시키는 것으로 판단되었다(Van Breemen and Feijtel, 1990; Denier Van der Gon and Neue, 1994). 저염도 토양에 비해 고염도 토양에서 황산염의 농도가 더욱 높게 나타났다. Marzaco(1998)는 비활성 염을 가하였을 경우 이온성 화합물의 용해도는 증가한다고 보고하였다. 본 연구에서도 고염도 토양 내 다량으로 존재하는 이온으로 인해 석고의 용해도가 크게 증가되어 더 많은 황산염이 재배기간 동안 침출수 내에 존재할 수 있었던 것으로 평가된다.

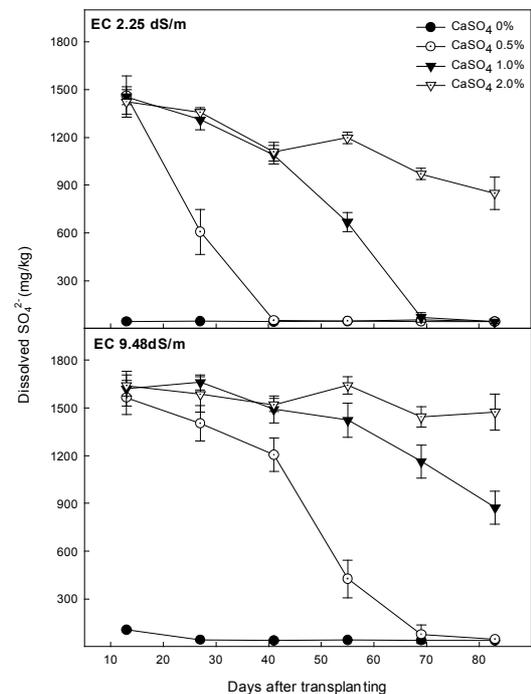


Fig. 3. Changes of dissolved SO₄²⁻ in the percolated water from the potted paddy soils amended with different levels of gypsum application.

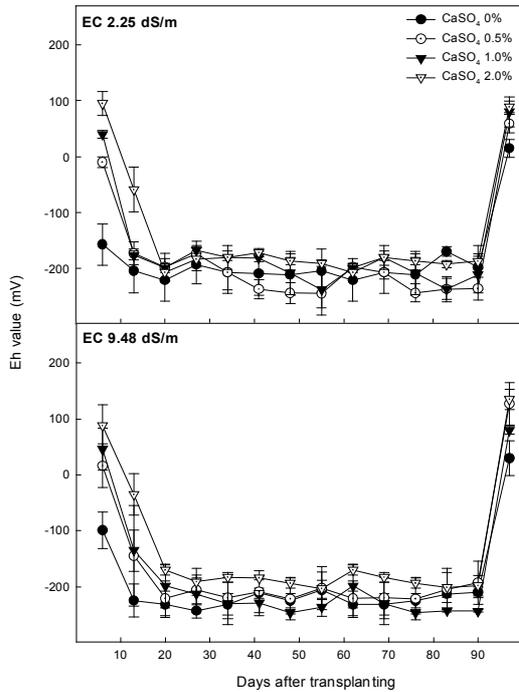


Fig. 4. Changes of soil Eh values in the potted paddy soils amended with different levels of gypsum application.

벼 재배 기간 중 토양의 산화환원전위(Eh)를 조사한 결과 고염도와 저염도 전체 토양에서 유사한 변화 양상을 보였으며, 특히 담수 이후 급격하게 감소하는 경향을 나타내었다. 벼 재배기간 중에는 -200mV 이하를 유지하였다가 배수 후 급격하게 증가하는 경향을 보였다(Fig. 4). Takai(1961)와 Garica 등(2000)은 메탄은 극한 혐기상태(토양 산화환원전위 -200mV 이하)에서 제한적으로 메탄 생성균에 의한 유기물의 분해과정으로부터 생성되는 것으로 보고하고 있다. 무처리구에서 산화환원 전위는 가장 급격하게 감소하였으나 석고처리구에서 산화환원 전위는 무처리구에 비하여 다소 느리게 감소하는 경향을 나타내었다. 특히 석고 처리량이 가장 높았던 2.0% 처리구에서 가장 느린 감소를 나타내었다. 이는 석고 투입을 통한 황산염 투입의 증가가 토양의 산화환원 전위를 느리게 감소시킨 원인으로 판단되며, 석고 처리에 따른 느린 산화환원 전위의 감소가 메탄 생성을 저감시킨 것으로 평가 된다.

석고 처리에 따른 간척 농경지의 토양 개량효과

저 · 고염도의 토양에서 석고를 처리함에 따라 일 평균 침출량이 증가하는 것을 확인하였다(Fig. 5). 저 · 고염도의 토양에서 석고 무처리구에서 평균 침출속도는 4.05×10^{-6} 과 1.78×10^{-6} cm/sec로 약 2배 이상의 침출량 차이를 보여 고염도 토양의 물리성과 배수성이 불량함을 확인 할 수 있었다.

석고 처리에 따른 최대 평균배출 속도는 저염도와 고염도 토양 석고 2.0% 처리구에서 각각 2.02×10^{-5} 과 1.27×10^{-5} cm/sec로 무처리에 비하여 전체토양에서 약 5배의 배출량 증가를 보여, 석고처리가 토양의 배수성을 개선시킨 것으로 평가되었다. 이전 연구에 따르면, 소석회, 석고, 탄산석회, 생고 등의 석회질 제재의 사용은 간척지 토양의 투수성을 개선시켰으며, 그 중 석고의 투수성 개량효과가 가장 우수한 것으로 보고하였다(농촌진흥청 보고서, 2002). 간척지 논에서 석고와 같은 토양개량제의 사용은 배수조건 개선을 통한 토양 내 용존산소 공급 증가로 인하여 메탄 발생 저감에 다소 기여한 것으로 평가된다.

벼 수확 후 석고처리에 따른 토양의 이화학적 특성을 살펴본 결과(Table 2) 석고 처리에 따라 토양의 pH는 유의적으로 감소하는 경향을 보였다. 이는 간척지와 같은 높은 pH를 가진 토양에 석고를 사용할 경우 토양의 pH를 적절하게 낮춤으로서 충분하게 토양개량의 효과가 클 것으로 판단된다. 또한 석고처리에 따라 치환성 칼슘의 함량은 유의적으로 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 간척 농경지의 낮은 칼슘함량과 이온의 불균형을 개량할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 석고 처리에 따라 고염도와 저염도 처리구 전체에서 작물에 악영향을 끼치는 치환성 나트륨이온 함량과 SAR값이 감소하는 것을 확인 할 수 있었다(Table 2). 과량의 석고 처리시 치환성 나트륨이온과 SAR값의 감소 효과는 큰 유의적인 차이를 나타내지 않았는데, 이는 석고의 낮은 용해도 때문인 것으로 평가된다.

석고의 처리로 인한 칼슘의 공급 효과는 간척지 논 토양의 물리성을 개선 할 수 있을 것으로 판단되며, 이를 통하여 간접적으로 메탄 발생 저감에 영향을 줄 수 있을 것으로 평가된다.

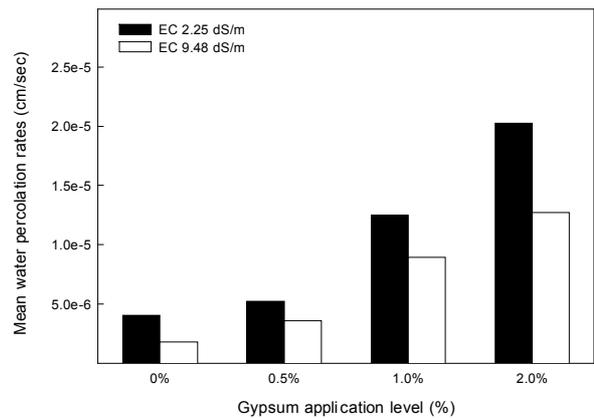


Fig. 5. Mean water percolation rates in the potted paddy soils amended with different levels of gypsum application.

Table 2. Chemical properties of soils amended with different levels of gypsum application at rice harvesting stage

EC levels (dS/m)	Parameters	Gypsum application (%)				LSD _{0.05}
		0	0.5	1.0	2.0	
2.25	pH(1:5, H ₂ O)	4.40	4.09	3.90	3.74	0.51
	Organic matter (g/kg)	25.2	25.4	25.0	25.6	2.1
	Electrical conductivity (dS/m)	1.97	4.63	5.12	6.87	1.48
	Exchangeable cation (cmol ⁺ /kg)					
	K	0.21	0.22	0.21	0.23	0.04
	Ca	1.99	4.81	5.11	6.81	0.91
	Mg	0.89	0.65	0.40	0.39	0.17
	Na	0.16	0.15	0.11	0.13	0.11
	Water soluble SO ₄ ²⁻ (mg/kg)	459	624	789	978	192.6
Sodium adsorption ratio (SAR)	0.42	0.29	0.21	0.22	0.13	
9.48	pH(1:5, H ₂ O)	5.72	5.50	5.28	4.88	0.62
	Organic matter (g/kg)	18.2	18.9	17.9	18.5	1.8
	Electrical conductivity (dS/m)	1.67	3.03	3.32	6.36	2.51
	Exchangeable cation (cmol ⁺ /kg)					
	K	0.40	0.35	0.34	0.33	0.09
	Ca	3.27	5.28	6.53	10.4	3.02
	Mg	1.82	1.08	0.82	0.38	0.20
	Na	0.65	0.15	0.14	0.15	0.23
	Water soluble SO ₄ ²⁻ (mg/kg)	471	741	843	1179	224.3
Sodium adsorption ratio (SAR)	1.29	0.27	0.23	0.20	0.27	

벼 생육 및 수량 특성

석고처리에 따른 벼 수량 변화 및 구성요소는 Fig. 6 과 Table 3에 나타내었다. 벼 수량은 석고처리를 1.0% 수준까지 증가시킴에 따라 저염도 토양에서는 무처리구 5.3Mg/ha에 비하여 최대 6.0Mg/ha(13.2%)까지 수량이 증가하였으며, 고염도 토양에서는 무처리구 2.3Mg/ha에 비하여 최대 3.2Mg/ha(39.1%) 까지 수량이 증수되는 것으로 조사되었다. 저염도와 고염도 두 토양에서 2차방정식을 이용하여 최대 수량을 추정한 결과, 두 토양에서 석고 처리량을 각각 0.76% (저염도, $Y = 5.2 + 2.3X - 1.6X^2$, $R^2 = 0.993^{***}$)와 0.84%(고염도, $Y = 2.2 + 2.0X - 1.2X^2$, $R^2 = 0.927^{***}$)까지 처리하였을 때 가장 높은 수량을 얻을 수 있는 것으로 평가되었다. 석고처리량을 저염도 토양에서 0.76%, 고염도 토양에서 0.84% 이상 처리시 수량은 각각 감소하는 경향을 나타내었다. 과량의 석고처리로 인한 증가된 황산염은 독성을 유발시킬 수 있으며, 이로 인하여 수량이 감소 한 것으로 평가된다. 수량 구성요소인 분얼, 천립중, 등숙율과 수당입수 또한 석고 처리에 따라 증가되는 경향을 나타내었으며, 수량변화와 동일한 경향을 나타내었다. 따라서 간척지와 같이 염이 집적된 토양에서 석고의 처리는 수량 증수와 벼의 생육 개선 효과가 충분할 것으로 평가된다.

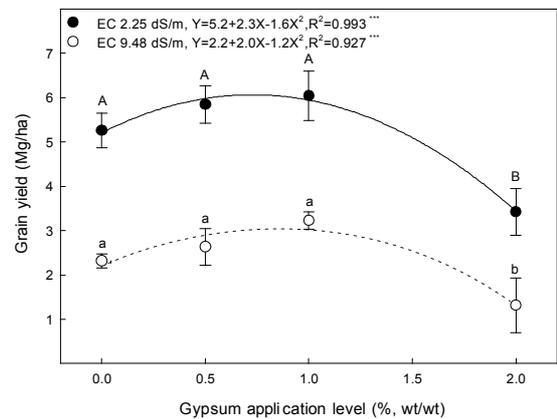


Fig. 6. Grain yield in the potted paddy soils amended with different levels of gypsum application.

Table 3. Effect of gypsum application levels on rice plant growth and yield properties in reclaimed paddy soil packed pots at the harvesting stage

EC levels (dS/m)	Parameters	Gypsum application (%)				LSD _{0.05}
		0	0.5	1.0	2.0	
2.25	Tiller number per hill	13	15	17	13	2.9
	Plant height (cm)	95	98	98	84	10.9
	Shoot biomass (g/hill)	83	83	101	47	18.4
	Panicle number per hill	12	14	16	11	2.5
	Number of grains per panicle	97	97	106	68	18.2
	Ripened grains (%)	71	71	83	65	13.5
	1000 grain weight (g)	24.9	26.4	26.6	24.5	2.2
	Straw yield (Mg/ha)	5.9	5.9	5.9	2.9	1.8
	Total biomass (Mg/ha)	11.1	11.7	11.9	6.4	1.9
9.48	Tiller number per hill	11	12	13	8	1.2
	Plant height (cm)	76	78	84	71	9.2
	Shoot biomass (g/hill)	29	40	43	24	16.4
	Panicle number per hill	9	10	12	8	1.2
	Number of grains per panicle	75	87	91	60	14.8
	Ripened grains (%)	46.0	55.7	58.8	33.4	9.9
	1000 grain weight (g)	20.3	21.2	21.8	19.4	1.6
	Straw yield (Mg/ha)	2.0	2.9	2.9	1.7	2.4
	Total biomass (Mg/ha)	4.1	5.5	6.1	3.0	2.9

메탄 발생에 관련된 요인분석

본 연구에서 토양의 화학성, 벼의 생육특성 및 수량 구성 요소와 메탄 발생간의 상관관계를 조사한 결과(Table 4), 식물체의 생육 및 수량에 비해 토양의 화학적인 특성이 더욱 높은 상관관계를 가지는 것으로 조사되었다. 특히 고염도와 저염도 토양에서 전기전도도, 치환성 칼슘, 수용성 황산염의 함

량은 고도의 부의 상관관계가 있는 것으로 평가 되었다. Lindau 등(1993)은 메탄 발생과 황산염의 함량은 높은 역의 상관관계가 성립하는 것으로 보고하였으며, 본 연구에서도 동일하게 황산염과 메탄발생은 고도의 역의 상관관계가 성립되는 것으로 조사되었다.

Table 4. Correlation between seasonal CH₄ flux, soil properties, plant growth and yield components at the harvesting stage (n=12)

EC levels (dS/m)	Parameters	Correlation coefficient (r)	
2.25	Soil properties	pH	0.543
		Electrical conductivity	-0.872***
		Organic matter	-0.268
		Exchangeable K	-0.359
		Exchangeable Ca	-0.927***
		Exchangeable Mg	0.488
		Exchangeable Na	0.486
		Water soluble SO ₄ ²⁻	-0.789**

		Tiller number per hill	-0.406
		Plant height	0.126
		Shoot biomass	0.233
		Panicle number per hill	-0.240
2.25	Growth and yield components	Number of grains per panicle	0.344
		Ripened grains	-0.046
		1000 grain weight	-0.284
		Grain yield	0.162
		Straw yield	0.395
		Total biomass	0.353
		pH	0.515
		Electrical conductivity	-0.570*
		Organic matter	-0.199
	Soil properties	Exchangeable K	0.538
		Exchangeable Ca	-0.656*
		Exchangeable Mg	0.487
		Exchangeable Na	0.451
		Water soluble SO ₄ ²⁻	-0.727**
9.48		Tiller number per hill	-0.269
		Plant height	-0.111
		Shoot biomass	-0.310
		Panicle number per hill	-0.287
	Growth and yield components	Number of grains per panicle	-0.114
		Ripened grains	-0.102
		1000 grain weight	-0.207
		Grain yield	-0.114
		Straw yield	-0.205
		Total biomass	-0.188

Note) Asterisks (*, ** and ***) denote significant at 5%, 1% and 0.1% levels, respectively

요 약

간척지 논 토양에서 석고의 처리는 염의 농도에 관계없이 고염도와 저염도 전체 토양에서 무처리 대비 71.3~98.9%까지 메탄 발생을 저감 할 수 있었다. 석고 처리에 따른 황산염을 증가는 전지수용체, 즉 황산염이온의 양 증대에 따른 전자의 활성저하와 황환원균의 활성증가가 메탄 발생을 저감시키는 가장 큰 요인인 것으로 판단된다. 간척지 논에 석고를 사용할 경우 부족한 칼슘의 공급효과를 통하여 토양의 물리성 및 배수 개선을 통하여 메탄 발생 감소에 영향을 줄 수 있었다. 또한 석고의 사용은 간척지 토양의 높은 pH와 높은 나트륨 이온을 효과적으로 저감할 수 있어 식물 생육 및 수량에 긍정적인 영향을 주었으며, 물리성 개선을 통하여 메탄 발생을 저감시킬 수 있었다.

간척지 토양에서 석고의 사용은 벼 수량을 13.2~39.1%까지 증수 효과가 있었으나, 과량 처리시 오히려 생산성을 감

소시켰다. 결론적으로 간척지에서 토양 개량을 위해 사용되어 지는 석고는 토양의 물리·화학적 개선을 위한 뿐만 아니라 메탄 발생을 효과적으로 저감할 수 있는 우수한 토양 개량제로서 평가되었다.

감사의 글

This research was conducted with subsidies for a research professor under study year system of Gyeongsang University in 2009 (KRF2008013F00003) and supported by Rural Development Administration, Republic of Korea (PJ0067842011). Sang Yoon Kim was supported by scholarships from the BK21 program of Ministry of Education and Human Resources Development, Korea.

참고문헌

- Ali, M.A., Lee, C.H., Kim, P.J., 2008. Effect of silicate fertilizer on reducing methane emission during rice cultivation. *Biol. Fertil. Soils*. 44, 597-604.
- Blake, D.R., Rowland, F.S., 1988. Continuing worldwide increase in tropospheric methane. *Science*. 239, 1129-1131.
- Bronson, K.F., Mosier, A.R., 1991. Effect of encapsulated calcium carbide on dinitrogen, nitrous oxide, methane, and carbon dioxide emissions from flooded rice. *Biol. Fert. Soils*. 11, 116-120.
- Denier Van der Gon, H.A.C., Neue, H.U., 1994. Impact of gypsum application on the methane emission from a wetland rice field. *Global Biogeochem. Cycles*. 8, 127-134.
- Dickinson, R.E., Cicerone, R.J., 1986. Future global warming from atmospheric trace gases. *Nature*. 319, 109-114.
- Garica, J.L., Patel B.K.C., Ollivier, B., 2000. Taxonomic, phylogenetic and ecological diversity of methanogenic archaea. *Anaerobe*. 6, 205-226.
- Hori, K., Inubushi, K., Matsumoto, S., Wada, H., 1990. Competition for acetic acid between methane formation and sulfate reduction in paddy soil. *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.* 61, 572-578.
- Houghton, J.T., Callander, B.A., Varney, S.K., 1992. Intergovernmental Panel on Climatic Change (IPCC): Climate change. The supplementary report to the IPCC Scientific Assessment, pp. 1-200, Cambridge University Press, New York.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers.
- IRRI(International Rice Research Institute), 2009. Trends In the Rice Economy: Harvested area of rough rice, by country and geographical region-USDA.
- Jung, Y.S., Ryu, C.H., 2005. Soil problems and agricultural management of the reclaimed land. *Korean Journal of Crop Science* 60, 8-20.
- Lindau, C.W., Alford, D.P., Bollich, P.K., Linscombe, S.D., 1993. Inhibition of methane evolution by calcium sulfate addition to flooded rice. *Plant and Soil*. 158, 299-301.
- Marzocco, C.J., 1998. The Effects of Salts and Nonelectrolytes on the Solubility of Potassium Bitartrate: An Introductory Chemistry Discovery Experiment. *J. Chem. Educ.* 75, 1628.
- Minami, K., Neue, H.U., 1994. Rice paddies as a methane source. *Climate change*. 27, 13-26.
- Ranjan, M., Animita, B., Ujjanini, S., Bijay, K.D., Alak, K.M., 2009. Role of Alternative Electron Acceptors (AEA) to control methane flux from waterlogged paddy fields: Case studies in the southern part of West Bengal, India. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 3, 664-672.
- Rodhe, H., 1990. Comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect. *Science*. 248, 1217-1219.
- Rural Development Administration(RDA), 1988. Methods of Soil Chemical Analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon.
- Rural Development Administration(RDA), 1999. Fertilization standard of crop plants. National Institute of Agricultural Science and Technology, Suwon. pp. 148.
- Rolston, D.E., 1986. Gas flux, In: Klute A, (ed.) Methods of soil analysis, part 1, 2nded., Agron. Monogr. 9. Soil Sci Soc America and American Soc Agron. Madison, WI, pp. 1103-1119.
- SAS Institute., 1995. System for Windows Release 6.11. SAS Institute, Cary, NC.
- Singh, S., Singh, J.S., Kashyap, A.K., 1999. Methane flux from irrigated rice fields in relation to crop growth and N-fertilization. *Soil Biol. Biochem.* 31, 1219-1228.
- Sposito, G., Mattigod, S.V., 1977. On the chemical foundation of the sodium adsorption ratio. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41, 323-329.
- Takai, Y., 1961. Reduction and microbial metabolism in paddy soil (3) - in Japanese. *Nogyo Gijutsu (Agricultural Technology)*. 16, 122-126.
- Van Breemen, N., Feijtel, T.C.J., 1990. Soil processes and properties involved in the production of greenhouse gases, with special relevance to soil taxonomic systems, In: Bouwan, A.F. (Ed.), Soils and greenhouse effect, Wiley, New York, pp. 195-223.
- Yagi, K., Chairaj, P., Tusuruta, H., Cholitul, W., Minami, K., 1994. Methane emission from rice paddy fields in the central plain of Thailand. *Soil Sci. Plant Nutrition*, 40, 29-37.