

Research Article

Open Access

## 간척지 논 토양의 염 농도가 메탄 배출에 미치는 영향

임창현,<sup>1</sup> 김상윤,<sup>1</sup> 정승탁,<sup>1</sup> 김건엽,<sup>2\*\*</sup> 김필주<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>경상대학교 응용생명과학부, <sup>2</sup>농촌진흥청 국립농업과학원, <sup>3</sup>경상대학교 농업생명과학연구원

### Effect of Salt Concentration on Methane Emission in a Coastal Reclaimed Paddy Soil Condition: Pot Test

Chang-Hyun Lim,<sup>1</sup> Sang-Yoon Kim,<sup>1</sup> Seung-Tak Jeong,<sup>1</sup> Gun-Yeob Kim<sup>2\*\*</sup> and Pil-Joo Kim<sup>1,3,\*</sup> (Division of Applied Life Science, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701, South Korea, <sup>2</sup>National Academy of Agricultural Science, RDA, <sup>3</sup>Institute of Agriculture and Life Science, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701, South Korea)

Received: 5 September 2013 / Revised: 26 September 2013 / Accepted: 7 October 2013

© 2013 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

#### Abstract

**BACKGROUND:** Salt accumulation in coastal reclaimed soil can decrease plant growth and productivity, which could lead to considerable variation of methane(CH<sub>4</sub>) emission in a rice paddy. The objective of this study was to evaluate the effect of salt concentration on CH<sub>4</sub> emission in a coastal reclaimed soil.

**METHODS AND RESULTS:** The effect of salt concentration on CH<sub>4</sub> emission and rice growth characteristics was studied by pot test, which packed by reclaimed paddy soils collected from Galsa, Hadong, Gyeongnam province. Electrical conductivity(EC) of each treatment was controlled by 0.98, 2.25, 5.05 and 9.48 dS/m and CH<sub>4</sub> emission was characterized a week interval by closed chamber method during rice cultivation. The CH<sub>4</sub> emission rate was significantly decreased with increase of salt

accumulation, but total CH<sub>4</sub> flux in EC 5.50 dS/m treatment was lower than those of EC 9.48 dS/m treatment. It seems because of higher content of water soluble SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> in EC 5.50 dS/m treatment than those of EC 9.48 dS/m treatment. Rice growth and grain yield were significantly decreased with increase of salt accumulation. Soil properties, especially EC and pH were negatively correlated with CH<sub>4</sub> flux, while rice growth characteristics like plant height and tiller number show significantly positive correlation with CH<sub>4</sub> flux.

**CONCLUSION(S):** Conclusively, salt accumulation significantly decreased CH<sub>4</sub> flux in a rice paddy, which could be useful information for evaluating CH<sub>4</sub> flux in reclaimed area in Korea.

**Key words:** CH<sub>4</sub> emission, Reclaimed soil, Salt accumulation

#### 서론

메탄(CH<sub>4</sub>)은 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)와 더불어 주요 온난화 가스로서 지구 전체 온실가스 배출량의 약 20 % 이상을 차지하고 있다(IPCC, 2007). 대기 중 메탄 농도는 약 1.7 ppmv로서(Le Mer and Roger, 2001) 1800년대를 기준으로 연간

\*교신저자 (corresponding author),

Phone: +82-55-772-1966; Fax: +82-55-772-1969;

E-mail: [pjkim@gnu.ac.kr](mailto:pjkim@gnu.ac.kr)

\*\*공동 교신저자 (co-corresponding author),

Phone: +82-31-290-0240; Fax: +82-31-290-0206;

E-mail: [gykim1024@korea.kr](mailto:gykim1024@korea.kr)

0.5~1 % 가량 증가해오고 있으며(Conrad, 2007), 이산화탄소의 약 25배에 달하는 지구온난화잠재능(Global warming potential, GWP) 때문에 매우 중요한 온실가스로 알려져 있다(Blake and Rowland, 1988; Rodhe, 1990; Minami and Neue 1994). 전체 메탄 배출량의 약 70 %는 인위적 활동(Anthropogenic activity)에 의해 발생하는 것으로 추정되며, 지구전체 메탄 배출량의 약 5-29 %에 해당하는 25~150 Tg/yr 이 벼 재배과정에서 배출되고 있어 수도작 논은 주요한 메탄 배출원으로 간주되고 있다(Le Mer and Roger, 2001).

최근 국내에서는 1960년 이후부터 감소되고 있는 농업 용지의 확충을 위한 대책으로 간척사업을 진행해 오고 있으며, 상당부분의 간척지가 벼 재배를 위한 농경지로서 활용되고 있다(한국농어촌공사 보고서, 2009). 간척 농경지는 일반 농경지와 다르게 토양 내 염 농도가 매우 높아 일반 농경지에 비해 높은 pH를 가지고 있을 뿐만 아니라, 다른 양이온에 비해 칼슘의 함량이 상대적으로 낮아 이온의 불균형이 존재하는 것으로 알려져 있다. 토양 내 경반층이 형성되어 용적밀도가 높고 공극률이 낮아 토양의 물리성 또한 매우 불량하여 벼 생육 및 수량 그리고 미질 등이 일반 농경지에 비해 감소되는 것으로 알려져 있다(Jung and Ryu, 2005). 수도작 논에서 배출되는 약 60-90 %의 메탄은 벼의 통기조직(Aerenchyma channel)을 통하여 대기 중으로 배출되며(Cicerone and Shetter, 1981; Holzapfel-Pschorn and Seiler, 1986; Holzapfel-Pschorn *et al.*, 1986; Wassmann *et al.*, 1996; Wassmann and Aulakh, 2000), 벼 생육은 메탄 배출량을 조절하는 주요한 인자로서 보고된바 있다(Ali *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2012, 2013). 간척지 수도작 논의 염 농도에 따른 메탄 배출 특성이 크게 다를 것으로 판단되어지나, 이에 대한 연구는 아주 드물게 이루어 지고 있는 실정이다.

메탄 발생은 메탄생성균(Methanogens)과 메탄산화균(Methanotrophs)의 활동도에 영향을 받으며, Patel 과 Roth (1977)는 토양 내 NaCl과 같은 염의 축적이 메탄생성균의 성장과 메탄 생성을 억제시킬 수 있으며, Balttlet 등 (1987) 또한 토양 내 염 농도의 증가가 메탄 발생량을 유의하게 감소시키는 것으로 보고된 바 있다. 하지만 현재까지 상당부분의 연구가 비 농경지에서 이루어지거나, 특정 미생물만을 분리하여 *in vitro* 상에서 주로 이루어졌기 때문에 실제 농경지에서 염 농도가 메탄 배출량에 미치는 영향에 대한 정확한 평가는 이루어 지지 않고 있는 실정이며 특히 국내에서는 이에 관한 연구가 거의 전무한 편이다.

본 연구에서는 간척지 내 서로 다른 염 농도가 메탄 배출량에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 염 농도가 다른 간척지 토양을 선발하여 메탄 배출량을 평가함과 동시에 토양의 화학성 및 벼의 생육 특성을 pot 실험을 통하여 조사하였다.

## 재료 및 방법

### 조사대상 토양 선발

본 연구를 위한 공시토양으로 경상남도 하동군 금성면 갈사리에 위치한 갈사 간척지의 토양을 선정하였다. 갈사 간척지는 경남 하동군 금산면 가덕리, 갈사리 고포리 일대에 위치한 간척지로서, 총면적은 약 651 ha로 약 403 ha가 개답되어 1994년부터 본격적으로 답상태 영농에 이용 되어져 왔으며, 갈사 간척지의 평균적인 토양 이화학적 특성은 일반적인 간척지 토양의 특성과 비슷하였다(Koo *et al.*, 1998). 실험 전 갈사 간척지 16개 지점에서 토양을 채취하여 토양의 이화학적 특성 분석을 실시하였다. 채취된 간척지 토양에서 염 농도에 따른 메탄발생 차이를 평가하기 위하여 분석된 토양들은 염 농도에 따라 크게 네 가지로 분류하였다. 간척지 토양과 비교를 위한 저염도(Low, EC 0.98 dS/m), 보통염도(Medium, EC 2.25 dS/m) 토양과 간척지 토양인 고염도(High, EC 5.05 dS/m), 초고염도(Very high, EC 9.48 dS/m)로 나누어 토양을 선발하였으며, 이 때 선발된 네 지역의 토양의 이화학적 특성은 Table 1과 같다.

**Table 1. Chemical properties of the selected soils before the experiment**

Soil properties	Salt accumulation level			
	Low	Medium	High	Very high
Electrical conductivity (dS/m)	0.98	2.25	5.05	9.48
pH (1:5 with H <sub>2</sub> O)	4.93	5.37	6.21	6.58
Organic matter (g/kg)	19.8	20.4	19.8	14.3
Exchangeable cations (cmol <sup>+</sup> /kg)				
K	0.24	0.27	0.45	0.47
Ca	2.44	2.56	3.35	4.13
Mg	0.87	1.92	2.49	3.46
Na	0.31	1.55	3.43	6.62
Water soluble Fe (mg/kg)	0.87	1.92	2.49	3.46
Water soluble SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/kg)	183	275	401	392
Sodium adsorption ratio (SAR)	0.76	3.27	6.35	10.75

분석 방법상의 차이는 있으나 저염도와 보통염도를 제외한 고염도와 초고염도의 경우 U.S. Soil Salinity Laboratory Staff의 염류집적지 기준인 EC 4.0 dS/m의 기준을 초과하는 것으로 보아 상당량의 염류를 포함하고 있음을 알 수 있었다. 상대적으로 조사 토양 내 SAR 값은 13 이하로 나트륨 자체에 의한 작물생육의 장애나 토양의 물리성을 불량하게 만들 가능성은 그리 높지 않은 것으로 판단되었다. 따라서 본 토양에서 염 농도가 메탄 배출량에 미치는 효과를 검증하기에 적합한 토양으로 판단되었다.

**포트 실험**

간척 농경지에서 염 농도에 따른 메탄 발생 특성을 조사하기 위하여 포트 실험을 실시하였다. 실험 대상으로 선정된 토양은 채취 후 자연건조 후 사분(<10 mm)한 후 벼 재배를 위한 포트 실험에 사용되었다. 사분된 토양 13.5 kg을 Wagner pot(1/2000 a size) 25 cm 높이까지 가비중 1.2 g/cm<sup>3</sup>의 조건으로 충전한 후 토양에 유기물원으로서 분쇄 볏짚 5 Mg/ha 비율로 처리하였다. 농촌진흥청 표준 시비량을 근거로 하여 이앙 1일전 기비로 50 kg N/ha(요소), 45 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha(용과린), 40 kg K<sub>2</sub>O /ha(염화加里)로 전층 시비하였으며, 벼는 조생종 품종인 오대벼(*Oryza sativa* L.)를 공시작물로 선택하여 각 포트당 3포기를 손 이앙하였다. 1차 추비(분얼비)는 이앙 2주일 후 질소를 20 kg/ha를 처리하였으며, 2차 추비(수비)는 이앙 2개월 후(출수 15일 전)에 질소와 가리를 각각 20, 17 kg/ha를 처리하였다(RDA, 1999). 실험 포트는 무작위로 배치되었으며, 모든 처리구는 3반복으로하여 실험을 수행하였다. 생육기간 동안 약 5~7 cm 높이로 물 수위를 유지하였으며, 벼 수확을 위하여 수확 약 1달전에 배수를 실시하였으며, 이앙 후 106일이 경과된 후 수확을 실시하였다.

**메탄가스 채취 및 정량분석**

가스 시료 채취는 이전 연구에서 사용된 방법을 기준으로 벼 재배기간 동안 일주일에 1회, 메탄 발생량이 가장 많은 오후 2~3시 사이에 실시하였다(Lim *et al.*, 2011). 주 1회 가스 시료 채취는 당일의 날씨와 같은 환경에 영향을 받을 수 있어 한계점이 있을 수 있으나, 일반적으로 통용되는 방법이며 본 실험은 포트실험으로 필드 실험에 비해 외부환경이 잘 통제되었다. 벼 재배기간 중 벼를 통해 발생하는 메탄가스는 폐쇄형 챔버법(Closed chamber method, Rolston, 1986)을 이용하여 시료를 채취하였으며, 원통형 아크릴 챔버 내부에 공기를 혼합하기 위해 64 cm<sup>2</sup> (8 cm × 8 cm)사이의 소형팬을 설치하여 시료의 균질성을 확보하였다. 메탄 포집 시간은 30분동안 실시하였으며 50 ml 주사기를 이용해 채취하였다. 이 때 챔버 내부와 토양의 온도를 각각 측정하였다. 메탄가스는 가스크로마토그래피(Shimadzu, GC-2010, Tokyo)를 이용하여 측정하였으며, 이 때 Packed Porapak NQ column(80-100 mesh)을 이용하였으며, 검출기는 불꽃이온화검출기(Flame ionization detector, FID)를 사용하여 분석하였다. 이 때 분석 조건은 컬럼 80 °C, 주입구 100 °C, 검출기 110 °C로 설정하였으며, 운반 가스로 헬륨(He)을 연소가스로 수소(H<sub>2</sub>)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/m<sup>2</sup>/hr)  
 ρ: 메탄가스의 밀도 0.714(mg/cm<sup>3</sup>)  
 A: 챔버 표면적(가로(m)×세로(m):m<sup>2</sup>)  
 V: 챔버 부피(A×h:m<sup>3</sup>)  
 Δc: 시료 채취 전후의 농도차(nL/cm<sup>3</sup>)

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.

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

Seasonal flux: 재배기간 중 발생된 총 메탄 발생량 (CH<sub>4</sub> g/m<sup>2</sup>)

R<sub>i</sub>: i번째 샘플링기간 내 일 메탄 발생량(g/m<sup>2</sup>/day)

D<sub>i</sub>: i번째 기간 내 샘플링 간격일수

n: 샘플링 간격

**토양의 이화학적 특성 조사**

벼 재배 기간 중에 토양의 산화환원전위(Eh)를 조사하였으며 토양 면으로부터 약 5cm 깊이에 백금 전극(Platinum electrode)을 설치하여 산화환원전위 측정기(Eh meter, PRN-41, DKK-TOA Corporation)를 이용하여 측정하였다. 시험 전 공시토양과 수확 후 채취된 토양은 자연 건조 후 사분(<2 mm)하여 화학성 분석에 이용하였다. 토양의 pH와 EC는 토양과 물을 1:5 비율로 침출 후 산도 측정기(pH meter, Orion 3 star, Thermo Electron Corporation)와 전기전도도 측정기(EC meter, Orion 150A<sup>+</sup>, Thermo Electron Corporation)로 각각 측정하였다. 치환성 양이온은 1N NH<sub>4</sub>OAc로 침출 후 ICP-OES(Inductively coupled plasma-optical emission spectrophotometer Perkin Elmer Model OPTIMA 4300DV, Shelton Connecticut USA)를 이용하여 측정하였다. 유기물은 Tyurin 법을 이용하여 측정하였다(RDA, 1988). 토양 용액 중의 Ca<sup>2+</sup>와 Mg<sup>2+</sup>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**

염 농도에 따른 토양의 화학성과 메탄 배출량은 SAS software(SAS Institute Inc., 1995)를 이용하여 One-way ANOVA 방식으로 처리효과를 비교하였으며, 처리효과가 인정될 경우 최소유의차(Least significant difference, LSD)를 이용하여 처리구간의 평균값을 비교하였다.

**결과 및 고찰**

**염 농도에 따른 메탄 배출 특성**

염 농도가 다른 논 토양으로부터 벼 재배기간 중 메탄 배출량 변화를 조사한 결과, 벼 이앙 후 시간이 경과함에 따라 토양의 환원조건 발달과 벼 생육이 증진되면서 메탄 배출량은 크게 증가하는 경향을 보였다(Fig. 1). 특히 대부분의 메탄은 벼 생육초기인 이앙 후 13~44일 사이에서 집중적으로 발생하는 것으로 조사되었다. 일반적으로 수도작 논에서 메탄의 배

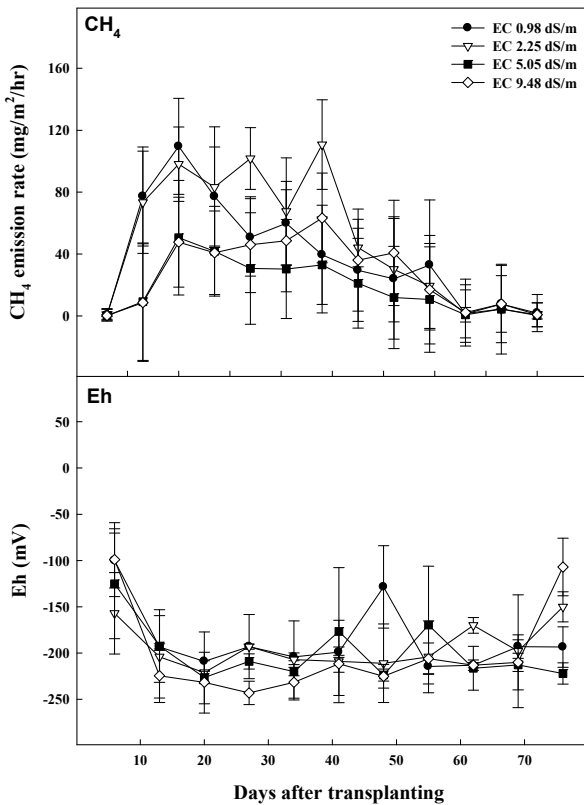


Fig. 1. Changes of CH<sub>4</sub> emission rates and soil Eh values at different levels of salt accumulated soils during rice cultivation.

출 특성은 유수형성기부터 출수기 사이인 생육 중반부에 메탄 배출이 가장 왕성하게 이루어 진다(Ali *et al.* 2008, 2009; Lee *et al.* 2010). 이러한 결과는 토양의 온도 상승과 메탄 생성균의 생장에 적합한 환원상태 발달(Eh vale -200 mV 이하) (Adhya *et al.*, 1994; Takai, 1961; Garica *et al.*, 2000), 벼 생육에 따른 근권 삼출물(root exudate) 생성량 증대로 인한 가급태 유기물(labile organic carbon)의 공급 증가(Bouwman, 1991; Wassmann *et al.*, 1993), 벼 식물체 생육중대에 의한 메탄 전이율 증대(Mariko *et al.*, 1991) 등이 메탄 배출량 증가의 주요 원인으로 해석되고 있다. 하지만 본 연구에서는 이전 연구결과와는 다르게 생육 초기에 다량의 메탄이 배출되는 경향을 확인하였다. 이러한 결과는 토양 내 벼짚 시용으로 인한 다량의 유기물이 벼 생육 초기에 공급됨에 따라 methanogen 활성이 크게 증가된 것으로 판단되며, 이에 따라 벼 생육 초반부에 메탄배출량이 크게 증가된 것으로 판단된다.

염 농도에 따른 메탄 배출은 대부분의 처리구에서 염 농도와는 관계없이 비슷한 경향을 보였으나, 저염도와 보통염도에서의 초기 메탄 배출량이 고염도와 초고염도에 비하여 더욱 높게 나타났다. Patel 과 Roth(1977)의 연구에 의하면 토양 내 높은 염의 농도가 메탄생성균의 성장과 메탄 생성을 억제하는 것으로 보고하였으며, 본 연구에서도 벼 생육 초기에 상대적으로 더 높게 유지되었던 염 농도가 고염도와 초고염도

처리구의 메탄 배출량 감소에 큰 영향을 준 것으로 판단된다 (Fig. 2). 그러나 이양 후 44일 경과 후 염 농도와 관계없이 메탄 배출량은 대부분 감소하는 경향을 보였다. 이는 담수를 통한 염 용탈의 증가 및 식물체를 통한 흡수량의 증가로 인한 염 농도의 희석효과 때문에 메탄 배출량이 대부분의 처리구에서 큰 차이를 보이지 않았던 것으로 판단된다. 이양 후 70일 경과 후 벼 등숙을 위하여 배수를 실시한 결과 토양 산화 환원 전위는 급격히 증가하는 경향을 보였으며, 그 이후의 메탄 배출은 대부분의 처리구에서 관찰되지 않았다.

염 농도 처리구별 총 메탄 배출량(Fig. 3)은 저염도와 보통염도에서 각각 93과 92 g/m<sup>2</sup>로 가장 높았으며, 고염도와 초고염도에서 총 메탄 발생량은 각각 50과 58 g/m<sup>2</sup>로 보통농도에 비해 약 54~63 % 낮은 것으로 조사되었다. Baltlet 등(1987)은 토양 내 염 농도의 증가가 메탄 발생량을 유의한 수준으로 감소시킬 수 있는 것으로 보고하였다. 하지만 본 연구에서는 고염도 처리구에서 오히려 총 메탄 배출량이 초고염도 처리구보다 다소 낮았다. 이는 고염도 처리구의 공시토양에서 초고염도 처리구에 비해 높았던 수용성 황산염(water soluble SO<sub>4</sub>) 함량으로 인해 황환원균(Sulfate reducer)의 활성이 더욱 증대된 것으로 보이며(Table 1), 결과적으로 동일한 기질(H<sub>2</sub>와 CH<sub>3</sub>COOH)을 두고 경쟁하는 메탄생성균의 활성을 저감시켜 고염도 처리구의 메탄배출량이 초고염도 처리구에 비해 다소 낮게 나타난 것으로 판단된다(Hori *et al.*, 1990; Ranjan *et al.*, 2009).

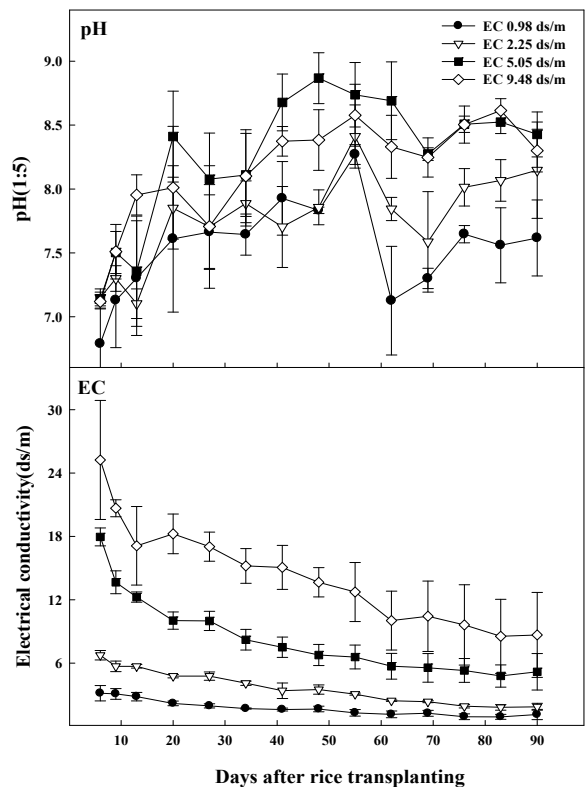


Fig. 2. Changes of pHs and electrical conductivities (EC) of the percolated waters from the potted soils with different levels of salt accumulation during rice cultivation.

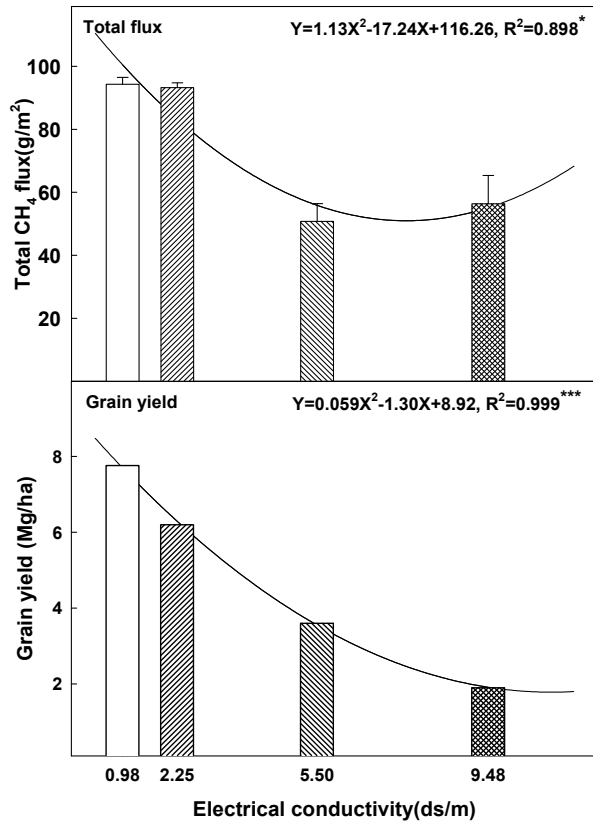


Fig. 3. Total CH<sub>4</sub> fluxes and grain yields at different levels of salt accumulated soils during rice cultivation.

특히 염 농도와 메탄 산화균의 활성은 고도의 부의 상관관계가 성립하는 것으로 조사된 바 있으며(Singh *et al.* 2010), 간척지 내 다량으로 존재하는 황산염과 암모늄 이온(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) 같은 염의 존재는 EC의 증가를 초래 할 뿐 아니라, 메탄 산화균과 암모니아산화균(Ammonium oxidizing bacteria)의 경쟁을 유발시켜 메탄의 산화능을 크게 감소시킬 수 있다(Bodelier and Laanbroek, 2004). 본 연구결과를 통해 높은 염 농도는 메탄 생성균의 활성을 감소시켜 실제 메탄 배출량을 크게 감소시킨 것으로 판단되며, 메탄 산화균의 활성 증진 효과에 따른 메탄 배출량 감소효과는 거의 없었던 것으로 평가된다.

#### 침출수 및 토양의 화학적 특성

벼 재배 기간 중 염 농도별 토양의 침출수 내 EC 변화를 조사한 결과(Fig. 2), 염 농도와 관계없이 전체 처리구에서 비슷한 경향을 보였으며 전반적으로 벼 생육 초기에 가장 높았다가 벼의 생육 증가에 따라 서서히 감소하는 경향을 보였다. 특히 토양 내 염 농도가 높은 처리구일수록 침출수에서 더 높은 EC를 나타내었다. Hanna 등(2011)은 염의 함량과 메탄 발생은 높은 역의 상관관계가 성립하는 것으로 보고하였으며, 본 연구에서도 동일하게 염 농도와 메탄 발생은 고도의 역의 상관관계가 성립되는 것으로 조사되었다(Table 3). 염 농도의

지속효과를 확인하기 위해 공시토양과 수확 후 토양의 염 농도를 메탄 배출량과 각각 상관관계를 분석해본 결과 공시토양에서만 높은 상관관계가 확인이 되었으며 수확 후 토양과는 유의한 상관관계를 나타내지 않았다. 이 결과를 통해 벼 재배기간 중 염 농도는 메탄 배출량에 영향을 주는 것으로 판단되며, 특히 초기 메탄 배출량 감소에 큰 영향을 주는 것으로 평가된다. 하지만 벼 생육 후반부부터 토양 내 염 희석효과에 의해 그 영향성이 다소 감소되는 것으로 보이나 여전히 메탄 배출량에 영향을 주는 중요한 인자로서 평가되었다.

벼 재배기간 중 토양 침출수의 pH 변화(Fig. 2)를 조사한 결과 전체 처리구에서 염 농도에 관계없이 비슷한 경향의 변화를 보였으나, 고염도와 초고염도 처리구에서 더 높은 pH 증가를 보였다. 벼 생육 초기에 pH가 6.7~7.2로 각 처리구가 비슷한 경향을 보였으나, 이양 후 30일 이후부터 고염도와 초고염도 처리구에서 저염도와 보통염도에 비해 pH가 8.2~8.8 범위까지 높았다. 이에 반해 저염도와 중간염도 처리구는 벼 재배기간 전반적으로 pH가 중성범위로 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 메탄생성균은 중성 범위에서 최적의 활성을 보이며(Garcia *et al.*, 2000), 토양 내 pH에 아주 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있다(Wang *et al.*, 1993). 고염도와 초고염도 처리구에서 높았던 pH가 메탄 생성균의 활성 감소에 영향을 준 것으로 판단되며, 총 메탄 배출량과도 고도의 부의 상관관계가 있는 것으로 보아 메탄 배출량 감소에도 큰 영향을 준 것으로 보인다.

#### 벼 생육 및 수량 특성

수확 후 염 농도에 따른 벼의 생육 및 수량을 조사한 결과(Table 2), 초장(plant height), 분얼수(tiller number per hill), 수당입수(number of grains per panicle), 볏짚수량(straw yield), 천립중(1000 grain weight) 및 등숙율(ripened grains) 등은 염의 농도가 높아짐에 따라 전반적으로 감소되는 경향을 보였다. 일반적으로 논 토양에서 벼 재배 과정 중 메탄 배출량은 토양의 특성뿐만 아니라 벼 식물체 요인에 의해서도 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 벼 이양 초기 토양 내 유기물 분해되는 과정 중 메탄이 과량 생성되어 토양으로부터 직접 배출되는 것과, 식물의 생육이 증대되면서 통기조직(aerenchyma channel)의 발달로 식물을 통해 배출량이 증대되면서 메탄 배출량 증가가 발생하는 것으로 알려져 있다. 이 때문에 논 토양에서 벼를 재배하는 과정 중 메탄 배출량의 90 % 이상이 벼의 통기조직을 통해 배출되고 나머지 10 % 내외가 토양으로부터 단순 확산에 의해 배출되는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 벼의 지상부의 생육관련 인자가 메탄 배출량과 고도의 정의 상관관계가 있다고 알려져 있으며(Kim *et al.*, 2012; Ali *et al.*, 2009), 본 연구에서도 벼 생육 관련 인자와 고도의 정의 상관관계가 있는 것으로 조사되었다(Table 3). 특히 높은 염의 농도로 인한 벼 생육 악화가 벼 재배기간 중 메탄배출량 감소에 영향을 준 것으로 판단된다.

**Table 2. Chemical properties of the surface soils (0-15cm) and Characteristics of rice growth and yields in the potted soils packed with different levels of salt accumulation at rice harvesting stage**

Parameters	Salt accumulation level				LSD <sub>0.05</sub>
	Low	Medium	High	Very high	
<b>Soil properties</b>					
Electrical conductivity (dS/m)	0.8	1.15	1.71	1.78	0.8
pH (1:5 with H <sub>2</sub> O)	4.74	4.4	5.12	5.72	0.42
Exchangeable cations (cmol <sup>+</sup> /kg)					
K	0.15	0.21	0.34	0.4	0.07
Ca	2.05	1.99	3.44	3.27	0.43
Mg	0.42	0.89	1.42	1.82	0.15
Na	0.1	0.16	0.32	0.65	0.28
Water soluble Fe (mg/kg)	12.33	2.51	1.37	18.02	11.26
Water soluble SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/kg)	209	459	458	384	179.6
Sodium adsorption ratio (SAR)	0.34	0.53	0.8	1.6	0.67
<b>Growth and yield properties</b>					
Plant height (cm)	102.5	96.5	94.5	80.7	2.5
Tiller number per hill	29	26	19	8	5.6
Number of grains per panicle	57	54	45	33	15
1000 grain weight (g)	26.6	24.9	22.9	25.4	2.7
Ripened grains (%)	58.7	49.7	37.5	43.8	17.2
Straw yield (Mg/ha)	8.4	8.4	5.9	2.7	0.6

**Table 3. Correlation between total CH<sub>4</sub> flux and soil and plant growth characteristics at rice harvesting stage**

Parameter	Correlation coefficient (r)	
	Before rice transplanting	After rice harvesting
<b>Soil properties</b>		
Electrical conductivity	-0.620*	-0.245
pH	-0.791**	-0.676*
Exchangeable K	-0.842***	-0.765**
Exchangeable Ca	-0.703**	-0.942***
Exchangeable Mg	-0.626*	-0.723**
Exchangeable Na	-0.651**	-0.583*
Water soluble Fe	0.773**	-0.018
Water soluble SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-0.808***	-0.232
Sodium adsorption ratio (SAR)	-0.669*	-0.526
<b>Growth and yield properties</b>		
Grain yield		0.524
Straw yield		0.470
Plant height		0.580*
Tiller number per hill		0.569*
Number of grains per panicle		0.472

정조 수량(Fig. 3)은 수량구성요소와 마찬가지로 토양 내 염 농도가 높아질수록 유의하게 감소하는 것으로 조사되었다. 예를 들어, 저염도의 경우 7.8 Mg/ha 로서 일반적인 벼 수량과 큰 차이를 보이지 않았으나, 토양 내 염도가 보통, 고염

도, 초고염도 순으로 높아짐에 따라 6.2, 3.8, 2.2 Mg/ha 로 토양 내 염의 농도가 높아질수록 저염도 대비 생산량이 27-72 % 감소하는 것으로 조사되었다. 이는 고염도 처리구의 높은 염 농도가 식물의 수분 흡수를 방해해 벼의 생육에 불리한

영향을 미쳤기 때문에 판단된다(U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954).

본 연구에서 토양의 화학성, 벼의 생육특성 및 수량 구성 요소와 메탄 발생 간의 상관관계를 조사한 결과(Table 3), 벼의 생육 및 수량 특성에 비해 토양의 화학적인 특성이 메탄 발생에 더욱 많은 영향을 미치는 것으로 조사되었다. 특히 토양에서 치환성 칼륨, 칼슘, 나트륨, 수용성 철, 수용성 황산염의 함량은 총 메탄 배출량과 고도의 부의 상관관계가 있는 것으로 평가되었다. 일반적으로 토양 내 전자수용체( $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{4+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ )가 존재할 경우 산화환원 전위의 감소에 다소 영향을 줄 수 있으며, 이는 결국 메탄생성 단계로 이어지는 전자의 흐름을 차단시켜 메탄생성량을 큰 폭으로 억제시킬 수 있다(Conrad, 2007). 실제 벼 재배과정 중 전자수용체로서 규산질 비료(10 Mg/ha)를 활용하여 메탄 배출량을 무처리 대비 약 28 % 까지 저감 가능한 것으로 이미 보고된 바 있다(Ali *et al.*, 2008). 간척지 토양은 일반토양에 비해 다량의 수용성 철(1.92-3.46 mg/kg)과 황산염(275-392 mg/kg)을 포함하고 있으며(Lim *et al.*, 2011), 상대적으로 전자수용체(Electron acceptor)의 농도가 메탄 배출량의 감소에 유의한 영향을 준 것으로 판단된다. 하지만 본 연구에서는 수용성 철의 경우 메탄 배출량과 부의 상관관계를 나타내지 않았는데, 이는 아마도 상대적으로 높았던 황산염에 의해 그 효과가 다소 낮아진 것으로 판단된다. 토양 내 과다한 이온이 존재할 경우 높은 EC 문제를 야기시킬 뿐 아니라 벼 재배기간 중 메탄 생성균의 활성과 벼의 생육을 억제시켜 총 메탄 배출량을 감소시킨 것으로 판단된다. 특히 초기의 높은 염 농도가 메탄 배출량 감소에 큰 영향을 준 것으로 평가되며, 담수 이후 염의 상당 부분이 용탈되어 없어지면서 그 효과가 점차 감소된 것으로 판단된다.

## 요 약

간척지 논 토양에서 염 농도에 따른 메탄 배출특성을 조사하기 위하여 포트 실험을 실시한 결과, 염 농도의 증가는 메탄 배출량 감소와 벼 생육 및 수량성 악화에 영향을 주는 것으로 조사되었다. 벼 재배기간 중 높은 EC와 pH로 인한 메탄생성균의 활성 감소와 벼 생육 악화에 따른 메탄 배출량 감소가 주요 원인으로 평가되었다. 토양의 EC와 pH는 총 메탄 배출량과 고도의 부의 상관관계를 나타내었으며, 벼 생육(초장 및 분얼)과는 정의 상관관계를 나타내었다. 하지만 주로 높은 EC에 의한 메탄 저감효과는 벼의 생육 초기에 대부분 나타났으며, 생육 후기로 갈수록 염의 희석효과에 의하여 저감효과가 크게 감소되는 것으로 확인하였다. 본 연구의 결과를 통하여 간척지 논 토양의 염 농도가 메탄 배출량에 감소에 큰 영향을 줄 수 있는 것으로 평가되며, 간척지 논 토양에서 메탄 배출량 평가 또는 예측에 좋은 자료로 활용될 수 있는 것으로 판단된다.

## Acknowledgement

This work was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ009315)" Rural Development Administration, Republic of Korea.

## References

- Adhya, T.K., Rath, K., Rao, P.K., Das, S.N., Parida, K.M., Sethunathan, D.C., 1994. Methane emission from flooded rice fields under irrigated conditions, *Biol. Fertil. Soils*. 18, 245-248.
- Ali, M.A., Lee, C.H., Lee, Y.B., Kim, P.J., 2009. Silicate fertilization in no-tillage rice farming for mitigation of methane emission and increasing rice productivity, *Agric. Ecosyst. Environ.* 132, 16-22.
- Ali, M.A., Oh, J.H., Kim, P.J., 2008. Evaluation of silicate iron slag amendment on reducing methane emission from flood water rice farming, *Agric. Ecosyst. Environ.* 128, 21-26.
- Balittlet, K.B., Bartlett, D.S., Harriss R.C., Sebacher, D.I., 1987. Methane emissions along a salt marsh salinity gradient, *Biogeochem.* 4, 183-202.
- Blake, E.R., Rowland, F.S., 1988. Continuing worldwide increase in tropospheric methane, *Science* 239, 1129-1131.
- Bodelier, L.E., Laanbroek, J., 2004. Nitrogen as a regulatory factor of methane oxidation in soils and sediments, *FEMS Microbiol. Ecol.* 47, 265-277.
- Bouwman, A.F., 1991. Agronomic aspects of wetland rice cultivation and associated methane emissions, *Biogeochem.* 15, 65-88.
- Cicerone, R.J., Shetter, J.D., 1981 Sources of atmospheric methane: Measurements in rice paddies and a discussion, *J. Geophys. Res.* 86, 7203-7209.
- Conrad, R., 2007. Microbial ecology of methanogens and methanotrophs, *Adv. Agron.* 96, 1-63.
- Garica, J.L., Patel B.K.C., Ollivier, B., 2000. Taxonomic, phylogenetic and ecological diversity of methanogenic archaea, *Anaerobe* 6, 205-226.
- Hanna, J., Brian, A., J. Patrick, 2011. Salinity influence on methane emissions from tidal marches, *Soc. Wet. Sci.* 31, 831-842.
- Holzappel-Pschorn, A., Conrad, R., Seiler, W., 1986. Effects of vegetation on the emission of methane from submerged paddy soil, *Plant and Soil* 92, 223-233.
- Holzappel-Pschorn, A., Seiler, W., 1986. Methane emission during a cultivation period from an Italian rice paddy, *J. Geophys. Res.* 91, 11803-11814.

- Hori, K., Inubushi, K., Matsumoto, S., Wada, H., 1990. Competition of acetic acid between methane formation and sulfate reduction in paddy soil, *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.* 61, 572-578.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Bases. Summary for Policymakers.
- Jung, Y.S., Ryu, C.H., 2005. Soil problems and agricultural management of the reclaimed land, *Korean Journal of Crop Science* 60, 8-20.
- Kim, S.Y., Gutierrez, J., Kim, P.J., 2012. Considering winter cover crop selection as green manure to control methane emission during rice cultivation in paddy soil, *Agr. Ecosyst. and Environ.* 161, 130-136.
- Kim, S.Y., Lee, C.H., Gutierrez, J., Kim, P.J., 2013. Contribution of winter cover crop amendments on global warming potential in rice paddy soil during cultivation, *Plant and Soil*. 366, 273-286.
- Koo, J.W., Choi, J.K., Son, J.G., 1998. Soil properties of reclaimed tide lands and tidelands of western sea coast in Korea, *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 31, 120-127.
- Lee, C.H., Park, K.D., Jung, K.Y., Ali, M.A., Lee, D., Gutierrez, J., Kim, P.J., 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.
- Le Mer, J., Roger, P., 2001. Production, Oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review, *Eur. J. Soil Biol.* 37, 25-50.
- Lim, C.H., Kim, S.Y., Kim, P.J., 2011. Effect of gypsum application on reducing methane emission in a reclaimed coastal paddy soil, *Korean. J. Environ. Agric.* 30, 243-251.
- Mariko, S., Harazono, Y., Owa, N., Nouchi, L., 1991. Methane in flooded soil water and the emission through rice plants to the atmosphere, *Environ. Exp. Bot.* 31, 343-350.
- Minami, K., Neue, H.U., 1994. Rice paddies as a methane source, *Climatic change* 27, 13-26.
- Patel, G.B., Roth, L.A., 1977. Effect of sodium chloride on growth and methane production of methanogens, *Can. J. Microbiol.* 23, 893-897.
- 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, *Int. J. Greenh. Gas Con.* 3, 664-672.
- Rodhe, H., 1990. Comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect, *Science* 248, 1217-1219.
- Rolston, D.E., 1986. Gas flux, in: Klute A, (ed) *Methods of soil analysis, part 1, 2nded.*, Soil Sci Soc America and American Soc Agron. USA, pp. 1103-1119.
- 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*, p. 148, National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon.
- 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.
- Singh, J.S., Pandey, V.C., Singh, D.P., Singh, R.P., 2010. Influence of pyrite and farmyard manure on population dynamics of soil methanotroph and rice yield in saline rain-fed paddy field, *Agr. Ecosyst. and Environ.* 139, 74-79.
- Sposito, G., Mattigod, S.V., 1997. 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.
- U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, *USDA Handbook*. 60, 160.
- Wang Z.P., Delaune R.D., Masscheleyn P.H., Patrick W.H., 1993. Soil redox and pH effects on methane production in a flooded rice soil, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57, 382-385.
- Wassmann, R., Papen, H., Rennenberg, H., 1993. Methane emission from rice paddies and possible mitigation strategies, *Chemosphere* 26, 201-217.
- Wassmann, R., Neue, H.U., Alberto, M.C.R., Lantin, R.S., Bueno, C., Llenaresas, D., Arah, J.R.M., Papen, H., Seiler, W., Rennenberg, H., 1996. Fluxes and pools of methane in wetland rice soils with varying organic inputs, *Environ. Monit. Assess.* 42, 163-173.
- Wassmann, R., Aulakh, M.S., 2000. The role of rice plants in regulating mechanisms of methane emissions, *Biol. Fert. Soils* 31, 20-29.