

Evaluation of Methane Emissions with Water Regime before the Cultivation Period in Paddy Fields

Jun-Hong Park, Sang-Jo Park, Jong-Su Kim, Dong-Hwan Seo, So-Deuk Park, and Jin-Ho Kim^{1*}

GyeongSangBuk-Do Agriculture Reserch and Extention Services, Daegu, 702-708, Korea

¹School of Ecology and Environmental System, Kyungpook National University, Sangju, Gyeongbuk, 742-711, Korea

(Received: June 5 2015, Revised: August 17 2015, Accepted: August 18 2015)

Anaerobic decomposition of organic material in flooded rice fields produces methane, which escapes to the atmosphere primarily by transport through the rice plants. The annual amount of CH₄ emitted from a given area of rice is a function of the number and duration of crops grown, water regimes before and during cultivation period, and organic and inorganic soil amendments. Soil type, temperature, and rice cultivar also affect CH₄ emissions. The field experiment was conducted for three years to develop methane emission factor for water regime before the cultivation period from the rice fields. It was treated with three different water regimes prior to rice cultivation, namely: non-flooded pre-season < 180 days, non-flooded pre-season > 180 days, flooded per-season in which the minimum flooding interval is set to 30 days. Methane emission increased with days after transplanting and soil redox potential (Eh) decreased rapidly after flooding during the rice cultivation. The average methane emission fluxes were 5.47 kg CH₄ ha⁻¹ day⁻¹ in flooded pre-season > 30 days, 5.04 in non-flooded pre-season < 180 days and 4.62 in non-flooded pre-season > 180. Methane emission flux was highly correlated with soil temperature and soil Eh. Rice yields showed no difference among treatments with water regime before the cultivation period.

Key words: Methane, Water regime, Greenhouse gas, Rice, Redox potential (Eh)

Methane emission with water regime before the cultivation period in paddy soils.

Water regime prior to rice cultivation	2010	2011	2012	Average
	----- kg CH ₄ ha ⁻¹ day ⁻¹ -----			
Flooded pre-season > 30d	5.22a [†]	6.07a	5.13a	5.47a
Non flooded pre-season < 180d	4.83ab	5.62a	4.68ab	5.04a
Non flooded pre-season > 180d	4.33b	5.52a	4.00b	4.62a

[†] Numbers followed by the same letter with a column are not significantly different (Duncan test, $p < 0.05$).

Introduction

농업부문에서 배출되는 온실가스는 크게 메탄(CH_4)과 아산화질소(N_2O)로 구분되며 (IPCC, 1994; Rodhe, 1990), 메탄은 이산화탄소에 이어 2번째로 지구온난화에 영향이 높은 온실가스이다 (Karl and Kevin, 2003). 2010년 우리나라 농업부문에서 발생한 메탄 배출량은 약 6.1 백만 톤 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 으로 농업부문 메탄 배출량의 53%를 차지하고, 우리나라 메탄 총 배출량의 약 21.7%를 차지하는 양이다 (NIR, 2012).

벼 재배에 의한 메탄 발생은 저지대나 담수된 논에서 유기물이 혐기적으로 분해되는 과정에서 일어나며, 그 양의 90% 이상이 벼의 통기조직을 통해 대기 중으로 배출된다 (Conrad, 1993). 영농활동의 변수, 연간 재배횟수, 토양특성 등 불확실한 요소들의 영향 때문에 메탄배출량 산정은 매우 어렵다. 벼 재배에 따른 메탄 총 배출량은 하루 중 또는 작물생육 시기별 배출량의 변화를 예측할 수 있는 평균 배출량과 벼 재배면적이나 생산량을 근거로 추정하고 있다.

메탄 배출량은 지역과 측정 시기에 따라 변동이 크며, 토양 특성과 물관리, 유기물이나 화학비료의 사용량, 기후, 벼 품종, 수확 횟수나 재배기간 등에 따라서도 차이가 크다 (Neue and Sass, 1994; Yan et al., 2005). 이처럼 메탄 배출량의 변화폭이 큰 것은 기후, 토양과 논 의 특징, 영농방법, 특히 물 관리를 포함한 여러 가지 요인들이 시간적 혹은 공간적으로 다르게 영향을 미치기 때문이다. 또한 같은 지역, 유사한 환경조건에서도 메탄의 계절별 배출량은 큰 차이가 있고 특정지역의 메탄 배출량을 하나의 숫자로 나타내기 어렵기 때문에 지역별 또는 국가별 수준에서 통합적인 배출량이 사용된다. 따라서 현재의 선행연구 결과로서는 한국의 메탄 배출량 규정은 배출범위가 배출량보다 오히려 더 현실적일 수 있다.

국가단위의 온실가스 배출량은 온실가스 종류별로 배출에 영향을 미치는 요인들에 대한 각각의 배출계수 (emission factor)와 배출계수에 해당하는 활동량 자료 (activity data) 들을 곱해 얻은 배출량들을 종합하여 계산한다. 배출계수는 재배환경이나 영농방법별 단위면적이나 단위 사용량에 대한 온실가스의 단위 배출량으로 기본계수 (baseline factor), 요인별 보정계수 (scaling factors), 임의 값 (default value) 등이 있다. 활동량은 배출계수를 산출할 때 이용하는 통계 자료이다. IPCC 2006 가이드라인에 의하면 메탄 배출량 평가는 기본배출계수에 재배기간 중 물관리 방법, 작기전 담수일수, 유기물 사용량, 토성이나 품종계수에 관한 보정계수들을 곱해서 종합적인 메탄배출계수를 구한 후 재배면적, 재배일수를 산입하여 메탄의 배출량을 평가하도록 하고 있다.

담수토양에서 메탄 생성의 주요 메커니즘은 수소 공여체로서 지방산 또는 알콜, 수소에 의한 이산화탄소의 환원과

메탄 생성 박테리아에 의한 아세트산 또는 메탄올의 trans-methylation 과정을 거쳐 주로 생성된다 (Takai, 1970; Conrad, 1989). Patrick (1981)은 메탄을 생산하기 위한 토양의 산화환원 전위는 대략 -150 mV 이하여야 한다고 하였고, 토양온도는 토양미생물 활동에 영향을 주는 중요한 요소로서 메탄생성은 담수층적토에서 토양온도가 35°C 일 때 최고에 도달하는 것으로 알려져 있다 (Yamane and Sato, 1961). 반면에 Roy and conard (1999)은 질산에 의한 메탄 생성 억제작용은 산화환원전위와는 무관하다고 하였다.

메탄발생에 영향을 미치는 또 다른 요인으로 벼 재배 이전에 논에 물을 대는 이양전 담수일수가 중요하다. 1996년 가이드라인에는 이에 관한 규정이 없으나 2006년 IPCC 2006 가이드라인에서는 3가지 방법에 대한 메탄 배출계수를 제시하고 있다. 작기전 비담수 180일 미만 처리는 벼 2기 작 재배하는 경우이고, 작기전 비담수 180일 이상 처리는 우리나라와 같이 1모작 재배를 하는 경우로 휴경기간 동안에는 담수하지 않고 이양 직전 담수하는 경우이며, 작기전 담수 30일 이상 처리는 벼 이양전 담수를 최소한 30일 이상 하는 경우이며 경운을 위하여 짧은 기간 담수는 이에 해당되지 않는다.

우리나라와 같이 벼 수확 후 겨울동안 담수하지 않을 경우 작기전 180일 이상 비담수 조건에 해당하여 배출계수가 0.68에 해당하지만 담수 방법별 배출계수가 없는 경우 통합 배출계수인 1.22를 사용하도록 규정되어 있어(IPCC, 2006) 배출량이 거의 2배 이상 과다추정 될 수 있으므로 이에 대한 배출계수 개발이 필요하다.

따라서 본 연구는 2010년부터 2012년까지 3년간 벼 재배 시 작기전 물관리 방법에 따른 메탄발생양상 및 배출량을 평가하여 벼에 대한 국가고유배출계수를 개발하고자 수행하였다.

Materials and Methods

시험포장 설계 및 벼 재배 본 연구는 대구광역시 북구 칠곡중앙대로 136길 47번지에 위치하고 있는 경상북도 농업기술원 포장 (북위 : $35^\circ 57' 02''$, 경도 : $128^\circ 33' 52''$, 해발고도 50 m)에서 시험을 수행하였다. 시험토양은 하성평탄지에 분포된 신흥토 (fine loamy, mixed, mesic family of Aeric Fluvaquentic Endoaquepts)으로 배수가 약간 불량한 논토양이며 현재까지 벼를 계속 재배하고 있는 논토양이었고 시험전 토양이화학성은 Table 1과 같다. 메탄배출량 평가를 위해서 논에 유기물을 투입하지 않고, 이양전 180일 이내에는 담수하지 않은 조건과 이양 이후부터 수확기까지 지속적으로 담수상태를 유지하는 조건에서 시험을 수행하였으며, 일주일에 2회 메탄 flux를 측정하였다. 벼 재배기간 전 물관리방법은 작기전 담수기간 30일 이상, 비담수기간

Table 1. Physico-chemical properties of paddy soil used in experiment.

pH	OM	Avail. P ₂ O ₅	Exch. Cations			EC	Soil texture
			K	Ca	Mg		
(1:5)	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	-----	cmol _c kg ⁻¹	-----	dS m ⁻¹	
6.7	25	61	0.54	5.1	1.6	0.30	Silt loam

Table 2. General information of water regimes and rice cultivation.

Year	Parameters	Water regime prior to rice cultivation		
		Flooded pre-season > 30d	Non flooded pre-season < 180d	Non flooded pre-season > 180d
2010	Flooding	28 Mar.	4 Apr.	26 May
	Draining	22 Sep.	22 Sep.	22 Sep.
	Cultivation day	122	122	122
2011	Flooding	25 Mar.	5 Apr.	25 May
	Draining	20 Sep.	20 Sep.	20 Sep.
	Cultivation day	129	129	129
2012	Flooding	2 Apr.	10 Apr.	25 May
	Draining	21 Sep.	21 Sep.	21 Sep.
	Cultivation day	131	131	131

180일 이상, 비답수기간 180일 미만 처리로 구분하였고, 년도별 답수일, 배수일 및 벼 재배기간은 Table 2와 같이 처리하였으며, 유기물을 사용하지 않았다. 벼 시험품종은 칠보벼 (*Oryza sativa* L, cv. Chilbobyeo)로 30일간 육묘한 후 주당 4~5분씩 재식거리 30×14 cm로 6월 1일에 손으로 이앙하였으며, 삼요소 성분별 시비량은 질소 90 kg ha⁻¹, 인산 45 kg ha⁻¹, 칼리 57 kg ha⁻¹ 을 사용하였다. 이앙 7일전에 경운 후 썩레질을 실시하였으며 재배기간 동안 중간 물떼기를 하지 않고 지속적으로 답수 상태를 유지하였다.

메탄 시료채취 및 분석 논토양으로부터 발생하는 메탄가스 채취와 분석은 Ko et al. (2011)의 방법에 준하여 실시하였다. 메탄가스 시료채취는 polyacrylic plastic 재질의 밀폐식 chamber (60 cm×60 cm×100 cm)를 이용하였으며 메탄가스는 오전 10시경부터 30분간 포집하였으며 삼방밸브가 장착된 60 mL polypropylene 주사기로 채취하여 시료채취 당일 불꽃이온화검출기 (Flame Ionization Detector, FID)가 장착된 가스크로마토그래프 (Agilent GC6890, USA)를 사용하여 분석하였다. CH₄ 분석을 위해 Porapak Q column (Stainless steel, 1/8"×2 m) 칼럼을 사용하였으며 column oven 온도는 40°C, injector 온도는 50°C, detector 온도는 250°C로 분석하였다.

GC로 분석된 시료의 농도로부터 농경지 온실가스의 단위 시간당 배출량은 Eq. 1에 따라 구하였다.

$$F = \rho \times \frac{273}{273 + (\text{처음온도} + \text{나중온도})/2} \times H \times \Delta C / h \quad (\text{Eq. 1})$$

F : 단위시간당 가스배출량 (mg CH₄ m² h⁻¹)

ρ : 밀도 (0.714 mg cm⁻³)

H : 상자내 수면으로부터 상자 위쪽 끝부분까지의 높이 (cm)

ΔC : 시료채취 전후의 농도차 (ppm)

h : 시료채취 시간

토양 분석 및 벼 수량 조사 토양은 시험전과 벼 수확 후 표토 0~15 cm 깊이에서 채취하였고 7일간 풍건하여 2 mm 체를 통과된 것을 분석에 사용하였다. 토양분석은 농업과학기술원의 토양 및 식물체 분석법 (NIAS, 2000)에 준하여 실시하였으며, 토양 pH는 초자전극법, 유기물함량은 Tyurin법, 유효인산은 Lancaster법으로 분석하였고, 치환성 양이온 함량은 1M NH₄OAc 용액 (pH 7.0)으로 추출하여 원자흡광분석기 (Alalyst 800, PerkinElmer, USA)로 분석하였으며, 토성은 비중계법으로 측정하였다. 산화환원전위는 Rowell (1994)의 방법에 따라 분석하였으며 백금전극을 이용하여 측정하였다. 벼 생육 및 수량은 농촌진흥청 농사시험연구조사기준 (RDA, 1995)에 준하여 각 시험구마다 20주씩 조사하였다.

통계분석 통계분석은 SAS 프로그램 (Ver. 9.2, SAS, Cary, NC, USA)을 이용하였으며, 5% 수준에서 처리간 차이의 통계적 유의성을 검토하였다.

Results and Discussion

답수일수별 CH₄ 배출량 변화 연도별 작기전 답수일

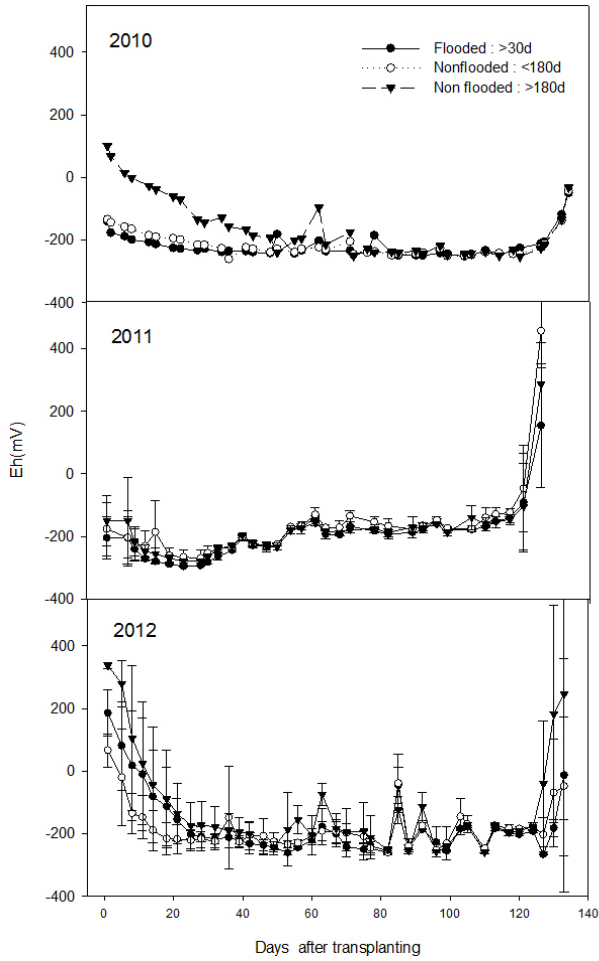


Fig. 1. Changes of Eh with water regime before the cultivation period in paddy soils.

수별 재배기간중 논토양의 산화환원전위는 연도별 차이는 있었지만 이양후 경과일수에 따라 감소하는 경향을 나타내었고, 이양후 20일경 부터는 산화환원전위가 -250 mV미만을 유지하였고 수확기 배수 이후부터 급격하게 증가하는 경향을 보였다 (Fig. 1). 이양후 초기의 산화환원전위는 작기 전 담수 30일이상 > 비담수 180일 미만 > 비담수 180일 이상 순으로 처리간에 차이를 나타내었지만, 이양후 40일경 부터는 처리간에 차이를 나타내지 않았다. Kim (2009)은 혐기조건에서 토양 중 유기물의 분해특성에 따라 메탄의 배출양상이 영향을 받으며, 수온, 토양온도와는 상관성이 다소 낮은 것으로 보고하였다. 또한 산화환원전위를 -200 mV에서 -300 mV로 조절하여 벼를 재배할 경우 메탄의 발생량이 10배 정도 증가하였으며, 볏짚을 사용하지 않았거나 포장용수량에 해당하는 토양수분으로 조절한 처리에서는 상대적으로 높은 산화환원전위와 낮은 메탄배출량을 보였다 (Lee et al., 2005). 따라서 메탄의 배출량은 토양의 산화환원전위 변화와 매우 높은 관련성을 나타냈으며 토양중 메탄이 생성되기 위해서는 -200 mV 이하로 되어야 하며, 메탄생성을 위한 토양의 산화환원전위가 메탄배출을 조절하는 주요

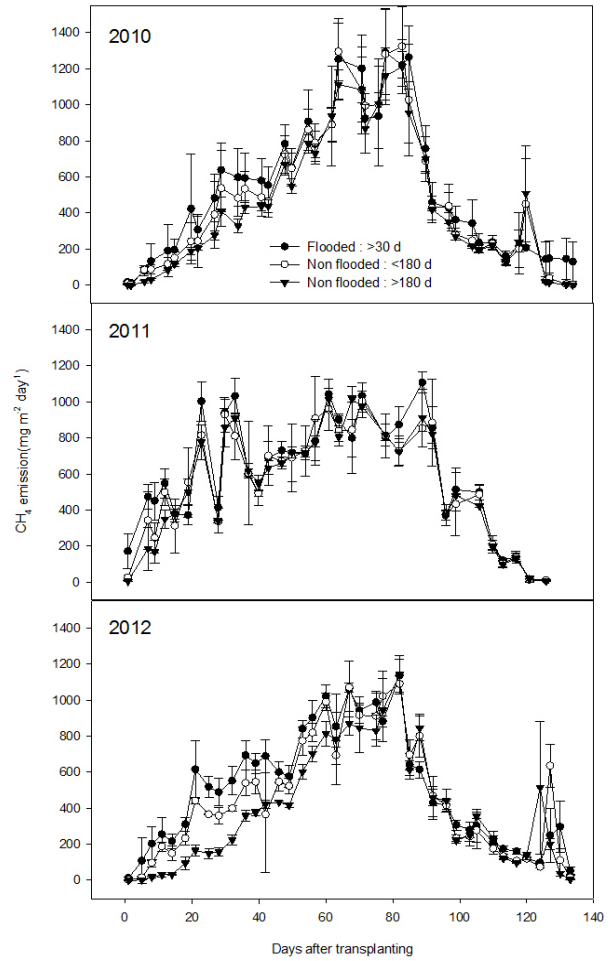


Fig. 2. Changes of CH₄ emission fluxes with water regime before the cultivation period in paddy soils.

인자로 판단되었다.

벼 재배기간중의 논토양의 메탄 발생은 벼 초기생육단계인 이양후 20일 까지는 낮았고, 벼의 최대분얼기 이후 생육이 증가하였고 산화환원전위가 -200 mV 이하로 낮아짐에 따라 메탄 발생량이 큰 폭으로 증가하는 경향을 보였다 (Fig. 2). 이양후 60~80일경에 일배출량이 800~1,200 mg m⁻² day⁻¹으로 가장 높았고, 그 이후에는 급격하게 감소하는 경향을 나타내었다. 2012년의 경우는 비담수 180일 이상 처리구는 2010년 2011년에 비해 벼 생육초기에 메탄 배출량이 아주 낮게 나타나 큰 차이를 보였는데, 이는 Fig. 1에서와 같이 높은 산화환원전위로 메탄 발생량이 낮은 것으로 판단된다. Seo et al. (2011)은 논토양 종류에 따라서 회색토는 이양 20일 이후 700~900 mg m⁻² day⁻¹의 메탄 배출량을 나타낸 반면, 적황색토는 이양후 80일경까지는 100mg m⁻² day⁻¹ 미만의 메탄 배출량을 나타내어 토양 종류에 따라 큰 차이를 나타내었다. 논토양 유형별로는 습논 674.3 kg ha⁻¹, 미숙논 431.4 kg ha⁻¹, 보통논 315.9 kg ha⁻¹, 사질논 160.6 kg ha⁻¹의 순으로 메탄이 배출되었는데, 이는 습논에서 메탄 배출의 기질이 되는 토양 유기물 함량이 높

Table 3. Methane emission with water regime before the cultivation period in paddy soils.

Water regime prior to rice cultivation	2010	2011	2012	Average
----- kg CH ₄ ha ⁻¹ day ⁻¹ -----				
Flooded pre-season > 30d	5.22a [†]	6.07a	5.13a	5.47a
Non flooded pre-season < 180d	4.83ab	5.62a	4.68ab	5.04a
Non flooded pre-season > 180d	4.33b	5.52a	4.00b	4.62a

[†]Numbers followed by the same letter with a column are not significantly different (Duncan test, *p* < 0.05).

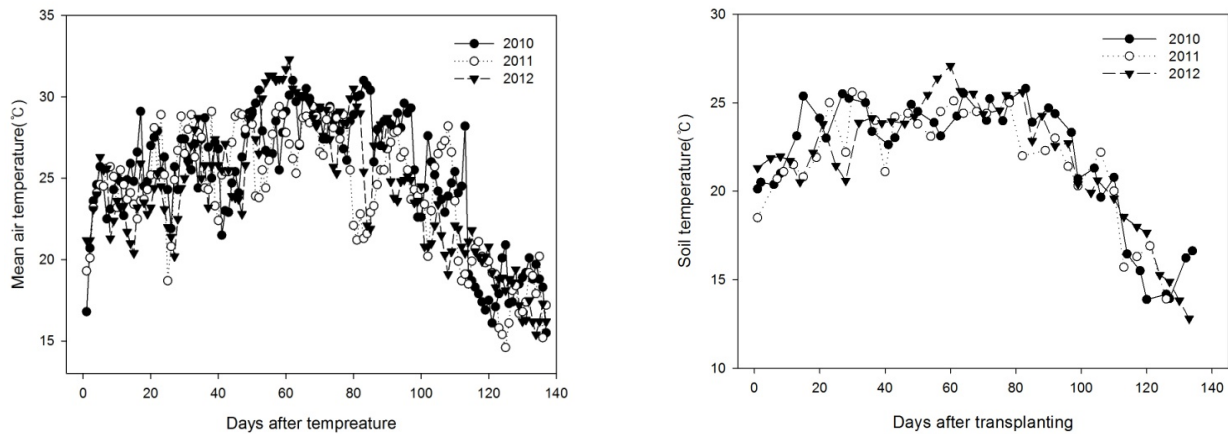


Fig. 3. Mean air and soil temperature with days after transplanting.

고 느린 투수속도로 인하여 토양 산화환원전위가 낮아 토양이 혐기상태로 강하게 조성되어 메탄 배출량이 증가한 것으로 보고하였는데 (Ko et al., 2011), 본 시험에 사용된 토양이 배수가 약간 불량한 신흥토로 메탄 배출량이 높았던 것으로 판단된다.

메탄배출계수 산정 및 요인분석 년도별 메탄 배출량은 Table 3과 같다. 답수 30일 이상이 5.22~6.07 kg CH₄ ha⁻¹ day⁻¹, 비답수 180일 미만 4.68~5.62 kg CH₄ ha⁻¹ day⁻¹, 비답수 180일 이상 4.00~5.52 kg CH₄ ha⁻¹ day⁻¹로 처리간에 변화폭이 큰 것으로 나타났는데, 이는 메탄 배출이 기후, 토양조건 등을 포함한 여러 가지 요소에 의해 결정되기 때문인 것으로 추측된다. 메탄 발생은 토양의 산화환원전위와 밀접한 관련이 있으며 산화환원전위가 -150 mV 이하의 혐기적 상태에서 유기물의 미생물 분해에 의해 생성되는 것으로 보고 (Wang et al., 1993)되어 있는데, 본 연구에서도 답수 30일 이상, 비답수 180일 미만의 경우 작기전 답수기간이 길어짐에 따라 초기 산화환원전위가 낮아 비답수 180일 이상에 비해 메탄 발생량이 증가한 것으로 추측된다. IPCC (2006) 가이드라인에서는 작기전 물관리에 따라 통합배출계수 1.22, 세부배출계수로 비답수 180일 이상 1.00 kg CH₄ ha⁻¹ day⁻¹, 비답수 180일 미만 0.68 kg CH₄ ha⁻¹ day⁻¹, 답수 30일 이상 1.90 kg CH₄ ha⁻¹ day⁻¹의 메탄 배출계수를 제시하고 있다. 3년 평균 메탄배출계수는 답수 30일 이상 5.47 kg CH₄ ha⁻¹ day⁻¹, 비답수 180일 미만 5.04 kg CH₄

ha⁻¹ day⁻¹, 비답수 180일 이상 4.62 kg CH₄ ha⁻¹ day⁻¹로 IPCC (2006) 가이드라인에서 제시한 배출계수보다 높았다.

벼 재배기간의 평균기온과 지온은 각각 Fig. 3과 같다. 벼 재배기간 동안의 평균기온은 2010년 25.1°C, 2011년 24.2°C, 2012년 24.3°C로 평년기온 23.5°C보다 높았고, 적산온도는 2010년 3,441.9°C, 2011년 3,321.5°C, 2012년 3,324.6°C이었다.

Fig. 4는 지온 및 산화환원전위 (Eh)와 메탄배출량과의 상관관계를 나타낸 것으로서 메탄배출량과 지온은 r=0.797 (*p*<0.001)로 강한 정적상관관계, 산화환원전위는 r=0.524 (*p*<0.001)으로 약한 부적상관관계를 나타내었다. 메탄배출량은 지역과 측정시기에 따라 변동이 크며, 토양 특성과 온도, 물관리 방법, 유기물이나 화학비료의 사용량, 벼 품종, 수확 횟수나 재배기간 등에 따라서도 차이가 크고 (Neue and Sass, 1994), 지온은 메탄 배출량과의 상관관계가 있다는 보고(Lee et al., 1997)로 보아 지온은 메탄 배출의 중요한 인자인 것으로 생각된다.

토양화학성 및 벼 수량 작기전 답수일수별 시험후 토양화학성은 Table 4와 같이 물관리 방법에 따른 토양의 화학성에서는 차이가 없었다. 메탄의 생성기작은 메탄 생성균의 기질이 되는 유기물, 토양 산화환원전위, 토양온도, 토양물리성 등에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있으며 (Minami, 1993), 특히 유기물 사용량과 메탄 발생량과는 고도의 정의상관이 있는 것으로 보고하고 있는데 (Ju et. Al.,

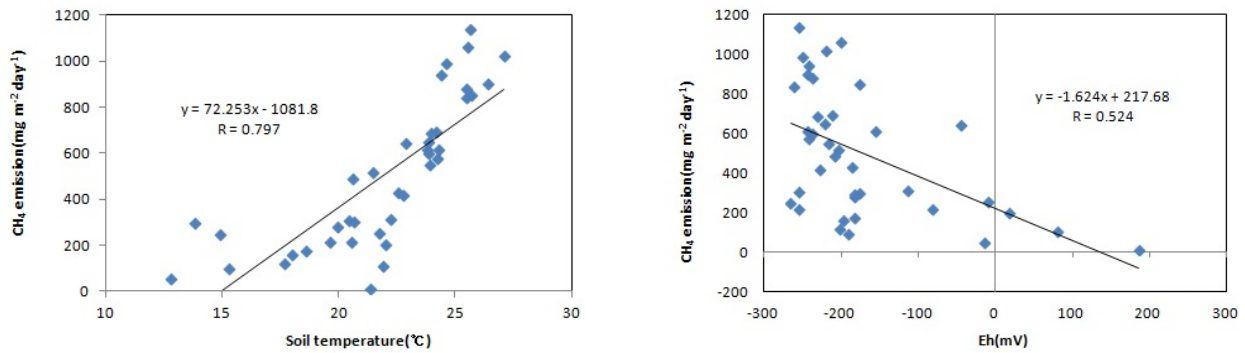


Fig. 4. Correlation between soil temperature, Eh and CH₄ emissions.

Table 4. Soil chemical properties after harvest of rice in paddy soils.

Water regime prior to rice cultivation	pH	OM	Avail. P ₂ O ₅	Exch. Cations			EC
				K	Ca	Mg	
	(1:5)	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹			dS m ⁻¹
Flooded pre-season > 30d	5.9a [†]	23.5a	56.3a	0.4a	5.3a	1.5a	0.31a
Non flooded pre-season < 180d	5.8a	23.7a	60.2a	0.4a	5.1a	1.3a	0.29a
Non flooded pre-season > 180d	5.8a	22.9a	65.4a	0.4a	5.1a	1.3a	0.26a

[†]Numbers followed by the same letter with a column are not significantly different (Duncan test, *p* < 0.05).

Table 5. Yields and yield components of rice with water regime before the cultivation period in paddy soils.

Water regime prior to rice cultivation	Culm length (cm)	Panicle length (cm)	No. of panicles plant ⁻¹	No. of spikelet panicle ⁻¹	Wt. of 1,000 grains (g)	Ripened grain (%)	Yield (kg/10a)
Flooded pre-season > 30d	76.0a [†]	15.9a	20.3a	69.4a	23.4a	91.0a	553a
Non flooded pre-season < 180d	75.4a	15.8a	19.1a	71.0a	23.9a	90.5a	546a
Non flooded pre-season > 180d	75.3a	16.6a	19.0a	71.4a	23.4a	91.1a	549a

[†]Numbers followed by the same letter with a column are not significantly different (Duncan test, *p* < 0.05).

2013), 본 연구에서는 유기물을 전혀 사용하지 않아 시험후 토양 화학성에서는 차이가 없는 것으로 판단된다.

작기전 담수일수 처리별 벼 수량구성요소 및 수량은 Table 5와 같다. 처리간에 수량구성요소는 뚜렷한 차이는 나타나지 않았고 수량은 546~553 kg/10 a로 작기전 물관리와 벼 수량과는 상관성이 없는 것으로 생각된다. 벼 이앙시기에서 권장되는 이앙일 보다 일찍 이앙하는 것은 토양 담수기간의 연장으로 메탄 발생량이 증가하고 분얼수, 수수 등 수량구성요소가 증가됨에 따라 벼 수량이 증가되는 것으로 보고하고 있다 (Kim et al., 2013). 작기중 물관리에서 토양수분이 20 kPa, 30 kPa에서는 벼 수량이 각각 21%, 34% 감소하였고 작기중 토양수분이 10~15 kPa와 상시담수에서는 벼 수량의 감소 없이 메탄발생량을 38~61%까지 감소시킬 수 있다고 보고 (Khosa et al., 2011)하였는데, 본 시험에서도 벼 재배기간 중에는 지속적으로 담수상태를 유지하였고 이앙시기가 동일하였으므로 수량에서 차이가 없는 것으로 판단된다.

Conclusion

IPCC 2006 가이드라인에 의한 메탄 배출량평가는 기본 배출계수에 재배기간 중 물관리 방법, 작기전 담수일수, 유기물 사용량, 토성이나 품종계수에 관한 보정계수들을 곱해서 메탄 배출계수를 산출하는데, 본 연구는 2010년부터 2012년까지 3년간 벼 재배시 작기전 물관리 방법에 따른 메탄발생양상 및 배출량을 평가하였다. 작기전 담수일수별 논 토양의 산화환원전위는 연도별 차이는 있었으나, 이양후 경과일수에 따라 감소하는 경향이였다. 이양후 초기의 산화환원전위는 작기전 담수 30일 이상 > 비담수 180일 미만 > 비담수 180일 이상 순이였다. 메탄배출계수는 담수 30일 이상 5.50 kg CH₄ ha⁻¹ day⁻¹, 비담수 180일 미만 5.04 kg CH₄ ha⁻¹ day⁻¹, 비담수 180일 이상 4.61 kg CH₄ ha⁻¹ day⁻¹로 IPCC 가이드라인에서 제시한 배출계수보다 높았다. 메탄배출량은 지온 및 산화환원전위와 밀접한 관련이 있었다. 작기전 물관리 방법에 따른 수량은 차이가 없었다.

References

- Conrad, R. 1989. Control of methane production in terrestrial ecosystems. In: Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere, M.O. Andreae and D.S. Schimel(eds.), 39-58.
- Conrad, R. 1993. Mechanism controlling methane emission from wetland rice field. In R.S. Oremland (ed) The biochemistry of global change: Radiative trace gases, Chapman & Hall. New York. pp. 317-335.
- IPCC. 1994. Climate change 1994: Radiation forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York. p. 399.
- IPCC. 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Japan.
- Ju, O.K., T.J. Won, K.R. Cho, B.R. Choi, J.S. Seo, I.T. Park and G.Y. Kim. 2013. New estimates of CH₄ emission scaling factors by amount of rice straw applied from Korea paddy fields. *Korean J. Envir. Agri.* 32(3):179-184.
- Karl, T.R. and E.T. Kevin. 2003. Modern global climate change. *Science* 302:1719-1723.
- Kim, G.Y. 2009. Emission and evaluation of greenhouse gas (CO₂, CH₄, N₂O) in paddy and upland field. p. 25-29. Ph.D. Thesis. Chungbuk National University. Cheongju, Korea.
- Ko, J.Y., J.S. Lee, K.S. Woo, S.B. Song, J.R. Kang, M.C. Seo, D.Y. Kwak, B.G. Oh, and M.H. Nam. 2011. Effects of soil organic matter contents, paddy types and agricultural climatic zone on CH₄ emissions from rice paddy field. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(5):887-894.
- Khosa, M.K., B.D. Sidhu, and D.K. Benbi. 2011. Methane emission from rice fields in relation to management of irrigation water. *J. Environ. Biol.* 32:169-172.
- Lee, G.B., J.G. Kim, C.W. Park, Y.K. Shin, D.B. Lee, and J.D. Kim. 2005. Effects of irrigation water depth on greenhouse gas emission in paddy field. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 38(3):150-156.
- Lee, K.B., D.B. Lee, J.G. Kim and Y.W. Kim. 1997. Effect of rice cultural patterns on methane emission from a Korean paddy soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 30(1)35-40.
- Minami, K., 1993. Methane from rice production, Res. Rep. Div. Environ. Planning 9, 243-258.
- Neue, H.U., and R. Sass. 1994. Trace gas emissions from rice fields. In: Global atmospheric-biospheric chemistry Plenum Press, New York. 119-148.
- NIAS. 2000. Method of analysis soil and plant. National Institute of Agricultural Science and Technology, Suwon, Korea.
- NIR. 2012. National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea. Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea.
- Patrick, W.H. Jr. 1981. The role of inorganic redox systems in controlling reduction in paddy soils. In: Proc. Symp. Paddy Soil, 107-117, Science Press, Beijing, China, Springer-Verlag.
- RDA (Rural Development Administration). 1995. Standard methods for agri-cultural experiment. Rural Development Administration, Suwon, Korea.
- Rodhe, H. 1990. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect. *Science.* 247:1217-1219.
- Rowell, D.L. 1994. Air in soils-supply and demand. p. 125-129. *Soil Science : Method and applications.* Longman Scientific and Technical, Larlow, Essex, England.
- Roy, R. and R. Conrad. 1999. Effect of methanogenic precursors (acetate, hydrogen, propionate) on the suppression of methane production by nitrate in anoxic rice field soil. *FEMS Microbiology Ecology.* 28:49-61.
- Seo, Y.J., J.H. Park, C.Y. Kim, J.S. Kim, D.H. Cho, S.Y. Choi, S.D. Park, H.C. Jung, D.B. Lee, K.S. Kim and M. Park. 2011. Effects of soil types on methane gas emission in paddy during rice cultivation. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(6):1220-1225.
- Takai, Y. 1970. The mechanism of methane fermentation in flooded paddy soil. *Soil Sci. Plant Nutr.* 16: 238-244.
- Wang, Z.P., R.D. Delaune, P.H. Masscheleyn, and Jr. W.H. Patrick. 1993. Soil redox and pH effects on methane production in a flooded rice soil. *Soil Soc. Am. J.* 57:382-385.
- Yan, X., K. Yagi, H. Akiyama and H. Akimoto. 2005. Statistical analysis of major variables controlling methane emission from rice field. *Global Change Biol.*, 11:1131-1141.
- Yamane, I. and K. Sato. 1961. Effect of temperature on the formation of gases and ammonium nitrogen in the water-logged soils. *Sci. Rep. Res. Inst. Tohoku Univ. D (Agr.)* 12:31-46.