

Short Communication

Open Access

국내 벼 논에서 메탄 기본배출계수 개발

김건엽,¹ 정현철,¹ 주옥정,² 김희권,³ 박준홍,⁴ 권효숙,^{5**} 김필주^{5,6*}

¹농촌진흥청 국립농업과학원, ²경기도 농업기술원, ³전라남도 농업기술원, ⁴경상북도 농업기술원, ⁵경상대학교 응용생명과학부, ⁶경상대학교 농업생명과학연구원

Establishment of Baseline Emission Factor of Methane in Korean Rice Paddy Soil

Gun-Yeob Kim,¹ Hyun-Cheol Jeong,¹ Ok-Jung Ju,² Hee-Kwon Kim,³ Jun-Hong Park,⁴ Hyo-Suk Gwon^{5**} and Pil-Joo Kim^{5,6*} (¹National Academy of Agricultural Science, RDA, ²Gyeonggi-do Agricultural Research and Extension Services, ³Jeollanam-do Agricultural Research and Extension Services, ⁴Gyeongsangbuk-do Agricultural Research and Extension Services, ⁵Division of Applied Life Science, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701, South Korea, ⁶Institute of Agriculture and Life Science, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701, South Korea)

Received: 9 November 2013 / Revised: 11 November 2013 / Accepted: 15 November 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: Methane (CH₄) emission is calculated using the default CH₄ emission factor as recommended by the International Panel on Climate Change(IPCC guidelines). However, the default emission factor has been derived using including the data from other countries having different soil and environmental conditions and may not reflect the real CH₄ emission rates in Korea. The objective of this study was to estimate the baseline emission factor of CH₄ in Korean paddy soils during rice cultivation.

METHODS AND RESULTS: Methane emission patterns were characterized in four different paddy soils across country for a consecutive 3 years during the rice cultivation period. Rice plants were cultivated under continuous flooding and fertilized using the recommended chemical fertilization in Korea (N-P₂O₅-K₂O=90-45-57kg/ha). The

mean CH₄ emission rate was 2.32 kg CH₄/ha/day and the uncertainty of the investigated data was 21.7%, with a valuable error range at 1.82-2.82 kg CH₄/ha/day with a 95% confidence interval.

CONCLUSION(S): Conclusively, the Korean paddy soils' baseline emission factor of CH₄ is approximately 2.32 kg CH₄/ha/day and can be used to estimate the CH₄ emissions more exactly.

Key words: Baseline emission factor, Korean paddy soil, Methane, Rice

서론

Revised 2006 IPCC Guidelines 상에는 벼논에서 메탄 배출량을 산정하는 방법론은 크게 Tier 1, 2, 3로 구분하고 있다(IPCC, 2006). Tiers는 방법의 복잡성 정도를 나타내는 것으로서, 방법론의 선택은 배출계수(emission factor) 및 활동자료(activity data) 확보수준에 따라 달라질 수 있다. 농경지 중 벼논이 거의 없거나, 혹은 우리나라와 같이 국가고유의 배출계수가 아직 준비되어 있지 않을 경우에는 Tier 1 방법으로 메탄 배출량을 산정할 수 있다. 이때는 IPCC 가이드라

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

**공동교신저자(Corresponding author),
Phone: +82-55-772-1966; Fax: +82-55-772-1969;
E-mail: sky9420@paran.com

인에서 제시하고 있는 메탄 배출계수와 활동자료 등을 활용하여 연간 메탄 배출량을 산정할 수 있다(IPCC, 2006). 이와는 상대적으로 Tier 2 수준에서는 각국 고유 메탄 배출계수와 활동자료를 활용하여 정확한 메탄 배출량을 산정한다. Tier 2 수준으로 벼논의 메탄 배출량을 산정하기 위해서는 우리나라 벼논에서의 고유 메탄 배출계수를 우선적으로 산정하여야 한다. 그리고 메탄 발생량에 영향을 줄 수 있는 다양한 경중환경에서의 보정계수(Scaling factor)의 조사가 선행되어야 한다(IPCC, 2006). Tier 3은 장기간 반복시험을 통해 얻어진 각 지역 별 고유 메탄 배출특성과 메탄 배출량 관련 제한인자, 예를 들어 기후, 토양 및 작물 특성 등과의 상관성을 이용하여 지역고유의 메탄 배출량을 추정하는 방법론으로서 높은 수준의 정확한 자료를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다(IPCC, 2006). 그러나 Tier 3 수준의 메탄 배출량 평가를 위해서는 메탄 배출량 관련 다양한 제한인자의 조사가 선행되어야 한다.

벼논에서 메탄 배출량은 1일 메탄배출계수(kg CH₄/ha/day)와 벼 재배기간(day), 벼 재배면적(ha/yr)의 곱을 통해 산정하고 있다(IPCC, 2006). 지금까지 우리나라 벼논에서 메탄 배출량은 Revised 2006 IPCC Guidelines에서 제시하고 있는 default 값(1.30 kg CH₄/ha/day)을 이용하여 Tier 1 수준에서 평가되어 왔다. 이는 우리나라 벼논에서 발생하는 실제 메탄 배출량과는 상당한 차이가 있을 것으로 생각된다. 벼논에서의 메탄배출계수는 지역의 기후특성, 토양의 유기물 함량, 시비 및 물 관리 유형 등에 따라 크게 달라 질 수 있는 특징을 가지고 있다(Yagi et al., 1996; Sass et al., 1994; Wassmann and Aulakh, 2000). 그러나 현재 Revised 2006 IPCC Guidelines에서 제시하고 있는 default 값은 일본이 아시아 전역의 벼 재배지 103 site로부터 수집된 868개의 메탄 배출량 자료(seasonal data)를 취합 통계처리를 통해 얻어진 평균값을 사용하고 있다(Yan et al., 2005; IPCC, 2006). 상당수의 자료가 우리나라 토양보다 유기물 함량이 낮은 남중국 베트남 태국 등에서 조사된 자료가 포함되어 있어 우리나라 벼논에서의 메탄 배출계수와는 다소 차이가 있을 것으로 판단된다. 우리나라 벼논에서의 정확한 메탄 배출량을 산정하기 위해서는 우리의 토양과 기후특성, 그리고 벼 재배 환경에 맞는 고유의 메탄 배출계수(baseline emission factor)의 설정이 먼저 이루어져야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 우리나라 벼논에서 고유의 메탄배출계수를 산정하기 위해 전국의 4개 지역 벼논에서 상시담수와 표준시비(N-P₂O₅-K₂O=90-45-57 kg/ha) 하에서 벼 재배기간 중 메탄 배출량 변화를 조사하였다.

재료 및 방법

메탄 배출계수 개발의 이론적 배경

Revised 2006 IPCC Guidelines에 따라 벼논에서 메탄 총 배출량은 아래 식 1과 같이 1일 메탄 배출계수(daily emission factor)와 총 재배기간, 그리고 재배면적을 이용하

여 환산하고 있다.

$$CH_4 \text{ Emissions (Gg/yr)} = \sum_{ijk} (EF_{ijk} \times t_{ijk} \times A_{ijk} \times 10^6) \text{ (식 1)}$$

여기서, EF_{ijk} (kg CH₄/ha/day)는 i, j, k 조건에서의 1일 메탄 배출계수
 t_{ijk} (day)는 I, j, k 조건에서의 벼 재배기간
 A_{ijk} (ha/year)는 연간 벼 재배면적

이때 1일 메탄 배출계수(EF_i, kg CH₄/ha/day)는 식 2에서와 같이 기본배출계수(EF_c)와 주요 작물재배 조건 별 보정계수(scaling factor, SF)를 이용하여 환산하고 있다.

$$EF_i = EF_c \times SF_w \times SF_p \times SF_o \times SF_{s,r} \text{ (식 2)}$$

여기서, EF_c (kg CH₄/ha/day)는 기본배출계수 (baseline emission factor)
 SF_w는 벼 재배기간 중 물 관리방법(water regime)에 대한 보정계수
 SF_p는 벼 재배 전(pre-season) 물 관리방법에 대한 보정계수
 SF_o는 유기질 토양개량제 처리에 대한 보정계수
 SF_{s,r}는 가능하다면 토양유형, 벼 품종 등에 대한 보정계수

우리나라 벼논에서의 메탄 배출량을 정확하게 산정하기 위해서는 1차적으로 우리의 벼 재배환경 하에서의 고유 기본 배출계수(baseline emission factor, EF_c)의 설정이 선행되어야 한다.

기본 메탄 배출계수 설정을 위한 조사지역 선정

우리나라 벼논의 메탄 기본배출계수(EF_c, baseline emission factor)를 설정하기 위해, 아래 Table 1에서와 같이 남한의 북부지역(경기도 화성) 중부지역(대구) 남부지역(광주와 경남 진주)의 벼논을 조사포장으로 선정하였다. 이때 광주와 대구 지역에서는 2009년 포장을 설치하였으며, 화성과 진주지역에서는 2010년 포장을 설치 운영하였다.

기본 메탄배출계수를 얻기 위해 농촌진흥청에서 고시하고 있는 표준 벼 재배관리방법(RDA, 1999), 예를 들어 작기 중 상시담수(continuous flooding) 조건에서 추천시비량(N-P₂O₅-K₂O=90-45-57 kg/ha)으로 벼를 재배하였다(Table 2). 벼 재배관리방법은 지역의 특성에 따라 다소간의 차이가 있었으나, 기본적으로 이앙 2-3주 전 담수를 시작하여 벼 수확 약 1개월 전까지 배수 관리하였다. 이때 재식거리는 15 cm × 30 cm로 조절하였다. 그리고 공시품종은 각 지역의 추천 벼 품종을 선발하였으며, 조사기간 중 일정하게 재배관리를 하였다. 예외적으로 경남 진주에서는 전국적으로 재배면적이 많은

Table 1. Soil properties selected for investigating CH₄ emission factor

Parameter	Investigation site			
	Hwaseong	Daegu	Gwangju	Jinju
Soil series	Jisan	Shinhung	Duckpyeong	Pyeongtaeg
Soil texture	CL	CL	CL	SiCL
pH (1:5 with H ₂ O)	6.1	5.6	5.9	5.7
Organic matter (g/kg)	25.7	23.8	28.1	17.2
Available P ₂ O ₅ (mg/kg)	51	63	25	30
Exchangeable cation (cmol _c /kg)				
K	0.26	0.44	0.15	0.09
Ca	8.83	5.57	4.68	6.94
Mg	2.07	1.50	1.31	2.13
Sampling site (GPS reading)	37° 13' 10.3"N, 127° 2' 44.5"E	35° 57' 2"N, 128° 33' 52"E	35° 7' 2.56"N, 126° 46' 47.7"E	35° 8' 56.73"N, 128° 5' 46.27"E

Table 2. General information of rice management in the selected sites

Parameter	Investigation site			
	Hwaseong	Daegu	Gwangju	Jinju
Transplanting	May 18-20	May 29-June 2	June 8	June 1-12
Draining	September 8-15	September 10-12	September 10-12	September 12-20
Harvesting	October 12-16	October 8-9	October 15-17	October 6-21
Cultivation day	146-149	128-132	129-134	127-136
Rice cultivar	Samkwang	Chilbo	Hopum	Dongjin, Chuchung, Ilmi, Nampyeong, Junam, Samkwang

6개의 중만생 벼 품종(남평, 동진, 삼광, 일미, 주남, 추청)을 선발하여 품종 간 메탄 발생량 차이를 평가하였다. 그리고 본 연구에서는 이상의 6개 선발 벼 품종의 메탄 배출량을 평균하여 해당 지역의 메탄배출계수 환산에 활용하였다. 이때 모든 실험과 조사는 3반복으로 실시되었다.

메탄배출계수 조사

가. 조사시설설치

벼 재배기간 중 메탄 배출량은 국제적으로 공인된 Simplified closed chamber method로 조사하였다(Rolston 1986). 벼 이앙 직후 투명 아크릴 챔버(가로 62 cm × 세로 62 cm × 높이 112 cm)을 각 Plot의 대표 지점에 안정적으로 설치하였다. 이때는 챔버 내에는 재식거리 15 cm × 30 cm로 총 8개의 벼 포기를 이앙하였다. 그리고 아크릴 챔버 하단 사방에는 총 4개의 구멍을 설치하여 물의 왕래가 가능하도록 하였다. 챔버의 중간부분과 뚜껑부분에 소형 Fan을 설치하여 시료채취 기간 중 공기가 잘 혼합되도록 하였다. 시료채취 시간 이외의 전 기간 동안 챔버의 뚜껑은 열린 상태를 유지하였다.

조사기간 중 토양의 산화환원전위(Eh value), 대기와 토양의 온도가 함께 조사되었다. 토양의 산화환원전위는 벼 포기사이 중간지점에 약 5cm 깊이로 백금전극을 설치하고 Eh

meter로 조사하였다. 그리고 가스시료 채취시기 마다 대기와 토양온도, 그리고 토양의 산화환원전위 값을 함께 기록하였다.

가스 중 메탄 농도는 Gas chromatograph를 이용하여 정량하였다. 이때 Porapak NQ column (Q 80-100 mesh)과 Flame ionization detector (FID)가 이용되었으며, column-injector-detector 온도는 80-100-110°C로 각각 조절하였다.

나. 메탄배출량 산정

메탄 배출율(CH₄ emission rate)은 Closed chamber의 뚜껑을 닫기 전과 닫은 지 30분 경과 후 농도차를 이용 아래 식 3과 같이 계산하였다(Rolston 1986).

$$F = \rho \times (V/A) \times (\Delta c/\Delta t) \times (273/T) \text{ ----- (식 3)}$$

여기서, F는 메탄 배출율(CH₄ flux, mg CH₄/m/h), ρ는 메탄의 밀도(0.714g/L, 1atm, 0°C), V는 챔버부피(chamber volume, m³), A는 챔버넓이(chamber area, m²), Δc/Δt는 챔버 내 메탄가스 축적율(CH₄ gas accumulation rate in the chamber, mg CH₄/m/h), T는 챔버 내 절대

온도(273+mean temperature in the chamber, °C).

벼 재배기간 중 총 메탄 배출량(seasonal CH₄ flux)은 아래의 식 4를 이용하여 환산하였다(Singh et al. 1999).

$$\text{Seasonal CH}_4 \text{ flux} = \sum_i^n (R_i \times D_i) \text{ ----- (식 4)}$$

여기서, R_i는 i 번째 시료채취 시기에 메탄 배출율 (CH₄ flux, mg CH₄/m²/day), D_i는 i 번째 시료채취 시기에 시료채취 간격(day).

다. 1일 메탄 배출특성 평가

Revised 2006 IPCC Guidelines에 따라 벼논에서 작기 중 메탄 배출량을 산정하기 위해서는, 하루 24 시간 동안의 메탄 배출량 변화를 조사하여 하루 평균 메탄배출계수의 산정이 선행되어야 한다. 이를 바탕으로 평균 메탄배출계수와 유사한 시간대를 설정하고 이후 이시간대에 지속적인 가스시료채취가 이루어져야 한다.

우리나라 벼논에서 1일 메탄 배출특성 변화를 평가하기 위해 진주의 논 포장에서, 2009년 벼의 개화기 중 하루를 선발하여 1일 메탄 배출량 변화를 매 3시간 간격으로 총 8회 조사하였다(Fig. 1). 이때 1일 평균 메탄 배출량은 2.75 kg CH₄/ha/day 이었으며, 이는 하루 중 11 시 부근의 메탄 배출계수와 유사한 수준이었다. 이는 IPCC 가이드라인에서 추천하고 있는 벼논에서의 가스 채취시간 10:00-12:00은 이전의 다른 연구보고서 관측 시간과 유사하였다(Yagi and Minami, 1990, Adhya et al., 1994). 이상의 연구결과를 바

탕으로, 본 연구에서는 하루 중 11:00-12:00 사이 매주 2회씩 가스시료를 채취하여 분석에 활용하였다.

불확도(Uncertainty) 평가

IPCC에서는 불확도(Uncertainty) 평가를 통해 생산자료의 신뢰성 확보를 요구하고 있다(IPCC, 2006). 우리나라 벼논에서 메탄 배출기본계수를 구하기 위하여 3년간 전국 4개 지역에서 조사된 평균 1일 메탄 배출계수의 정규분포 95% 신뢰구간(error range)을 산정하였고, 본 Error range의 절대 값을 평균 배출계수로 나누어 자료의 불확도(%)를 평가하였다(SRI report, 2011).

결과 및 고찰

전국 4개 지역 논토양에서 3년 동안 조사된 벼 재배기간 중 메탄 배출량 변화는 벼 품종, 조사지역, 그리고 조사 년차와 관계없이 거의 일정한 변화양상을 보였다(Fig. 2). 벼 이앙 초기 메탄 배출량은 비교적 낮았으나 식물체의 생육단계 발달과 함께 빠르게 증가하여 출수기 전후에 최대 발생량을 보였다. 이후 메탄 배출량은 시간이 지남에 따라 크게 감소하여 수확을 위해 논물의 배수처리와 함께 대기 메탄농도 수준까지 감소하였다.

조사기간 중 토양의 산화환원전위(Eh value) 변화는 조사 지역의 강우양상 등의 영향으로 다소 간 차이가 있었으나, 전체적으로는 토양의 Eh value는 메탄 배출양상과 거의 반대양상으로 변화되었다(자료제시 생략). 벼 이앙초기 토양의 Eh

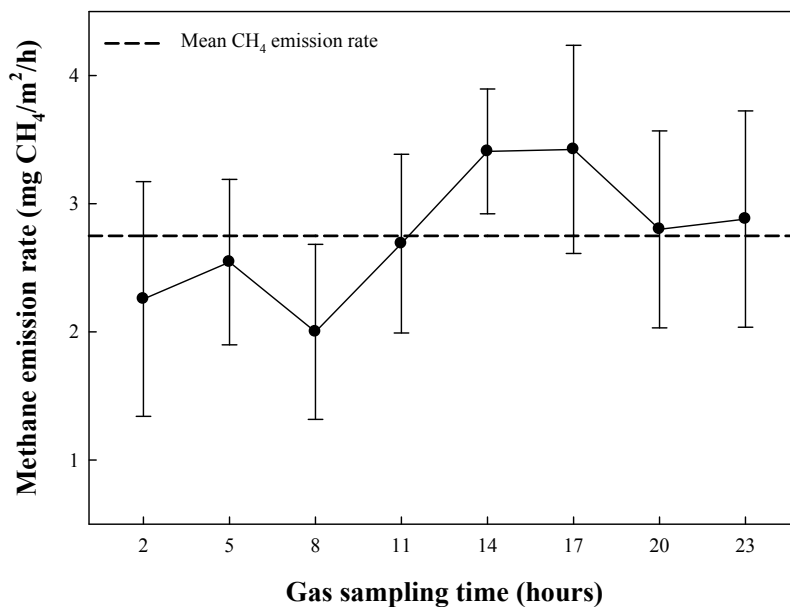


Fig. 1. Changes of CH₄ emission rates for 24 hours a day at panicle forming stage in a rice paddy soil in Jinju.

value는 약 +100 mV 수준으로 비교적 높은 산화상태를 보였으나, 담수시간이 경과하고 식물체 생체량이 증대되면서 토양의 Eh value는 빠르게 낮아지는 양상을 보였다. 벼 이앙 후 약 20-30일 쯤부터는 거의 대부분 토양 Eh value가 -200 mV에서 -270 mV 사이에서 안정화되었다. 토양의 Eh value가 -200 mV 이하일 때 메탄 생성균(methanogen)에 의해 유기산이 CH₄으로 전환되거나 토양공기 중 이산화탄소와 물이 반응하여 CH₄을 생성하는 것으로 알려져 있다(Garcia et al., 2000). 일반적으로 본 연구에서도 이시기 메탄 발생량이 크게 증가하는 현상을 볼 수 있었다. 그리고 벼 수확 약 30일 전 관개 중단과 함께 토양 Eh value는 빠르게 상승하여 수확기에는 약 +100 mV의 산화상태로 전환되었다.

조사지역에 따라 선발 벼 품종과 기온 등의 재배환경 차이로 인해 벼의 총 재배기간 및 벼의 수량 등은 다소 간 차이가 있었다(Table 3). 북부지역 경기도 화성에서의 벼 재배기간은 146-149일로 가장 길었으며, 기타 지역에서는 122-136일 내외로 비슷하였다.

이상의 벼 재배기간 중 1일 평균 메탄 배출량을 의미하는 메탄 배출계수(CH₄ emission factor)는 조사지역 간 다소간의 차이가 있었다. 그러나 동일 조사지역 내에서 조사연차 간 메탄 배출계수는 큰 차이가 발생되지 않았다(Table 4). 대기와 토양 온도가 가장 높았던 대구의 작기 중 메탄 배출계수는 평균 3.32 kg CH₄/ha/day로 타 지역에 비해 크게 높았으며, 상대적으로 광주 지역의 평균 메탄 배출계수는 1.49 kg

CH₄/ha/day으로 가장 낮게 낮았다(Table 4). 이상의 4개 지역에서 3년간 조사된 작기 중 메탄 배출계수는 평균 2.32 kg CH₄/ha/day이었다. 이때 조사 자료 대부분은 오차범위(error range) 1.82-2.82 kg CH₄/ha/day 안에 분포하였으며, 95% 신뢰구간에서 평가한 불확도(uncertainty)는 약 21.7%이었다.

이상의 결과를 종합할 때 우리나라 논토양에서 벼 작기 중 메탄의 기본 배출계수는 약 2.32 kg CH₄/ha/day 수준으로 평가되었다. 메탄 기본 배출계수 2.32 kg CH₄/ha/day는 2006 IPCC Guidelines에서 유기물 투입이 없고 벼 이앙 전 180일보다 적은 기간 동안 건답으로 유지되고 상시담수관리를 통해 벼를 재배하는 논토양 조건에서 제시하고 있는 Default CH₄ baseline emission factor 1.30 kg CH₄/ha/day에 비해 약 1.8 배 이상 높은 값이었다(IPCC, 2006). 일본 농업환경기술연구소(National Institute for Agro-Environmental Science)를 중심으로 개발된 IPCC의 Default CH₄ baseline emission factor는 아시아 전역의 103개 지역 논토양에서 868 벼 작기 중 자료(seasonal data)를 활용하여 환산된 값이며(Yan et al., 2005), 조사과정 중 토양 유기물 함량이 낮은 남중국 태국 베트남 등의 자료가 상당수 포함되었기 때문에 IPCC의 Default CH₄ baseline emission factor가 우리나라 논토양의 메탄 배출계수(2.32 kg CH₄/ha/day)에 비해 크게 낮았던 것으로 판단된다.

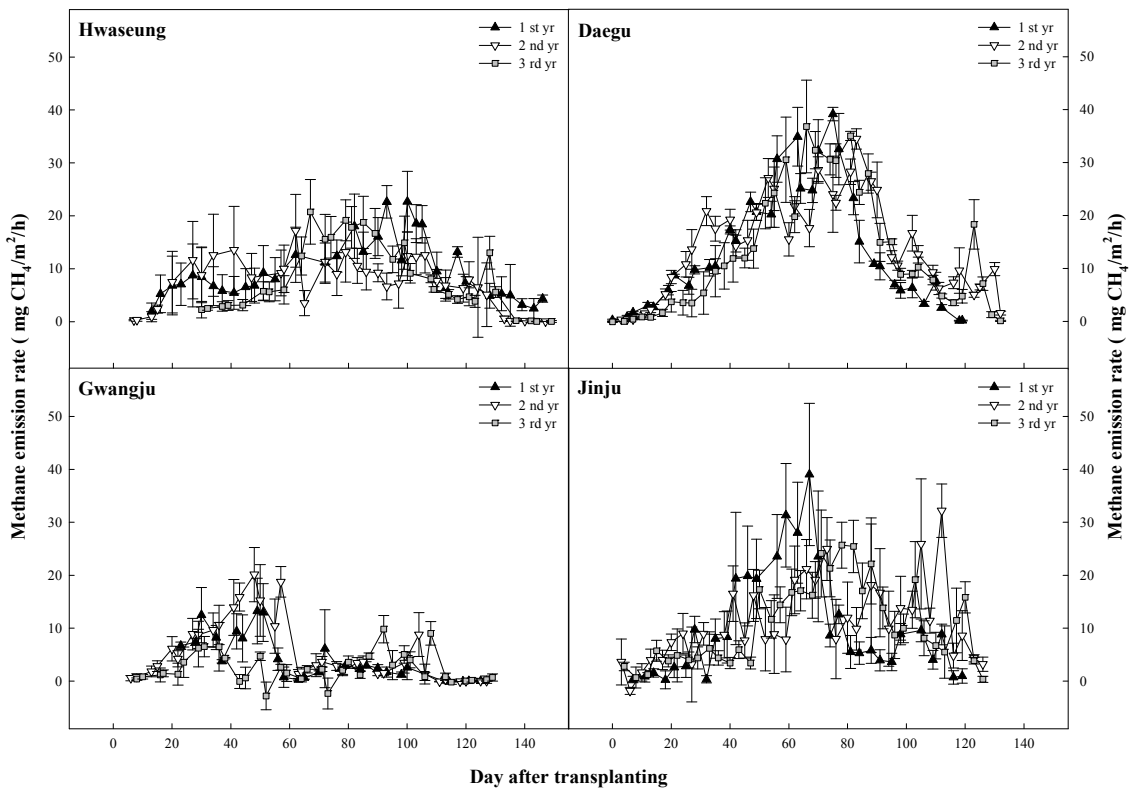


Fig. 2. Methane emission patterns in paddy soils located at 4 different sites under the standard fertilization and the continuous flooding during rice cultivation.

Table 3. Comparison of climate condition and yield properties in paddy soils located at 4 different sites during rice cultivation

Parameter	Investigation site			
	Hwaseoung	Daegu	Gwangju	Jinju
1st year				
Mean air temperature (°C)	23.4	23.8	24.7	23.3
Mean soil temperature (°C)	24.7	21.2	23.9	24.1
Precipitation (mm)	1135	585	992	1146
Sunshine hour (hour)	767	629	560	668
Grain yield (Mg/ha)	4.9	-	6.8	5.9
2nd year				
Mean air temperature (°C)	22.4	25.6	23.7	22.6
Mean soil temperature (°C)	18.8	22.1	22.0	24.6
Precipitation (mm)	1550	860	804	1312
Sunshine hour (hour)	755	572	619	695
Grain yield (Mg/ha)	5.1	5.3	7.5	6.9
3rd year				
Mean air temperature (°C)	23.2	24.6	23.9	23.3
Mean soil temperature (°C)	21.3	22.0	22.9	24.7
Precipitation (mm)	1364	856	1156	1181
Sunshine hour (hour)	912	862	845	792
Grain yield (Mg/ha)	5.2	4.9	4.1	5.9

Table 4. Comparison of CH₄ emission factors (kg CH₄/ha/day) in paddy soils located at 4 different sites during rice cultivation under the recommended fertilization and the continuous flooding

Year	Investigation site				Mean	Error range
	Hwaseoung	Daegu	Gwangju	Jinju		
1st year	2.29	3.51	1.95	2.24	2.50	1.54-3.46
2nd year	1.85	3.30	1.98	2.51	2.41	1.50-3.32
3rd year	1.99	3.14	0.55	2.52	2.05	0.52-3.58
Mean	2.04	3.32	1.49	2.42	2.32	
Error range*	1.63-2.46	2.98-3.66	0.00-2.99	2.13-2.72		1.82-2.82

Note) *Error range within 95% confidence intervals.

결론

우리나라 논토양에서 작기 중 메탄의 기본배출계수를 산정하기 위해, 전국 4개 지역의 논토양에서 3년간 작기 중 메탄 배출량을 조사하였다. 벼는 상시담수관리 하에서 추천량의 화학비료를 시비(N-P₂O₅-K₂O=90-45-57 kg/ha)하여 재배하였다. 3년간 전국 4개 지역에서 벼 작기 중 메탄의 평균 배출량은 2.32 kg CH₄/ha/day이었으며, 95% 신뢰구간 유효 오차범위 1.82-2.82 kg CH₄/ha/day에서의 불확도(uncertainty)는 21.7%이었다. 결과적으로 우리나라 논에서 벼 재배기간 중 배출되는 메탄의 기본배출계수는 약 2.32 kg CH₄/ha/day으로 평가되었다.

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., A.K. Rath, P.K. Gupta, V.R. Rao, S.N. Das, K.M. Parida, D.C. Parashar, and N. Sethunathan. 1994. Methane emission from flooded rice fields under irrigated conditions, *Biol. Fertil. Soils*. 18, 245-248.

- Garcia, J.L., B.K.C. Patel, and O. Ollivier, 2000. Taxonomic, phylogenetic and ecological diversity of methanogenic archaea, *Anaerobe*, 6, 205-226.
- IPCC, 2006. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Japan.
- RDA, 1999. Fertilization Standard of Crop Plants. National Institute of Agricultural Science and Technology, Suwon, p. 148.
- Rolston, D.E., 1986. Gas flux. In: Klute, A. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 1*, second ed. ASA and SSSA, Madison, WI, pp. 1103-1119.
- Sass, R.L., 1994. Short summary chapter for methane. In: Minami et al. (Eds.) *CH₄ and N₂O-Global Emissions and Controls from Rice Fields and Other Agricultural and Industrial Sources*, Yokendo Publishers, Japan, pp. 1-7.
- Singh, S., J.S. Singh, and A.K. Kashyap, 1999. Methane flux from irrigated rice fields in relation to crop growth and N-fertilization, *Soil Biol. Biochem.* 31, 1219-1228.
- Wassmann, R., and M.S. Aulakh, 2000. The role of rice plants in regulating mechanisms of methane emissions, *Biol. Fertil. Soils.* 31, 20-29.
- Yagi, K., and K. Minami, 1990. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields, *Soil Sci. Plant Nutr.* 36(4), 599-610.
- Yagi, K., H. Tsuruta, K. Kanda, and K. Minami, 1996. Effect of water management on methane emission from a Japanese rice paddy field: Automated methane monitoring, *Glob. Biogeochem. Cycles.* 10, 255-267.
- Yan, X., K. Yagi, H. Akiyama, and H. Akimoto, 2005. Statistical analysis of the major variables controlling methane emission from rice fields, *Glob. Change Biol.* 11, 1131-1141.