

논 토양에서 벼 기상생태형별 CH₄ 배출양상 및 배출량 추정

이경보 · 이덕배 · 이상복 · 김종구 · 김용웅¹⁾
호남농업시험장, ¹⁾전남대학교 농과대학

Methane Emission among Rice Ecotypes in Korean Paddy Soil

Kyeong-Bo Lee, Deog-Bae Lee, Sang-Bok Lee, Jong-Gu Kim, and Yong-Woong Kim¹⁾ (National Honam Agricultural Experiment Station RDA, Iksan 570-080, Korea, ¹⁾Chonnam National University, College of Agriculture Kwangju 500-757, Korea)

ABSTRACT : This study was conducted to investigate methane emission among rice ecotypes in paddy soil (Jeonbug series). The varieties of rice involved early maturing short-grain variety, Samcheonbyeo, middle maturing variety, Hawsungbyeo and late maturing variety, Dongjinbyeo. The seasonal change of methane flux was high from ear formation stage to heading stage. It was found that the methane flux was tended to be lower in early maturing variety than in the mid-to-late maturing variety. The plots without rice straw reduced methane emission as much as 46% relative to rice straw application. The methane emission rate through rice stem was highly correlated with temperature fluctuation. Methane emission on ecotypes by rice straw application was 0.394 g m⁻²day⁻¹ in early maturing variety (Samcheonbyeo), 0.407 g m⁻²day⁻¹ in mid maturing variety(Hawsungbyeo), 0.411 g m⁻²day⁻¹ in late maturing variety(Dongjinbyeo).

Key words : Greenhouse gas, Rice ecotypes, Methane emission

서 론

대기중 CH₄의 수지균형은 각종 발생원으로부터의 CH₄ 방출량과 대기중에서 광화학 반응 등에 의한 CH₄ 소실량으로 결정된다. 1990년대에 있어서 대류권 CH₄의 전 지구 평균농도는 1.72 ppmV인데 이것은 대류권 전체에서 4900 Tg의 양에 상당한다¹²⁾. 이들 CH₄은 어느 정도의 비율로 대류권으로부터 소실되며 그 소실량의 약 80%는 대류권에서 OH기와 광화학적으로 산화되며, 나머지는 성층권으로 이행되든지 토양중이나 물속의 CH₄ 산화균에 의한 분해로 소실된다. 이들의 소실 속도로부터 계산하면 대류권의 CH₄의 평균체류 기간은 약 10년 정도라고 한다⁹⁾.

대기중 CH₄ 농도 증가 원인의 하나로서 CH₄ 발생량의 증가 외에 대기중 OH기 농도의 감소가 지적되고 있다. 즉 화석연료의 연소에 의해 CO₂나 CH₄ 이외의 탄화수소 화합물의 방출량이 증가하면서 이들이 OH기와 반응하게 되며, 그 결과 OH기의 농도가 감소하고 광화학 반응에 의하여 CH₄ 소실 속도가 감소하게 된다⁶⁾. 대류권에서 CH₄의 양

(4900Tg), 증가속도(40~48Tg yr⁻¹) 및 평균체류 시간(8~12년)에 의해 각종 발생원으로부터 연간 CH₄ 방출량의 합계치(410~620Tg)가 추정 보고되고 있다. 그러나 어느 발생원에 대해서도 충분한 자료가 축적되어 있지 않기 때문에 오차범위가 크며 또 표출되지 않은 발생원의 존재나 지금까지와 크게 다른 실측치가 급후 보고될 가능성도 있다.

논으로부터의 CH₄ 발생량을 추정하려는 시도는 탄소의 지구화학적 순환을 해명하려고 하는 관점에서 대기중의 CH₄ 농도 증가가 보고되기 이전부터 행해졌으며³⁾, 1980년대부터는 논에서의 실측치를 기본으로하여 추정이 이루어졌지만 유기물 시용, 물관리 및 시비 등 CH₄ 발생량에 큰 영향을 주는 인위적 변동 요인들에 대해서는 명확히 밝혀진 바 없다.

대기중의 CH₄ 농도가 증가되고 있다고 보고된지는 이미 10여년이 경과했음에도 불구하고 이러한 증가는 각종 발생원으로부터의 발생량 증가에 의한 것인지, 대기중에서 CH₄ 소실량의 감소에 의한 것인지 아직 밝혀져 있지 않다. 그러나 과거의 대기중의 각종 성분의 분석으로부터 증가된

CH₄ 농도는 인간의 생활환경 변화와 밀접한 관련이 보여 지므로 인위적인 CH₄ 발생이 중요시 되고 있다. 또한 대기의 CH₄ 문제가 제시된 이래 몇 개의 인위적 발생중 세계적으로 논 경작면적의 확대에 따른 CH₄ 발생량의 증가가 일찍부터 부각되면서 논으로부터 CH₄ 발생량을 정확히 파악하고 대기 CH₄ 농도의 증가에 미치는 역할을 밝히려는 시도가 세계 각지에서 활발하게 행해지고 있다.^{1,2)}

세계의 논으로부터 연간 CH₄ 발생량을 110Tg으로 추정하고 있는데 이 양은 전체 CH₄ 발생량의 20%에 해당되는 것으로 이것은 논이 자연습지와 아울러 대기 CH₄의 큰 발생원임을 입증해 주고 있다³⁾. 또 농경지의 확대와 2기작, 3기작의 작부체계에 의해 세계의 벼 재배면적이 과거 50년간에 70% 증가를 보이는 사실로도 논은 대기 CH₄의 농도 증가에 크게 영향을 미치는 것으로 추정되고 있다. 그러나 논에서의 CH₄ 추정치는 많은 불확실한 요인이 작용하게 되는데 이 불확정 요인을 밝히고 논으로부터 배출된 CH₄ 발생량을 보다 정확히 추정할 수 있는 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구는 유기물 시용 및 벼 기상 생태형별 CH₄ 실측치를 근거로 논 토양에서 배출되는 CH₄ 배출량을 추정하기 위해 본 시험을 수행하였다.

재료 및 방법

본 시험은 호남농업시험장 시험 포장인 미사질 양토에서 수행하였으며, 공시 토양의 특성은 표 1과 같다. 공시 품종으로 조생종은 삼천벼, 중생종은 화성벼, 만생종은 동진벼를 '97년 5월 30일 재식 거리 15×30cm로 손이앙 하였다. 시비량은 N : P₂O₅ : K₂O = 110 : 70 : 80kg/ha를 요소, 용성인비, 염화칼리로 각각 시용하였으며 또한 벼짚은 이앙 2개월 전인 3월 20일경에 5,000kg/ha 수준으로 시용하고 경운하였다. 그리고 물관리는 간단관개를 실시하였다.

CH₄ flux를 측정하기 위해 간이 폐쇄 정대 chamber법¹⁰⁾에 따라 가로, 세로 각각 60cm, 높이 100cm의 아크릴 소재로 제작된 가스포집 장치를 시험구당 3개씩 설치하여 10~12시 사이에 매주 1회씩 50ml polypropylene syringe을 이용하여 시료를 채취하였으며 표 2와 같은 조건하에서 gas chromatograph를 이용 CH₄ 농도를 측정하였다.

줄기를 통한 CH₄ 배출 양상을 조사하기 위해 1/2,000a Wagner's pot에 벼짚을 약 3cm 크기로 절단하여 5,000kg/ha 수준으로 시용하고 벼를 3본씩 5반복 이앙하였으며, 출수 10일전에 벼 뿌리로부터 10cm만 남기고 지상부

Table 1. Characteristics of the experimented soil

pH	O.M (g / Kg)	Av. P ₂ O ₅ (mg / kg)	T-N (g / kg)	Ex.Cation(cmol ⁺ /kg)			Texture
				K	Ca	Mg	
5.8	23.3	101.7	2.2	0.3	5.4	2.3	Silty Loam

Table 2. Gas chromatographic analysis conditions for methane measurement

Detector		FID
Column	Packing material	Porapak N (80/100)
		Stainless steel 1/8" × 2 m
Carrier gas		N ₂
Flow rate		30 ml/min
Temperature	Column	50°C
	Injector	60°C
	Detector	150°C
Retention time		0.45 min

를 절단한 후 주간에만 2시간 간격으로 CH₄ flux와 온도를 측정하였다. 이때 사용된 CH₄ 포집장치는 가로, 세로 각각 30cm, 높이 90cm의 아크릴소재로 제작된 chamber를 이용하였다. 분석된 CH₄농도는 아래 식으로 CH₄ 배출량을 환산하였다.

$$\text{Flux} = \rho \times V / A \times \Delta c / \Delta t \times 273 / T$$

ρ : CH₄의 밀도 (T = 273 K)
 A : Chamber 바닥면적 (m²)
 V : Chamber내 체적 (m³)
 $\Delta c / \Delta t$: 단위시간당 농도의 변화
 T : 포집장치내 평균 기온 (273 + °C)

결과 및 고찰

벼 기상생태형에 따른 CH₄ 배출 양상

그림 1은 벼짚 시용후 CH₄ 배출양상을 벼 생육시기별로 나타낸 것으로 조생종은 2번의 peak를 보인 반면 중생종과 만생종은 3번의 peak를 보였다. 조생종의 CH₄ flux는 7월 9일에 19.02 mgm⁻²hr⁻¹로 1차 peak를 나타냈으나 점차 감소하다가 다시 증가하여 8월 1일에는 27.47mgm⁻²hr⁻¹로 2차 peak를 나타내었다. 중생종의 CH₄ flux는 7월 3일에 18.51mgm⁻²hr⁻¹, 8월 1일에 25.95mgm⁻²hr⁻¹, 8월 27일에

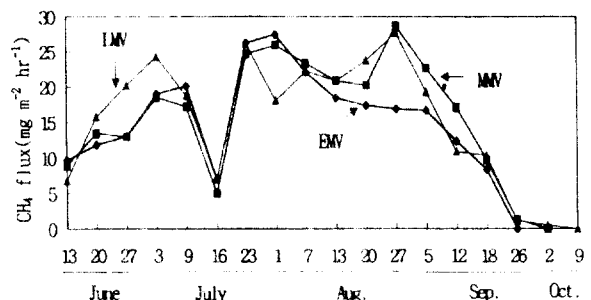


Fig. 1. Seasonal change of methane flux with rice straw during rice growing season in paddy field. (EMV : early-maturing variety, MMV : mid-maturing variety, LMV : late-maturing variety)

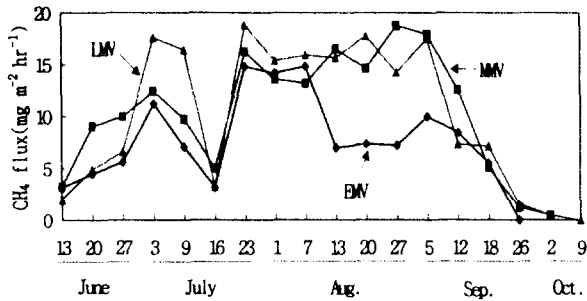


Fig. 2. Seasonal change of methane flux without rice straw during rice growing season in paddy field (EMV : early-maturing variety, MMV : mid-maturing variety, LMV : late-maturing variety)

28.74mgm²hr⁻¹로 최대 peak를 보였다. Holzapfel-Pschorn과 Seiler⁹⁾는 벼 생육기간 동안 세 번의 CH₄ flux peak가 나타남을 보고하였는데, 처음 peak는 토양 유기물의 분해에 기인된 것이고, 두 번째 peak는 뿌리 분비물내의 유기물질의 공급에 의한 것이며, 세 번째 peak는 뿌리의 분해산물로부터 유래한다고 보고하였다. 만생종의 CH₄ flux는 7월 3일에 24.28 mgm²hr⁻¹로 생육초기에는 조생종과 중생종에 비하여 높은 경향이였으나 그 이후의 CH₄ flux는 중생종과 비슷한 양상을 보였다.

그림 2는 벼짚 무시용시 벼 생육시기별 CH₄ flux를 조사한 그림이다. CH₄ 배출양상은 벼짚 시용구와 비슷하였으나 CH₄ 배출량은 전체적으로 낮은 경향이었는데 이는 벼짚을 사용하지 않아 유기물 분해에 따른 CH₄ 생성이 적었기 때문으로 해석된다. 조생종의 CH₄ flux는 7월 3일에 11.21mg m² hr⁻¹로 다소 높은 경향이였으나 그 이후 감소하여 출수기인 8월 7일에 14.83mgm²hr⁻¹로 최대 peak를 나타냈으며 9월 5일 이후에는 급격히 감소하는 경향이였다. 중생종과 만생종의 CH₄ flux는 생육 초기에는 차이가 있었지만 생육 중기 이후로는 거의 비슷한 경향이였다.

CH₄ 배출과 온도의 영향

표 3은 줄기를 통한 CH₄ 배출양상을 조사하기 위해 벼를 지상부 10cm만 남기고 절단한 후 CH₄ flux를 측정할 결과 온도에 따라 CH₄ flux가 커다란 차이가 있음을 알수 있었다.

절단 하루 후인 8월 7일의 CH₄ flux는 08시에 5.26mgm²hr⁻¹이었으나 14시에는 26.46mgm²hr⁻¹로 CH₄ flux가 무려 5배 이상 증가하였다. 전체적으로 볼 때 온도가 가장 높은 2시경에 CH₄ 배출이 가장 많았다. 시간별 온도 변화가 크지 않았던 8월 26일의 CH₄ flux는 7~9 mgm²hr⁻¹ 범위로 거의 비슷한 양상을 보였다. Wang 등¹¹⁾은 벼가 새포간극이 잘 발달되어 있기 때문에 산소를 뿌리로 공급하고 토양으로부터 생성된 CH₄, CO₂등의 가스를 대기로 배출할 수 있다고 하였으며, Holzapfel 등⁹⁾은 벼줄기를 통하여 배출된

Table 3. Effect of temperature on transport of methane through the stems

Hours	AUG.7		AUG.9		AUG.13		AUG.26	
	flux*	Air Tem.(C)	flux*	Air Tem.(C)	flux*	Air Tem.(C)	flux*	Air Tem.(C)
08:00	5.26	30.8	11.70	30.5	9.87	31.0	7.42	22.0
10:00	14.13	37.8	11.75	36.4	9.90	38.5	8.13	22.5
12:00	19.79	39.5	17.93	39.8	21.08	42.0	8.58	23.0
14:00	26.46	40.3	26.38	42.1	43.10	43.3	9.72	23.5
16:00	14.70	36.5	19.23	39.0	15.68	41.0	9.50	23.5

*flux : mg · m² · hr⁻¹

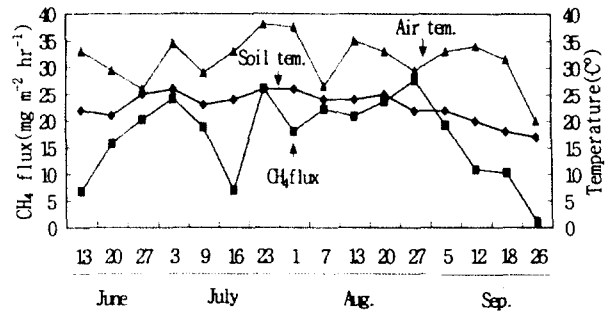


Fig. 3. Seasonal change of methane flux on air and soil temperature from paddy field with rice straw

CH₄은 80%였다고 보고하였다.

그림 3은 기온 및 지온에 따른 시기별 CH₄ 배출 양상을 나타낸 그림이다. 벼 생육 기간중 기온의 범위는 20~38℃ 범위로 온도 차이가 컸으나 지온은 17~26℃ 범위로 기온에 비하여 온도 차이가 적었다. CH₄배출량은 생육 초기에는 기온 및 지온의 변화와 큰 상관성이 없어지지만 7월 16일 이후에는 기온 및 지온의 변화와 밀접한 관련을 보였다. Nouchi 등¹⁰⁾은 CH₄ 배출은 기온의 영향이 크다고 보고하였으며, Wang 등¹¹⁾은 지온과 CH₄ 생성 및 배출은 일반적으로 정상관 관계를 보인다고 보고하였으나, CH₄ 배출에 대한 제한적인 요인들 때문에 항상 고도의 상관관계를 나타내지는 않는다고 보고하였다.

CH₄ 배출량

그림 4는 기상 생태형별 CH₄ 배출 계수를 나타낸 그림으로 벼짚 시용시 CH₄ 배출 계수(gm²day⁻¹)는 조생종이 0.394, 중생종이 0.407, 만생종이 0.411 이었으며, 벼짚을 사용하지 않을 때 CH₄ 배출 계수는 조생종이 0.198, 중생종은 0.269, 만생종은 0.273 이었다.

CH₄ 배출 계수를 근거로 벼 논외의 CH₄ 발생량을 추정할 결과를 표 4에 나타낸 바와 같이 作期綜合排出係數(CH₄ g m⁻²)는 벼짚 시용구에 있어서 조생종이 46.492, 중생종이 50.468, 만생종이 53.841 었으며, 벼짚을 사용하지 않았을 때 조생종이 23.364, 중생종이 33.356, 만생종이 35.763 이었다. 이러한 실측 배출계수와 우리나라 벼 재배면적을 적

Table 4. Estimated methane emission inventory from wetland transplanting rice cultivation in Korea

Ecotypes	Cultivation area (Mm ²)	Integrated emission factor ^a (g m ⁻²)		Inventory of methane emission (Gg yr ⁻¹)	
		with rice straw	without rice straw	with rice straw	without rice straw
EMV	1,148	46.492	23.364	53.373	26.821
MMV	1,506	50.468	33.356	126.472	83.590
LMV	6,846	53.841	35.763	368.595	244.833
Total	10,500			548.440	355.244

^a Integrated Emission factor (Ef) = Growth duration (day) × Emission factor (g m⁻² day⁻¹)

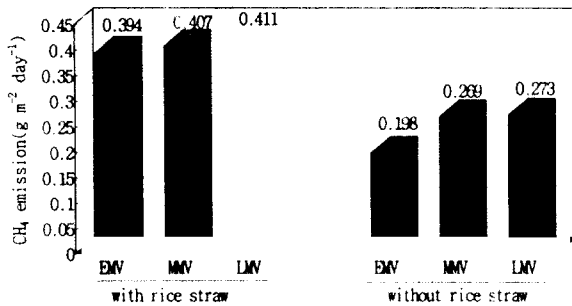


Fig. 4. Methane emission on rice ecotypes and rice straw application (EMV : early-maturing variety, MMV : mid-maturing variety, LMV : late-maturing variety)

용하여 추정된 벼 논에 총 CH₄ 배출량은 표4에 표시한 것과 같이 볏짚 시용구가 548.440 Gg yr⁻¹, 볏짚 무시용구가 355.244 Gg yr⁻¹이었다. 그러나 이 추정치는 볏짚을 이앙 2개월 전에 시용했기 때문에 높은 경향이었는데, Lee⁷⁾는 볏짚을 이앙 전에 시용한 구를 기준으로 할 때 볏짚을 가을에 시용한 구는 CH₄ 배출이 48.9% 저감 되었다고 보고 하였으며, 윤 등¹³⁾은 볏짚을 가을에 시용했을 때 이앙 직전에 시용한 구에 비하여 CH₄이 36.7% 저감되었다고 보고하였다. 이상을 종합해볼 때 벼 농사에서 CH₄을 저감시키기 위해서는 합리적인 유기물 시용, 간단관개 등을 통한 재배법의 철저한 이행이 필요하다고 생각된다.

요 약

유기물 시용 및 벼 기상 생태형별 CH₄ 발생양상을 구명하고 이를 근거로 논 토양에서 배출되는 CH₄ 배출량을 추정하기 위해 미사질 양토에서 시험한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 시기별 CH₄ 배출은 조생종이 2번의 peak를 나타냈으며 중생종과 만생종은 3번의 peak를 나타냈으며 줄기를 통한 CH₄ 배출은 온도가 높을수록 많은 경향이였다.
2. CH₄ 배출량은 조생종에 비하여 중생종과 만생종이 높은 경향이였으며, 볏짚 시용구와 비교해볼 때 볏짚 무시용구에서 46%의 CH₄ 배출이 감소되었다.
3. CH₄ 배출 계수(gm²day⁻¹)는 조생종이 0.394, 중생종이

0.407, 만생종이 0.411이었으며, 볏짚 무시용시 CH₄ 배출 계수는 조생종이 0.198, 중생종이 0.269, 만생종은 0.273이었다.

참 고 문 헌

1. Cicerone, R. J. and R. S. Oremland(1988). Biogeochemical aspects of atmospheric methane. *Global Biogeochem. Cycles*, 2 : 299 ~ 327
2. Dickinson, R. E. and R. J. Cicerone(1986). Future global warming from atmospheric trace gases. *Nature*, 319 : 109 ~ 115
3. Ehhalt, D. H. and U. Schmidt(1978). Sources and Sinks of atmospheric methane. *Pageoph*, 116 : 452 ~ 464
4. Holzapfel-Pschorn and A. W. Seiler. 1986. Methane emission during a cultivation period from an Italian rice paddy. *Journal of Geophysical Research* 91 : 11603 ~ 11814.
5. Houghton, J. T., G. J. Jenkins and J. J. Ephraums(1990). *Climate Change. IPCC Scientific assessment Cambridge Univer. Press.*
6. Khalil, M. A. K. and R. A. Rasmussen(1985). Causes of increasing atmospheric methane : Depletion of hydroxyl radicals and the rise of emission. *Atmos. Environ.* 19 : 397 ~ 407
7. 李 庚甫(1997). 논 土壤에서 벼 栽培 環境이 Methane 排出에 미치는 영향. 全南大學校 博士學位論文
8. Nouchi, I., S. Mariko and K. Aoki(1990). Mechanisms of methane transport from the rhizosphere to the atmosphere through rice plants. *Plant Physiology* 94 : 59 ~ 65.
9. Prinn, R.D. Cunnold, R. Rasmussen, P. Simmonds, F. Alyea, A. Crawford P. Fraser and R. Rosen(1987). Atmospheric trends in methyl chloroform and the global average for the hydroxyl radical. *Science* 238 : 945 ~ 950
10. Sin, Y. K., Y. S. Lee, S. H. Yun and M. E. Park(1995). A simplified closed static chamber method for measuring methane flux in paddy soils. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert* 28(2) : 183 ~ 190.
11. Wang, Z., H. Kludze, C. R. Crozier and W. H.

- Patrick(1995). Soil Characteristics affecting methane production and emissions in flooded rice. *Climate Change and Rice*. 80~90.
12. Watson, R. T., H. Rodhe, H. Oeschger and U. Segenthaler(1990). Green house gases and aerosols : In *climate change, the IPCC scientific assessment*, ed. Cambridge Univer. Press. P. 1 ~ 40.
13. 윤성호, 신용광, 이경보, 고지연(1996). 농업부문 CH₄, N₂O 발생량 추정. *농업과학 기술원 시험연구 사업보고서 농업환경부* 편 667 ~ 672.