

벼 논에서 토양 유기물 함량, 논 유형 및 농업기후대가 CH₄ 배출에 미치는 영향

고지연* · 이재생 · 우관식 · 송석보 · 강종래 · 서명철 · 광도연 · 오병근 · 남민희

국립식량과학원 기능성작물부

Effects of Soil Organic Matter Contents, Paddy Types and Agricultural Climatic Zone on CH₄ Emissions from Rice Paddy Field

Jee-Yeon Ko*, Jae-Saeng Lee, Koan-Sik Woo, Seok-Bo Song, Jong-Rae Kang, Myung-Chul Seo, Do-Yeon Kwak, Byeong-Gun Oh, and Min-Hee Nam

RDA, National Institute of Crop Science, Department of Functional Crops, 627-803

To evaluate the effects of abiotic factors of paddy fields on greenhouse gases (GHGs) emissions from rice paddy fields, CH₄ emission amounts were investigated from rice paddy fields by different soil organic matter contents, paddy types, and agricultural climatic zone in Yeongnam area during 3 years. CH₄ emission amounts according to soil organic matter contents in paddy field were conducted at having different contents of 5 soil organic matters fields (23.6, 28.7, 31.0, 34.5, and 38.0 g kg⁻¹). The highest CH₄ emission amount was recorded in the highest soil organic matters plot of 38.0 g kg⁻¹. High correlation coefficient ($r=0.963^{**}$) was obtained between CH₄ emissions from paddy fields and their soil organic matter contents. According to paddy field types, CH₄ emission amounts were investigated at 4 different paddy fields as wet paddy, sandy paddy, immature paddy, and mature paddy. The highest CH₄ emissions was recorded in wet paddy (100%) and followed as immature paddy 64.0%, mature paddy 46.8%, and sandy paddy 23.8%, respectively. For the effects of temperature on CH₄ emissions from paddy fields, 4 agricultural climatic zones were investigated, which were Yeongnam inland zone (YIZ), eastern coast of central zone (ECZ), plain area of Yeongnam inland mountainous zone (PMZ), and mountainous area of Yeongnam inland mountainous zone (MMZ). The order of CH₄ emission amounts from paddy fields by agricultural climatic zone were YIZ (100%) > ECZ (94.6%) > PMZ (91.6%) > MMZ (78.9%). The regression equation between CH₄ emission amounts from paddy fields and average air temperature of Jul. to Sep. of agricultural climatic zone was $y = 389.7x - 4,287$ (x means average temperature of Jul. to Sep. of agricultural climatic zone, $R^2=0.906^{\dagger}$)

Key words: CH₄, Agricultural climate zone, Paddy fields, Soil organic matter, Paddy type

서 언

최근 기후변화 관련 국제정세는 교토의정서의 1차 공약 기간 이후 기후변화협약의 모든 당사국이 온실가스 감축에 대해 참여하는 것으로 결정한 발리 로드맵에 따라 온실가스 감축 및 관리에 대한 요구가 어느 때보다 증가하고 있다. 우리나라도 정부차원에서 기후변화에 보다 적극적인 대응체제를 구축하고자 ‘저탄소 녹색성장기본법’ (10.4)을 시행하고 2020년까지 온실가스 감축목표를 BAU값 대비 30%로는 결정하는 등 대응을 위하여 노력하고 있다 (농진

청, 2010).

지구온난화를 유발하는 미세기체 중 CO₂ 다음으로 중요한 온실가스인 CH₄와 N₂O는 농업활동으로부터 인간의 활동에 의한 배출량의 50%와 70%가 배출된다고 한다 (IPCC, 2001). 우리나라 농업부문의 온실가스 배출량을 배출원별로 살펴보면 농경지 65.4%, 축사 34.6%가 배출되고, 농경지 중 논토양은 전체의 34.0%를 차지하고 있어 농업부문 온실가스의 최대 배출원에 해당하므로 관리 및 저감방법의 개발이 필수적이다 (농진청, 2008).

논토양에서 온실가스 발생의 대부분을 차지하는 CH₄는 Ciceron and Shettler (1981)에 의해 보고된 이후 논토양 온실가스 배출에 미치는 인자와 그에 따른 배출량 및 저감방법 구명 등 다양한 연구들이 수행되어 왔다 (Kimura,

접수 : 2011. 9. 1 수리 : 2011. 10. 17

*연락처 : Phone: +82553501133

E-mail: kjeeyeon@rda.go.kr

1997; Minami, 1993; Yagi et al., 1990). CH₄는 절대 혐기성균에 의하여 생산되는 유기물 분해의 최종 산물로서, 논에서의 CH₄ 배출에 영향을 미치는 요인은 논토양의 물리, 화학적 특성과 같은 비인위적 요인과 시용유기물, 물관리, 품종과 같은 인위적 요인으로 크게 나눌 수 있다 (Kimura et al., 1992; Minami, 1993; Neue, 1993).

우리나라에서도 1994년 논토양에서 온실가스 배출량의 측정을 시작한 이후로 물관리, 유기물의 종류, 재배법, 품종, 질소질 비종 등이 미치는 영향 및 효과적인 저감방법에 관한 연구 (Kim et al., 2002; Ko et al., 1998; 2000; 2002; 2007; Lee et al., 1997, 2005; Shin, 1996)가 지속되어 왔다. 그러나 국내에서의 논토양 온실가스 배출에 관한 연구는 재배관리에 의한 저감방법 개발 등의 인위적 요인에 주로 집중되어 있고, 배출이 일어나는 논토양의 유기물 함량, 물리적 특성 및 입지조건과 같은 자연적 요인에 관한 연구는 많이 이루어지지 않은 실정이다.

따라서 본 연구는 입지조건과 같은 자연적 인자가 논토양에서의 CH₄ 배출에 미치는 영향을 살펴보고자 2004년, 2005년 및 2007년의 3년간 경남 밀양에 위치한 국립식량과학원 기능성작물부 시험포장과 인근 포장에서 수행하였으며, CH₄ 생성의 탄소원인 토양유기물, 토양의 산화환원 정도와 관련 깊은 벼 논 유형 및 CH₄ 생성미생물의 활력에 영향을 미치는 기온과 관련 있는 농업기후대별로 논토양조건에서 CH₄ 배출량을 조사하였다.

재료 및 방법

토양유기물 함량에 따른 논토양에서의 CH₄ 배출량
토양유기물 함량 차이가 온실가스 배출에 미치는 영향을 조사하기 위하여 동일한 토양 입지 및 재배조건에서 동일 비료의 장기적 연용에 의하여 동일한 포장임에도 시험구에 따라 토양유기물 함량이 달라진 국립식량과학원 기능성작물부내 시험포장에서 2004년 논토양 CH₄ 배출량을 조사하였다.

실험이 수행된 포장은 1967년 이후 2004년까지 38년에 걸쳐 동일한 시비관리를 한 포장으로, CH₄ 배출량을 조사한

처리는 장기구명시험 처리구 중 1) 3요소 (NPK), 2) 3요소+규산 (NPK+Si), 3) 퇴비 (COM), 4) 3요소+퇴비 (NPK+C), 5) 무비 (No-F)를 장기적으로 처리하여 토양 유기물 함량이 서로 상이한 토양이었다. 각 처리구 토양의 화학적 특성을 조사하기 위하여 토양 pH는 토양과 증류수의 비율을 1:5로 희석하여 초자전극법으로 분석하였고 유기물은 Tyurin 법, 유효인산은 Lancaster법, 양이온인 K, Ca는 1N-NH₄OAc로 침출시킨 후 ICP를 이용하여 분석하였다.

시험 전 토양의 화학적 특성은 Table 1과 같은데 각 처리별 유기물함량은 3요소+퇴비구 38.0 g kg⁻¹으로 가장 높았고, 퇴비 34.5 g kg⁻¹, 3요소 31.0 g kg⁻¹, 3요소+규산 28.7 g kg⁻¹ 및 무비 23.6 g kg⁻¹의 순으로 나타났다.

시험에 사용된 벼 품종은 화삼벼이고, 장기구명시 시비량은 N : P₂O₅ : K₂O를 '67~'77년까지는 120 : 80 : 80 kg ha⁻¹, '78년부터 현재까지는 150 : 100 : 100 kg ha⁻¹ 이었다. 퇴비는 가축분이 혼입되지 않은 순수 벼짚을 주원료로 한 완숙 퇴비를 10 ton ha⁻¹, 규산은 분상 규산질 광재를 '81~'85년까지는 300 kg ha⁻¹, '86~'03년까지는 500 kg ha⁻¹를 매년 3월 하순경 경운 전에 사용하였다.

당해 연도의 시비가 온실가스 배출에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 퇴비 및 규산을 3월 하순 처리한 것을 제외하고는 온실가스 측정을 위해 설치한 chamber내의 시비관리는 벼 표준재배법에 따라 동일하게 관리되었다. 사용된 퇴비는 CH₄ 생성균의 직접적인 기질이 되는 이분해성 유기물 (Croziere et al., 1994; Yagi et al., 1990) 이 적은 완숙퇴비였고, 또한 사용시기도 3월 하순경으로 퇴비 내 남아있던 이분해성 유기물이 6월 이양 전까지 대부분 분해되어 당해 연도에 사용된 퇴비가 CH₄ 배출에 미친 영향은 크지 않았으리라고 생각된다.

논 유형에 따른 논토양 CH₄ 배출량 평가 논은 토지생산력이 높으며 벼 재배에 저해인자가 없는 보통논 (전국 논토양 중 분포비율 31.9%), 점토함량이 적어 수분 및 양분 보유력이 약한 사질논 (31.9%), 경작년수가 적어 토층분화가 덜된 미숙한 논 (23.0%), 지하수위가 높거나 물이 솟아 습해가 우려되는 습답 (9.1%) 및 염해논 (3.9%),

Table 1. Chemical properties of used soil of long term fertilizer applied plots for estimating CH₄ emission by soil organic matters in paddy field.

Treatment	pH	EC	OM	Avail. P ₂ O ₅	Exch. Cation	
					K	Ca
	(1:5)	dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	----- cmol _c kg ⁻¹ -----	-----
NPK	5.35	0.51	31.0	762.5	0.23	4.6
NPK+Silicate	6.49	0.60	28.7	704.6	0.22	8.1
Compost	5.46	0.69	34.5	390.6	0.56	4.9
NPK+Compost	5.52	0.71	38.0	1288.1	0.56	7.5
No Fertilizer	5.11	0.44	23.6	127.5	0.20	4.0

특이산성은 (0.2%)으로 유형에 따라 나눌 수 있다 (농촌진흥청, 1992). 본 연구에서는 2005년 우리나라 논 분포의 대부분을 차지하는 보통논, 미숙논, 사질논 및 습논에서 논 토양 온실가스 배출량을 조사하였는데, 보통답과 미숙답은 경남 밀양 국립식량과학원 기능성작물부내 시험포장에서, 사질답은 국립종자원 경남지원내 시험포장 (밀양시 상남면 기산리), 습답은 기능성작물부 인근에 위치한 농가포장 (밀양시 하남읍 파서리)에서 조건에 적합한 포장을 선정하여 실시하였다. 벼 품종은 중만생종인 일미벼를 6월 상순 중묘 기계이앙 후 표준재배법에 따라 재배하였다.

논 유형별 온실가스 배출량 시험이 수행된 논토양의 이화학적 성질은 토양유기물 함량별 온실가스 배출량시험과 동일한 방법으로 분석하였고, 논토양 투수속도는 철제로 만든 무저원통을 토심 20 cm의 깊이로 각 처리구마다 3반복 설치하여, 이양후 부터 완전낙수시까지 총 8회 측정하였다. 투수속도의 측정은 24시간 동안의 논물 총 감수심 및 증발에 의한 감수심을 조사하여 총 감수심에서 증발량을 제외한 감수심의 변화로 논토양 투수속도를 측정하였다.

유형별 논토양의 시험 전 토양 특성분석 결과를 보면 (Table 2), 습논의 토양 유기물 함량이 38.4 g kg⁻¹로 가장 높았고, 투수속도는 2.5 mm d⁻¹로 가장 느린 반면, 사질논은 유기물 함량이 28.1 g kg⁻¹로 가장 낮았고, 투수속도는 10.9 mm d⁻¹로 가장 높았다.

농업기후대에 따른 논토양 CH₄ 배출량 평가 농업기후대에 따른 온실가스 배출량 구명은 Choi et. al. (1985)이 발표한 수도재배 주요 농업기후대중 영남내륙지대 (밀양, 국립식량과학원 기능성작물부, 해발 10 m), 영남내륙산간지대 (상주), 동해안중부지대 (영덕, 해발 8 m)에서 조사하였다. 기온의 차이가 온실가스 배출량에 미치는 영향을 보다 뚜렷이 알고자 영남내륙산간지대의 시험지역인 상주에서는 시내 평야지인 신봉동 (해발 100 m)과 중산간지대인 화서면 (해발 285 m)의 2지점에서 조사하여 총 4지점에서 2007년 논토양 온실가스 배출량을 조사하였다.

온실가스 배출량이 조사된 지점은 온도이외의 다른 요인이 배출량에 미치는 영향을 최소화하고자 가능한 특성

Table 2. Major characteristics of the soils experiment used of CH₄ emission amounts by paddy field type.

Paddy field type	pH	EC	OM	Avail. P ₂ O ₅	Exch. Cation		Soil Texture	Percolation rate
					K	Ca		
	(1:5)	dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	-----	cmol _c kg ⁻¹	-----	mm d ⁻¹
Mature paddy	6.2	0.84	33.1	137.3	0.43	5.5	SiCL	5.6 ± 1.71
Immature paddy	6.4	0.54	29.5	145.3	0.34	6.8	SiCL	3.9 ± 0.71
Sandy paddy	6.0	0.45	28.1	200.5	0.23	3.0	SL	10.9 ± 1.81
Wet paddy	5.9	0.92	38.4	260.4	0.56	5.1	SL	2.5 ± 0.48

Table 3. Average, maximum and minimum temperature of experimented sites for estimating CH₄ emission from paddy fields by agricultural climatic zone during rice cultivation.

Sites	Month	Average temperature	Maximum temperature	Minimum temperature
		----- °C -----		
Yeongnam inland zone (Milyang)	Jun	22.6	27.6	18.2
	Jul.	24.4	28.5	21.0
	Aug.	26.8	30.8	24.0
	Sep.	22.7	27.1	19.3
	Ave.	24.2	28.5	20.6
Yeongnam inland mountainous zone (Sangju Sinbong, plain area)	Jun	22.1	28.4	17.0
	Jul.	23.2	27.4	19.6
	Aug.	26.2	31.9	22.6
	Sep.	20.9	26.6	17.4
	Ave.	23.2	28.6	19.2
Yeongnam inland mountainous zone (Sangju Hwaseo, mountainous area)	Jun	20.5	25.9	15.8
	Jul.	22.1	26.0	19.2
	Aug.	24.4	28.8	21.2
	Sep.	19.5	23.6	16.2
	Ave.	21.6	26.1	18.1
Eastern coast of central zone (Yeongduk)	Jun	20.4	27.2	20.2
	Jul.	22.7	26.3	19.7
	Aug.	26.0	31.0	22.1
	Sep.	21.3	25.6	17.9
	Ave.	22.5	27.5	19.9

이 유사한 식양질 농토양으로 선정하였으며, 조사된지점의 벼 재배기간 중 기상조건은 Table 3과 같다. 조사대상 지점 중 벼 재배기간 평균기온이 가장 높았던 곳은 영남 내륙지대인 밀양으로 평균 24.2°C, 가장 낮았던 곳은 영남 내륙산간지대의 중산간지인 상주 화서로서 평균 21.6°C를 나타내었다.

공시 벼 품종은 감온성이 낮아 여러 기후대에서 재배 가능한 화영벼를 5.25 (상주), 5.29 (영덕), 6.5 (밀양) 각각 중묘기계이양하였고, 재배방법은 4지점 동일하게 농촌진흥청 벼 표준재배법에 준하였다.

농토양 CH₄ 시료 채취와 분석 농토양으로부터 온실가스 시료 채취는 polyacrylic plastic 재질의 밀폐식 chamber (60 cm × 60 cm × 100 cm)를 이용하였다. 시료는 이양 7일 후 부터 주 2회씩 stopcock이 장착된 60 ml의 pp 주사기로 채취하였으며, 분석은 시료채취 당일 gas chromatograph (Varian 3000, USA)로 하였다. CH₄ 분석을 위해 검출기는 FID를 사용하였고, 온도는 150°C로 하였다. 컬럼은 porapak Q (1/8"×6'), 오븐 온도는 70°C, 주입기 온도는 75°C, 검출기 온도는 150°C, carrier gas는 N₂를 사용하였다. CH₄ 분석결과는 CO₂ 당량으로 환산하기 위하여 배출량에 CH₄ 21의 환산지수를 곱하여 지구온난화지수 GWP (Global Warming Potential) 로 나타내었다 (IPCC, 1996).

결과 및 고찰

토양 유기물 함량에 따른 CH₄ 배출량 Table 4는 토양 유기물 함량이 서로 다른 비료장기연용 효과 구명시험 포장에서 벼 표준재배시 농토양 CH₄ 배출량을 나타낸 것이다. CH₄ 배출량은 유기물 함량이 가장 높았던 3요소+퇴비시험구에서 171.3 kg ha⁻¹ yr⁻¹로 가장 많았고 (100%), 다음으로는 퇴비처리구로서 3요소+퇴비 시험구의 72.1%, 3요소 70.5%, 3요소+규산 49.9%, 무비 41.1%의 수준이었는데, 이는 각 처리구의 토양 유기물 함량의 순과 일치하였다. 토양 내 유기물 함량은 벧짚 등 외부로부터 공급되는 신선한 유기물과 함께 CH₄ 생성균의 기질이 되는 탄소원의 역할을 함으로써 CH₄ 발생을 증가시키는데, CH₄ 발

생은 토양 내 수용성 탄소의 양이나 쉽게 무기화할 수 있는 탄소의 양과 정의 상관성이 있다고 알려져 있다 (Yagi et al., 1990; Croziere et al., 1994; Ko et al., 1998). 사용 유기물에 의하여 농토양으로부터 CH₄ 배출이 증가되는 것은 유기물 종류, 사용시기 및 사용량 등 다양한 연구결과로부터 보고되었는데, Yagi et al. (1990)는 유기물원으로 6~9 ton ha⁻¹의 벧짚을 사용하였을 때 NPK구에 비하여 1.8~3.5 배의 CH₄ 배출이 증가되었다고 하였고, Xie et al. (2010)은 유기물의 사용시기를 벼 재배기간 중에서 수확 후 건조기간으로 바꿈으로 37%의 CH₄ 배출을 줄일 수 있다고 하였다.

토양 유기물함량이 CH₄ 배출에 미치는 영향에 대해 Mitra et al. (2002)은 인도, 필리핀을 비롯한 6개국에 참여한 'Methane Asia Campaign-98' 프로젝트의 연구결과에서 토양 유기물 함량과 CH₄ 배출량과의 관계를 조사하여 보고하였다. 토양 탄소 함량이 0.7% 미만인 상시담수 상태의 농토양은 12 (최소 5~최대 29) g m⁻², 0.7% 이상인 경우 36 (최소 22~최대 57) g m⁻², 간단관수재배의 경우 상시담수시의 1/6수준이라고 밝혔다. 본 시험지역의 토양탄소는 모두 0.7% 이상이고 (토양 유기물 함량 12.1 g kg⁻¹ 이상) CH₄ 배출량은 7.0~ 17.1 g m⁻² (Table 1, 4)로 Mitra et al. (2002)의 상시담수 상태의 배출량에 비하면 낮은 수준이었으나 우리나라는 Mitra et al. (2002)의 연구에서 조사된 나라들과 기온조건이 다르고 CH₄ 배출량에 영향을 직접적으로 미치는 물관리 방법에서도 중간낙수를 실시하였기 때문에 차이가 난 것으로 생각되었다. Wassmann et al. (1998)도 11개의 필리핀 농토양을 대상으로 한 혐기 배양시험 결과, CH₄ 생성이 토양 중 유기태 탄소의 함량, 특히 표토의 유기태 탄소함량과 밀접한 상관 (R²=0.94)이 있다고 보고한 바 있다.

우리나라 토양조건에서는 Lim et al. (2010)이 염농도가 서로 다른 간척지 토양을 48시간동안 37°C조건에 배양 후 CH₄ 배출량을 조사하였는데, 그 결과 염농도에 따라서는 CH₄ 배출량의 차이가 크지 않았으나 토양 유기물 함량과 고도로 유의한 정의 관계를 나타내었다고 하여 본 시험결과와 동일하였다.

Figure 1은 토양 유기물 함량과 CH₄ 배출량을 GWP로

Table 4. CH₄ and GWP emission amounts from different content of soil organic matter in long term same fertilization paddy plots.

Long term fertilization plots	Soil OM	CH ₄	GWP	Index
	g kg ⁻¹	kg ha ⁻¹ yr ⁻¹	kg CO ₂ ha ⁻¹ yr ⁻¹	%
NPK	31.0	120.7	2,535	70.5
NPK+Si	28.7	85.4	1,793	49.9
Compost	34.5	123.5	2,594	72.1
NPK+Compost	38.0	171.3	3,597	100
No fertilizer	23.6	70.4	1,478	41.1

환산한 논토양 온실가스 배출량 사이의 관계를 나타낸 그래프로서 논토양 온실가스 배출량은 토양유기물함량과 $r=0.963^{**}$ 의 고도로 유의한 상관관계를 나타내었다 ($y = 4.3096x^{1.8314}$, 단 x 는 토양 유기물함량, $g\ kg^{-1}$).

논토양 유형에 따른 온실가스 배출량 논토양 유형별 재배기간 중 CH₄ 배출량은 습답 674.3 $kg\ ha^{-1}\ yr^{-1}$, 미숙답 431.4 $kg\ ha^{-1}\ yr^{-1}$, 보통답 315.9 $kg\ ha^{-1}\ yr^{-1}$ 및 사질답 160.6 $kg\ ha^{-1}\ yr^{-1}$ 의 순으로 습답에서 배출량이 가장 많았다 (Table 5). 습답에서 배출량이 가장 많았던 것은 높은 토양 유기물함량으로 CH₄ 발생의 기질이 되는 토양 탄소원이 많았을 뿐 아니라, 2.5 $mm\ d^{-1}$ 의 느린 투수속도로 인하여 혐기성 가스인 CH₄ 생성이 적합하도록 토양 산화환원전위가 충분히 낮아졌기 때문으로 생각된다. 사질답에서 CH₄ 배출이 가장 낮았던 것은 토양의 빠른 투수속도 (10.9 $mm\ d^{-1}$)에 의해 대기로부터 용존된 산소를 포함하고 있는 관개수의 침투증가로 토양 산화환원전위가 상승하여 절대혐기성균인 CH₄ 생성균의 활동이 억제되고, CH₄

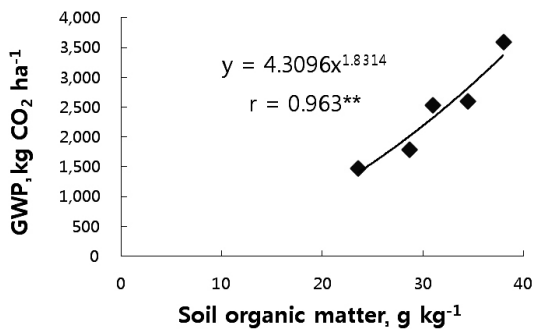


Fig. 1. GWP from different contents of soil organic matter in long term same fertilization paddy fields.

생성의 기질이 되는 TOC (total organic carbon)와 같은 탄소원의 용탈이 조장되어 (Kimura et al., 1992, 2004; Murase et al., 1993), 사질답 내 논토양의 유기물함량이 다른 유형의 유기물함량보다 낮아진 것이 CH₄ 배출 저감의 원인으로 작용하였으리라 생각된다 (Table 2). Ko et al. (2007)은 토양 투수속도가 다른 논에서 CH₄ 배출을 조사한 결과, 투수속도가 11.9 $mm\ d^{-1}$ 로 빠른 논에서 6.1 $mm\ d^{-1}$ 로 느린 논에 비하여 46%의 CH₄ 배출이 감소되었다고 보고하였으며, Yagi et al. (1990)도 토양 투수속도가 온실가스 배출에 미치는 영향에 대하여 이와 유사한 결과를 보고하였다.

미숙답과 보통답은 CH₄ 발생량이 가장 많았던 습답의 64.0%, 46.8%가 각각 배출되었다. 한국토양총설에 따르면 미숙답은 보통답에 비하여 경작년수가 적어 토층분화가 덜 된 논을 규정하는 것으로 보통답에 비하여 점토함량이 많고 토지생산력은 보통인 논토양이다 (농촌진흥청, 1992). 본 시험에서 미숙답의 CH₄ 배출량이 보통답에 비하여 높았던 것은 논토양에서 CH₄은 물에 담수되는 토양표면으로부터 벼 뿌리가 존재하는 작토층에서 대부분 발생하므로 (Schutz et al., 1990), 토층분화 정도의 차이와 같은 토양 유형이 영향을 끼쳤다고보다 Table 2에 나타난 바와 같이 점토함량이 높았던 미숙답 조사지점의 토양 투수속도가 보통답에 비하여 느렸던 것에 영향을 받았을 것으로 생각되었다.

농업기후지대에 따른 온실가스 배출량 농업기후지대에 따른 GWP 기준 논토양 온실가스 배출량 (Table 6)은 영남내륙지대 (밀양)에서 4,967 $kg\ CO_2\ ha^{-1}\ yr^{-1}$ 로 가장 배출량이 많았고 (100%), 다음으로 동해안중부지대 (영

Table 5. CH₄ and GWP emission amounts from different type of paddy field.

Paddy types	CH ₄	GWP	Index
	$kg\ ha^{-1}\ yr^{-1}$	$kg\ CO_2\ ha^{-1}\ yr^{-1}$	%
Mature paddy	315.9	6,634	46.8
Immature paddy	431.4	9,059	64.0
Sandy paddy	160.6	3,373	23.8
Wet paddy	674.3	14,160	100.0

Table 6. CH₄ and GWP emission amounts by agricultural climatic zone during cultivation.

Agricultural climatic zone	CH ₄	GWP	Index
	$kg\ ha^{-1}\ yr^{-1}$	$kg\ CO_2\ ha^{-1}\ yr^{-1}$	%
Yeongnam inland zone (Milyang)	236.5	4,967	100
Yeongnam inland mountainous zone (plain area, Sanju Sinbong)	216.7	4,552	91.6
Yeongnam inland mountainous zone (mountainous area, Sangju Hwaseo)	186.6	3,920	78.9
Eastern coast of central zone (Yeonduk)	223.7	4,697	94.6

덕) 94.6%, 영남내륙산간 평지 (상주 신봉) 91.6%, 영남내륙산간 산지 (상주 화서) 78.9%의 순으로 나타났다. 이는 벼 재배기간 중 평균기온의 순서와 같은 경향으로 (Table 3), 평균기온이 가장 높았던 영남내륙지대 (밀양)에서 논토양 온실가스 배출량이 가장 많았고, 해발이 285 m로 위치가 높아 평균기온이 가장 낮았던 영남내륙산간 산지 (상주 화서) 에서 배출량이 낮았다.

이와 같은 결과는 벼 재배기간 중 기온이 논토양 CH₄ 배출량에 직접적인 영향을 미쳤기 때문으로 생각되는데, Watanabe et al. (2005)은 6년간의 Pot 시험을 통하여 CH₄ 배출량과 기온사이의 정량적인 관계를 구명한 결과, 유효 적산온도 [Σ(T-15), T는 평균기온 (°C)와 CH₄ 배출량 사이에 벗짚 사용시 r = 0.830^{***}, 무사용시 r = 0.818^{***}의

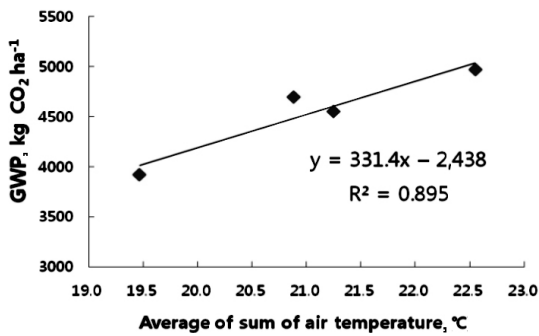


Fig. 2. GWP from rice paddy field and average of sum of air temperature by agricultural climatic zone during rice cultivation period.

* Average of Sum of air temperature : Sum of air temperature/rice cultivation days Rice cultivation period : 20. May~5. Oct. (138days).

뚜렷한 상관관계가 있음을 보고하였다. 또한 하루 및 계절 중 논토양 CH₄ 배출 변화양상도 하루 및 계절의 온도변화와 밀접한 상관이 있는 것으로 여러 연구 결과에서 알려진 바 있다 (Minami, 1993; Shin et al., 1995; Watanabe et al., 2001).

영남지역 농업기후지대에 따른 논토양 온실가스 배출량을 정량적으로 설명할 수 있는 유의성 있는 관계식을 구하기 위하여, 기후지대별 온도관련 인자와 GWP로 환산한 논토양 CH₄ 배출량 사이의 결정계수를 조사하였다. 사용된 기후지대별 온도관련 인자는 벼 재배기간중 적산온도를 재배일수로 나눈 평균적산온도 및 온실가스 발생시기인 7-9월 평균기온을 이용하였는데, 재배기간 중 평균적산온도와 논토양 온실가스 배출량사이의 결정계수는 R²=0.895 (Fig. 2) 이었고, 7-9월 평균기온과 논토양 온실가스 배출량은 R²=0.906 (Fig. 3)으로 나타나, 평균적산온도와 평균기온에 따라 온실가스 배출의 경시적 변이를 각각 90.3%와

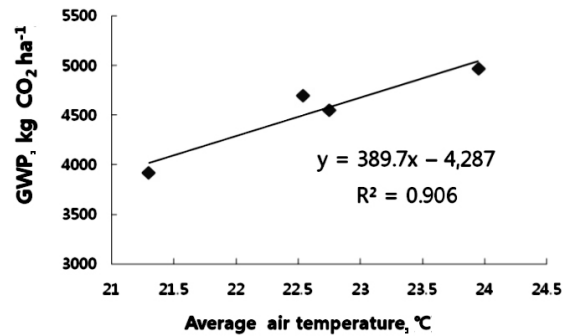


Fig. 3. GWP from rice paddy field and average air temperature of agricultural climatic zone from Jul. to Sep.

Table 7. Expected CH₄ emission amounts by Agricultural climatic zone.

Agricultural climatic zone	Investigated sites		Ave. temperature of climatic zone from Jul. to Sep. °C	Expected emission amounts [§] kg CO ₂ ha ⁻¹ yr ⁻¹	Index %
	Locations	Ave. temp. during cultivation [‡] °C			
Taebaek semi-mountainous zone	Sangju Hwaseo [†]	21.2	21.7	4,169	82.6
Yeongnam inland mountainous zone (plain area)	Sangju Sinbong	22.8	22.8	4,598	91.1
Yeongnam east-south interior zone	-	-	23.4	4,832	95.8
Yeongnam basin zone	-	-	23.4	4,832	95.8
Yeongnam inland zone	Milyang	23.6	24.0	5,046	100.0
South coast zone	-	-	23.9	5,027	99.6
Central of eastern coast zone	Yeongduk	22.1	22.5	4,481	88.8
South of eastern coast zone	-	-	23.5	4,871	96.5

[†]Data of Taebaek semi-mountainous zone is substituted for one of Yeongnam interior mountainous zone in Sangju Hwaseo.

[‡]Ave. air temp. of climatic zone during cultivation.

Average air temperature of AWS data during rice cultivation (5.20~10.5).

[§]Expected emission amounts (Y) : Y=389.7X - 4,287, X, Average air temperature from Jul. to Sep.

90.8%를 설명할 수 있었다. 표본수가 4일 때 5% 유의수준에서 단순선형 회귀식이 통계적으로 유의할 결정계수 값은 0.903 이상이므로 (Hahn, 1973), 2가지 농업기후대별 온도인자 중 논토양에서 발생하는 온실가스 배출량을 유의적으로 설명하는 데는 7-9월 평균 기온값을 인자로 한 회귀식을 이용하는 것이 더 적합할 것으로 생각되었다.

따라서, 농업기후지대에 따른 온실가스 배출량을 구하기 위하여, 농업기후지대 7-9월 평균기온과 논토양 온실가스 배출량 사이의 회귀식인 $y = 411.6x - 4,483$ 을 이용하여 직접적으로 측정이 이뤄지지 않은 기후대를 포함한 영남지역 농업기후지대의 논토양 온실가스 예상배출량을 구하였다 (Table 7). 단, 태백준고냉지대의 배출량은 조사지역 중 태백준고냉지의 기온특성과 유사하였던 영남내륙산간지대의 증산간지인 상주 화서지점의 자료에 준하였다. 예상배출량은 영남내륙지대의 4,832 kg CO₂ ha⁻¹ yr⁻¹을 기준 (100%)으로 하였을 때, 남부해안지대 99.6%, 동해남부지대 96.5%, 7-9월 평균기온이 같았던 영남동서내륙지대와 영남분지지대 95.8%, 영남내륙산간지대 91.1%, 동해중부지대 88.8%, 태백준고령지대 82.6%의 순으로 나타났다.

논토양에서 온실가스 배출은 온도변화에 민감한 미생물 뿐 아니라 작물의 바이오매스 등 생물상 전체에 의하여 영향을 받으므로, 온도와 논토양 온실가스 배출량 사이의 관계를 정확히 이해하기 위해서는 영남지역기후대 뿐만 아니라 보다 넓은 범위에서의 기온변화가 온실가스 배출에 미치는 영향에 대한 추가적인 연구와 데이터의 수집이 필요할 것으로 생각된다.

요 약

영남지역에서 자연적 입지조건이 논토양 온실가스 배출에 미치는 영향을 살펴보고자, 2004년, 2005 및 2007년의 3년간 경남 밀양에 위치한 국립식량과학원 기능성작물부 시험포장과 인근 포장에서 연구를 수행하였다. 논토양에서 온실가스 배출과 관련 깊은 자연적 요인인 논토양 유기물 함량, 논 유형 (보통답, 미숙답, 습답 및 사질답) 및 농업기후대별 (영남내륙지대, 영남내륙산간지대 평지 및 산지, 동해안중부지대) 로 CH₄ 배출량을 조사하였다.

논토양 유기물 함량에 따른 CH₄ 배출량은 동일비료의 장기연용에 의하여 인접한 토양임에도 토양유기물 함량이 서로 다른 시험구에서 벼 표준재배법에 따라 동일하게 시비관리하면서 조사하였다. 논토양 CH₄ 배출량은 GWP 기준으로 3요소+퇴비 장기시용에 의하여 유기물 함량이 가장 높았던 처리구에서 CH₄ 배출량이 3,597 kg CO₂ ha⁻¹ yr⁻¹ (100%)으로 가장 많았고, 다음으로 퇴비 72.1%, 3요

소 70.5%, 3요소+규산 49.9% 및 무비 41.1%의 순으로 나타났다. 이는 토양 유기물 함량의 순서와 일치하였으며, 논 토양 온실가스 배출량과 토양 유기물 함량 사이에는 $r = 0.963^{**}$ 의 고도로 유의한 정의 상관관계가 있었다 ($y = 4.3096x^{1.81314}$, 단 x는 토양 유기물함량, g kg⁻¹).

논 유형별 CH₄ 배출량 (GWP)은 토양 투수속도가 느리고, 유기물 함량이 높아 토양의 혐기상태가 강하게 유지되는 습답에서 14,160 kg CO₂ ha⁻¹ yr⁻¹ (100%)로 가장 많았고, 미숙답은 64.0%, 보통답 46.8%, 사질답 23.8%의 순으로 나타났다.

농업기후대에 따른 논토양 CH₄ 배출량 (GWP)은 벼 재배기간 중 평균기온이 가장 높았던 영남내륙지대 (밀양)에서 4,967 kg CO₂ ha⁻¹ yr⁻¹ (100%)로 가장 배출량이 많았고, 동해안중부지대 (영덕) 94.6%, 영남내륙산간 평지 (상주 신봉) 91.7% 및 영남내륙산간 산지 (상주 화서) 78.9%의 순이었다. 기후대별 온도인자 중 7-9월 평균기온과 논 토양 온실가스 배출량 사이의 회귀식은 $y = 389.7x - 4,287$ (단 x는 농업기후대별 7-9월 평균기온, R²=0.906^{*})이었다.

이와 같은 자연적 입지조건이 논토양 CH₄ 배출에 미치는 영향에 대한 이해를 높임으로써 논토양 입지조건을 고려한 온실가스 저감방법 구명 및 개발에 기초연구로 이용될 수 있을 것이다.

인 용 문 헌

- Choi, D.H., Y.S. Jung, B.C. Kim and M.S. Kim. 1985. Zoning of agroclimatic regions based on climatic characteristics during the rice planting period. *Korean J. of Crop Sci.* 30(3):229-235.
- Cicerone, R.J. and J.D. Shettler. 1981. Sources of atmospheric methane: Measurements in rice paddies and discussion. *J. Geophys. Res.* 86:7203-7209.
- Croziere, C.R., R.D. DeLaune, and W.H.Jr. Patrick. 1994. Methane production in Mississippi Deltatic Plain wetland soil as a function soil redox species. *Soil and global change.* Lewis Publisher, Chelsea, MI.
- Hahn, G.J. 1973. The coefficient of determination exposed. *Chemtech*, October, 609-611.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1996. Guidelines for national greenhouse inventories.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2001. *Climate Change 2001 : The Scientific Basis.* Cambridge University PRESS, Cambridge, UK.
- Kimura, M., Y. Miura, A. Watanabe, J. Murase, and S. Kuwatsuka. 1992. Methane production and its fate in paddy fields. I. Effects of rice straw application and percolation rate on the leaching of methane and other soil components into the subsoil. *Soil Sci. Plant Nutr.* 38:665-672.

- Kimura, M. 1997. Sources of methane emitted from paddy fields. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 49:153-161.
- Kim, G.Y., S.I. Park, H.S. Beom, and Y.K. Shin. 2002. Emission Characteristics of Methane and Nitrous Oxide by Management of Water and Nutrient in a Rice Paddy Soil. *Korean. J. Env. Agri.* 21(2):136-143.
- Ko, J.Y., H.W. Kang, U.G. Kang, H.M. Park, D.K. Lim, and K.B. Park. 1998. The effects of nitrogen fertilizers and cultural patterns on methane emission from rice paddy field. *Korean. J. Env. Agri.* 17(3):227-233.
- Ko, J.Y. and H.W. Kang. 2000. The effects of cultural practices on methane emission from rice field. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 58:311-314.
- Ko, J.Y., J.S. Lee, M.T. Kim, H.W. Kang, U.G. Kang, D.C. Lee, Y.G. Shin, K.Y. Kim, and K.B. Lee. 2002. Effects of Cultural Practices on Methane Emission in Tillage and No-tillage Practice from Rice Paddy Fields. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 35(4):216-222.
- Ko, J.Y., J.S. Lee, K.Y. Jung, C.Y. Dae, D.W. Lee, E.S. Yun, C.S. Kim, and S.T. Park. 2007. Effects of Soil Percolation Rate by Different Drainage Treatments on CH₄ and N₂O Emissions from Paddy Field. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 40(3):214-220.
- 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.
- Lee, K.B., J.G. Kim, C.W. Park, Y.K. Shin, D.B. Lee, and J.D. Kim. 2005. Effect of Irrigation Water Depth on Greenhouse Gas Emission in Paddy Field. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 38(3):150-156.
- Lim, C.H., S.Y. Kim, J. Gutierrez, and P.J. Kim. 2010. Impact of soil salinity on CH₄ production in coastal reclaimed land. Spring symposium proceeding of Korean J. Soil Sci. Fert.:330-331.
- Minami, K. 1993. Methane from rice production. *Res. Rep. Div. Environ. Planning.* 9:243-258.
- Mitra, A. P., Prabhat K. G., and C. Sharma. 2002. Refinement in methodologies for methane budget estimation from rice paddies. *Nutrient Cyc. in Agro.* 64:14-155.
- Murase, J., M. Kimura and S. Kuwatsuka. 1993. Methane production and its fate in paddy fields. III. Effects of percolation on methane flux distribution to the atmosphere and the subsoil. *Soil Sci. Plant Nutr.* 39:63-70.
- Neue, H.U. 1993. Methane emission from rice fields. *Biosciences.* 43:466-474.
- Schutz H., W. Seiler, and R. Conrad. 1990. Influence of soil temperature on methane emission from rice paddy fields. *Biogeochemistry.* 11:77-95.
- Shin, Y.K., B.L. Lee, and J.S. Suh. 1995. Influence of soil and air temperature on the diel change of methane emission in a Korean paddy soil incorporated with rice straw. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 28(3):266-269.
- Shin, Y.K. 1996. Mitigation options for methane emission from rice fields in Korea. *Ambio.* 25(4):289-291.
- Wassmann, R., H.U. Neue, C. Bueni, R.S. Lantin, M.C.R. Alberto, L.V. Buendia, K. Bronson, H. Papen and H. Rennenberg. 1998. Methane production capacities of different rice soils derived from inherent and exogenous substrates. *Plant and soil.* 203:227-237.
- Watanabe, A., H. Yamada and M. Kimura. 2001. Effect of shifting growth stage and regulating temperature on seasonal variation of CH₄ emission from rice. *Global Biogeochem. cycles.* 15:729-739.
- Watanabe, A., H. Yamada and M. Kimura. 2005. Analysis of temperature effects on seasonal and interannual variation in CH₄ emission from rice-planted plots. *Agric. Ecosyst. Environ.* 105:439-443.
- Xie, Z., G. Liu, Q. Bei, H.Y. Tang, J.S. Liu, H.F. Sun, Y.P. Xu, J.G. Zhu, and G. Cadisch. 2010. CO₂ mitigation potential in farmland of China by altering current organic matter amendment pattern. *Earth Science.* 53(9):1351-1357.
- Yagi, K., K. Minami, and Y. Ogawa. 1990. Effects of water percolation on methane emission from some Japanese paddy fields. *Soil Sci. Plant Nutr.* 36:599-610.
- 농촌진흥청. 1992. 한국토양총설, 농업기술연구소 토양조사자료 13. p.725.
- 농촌진흥청. 2010. 기후변화대응 연구 증장기 계획. p.235.