

## Effects of Water Management Methods on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O Emission From Rice Paddy Field

Gun-Yeob Kim\*, Jong-Sik Lee, Hyun-Cheol Jeong, Eun-Jung Choi, Yeon-Kyu Sonn, and Pil-Joo Kim<sup>1</sup>

*National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Suwon, 441-707, Korea*

<sup>1</sup>*Gyeongsang National University, Jinju, 660-701, Korea*

(Received: November 19 2013, Accepted: November 29 2013)

The effects of water-saving irrigation on the emissions of greenhouse gases and the prokaryotic communities in rice paddy soils were investigated through a field experiment. In the Water-Saving (WS) irrigation, the water layer was kept at 2~3 cm while it was kept at 6 cm in the Continuously Flooding (CF) irrigation. A plot was treated with Intermittently Drainage (ID) that is drained as fine cracks on the floor were seen after transplanting. GHGs emission amounts from WS plots were reduced by 78.1% compared to that from CF plot and by 70.7% compared to that from ID plot, meaning that WS could help contribute to mitigation of the greenhouse gas accumulation in the atmosphere.

**Key words:** Water management methods, Paddy, GHGs emission

### Comparison of water quantity, yield and GHGs emission from a paddy field under different water management.

Water management	Weed occurrence	Total water quantity	Yield of rice	GWP	Emission rate
	kg ha <sup>-1</sup>	----- ton ha <sup>-1</sup> -----	-----	--- CO <sub>2</sub> ton ha <sup>-1</sup> ---	(%)
CF <sup>†</sup>	0.84	5.49	5.83	6.02	100
ID	28.8	4.43	5.75	4.51	74.9
CF+WS	16.1	3.86	6.18	1.85	30.7
WS	42.4	2.78	6.25	1.32	21.9

<sup>†</sup>CF: (Continuous-Flooding), ID (Intermittently Drainage), CF+WS (Continuously Flooding+Water-Saving), WS (Water-Saving)

<sup>††</sup>GWP: Global Warming Potential

\*Corresponding author : Phone: +82312900240, E-mail: gykim1024@korea.kr

<sup>§</sup>Acknowledgement: This study was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ007874)", Rural Development Administration, Republic of Korea.

## Introduction

지표면에서 반사되는 적외선을 흡수하여 대기 열수지 및 온난화에 영향을 주는 CH<sub>4</sub>은 지구온난화잠재력 (Global Warming Potential: GWP)이 CO<sub>2</sub> 대비 21배로 농경지에서 CH<sub>4</sub> 배출은 토양조건이 혐기적인 상태에서 발생되므로 우리나라에서는 담수상태로 재배되는 논토양이 주 배출원으로 알려져 있다. 논토양은 담수상태로 대기로부터 산소공급이 원활하지 않기 때문에 토양 내 유기물은 혐기적 분해과정을 거치면서 밭 토양에서 발생되지 않는 미량기체들인 CH<sub>4</sub>, ammonia, hydrogen sulfide, mercaptans, dimethyl sulfide 등이 발생하게 된다. 이 중 가장 많이 배출되는 것은 CH<sub>4</sub>가스이다. CH<sub>4</sub>은 담수된 논에서 H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub> 또는 acetate를 기질로 하여 편성 혐기 조건에서 CH<sub>4</sub> 생성균에 의해 생성되며, 이렇게 생성된 CH<sub>4</sub>은 CO<sub>2</sub>로 산화되거나 벼 통기조직을 통하여 90% 이상이 배출된다. 대기로 배출된다. 그리고 논은 담수 상태에서 투입된 질소원들이 NO<sub>3</sub>→N<sub>2</sub>O→N<sub>2</sub> 전환과정을 거치는데, 중간생성물인 N<sub>2</sub>O는 신속히 N<sub>2</sub>로 전환되고, 상당량의 N<sub>2</sub>O가 물에 녹기 때문에 N<sub>2</sub>O배출량은 적다 (Freney et al., 1981; Minami et al., 1987; Smith et al., 1983). 그러나 과다한 배수는 양분 및 유기산의 용탈을 초래하고 지하수의 염류 집적을 야기 시키게 되므로 적절한 논물 관리가 필요하다. Sass et al. (1990)은 수회에 걸친 간단 관개는 토양 통기를 조장시키며 벼 수량에는 영향을 주지 않고 CH<sub>4</sub> 배출을 88%까지 감소시킨다고 하였다. 최근에는 벼 생산성 증대와 관개용수를 절약하는 SRI (System of Rice Intensification) 재배방법의 도입이 확산되고 있는데 (IRRI, 2007), 논물의 담수 깊이를 얇게 대어서 CH<sub>4</sub> 배출을 저감시키는 효과가 있다고 하였다 (Kim et al., 2012; Ponnamperna, 1972).

논물을 배수시키면 토양 Eh를 상승시켜 CH<sub>4</sub> 생성이 억제되어 매탄 배출량이 줄어들지만, 토양의 N<sub>2</sub>O의 배출량은 반대로 증가한다 (Partrick et al., 1977; Yagi et al., 1991). 따라서 논벼에서 담수기간 조절이나 담수깊이 등 물 관리에 따라 온실가스 배출에 많은 영향을 미친다는 사실을 알 수 있다.

따라서 본 논문에서는 온실가스 배출이 논물 관리를 통한 온실가스 감축효과와 벼 생산성 효과를 정량적으로 밝히고 온실가스 관리에 필요한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

## Materials and Methods

본 시험은 논물 관리를 통해 온실가스 배출에 대한 영향과 감축효과를 살펴보기 위해 수원시에 위치한 국립식량과학원의 벼 재배 시험포장에서 2012년에 수행하였다. 시험 토양은 유기물 함량이 25.7 g kg<sup>-1</sup> 그리고 인산이 158.0 mg kg<sup>-1</sup>, 암모니아태 질소 4.2 mg kg<sup>-1</sup>와 질산태질소 4.3 mg kg<sup>-1</sup>로서 토양의 이화학성 분석은 Table 1과 같다. 벼의 공시품종은 삼광벼로 5월 22일에 이앙하였으며, 재식거리가 15 × 30 cm, 수확은 10월 9일에 하였다.

농촌진흥청 작물별 시비처방기준 (1999)의 표준시비방법에 따라, 시비처리로 화학비료는 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O : 110-45-57 kg ha<sup>-1</sup> 질소는 요소를 2회 분시, 인산은 용성인비로 전량기비, 칼리는 염화칼리를 1회 분시 하였으며, 논물 관리처리는 상시담수 (Continuous-Flooding, CF)와 벼 생육기간 중 1회 (이앙 후 약 한 달인 6월 18일부터 6월 28일까지 10일간) 낙수한 간단관개 (Intermittently drainage, ID)와 생육 후기의 완전 물 떼기를 제외한 전 생육기간 동안 2~3 cm 담수깊이까지 논물을 채운다음 자연소모 (토양 중 침수와 증발)로 토양 바닥이 실금이 보이면 물을 다시 2~3 cm 관개하는 논물 얇게대기 관개 (Water-Saving, WS) 그리고 논에 잡초발생을 줄이기 위해 이앙 후, 약 한 달까지는 상시담수 상태로 유지하다가 이후로는 논물 얇게 대기를 절충한 초기담수+논물 얇게대기 (Continuously Flooding+Water-Saving, CF+WS) 등 4처리를 두었다.

CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O 플럭스를 조사하기 위해 간이폐쇄정태(簡易閉鎖靜態) chamber법 (Shin et al., 1995)을 이용하였으며, 설치된 chamber는 밑면적이 0.36 m<sup>2</sup> (0.6 × 0.6 m)이고 높이가 1 m인 투명한 polyacrylic plastic의 소재로 제작하였다 (Fig. 1). 가스시료 채취는 Yagi 등 (1991)의 방법에 의하여 10:00~13:00시 사이에 60 ml 주사기로 1주일에 2회 채취하여 분석하였다. Chamber 내 온도와 토양온도, 수온, 토양 Eh (산화환원전위)는 가스시료 채취를 시작할 때와 끝날 때 측정하였다.

채취한 공기 시료의 CH<sub>4</sub> 기체농도는 6 port gas sampling valve가 장착된 GC-FID (Varian 3800)로 분석하였으며, column은 Porapack N (80/100 mesh)을 충전한 1/8" × 2 m의 stainless steel tubing column이었고 carrier gas는 N<sub>2</sub>로 유속을 분당 30 ml로 조절하였다. N<sub>2</sub>O 기체농도는 10 port 와 4 port valve를 장착한 GC-ECD (Varian 3800)를 사용하

**Table 1. Chemical properties of soils in paddy field before experiment.**

pH	EC	OM	Av.P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	Exch. Cation		
						K	Ca	Mg
(1:5)	dS m <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>		mg kg <sup>-1</sup>		cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>		
5.32	1.23	25.7	158.0	4.2	4.3	0.16	3.99	1.45

였고 column은 Porapak Q (80/100 mesh)를 충전한 1/8" × 2 m의 stainless steel tubing column, 그리고 Detector의 온도는 320 °C로 하였다. CH<sub>4</sub> 및 N<sub>2</sub>O 분석 조건은 Table 2와 같다.

플럭스는 다음 식에 따라서 계산 ( $F$ :  $\text{mg m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ )하였다.

$$F = \rho \cdot V \cdot A^{-1} \cdot \Delta c \cdot \Delta t^{-1} \cdot 273 \cdot T^{-1}$$

$\rho$ 는 가스밀도 ( $\text{mg m}^{-3}$ ),

$A$ 는 chamber 바닥면적 ( $\text{m}^2$ ),

$V$ 는 chamber 내 공기체적 ( $\text{m}^3$ ),

$\Delta c \cdot \Delta t^{-1}$ 는 chamber내 가스농도의 평균 증가속도 ( $10^{-6} \text{m}^3 \text{m}^{-3} \text{hr}^{-1}$ ),

$T$ 는 chamber 내 평균기온 (K)

CH<sub>4</sub> 및 N<sub>2</sub>O  $\rho$ 값 ( $T=273 \text{ K}$ )은 다음과 같다.

$$\rho_{\text{CH}_4} = 0,714$$

$$\rho_{\text{N}_2\text{O}} = 1,96, \rho_{\text{N}_2\text{O}-\text{N}} = 1,25$$

지구온난화잠재력 (GWP: Global Warming Potential)은 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 배출량을 CO<sub>2</sub> 상당량으로 환산하기 위하여 CH<sub>4</sub>과 N<sub>2</sub>O 총 배출량에 지구온난화잠재력인 21배와 310배

를 각각 곱하여 환산하였다 (IPCC, 1996).

## Results and Discussion

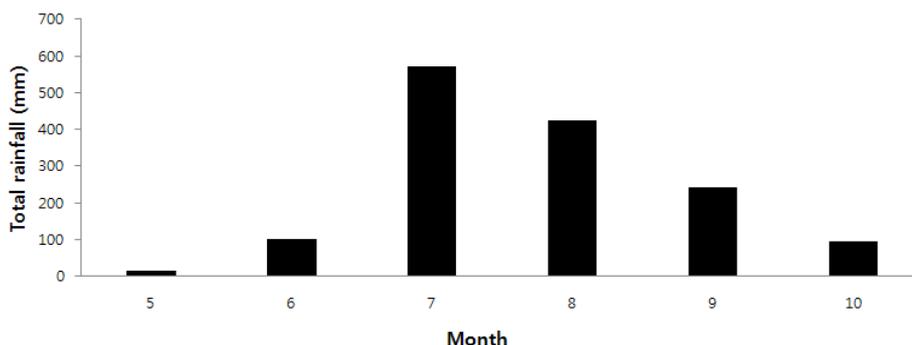
이양부터 수확까지 벼 재배기간 동안의 강우량은 Fig. 1에서 보는 바와 같다. 총강수량은 5월에 16.5 mm로 재배기간 중 가장 적었으며, 장마기간인 7월에는 572.4 mm, 8월 42.6 mm, 그리고 수확시기인 10월에는 95.6 mm 이었다.

Fig. 2에서 물 관리에 따른 토양 Eh 변화는 벼의 전 생육기간 동안 논물 얹게대기 처리가 다른 처리에 비해 높았으며, 상시답수 처리가 가장 낮았다. 그리고 토양 Eh가 낮으면 CH<sub>4</sub> 배출이 높은 것으로 나타났다. 간단관개 처리에서 중간낙수 기간인 6월 18일~6월 28일 (10일간)에 토양 Eh는 -76~+48 mV로 상승하였으며, 이 기간 동안 CH<sub>4</sub> 배출은 0~0.006  $\text{g CH}_4 \text{m}^{-2} \text{day}^{-1}$ 으로 다른 처리에 비해 가장 낮아, 토양 Eh 변화에 따라 CH<sub>4</sub> 배출량도 크게 좌우되는 경향이 있었다.

Takai et al. (1956)은 CH<sub>4</sub>가 생성되기 위해서는 토양 Eh가 -200 mV이하가 되어야 한다고 하였고, Wang et al. (1993)은 CH<sub>4</sub>가 생성이 시작되기 위한 토양 Eh는 -150 mV

**Table 2. Gas Chromatographic analysis conditions for CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O measurement.**

Detector		FID	ECD
Column	Packing material	Porapak N(80/100)	Porapak Q(80/100)
	Materials	Stainless steel	Stainless steel
	O.D. x length	1/8" × 2 m	1/8" × 2 m
Carrier gas		N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Flow rate		30 ml/min	30 ml/min (Carrier+make up)
Temperature	Column	70°C	70°C
	Injector	80°C	80°C
	Detector	200°C	320°C
Retention time		0.63 min	3.2 min
Concentration of calibration gas		9.6 and 100 ppmv CH <sub>4</sub> in N <sub>2</sub>	0.5 and 1.0 ppmv N <sub>2</sub> O in N <sub>2</sub>
Loop		2 ml	2 ml



**Fig. 1. Total amount of monthly rainfall in Suwon from May to October in 2012.**

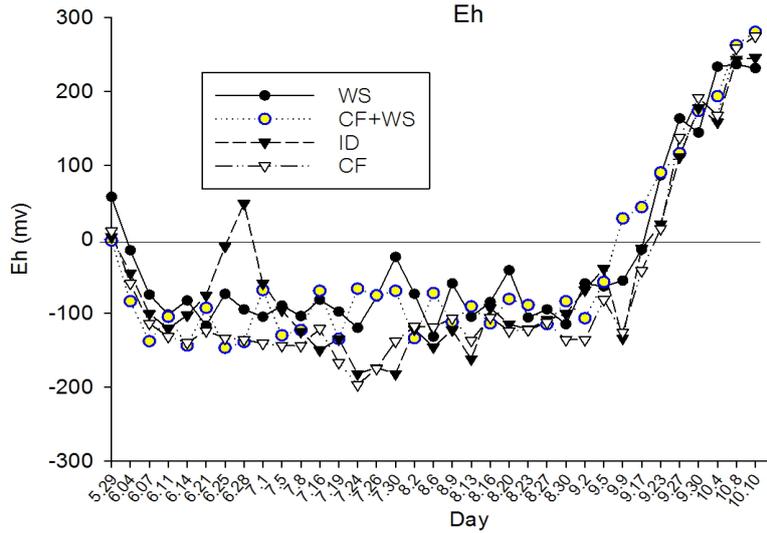


Fig. 2. Temporal changes of soil Eh flux at a 5 cm depth in flooded rice field.

†CF (Continuous-Flooding), ID (Intermittently Drainage), CF+WS (Continuously Flooding+Water-Saving), WS (Water-Saving)

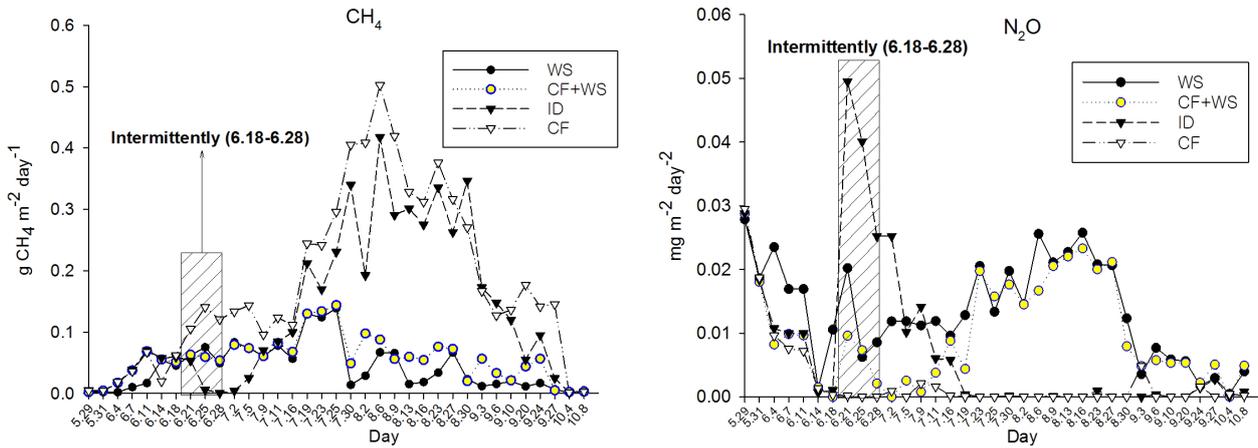


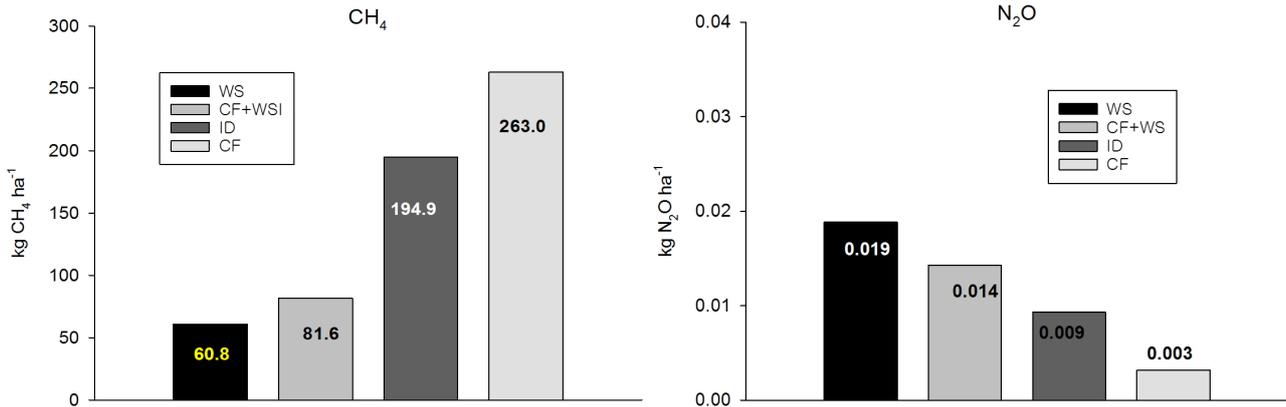
Fig. 3. Temporal changes of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions as affected by different water management system.

†CF (Continuous-Flooding), ID (Intermittently Drainage), CF+WS (Continuously Flooding+Water-Saving), WS (Water-Saving)

라고 하였다. 또한 Lindau et al. (1991)은 CH<sub>4</sub> 배출과 산화 환원 전위는 고도의 유의성이 있다고 하였다. 토양의 Eh 상승과 토양층 산소의 공급은 CH<sub>4</sub> 생성을 저해하기 때문에 토양 Eh와 물 관리에 의한 산소의 공급은 논토양으로 부터 CH<sub>4</sub> 배출을 조절하는 중요한 인자라고 생각 된다.

벼 생육기간 중 물 관리 처리별 CH<sub>4</sub>과 N<sub>2</sub>O 배출의 경시적 변화는 Fig. 3과 같다. 생육 초기까지 CH<sub>4</sub> 배출의 변동(5월 29일~6월 18일)은 상시담수와 간단관개, 논물 알개대기 관개 그리고 초기담수+논물 알개대기 처리구에서 비슷한 양상을 보였으며, 10일간(6월 18일~6월 28일) 중간낙수를 처리한 간단관개는 CH<sub>4</sub> 배출이 뚜렷한 감소를 보였다. 이는 간단관개시 토양이 호기상태로 변함에 따라 산화환원 전위가 상승하여 CH<sub>4</sub> 배출량은 줄어든다는 보고와 일치하였다(Kim et al., 2002; Partrick et al., 1977). 간단관개에서 중간낙수 이후부터 수확기까지 CH<sub>4</sub> 배출변동이 상시담

수에 비해 전반적으로 낮게 나타났다. 논물 알개대기 관개 처리에서는 이앙 이후부터 수확까지 계속 낮은 배출 추이를 보였으며, 이는 논물 알개대기 관개의 물 관리가 토양표면이 실금이 보이면 3~4일 간격으로 관개하므로 토양의 산화와 환원이 반복적으로 이루어져서 간단관개 처리의 경우와 같이 CH<sub>4</sub> 발생이 줄어든다(Kim et al., 2012). 이에 비해 상시담수에서는 전체 벼 재배 기간 동안 높은 배출을 보였다. 이는 계속되는 담수로 인한 혐기상태에서 혐기성균에 의해 토양 내에 유기물이 분해되어 CH<sub>4</sub>이 발생은 증가한다(Freney et al., 1981; Minami et al., 1987; Smith et al., 1983). 초기담수+논물 알개대기 처리는 이앙 이후 한 달까지(6월 20일 이전)는 상시담수 처리의 배출변동과 비슷하였으나, 한 달 후 부터(6월 20일 이후)는 논물 알개대기 처리구와 같은 배출변동을 보였다. Rath et al. (1999)은 토양 시료로부터 CH<sub>4</sub> 생성이 담수 물 높이가 증가함에 따라 뚜렷



**Fig. 4. Total emission of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O by the different water management system.**

†CF (Continuous-Flooding), ID (Intermittently Drainage), CF+WS (Continuously Flooding+Water-Saving), WS (Water-Saving)

**Table 3. Comparison on water quantity, yield and GHGs emission from a paddy field under the different water management.**

Water management	Weed occurrence	Total water quantity	Yield of rice	GWP	Emission rate
	kg ha <sup>-1</sup>	----- ton ha <sup>-1</sup> -----	-----	- CO <sub>2</sub> ton ha <sup>-1</sup> -	%
CF	0.84	5.49	5.83	6.02	100
ID	28.8	4.43	5.75	4.51	74.9
CF+WS	16.1	3.86	6.18	1.85	30.7
WS	42.4	2.78	6.25	1.32	21.9

†CF (Continuous-Flooding), ID (Intermittently Drainage), CF+WS (Continuously Flooding+Water-Saving), WS (Water-Saving)

이 증가하며, Ponnampereuma et al. (1972)은 토양을 담수 하는 것은 산소 확산을 감소시키고 혐기적인 조건을 유발한다고 하였다.

N<sub>2</sub>O 배출 변이는 CH<sub>4</sub>의 경우와 반대로 초기 배출량이 많았으며 간단관개 경우 중간낙수 기간 동안 (6월 18일~6월 28일) N<sub>2</sub>O 배출량이 다른 처리구에 비해 가장 높게 나타났으며, 상시담수 처리의 경우 이양 한 달 이후부터 생육 후기 까지 배출량은 거의 나타나지 않았다. 이는 Ogawa et al. (1988)이 벼논의 물 관리 시에 N<sub>2</sub>O 배출량은 CH<sub>4</sub> 배출량과 부의 상관관계가 있다는 보고와도 일치하였다.

벼 생육기간 중 이양기에서 출수 후 45일 (완숙기)까지 배출된 CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O의 총 배출량은 Fig. 4와 같다. CH<sub>4</sub> 배출량은 논물 얹게대기 관개에서 60.8 kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup>, 초기담수+논물 얹게대기가 81.6 kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup>, 간단관개 194.9 kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup>, 담수 263.0 kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup>으로 상시담수 처리에 비해 간단관개가 25.8%, 초기담수+논물 얹게대기 관개 69.0% 그리고 논물 얹게대기 관개가 76.9%의 감축 효과가 있었다. N<sub>2</sub>O의 배출량은 상시담수에서 0.003 kg N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>, 간단관개 0.009 kg N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>, 초기담수+논물 얹게대기 0.014 kg N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> 그리고 논물 얹게대기 관개가 0.019 kg N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>로 나타나 담수 처리에 비해 논물 얹게대기 관개가 6.3배 많이 배출하였다. 낮은 논 물 수위 처리의 총 배출량 비교는 Kim et al. (2012)의 결과와 일치 하였다. 또한 Sass et al.

(1990)은 수회에 걸친 간단관개는 토양 통기를 조장시키며 벼 수량에는 영향을 주지 않고 CH<sub>4</sub> 배출을 88%까지 감소시킨다고 하였다. 그리고 Yang et al. (1998)은 논토양에서 CH<sub>4</sub> 발생은 논 물 담수 높이에 따라 증가한다고 하였다.

벼 재배기간 동안 물 관리에 따른 잡초 발생량, 논물 총 사용량, 수량, CH<sub>4</sub> 그리고 N<sub>2</sub>O의 총 배출량을 지구온난화 잠재력 (GWP)으로 환산한 결과 (Table 3), 벼 재배기간 동안 잡초 발생량은 상시담수 처리에 비해 논물 얹게대기 관개가 42.4 kg ha<sup>-1</sup>으로 가장 많았고, 초기담수+논물 얹게대기 (16.1 kg ha<sup>-1</sup>)가 간단관개 (28.8 kg ha<sup>-1</sup>)보다 발생량이 적었다. 논물 사용량은 상시담수 처리가 5.49 ton ha<sup>-1</sup>으로 가장 많았고 초기담수+논물 얹게대기가 3.86 ton ha<sup>-1</sup>, 논물 얹게대기 관개 2.78 ton ha<sup>-1</sup>으로 가장 물 사용량이 적은 것으로 나타나, 담수 대비 논물 얹게대기 관개 처리가 49.4% 그리고 초기담수+논물 얹게대기가 29.7%의 논물 절수효과를 보여 Kim 등 (2012)의 결과와 유사하였다. 논에서 물 관리별 벼 수량은 논물 얹게대기 관개 처리에서 6.25 ton ha<sup>-1</sup>으로 가장 수량이 높았으나, 초기담수+논물 얹게대기 처리도 논물 얹게대기 관개 처리와 비슷한 수량 (6.18 ton ha<sup>-1</sup>)을 보였다. 수량의 증수 효과는 상시담수 처리에 비해 논물 얹게대기 관개와 초기담수+논물 얹게대기에서 각각 7.2%와 6.0%를 보였다.

지구온난화잠재력은 물 관리 조건에서 상시담수 (6.02

CO<sub>2</sub> ton ha<sup>-1</sup>)에 비해 간단관개 (4.51 CO<sub>2</sub> ton ha<sup>-1</sup>)가 25.1%, 초기담수+논물 얇게대기 (1.85 CO<sub>2</sub> ton ha<sup>-1</sup>) 69.3% 그리고 논물 얇게대기 관개 (1.32 CO<sub>2</sub> ton ha<sup>-1</sup>)는 78.1% 감축효과가 있는 것으로 나타났다. 일반적으로 간단관개 처리는 CH<sub>4</sub> 배출을 저감시키고 N<sub>2</sub>O의 배출이 늘어난다고 보고되고 있다 (Cai et al., 1999). 그리고 논물 얇게대기 처리는 벼논의 물 관리에서 논물 사용량뿐만 아니라 온실가스 감축 효과에도 탁월한 효과를 보였다. Yagi et al. (1994)은 CH<sub>4</sub> 배출은 논물 관개와 낙수 등 물 관리 방식에 따라 토양의 산화환원전위와 밀접한 관계를 가지고 있으며 산화환원전위가 높을수록 토양의 산화상태가 일수록 CH<sub>4</sub> 배출이 낮아지므로 물 관리에 따라 절대적인 온실가스 배출에 영향을 미친다고 하였다. 따라서 논물 얇게대기 관개 처리는 3~4일 간격으로 논물 수위 2~3 cm 관개와 자연 소모를 반복하므로 계속되는 산화-환원상태의 토양 조건을 유지하기 때문에 CH<sub>4</sub> 배출이 낮은 것으로 생각된다. 잡초발생, 논물 사용량 그리고 수량 등을 비교 평가한 온실가스 배출은 논물 얇게대기 관개 처리에 비해 초기담수+논물 얇게대기 처리가 온실가스 감축을 위한 적합한 물 관리 기술로 손색이 없는 것으로 생각된다. 특히 잡초 발생은 논물 얇게대기 관개 처리보다 62.0% 감소되는 것으로 나타났다.

## Conclusions

논에서 온실가스 배출에 영향을 주는 가장 큰 요인인 물 관리를 통하여 온실가스 감축효과를 파악하고자, 수원시 권선구 수인로에 위치한 국립식량과학원 답작과 벼 시험포장에서 CH<sub>4</sub>과 N<sub>2</sub>O 배출 시험을 수행하였다. 벼 재배에서 상시담수, 간단관개 (중간낙수 1회 처리) 그리고 논물 얇게대기 관개 처리 등을 조성하여 잡초발생, 논물 사용량, 수량, 온실가스 배출량 비교와 CH<sub>4</sub> 생성과 산화에 관여하는 유전자들과의 관계를 통해 온실가스 감축효과를 조사한 결과는 다음과 같다.

잡초 발생량은 상시담수 처리에 비해 논물 얇게대기 관개가 42.4 kg ha<sup>-1</sup>으로 가장 많았고, 초기담수+논물 얇게대기 (16.1 kg ha<sup>-1</sup>)가 간단관개 (28.8 kg ha<sup>-1</sup>)보다 발생량이 적었다.

벼 재배기간 동안 논물 사용량은 상시담수 처리가 5.49 ton ha<sup>-1</sup>으로 가장 많았고 초기담수+논물 얇게대기가 3.86 ton ha<sup>-1</sup>, 논물 얇게대기 관개 2.78 ton ha<sup>-1</sup>으로 가장 물 사용량이 적은 것으로 나타나, 담수 대비 논물 얇게대기 관개 처리가 49.4% 그리고 초기담수+논물 얇게대기가 29.7%의 논물 절수효과를 보였다.

지구온난화잠재력은 물 관리 조건에서 상시담수 (6.02 CO<sub>2</sub> ton ha<sup>-1</sup>)에 비해 간단관개 (4.51 CO<sub>2</sub> ton ha<sup>-1</sup>)가 25.1%, 초기담수+논물 얇게대기 (1.85 CO<sub>2</sub> ton ha<sup>-1</sup>) 69.3% 그리고

논물 얇게대기 관개 (1.32 CO<sub>2</sub> ton ha<sup>-1</sup>)는 78.1% 감축효과가 있는 것으로 나타났다.

## References

- Cai, Z., G. Xing, G. Shen, H. Xu, X. Yan, H. Tsuruta, K. Yagi, and K. Minami. 1999. Measurements of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from rice paddies in Fengqiu, China. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 45(1):1-13.
- Freney, J.R., O.T. Denmead, I. Watanabe, and E.T. Craswell. 1981. Ammonia and nitrous oxide losses following application of ammonium sulphate to flooded rice. *Australian Journal of Agricultural Research* 32:37-45.
- IPCC. 1996. Revised IPCC guideline for national greenhouse gas inventories: Reference Manual, revised in 1996, IPCC.
- Kim, G.Y., S.I. Park, B.H. Song, and Y.K. Shin. 2002. Emission characteristics of methane and nitrous oxide by management of water and nutrient in rice paddy soil. *Korean J. Environ. Agri.* 21:136-143.
- Kim, G. Y., S. B. Lee, J. S. Lee, E. J. Choi, J. H. Ryu, W. J. Park, and J. D. Choi. 2012. Mitigation of greenhouse gases by water management of SRI (System of Rice Intensification) in rice paddy fields. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45(6):1173-1178.
- Lindau, C.W., P.K. Bollich, R.D. Delaune, and V.J. Law. 1991. Effect of urea fertilizer and environmental on CH<sub>4</sub> emissions from a Louisiana USA rice field. *Plant and Soil*, 136:195-203.
- Minami, K. 1987. Emission of nitrous oxide(N<sub>2</sub>O) from agro-ecosystems. *Japan Agricultural Research Quarterly*. 21:22-27.
- Ogawa, Y. and K. Minami 1988. Effect of nitrogen enrichment in irrigation water on nitrogen balance in paddies. *Paddy soil Fert.* 497-509.
- Partrick, W.H.Jr. and C.N. Reddy. 1977. Chemical changes in rice soils. In *IRRI symposium on soils and rice*. International Rice Research Institute, Los Baños, Laguna, Philippines. 361-379.
- Ponnamperuma, F.N. 1972. The chemistry of submerged soils. *Adv. Agron.* 24:29-96.
- Rath, A.K., B. Swain, B. Ramakrishnan, D. Panda, T.K. Adhya, V.R. Rao, and N. Sethunathan. 1999. Influence of fertilizer management and water regime on methane emission from rice fields. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 76:99-107.
- RDA. 2006. Fertilizer recommendation standards for various crops. *Gwangmun-dang*. p. 57-58 (In Korean).
- Sass, R.L., F.M. Fisher, P.A. Harcombe, and F.T. Turner. 1990. Methane production and emission in a Texas rice field. *Global Biogeochemical Cycles* 4:47-68.
- Shin, 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. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 28(2):183-190.
- Smith, C.J., and W.H.Jr. Patrick. 1983. Nitrous oxide emission as affected by alternate anaerobic and aerobic conditions from soil suspensions enriched with ammonium sulfate. *Soil Biology & Biochemistry.* 15:693-697.
- Takai, Y., Koyama, and T. Kamura. 1956. Microbial metabolism in reduction process of paddy soil (Part 1), *Soil and Plant Food*, 2:63-66.
- 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.
- Yagi, K. 1991. Emission of biogenic gas compounds from soil ecosystem and effect of global environment. 2. Methane emission from paddy fields. *Soil and Fert. Japan.* 62(5):556-562.
- Yagi, K., H. Tsuruta, K. Minami, P. Chairaj, and W. Cholitkal. 1994. Methane emission from Japanese and Thai paddy fields. In: K. Minami et al.,(eds), *CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O: Global emission and controls from rice fields and other agricultural and industrial sources.* Yokendo Publishers, NAIES series 2, Tokyo, pp. 41-53.
- Yang, S.S. and H.L. Chang. 1998. Effect of environmental conditions on methane production and emission from paddy soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 69:69-80.