

Mitigation of Greenhouse Gas Emissions (GHGs) by Water Management Methods in Rice Paddy Field

Gun-Yeob Kim, Woo-Kyun Park, Sun-II Lee, Jong-Sik Lee, Eun-Jung Choi, Un-sung Na,
Hee-Young Jang, and Sang-Uk Suh*

National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju, 55365, Korea

(Received: September 15 2015, Revised: October 21 2015, Accepted: October 22 2015)

Environmental effect of water-saving irrigation on the emissions of greenhouse gases (GHGs) has not been well investigated. The objective of this study was to measure the effect of water-saving irrigation on GHGs as well as water use and rice production yield in paddy field condition in Korea. Four experimental runoff plots of 4x35 m in size were prepared at an existing paddy field. GHGs emission was measured during the 2012 ~ 2013 growing seasons while a Japonica rice variety was cultivated. Four different water management methods, 1) Continuous Flooding (CF), 2) Intermittent Drainage (ID), 3) Water Saving (WS), and 4) CF+WS, were used during a rice growing season to compare the effects of water management methods on GHGs emission. CF method is flooding all the time, ID method makes paddy water drained 40 days after transplanting for about two weeks, WS method maintains 2~3 cm water-level, which should be refilled when the water-level decreased to about 0 cm, and CF+WS method combines CF method before 30 days after transplanting (DAT) and WS method after 30 DAT. Regardless of water management methods, paddy field water was drained about 30 days before harvest. Amount of GHGs emission from WS plot was reduced by 69.3% compared to that from CF plot and by 59.0% compared to that from ID plot. Amount of GHGs emission from CF+WS plot was reduced by 60.7% compared to that from CF plot and by 47.5% compared to that from ID plot. Weed occurrence in CF+WS plots was reduced to 62.2% in comparison with the WS plot, implying that CF+WS plot showed the best effect to mitigation of the greenhouse gas emission in the atmosphere.

Key words: Water management methods, Rice paddy field, GHGs emission, Mitigation

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

Water management methods [†]	Weed occurrence	Total water quantity	Yield of rice	GWP ^{††}	Emission rate
	kg ha ⁻¹	----- ton ha ⁻¹ -----	-----	CO ₂ ton ha ⁻¹	(%)
CF	0.84	5.46	5.11	5.34	100
ID	28.8	4.55	5.17	4.00	75.9
CF+WS	16.1	3.89	5.64	2.10	39.3
WS	42.4	2.49	5.55	1.64	30.7

[†] CF: (continuous-flooding), ID (Intermittent drainage), CF+WS (continuous Flooding+Water-Saving, WS (Water-Saving)

^{††} GWP: Global Warming Potential

*Corresponding author : Phone: +82632382487, Fax: +82632383823, E-mail: sanguk07@gmail.com

[§]Acknowledgement : This study was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ009980)", Rural Development Administration, Republic of Korea.

Introduction

지표면에서 반사되는 적외선을 흡수하여 대기 열수지 및 온난화에 영향을 주는 CH_4 은 지구온난화잠재력 (Global Warming Potential: GWP)이 CO_2 대비 21배이며, 농경지에서 CH_4 배출은 토양조건이 혐기적인 상태에서 발생되므로 우리나라에서는 담수상태로 재배되는 논토양이 주 배출원으로 알려져 있다 (IPCC, 1996). 논토양은 담수상태에서 대기로부터 산소공급이 원활하지 않기 때문에 토양 내 유기물은 혐기적 분해과정을 거치면서 밭 토양에서 발생되지 않는 미량기체 들인 CH_4 , ammonia, hydrogen sulfide, mercaptan, dimethyl sulfide 등이 발생하게 된다 (Schütz et al., 1989). 이 중 가장 많이 배출되는 것은 CH_4 가스이다. CH_4 은 담수된 논에서 H_2+CO_2 또는 acetate를 기질로 하여 편성 혐기 조건에서 CH_4 생성균에 의해 생성되며, 이렇게 생성된 CH_4 은 CO_2 로 산화되거나 벼 통기조직을 통하여 90%이상이 배출된다 (Cicerone and Shetter, 1981).

논은 담수 상태에서 투입된 질소원들이 $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{N}_2\text{O}$, N_2 전환과정을 거치는데, 중간생성물인 N_2O 는 신속히 N_2 로 전환되고, 상당량의 N_2O 가 물에 녹기 때문에 N_2O 배출량은 적다 (Freney et al., 1981; Minami et al., 1987; Smith et al., 1983). 그러나 과도한 배수는 양분 및 유기산의 용탈을 초래하고 지하수의 염류 집적을 야기하게 되므로 적절한 논물 관리가 필요하다. Sass et al. (1990)은 수회에 걸친 간단 관개는 토양 통기를 조장시키며 벼 수량에는 영향을 주지 않고 CH_4 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_4 배출을 저감시키는 효과가 있다고 하였다 (Kim et al., 2012; Ponnampereuma, 1972).

논물을 배수시키면 토양 Eh를 상승시켜 CH_4 생성이 억제되어 매탄 배출량이 줄어들지만, 토양의 N_2O 의 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 2년 (2012~2013년) 동안 수행하였다. 2012년 시험 토양은 유기물 함량이 25.7 g kg^{-1} 그리고 인산이 118.0 mg kg^{-1} , 암모니아태 질소 4.2 mg kg^{-1} 와 질산태질소 4.3 mg kg^{-1} 이며 2013년에는 유기물 함량 29.3 g kg^{-1} , 인산 112.1 mg kg^{-1} 그리고 암모니아태 질소 4.9 mg kg^{-1} 와 질산태 질소 5.4 mg kg^{-1} 로서 토양의 화학성 분석은 Table 1과 같다. 벼의 공시품종은 삼광벼로 5월 22일에 이앙하였으며, 재식거리가 $15 \times 30 \text{ cm}$, 수확은 10월 10일에 하였다.

농촌진흥청 작물별 시비처방기준 (RDA, 2010)의 표준시비방법에 따라, 시비처리로 화학비료는 $\text{N}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{K}_2\text{O} : 110-45-57 \text{ kg ha}^{-1}$ 질소는 요소를 2회 분시, 인산은 용성인비로 전량 기비, 칼리는 염화칼리를 1회 분시 하였으며, 논물 관리 처리는 상시담수 (Continuous-Flooding, CF)와 벼 생육기간 중 1회 (이앙 후 약 한 달인 2012년에는 6월 18일~6월 28일까지 10일간 그리고 2013년은 7월 5일~7월 19일 까지 14일간) 중간 낙수한 간단관개 (Intermittent drainage, ID)와 수확 전에 마지막 물 때는 시기를 제외한 전 생육기간 동안 $2 \sim 3 \text{ cm}$ 담수깊이까지 논물을 채운 후 자연소모 (토양 중 침수와 증발)로 토양 바닥이 실금이 보이면 물을 다시 $2 \sim 3 \text{ cm}$ 관개하는 논물 얇게대기 관개 (Water-Saving, WS) 그리고 논에 잡초발생을 줄이기 위해 이앙 후, 약 한 달까지는 상시담수 상태로 유지하다가 이후로는 논물 얇게대기를 절충한 초기담수+논물 얇게대기 (Continuous Flooding+Water-Saving, CF+WS) 등 4처리를 두었다.

CH_4 와 N_2O 배출 플럭스를 조사하기 위해 덮개부분이 열고 닫을 수 있는 open-closed chamber법 (Shin et al., 1995)을 이용하였으며, 설치된 chamber는 밀면적이 0.36 m^2 ($0.6 \times 0.6 \text{ m}$)이고 높이가 1 m인 투명한 polyacrylic plastic의 소재로 제작하였다 (Fig. 1). 가스시료 채취는 Yagi et al. (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_4 기체농도는 6 port gas sampling

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

Year	pH	EC	OM	Aval. P_2O_5	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	Exch. Cation		
							K	Ca	Mg
	(1:5)	dS m^{-1}	g kg^{-1}	-----	mg kg^{-1}	-----	-----	cmolc kg^{-1}	-----
2012	5.92	1.23	25.7	118.0	4.2	4.3	0.16	4.99	1.45
2013	6.05	0.89	29.3	112.1	4.9	5.4	0.31	5.82	2.32

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 N₂로 유속을 분당 30 ml로 조절하였다. N₂O 기체농도는 10 port와 4 port valve를 장착한 GC-ECD (Varian 3800)를 사용하였고 column은 porapack Q (80/100 mesh)를 충전한 1/8"×2 m의 stainless steel tubing column, 그리고 detector의 온도는 320°C로 하였다. CH₄ 및 N₂O 분석 조건은 Table 2와 같다.

플럭스는 다음 (Eq. 1)에 따라서 계산 (F: mg m⁻² hr⁻¹)하였다.

$$F = \rho \cdot V \cdot A^{-1} \cdot \Delta c \cdot \Delta t^{-1} \cdot 273 \cdot T^{-1} \quad (\text{Eq. 1})$$

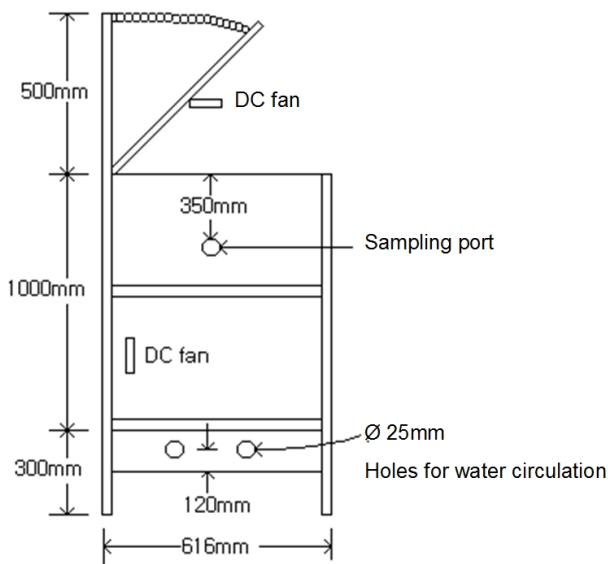


Fig. 1. Schematic cross section of gas collecting chamber for measurement of methane emission rates in rice paddy field.

ρ 는 가스밀도 (mg m⁻³),
 A 는 chamber 바닥면적 (m²),
 V 는 chamber 내 공기체적 (m³),
 $\Delta c \cdot \Delta t^{-1}$ 는 chamber내 가스농도의 평균 증가속도 (10⁻⁶ m³ m⁻³ hr⁻¹),
 T 는 chamber 내 평균기온 (K)
 CH₄ 및 N₂O ρ 값 (T=273 K)은 다음과 같다.
 $\rho_{CH_4} = 0.714$
 $\rho_{N_2O} = 1.96, \rho_{N_2O-N} = 1.25$

지구온난화잠재력 (GWP: Global Warming Potential)은 CO₂, CH₄, N₂O 배출량을 CO₂ 상당량으로 환산하기 위하여 CH₄과 N₂O 총 배출량에 지구온난화잠재력인 21배와 310배를 각각 곱하여 환산하였다 (IPCC, 1996). 그리고 온실가스 배출량에서 논물 관리 처리 간의 유의성 검정은 SAS를 이용하여 던칸 다중검정 분석하였다.

Results and Discussion

이앙부터 수확까지 벼 재배기간 동안의 강수량은 Fig. 2에서 보는 바와 같다. 월별 강수량은 2012년 5월에 16.5 mm로 재배기간 중 가장 적었으며, 장마기간인 7월에는 572.4 mm, 8월 42.6 mm, 그리고 수확시기인 10월에는 95.6 mm이었으며 2013년에는 5월 129.0 mm, 7월 405.9 mm, 8월 157.0 mm 그리고 10월에는 5.4 mm이었다. 총 강수량은 1,455.4 mm (2012), 950.5 mm (2013)로 2012년에 더 많았다.

물 관리에 따른 토양 Eh 변화 (Fig. 3)는 이앙 직전에 논물을 대기 시작했을 때 Eh가 점차적으로 낮아지다가 논토양이 완전히 환원이 된 시기에는 Eh가 가장 낮아진다. 2012년과 2013년 모두 벼의 전 생육기간 동안 논물 얹게대기 처리가 다른 처리에 비해 높았으며, 상시담수 처리가 가장 낮

Table 2. Instrumental conditions of gas chromatographic analyses for CH₄ and N₂O, respectively.

Detector		FID	ECD
Column	Packing material	Porapack N(80/100)	Porapack Q(80/100)
	Materials	Stainless steel	Stainless steel
	O.D. x length	1/8" x 2 m	1/8" x 2 m
Carrier gas		N ₂	N ₂
Flow rate		30 ml/min	30ml/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	0.5 and 1.0 ppmv
		CH ₄ in N ₂	N ₂ O in N ₂
Loop		2 ml	2 ml

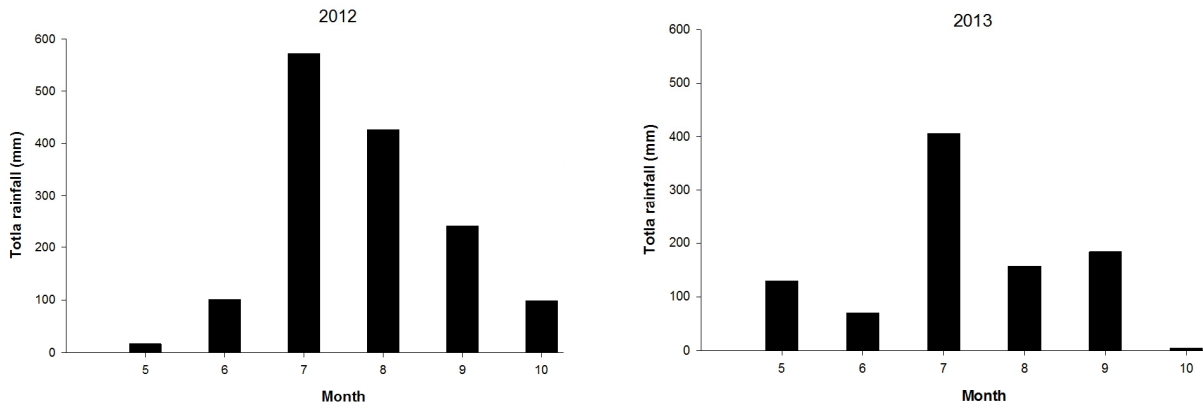


Fig. 2. Total amounts of monthly rainfall in Suwon from May to October in 2012 and 2013, respectively.

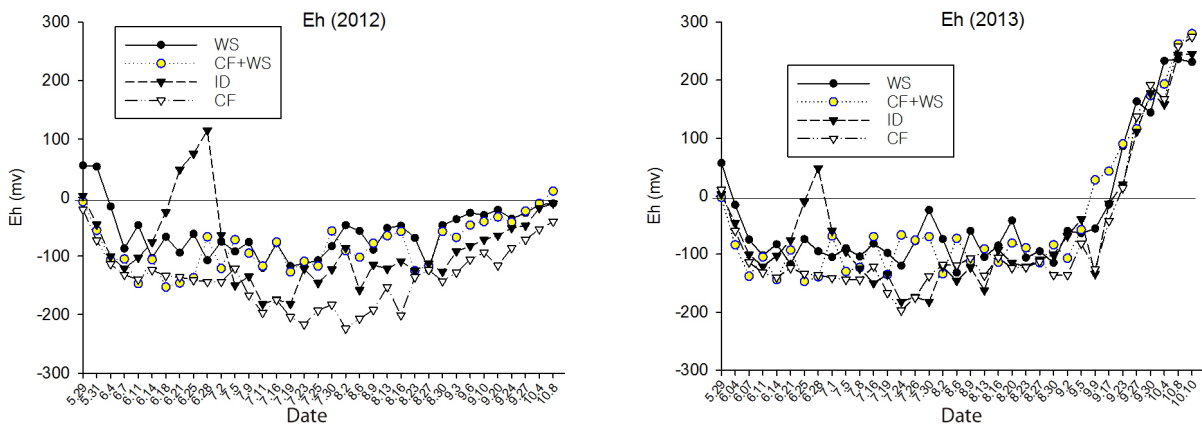


Fig. 3. Temporal changes of soil Eh flux at a 5cm depth in flooded rice field in 2012 and 2013: CF (continuous-flooding), ID (Intermittent drainage), CF+WS (continuous flooding+Water-Saving, WS (Water-Saving).

았다. 논물 얇게대기는 담수깊이까지 논물을 채운다음 논물의 증발과 토양 중 침출로 토양 바닥이 실금이 보이면 물을 다시 관개하기 때문에 Eh가 높았다. 2012년에 간단관개 처리에서 중간낙수 기간인 6월 18일~6월 28일 (10일간)에 토양 Eh는 -76~+48 mV로 상승하였으며, 이 기간 동안 CH₄ 배출은 0.001~0.059 g CH₄ m⁻² day⁻¹으로 다른 처리에 비해 가장 낮았지만, N₂O 배출은 0.001~0.025 mg N₂O m⁻² day⁻¹으로 다른 처리에 비해 가장 높았다. 2013년에도 전년도 양상과 같이 간단관개 처리에서 중간낙수 기간인 7월 5일~7월 19일 (14일간)에 토양 Eh는 -96~+98 mV로 상승하였으며, 이 기간 동안 CH₄ 배출은 0~0.144 g CH₄ m⁻² day⁻¹으로 다른 처리에 비해 가장 낮았으나 N₂O 배출은 0.0007~0.034 mg N₂O m⁻² day⁻¹으로 가장 높았다. 토양 Eh 변동과 Fig. 4의 CH₄ 배출 변동과 비교해 보면 모든 처리에서 토양 Eh가 낮으면 CH₄ 배출이 높고 Eh가 높으면 CH₄ 배출이 낮은 것으로 나타났다. 따라서 토양 Eh 변화에 따라 CH₄ 배출량도 크게 좌우되는 경향을 보였다.

Takai et al. (1956)은 CH₄가 생성되기 위해서는 토양 Eh가 -200 mV이하가 되어야 한다고 하였고, Wang et al. (1993)은 CH₄가 생성이 시작되기 위한 토양 Eh는 -150 mV

라고 하였다. 또한 Lindau et al. (1991)은 CH₄ 배출과 산화환원 전위는 고도의 유의성이 있다고 하였다. Nishimura et al. (2004)은 논에서 담수 깊이 변동에 따라 토양 Eh와 CH₄ 배출도 같은 양상으로 변동한다고 하였다. 토양의 Eh 상승과 토양층 산소의 공급은 CH₄ 생성을 저해하기 때문에 토양 Eh와 물 관리에 의한 산소의 공급은 논토양으로 부터 CH₄ 배출을 조절하는 중요한 인자라고 생각된다.

벼 생육기간 중 물 관리 처리별 CH₄과 N₂O 배출의 경시적 변화는 Fig. 4와 같다. 이양 이후부터 간단관개 처리 이전 시기의 CH₄ 배출의 변동은 모든 처리구에서 비슷한 양상을 보였으며, 중간낙수를 처리한 간단관개는 CH₄ 배출이 뚜렷한 감소를 보였고 이와 반대로 N₂O 배출은 높았다. 이는 간단관개시 토양이 호기상태로 변함에 따라 산화환원전위가 상승하여 CH₄ 배출량은 줄어으나 토양의 산화상태에서 N₂O의 배출이 증가하고 (Partrick et al., 1977), Yagi et al. (1991)과 Kim et al., (2002)은 토양 Eh를 상승시켜 CH₄ 생성을 억제하여 CH₄ 배출이 낮아지고 N₂O 배출은 높아진다고 하였다는 보고와 일치하였다. 그리고 간단관개 처리 기간이 끝난 이후부터 수확기까지 CH₄ 배출변동은 전반적으로 상시담수에 비해 낮게 나타났다. 논물 얇게대기 관개 처

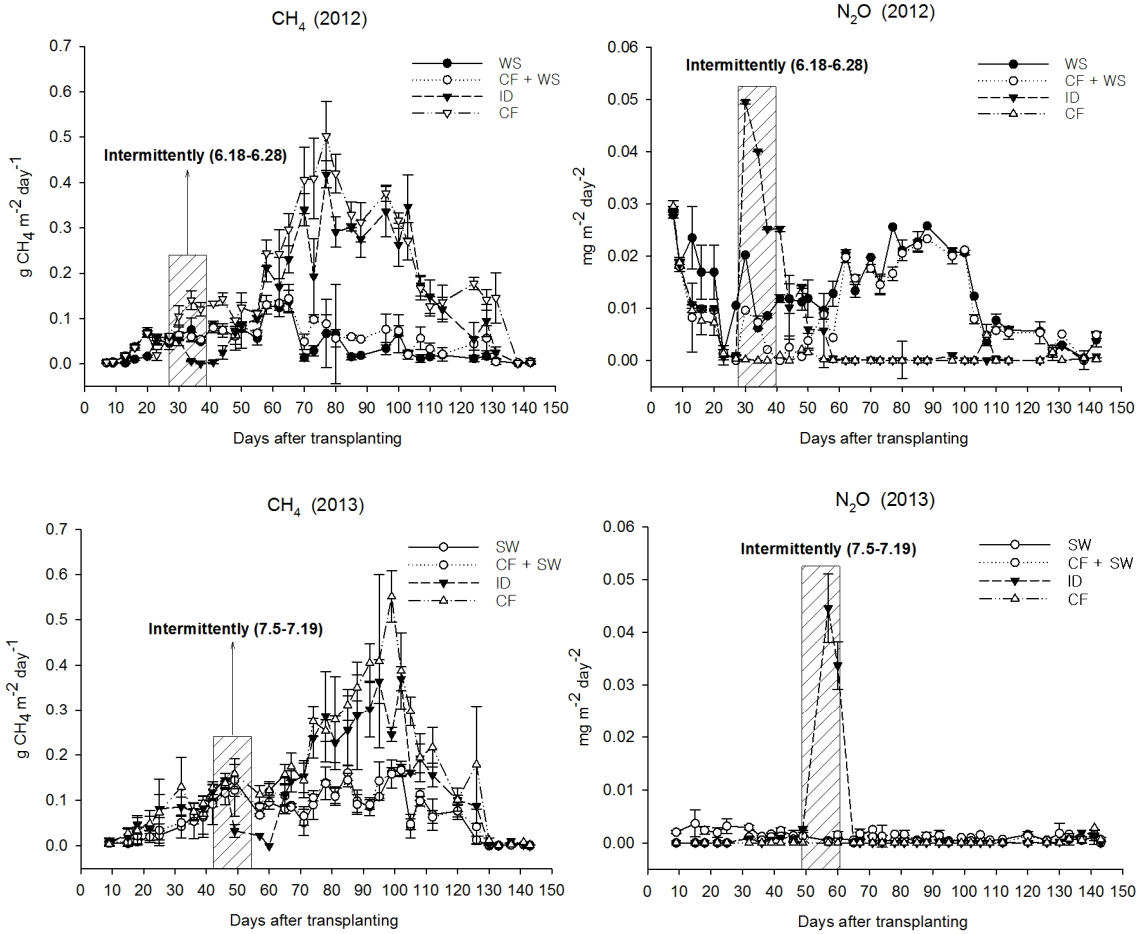


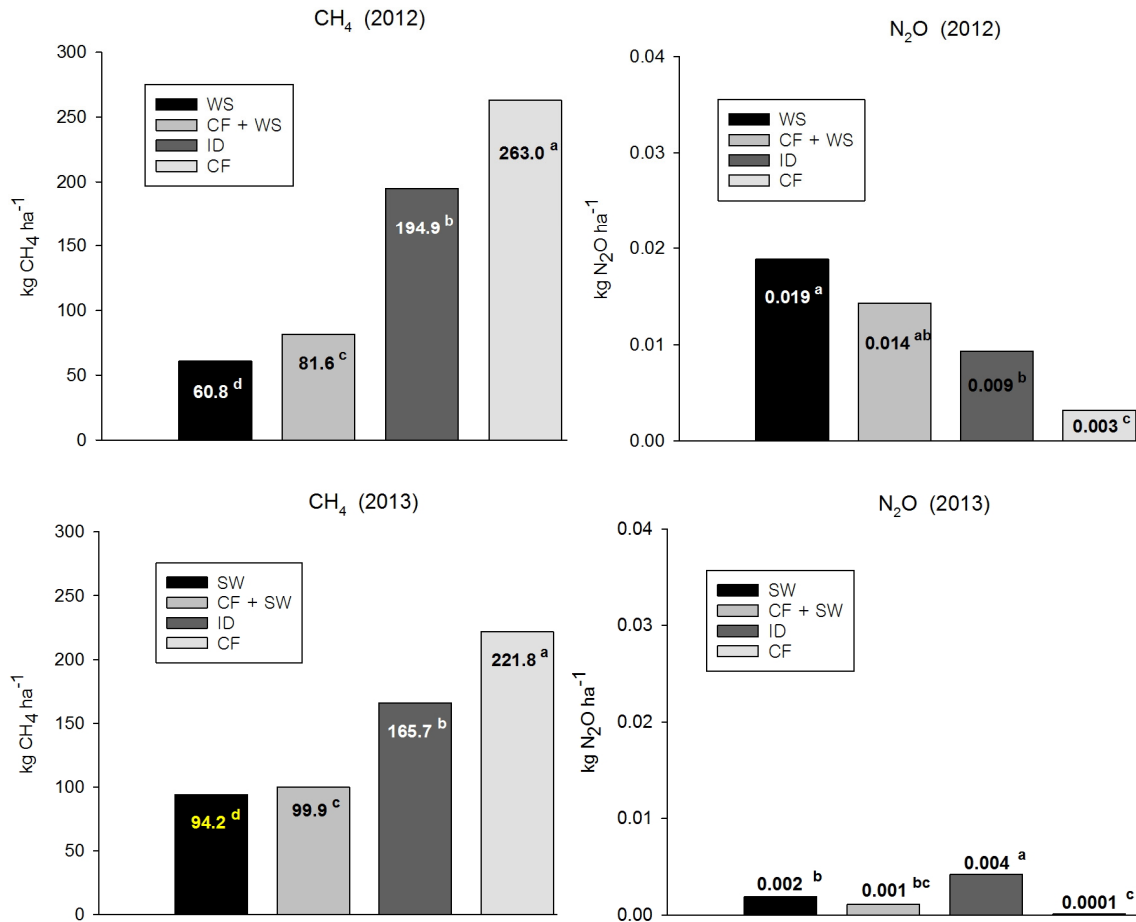
Fig. 4. Temporal changes of CH₄ and N₂O emissions as affected by different water management systems in 2012 and 2013, respectively: CF (continuous-flooding), ID (Intermittent drainage), CF+WS (continuous flooding+Water-Saving, WS (Water-Saving).

리에서는 이양 이후부터 수확까지 계속 낮은 배출 추이를 보였으며, 이는 논물 얇게대기 관개의 물 관리가 토양표면이 실금이 보이면 3~4일 간격으로 관개하므로 토양의 산화와 환원이 반복적으로 이루어져서 간단관개 처리의 경우와 같이 CH₄ 발생이 줄어든다고 하였다 (Kim et al., 2012). Nishimura et al. (2004)은 논물 담수높이 5 cm 이하에서 2 일 간격으로 배수와 담수를 반복하면 CH₄ 발생이 현저히 낮아진다고 하였다. 상시담수 처리에서는 전체 벼 재배 기간 동안 높은 배출을 보였다. 이는 계속되는 담수로 인한 혐기 상태에서 혐기성균에 의해 토양 내에 유기물이 분해되어 CH₄ 발생은 증가한다 (Freney et al., 1981; Minami et al., 1987; Smith et al., 1983). 초기담수+논물 얇게대기 처리는 이양 이후 한 달까지는 상시담수 처리의 배출변동과 비슷하였으나, 한 달 후 부터는 논물 얇게대기 처리구와 같은 배출 변동을 보였다. Rath et al. (1999)은 논에서 CH₄ 생성이 담수 물 높이가 증가함에 따라 뚜렷이 증가하며, Ponnampetuma et al. (1972)은 토양을 담수하는 것은 산소 확산을 감소시키고 혐기적인 조건을 유발한다고 하였다.

N₂O 배출 변이는 CH₄의 경우와 반대로 초기 배출량이 많았으며 간단관개의 경우 중간낙수 기간 동안 N₂O 배출량이

다른 처리구에 비해 가장 높게 나타났으며, 상시담수 처리의 경우 이양 한 달 이후부터 생육 후기까지 배출량은 거의 나타나지 않았다. 이는 Ogawa et al. (1988)이 벼논의 물 관리 시에 N₂O 배출량은 CH₄ 배출량과 부의 상관관계가 있다는 보고와 일치하였다.

벼 생육기간 중 이양기에서 출수 후 45일 (완숙기)까지 배출된 CH₄와 N₂O의 총 배출량은 Fig. 5와 같다. 온실가스 배출량에서 논물 관리 처리 간의 관계는 CH₄ 배출에서 2012~2013년 모든 처리에서 처리 간에 배출량의 차이가 있었으나 N₂O 배출량은 논물 얇게대기와 초기담수+논물 얇게대기 처리에서 처리 간에 배출량의 차이는 없었다. CH₄ 배출량은 논물 얇게대기 관개에서 60.8 kg CH₄ ha⁻¹, 초기담수+논물 얇게대기가 81.6 kg CH₄ ha⁻¹, 간단관개 194.9 kg CH₄ ha⁻¹, 상시담수 263.0 kg CH₄ ha⁻¹으로 상시담수 처리에 비해 간단관개가 25.8%, 초기담수+논물 얇게대기 관개 69.0% 그리고 논물 얇게대기 관개가 76.9%의 감축 효과가 있었다. N₂O의 배출량은 상시담수에서 0.003 kg N₂O ha⁻¹, 간단관개 0.009 kg N₂O ha⁻¹, 초기담수+논물 얇게대기 0.014 kg N₂O ha⁻¹ 그리고 논물 얇게대기 관개가 0.019 kg N₂O ha⁻¹로 나타나 상시담수 처리에 비해 초기담수+논물 얇게대기



† Mean separation by Duncan's multiple range test at $p=0.05$

Fig. 5. Total emission of CH₄ and N₂O by the different water management system in 2012 and 2013: CF (continuous-flooding), ID (Intermittent drainage), CF+WS (continuous flooding+Water-Saving, WS (Water-Saving).

에서 4.7배, 그리고 논물 알계대기 관개가 6.3배 많이 배출하였다. 2013에는 CH₄ 배출량은 논물 알계대기 관개에서 94.2 kg CH₄ ha⁻¹, 초기담수+논물 알계대기가 99.9 kg CH₄ ha⁻¹, 간단관개 165.7 kg CH₄ ha⁻¹, 상시담수 221.8 kg CH₄ ha⁻¹으로 상시담수 처리에 비해 간단관개가 25.3%, 초기담수+논물 알계대기 관개 55.0% 그리고 논물 알계대기 관개가 57.5%의 감축 효과가 있었다. N₂O의 배출량은 상시담수에서 0.0001 kg N₂O ha⁻¹, 간단관개 0.004 kg N₂O ha⁻¹, 초기담수+논물 알계대기 0.001 kg N₂O ha⁻¹ 그리고 논물 알계대기 관개가 0.002 kg N₂O ha⁻¹로 나타나 상시담수 처리에 비해 초기담수+논물 알계대기에서 10배, 그리고 논물 알계대기 관개가 20배 많이 배출하였다. 이는 낮은 논물 수위 처리의 총 배출량 비교는 Kim et al. (2012)의 결과와 일치 하였다. 그리고 N₂O 배출량은 2012년에 비해 2013년이 적었는데, 토양수분에 영향을 많이 받는 N₂O 배출의 특징으로 2012년 보다 2013년에 강수량이 적은 것이 원인으로 생각된다. Khan et al. (2015)은 품종별로 벼논에서 1주일에 3일은 논물 수위 5 cm를 유지하고, 4일 동안은 논물을 배수시켜 논바닥을 말리는 논물관리 시험에서 상시담수처리에

비해 CH₄ 배출량이 26.4~28.1% 감축효과가 있었으며, 또한 수량도 4.3~4.7% 증수하였다고 하였다. 또한 Sass et al. (1990)은 수회에 걸쳐 논물을 중간낙수를 실시한 간단관개는 토양 통기를 조장시키며 벼 수량에는 영향을 주지 않고 CH₄ 배출을 88%까지 감소시킨다고 하였다. 그리고 Yang et al. (1998)은 논토양에서 CH₄ 발생은 논물 담수 높이에 따라 증가한다고 하였다.

벼 재배기간 (2012~2013) 동안 물 관리에 따른 잡초 발생량, 논물 총 사용량, 수량, CH₄ 그리고 N₂O의 총 배출량을 지구온난화잠재력 (global warming potential; GWP)으로 환산한 결과 (Table 3), 벼 재배기간 동안 잡초 발생량은 상시담수 처리에 비해 논물 알계대기 관개가 37.8 kg ha⁻¹으로 가장 많았고, 초기담수+논물 알계대기 (14.3 kg ha⁻¹)가 간단관개 (20.7 kg ha⁻¹)보다 발생량이 적었다. 논물 사용량은 상시담수 처리가 5.46 ton ha⁻¹으로 가장 많았고 논물 알계대기 관개 2.49 ton ha⁻¹와 초기담수+논물 알계대기가 3.89 ton ha⁻¹ 순으로 물 사용량이 적은 것으로 나타났다. 상시담수 대비 논물 알계대기 관개 처리가 54.4% 그리고 초기담수+논물 알계대기가 28.8%의 논물의 절수효과를

Table 3. Comparison of water quantity, yield and GHGs emission from a paddy field under the different water methods.

Water management methods [†]	Weed occurrence kg ha ⁻¹	Total water quantity ton ha ⁻¹	Yield of rice	GHGs emission		GWP CO ₂ ton ha ⁻¹	Emission rate %
				CH ₄	N ₂ O		
CF	0.8	5.46	5.11	254.1	0.0018	5.34	100
ID	20.7	4.55	5.17	190.2	0.0042	4.00	74.9
CF+WS	14.3	3.89	5.64	99.9	0.0011	2.10	39.3
WS	37.8	2.49	5.55	78.3	0.0019	1.64	30.7

[†]CF (continuous-flooding), ID (Intermittent drainage), CF+WS (continuous flooding+Water-Saving, WS (Water-Saving)

보여 Kim et al. (2012)의 보고와 유사하였다. 논에서 물 관리별 벼 수량은 초기담수+논물 알계대기 관개 처리에서 5.64 ton ha⁻¹로 가장 수량이 높았고 다음으로 논물 알계대기 처리가 5.55 ton ha⁻¹순으로 나타났다.

지구온난화잠재력은 물 관리 조건에서 상시담수 (5.34 CO₂ ton ha⁻¹)에 비해 간단관개 (4.00 CO₂ ton ha⁻¹)가 25.1%, 초기담수+논물 알계대기 (2.10 CO₂ ton ha⁻¹) 60.7% 그리고 논물 알계대기 관개 (1.64 CO₂ ton ha⁻¹)는 69.3% 감축효과가 있는 것으로 나타났다. 일반적으로 간단관개 처리는 CH₄ 배출을 저감시키고 N₂O의 배출이 늘어난다고 보고되고 있다 (Cai et al., 1999). 그리고 논물 알계대기 처리는 벼논의 물 관리에서 논물 사용량뿐만 아니라 온실가스 감축 효과에도 탁월한 효과를 보였다. Yagi et al. (1994)은 CH₄ 배출은 논물 관개와 낙수 등 물 관리 방식에 따라 토양의 산화환원전위와 밀접한 관계를 가지고 있으며 산화환원전위가 높을수록 토양의 산화상태가 일수록 CH₄ 배출이 낮아지므로 물 관리에 따라 절대적인 온실가스 배출에 영향을 미친다고 하였다. 따라서 논물 알계대기 관개 처리는 3~4일 간격으로 논물 수위 2~3 cm 관개와 자연 소모를 반복하므로 계속되는 산화-환원상태의 토양 조건을 유지하기 때문에 CH₄ 배출이 낮은 것으로 생각된다. 잡초발생, 논물 사용량 그리고 수량 등을 비교 평가한 온실가스 배출은 논물 알계대기 관개 처리에 비해 초기담수+논물 알계대기 처리가 온실가스 감축을 위한 적합한 물 관리 기술로 손색이 없는 것으로 생각 된다. 특히 잡초 발생은 논물 알계대기 관개 처리보다 62.2% 감소되는 것으로 나타났다.

Conclusion

논에서 온실가스 배출에 영향을 주는 가장 큰 요인인 물 관리를 통하여 온실가스 감축효과를 파악하기 위하여 2년 동안 (2012~2013) 배출량을 조사하였다. 벼 재배에서 상시담수, 간단관개 (중간낙수 1회 처리) 그리고 논물 알계대기 관개 등 처리 별로 잡초발생, 논 물 사용량, 수량, 온실가스 배출량을 종합적으로 비교한 결과, 초기담수+논물 알계대

기 처리가 온실가스 감축을 위한 중요한 물 관리 기술인 것으로 나타났다. 특히 초기담수+논물 알계대기 처리는 잡초 방제를 위해 이앙 후 한 달 동안 상시담수처리하고 그 이후로는 논물 알계대기 처리를 하여 방제효과가 탁월하였다. 따라서 영농현장에서는 초기담수+논물 알계대기 방법이 용수 절약, 잡초방제 및 온실가스 배출 감축을 위한 재배기술로서 농업현장 지도 활용으로 우리나라 농업의 온실가스 배출량 감축 효율성 제고를 기대하고 있다.

References

Cai, Z., G. Xing, G. Shen, H. Xu, X. Yan, H. Tsuruta, K. Yagi, and K. Minami. 1999. Measurements of CH₄ and N₂O emissions from rice paddies in Fengqiu, China. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 45(1):1-13.

Cicerone, R.J., and J.D. Shetter. 1981. Sources of atmospheric methane : measurements in rice paddies and a discussion. *J. Geophysic. Res.* 86:7203-7209.

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. *Aust. J. Agric. Res.* 32(1):37-45.

IPCC. 1996. Revised IPCC guideline for national greenhouse gas inventories: Reference Manual, revised in 1996, IPCC.

IRRI. 2007. Rice Today. International Rice Research Institute, Vol. 6, No. 2.

Khan, M.A., M.O.H. Reza, M.T. Khan, and M.A. Ali. 2015. Effect of irrigation water management practices and rice cultivars on methane (CH₄) emission and rice productivity. *Int. J. Innov. Appl. Stud.* 10:516-534.

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 CH₄ emissions from a Louisiana USA rice field. *Plant Soil*. 136:195-203.
- Minami, K. 1987. Emission of nitrous oxide(N₂O) from agro-ecosystems. *Jpn. Agric. Res. Q.* 21:22-27.
- Nishimura, S., T. Sawamoto, H. Akiyama, S. Sudo, and K. Yagi. 2004. Methane and nitrous oxide emissions from a paddy field with Japanese conventional water management and fertilizer application. *Global Biogeochem. Cycles*. 18(2):1-10.
- 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. *Agric. Ecosyst. Environ.* 76:99-107.
- RDA (Rural Development Administration). 2010. Fertilizer recommendation standards for various crops. p.58-59. Sanglok-sa, Korea.
- Sass, R.L., F.M. Fisher, P.A. Harcombe, and F.T. Turner. 1990. Methane production and emission in a Texas rice field. *Global Biogeochem. Cycles*. 4:47-68.
- Schütz, H., A. Holzapfel- Pschorn, R. Conrad, H. Rennenberg, and W. Seiler. 1989. A 3 year continuous record on the influence of daytime, season and fertilizer treatment on methane emission rates from an Italian rice paddy field. *J. geophys. Res.* 94:16405-16415.
- 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 Biol. Biochem.* 15:693-697.
- Takai, Y., Koyama, and T. Kamura. 1956. Microbial metabolism in reduction process of paddy soil (Part 1). *Soil 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 Fert. Jpn.* 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), CH₄ and N₂O: Global emission and controls from rice fields and other agricultural and industrial sources. p.41-53. Yokendo Publishers, NAIES series 2, Tokyo.
- Yang, S.S., and H.L. Chang. 1998. Effect of environmental conditions on methane production and emission from paddy soil. *Agric. Ecosyst. Environ.* 69:69-80.