



논에서 SRI 물관리 방법에 의한 온실가스와 관개용수 저감효과 분석

Effect of SRI Water Management on the Reduction of Greenhouse-gas Emissions and Irrigation Water Supply in Paddy

서지연* · 박배경* · 박운지** · 이수인* · 최용훈*** · 신민환** · 최종대**†

Seo Jiyeon · Park Baekyung · Park Woonji · Lee Suin · Choi Yonghun · Shin Minhwan · Choi Joongdae

Abstract

Water management impacts both methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) emissions from rice paddy fields. Although irrigation is one of the most important methods for reducing CH₄ emission in rice production systems it can also N₂O emissions and reduce crop yields. A feasibility study on the system of rice intensification (SRI) methods with respect to irrigation requirements, greenhouse gas (GHG) emissions was conducted for either 2 or 3 years depending on the treatment in Korea. The SRI methods (i.e. SRI and midsummer drainage (MD) with conventional practice (CT)) reduced the irrigation requirement by 49.0 and 22.0 %, respectively. Global warming contribution of GHG to different depending on the type of GHG. Therefore, the emission of CH₄ and N₂O shall be converted to Global Warming Potential (GWP). The GHG emission from the conventional practice with midsummer drainage (MD) and the SRI plots, in GWP were reduced by 49.1 and 77.1 %, respectively. Application of SRI water management method could help to improve Korea's water resources and could thus contribute to mitigation of the negative effects of global warming.

Keywords: GHG emission; global warming potential; irrigation; methane; nitrous oxide; GWP; SRI

1. 서론

온실가스 배출감축을 포함하는 국제사회의 기후변화 협약 논의가 빠르게 진전되고 있다. 정부는 2015년 6월 11일 관계 부처합동 보도자료를 통해 당초의 온실가스 감축목표보다 강화된 2030년 배출전망치 (BAU)의 37 %를 감축하겠다고 국제사회에 공언하였다 (Ministry of environment, 2015). 정부는 지속적이며 효과적으로 국가의 온실가스 감축목표를 달성하기 위하여 연도별, 부문별로 구체화된 온실가스 감축목표를 설정하고 다방면에서의 대응방안을 논의하고 있다 (Yoo, 2012).

또한 IPCC 5차 보고서에 따르면, 기후변화에 의한 기온 상승 및 강수량 변동성은 유량 및 강우 유출량의 변화를 유발하

여 농어촌 수자원의 수량, 수질 및 수 환경에 직·간접적인 영향을 미친다고 하였다 (Korean Meteorological Administration, 2014). 지구 온난화에 의한 가뭄과 홍수의 빈도가 높아지고 있는 상황에서 기후변화에 의한 가용 수자원의 변화는 작물 생산량에 미치는 영향이 클 것으로 예상된다 (Oh et al., 2012). 기후변화에 따른 농어촌지역의 다양한 물 수요량의 증가와 공급 가능량의 감소는 농어촌용수 관리 측면에 있어 문제도 작용되고 있다. 이에 장래 물 부족에 대응하고 기후변화에 능동적으로 대처하기 위해 다양한 수자원절약 방법이 필요하다.

농업분야는 전 세계 온실가스 배출량 중 약 10~20 %를 차지하는 중요한 온실가스 배출원으로 인식되고 있다 (Lehugera et al., 2011; Smith et al., 2007). 농업분야의 온실가스는 주로 메탄과 (CH₄)과 아산화질소 (N₂O)이다 (IPCC, 1995). 이들 온실가스는 논에서 많이 발생될 수 있는 환경을 가지고 있다. 특히, 전 세계 면적의 90 % 이상을 차지하는 아시아 지역의 논에서 배출되는 온실가스가 중요하므로 이를 추정하기 위한 연구가 진행되었다 (Bachelet et al., 1993; Matthews et al., 1991; Yagi et al., 1990).

우리나라 농업부문의 온실가스 배출원은 농경지 65.4 % 그리고 축사 34.6%로 추정되고 있다. 논토양의 온실가스 배출량은 농경지 배출량의 34.0 %를 차지하여 농업부문의 온실가스 최대 배출원이다 (Kim, 2010). 논에서 가장 많이 배출되

* National Institute of Environmental Research Watershed and Total Load Management Research Division

** Kangwon National University Dept of Regional Infrastructure Engineering

*** Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development

† Corresponding author

Tel.: +82-33-250-6464 Fax: +82-33-251-1518

E-mail: jdchoi@kangwon.ac.kr

Received: October 30, 2017

Revised: November 17, 2017

Accepted: December 4, 2017

는 온실가스는 CH₄이다. 이는 담수상태를 유지하는 논에서는 토양으로 산소공급이 원활하지 않아 토양이 혐기상태를 유지하기 때문이다 (Kim et al., 2012).

최근 농업분야에서는 기후변화 대응, 관개용수 절약, 생산성 증대, 비점오염원 저감 등을 위한 System of Rice Intensification (SRI) 재배방법이 활용되고 있다. SRI는 1980년대 마다가스카르에서 시작되었으며, 관개용수 효율성 증대, 환경 친화적 재배기술, 기후변화 대응, 쌀의 품질개선 등을 할 수 있는 기술로 평가받고 있다 (Norman Uphoff, 2004). 물 관리 관점에서 SRI는 Wet-dry를 반복하는 간단관개 방법으로, 최소담수 논을 추구하며 논토양을 호기성 상태로 유지시켜서 벼 뿌리의 발육을 촉진하고 생산성을 증대시킨다. 벼 뿌리의 발달은 토양의 탄소저장량을 증대시킨다. 또한 최소담수 논은 강우 시 저류능력을 높이고, 홍수유출을 줄이고 유효강우를 늘리게 된다.

SRI는 논 토양을 호기성상태로 유지하도록 관개하기 때문에 메탄가스 발생량을 줄일 수 있는 좋은 환경을 제공한다. 연구 결과에 따르면 호기성상태로 유지하도록 관개 시 관행대비 약 40~67% 용수 저감 효과를 나타낸다고 보고하였다 (Li et al., 2005; Park et al., 2011; Sato et al., 2007). 그리고 일부의 연구자들은 중간낙수 또는 간단관개로 토양을 호기성 상태로 조성하며 메탄가스의 발생량을 조사하였다. Towprayoon et al. (2005)은 중간낙수를 2회 시행한 경우 CH₄ 배출량을 관행 대비 35% 저감하였다고 하였으며, Lu et al. (2000)은 중간낙수 1회의 경우와 10일 간격으로 Wet-dry를 반복하였을 경우 각각 44%와 61%의 CH₄ 배출량의 저감효과가 있었다고 보고하였다. 또한 Itoh et al. (2011)은 중간낙수가 69.5%의 CH₄ 저감효과가 있다고 보고하였다. 그러나 이들 연구는 CH₄ 중심으로 N₂O 발생량 연구는 충분하지 못하였고, 또한 이들을 모두 고려한 지구온난화잠재력 (Global Warming Potential (GWP)) 에 관한 연구는 수행되지 못하고 있다.

우리나라에서도 1980년대부터 논에서 메탄가스의 배출량을 측정하기 시작하였다. 그리고 벼 재배시 물관리, 유기물의 종류, 재배법, 품종, 질소질 비종 등이 메탄가스 배출량에 미치는 영향 등에 관한 연구 (Kim et al., 2002; Ko et al., 1998;

2000; 2002; 2007; Lee et al., 1997; 2005; Shin, 1996, Choi et al., 2013)가 지속되어 왔다.

그러나 우리나라에서 SRI와 관개용수 저감 그리고 온실가스 배출저감에 관한 연구는 Kim et al. (2012)과 Choi et al. (2013) 등이 보고한 2011년도에 수행한 1년의 실험자료 연구가 전부이다. 본 연구의 목적은 시험포에서 실험한 SRI 농법을 구역단위에 적용하였을 때, 온실가스 저감 효과 분석을 통한 농업분야 기후변화 대응 정책 근거 자료를 제시하는데 있다. 본 논문은 2011년과 2012년, 즉 2년의 실험자료를 사용하여 관행재배와 SRI 재배 사이의 용수저감효과와 CH₄와 N₂O를 고려한 온실가스 배출량 저감효과를 기술하고자 하였다.

II. 연구방법

1. 연구대상지점

SRI 실험을 위한 시험포는 강원도 춘천시 신북읍 천전리 내에 위치한 강원대학교 농장이다. 강원대학교 농장의 SRI 실험은 강원도 춘천시 신북읍 천전리에 위치한 강원대학교 농장의 상시담수재배 논 시험포 (Conventional Treatment (CT))와 Wet-dry를 반복하는 물관리 방법을 적용한 논 시험포 (System of rice intensification (SRI))에서 3년 동안 (2010년~2012년) 진행하였다.

실험처리는 상시담수재배 (Conventional (CT)), 상시담수에 중간낙수 2회 실시 (Midsummer Drainage (MD)), 그리고 Wet-dry를 반복하는 물관리 방법인 SRI로 총 3가지이었다. 시험포의 관개용수는 농장의 저수지에서 공급받았고, 영농활동 기간의 월별 평균 온도, 강수량, 일조시간 및 상대습도는 Table 1과 같다.

CH₄는 혐기성 미생물인 CH₄ 생성균에 의한 유기물의 최종 분해 산물이다. 논토양에서 발생하는 CH₄의 생성작용은 CH₄ 생성균의 기질이 되는 유기물, 토양의 물리적 성질, 작부되는 식물 등에 영향을 받는다고 보고되었다 (Minami, 1993). 본 연구도 논에서 발생하는 일반적인 가스 배출양상을 알아보기

Table 1 Average temperature, monthly rainfall, sunshine duration and relative humidity of the site during the growing seasons of 2010 and 2012

	May	June	July	August	September
Temperature (°C)	17.7	22.5	24.7	25.5	19.4
Rainfall (mm)	81.1	288.0	609.2	256.9	105.3
Sunshine duration (hr)	213.6	204.8	100.5	132.3	149.2
Relative humidity (%)	61.5	67.3	82.4	80.6	78.0

위하여 영농전, 영농기, 그리고 수확 후의 시험포의 토양 성분 변화를 분석하였고 우리나라의 평균 논토양 성분과 비교하였다. 시험포의 경작 시작 전 평균함수비는 21.6 %이었다. 2011년 영농시작 전 시험포 토양의 분석결과 유기물, 유효인산 그리고 규산의 함량이 부족하여 지령이 분변토(유기물 376 g/kg, 유효인산: 750 mg/kg, 유효규산: 2,062 mg/kg)를 각 시험포 별로 1 ton 씩 시비하고 경운하였다(Table 2). 또한 시험포 토양의 입도를 분석하고 미국 농무성의 삼각좌표분류법을 사용하여 토성을 분류하였다. 본 과제의 연구기간은 2010년부터 2012년까지이나 온실가스는 2011년과 2012년 등 2년간 측정하였다. 따라서 온실가스 분석은 2년의 자료를 사용하였고, 기타 분석은 3년의 자료가 사용되었다.

2. 재배방법 및 시비조건

실험처리(CT, MD, SRI) 논의 육묘, 이앙, 제초, 시비 등의 영농관리는 기본적으로 농촌진흥청의 표준재배법(Rural Development Administration, 2000)에 준하여 진행되었다. MD와 SRI는 물관리 방법만 다르게 시행되었다(Table 3).

각 시험포에는 강우량, 관개량 그리고 유출량 등을 측정할 수 있는 자기우량계, 수도계량기 및 수위계 등의 장비를 설치하였다. 그리고 온실가스(CH₄ 및 N₂O)를 측정하기 위하여 아크릴재질의 Chamber (60×60×150 cm)를 각각의 논 시험포에 3개씩 설치하였다. CT, MD 그리고 SRI 시험포에 이앙한 모의 재배품종은 오대벼이며, 모판에 파종하여 온실에서 15

일 이내의 어린모와 20~30일 사이의 장모를 키웠다. SRI 시험포에는 어린모, CT와 MD 시험포에는 장모를 1주당 3~5본씩 기계이앙을 실시하였다. 시비량은 농촌진흥청 작물별 시비처방기준(1999)에 의한 표준시비방법으로 N-P₂O₅-K₂O : 110-45-57 (kg/ha) 을 각 시험포에 시비하였다.

3. 시험포 관개용수 및 GHG 측정방법

CT는 이앙기부터 낙수기까지 농촌진흥청 표준영농교본 물 관리 방법에 따라 상시답수를 기본으로 시기별로 물 관리를 수행하였다. MD는 CT 물 관리 방법(상시답수)에 중간낙수를 2회 실시하였다. SRI 시험포의 물 관리는 해외 여러 지역의 연구내용을 바탕으로 SRI 원칙에 부합할 수 있도록 물 관리를 하였다. 특히 Khidhir et al. (2011)의 연구에서는 SRI를 적용함에 있어 토양의 생물학적 활성도를 증가시키고, 토양통기성이 유지될 수 있도록 논의 물을 관리하는 것이 중요하다고 하였다. 따라서 본 연구는 이러한 내용을 기초로 하여 이앙 후 초기에는 간단관개로 약 1 cm 깊이로 물을 대고 3~4일 간격 또는 기상조건에 따라 1~2일 간격으로 물 관리를 수행하였다.

우리나라 농경지에서 배출되는 온실가스에 대한 연구는 1993년 농업과학기술원에서 간이폐쇄정태 Chamber 법으로 측정하면서 시작되었고, Shin et al. (1995)이 간이폐쇄정태 Chamber (simplified closed static chamber method)을 고안하여 사용하고 있다.

Table 2 General soil properties of the experimental site

Index	pH	OM (g/kg)	P ₂ O ₅ (mg/kg)	SiO ₂ (mg/kg)	Exchangeable cation (cmol/kg)			
					Ca	Mg	K	
Recommended range	6.0~6.5	25~30	80~120	130~180	5.0~6.0	1.5~2.0	0.25~0.30	
2010 before*	6.1±0.2	25	-***	-	4.6±0.2	1.7±0.3	0.28±0.1	
2011	before	5.9±0.4	19±1.2	76±7	103±17	5.1±0.5	1.9±0.3	0.4±0.05
	after**	6.3±0.2	28±1.0	135±7	163±23	6.0±0.3	1.9±0.2	0.5±0.06
2012 before	5.4±0.3	31±7.8	334±53	130±18	6.4±0.7	1.7±0.3	0.4±0.1	

* before : Before beginning of plowing for rice culture

** after : After harvest

*** Not measured

Table 3 Comparison of seedling age, seedlings per hill, transplant spacing and water management among conventional practice (CT), midsummer drainage (MD) and system of rice intensification (SRI)

Treatment	Age of seedlings (date)	Seedlings per hill	Spacing (cm)	Water management
CT	20~30	3 to 5	30×15	Continuous Flooding
MD	20~30	3 to 5	30×15	Midsummer drainage (two times)
SRI	10~15	1 to 3	25×25 to 50×50	Intermittent irrigation

본 연구에서도 CH₄와 N₂O flux를 조사하기 위해 Shin et al. (1995) (Shin et al., 1995)의 간이폐쇄정태 chamber법을 이용하였다. 이 방법은 아크릴재질의 Chamber (60×60×150 cm)에서 주 2회 오전 10시와 오후 3시에 공기시료를 채취한다. 그리고 채취한 공기 시료의 CH₄ 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 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 4와 같고 flux로 변환한 식은 (1)에 나타내었다.

$$F = p \times V / A \times \Delta c / \Delta t \times 273 \quad (1)$$

여기서, F = flux (mg/m²·hr), p = 기체의 밀도 (mg/m³) ≒ N₂O 밀도 : 1.9643 mg/m³, V = 챔버의 체적 ≒ 0.01 m³, T = 챔버 내의 평균 온도 (°C), A = 챔버의 밀면적 ≒ 0.05 m², 그리고 Δc/Δt = 평균 시간에 따른 농도이다.

4. 지구온난화잠재력

벼 생육기간동안 논에서 배출되는 CH₄과 N₂O는 각각 지구온난화에 기여하는 기여율이 다르다. 따라서 CH₄과 N₂O의 배출량을 GWP로 변환하여야 한다. 본 연구에서는 GWP

Table 4 Gas Chromatographic analysis conditions for CH₄ and N₂O measurement

Gas species	CH ₄	N ₂ O
Detector	FID	ECD
Flow rate	30 ml/min	30 ml/min
Carrier gas	N ₂	N ₂
Column	Porapack N (80/100)	Porapack Q (80/100)
Column temp.	70 °C	70 °C
Injection temp.	80 °C	80 °C
Oven temp.	200 °C	320 °C

Table 5 Result of particle size and soil texture analysis of the soil at the study sites

Site	Particle fraction (%)			Soil texture
	Sand	Silt	Clay	
Korean paddy average	34.8	45.0	20.2	Loam
Study Site	49.0	34.8	16.2	Loam

를 산정하기 위하여 IPCC (2001)의 제안에 따라 CH₄와 N₂O 배출량을 식 (2)를 사용하여 CO₂ 상당량 (GWP)으로 변환하였다.

$$GWP = CH_4 \times 21 + N_2O \times 310 \quad (2)$$

III. 결과 및 고찰

1. 토양조건

우리나라 논토양의 입경분포는 평균적으로 모래 34.8 %, 실트 45.0 %, 점토 20.2 %이며 토성은 양토이다 (Yeongsan River, the Seomjin River water systems management committee, 2005). 본 시험포의 토양은 모래 49.0 %, 실트 34.8 %, 점토 16.2 %로 분석되었다. 이는 전국평균에 비하여 실트와 점토 함량은 낮은 반면 모래함량은 15 % 정도 높은 것으로 나타났다. 그러나 토성은 양토 (Loam)으로 분석되어 우리나라 논토양의 평균토성과 같았다 (Table 5).

2010년부터 2012년까지 3년의 연구기간동안 벼 재배전, 재배중 및 재배후 등 시기별로 분석된 평균적인 토양분석결과는 Table 6에 나타내었다. CT, MD 그리고 SRI 시험포 토양의 유기물함량이 다소 낮아진 경향을 보이는 것으로 나타났으나, 유효인산함량은 CT에서만 감소하였고 MD와 SRI는 시험 전에 비해 증가하였다.

Kim et al. (2007)에 따르면 인산은 토양에 강한 흡착성을 보이며, 담수상태의 환원 층에서 가용화된 많은 부분의 인산이 심토의 산화층을 통과하면서 철, 알루미늄등과 결합하여 다시 고정되는 특징을 지닌다고 하였다. MD와 SRI는 담수 기간과 담수깊이가 관행보다 작아 지하로 침투되는 침투량이 관행보다 작아 토양을 호기성 상태로 유지시키면서 인산의 흡착을 조장하여 함량을 증가시킨 것으로 판단된다. 교환성양이온 및 중금속 항목은 대체적으로 우리나라 논토양의 검출기준 이하인 것으로 나타났다.

2. 관개용수 사용량

영농지역에서의 관개는 대체적으로 4월 중순부터 시작하여 9월 말경에 종료한다. 본 연구에서는 5월부터 9월 말까지

Table 6 Result of soil analysis with respect to before, during, and after rice culture of the study site

Treatment		Before culture			During culture			After culture		
		CT	MD	SRI	CT	MD	SRI	CT	MD	SRI
pH		5.75	6.30	6.00	6.00	5.80	6.17	5.60	5.70	5.85
OM (g/kg)		32.55	27.70	27.17	23.53	21.70	25.63	23.75	21.00	22.68
P ₂ O ₅ (mg/kg)		247.25	140.00	190.17	194.25	118.00	175.67	138.00	232.00	226.50
SiO ₂ (mg/kg)		159.25	179.00	141.83	154.75	129.00	147.00	117.00	101.00	109.83
Exchangeable cation (cmol/kg)	Ca	6.23	6.00	6.17	5.70	5.70	6.17	5.08	5.60	5.83
	Mg	1.70	1.80	1.87	1.55	1.60	1.82	1.48	1.80	1.82
	K	0.50	0.40	0.43	0.47	0.31	0.50	0.33	0.28	0.35
Heavy Metals (mg/kg)	Cr < 5**	N.D.*	N.D.*	1.30	N.D.*	N.D.*	4.26	0.38	0.30	0.10
	Cu < 50**	15.53	6.80	14.08	12.17	9.50	12.48	8.80	9.40	7.97
	Cd < 4**	0.09	0.07	0.07	0.07	0.06	0.09	0.08	0.10	0.10
	Zn < 300**	59.39	9.60	42.42	56.00	15.30	41.11	12.59	16.40	11.45
	Ni < 100**	12.20	0.50	8.42	11.94	0.70	8.32	0.70	0.75	0.73
	Pb < 200**	13.56	10.40	10.85	17.59	10.50	12.17	11.61	9.20	8.12
	As < 25**	3.15	1.80	2.64	2.42	2.40	2.35	1.89	2.40	1.83
Hg < 4**	N.D.*	N.D.*	N.D.*	N.D.*	N.D.*	N.D.*	N.D.*	N.D.*	N.D.*	

* N.D. : Not detected

** Maximum contaminant level of Korean paddy soil

Table 7 Comparison of irrigation amount (m³) and reduction (%) between the treatments

Year	CT	MD	SRI
2010	36	-	16
2011	47	32	24
2012	52	37	28
Average	45	35	23
Reduction (%)	-	22	49

용수량 측정을 하였으며, Table 7은 3년 (2010년~2012년)의 용수사용량을 보여준다. CT대비 평균 관개용수 저감률은 MD와 SRI에서 각각 22%와 49%로 나타났다. 관개용수는 MD보다 SRI 물 관리 방법에서 더 많이 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

Table 8에는 Amir et al. (2011)이 발표한 SRI에 의한 각국의 관개용수 저감율을 관개 지구단위에서 측정한 결과를 나타내었다. 본 실험에서 측정한 자료는 필지단위의 연구로 Table 8의 관개용수 저감율과 직접적인 비교는 어려울 수 있다. 하지만 국·내외의 필지단위에서 SRI 적용에 의한 용수저감효과를 측정한 자료가 없으므로, 본 실험에서 측정한 자료를 관개지구단위로 확대하여 비교하였다. 본 실험에서 측정된 SRI 관개용수 저감율을 관개지구단위로 확대하면 약 35%의 효과를 볼 수 있을 것으로 추정되고 있다. 이는 국외 SRI 관

Table 8 Irrigation reduction by SRI compared with conventional rice culture in some countries

Country	Irrigation water reductions (%)
China	26.5
Indonesia	40
India (a)	52
India (b)	22.2
Pakistan	70
Iraq	37.4
Mali	10
Panama	78
Average	42

* Source : Amir et al. (2011)

개용수 저감효과인 42%와 큰 차이는 나지는 않는 것으로 판단된다.

Kim et al. (2012)에 따르면 농경지에서 CH₄ 배출은 담수 상태로 재배되는 논토양이 주 배출원이며, 이는 토양으로 산소공급이 원활하지 않기 때문이라고 하였다.

3. 온실가스 배출량 평가

2011과 2012년의 벼 이앙기에서 수확전 완숙기까지 CH₄ 과 N₂O의 평균 배출량은 Fig. 1과 같다. CH₄ 배출량은 CT에

서 412.8 kg CH₄ ha⁻¹인데 비하여 MD는 214.4 kg CH₄ ha⁻¹, 그리고 SRI는 95.9 kg CH₄ ha⁻¹로 측정되었다. 이는 MD와 SRI 물관리는 관행재배 (CT)에 비해 각각 48.1 %와 76.8 %의 CH₄가 감축되었음을 의미한다. N₂O의 평균 배출량은 CT 0.001814 kg N₂O ha⁻¹, MD 0.006 kg N₂O ha⁻¹, 그리고 SRI 0.040 kg N₂O ha⁻¹로 측정되었다. N₂O 배출량은 CT보다 MD와 SRI 물관리에서 더 높았다. Ogawa et al. (1988)와 Tsuruta et al. (1995)는 벼논의 물 관리 시에 N₂O 배출량은 CH₄ 배출량과 부의 상관관계로, 간단관개 시 산화환원 조건 및 호기성 상태에서 메탄배출량은 줄어드나 산화질소의 배출을 증가한다고 하였고, 본 연구에서도 비슷하게 나타났다.

지구온난화에 대한 온실가스의 기여도는 온실가스의 종류에 따라 다르기 때문에 CH₄과 N₂O의 배출량을 GWP로 환산하여야 한다(Yagi, 1997). CH₄과 N₂O 배출량을 이산화탄소 배

출량으로 환산하면 CT는 12.8 ton/ha/yr, MD는 6.6 ton/ha/yr, SRI는 3.0 ton/ha/yr으로 산정된다(Table 9). SRI로 물 관리를 하는 경우 GWP는 CT에 비하여 77.1 %, MD에 비하여 49.1 % 이산화탄소 배출량이 감소되는 것으로 나타났다.

간단관개가 CH₄ 배출은 저감시키나 N₂O의 배출은 증가한다고 보고되고 있다 (Cai et al., 1999). N₂O는 이산화탄소의 310배에 이르는 지구온난화잠재력 (GWP)을 가지고 있다. 따라서 간단관개로 N₂O의 증가는 GWP에 많은 영향을 미칠 수 있다. 그러나 본 연구에서 N₂O 배출 증가량은 CH₄의 저감량에 비해 상대적으로 매우 작아 GWP에는 큰 영향을 주지 못했다. 본 연구에서 측정된 N₂O는 0.00083~0.0018 kg CO₂ ha⁻¹ 정도로 CH₄ 배출량 3.0~12.8 kg CO₂ ha⁻¹의 비해 적게 배출되었다.

Table 10은 Shin et al. (2014)이 발표한 논에서 실제 측정

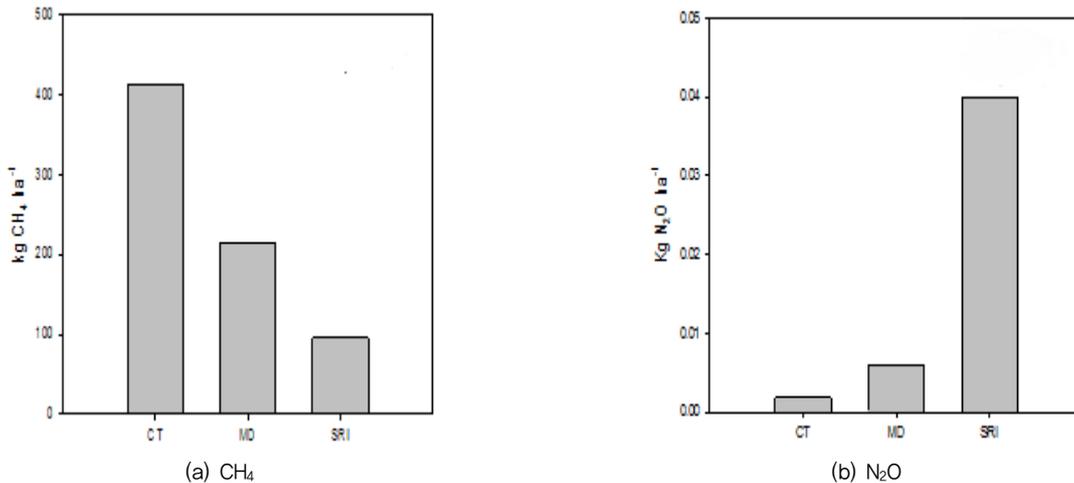


Fig. 1 Two-year average CH₄ and N₂O emission with respect to treatment

Table 9 Assorted greenhouse gas emission and global warning potential (GWP) from the study paddy plot during 2011~2012 growing seasons

Water management		Total emission		GWP @ kg CO ₂ ha ⁻¹	GWP ⑥ kg CO ₂ ha ⁻¹	GWP (④+⑥) kg CO ₂ ha ⁻¹	Index (%)
		CH ₄ ④ kg ha ⁻¹	N ₂ O ⑥ kg ha ⁻¹				
2011	CT	458.4	0.000028	14.2	0.00001	14.20	100.0
	MD	157.7	0.007	4.9	0.003	4.90	34.4
	SRI	126.8	0.074	3.9	0.034	3.93	27.9
2012	CT	367.2	0.0036	11.4	0.002	11.40	100.0
	MD	271.1	0.005	8.4	0.002	8.40	73.8
	SRI	64.9	0.006	2.0	0.003	2.00	17.7
Avg.	CT	412.8	0.001814	12.8	0.00083	12.80	100.0
	MD	214.4	0.006	6.6	0.003	6.60	52.0
	SRI	95.9	0.040	3.0	0.018	3.00	23.4

Table 10 The GWP and Net GWP according to measured at paddy field

Date	GWP (kg CO ₂ -eq./ha/yr)			Net GWP (t CO ₂ -eq./ha/yr)
	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	
2002	128.2	384.8	16,179.2	16.7
2003	227.2	721	14,824.2	15.8
2004	223.5	282.5	16,515.2	17
2005	351.7	618.7	17,620.9	18.6
2006	260.1	487.1	15,566.1	16.3
2007	205.2	423.8	16,755.6	17.4
2008	285.8	365.4	16,033.1	16.7
2009	447	389.7	15,875.2	16.7
2010	106.3	842.8	18,596.4	19.5
2011	213.2	116.9	16,120.8	16.5
Ave.	245.1	463.3	16,408.6	17.1

Source : Shin et al. (2014), Journal of the Korean Society of Agroculture Engineers 56(2), pp. 47-57

Table 11 The contribution rate GWP to the CH₄ and N₂O

Date	GWP (kg CO ₂ -eq./ha/yr)			Net GWP (t CO ₂ -eq./ha/yr)
	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	
2002	1 %	2 %	97 %	100 %
2003	1 %	5 %	94 %	100 %
2004	1 %	2 %	97 %	100 %
2005	2 %	3 %	95 %	100 %
2006	2 %	3 %	95 %	100 %
2007	1 %	2 %	96 %	100 %
2008	2 %	2 %	96 %	100 %
2009	3 %	2 %	95 %	100 %
2010	1 %	3 %	95 %	100 %
2011	1 %	1 %	98 %	100 %
Ave.	1 %	3 %	96 %	100 %

한 자료를 이용하여 온실가스 배출량을 연간 산정한 표이다. GWP에 CH₄와 N₂O이 차지하는 기여율은 각각 94 %~98 %와 1 %~5 %의 범위에 있는 것으로 확인되었다(Table 11). 따라서 GWP는 메탄에 의한 영향이 큰 것으로 판단되었다.

Proyuth et al. (2013)은 SRI 방법에 의해 물 관리를 할 경우 논토양의 건조가 일어나고 이로 인해 다른 관행 논보다 메탄 배출량이 상대적으로 적다고 하였다.

본 연구에서 SRI 처리방법에 의한 CH₄의 배출량이 가장 작았던 이유는 wet-dry 재배를 원칙으로 관개와 배수를 반복하므로 호기성(산화) 토양조건을 유지하는 시간이 길기 때문에 메탄 배출이 낮은 것으로 사료된다.

IV. 결 론

본 연구는 CT, MD 그리고 SRI 물관리 방법에 의한 관개용수 사용과 온실가스 배출량의 차이를 알아보기 위하여 수행하였다. 실험은 강원도 춘천시 신북읍 천전리에 위치한 강원대학교 농장의 시험포에서 3년 동안 수행되었으며, 온실가스는 2년 동안 측정되었다.

1. 벼 재배전, 재배중 및 재배후로 구분하여 함수량과 일반적인 토양분석을 수행한 결과 유기물함량은 모든 처리방법이 재배전보다 재배후에 낮아졌다. CT 시험포의 유효인산 함량은 재배전보다 재배후에 높아졌다. 반면에 MD와 SRI

시험포의 유효인산함량은 재배전보다 재배후에 다소 증가하였다.

2. CT대비 SRI 물관리 방법의 관개용수 평균저감량은 47.9%로 나타났다. 이는 필지(시험포)단위 저감량으로 관개지구 단위에서는 다소 낮아질 것으로 예상된다.
3. CH₄ 배출량은 CT에서 412.8 kg CH₄ ha⁻¹인데 비하여 MD는 214.4 kg CH₄ ha⁻¹, SRI 물관리 방법은 95.9 kg CH₄ ha⁻¹로 각각 48.1%와 76.8% 감축되었다. N₂O 배출량의 경우는 CT 0.001814 kg N₂O ha⁻¹에 비해 MD는 0.006 kg N₂O ha⁻¹, SRI는 0.040 kg N₂O ha⁻¹로 CT보다 MD와 SRI 물관리 방법의 N₂O 배출량이 더 많았다. 그러나 본 연구에서 N₂O 배출 증가량은 CH₄의 저감량에 비해 상대적으로 매우 작아 GWP에는 큰 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.
4. 2년 동안의 벼 재배기간 GWP는 SRI 물관리 방법은 3.00 kg CO₂ ha⁻¹, MD 6.60 kg CO₂ ha⁻¹, 그리고 CT 12.80 kg CO₂ ha⁻¹으로 나타났다. SRI 물관리 방법은 CT와 MD 처리구에 비하여 각각 77.1%와 49.1%의 GWP 배출을 저감시킬 수 있는 것으로 나타났다.
5. SRI 물관리 방법을 이용한 벼 재배방법은 기후변화로 예상되는 관개용수 부족에 대응할 수 있는 매우 효과적인 방법이며 또한 기후변화 완화를 위한 GWP 배출저감에 효과적인 방법으로 나타났다. 그러나 본 연구는 필지단위의 연구로 유역에서의 저감효과로 일반화 하기는 어렵다. 따라서, SRI 방법을 사용하는 농민들에게 인센티브와 같은 제도를 마련하여 SRI 농법을 사용할 수 있도록 정착시키는 것이 필요하다.
6. 향후, SRI 벼 재배방법에 대한 유역단위의 추가적인 연구를 통하여 관개용수량 및 온실가스 배출자료를 생성할 필요가 있으며, 생성된 자료는 향후 가뭄대비 용수절약뿐만 아니라 논외 온실가스를 효과적으로 제어하여 유역관리에 유용한 자료로 활용할 수 있을 것이다.

REFERENCES

1. Amir, K., S. Willem, and U. Norman, 2011. Review of SRI modifications in rice crop and water management and research issues for making further improvements in agricultural and water productivity, *Paddy Water Environment* 9, pp. 163-180. DOI 10.1007/s10333-011-0259-1.
2. Bachelet, D. and H. U. Neue, 1993. Methane emissions from wetland rice areas of asia, *Chemosphere* 26: 219-237.
3. 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 Science. Plant Nutri.* 45(1): 1-13.
4. Choi, J. D., W. J. Park, K. W. Park, and K. J. Lim, 2013. Feasibility of SRI methods for reduction of irrigation and NPS pollution in Korea, *Paddy Water Environment*, 11: 241-248.
5. Minami, K., 1993. Methane from Rice production. Res. Rep. Div. *Environment Planning*. 9: 243-258.
6. Intergovernmental Panel on Climate Change, 1995. Climate change, 1994 : Radiation forcing of climate change and an evaluation of the the IPCC IS92 emission secinario. Cambridge University Press, Cambridge, england. New York. P. 399.
7. Itoh, M., S. Sudo, and S. Mori, 2011. Mitigation of methane emission from paddy field by prolonging midseason drainage, *Agric Ecosyst Environ* 141(3-4): 359-372.
8. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2001. Climate Change 2001 : The Scientific Basis. Cambridge University PRESS, Cambridge, UK.
9. 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 management of SRI (System of rice intensification) in rice paddy fields, *Korean Society of Soil Science and Fertilizer* 45(6): 1173-1178 (in Korean).
10. Korean Meteorological Administration, 2014. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) AR5 the 5th Assessment Report Korean Meteorological Administration translation data. *Korean Meteorological Administration*. (in Korean).
11. Kim, G. Y., S. I. Park, B. H. Song, Y. K. Shin, 2002. Emission characteristics of methane and nitrous oxide by management of water and nutrient in a rice paddy soil, *Korean Journal of Environmental Agriculture* 21(2): 136-143 (in Korean).
12. Kim, G. Y., Title of article. <http://www.ecofuturenetwork.co.kr/news/articleView.html?idxo-2898>. Accessed 01 Dec. 2010.
13. Kim, C. S., J. Y. Ko, J. S. Lee, K. Y. Jung, S. T. Park, Y. C. Ku, and H. W. Kang, 2007. Use of drainage water as irrigation resource in the paddy field to mitigate non-point source pollutants. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 26(2): 107-115 (in Korean).
14. 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 Journal of Environmental Agriculture* 17(3): 227-233 (in Korean).
15. Ko, J. Y. and H. W. Kang, 2000. The effects of cultural practices on methane emission from rice field. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry* 58: 311-314 (in Korean).
16. 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 Society of Soil Science and Fertilizer* 35(4): 216-222 (in Korean).

17. 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 emission from paddy field. *Korean Society of Soil Science and Fertilizer* 40(3): 214-220 (in Korean).
18. Khidhir, A. H., J. M. Abdul-Kadhim, and A. J. Flayeh, 2011. Irrigation water reduction using System of Rice Intensification compared with conventional cultivation methods in Iraq. *Paddy Water Environment* 9: 121-127.
19. Lee, K. B., J. G. Kim, C. W. Park, Y. K. Shin, D. B. Lee, J. D. Kim, 2005. Effect of irrigation water depth on greenhouse gas emission in paddy field, *Korean Society of Soil Science and Fertilizer* 38(3): 150-156 (in Korean).
20. Lehugera, S., B. Gabrielleb, P. Lavillec, M. Lambonid, B. Loubetd, and P. Cellierd, 2011. Predicting and mitigating the net greenhouse gas emissions of crop rotations in western Europe. *Agricultural and Forest Meteorology* 151: 1654-1671.
21. Lu, WF., W. Chen, and BW. Duan, 2000. Methane emissions and mitigation options in irrigated rice fields in Southeast China. *Nutr Cycl Agroecosyst* 58(1): 65-73.
22. 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 Society of Soil Science and Fertilizer* 38(3): 150-156 (in Korean).
23. Li, X., X. Xu, and H. Li, 2005. Cornell University College of Agriculture and Life Sciences, USA. <http://sri.cals.cornell.edu/countries/china/cnciadeng.pdf> (accessed Jan. 2016).
24. Ministry of environment, 2015. Report explain data, Ministry of environment (in Korean).
25. Matthews, E., I. Fung, and J. Lerner, 1991. Methane emission from rice cultivation : Geograhic and seasonal distribution of cultivated areas and emissions, *Global Bioeochem. cycles* 5: 3-24.
26. Norman, U., 2004. system of rice intensification responds to 21st century need. *Rice Today* 3(3): 42
27. Ogawa, Y. and K. Minami, 1988. Effect of nitrogen enrichment in irrigation water on nitrogen balance in paddies, *Paddy soil Fertilizer* 497-509.
28. Oh, Y. K., S. H. Yoo, S. H. Lee, N. Y. Park, J. Y. Choi, and D. K. Yun, 2012. Prediction of land-cover changes and analysis of paddy fields changes based on climate change scenario (A1B) in agricultural reservoir watershes, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(2): 77-86 (in Korean).
29. Proyuth, L., S. J. Lars, B. B. Thilde, and D. N. Andreas, 2013. Methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) emissions from the system of rice intensification (SRI) under a rain-fed lowland rice ecosystem in Cambodia, *Nutr Cycl Agroecosyst* 97: 13-27.
30. Park, W. J., Y. H. Choi, M. H. Shin, C. H. Won, K. W. Park, and J. D. Choi, 2011. Evaluation on feasibility of system of rice intensification (SRI) for reduction of irrigation water in South Korea, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 53(4): 1-9 (in Korean).
31. Rural Development Administration, 2008. The agricultural sector, climate change action proceeding situations Parliamentary special committee on climate change Buildup, *Rural Development Administration* (in Korean).
32. Rural Development Administration, 2000. Rice labor saving culture, 11-1390000-00754-01, Rural Development Administration (in Korean).
33. Smith, P., D. Martino, Z. Cai, D. Gwary, H. Janzen, P. Kumar, B. McCarl, S. Ogle, F. O'Mara, C. Rice, B. Scholes, and O. Sirotenko. 2007. Agriculture In Climate Change 2007: Mitigation Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
34. Shin, Y. K., 1996. Mitigation options for methane emission from rice fields in Korea. *Ambio* 25(4): 289-291.
35. Shin, Y. K., Y. S. Lee, S. H. Yun, and M. E. Park, 1995. Simplified closed static chamber method for measuring methane flux in paddy soils, *Korean Society of Soil Science and Fertilizer* 28(2): 183-190 (in Korean).
36. Shin, M. H., J. R. Jang, C. H. Won, D. H. Kum, Y. H. Jung, S. I. Lee, K. J. Lim, and J. D. Choi, 2014. Simulation of GHG Emission from Paddy Field using DNDC Model. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(2): 47-57 (in Korean).
37. Towprayoon, S., K. Smakgahn, and S. Poonkaew, 2005. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from drained irrigated rice fields. *Chemosphere* 59(11): 1547-1556.
38. Tsuruta, H., K. Yagi, K. Kanda, K. Hirose, 1995. Nitrous oxide emission from rice paddy fields. In : *Program and abstract of international symposium on soil-source and sink of greenhouse gases, Nanjing, China*, pp. 12.
39. Yagi, K. and K. Minami, 1990. Estimation of gobal methane emission from paddy fields, res. Div. Environment Planing 6, 132-142.
40. Yagi, K. 1997. Greenhouse gas emission and absorption. In : Konno T, Anzai T, Onikura Y et al. (eds) *Methods of soil environment anaylsis, Hakuyusha, Tokoy*, 129-138.
41. Yoo, S. J., 2012. National greenhouse gas reduction targets and Policy Direction, *The Korean Society of Environmental Agriculture Conference*, 3-25 (in Korean).