

논에서 SRI (System of Rice Intensification) 물 관리 방법을 적용한 온실가스 저감 효과

김건엽* · 이슬비 · 이종식 · 최은정 · 유종희

농촌진흥청 국립농업과학원

Mitigation of Greenhouse Gases by Water Management of SRI (System of Rice Intensification) in Rice Paddy Fields

Gun-Yeob Kim*, Seul-Bi Lee, Jong-Sik Lee, Eun-Jung Choi, and Jong-Hee Ryu

National Academy of Agricultural Science(NAAS), RDA, Suin-ro 150, Gwonseon-gu, Suwon-si 441-707, Korea

Water competition among domestic, industrial and agricultural sectors has been gradually heightened recently in Korea as the lack of water supply is expected in the near future. About 46% of nation's water use is consumed in paddy farming to produce rice. And the conservation of water resource and quality in agricultural sector is a pending issue in the nation's long term water management plan. New paddy rice farming techniques that use significantly less irrigation water are urgently required. System of Rice Intensification (SRI) that is now well known to produce more rice with less water consumption has not been tried in Korea yet. And environmental effect of SRI on greenhouse gases (GHGs) has not been well investigated. The objective of this study was to measure the effect of SRI on GHGs as well as water use and rice yield in a Korean paddy condition. Three experimental runoff plots 5×15 m in size were prepared at an existing paddy field. Runoff, GHGs emission and water quality were measured during the 2011 growing seasons while a Japonica rice variety was cultivated. Rice plants grew better and healthier in SRI plots than in continuously flooded (CF) and intermittently drained (ID) plots. Rice yield from SRI plots increased 112.8 (ID)~116.1 (CF)% compared with CF and ID plots. Irrigation requirement of SRI plots compared to CF plot reduced by 52.6% and ID plot reduced by 62.0%, meaning that about 37.9~47.4% of irrigation water could be saved. GHGs emission from SRI plots reduced by 71.8% compared to that from CF plot and by 18.4% compared to that from ID plot, meaning that SRI could help contribute to ease the greenhouse gas accumulation in the atmosphere. It was believed that SRI is a promising paddy farming technique that could increase rice yield, and reduce irrigation water requirement and GHGs emission not just in Korea but also other rice farming countries all over the world. However, it was recommended that long term studies under different conditions including rice variety, soil texture, water source, climate need to be conducted for reliable data for the development of environmental policies related to GHGs emission control and management.

Key words: Irrigation, Paddy, System of rice intensification, greenhouse gas emission

서 언

지표면에서 반사되는 적외선을 흡수하여 대기 열수지 및 온난화에 영향을 주는 CH₄은 지구온난화잠재력 (Global Warming Potential; GWP)이 CO₂ 대비 21배로 농경지에서 CH₄ 배출은 토양조건이 혐기적인 상태에서 발생되므로 우리나라에서는 담수상태로 재배되는 논토양이 주 배출원으로 알려져 있다. 논토양은 담수상태인 관계로 대기로부터 산소공급이 원활하지 않기 때문에 토양 내 유기물은 혐기적

분해과정을 거치면서 발 토양에서 발생되지 않는 여러 미량 기체들이 배출된다.

지구온난화잠재력이 CO₂ 대비 310배에 해당하는 N₂O의 주 배출원은 질소질 비료 및 가축분뇨인 것으로 알려져 있다 (IPCC, 1996).

이들 온실가스 중 논에서 가장 많이 배출되는 것은 메탄 가스이며, 논물 관리에 따라 메탄의 배출량이 증감이 된다. 최근 농업분야에서는 벼 생산성 증대와 관개용수 절약을 위한 SRI (System of Rice Intensification) 재배방법의 도입이 확산되고 있다. SRI는 1980년대 아프리카 동쪽 마다가스카르에서 프랑수아 선교사에 의해 기초가 마련되었다. 그 후 Norman (2008)에 의하여 전 세계로 널리 확산되고 있는 추

접수 : 2012. 11. 2 수리 : 2012. 12. 5

*연락처 : Phone: +82312900240

E-mail: gykim@rda.go.kr

세이다. 국제미작연구소 (IRRI)는 2004년에 21세기 논 농업의 연구개발목표로 논지의 생산성 증대, 관개용수의 효율성 증대, 낮은 비용 높은 생산성 농업기술 개발, 환경 친화적 재배기술 개발, 병충해 저항성 증대기술 개발, 기후변화 대응성의 향상, 쌀의 품질개선, 그리고 농업인의 수익성 개선 등 8가지를 제시하였다. 이와 같은 8가지의 목표를 만족시킬 수 있는 논벼 재배방법으로 각광받는 방법 중의 하나가 SRI 이며, SRI 벼 재배방법의 가장 큰 효과는 벼 생산성 제고와 용수 공급량 절감을 들 수 있다 (IRRI, 2007).

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

재료 및 방법

본 시험은 온실가스 배출이 SRI 재배방법의 논물 관리를 통해 온실가스 감축효과를 살펴보기 위해 춘천시에 위치한 강원대학교의 벼 재배 시험포장에서 2011년에 수행하였다. 시험포장의 토양 입도분포는 모래 48.6%, 미사 35.8% 및 점토 17.5%로 양토이며, 토양은 유기물 함량이 28.0 g kg⁻¹ 이고 유효인산이 135.0 mg kg⁻¹ 이었다 (Table 1). 그리고 강수량은 자동기상관측장치 (Automatic Weather Station)를 이용하여 측정하였다.

벼의 공시품종은 오대벼로 4월 22일 파종하고 5월 6일에 이앙하였으며, 재식거리가 15×30 cm, 수확은 9월 6일에 하

였다.

시비는 농촌진흥청 작물별 시비처방기준 (1999)에 의한 표준시비방법으로 하였다. 시비처리로 화학비료는 N-P₂O₅-K₂O : 110-30-30 kg ha⁻¹ 질소는 요소를 2회 분시, 인산은 용성인비로 전량 기비, 칼리는 염화칼리를 1회 분시 하였으며, 논물 관리 처리는 상시담수와 벼 생육기간 중 2회 (이앙 후 30일부터 10일간 및 이삭 패기 전 35일부터 10일간) 낙수한 간단관개 그리고 완전 물 떼기를 제외한 전 생육기간 동안 1~2 cm 담수깊이까지 논물을 채운다음 자연소모 (토양 중 침수와 증발)로 토양 바닥이 실금이 보이면 물을 다시 1~2 cm 관개하는 SRI 물 관리 농법 처리 등 3처리를 두었다.

물 관리는 SRI 처리에서 장마철 기간인 7월 20일~8월 6일에는 실시하지 않았으며, 간단관개 처리는 중간낙수를 10일간 (6월 11일~6월 20일) 1회 실시하였다.

CH₄와 N₂O 플럭스를 조사하기 위해 簡易閉鎖靜態 chamber 법 (Shin 등, 1995)을 이용하였으며, 설치된 chamber는 밑면적이 0.36 m² (0.6×0.6 m)이고 높이가 1 m인 투명한 polyacrylic plastic의 소재로 제작하였다 (Fig. 1). 가스시료 채취는 Yagi (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 CH₄ 농도는 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 농도는 10 port와 4 port valve

Table 1. Chemical properties of soil before experiment.

pH	O.M.	Av.P ₂ O ₅	Av. SiO ₂	Exch. Cation		
				K	Ca	Mg
(1:5)	g kg ⁻¹	----- mg kg ⁻¹ -----	-----	-----	cmol _c kg ⁻¹	-----
6.3	28.0	135.0	103.6	0.5	6.0	1.9

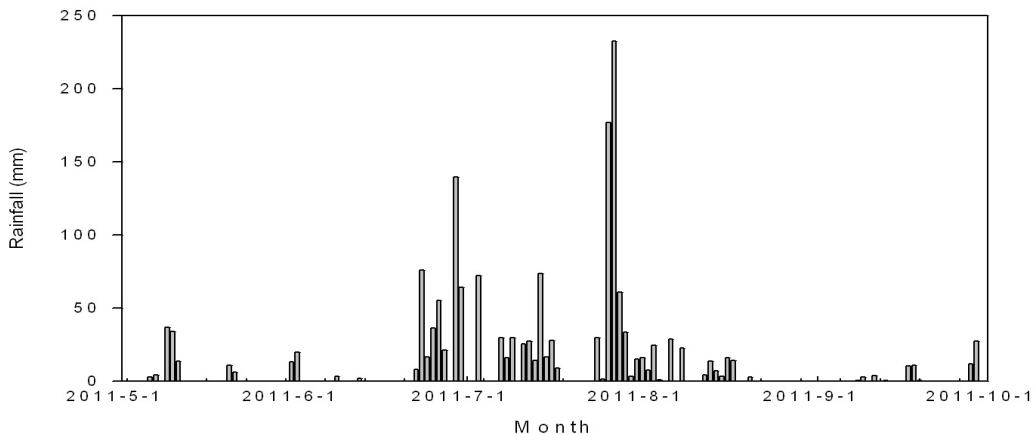


Fig. 1. Daily rainfall amount in Chuncheon from May to October in 2011.

Table 2. Gas Chromatographic analysis conditions for CH₄ and N₂O measurement.

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

Table 3. Yield of unhulled rice in paddy field under different water management.

Treatments	Yield of unhulled rice (kg ha ⁻¹)
CF	5,463
ID	5,622
SRI	6,341

¹CF (Continuously flooded), ID (intermittently drained), SRI (System of Rice Intensification)

를 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 식에 따라서 계산 (F : mg m⁻² hr⁻¹)하였다.

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

ρ 는 가스밀도 (mg m⁻³),

A는 chamber 바닥면적 (m²),

V는 chamber 내 공기체적 (m³),

$\Delta c/\Delta t$ 는 chamber내 가스농도의 평균 증가속도 (10⁻⁶ m³ m⁻³ hr⁻¹),

T는 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, 1995).

결과 및 고찰

이양부터 수확까지 벼 재배기간 동안 일 강우량은 0.3 mm ~ 232.6 mm의 범위로 큰 차이를 보였으며, 총 48회에 걸쳐 비가 내렸다. 특히, 6월 22일 이후 약 8일 동안 지속적인 강우로 인해 400 mm 이상의 폭우가 내렸고, 7월 24일부터 28일까지 4일간 약 500 mm 이상의 기록적인 강우량을 보였다. Table 3에서 물 관리별 벼 수량은 SRI 처리에서 6,341 kg ha⁻¹로 가장 수량이 높았으며, 상시담수 (CF)에 비해 간단관개 (ID)와 SRI 처리에서 각각 13.8%와 11.3% 증수되었다.

논물 관리에 따른 쌀의 품질은 Table 4와 같다. SRI 처리에서는 한국의 양질미 품종 선발 기준의 단백질 함량인 6%에 비교적 가까운 수치를 기록하였으며, 쌀의 품질에서 완전립 (Head rice)의 경우 가장 높은 값을 나타냈다. 이에 반해 상시담수와 간단관개 처리는 단백질 함량이 7.9%로 높게 측정되었는데 단백질 함량과 식이치 (윤기치, Palatability)는 반비례 관계로 단백질 함량이 높은 상시담수와 간단관개의 경우 식이치가 58~62로 가장 낮게 측정되었다.

재배기간 중 용수사용량은 이양전 썩레질 3.75 m³를 제외하고 상시담수 처리의 경우 총 용수사용량이 46.6 m³로 나타났으며, 중간낙수 2회 처리한 간단관개 처리는 39.5 m³, SRI 물 관리 처리가 24.5 m³로 나타나, 상시담수 대비 각각 15.2%, 47.4%의 농업용수를 절감한 것으로 조사되었다 (Table 5).

벼 생육기간 중 물 관리 처리별 메탄과 아산화질소 배출의 경시적 변화는 Fig. 2와 같다. 생육 초기까지 메탄 배출의 변동 (5월 13~6월 22일)은 상시담수와 간단관개 그리고 SRI 처리구에서 비슷한 양상을 보였으며, 10일간 (6월 11일~6월 20일) 중간 낙수를 처리한 간단관개구는 메탄배출이 점차 감소하였다. 이는 간단관개시 산화환원 조건 및 호기 상태에서 CH₄ 배출량은 줄어든다는 보고와 일치하였으며 (Kim 등, 2002; Partrick과 Reddy, 1977), 중간낙수 후 수확

Table 4. Assessment of rice quality and eating quality.

Different water management	Component (%)		Quality (%)				ToYo (Palatability)
	Protein	Amylose	Head rice	Broken rice	Chalky rice	Damage rice	
CF	7.9	16.4	81.7	3.1	7.1	7.7	62
ID	7.9	17.2	82.8	8.7	6.3	2.1	58
SRI	7.0	17.6	88.0	2.4	7.6	2	67

[†]CF (Continuously flooded), ID (ntermittently drained), SRI (System of Rice Intensification)

Table 5. Irrigation water requirement in paddy field under different water management.

Day	Mean water quantity (m ³)		
	CF	ID	SRI
5.10~5.13	16.5	14.5	15.0
5.14~5.20	5.0	4.8	2.6
5.20~5.31	7.2	7.4	3.9
6.1~6.10	12.2	10.5	5.4
6.11~6.30	11.7	7.7	5.9
7.1~7.31	5.6	5.2	3.6
8.1~8.31	4.9	3.9	3.1
Total	46.6	39.5	24.5
Reduction (%)		15.2	47.4

Table 6. Comparison GHGs emission from a paddy field under different water management.

Different water management	GHGs emission (kg ha ⁻¹)		CO ₂ Mg ha ⁻¹	Index (%)
	CH ₄	N ₂ O		
CF	458.4	0.000028	14.2	100
ID	157.7	0.007	4.9	34.5
SRI	126.8	0.074	4.0	28.2

[†]CF (Continuously flooded), ID (ntermittently drained), SRI (System of Rice Intensification)

기까지의 CH₄ 배출량도 상시담수에서와 같이 동일한 기간에 비해 전반적으로 낮게 나타났다. SRI 처리구에서는 이양 30일 이후부터 수확까지 계속 낮은 배출 추이를 보였다. SRI 농법에 의한 물 관리는 토양표면이 실금이 보이면 3~4일간격 관개하므로 토양의 산화가가 반복적으로 이루어져 간단관개 처리의 원리와 같이 메탄 발생이 줄어든다. 이에 비해 상시담수구에서는 두 처리구 보다 전체 작기 기간 동안 높은 배출을 보였다. 이는 계속되는 담수상태에서 혐기상태에서 혐기성균에 의해 토양중 유기물이 분해되어 CH₄이 발생되기 때문이다. 그리고 논에서는 상시담수 상태에서 NO₃ → N₂O → N₂ 전환과정 중 N₂O는 신속히 N₂로 전환되고, 상당량의 N₂O가 물에 녹기 때문에 N₂O배출량은 적고 반대로 CH₄의 발생량은 증가한다 (Freney 등, 1981; Minami, 1987; Smith 와 Patrick, 1983).

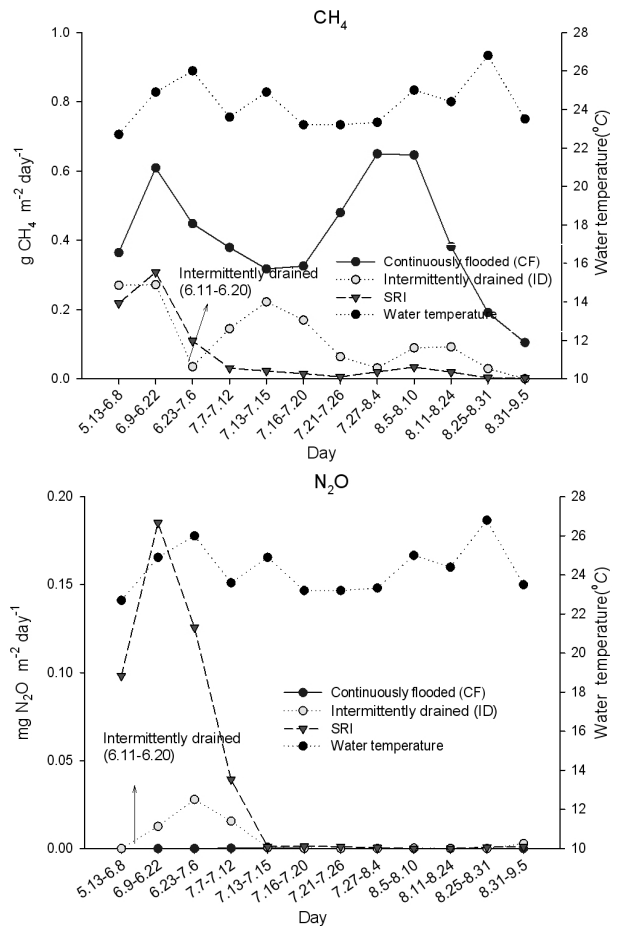


Fig. 2. Temporal changes of CH₄ and N₂O emissions as affected by different water management system.

그리고 논물온도와 메탄 발생과의 관계는 벼 생육기간 동안 CH₄ 플럭스의 변화 양상과 논물 온도변화 양상과 일치하지 않았다. 이는 Cai 등 (1997)과 Chen 등 (1993)이 토양 온도와 CH₄ 배출량과의 상관성이 낮았다는 결과와 일치하였다. 그러나 Yagi (1991)는 일본 벼 시험포의 CH₄ 배출의 경시적 변화에서 CH₄ 배출은 토양온도 변화에 영향을 받다고 보고 하였다 (Fig. 2).

벼 생육기간 중 이양기에서 출수 후 45일 (완숙기)까지 배출된 메탄과 아산화질소의 적산량은 Fig. 3과 같다. 메탄 배출량은 상시담수 (CF)에서 458 kg CH₄ ha⁻¹인데 비하여 간단관개 (ID)는 157.7 kg CH₄ ha⁻¹로 간단관개가 65.6%, 그리고 SRI는 72.3% 감축하였다. 아산화질소의 배출량의 경

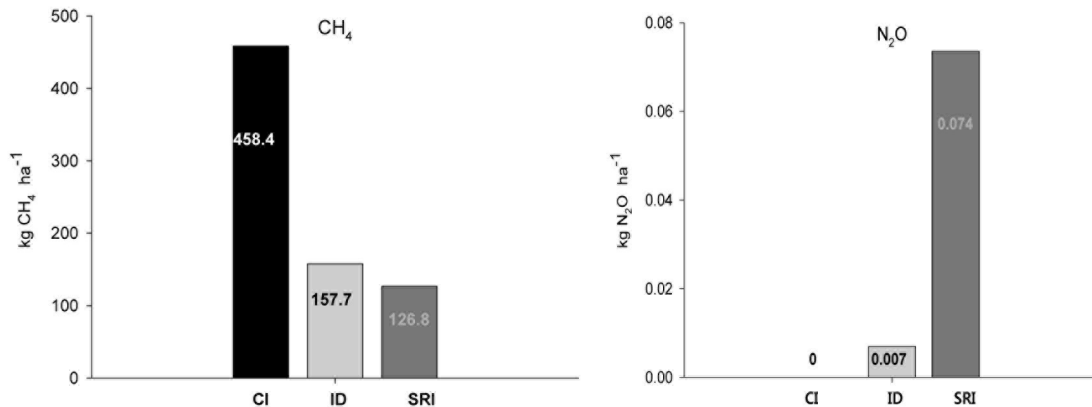


Fig. 3. Total emission of CH₄ and N₂O by the different water management system.

우 상시답수 0 kg CH₄ ha⁻¹에 비해 간단관개 와 SRI 처리 각각 0.007 kg N₂O ha⁻¹, 0.074 kg N₂O ha⁻¹로 나타났다. 상시답수와 간단관개 총 배출량 비교는 Kim 등 (2002)의 결과에 나타난 양상과 비슷하였다. 또한 Sass 등 (1992)은 수회에 걸친 간단관개는 토양 통기를 조정시키며 벼 수량에는 영향을 주지 않고 CH₄ 배출을 88%까지 감소시킨다고 하였다. Yagi와 Minami (1990)는 벼 생육 중기에 관개수를 배수시켜 52%의 CH₄가 저감되었다고 보고하였으며, Yagi 등 (1998)은 Lysimeter 실험에서 물의 투수량에 따라 CH₄ 배출량 변화는 투수율을 0, 5, 20 mm day⁻¹로 조절 했을 때 CH₄ 배출은 각각 9.25, 4.79 그리고 0.34 g m⁻² day⁻¹이었다고 하였다. Rath 등 (1999)은 답수 높이가 증가함에 따라 메탄생성이 뚜렷하게 증가한다고 하였으며, 이는 답수 깊이가 깊을수록 산소 확산을 감소시키고 혐기적인 조건을 더욱 유발시킨다고 하였다 (Ponnamperuma, 1972).

벼 재배기간 중 물 관리별 CH₄와 N₂O의 총 배출량을 지구 온난화잠재력 (GWP)으로 환산하여 비교한 결과는 Table 5과 같다. 온실가스 배출은 물 관리 조건에서 상시답수에 비해 간단관개가 65.5%, 그리고 SRI는 71.8% 감축효과가 있는 것으로 나타났다.

일반적으로 간단관개가 CH₄ 배출을 저감시키나 간단관개 시에는 N₂O의 배출이 늘어난다고 보고되고 있다 (Cai 등, 1997). 또한 N₂O의 지구온난화잠재력 총 배출량은 논에서 CH₄ 배출량 (1,904.7~15,569.4 kg CO₂ ha⁻¹)보다 배출 (62.0~217.0 kg CO₂ ha⁻¹)이 적어, 저감 효과는 미미한 것으로 나타났다. 그리고 SRI 처리에서 메탄 배출량이 가장 낮았는데, 그 원인으로는 Sebacher 등 (1986)이 답수 높이와 메탄 배출량은 상관관계가 성립한다고 하였으며, Yagi 등 (1994)은 메탄 배출은 관개와 낙수 등 물 관리 방식에 따라 토양의 산화환원전위와 밀접한 관계를 가지고 있으며, Yang 등 (2012)은 산화된 토양조건은 메탄 생성균에 의한 메탄 생성을 지연시키고 메탄 산화균에 의한 메탄 산화를 촉진시키기 쉽다고 하였다. 따라서 SRI 처리는 3~4일 간격으로 논물 수

위가 1~2 cm 관개와 배수를 반복하므로 계속해서 산화된 토양 조건을 유지하기 때문에 메탄 배출이 낮은 것으로 생각된다.

요 약

논에서 온실가스 배출에 영향을 주는 가장 큰 요인인 물 관리를 통하여 온실가스 감축효과를 파악하고자, 춘천시 신북읍 천전리에 위치한 강원대학교 벼 시험포장에서 메탄과 아산화질소 배출 시험을 수행하였다. 벼 재배에서 상시답수, 간단관개 (중간낙수 1회 처리, 6월 11일~6월 20일) 그리고 SRI 물 관리 농법 처리 등을 조성하여 수량, 쌀의 품질, 온실가스 배출량 비교 및 온실가스 감축효과를 조사한 결과는 다음과 같다.

1. 물 관리별 벼 수량은 SRI 처리에서 6,341 kg ha⁻¹로 가장 수량이 높았으며, 상시답수 (CF)에 비해 간단관개 (ID) 와 SRI 처리에서 각각 13.8%와 11.3% 증수되었다.
2. 재배기간 중 시기별 용수 사용량은 상시답수 처리가 46.6 m³, 간단관개 39.5 m³, SRI 물 관리 24.5 m³로 나타나, 상시답수 대비 각각 15.2% (간단관개), 47.4% (SRI)의 농업용수를 절감한 것으로 나타났다.
3. 벼 재배기간 온실가스 총 배출량을 지구온난화잠재력 (GWP)으로 환산한 결과, 상시답수에 비해 간단관개가 65.5%, 그리고 SRI 물 관리 농법은 71.8%의 온실가스 감축효과가 있는 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업 (세부과제번호: PJ006810012012)의 지원에 의해 이루어진 것임.

인 용 문 헌

- Cai, Z., G. Xing, X. Yan, H. Xu, H. Tsuruta, K. Yagi and K. Minami. 1997. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management. *Plant and Soil*. 196:7-14.
- Chen, Z., D. Li, K. Shao, and B. Wang. 1993. Features of CH₄ emission from rice paddy fields in Beijing and Nanjing. *Chemosphere*. 26:239-246.
- 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. Agr. Res.* 32:37-45.
- IPCC. 1996. Revised IPCC guideline for national greenhouse gas inventories: Reference Manual, revised in 1996, IPCC.
- IPCC. 1997. Greenhouse gas emissions from agricultural soils. In: *Greenhouse Gas Inventory Reference Manual; Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol.3, Section 4.5 Agriculture* (eds Houghton JT et al), IPCC/OECD/IEA. UK Meteorological Office, Bracknell, UK.
- IRRI. 2007. *Rice Today*. International Rice Research Institute, Vol. 6, No. 2.
- 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.
- Minami, K. 1987. Emission of nitrous oxide(N₂O) from agroecosystems. *Jpn. Agr. Res. Q.* 21:22-27.
- Norman U. 2008. *The System of Rice Intensification (SRI) as a System of Agricultural Innovation*. IPB (Bogor Agricultural University). Vol.10; No.1.
- 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. 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.
- Sebacher, D.I., Harris, R.C., Bartlett, K.B., Sebacher, S.M., Grice, S.S., 1986. Atmospheric methane sources: Alaskan tundra bogs, an alpine fen and a subarctic boreal marsh. *Tellus* 38B: 1-1.
- Sethunathan. 1999. Influence of fertilizer management and water regime on methane emission from rice fields. *Agr. Ecosyst. Environ.* 76: 99-107.
- 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.
- 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), CH₄ and N₂O: Global emission and controls from rice fields and other agricultural and industrial sources. Yokendo Publishers, NAIES series 2, Tokyo, pp. 41-53.
- Yagi, K. and K. Minami. 1990. Estimation of global methane emission from paddy fields. *Res. Div. Environ. Planning, NIAES*, 6:132-142.
- Yagi, K. and K. Minami, and Y. Ogawa. 1998. Effect of water percolation on methane emission from rice paddies: a lysimeter experiment. *Plant and Soil*. 198:193-200.
- Yang, S., S. Peng, J. Xu, Y. Luo, and D. Li. 2012. Methane and nitrous oxide emissions from paddy field as affected by water-saving irrigation. *Physics and Chemistry of the Earth* (in press).