

작기 중 물관리를 실시한 휴경기 논에서의 온실가스 배출 특성 조사 : 순 지구온난화지수 산정(net GWP)

권효숙*[†] · 김건엽* · 최은정* · 이선일* · 이종식**

*국립농업과학원 농업환경부 기후변화평가과 연구사, **국립농업과학원 농업환경부 기후변화평가과 연구관

Greenhouse Gas Emissions from Rice Paddy Soil During the Fallow Season: Effect of Water Management During Rice Cultivation

Gwon, Hyo Suk*[†] · Kim, Gun Yeob* · Choi, Eun Jung* · Lee, Sun Il* and Lee, Jong Sik**

*Researcher, Climate Change Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, Korea

**Senior researcher, Climate Change Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, Korea

ABSTRACT

Approximately 51% of the greenhouse gas (GHG) emissions generated by the agricultural sector in Korea are emitted from rice fields. Despite the extended fallow season, the calculation of GHG emissions from rice fields has been limited to rice cropping season. In this study, we sought to provide information on GHG emission considering the carbon budget in the fallow season. To compare the influence of water management during cropping season and how it affects the fallow season, two different treatments were examined, continuously flooded (CF-fallow) and intermittent drainage (ID-fallow). The emission rates of methane (CH₄), nitrous oxide (N₂O), and carbon dioxide (CO₂) were monitored using the closed chamber method. Changes in soil carbon were estimated using the net ecosystem carbon budget (NECB) method and the net global warming potential (GWP) calculated. Seasonal CH₄ and N₂O emissions were not significantly different between treatments, but the seasonal CO₂ emission for CF-fallow was significantly higher than that of ID-fallow. The net GWP was 5062 kg CO₂-eq. ha⁻¹ for CF-fallow and 4433 kg CO₂-eq. ha⁻¹ for ID-fallow. Approximately 77% of the calculated net GWP value was affected by the NECB value, followed by 22 ~ 23% affected by N₂O emission. In contrast, the influence of methane on net GWP was less than 1%, suggesting little effect on GHG emissions. In order to reduce GHG emissions during the fallow season in rice paddies, carbon enhancement through the input of carbon sources into the soil should be employed. However, since there are concerns about increased CH₄ emission from decomposing organic material during the cropping season, additional research on appropriate organic material sources and application methods should be conducted.

Key words: Net Global Warming Potential (net GWP), Greenhouse Gas (GHG), NECB (Net Ecosystem Carbon Budget), Rice Paddy, Fallow Season

1. 서론

국내 논 면적은 (813,503 ha) 전체 경작지 면적(1,532,578

ha)의 약 53%로, 우리나라 경종 부문에서 발생하는 온실가스의 약 51%(6.0 Gg CO₂-eq.)가 논에서 배출되고 있다(GIR, 2019; Statistics Korea, 2020). 논에서 배출되는 대표적인 온

[†]Corresponding author : gwonhs@korea.kr (55365, 166 Nongsangmyeong-ro, Wanju, Jeollabuk-do, Republic of Korea. Tel. +82-63-238-2485)

ORCID 권효숙 0000-0003-4030-1134
김건엽 0000-0001-8346-895X
최은정 0000-0001-9535-612X

이선일 0000-0002-0519-3150
이종식 0000-0002-9101-6811

실가스는 메탄(CH_4)으로, 일반적으로 담수 상태의 논 토양 환경에서 혐기적인 유기물 분해 시 발생한다. 1996 IPCC 지침에서는 벼재배부문 하에서 작기 중의 메탄(CH_4) 배출량 산정법을 제시하고 있으며, 국내 논에서의 메탄 배출량 역시 작기 중에 수집한 자료를 이용하여 산정하고 있다(Kim et al., 2013). 그러나 개정된 2006 IPCC 지침에서는 벼재배부문을 구분하지 않고 농경지(Cropland)로 통합하여 온실가스 배출량을 산정할 것을 요구하고 있다. 우리나라의 계절 특성 상 벼를 재배하는 기간은 111~130일이며(Choi et al., 2018), 나머지 240여 일의 휴경기는 작기와 달리 밭 상태로 논이 유지 및 관리된다. 휴경기는 작기와 비교하여 호기적 밭 토양 환경에 의해 메탄 배출량이 감소하고, 아산화질소 배출이 증가하는 등 작기와 다른 온실가스 배출 특성이 나타날 수 있다. 아산화질소는 지구온난화지수(Global warming potential, GWP)가 298로, 적은 양만으로도 지구온난화에 큰 영향을 줄 수 있는 온실가스이다(IPCC, 2007). 따라서 2006 IPCC 지침 적용을 통해 온실가스 배출량 산정의 정확도를 높이기 위해서는 작기 외에도 밭 상태의 휴경기를 포괄하는 논에서의 온실가스(CH_4 및 CO_2) 배출량 조사가 선행될 필요가 있다.

일부 선행 연구에서도 작기와 다른 휴경기 온실가스 배출에 대한 조사가 이뤄진 바가 있다. 그러나 대부분이 메탄 또는 아산화질소 배출에 한하여 연구해 온 것들로, 토양의 탄소수지(Carbon balance)를 포함하는 전체적인 온실가스 배출 특성에 대한 연구는 미비한 실정이다(Liang et al., 2007; Martínez-Eixarch et al., 2018; Sander et al., 2018). 토양 탄소원 중 하나인 토양 유기물(soil organic matter, SOM)은 토양의 건전성을 나타내는 중요한 지표이자(Delgado and Follett, 2002), 대기 중 이산화탄소를 안정적인 상태로 토양 내에 격리하는 역할을 통해 기후변화 완화하는 수단으로 알려져 있다(Lal, 2004). 특히 논(혐기적) 환경에서는 밭(호기적) 환경과 비교하여 상대적으로 토양 유기물이 안정적 구조로 토양 내에 잔류한다(Chen et al., 2018). 이러한 선행 연구 결과를 바탕으로 생각해 볼 때, 담수 상태의 논은 토양 유기물 축적에 유리하나 낙수 이후 휴경기에는 토양이 밭 환경으로 전환됨으로 토양 유기물의 분해가 촉진되고, 토양에서 탄소 유실이 발생할 것으로 생각된다. 마찬가지로 작기에 실시하는 중간낙수 역시 일시적으로 토양 환경을 호기적으로 전환하는 만큼(Itoh et al., 2011; Ma and Lu, 2011), 토양 유기

물의 안정성에 영향이 있을 것으로 보이며, 이와 관련하여 작기 중 물관리가 휴경기의 유기물 분해에 미치는 영향에 대하여 추가적인 연구를 수행할 필요가 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 휴경기 논에서 탄소 유입 및 손실을 고려하는 탄소수지와 함께 온실가스 배출 특성을 구명하였다. 토양의 탄소수지는 NECB (net ecosystem carbon budget)법을 이용하여 구하였으며, 이를 바탕으로 순 지구온난화지수(net GWP, net global warming potential)를 산정하여 휴경기 온실가스 배출 특성에 대하여 나타내었다.

2. 재료 및 방법

2.1 시험포장 및 처리구

시험연구는 전북 완주군 이서면에 위치한 국립농업과학원 내에 있는 벼재배 포장(위도 $35^{\circ}49'144.0''\text{N}$, 경도 $127^{\circ}02'137.2''\text{E}$)에서 수행되었다. 시험 포장은 하절기 중 벼를 재배하고 수확을 끝낸 곳으로, 2019년에서 2020년까지 휴경기 논에서의 온실가스 배출량을 산정하였다. 추가적으로 벼 재배 시 메탄 저감을 위해 수행하는 중간낙수가 휴경기 중 온실가스 배출 특성에도 영향을 주는지 알아보고자, 벼 재배 중 상시담수를 실시한 처리구(CF-fallow)와 중간낙수 처리구(ID-fallow)를 각각 단반복으로 설치하여 메탄, 아산화질소, 이산화탄소의 배출량을 조사하였다. 작기 중 벼 재배 중간낙수는 벼 이앙 이후 상시담수를 유지하다가 이앙 후 30일부터 중간 낙수를 20일간 실시하고, 재담수를 하여 수확을 위한 낙수 이전까지 6cm 이상 수위를 유지하는 방식으로 논물을 관리하였다. 작기 중 중간낙수 실시 외에 동일하게 포장 관리를 하였으며, 비료는 농촌진흥청 작물별 시비처방기준(NAAS, 2010a)에 따라 $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$ 를 각각 $110\text{-}45\text{-}57\text{ kg ha}^{-1}$ 시비하였다.

시험포장의 토양은 양토(Loam)로, 각 처리구의 이화학적 특성은 Table 1에 나타낸 바와 같다. 시험 포장은 2019년 10월 18일에 벼를 수확한 이후 방치된 상태로 두다가 이듬해 4월 7일(DAH 172th)과 5월 7일(DAH 202th) 경운을 하고, 5월 22일(DAH 217th)부터 벼 이앙을 위한 담수를 시작하였다. 휴경기 기간은 총 216일로 2019년 10월 18일부터 2020년 5월 21까지 온실가스 배출 특성을 조사하였다.

Table 1. Chemical properties of rice paddy soil after harvesting

Treatment	pH (1:5, H ₂ O)	EC (dS m ⁻¹)	Av. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	OM (g kg ⁻¹)	TOC (g kg ⁻¹)	T-N (g kg ⁻¹)	Ex. Cation (cmolc kg ⁻¹)		
							K	Ca	Mg
CF-fallow	5.6	0.3	36	14.3	8.3	0.8	0.2	4.8	1.7
ID-fallow	5.9	0.2	32	14.0	8.1	0.8	0.2	4.9	1.8

2.2 가스 시료 채취 및 분석

폐쇄형 챔버법(Closed chamber method)을 이용하여 휴경기 중 논토양에서 배출되는 온실가스 시료를 채취하여 분석하였다. 이때, 챔버 내부에 발생하는 잡초를 주기적으로 제거하여 타가호흡(heterotrophic respiration)에 의해 변화하는 가스 배출량을 조사할 수 있도록 하였다(Gwon et al., 2019a; Haque et al., 2016; Rolston, 1986). 시료 채취는 주 1회 오전 10시에서 12시 사이에 실시하였으나, 동절기 중 온도가 낮아짐에 따라 전체적인 온실가스 배출량 및 변동 폭이 감소하는 것을 확인하고 12월부터 2월까지는 격주 단위로 시료를 채취하였다. 가스 시료 채취를 위하여 불투명한 재질의 원통형 챔버(D: 25 cm, H: 50 cm)를 각각의 처리구에 3반복으로 설치하였으며, 시료채취를 위해 챔버를 닫을 때를 제외하고는 항상 열린 상태를 유지하였다. 60 mL 주사기를 이용하여 밀폐한 챔버의 30분 전후로 각각 2번씩 시료를 채취하여 가스크로마토그래피(Agilent Technologies, 7890B, U.S.A., Detector-FID for CH₄, CO₂ and ECD for N₂O)를 이용해 온실가스 별로 정량분석하고, 식 (1), (2)를 활용하여 배출량을 산정하였다(Haque et al., 2016; Rolston, 1986).

$$F = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{273}{T} \quad (1)$$

여기서, F : CO₂ or CH₄ or N₂O flux (mg m⁻² h⁻¹)

ρ : gas density (mg L⁻¹)

V : volume of chamber (m³)

A : surface area of chamber (m²)

$\frac{\Delta c}{\Delta t}$: rate of increase of gas concentration
($\mu\text{L L}^{-1} \text{h}^{-1}$)

T : absolute temperature

(273 + mean temperature in chamber)

$$\text{Seasonal CO}_2 \text{ or CH}_4 \text{ or N}_2\text{O flux} = \sum_n^i (F_i \times D_i) \quad (2)$$

여기서, F_i : the rate of flux (g m⁻² d⁻¹)
in the i^{th} sampling interval

D_i : the number of days
in the i^{th} sampling interval (d)

n : the number of sampling intervals

2.3 NECB(net ecosystem carbon balance) 산정

토양으로의 탄소 유입과 유출량인 탄소수지값을 구하기 위하여 NECB (net ecosystem carbon balance)법을 활용하였으며, 식 (3)으로부터 NECB 값을 구하였다(Gwon et al., 2019a; Haque et al., 2016; Ma et al., 2013; Wu et al., 2018).

$$\text{NECB} = \text{NPP} - R_h - \text{CH}_4 \quad (3)$$

여기서, NPP = net primary production (kg C ha⁻¹)

R_h = heterotrophic respiration as seasonal CO₂ flux (kg C ha⁻¹)

CH₄ = seasonal CH₄ flux (kg C ha⁻¹)

이때, NPP는 순 1차 생산량인 식물체의 생체중으로서 본 연구에서는 휴경기 중 시험포장에 발생한 잡초의 생체중으로부터 구하였다. 시험 포장에 경운을 실시하기 전 단위면적 당 잡초의 지상부 및 지하부 생체량을 조사하고, 식물체 시료를 건조 및 분쇄하여 원소 분석기(Vario Max CN, Elementer anlysensystem, Germany)를 이용하여 탄소 함량을 분석한 다음, 단위면적 당 탄소 투입량으로 환산하여 NPP를 구하였다. R_h 는 토양 미생물 등에 의한 토양 호흡을 의미하며, 챔버법으로 조사한 이산화탄소 배출량을 단위면적당 탄소 배출량으로 환산하여 구하였다.

메탄(CH₄)은 메탄생성균에 의해 발생한 토양 탄소 소실량으로, 챔버법으로 조사한 메탄 배출량을 단위면적 당 탄소 배출량으로 환산하여 구하였다.

2.4 net GWP 산정

식 (4)에 나타난 바와 같이 휴경기 논에서 배출된 메탄과 아산화질소에 지구온난화지수(Global warming potential, GWP)인 25와 298을 각각 곱하여 이산화탄소로 환산하여 GWP 값을 구하였다(IPCC, 2007). 이때, 토양 호흡 등으로 인해 발생한 탄소 유출량은 NECB 값으로 감하여 net GWP 값을 산정하였다(Forster et al., 2007; Haque et al., 2015; Ma et al., 2013).

$$\begin{aligned} \text{net GWP (kgCO}_2\text{-eq.ha}^{-1}\text{)} \\ = 25 \times \text{CH}_4 + 298 \times \text{N}_2\text{O} - \text{NECB} \times \frac{44}{12} \end{aligned} \quad (4)$$

2.5 토양 및 기상상태 조사

농촌진흥청 토양화학분석법(NAAS, 2010b)에 준하여 공시토양을 분석하였다. 토양을 풍건 후 2 mm 체를 통과시킨 것을 이용해 실험에 사용하였다. 토양의 pH는 토양과 증류수를 1:5 (W/V)로 혼합하여 30분 간 교반한 뒤, pH meter (Orison 4 star, Thermo, Singapore)로 측정하였으며, EC는 교반용액을 여과 후(Whatman No. 2, Germany) EC meter (orison 4 star, Thermo, Singapore)를 이용하여 측정하였다. 유효인산은 Lancaster (NAAS, 2010b)법으로 침출하여 720 nm 파장에서 비색계(AU/CARY 300, Varian Australia)를 활용하여 분석하였다. 치환성 양이온은 1M ammonium acetate (pH 7.0) 용액으로 침출 후 여과하여 유도결합플라즈마분광기(Optima 7300DV, Perkin Elmer, USA)로 분석하였다. 토양 탄소 및 질소 함량은 CN analyzer (Vario Max CN, Elementar, Germany)로 분석하였다.

토양 온도 및 수분함량은 Trime®-Pico 32 sensor (Eijkelkamp, Germany)를 이용하여 온실가스 시료 채취와

함께 주기적으로 측정하였으며, 수분함량의 경우 식 (5)를 활용하여 토양공극수분함량(WFPS, water filled pore space)로 환산하여 나타내었다. 이를 위하여 추가적으로 토양의 용적밀도를 조사하였다(AI-Shammery et al., 2018). 기상 조건은 농업날씨 365(NAAS, 2020)에서 제공하는 기상측정값을 활용하여 조사기간의 대기온도 변화 및 강수량을 조사하였다.

$$\text{WFPS(\%)} = \frac{\text{SMC}}{\left[1 - \frac{\text{BD}}{\text{PD}}\right]} \quad (5)$$

여기서, SMC = soil moisture content (vol. %)
 BD = bulk density (g cm⁻³)
 PD = particle density (2.65 g cm⁻³)
 (Blake, 2008)

2.6 통계분석 방법

처리구 간 차이는 SPSS (IBM Statistics 25)를 이용하여 5% 유의수준에서 *t*-test를 통해 비교하였으며, 온실가스 배출에 영향을 미친 환경 인자들 간의 상관성을 알아보았다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기상, 토양 온도 및 WFPS 변화

벼 수확일 이후부터 일 평균 대기 및 토양 온도, 강수량 및 WFPS 변화를 Fig. 1(a)와 Fig. 1(b)에 각각 나타내었다. 조사기간 중 전체 평균 대기 및 토양 온도는 각각 8.4, 9.2°C 로, 계절적 변화에 따라 대기 및 토양 온도는 변동을 나타내었다. 수확 이후 120일까지(DAH 120th, 2월 초)까지 대기 및 토양 온도는 지속적으로 감소하였으며, 그 이후를 기점으로 점차 증가하는 경향을 나타내었다. 휴경기 중 총 333 mm의 강수가 있었으며, WFPS는 평균 60%으로 조사되었다. 강수량에 의해 WFPS가 증감하는 경향을 나타내었으며, 특히 연속적으로 잦은 강수가 있었던 수확일 이후 127일부터 143일까지는 WFPS가 79~97%까지 크게 상승하는 것이 확인되었다.

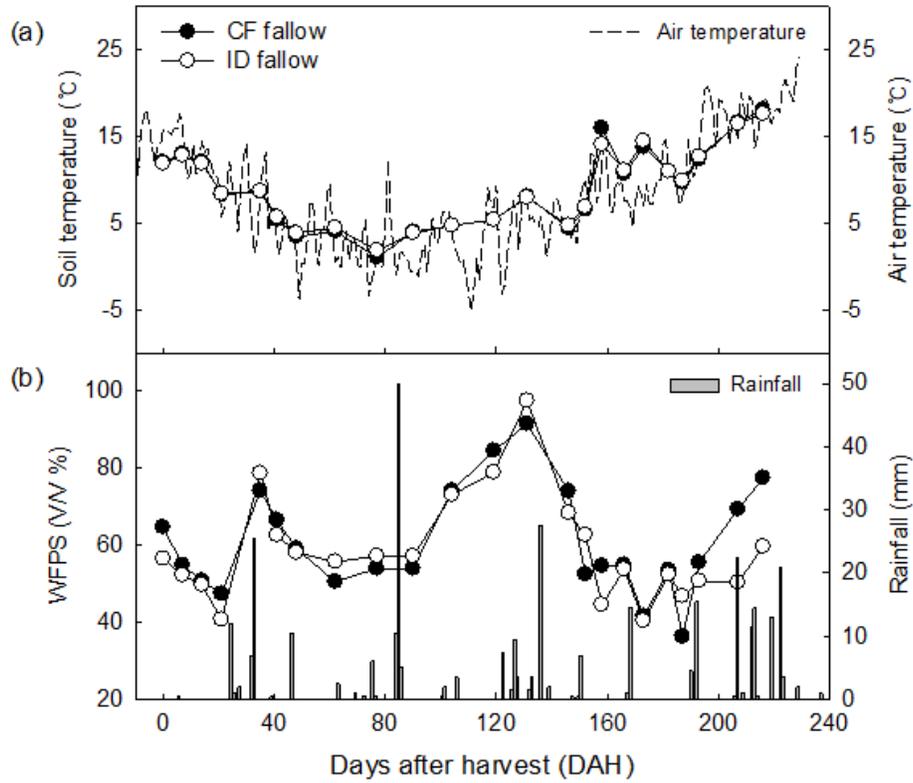


Fig. 1. (a) Changes in soil and air temperature and (b) WFPS and rainfall during fallow season

3.2 온실가스 배출 변화

3.2.1 메탄 배출 특성

휴경기 메탄 배출량 변화는 Fig. 2와 같다. 평균 메탄 배출량은 CF-fallow에서 $0.6 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, ID-fallow에서 $0.5 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 나타났으며, 총 메탄 배출량은 CF-Fallow에서 1.2 kg ha^{-1} , ID-fallow에서 0.9 kg ha^{-1} 로 확인되었다 (Table 2). ID-fallow 처리구에서 다소 낮게 나타났으나, 처리구 간에 유의적인 차이는 없었다. 두 처리구에서 비슷한 경향으로 메탄 배출량이 증감하였으며, 메탄 배출량 변화는 토양 온도 및 수분과 유의적인 상관성은 나타나지 않았다. 본 연구 결과를 선행연구에서 조사한 작기 중 총 메탄 배출량($208 \sim 435 \text{ kg ha}^{-1}$)과 비교한다면(Gwon et al., 2019b) 휴경기에는 메탄이 거의 배출되지 않는 것을 확인할 수 있었

다. 이는 비답수 상태의 논토양에서는 토양 내 기체의 확산이 용이하여, 토양 내 산소 유효도가 증가하는 등 토양이 호기적 상태로 유지되기 때문으로 판단된다. 호기적 상태에서는 메탄 생성균의 활성이 감소하고 메탄 산화균의 활성이 증가하는데(Ma and Lu, 2011), 본 연구에서도 작기와 비교하여 휴경기에는 메탄 배출이 거의 없던 것으로 보인다. 또한 일 메탄 배출량은 때때로 음의 값을 나타내었는데, 이는 메탄 생성균이 환원 상태 하에서 토양 유기물을 분해하면서 메탄을 배출하나(Garcia et al., 2000; Takai and Kamura, 1966), 휴경기 논은 벼 수확 이후 대부분 비 답수 상태로 메탄 산화균에 의해 대기 중 메탄이 기질로 활용되어 음의 값이 나타난 것으로 보인다(Gwon et al., 2019a; Le Mer and Roger, 2001).

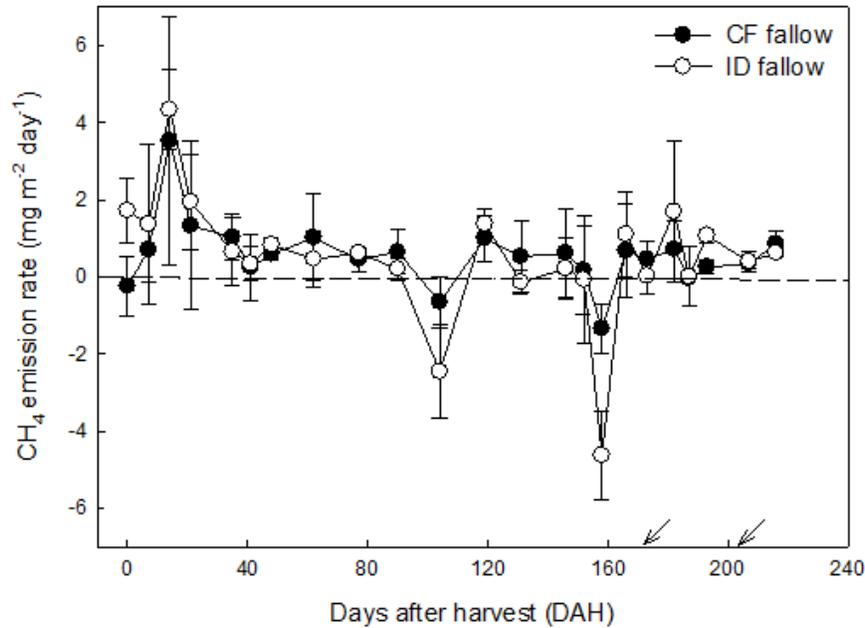


Fig. 2. Changes in CH₄ emission rate during fallow season (✓ means tillage)

Table 2. N₂O, CH₄, and CO₂ fluxes during fallow season

Treatment	Mean emission rate (mg m ⁻² day ⁻¹)			Seasonal flux (kg ha ⁻¹)		
	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂
CF-fallow	0.6 ^a	2.1 ^a	2610 ^a	1.2 ^a	3.8 ^a	5152 ^a
ID-fallow	0.5 ^a	1.7 ^a	2168 ^b	0.9 ^a	3.3 ^a	4527 ^b

Note. Different letters within the same column indicate significant differences between treatments at $p < 0.05$ level according to *t*-test.

3.2.2 아산화질소 배출 특성

휴경기 중 아산화질소 배출량 변화는 Fig. 3과 같다. 평균 아산화질소 배출량은 CF-fallow에서 2.1 mg m⁻² day⁻¹, ID-fallow에서 1.7 mg m⁻² day⁻¹로 나타났으며, 휴경기 총 아산화질소 배출량은 CF-fallow에서 3.8 kg ha⁻¹, ID-fallow에서 3.3 kg ha⁻¹로 확인되었다(Table 2). 아산화질소 배출은 ID-fallow 처리구에서 다소 낮게 나타났으나, 처리구 간에 유의적인 차이는 없었다. 두 처리구에서 모두 비슷한 경향으로 아산화질소 배출량이 증감하였으며, 이는 상시 담수 및 중간낙수를 실시하는 작기와 달리 휴경기 중에는 두 처리구 모두 동일한 밭 토양 환경 하에 관리되기 때문

으로 보인다. 이와 관련하여 계절적 변화에 따라 증가한 토양 온도 역시 아산화질소 배출 변화에 일부 영향을 끼쳤을 것으로 생각된다(부록 Fig. S1). 특히 토양 온도가 5°C 이하로 내려간 DAH 40th~146th에는 아산화질소 배출에 영향을 끼치는 토양 수분함량(WFPS) 등의 변화와 무관하게 아산화질소 배출의 평균 농도가 CF-fallow에서 0.37 mg m⁻² day⁻¹, ID-fallow에서 0.38 mg m⁻² day⁻¹로 나타나 저온에서 아산화질소가 거의 배출되지 않는 것을 확인할 수 있었다. 토양 온도가 5°C 이상인 조건에서, 1차 경운을 실시한(DAH 172th) 날을 기점으로 모든 처리구에서 아산화질소 평균 배출량이 6.9~8.5 mg m⁻² day⁻¹까지 증

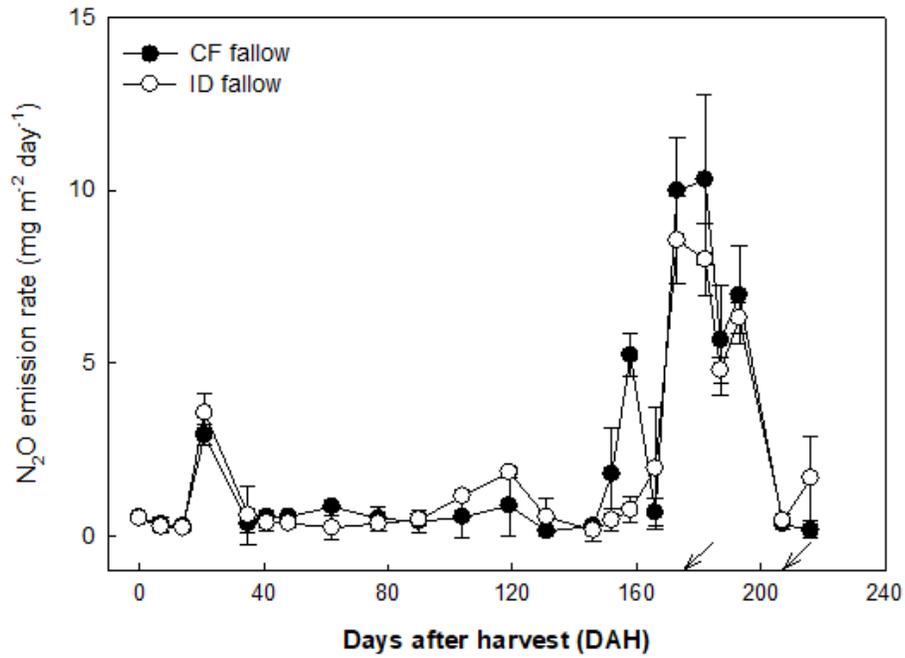


Fig. 3. Changes in N₂O emission rate during fallow season (✓ means tillage)

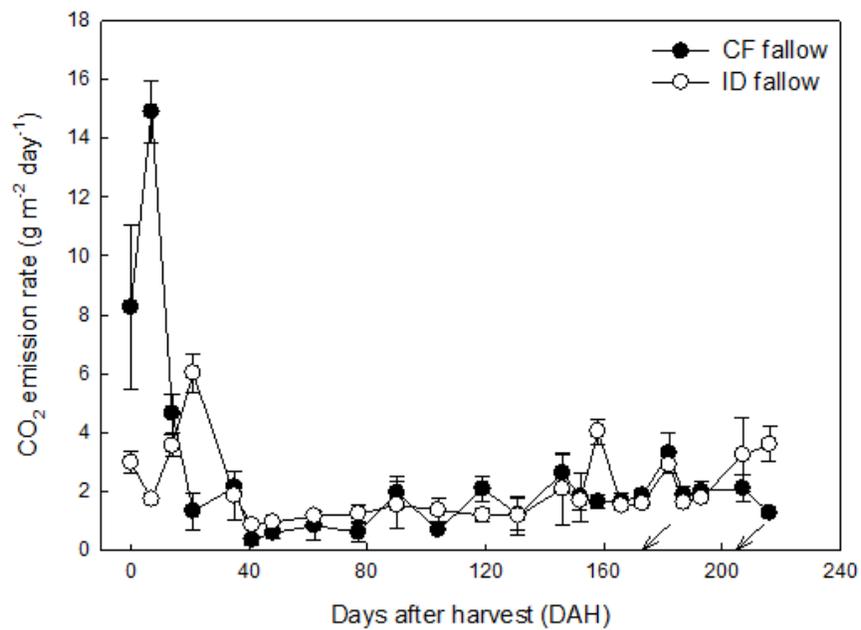


Fig. 4. Changes in CO₂ emission rate during fallow season (✓ means tillage)

가하였다. 일반적으로 아산화질소가 발생하는 질산화(nitrification)에는 산소(O_2)가 필요하다고 알려져 있으며 (Zhu et al., 2013), 이와 관련하여 경운에 의한 토양 내 산소공급 효과(Khan, 1996)에 의해 아산화질소 배출이 일시적으로 증가한 것으로 보인다. 그러나 수확 이후 약 200일을 기점으로 2차 경운(DAH 202th)을 실시하였음에도 불구하고 아산화질소 배출량이 급감하는 것이 관찰되었으며, 이는 잦은 강수로 인해 토양 수분이 증가한 영향으로 생각된다. 선행연구에 따르면 질산화과정에서 발생하는 아산화질소는 WFPS가 55~65%일 때 가장 크게 배출된다(Bouwman, 1998). 그러나 WFPS가 60~70% 범위 이상으로 증가하게 되면 토양 중 산소 확산이 저해되어 질산화과정에서 발생하는 아산화질소의 배출이 억제될 수 있다(Schjønning et al., 2003; Skopp et al., 1990). 본 연구에서는 1차 경운 직후(DAH 172th) WFPS는 평균 50% 수준일 때, 아산화질소 배출은 $6.9 \sim 8.5 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 나타났다. 반면, 2차 경운 직후(DAH 202th) WFPS는 평균 64% 수준으로, 아산화질소 배출은 $0.3 \sim 1.1 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 동일한 경운 직후임에도 수분함량의 차이에 따라 아산화질소 배출에 있어서 큰 차이가 나타났다. 이와 관련하여 휴경기 중 WFPS가 40~60%일 때의 평균 아산화질소 배출량은 $2.7 \sim 3.4 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로, 조사기간 중 전체 아산화질소의 평균 배출량과 비교하여 약 45~63% 높았다(Table 2). 반면, WFPS가 60% 이상일 때의 평균 아산화질소 배출량은 $0.4 \sim 0.5 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 전체 아산화질소의 평균 배출량과 비교하여 약 59~82% 적었다. 그 결과 조사기간 중 토양의 수분함량이 증가할수록 아산화질소 배출이 유의적으로 감소하는 경향을 확인할 수 있었다(부록 Fig. S2).

3.2.3 이산화탄소 배출 특성

휴경기 중 이산화탄소 배출량 변화는 Fig. 4와 같다. 평균 이산화탄소 배출량은 CF-fallow에서 $2.6 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, ID-fallow에서 $2.2 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 나타났다(Table 2). 휴경기 총 이산화탄소 배출량은 CF-fallow에서 5152 kg ha^{-1} , ID-fallow에서 4527 kg ha^{-1} 로 확인되었다(Table 2). ID-fallow 처리구와 비교하여 CF-fallow 처리구에서의 이산화탄소 배출량이 유의적으로 14% 가량 많았다. 이는 벼 수확 이후에 초기 이산화탄소 배출량이 CF-fallow 처리구에서 더 높았기 때문으로 판단된다. 선행 연구에 따르면 담수로 인해 혐기적 환경이 조성되면 유기물 분해 속도가 느려지며, 그 결과 토양 유기물 함량이 증진될 수 있다 (Chen et al., 2018; Sahrawat,

2004). 그러나 담수 환경이 호기적으로 전환되면 전반적인 미생물 활성이 증가하면서 토양 유기물 분해 및 이산화탄소 배출량이 증가될 수 있다(Haque et al., 2016). 본 연구에서도 작기 중 실시한 담수로 인하여 혐기적인 환경의 논토양에서 분해가 되지 않은 토양 유기물이 휴경기에는 호기적 환경으로 전환되면서 분해가 촉진되어 초반의 이산화탄소 배출량에 차이가 나타난 것으로 추정된다. 그러나 전체적인 이산화탄소 배출 경향은 두 처리구에서 모두 비슷하게 증가하였다. 이산화탄소 배출량은 휴경기 초반(DAH 40th 이내)에 가장 높은 농도가 관측되었으며 ($6.1 \sim 15.0 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), 이후 점차 감소하다가 수확 이후 120일(DAH 120th)을 전후로 다소 증가하였다. 이는 토양 온도 변화와 유사한 경향으로, 온도가 증가할수록 이산화탄소 배출 또한 유의적으로 증가하는 경향을 확인할 수 있었다(부록 Fig. S1). 선행연구에서 알려진 바와 같이 토양 온도가 증가함에 따라 토양 미생물의 활성 및 호흡이 증가하며, 그 결과 이산화탄소 배출량 역시 증가한 것으로 보인다(Andersson and Nilsson, 2001; Lopes de Gerenyu et al., 2005).

3.3 NECB 및 net GWP

CF-fallow와 ID-fallow 처리구에서 모두 독새플(*Alopecurus aequalis*)이 휴경기 논에 우점적으로 자랐다. 식물체의 지상부 탄소함량은 40.2%, 지하부 탄소함량은 38.6%로, 식물체 생체량과 탄소함량으로부터 구한 NPP 값을 Table 3에 나타내었다.

휴경기 중 NPP를 제외하고 추가적인 탄소 유입원은 없었으며, 그 결과 탄소 수지 값인 NECB는 CF-fallow와 ID-fallow 처리구에서 각각 $-1060 \text{ kg C ha}^{-1}$, $-934 \text{ kg C ha}^{-1}$ 으로 음의 값을 확인할 수 있었다. 이는 토양 호흡($CO_2 + CH_4$)으로 배출되는 탄소 유출량이 NPP 값보다 더 크기 때문으로, 선행연구에서도 나타난 바와 같이 휴경기 중 논에서 탄소 유출이 일어나는 것이 확인되었다(Gwon et al., 2019a). 식 (4)를 활용하여 산정한 net GWP 값은 CF-fallow 처리구에서 $5062 \text{ kg CO}_2\text{-eq. ha}^{-1}$, ID-fallow 처리구에서 $4433 \text{ kg CO}_2\text{-eq. ha}^{-1}$ 으로 확인되었다(부록 Table S1). 산정된 net GWP 값의 약 77%는 NECB 값에 영향을 받으며, 약 22~23%는 아산화질소 배출에 의해 영향을 받는 것이 확인되었다. 반면 메탄이 net GWP에서 차지하는 비율은 1% 미만으로, 휴경기 중 온실가스 배출에는 거의 영향을 주지 않는 것이 확인되었다. 이는 휴경기 중 온실

Table 3. Seasonal organic carbon input and output during fallow season

Treatment	Carbon input (kg C ha ⁻¹) [A]			Carbon output (kg C ha ⁻¹) [B]			NECB (kg C ha ⁻¹)
	Aboveground	Belowground	Sum	CH ₄	CO ₂	Sum	[A-B]
CF-fallow	270	76	346	0.9	1405	1406	-1060
ID-fallow	235	66	301	0.7	1235	1235	-934

가스 배출에는 메탄보다는 아산화질소 및 토양호흡으로 유출되는 탄소가 더 중요한 부분임을 의미한다. 따라서 휴경기 중 온실가스 배출량을 효율적으로 감축하기 위해서는 NECB 값을 증진할 필요가 있을 것으로 판단된다. 이와 관련하여 휴경기 논에서 풋거름 작물을 재배 및 환원하는 방법을 통해 토양 탄소 투입량을 증진하고 (Steenwerth and Belina, 2008) net GWP 값을 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 토양에 유기물을 투입하면 작기 중 메탄 배출량이 증가할 수 있다는 점에서 풋거름 작물의 종류 및 시용 방법 등에 대한 추가적인 연구 및 평가가 함께 수행되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

휴경기 중 총 메탄 및 아산화질소 배출량은 처리구 간에 유의적인 차이가 없었으나, 이산화탄소 배출량은 작기에 상시답수를 실시한 CF-fallow에서 ID-fallow보다 14% 가량 많았다. 그 결과 NECB는 CF-fallow와 ID-fallow 처리구에서 각각 -1060 kg C ha⁻¹, -934 kg C ha⁻¹으로 CF-fallow에서 더 큰 탄소 유실이 일어나는 것이 확인되었다. 휴경기 중 net GWP 값은 CF-fallow 처리구에서 5062 kg CO₂-eq. ha⁻¹, ID-fallow 처리구에서 4433 kg CO₂-eq. ha⁻¹으로 작기 중 상시답수를 실시한 처리구에서 휴경기에 더 큰 온실가스 배출이 나타나는 것으로 확인되었다. 산정된 net GWP 값의 약 77%는 NECB 값의 영향을 받았으며, 그 다음으로는 약 22~23%가 아산화질소 배출의 영향을 받았다. 반면에, 메탄은 net GWP의 1% 미만으로 휴경기 중 온실가스 배출에는 거의 영향을 주지 않았다. 이는 작기 중 메탄이 주요 배출 온실가스인 작기와 다른 휴경기의 온실가스 배출 특성으로, 국내 온실가스 배출량 산정에 반영하기 위하여 다양한 지역에서 추가적인 연구를 수행할 필요가 있어 보인다. 동시에 휴경기 논에서 효율적인 온실가스 배출량 감축을 위해 토양 유기

물 관리를 중점으로 전략을 수립, 적용 가능성에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

사사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구 개발사업(PJ012614012020) 지원에 의해 이루어진 것임.

References

- Al-Shammary AAG, Kouzani AZ, Kaynak A, Khoo SY, Norton M, Gates W. 2018. Soil bulk density estimation methods: A review. *Pedosphere*. 28(4):581-596.
- Andersson S, Nilsson SI. 2001. Influence of pH and temperature on microbial activity, substrate availability of soil-solution bacteria and leaching of dissolved organic carbon in a mor humus. *Soil Biol Biochem*. 33(9):1181-1191.
- Blake GR. 2008. Particle density. In: Chesworth W, editor. *Encyclopedia of soil science*. Dordrecht: Springer Netherlands. p. 504-505.
- Bouwman AF. 1998. Nitrogen oxides and tropical agriculture. *Nature*. 392(6679):866-867.
- Chen X, Xu Y, Gao H-j, Mao J, Chu W, Thompson ML. 2018. Biochemical stabilization of soil organic matter in straw-amended, anaerobic and aerobic soils. *Sci Total Environ*. 625:1065-1073.
- Choi SW, Kim J, Kang MS, Lee SH, Kang NG, Shim KM. 2018. Estimation and mapping of methane emissions from rice paddies in Korea: Analysis

- of regional differences and characteristics (in Korean with English abstract). *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*. 20(1):88-100.
- Delgado JA, Follett RF. 2002. Carbon and nutrient cycles. *J Soil Water Conserv*. 57(6):455.
- Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, Bernsten T, Betts R, Fahey DW, Haywood J, Lean J, Lowe DC, Myhre G et al. 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing chapter 2. United Kingdom: Cambridge University Press.
- Garcia J-L, Patel BKC, Ollivier B. 2000. Taxonomic, phylogenetic, and ecological diversity of methanogenic archaea. *Anaerobe*. 6(4):205-226.
- GIR. 2019. National inventory report in korea. Greenhouse gas inventory and research center of korea Seoul, Korea.
- Gwon HS, Khan MI, Yoon YE, Lee YB, Kim PJ, Hwang HY. 2019a. Unexpected higher decomposition of soil organic matter during cold fallow season in temperate rice paddy. *Soil Tillage Res*. 192:250-257.
- Gwon HS, Kim GY, Choi EJ, Lee SI, Lee JS. 2019b. Evaluation of greenhouse gas emission characteristics and intensity by management of water and nutrients in rice paddy soil during cropping season (in Korean with English abstract). *J Climate Change Res*. 10(4):351-359.
- Haque MM, Kim GW, Kim PJ, Kim SY. 2016. Comparison of net global warming potential between continuous flooding and midseason drainage in monsoon region paddy during rice cropping. *Field Crops Res*. 193:133-142.
- Haque MM, Kim SY, Ali MA, Kim PJ. 2015. Contribution of greenhouse gas emissions during cropping and fallow seasons on total global warming potential in mono-rice paddy soils. *Plant Soil*. 387(1):251-264.
- IPCC. 2007. Technical summary. In: *Climate change: The physical science basis. Contribution of working group I to the forth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press.
- Itoh M, Sudo S, Mori S, Saito H, Yoshida T, Shiratori Y, Suga S, Yoshikawa N, Suzue Y, Mizukami H et al. 2011. Mitigation of methane emissions from paddy fields by prolonging midseason drainage. *Agric Ecosyst Environ*. 141(3):359-372.
- Khan AR. 1996. Influence of tillage on soil aeration. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 177(4):253-259.
- Kim GY, Jeong HC, Ju OJ, Kim HK, Park JH, Gwon HS, Kim PJ. 2013. Establishment of baseline emission factor of methane in korean rice paddy soil. *Korean J Environ Agric*. 32(4):359-365.
- Lal R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*. 304(5677):1623.
- Le Mer J, Roger P. 2001. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *Eur J Soil Biol*. 37(1):25-50.
- Liang W, Shi Y, Zhang H, Yue J, Huang GH. 2007. Greenhouse gas emissions from northeast china rice fields in fallow season. *Pedosphere*. 17(5):630-638.
- Lopes de Gerenyu V, Kurganova I, Rozanova L, Kudeyarov V. 2005. Effect of soil temperature and moisture on co2 evolution rate of cultivated phaeozem: Analysis of a long-term field experiment. *Plant Soil Environ*. 51.
- Ma K, Lu Y. 2011. Regulation of microbial methane production and oxidation by intermittent drainage in rice field soil. *FEMS Microbiol Ecol*. 75(3):446-456.
- Ma YC, Kong XW, Yang B, Zhang XL, Yan XY, Yang JC, Xiong ZQ. 2013. Net global warming potential and greenhouse gas intensity of annual rice-wheat rotations with integrated soil-crop system management. *Agric Ecosyst Environ*. 164:209-219.
- Martínez-Eixarch M, Alcaraz C, Viñas M, Noguerol J, Aranda X, Prenafeta-Boldú FX, Saldaña-De la Vega JA, Català MDM, Ibáñez C. 2018. Neglecting the fallow season can significantly underestimate annual methane emissions in mediterranean rice fields. *PLoS*

- One. 13(5):e0198081-e0198081.
- NAASa. 2010. Fertilizer application recommendations for crop plants. National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon, Korea.
- NAASb. 2010. Method of soil and plant analysis. National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon, Korea.
- NAAS. Agricultural weather information service 365. 2020. [accessed 2020 Aug 30]. <http://weather.rda.go.kr>.
- Rolston. 1986. Gas flux. Methods of soil analysis. Soil Sci Soc Am J. p. 1103-1119.
- Sahrawat KL. 2004. Organic matter accumulation in submerged soils. Advances in agronomy. FAO of the UN. p. 169-201.
- Sander BO, Samson M, Sanchez PB, Valencia KP, Demafelix EAM, Buresh RJ. 2018. Contribution of fallow periods between rice crops to seasonal ghg emissions: Effect of water and tillage management. Soil Sci Plant Nutr. 64(2):200-209.
- Schjønning P, Thomsen IK, Moldrup P, Christensen BT. 2003. Linking soil microbial activity to water- and air-phase contents and diffusivities. Soil Sci Soc Am J. 67(1):156-165.
- Skopp J, Jawson MD, Doran JW. 1990. Steady-state aerobic microbial activity as a function of soil water content. Soil Sci Soc Am J. 54(6):1619-1625.
- Statistics korea. Annual report on the area of arable land statistics. 2020. [accessed 2020 Aug 30]. <http://www.kosis.kr/>.
- Steenwerth K, Belina KM. 2008. Cover crops enhance soil organic matter, carbon dynamics and microbiological function in a vineyard agroecosystem. Appl Soil Ecol. 40(2):359-369.
- Takai Y, Kamura T. 1966. The mechanism of reduction in waterlogged paddy soil. Folia Microbiol. 11(4):304-313.
- Wu X, Wang W, Xie X, Yin C, Hou H, Yan W, Wang G. 2018. Net global warming potential and greenhouse gas intensity as affected by different water management strategies in chinese double rice-cropping systems. Scientific Reports. 8(1):779.
- Zhu X, Burger M, Doane TA, Horwath WR. 2013. Ammonia oxidation pathways and nitrifier denitrification are significant sources of n₂o and no under low oxygen availability. Proc Natl Acad Sci U S A. 110(16):6328-6333.

부록

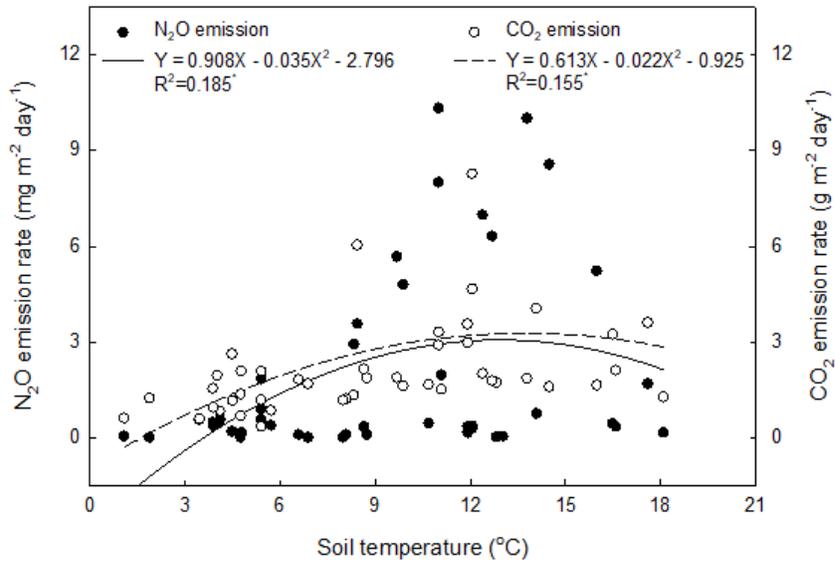


Fig. S1. Relationship between soil temperature and gas emissions (N₂O and CO₂) during fallow season in rice paddy

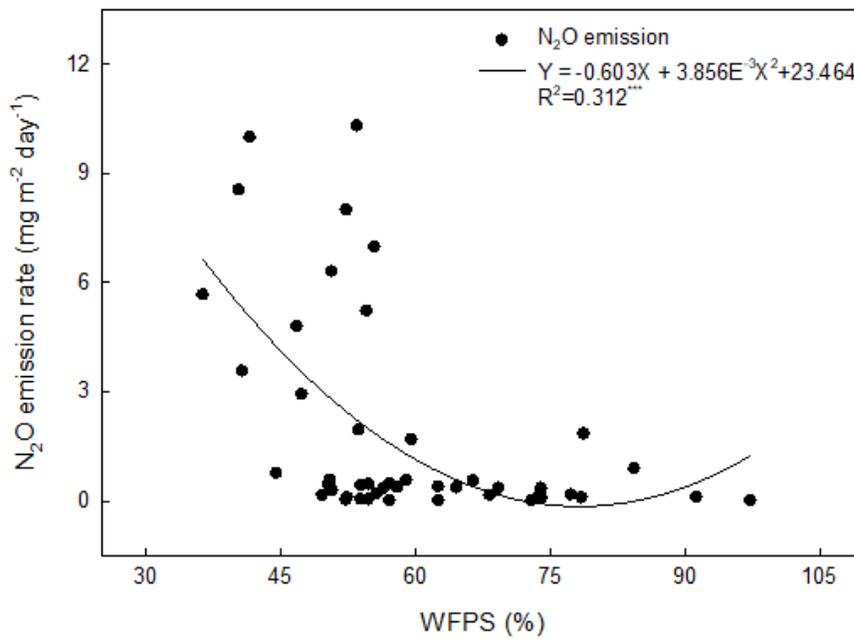


Fig. S2. Relationship between WFPS and N₂O emissions during fallow season in rice paddy

Table S1. Estimation of net GWP during fallow season

Treatment	GWP (kg CO ₂ -eq. ha ⁻¹) [A]			NECB (kg CO ₂ -eq. ha ⁻¹) [B]	Net GWP (kg CO ₂ -eq. ha ⁻¹) [A-B]
	CH ₄	N ₂ O	Sum		
CF-fallow	31	1144	1175	-3887	5062
ID-fallow	23	984	1007	-3426	4433