

휴경기간 녹비재배 농경지 토양에서 아산화질소 및 이산화탄소 배출특성

이선일* · 김건엽 · 최은정 · 이종식 · 정현철

국립농업과학원

(2018년 10월 10일 접수; 2018년 12월 7일 수정; 2018년 12월 12일 수락)

Nitrous oxide and carbon dioxide efflux of cropland soil during fallow season

Sun-II Lee*, Gun-Yeob Kim, Eun-Jung Choi, Jong-Sik Lee and Hyun-Cheol Jeong

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

(Received October 10, 2018; Revised December 7, 2018; Accepted December 12, 2018)

ABSTRACT

Cropland is sources of atmospheric nitrous oxide (N₂O) and carbon dioxide (CO₂). However, the contribution of the fallow season to emission of these gases has rarely been determined. In this study, a field experiment encompassing three treatments was conducted to determine efflux of N₂O and CO₂ in cropland during fallow season. The treatments were hairy vetch (H.V.), rye and control (Con.). The H.V. and rye were sown in middle October and early November, respectively. The soil N₂O efflux among all three treatments in the fallow season (November–April) were 0.014–2.956 mg N₂O m⁻² · d⁻¹. The cumulative N₂O emissions were 104.4 mg N₂O m⁻² for Con., 85.8 mg N₂O m⁻² for H.V. and 85.0 mg N₂O m⁻² for Rye during the fallow season. The highest N₂O emissions occurred in Con., while H.V. and Rye emissions were similar. Cumulative CO₂ emissions were 293.1 g CO₂ m⁻² for Con., 242.2 g CO₂ m⁻² for H.V., 275.2 g CO₂ m⁻² for Rye during fallow season. This study showed that soil N₂O and CO₂ average daily emission during fallow season were 28.3% and 27.4%, respectively of the growing season. Our results indicate that CO₂ and N₂O emissions from agricultural systems continue throughout the fallow season.

Key words: Carbon Dioxide, Cropland, Fallow Season, Nitrous Oxide

I. 서 론

전 지구적으로 대기 중의 아산화질소(N₂O)와 이산화탄소(CO₂) 농도는 인간의 활동에 의해 급격히 증가하였다. N₂O 농도는 산업화 이전보다 약 18% 증가한 319 ppb로 질소를 함유한 비료 사용 등 인간 활동에 의한 영향으로 증가되었고 CO₂ 농도는 391 ppm으로

화석연료 사용증가 등의 영향을 받아 산업화 이후 약 40%가 증가하였다(IPCC, 2014).

우리나라 농경지 토양에서 발생하는 온실가스는 밭 토양의 경우 산소공급이 충분한 호기적인 조건에서 N₂O와 CO₂가 주로 발생하고, 논 토양의 경우 담수되면 산소공급이 제한되어 혐기적인 조건이므로 메탄(CH₄)이 주로 발생한다. 따라서, 본 연구는 휴경기 녹



* Corresponding Author : Sun-II Lee
(silee83@korea.kr)

비를 재배한 밭 토양에서 온실가스 배출량 비교를 함으로 휴경기간 동안 농경지 토양에서 배출되는 N_2O 와 CO_2 에 대해 정량분석을 진행하였다.

농경지 토양에서 N_2O 배출은 주로 질소가 포함된 비료를 투입하였을 때 토양 내 미생물에 의해 질산화 과정과 탈질 과정을 일으키는 동안 발생된다(Freney, 1997; Singh and Tyagi, 2009). 질산화 과정은 비료에 포함되어 있는 암모늄태 질소가 호기적인 조건에서 질산으로 산화되는 반응이며, 탈질 과정은 질산이 혐기 조건에서 질소가스(N_2)로 환원되는 반응이다. CO_2 는 주로 토양 내 미생물이 유기물을 분해하는 과정과 호흡과정을 통해 주로 배출된다. 즉 농경지 토양에서 발생하는 N_2O 및 CO_2 는 투입되는 비료량, 토양 유기물 함량, 토양 산도, 토성, 재배작물, 양분원의 종류 등에 영향을 받아 배출된다(Stehfest, 2008).

현재까지 농경지에서 작물 종류, 시비방법, 재배지 토양의 이화학적 특성에 따른 온실가스 발생에 미치는 영향을 구명하는 연구 등 다양한 연구결과가 보고되었다. 국가 온실가스 인벤토리를 작성하기 위해 질소비료 사용량에 따른 N_2O 배출특성을 3년간 조사하여 국가 고유 배출계수로 등록한 연구결과(Kim *et al.*, 2016)와 농경지 토양에서 배출되는 온실가스를 줄이기 위해 바이오차 등을 농경지에 적용하여 N_2O 배출을 저감하는 연구 등이(Lee *et al.*, 2017) 있었다.

농경지 토양에서 발생하는 온실가스는 주로 비료 투입 후 질소순환 과정과 토양내 미생물 활동에 의해 배출되기 때문에 미생물 활성이 높은 작물 재배시기에 집중되어 있었다. 하지만 농경지에 단일작물을 재배할 경우 대부분 5~6개월간 재배하며, 비경작 기간이 오히려 6~7개월로 더 긴 경우도 있다. 그에따라 최근 몇 년간 비경작 시기에 농경지 토양에서 배출되는 온실가스의 연구 결과가 발표되고 있다. 비경작기 토양 온도가 $5^{\circ}C$ 에서 $-15^{\circ}C$ 로 낮아지는 동결기와 $-15^{\circ}C$ 에서 $5^{\circ}C$ 로 높아지는 해동기에서 각각 CO_2 와 N_2O 배출량을 평가하였을 때 토양온도가 $0^{\circ}C$ 이상 높아지는 해동기에 토양 수분 증가와 미생물 활성이 회복되어 CO_2 와 N_2O 배출되었던 연구(Phillips *et al.*, 2012), 그외 기후, 토성, 토양관리 방법, 비료투입 종류에 따른 비 경작기 온실가스 배출량에 미치는 영향을 연구한 연구들이 있었다(Zimov *et al.*, 1993; Oquist *et al.*, 2004; Teepe *et al.*, 2000; Maljanen *et al.*, 2007; Maljanen *et al.*, 2010; Miao *et al.*, 2014). 하지만 낮은 온도에 따른 가스 확산이 활발하지 않는 등 비경작기

온실가스 배출 특성은 아직 명확하게 구명되고 있지 않고 있다(Maljanen *et al.*, 2007).

따라서 비경작 시기에 배출되는 N_2O 및 CO_2 배출 특성에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 그리고 우리나라는 화학비료 사용량을 줄이기 위해 휴경기간 동안 녹비 피복작물을 재배하는 것을 적극 권장하고 있으며, 녹비작물을 재배함으로써 온실가스 저감 효과가 있는 것으로 보고되고 있다(Karlen *et al.*, 2009). 그러므로 본 연구는 휴경기간 동안 밭에서 녹비피복작물로서 헤어리베치(H.V.)와 호밀(Rye)을 재배할 경우 토양에서 발생하는 N_2O 와 CO_2 의 배출 특성을 비교 검토하였다.

II. 재료 및 방법

1. 시험 토양 및 위치

본 연구는 휴경기간 동안 동계피복작물 재배하고 토양에서 N_2O 와 CO_2 의 배출 특성을 조사하기 위하여 전라북도 완주군 이서면에 위치한 국립농업과학원 시험포장(위도: $35^{\circ}82'N$, 경도: $127^{\circ}04'E$)에서 수행하였다. 밭 포장의 토성은 사양질이며 화학적 특성은 Table 1과 같다. 동계피복작물을 재배하기 전 콩을 재배하였고, 토양의 화학적 특성은 토양산도(Soil acidity) 7.2, 전기전도도(Electrical Conductivity) $0.16 dS/m$, 총 탄소(Total Carbon) $9.03 g kg^{-1}$, 총 질소(Total Nitrogen) $4.14 g kg^{-1}$, 유효인산(Available P_2O_5) $13.7 mg kg^{-1}$, 치환성 칼륨(Exchangeable K) $0.26 cmol_c kg^{-1}$, 치환성 칼슘(Exchangeable Ca) $2.87 cmol_c kg^{-1}$, 치환성 마그네슘(Exchangeable Mg) $1.08 cmol_c kg^{-1}$ 로 나타났다 (Table 1).

토양분석은 토양 화학분석법(NIAS, 2000)에 준하여 토양산도는 토양을 증류수와 $1:5(W V^{-1})$ 로 혼합한 후 30분간 교반하여 pH meter (Orion 4 star, Thermo, Singapore)로 측정하였고, 총 탄소는와 질소는 CN analyzer (Vario Max CN, Elementar, Germany)로 분석하였다. 유효인산은 Lancaster법으로 720 nm 파장에서 비색계(AU/CARY 300, Varian, Australia)로 분석하였다. 치환성 양이온은 $1 M NH_4OAc$ (pH 7.0) 침출하여 유도결합플라즈마 분광계(ICP-OES, GBC scientific, USA)로 분석하였다.

시험기간 중 토양의 온도 측정을 위해 센서 (External sensor, Spectrum, British)를 경작지의 유효토심인 토양 내 10 cm 깊이에 설치하였고 토양 수

Table 1. Chemical properties of the studied soil before treatment

| Acidity | EC | T-C | T-N | Av.P ₂ O ₅ | Exchangeable cation (cmol _c kg ⁻¹) | | |
|------------|-------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|--|-------------|-------------|
| pH | (dS/m) | (g kg ⁻¹) | (g kg ⁻¹) | (mg kg ⁻¹) | K | Ca | Mg |
| 7.2 (0.1)* | 0.16 (0.02) | 9.03 (2.41) | 4.14 (0.11) | 13.7 (1.4) | 0.26 (0.04) | 2.87 (0.17) | 1.08 (0.09) |

Note) * The values in parentheses mean their standard errors. The number of samples is 6.

분함량은 센서(SM100, Spectrum, British)도 토양 내 10 cm 깊이에 수평으로 꽂아 실시간으로 측정하였으며, 각각 측정치는 데이터로거에 30분 단위로 기록 되도록 하였다. 강수량 및 대기평균 온도는 시험포장 인근에 위치한 기상관측망(위도: 35°82'N, 경도: 127°04'E)에서 측정하여 제공하는 농촌진흥청 농업기상정보서비스(weather.rda.go.kr)의 일별 기상자료를 활용하였다. 온실가스 측정용 챔버를 설치한 2017년 11월 16일부터 2018년 5월 2일까지 대기 평균온도와 총 강수량은 각각 4.3°C, 320 mm 이었다(Fig. 1). 기상청(www.kma.go.kr)의 30년 평년자료와 비교하면 평균기온은 2017년 11월부터 2018년 2월까지 1.2~2.0°C 낮았으며, 2018년 3월은 2.3°C 높았고, 4월 이후부터 약 0.5°C 내외의 높은 값을 보였다.

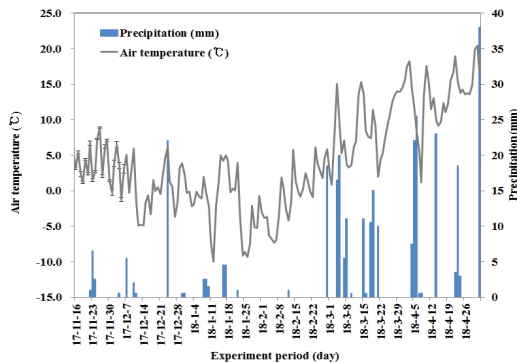


Fig. 1. Daily precipitation (mm) and daily average air temperature (°C) throughout the experimental period.

2. 시험구 처리

시험구 처리는 콩을 수확한 후 휴경기간동안 동계 피복작물로서 H.V.와 Rye을 각각 2017년 10월 16일, 11월 1일에 재식거리 70 × 20 cm으로 파종하였다. 비료 등 양분을 공급하지 않았으며, 2018년 5월 2일 수확하였다. 결과적으로 무처리(Con.), H.V., 그리고

Rye 처리구를 배치하였다.

N₂O와 CO₂ 배출량을 조사하기 위해 국제적으로 공인된 밀폐형태 챔버인 Non-steady-state (Hutchinson and Livingston, 1993)를 사용하였다. 챔버는 처리구 마다 6개씩 설치하였다. 설치된 챔버는 외부로의 공기 유출이 없도록 하였으며, 지름이 24 cm, 높이가 37 cm인 PVC 소재로 각 시험구의 대표 지점에 토양에 9 cm 깊이로 녹비 작물의 뿌리 활착의 저해를 최소화 하도록 설치하였다. 가스시료 채취는 Yagi(1991)의 방법에 준하여 토양에서 배출되는 온실가스의 24시간 중 평균배출 시간대인 10:00~13:00시 사이에 60 ml 주사기로 1주일에 1회 채취하여 분석하였다.

3. N₂O 및 CO₂ 분석

시료의 N₂O와 CO₂ 농도는 가스크로마토그래피 (7890B, Agilent, USA)로 분석하였으며 세부조건은 Table 2와 같다. N₂O와 CO₂ flux의 계산은 아래의(식 1)을 이용하였다

$$CO_2 \text{ or } N_2O \text{ flux (mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}) = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{273}{(T+273)} \text{-----(1)}$$

여기서, ρ는 기체밀도로써 CO₂는 1.977 mg cm⁻³, N₂O는 1.967 mg cm⁻³, V는 챔버 부피(m³), A는 챔버 표면적(m²), $\frac{\Delta C}{\Delta t}$ 는 챔버 내 단위시간당 CO₂ 및 N₂O의 증가농도(mg m⁻³ day⁻¹), T는 시료 채취 전 후의 평균 온도를 의미한다. 그리고 누적 발생량은 Σ(R×D)을 이용하여 휴경기 동안 총 CO₂ 및 N₂O flux를 계산하였다. R은 CO₂ 및 N₂O 발생량(mg m⁻² day⁻¹)이며, D는 시료채취 공백 기간을 나타낸다.

4. 통계분석

휴경기간 동안 동계피복작물 종류에 따른 N₂O 및 CO₂ 배출특성은 SAS 통계프로그램(버전 9.2)을 이용하여 통계처리 하였다. 처리간의 차이를 비교하기 위

Table 2. Analytical conditions of gas chromatographic measurement for CO₂ and N₂O

| Gas | | N ₂ O | CO ₂ |
|----------------------------------|------------------|---|---|
| Detector | | μECD | FID |
| Column | Packing material | Hayesep Q | Hayesep Q |
| | Materials | UltiMetal | Stainless steel |
| | O.D. × length | 1/8" × 1.83 m | 1/8" × 3.66 m |
| Carrier gas | | CH ₄ 5.0 % Ar ⁻¹ | N ₂ |
| Flow rate | Carrier | 21 ml min ⁻¹ | 23 ml min ⁻¹ |
| | Make up | 2 ml min ⁻¹ | 2 ml min ⁻¹ |
| Temperature | Oven | 60 °C | 60 °C |
| | Detector | 350 °C | 250 °C |
| Retention time | | 9 min | 9 min |
| Concentration of calibration gas | | 0.5 and 1.0 ppmv N ₂ O in N ₂ | 400 and 1000 ppmv CO ₂ in N ₂ |
| Loop | | 2 ml | 2 ml |

하여 조사된 자료는 일반선형모형을 이용한 ANOVA 검증을 통하여 분석하였다. 또한, F-test 결과 값이 $P < 0.05$ 의 범위에서 유의한 경우에만 Duncan's Multiple Range Test를 실시하였다.

III. 결 과

1. 휴경기 동안 토양 수분함량 및 지온

본 연구 기간 동안 시험포장의 측정된 수분함량과 지온의 경시적 변화는 Fig. 2와 같다. 수분함량은 11월 10~15% 범위였지만 12월 20일경 20 mm 이상의 강우가 발생한 이후 20% 이상 높게 유지 되었다. 그후 2018년 1월 25일경부터 10% 이하로 3월 초까지 유지 되었고, 3월 잦은 강우에 의해 다시 수분함량은 25% 이상 유지되었다. 지온은 대기온도 변화와 아주 비슷한 양상을 보였지만 약 3~4°C 높은 온도를 유지하였다. 대기 평균온도는 11월 말부터 0°C 이하이지만, 지온은 12월 중순 이후 0°C 이하였다. 그리고 3월 초부터 대기평균온도가 10°C 이상을 나타내면서 지온도 10°C에 가깝게 높아졌다.

2. N₂O 배출특성

N₂O 배출량은 동계피복작물 재배기간 초기 2017년 11월부터 2018년 2월 중순까지 모든 처리구에서 1.0 mg N₂O m⁻² day⁻¹ 이하로 배출되었으며, 2월 중순까지 일일평균 배출량은 Con., H.V., 그리고 Rye 처리구에서 각각 0.49, 0.42, 그리고 0.34 mg N₂O m⁻² day⁻¹의

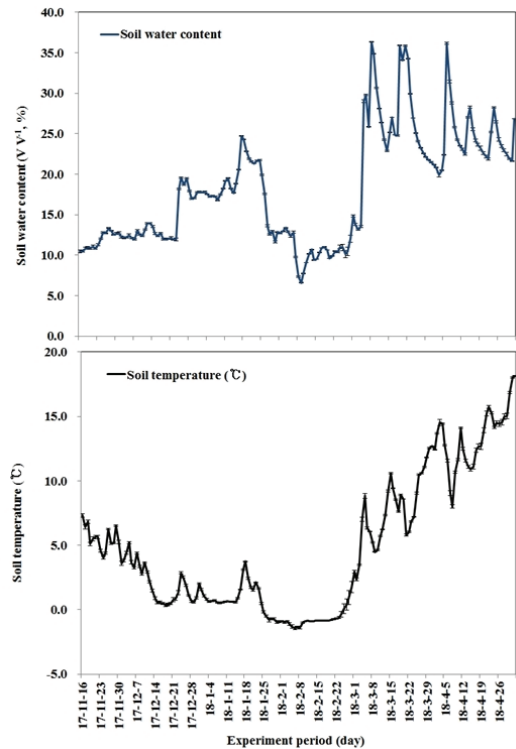


Fig. 2. Soil water content and temperature (at 10 cm soil depth) throughout the experimental period.

N₂O가 배출되었다. 2월 하순 이후 모든 처리구에서 배출량은 증가하였고 2월 하순부터 5월 초까지 일일 평균 배출량은 Con., H.V., 그리고 Rye 처리구에서 각각 0.88, 0.70, 그리고 0.85 mg N₂O m⁻² day⁻¹의 N₂O

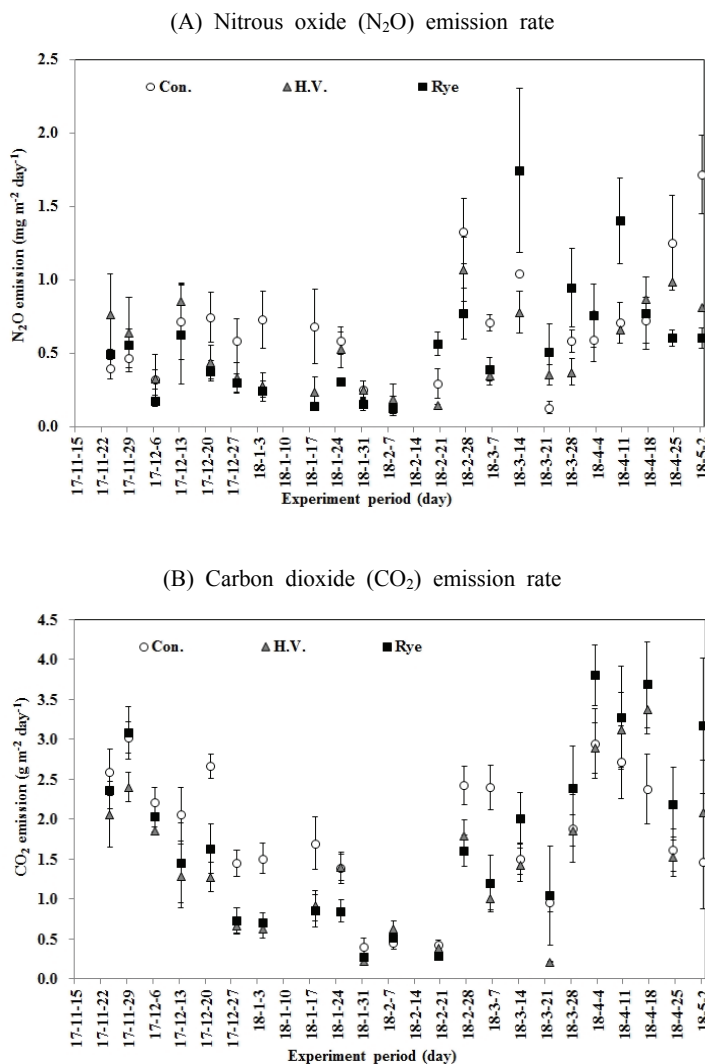


Fig. 3. Changes of nitrous oxide (N₂O) and carbon dioxide (CO₂) emission rates from cropland during fallow season. The daily average soil-to-atmosphere N₂O and CO₂ fluxes in control (Con.), hairy vetch (H.V.) and rye from November 2017 - April 2018. Vertical bars are standard errors of the means (n=6).

가 배출되었다(Fig. 3). 동계피복작물을 재배하였던 169일간 누적 N₂O 배출량은 Con., H.V., 그리고 Rye 처리구에서 각각 104.4, 85.8, 그리고 85.0 mg N₂O m⁻² 이었다(Fig. 4).

3. CO₂ 배출특성

CO₂ 배출량은 동계피복작물 재배기간 초기인 2017년 11월은 모든 처리구에서 2.0 g CO₂ m⁻² day⁻¹으로 높았지만 서서히 배출량이 줄어들어 2018년 1월말 이

후 모든 처리구에서 1.0 g CO₂ m⁻² day⁻¹ 이하로 지지 배출되었다. 2월 하순부터 CO₂ 배출량이 증가하였고, 5월 초까지 일일평균 배출량은 Con., H.V., 그리고 Rye 처리구에서 각각 2.03, 1.93, 그리고 2.44 g CO₂ m⁻² day⁻¹의 CO₂가 배출되었다(Fig. 3). 동계피복작물을 재배하였던 169일간 누적 CO₂ 배출량은 Con., H.V., 그리고 Rye 처리구에서 각각 293.1, 242.2, 그리고 275.2 g CO₂ m⁻² 이었다(Fig. 4).

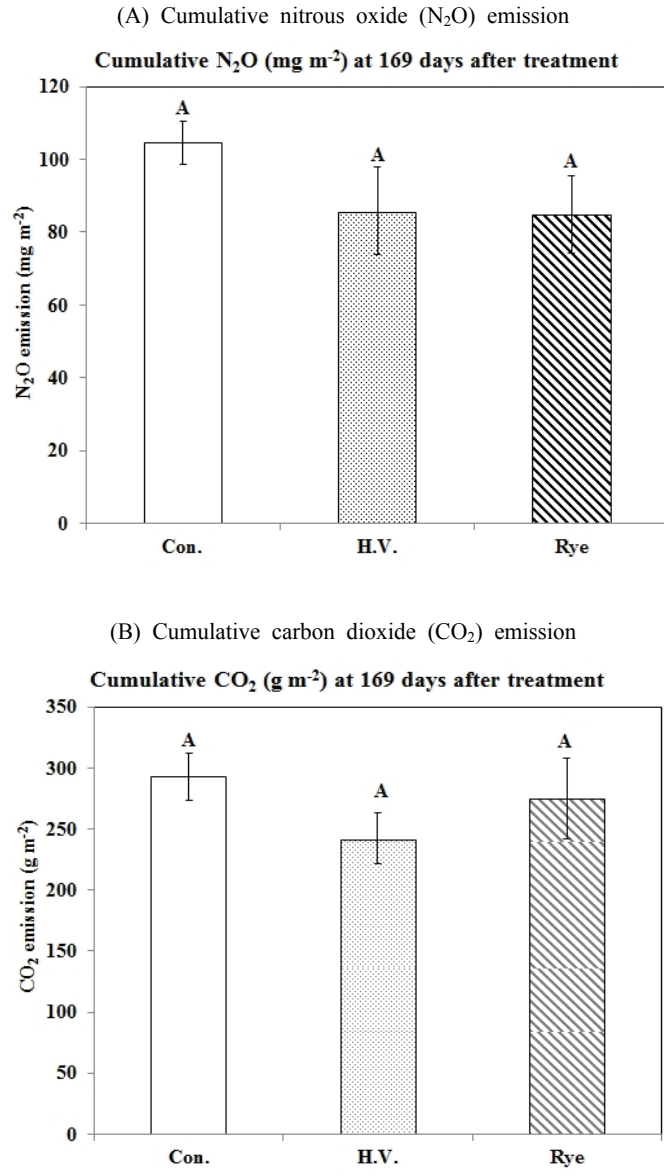


Fig. 4. Cumulative nitrous oxide (N₂O) and carbon dioxide (CO₂) emissions during fallow season. The treatments were control (Con.), hairy vetch (H.V.) and rye from November 2017 – April 2018. Vertical bars are standard errors of the means (n=6). Bars designated with the same letters indicate not significantly different at $\alpha=0.05$.

IV. 고 찰

1. N₂O 배출특성

경작시기의 농경지에서 수분함량은 N₂O배출과 연관이 높다. Kim *et al.*(2014)은 고추재배 시 사양토에서 N₂O 배출에 대한 상대적 기여도를 평가한 결과

토양수분이 66.0%, 토양온도가 21.7%으로 평가되었다. 휴경기간 동안 지온과 N₂O 배출은 유의확률은($P < 0.0001$) 높았지만(Fig. 5), 수분함량은 10~30% 범위에 집중되었고 N₂O 배출에 영향을 주지 않았다(Fig. 6). 즉 작물재배기간동안은 수분함량이 높을 경우 탈질 등의 질소순환 과정을 통해 N₂O 배출량이 증가하

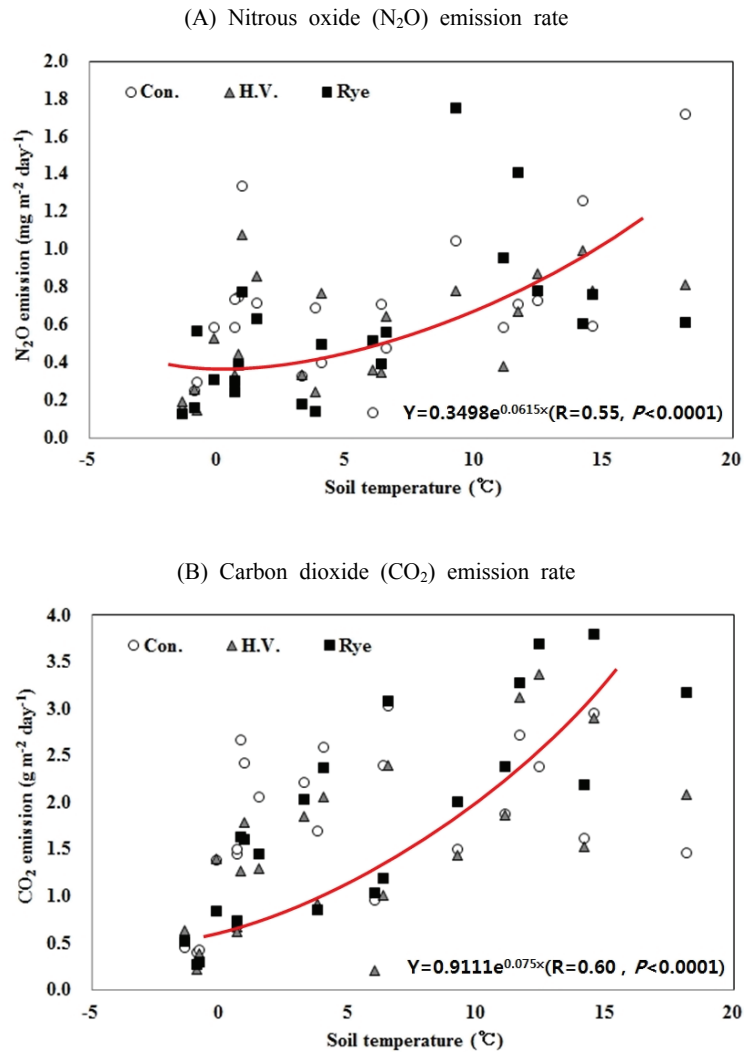


Fig. 5. Changes of nitrous oxide (N₂O) and carbon dioxide (CO₂) emission rates in relation to soil temperature at 10 cm depth during fallow season. The treatments were control (Con.), hairy vetch (H.V.) and rye from November 2017 – April 2018.

지만, 휴경기동안은 낮은 온도에 의해 미생물 활동이 감소하여 수분함량이 높아도 N₂O 배출이 증가하지 않았다(Miao *et al.*, 2014).

휴경기간 동안 누적 N₂O 발생량은 처리구간 통계적 유의한 차이는 발생하지 않았지만 동계녹비피복작물로 H.V.를 재배한 처리구에서 Con.보다 약 17.8%, Rye 처리구에서는 18.6% 더 낮게 나타났다(Fig. 4). 즉 동계피복작물을 재배함으로써 휴경기간 동안 농경지 밭 토양에서 N₂O를 줄일 수 있는 가능성을 확인하였다.

우리나라 밭 토양 아산화질소 국가 고유배출계수를 개발하기 위해 수원, 춘천, 예산 3지역에서 고추, 콩, 봄 배추, 가을배추, 토마토 재배지에서 아산화질소 배출량 평가를 한 결과 모두 질소비료 사용량이 많을수록 배출량이 증가하였다(Kim *et al.*, 2016). 즉 경작기에 N₂O 배출은 질소비료 사용이 가장 큰 요인으로 작용하지만 휴경기간동안 녹비작물 재배함에 따라 질소 사용량을 감소할 수 있어 경작기동안에도 N₂O를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

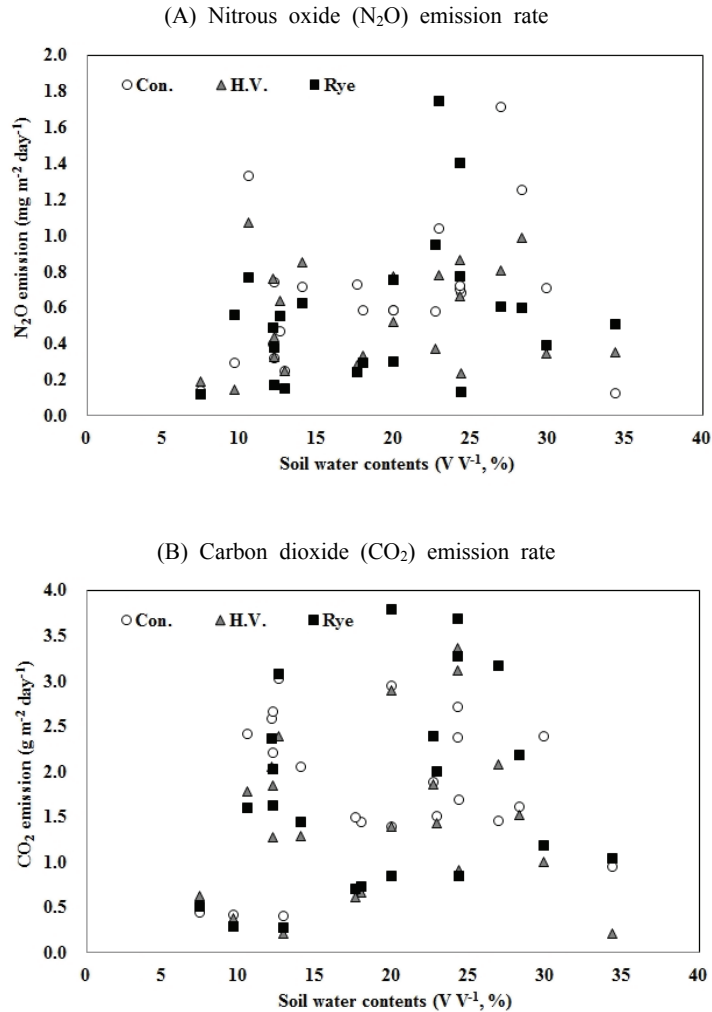


Fig. 6. Changes of nitrous oxide (N₂O) and carbon dioxide (CO₂) emission rates in relation to soil water contents (V V⁻¹, %) at 10 cm depth during fallow season. The treatments were control (Con.), hairy vetch (H.V.) and rye from November 2017 – April 2018.

2. CO₂ 배출특성

휴경기간 동안 지온과 CO₂ 배출은 유의확률은($P < 0.0001$) 높았으며(Fig. 5) 일일평균 배출량에서도 2월 하순 이후 배출량이 증가하였다. 즉 3월초 대기온도가 10°C 이상 되는 해빙기가 되어 토양내 미생물 활성이 회복되었다고 예상할 수 있었다. 하지만 수분 함량은 CO₂ 배출에 영향을 주지 않았다(Fig. 6). 즉 휴경기간 동안 낮은 온도에 의해 미생물 활동이 감소되어 N₂O 배출특성과 유사한 결과가 나타났다.

2017년 11월 중순부터 2018년 5월초까지 누적 CO₂ 배출량은 처리구간 통계적 유의한 차이는 발생하지 않

았지만 동계녹비피복작물로 H.V.를 재배한 처리구에서 Con. 보다 약 17.4%, Rye 처리구에서는 6.13% 더 낮게 나타났다(Fig. 4). 즉 동계피복작물 재배로 인한 토양유실 저감 및 토양유기물 공급 이외에도 온실가스인 CO₂의 직접 배출량도 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

3. 경작기와 비교한 휴경기 N₂O 및 CO₂ 배출 특성

휴경기와 경작기동안 농경지 토양에서 배출되는 온실가스 배출량은 녹비작물을 재배하지 않은 Con. 처

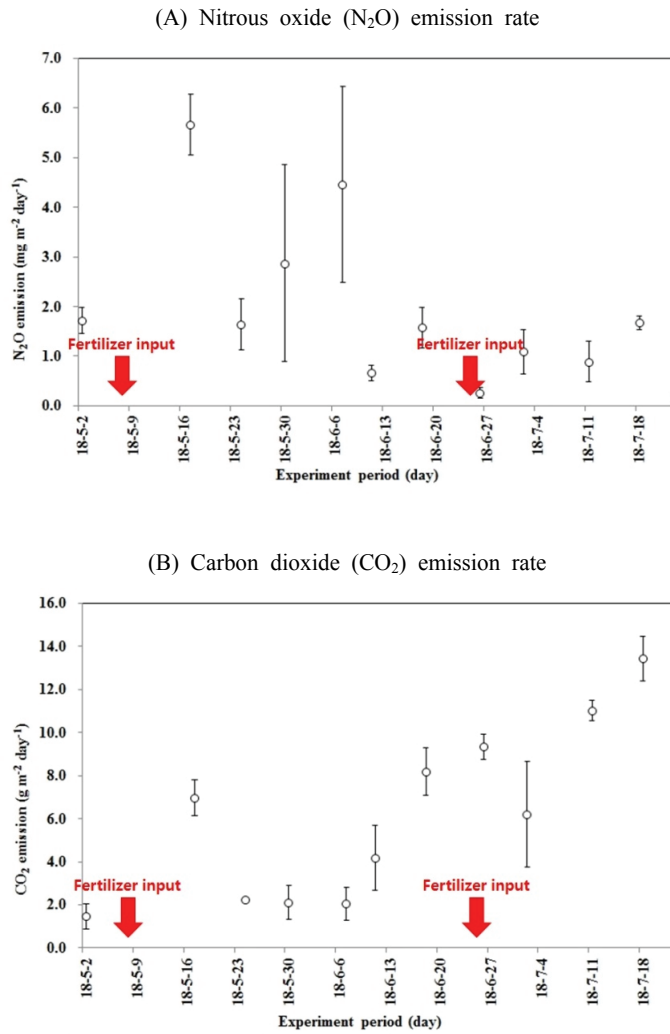


Fig. 7. Changes of nitrous oxide (N₂O) and carbon dioxide (CO₂) emission rates from cropland during growing season. Vertical bars are standard errors of the means (n=6). Vertical arrow indicates dates of supplemental fertilizer application.

Table 3. Nitrous oxide (N₂O) and carbon dioxide (CO₂) emissions by season

| Treatment | N ₂ O emission | | CO ₂ emission | |
|------------------------------|---|--|--|---|
| | Cumulative emission (mg/m ²) | Average daily emission (mg/m ² /day) | Cumulative emission (g/m ²) | Average daily emission (g/m ² /day) |
| Fallow season (Nov.-Apr.) | 104.4 (5.9) * | 0.62 (0.04) | 293.1 (19.4) | 1.73 (0.11) |
| Growing season (May-Jul.) | 181.9 (16.7) | 2.19 (0.20) | 524.6 (21.4) | 6.32 (0.26) |

Note) * The values in parentheses mean their standard errors. The number of samples is 6.

리구에서 비교하였다. 2018년 5월 2일 동계녹비피복 작물 수확 이후 재배작물인 옥수수를 5월 14일 정식 후 7월 24일까지 경작하였다. 옥수수 시비처방기준인 농촌진흥청 작물별 표준시비방법(RDA, 2017)에 준하여 N-P₂O₅-K₂O를 15-13-13 kg 10a⁻¹를 투입하였을 때 경작기 동안 농경지 토양에서 N₂O 와 CO₂ 배출량은 Fig. 7과 같다. 휴경기간 169일간 N₂O와 CO₂ 누적배출량은 각각 104.4 mg m⁻², 293.1 g m⁻²이었고, 경작기간 83일간 N₂O와 CO₂ 누적배출량은 각각 181.9 mg m⁻², 524.6 g m⁻²이었다. 일일 평균배출량으로 비교하면 휴경기간 동안 N₂O 배출은 약 28.3% 배출되었고, CO₂ 배출은 약 27.4% 배출되었다(Table 3). 즉 휴경기간 동안에도 경작기간의 20% 이상의 온실가스가 배출됨을 확인하였다. 시험구 지역의 겨울철(2017년 11월 ~2018년 2월) 평균대기온도는 평년대비 1.2~2°C 범위로 낮았지만, 2018년 3월 이후 평년보다 0.5~2.3°C 범위로 높았다(Fig. 1). 평균대기온도의 변화는 토양 온도에 영향을 주며 그에따라 농경지 토양에서 배출되는 온실가스도 간접적인 영향을 받기 때문에 추후 장기적인 기상기후의 환경영향에 따른 온실가스 배출특성을 파악하는 연구가 필요할것이다.

경작기간 동안의 N₂O와 CO₂는 지온 및 수분함량과 상관관계가 높았던 반면(Kim et al., 2014) 휴경기에는 지온과 유의확률은 높았지만 수분함량과의 연관성은 낮았다. 그리고 동계녹비피복작물 활용은 온실가스 감축 측면에서 두 가지의 효과가 기대된다. 첫 번째 휴경기 동안 N₂O와 CO₂ 모두 대조구에 비해 발생량이 저감된 측면, 두 번째 화학비료 시용을 절감하여 경작기 동안 온실가스를 줄일 수 있는 것으로 모두 유용할 것으로 판단된다. 그리고 휴경기 녹비작물 재배에 따른 작물 생산성 및 토양 화학적 특성 변화와 연계된 온실가스 배출량 평가하는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

적 요

농경지는 농업부문에서 배출되는 온실가스인 아산화질소와 이산화탄소의 공급원이다. 하지만 대부분 농경지 온실가스 배출연구는 경작기에 집중되어 있고, 휴경기 동안 거의 수행되지 않았다. 따라서 본 연구는 동절기 휴경 농경지 N₂O와 CO₂ 배출량과 주요 환경요인과의 유의확률 및 경작기 배출량과 비교하였다. 휴경기동안 녹비작물로써 H.V.와 Rye를 재배하였을

때, N₂O는 0.014~2.956 mg N₂O m⁻² · d⁻¹ 범위로 배출되었으며, 누적량은 대조구, H.V.처리구, Rye처리구에서 각각 104.4, 85.8 그리고 85.0 mg N₂O m⁻² 배출되었다. 대조구에서 배출량이 가장 높았으며, H.V. 및 Rye 처리구는 비슷했다. 누적 이산화탄소 배출량은 대조구, H.V. 처리구, Rye 처리구에서 각각 293.1, 242.2 그리고 275.2 g CO₂ m⁻² 배출되었다. 그리고 휴경기간동안 N₂O 및 CO₂ 일 평균배출량은 경작기의 각각 28.3%, 27.4% 배출되었다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 고유연구사업(과제번호: PJ01261402)의 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Freney, J. R., 1997: Emission of nitrous oxide from soils used for agriculture. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **49**(1-3), 1-6.
- Hutchinson, G. L., and G. P. Livingston, 1993: Use of chamber systems to measure trace gas fluxes. *Agricultural ecosystem effects on trace gases and global climate change, ASA Special Publication* **55**, D. E. Rolston, J. M. Duxbury, L. A. Harper, A. R. Mosier(Eds.), ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI, 63-78. doi:10.2134/asapecpub55.c4
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2014: Climate Change 2014, Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151pp.
- Karlen, D. L., R. Lal, R. F. Follett, J. M. Kimble, J. L. Hatfield, J. M. Miranowski, C. A. Cambardella, A. Manale, R. P. Anex, and C. W. Rice, 2009: Crop residues: The rest of the story. *Environmental Science and Technology* **43**(21), 8011-8015.
- Kim, G. Y., U. S. Na, S. I. Lee, H. C. Jeong, P. J. Kim, J. E. Lee, Y. H. Seo, J. S. Lee, E. J. Choi, and S. U. Suh, 2016: Assessment of integrated N₂O emission factor for korea upland soils cultivated with red pepper, soy bean, spring cabbage, autumn cabbage and potato. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* **49**(6),

- 720-730. (in Korean with English abstract)
- Kim, G. Y., H. C. Jeong, Y. K. Son, S. Y. Kim, J. S. Lee, and P. J. Kim, 2014: Effect of soil water potential on methane and nitrous oxide emissions in upland soil during red pepper cultivation. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry* **57**(1), 15-22.
- Lee, S. I., G. Y. Kim, E. J. Choi, J. S. Lee, and H. C. Jung, 2017: Decreases nitrous oxide emission and increase soil carbon via carbonized biomass application of orchard soil. *Korean Journal of Environmental Agriculture* **36**(2), 73-79. (in Korean with English abstract)
- Maljanen, M., J. Hytonen, and P. J. Martikainen, 2010: Cold-season nitrous oxide dynamics in a drained boreal peatland differ depending on land-use practice. *Canadian journal of forest research* **40**(3), 565-572.
- Maljanen, M., A. R. Kohonen, P. VirkajaaRvi, and P. J. Martikainen, 2007: Fluxes and production of N₂O, CO₂ and CH₄ in boreal agricultural soil during winter as affected by snow cover. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* **59**(5), 853-859.
- Miao, S., Y. Qiao, X. Han, R. Brancher Franco, and M. Burger, 2014: Frozen cropland soil in Northeast China as source of N₂O and CO₂ emissions. *PLoS ONE* **9**(12), 1-16.
- NIAS (National Institute of Agriculture Sciences), 2000: *Methods of soil and plant analysis*. National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Korea.
- Oquist, M. G., M. Nilsson, F. Sorensson, A. Kasimir-Klemedtsson, T. Persson, P. Weslien, and L. Klemedtsson, 2004: Nitrous oxide production in a forest soil at low temperatures processes and environmental controls. *FEMS Microbiology Ecology* **49**(3), 371-378.
- Phillips, R. L., A. F. Wick, M. A. Liebig, M. S. West, and W. L. Daniels, 2012: Biogenic emissions of CO₂ and N₂O at multiple depths increase exponentially during a simulated soil thaw for a northern prairie Mollisol. *Soil Biology and Biochemistry* **45**, 14-22.
- RDA (Rural Development Administration), 2017: Fertilizer recommendation standards for various crops, 37pp.
- Singh, S. N., and L. Tyagi, 2009: Nitrous oxide: sources, sinks and mitigation strategies. *Nitrous oxide emissions research progress*, A. I. Sheldon and E. P. Barnhart(Eds.), Nova Science Publishers, USA, 127-150.
- Stehfest, E., 2008: Modelling of global crop production and resulting N₂O emissions. Doctoral dissertation, Universitat Kassel Kassel.
- Teepe, R., R. Brumme, and F. Beese, 2000: Nitrous oxide emissions from frozen soils under agricultural, fallow and forest land. *Soil Biology and Biochemistry* **32**(11-12), 1807-1810.
- Yagi, K., 1991: Emission of biogenic gas compounds from soil ecosystem and effect of global environment. 2. Methane emission from paddy fields. *Soil and Fertilizer Japan* **62**(5), 556-562.
- Zimov, S. A., G. M. Zimova, S. P. Daviodov, A. I. Daviodova, Y. V. Voropaev, Z. V. Voropaeva, and I. P. Semiletov, 1993: Winter biotic activity and production of CO₂ in Siberian soils: a factor in the greenhouse effect. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **98**(D3), 5017-5023.