

## 농경지에서 무경운 및 녹비 투입에 따른 아산화질소 배출특성

이선일\*, 김건엽, 이종식, 최은정

농촌진흥청 국립농업과학원 기후변화생태과

## Effect of no-tillage and green manure practices on the nitrous oxide emission from cropland

Sun-Il Lee\*, Gun-Yeob Kim, Jong-Sik Lee and Eun-Jung Choi

National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Republic of Korea

### \*Corresponding author

Sun-Il Lee

Tel. 063-238-2495

E-mail. silee83@korea.kr

Received: 16 July 2019

First Revised: 6 August 2019

Second Revised: 26 August 2019

Revision accepted: 27 August 2019

**Abstract:** Cropland is a major source of atmospheric nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) and we need technologies in the field of agriculture that can reduce the presence of N<sub>2</sub>O. In this study, a field experiment encompassing six treatments was conducted to determine the efflux of N<sub>2</sub>O in cropland during the growing season. An experimental plot was composed of two main sectors, no-tillage (NT) and conventional tillage (CT), which were subdivided into three plots according to types of nitrogen (N) sources: CF, chemical fertilizer; HV, hairy vetch + chemical fertilizer; and RY, rye + chemical fertilizer. The cumulative N<sub>2</sub>O emissions were 179.8 mg N<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> for CF-CT, 108.1 mg N<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> for HV-CT, 303.5 mg N<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> for RY-CT, 86.7 mg N<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> for CF-NT, 73.8 mg N<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> for HV-NT, and 122.7 mg N<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> for RY-NT during the fallow season. The CT, HV, and RY of no-tilled soils were reduced by 51.8, 31.7 and 59.6%, respectively ( $p < 0.001$ ). Our results indicate that the use of no-tillage and hairy vetch practice rather than conventional tillage and chemical fertilizer practice can decrease N<sub>2</sub>O emission.

**Keywords:** cropland, green manure, nitrous oxide, no-tillage

## 서 론

전 지구적으로 대기 중 온실가스 농도는 산업혁명 이후 급격히 증가하고 있다. 증가된 온실가스에 의해 지구 평균 대기온도는 상승하였고 지구환경 변화는 가속화되었으며, 이에 따라 기상이변의 피해 발생 빈도가 증가하였다(IPCC 2014).

따라서 세계 각국은 지구온난화에 따른 기상이변의 피해를 최소화하기 위한 온실가스 저감기술 개발과 감축정책을 추진하고 있다. 기후변화협약 제3차 당사국 총회에서

교토의정서(Kyoto Protocol 1998)를 체결하여 기후변화의 주범인 주요 온실가스를 정의하고 선진국 중심으로 온실가스 감축 의무를 부여하였다. 그 후 제21차 유엔 기후변화협약 당사국 총회에서 파리협정(Paris Agreement 2015)을 이끌어 모든 당사국에게 온실가스 감축의무를 부여한 신 기후체제가 출범하였다. 이에 따라 우리나라는 2015년 6월에는 2030년의 온실가스 배출량 전망치(BAU; Business as usual) 대비 37%를 감축하는 것을 발표하였고 그 중 농축산 부문에 할당된 온실가스 감축목표는 BAU 대비 7.9%이다. 농축산 부문은 산업부문과 비교하여 상대적으로 감축 비

율이 낮지만, 농업의 구조적인 특성을 고려하면 쉽게 달성 가능한 목표는 아니다. 따라서 농업분야에서 효과적으로 온실가스를 줄일 수 있는 수단을 도출하고 적용할 필요가 있다. 농업부문에 배출되는 온실가스는 배출원에 따라 분류하며, 벼 재배 부분에서는 메탄(CH<sub>4</sub>)과 농경지 토양에서는 아산화질소(N<sub>2</sub>O)가 주로 배출된다. N<sub>2</sub>O의 지구온난화잠재력(GWP; Global warming potential)은 298이며 지구온난화 기여율은 5% 이상인 것으로 알려져 있다(IPCC 2007). 따라서 농업분야 농경지 토양에서 발생하는 N<sub>2</sub>O를 저감하는 기술이 필요하다.

농경지에서 작물을 재배하기 전 토양을 교반하는 것을 경운이라 하며, 경운을 하지 않는 것을 무경운이라 한다. 무경운 재배는 농경지에서 배출되는 온실가스를 줄일 수 있고 경운 시 손실되는 양분을 최소화할 수 있는 역할이 부각되면서 온실가스 감축기술로서 각광받고 있다(Burney *et al.* 2010). 또한 경운작업에 비해 농자재사용을 줄일 수 있어 비용 절감과 노동시간 단축 등의 긍정적인 효과가 높은 것으로 보고된다(Yang *et al.* 2012). 녹비 작물은 녹색작물의 줄기와 잎을 그대로 토양에 환원하여 토양의 양분으로 이용하는 작물이다. 농경지에서 녹비작물을 활용하면 토양의 물리·화학적 특성을 개량하고 화학비료를 대체할 수 있다(Kang *et al.* 2013). 녹비작물을 재배함으로써 온실가스 저감 효과가 있는 것으로 보고되었고(Karlen *et al.* 2009), 우리나라도 휴경기간 동안 녹비 피복작물을 재배하는 것을 권장하고 있다. 농경지에서 무경운과 녹비작물 재배기술을 활용하는 것은 토양의 질을 개선하고 온실가스도 줄일 수 있는 효율적인 감축 수단이 될 수 있다. 그리고 각 기술을 복합적으로 적용한다면 온실가스 감축효과를 더욱 증진할 수 있어 국가 온실가스 감축목표 달성에 기여할 수 있는 기술로서 활용될 수 있다. 하지만 무경운과 녹비작물의 복합적 적용으로 온실가스 배출량을 평가한 국내 연구결과는 부족하여 온실가스 감축효과를 평가하는 연구가 필요하다. 따라서 본 연구는 작물 재배 시 무경운과 녹비작물로서 두 과작물로 대표적인 헤어리베치와 화본과작물로 대표적인 호밀을 각각 투입한 후 농경지 토양에서 방출되는 N<sub>2</sub>O 배

출량을 정량적으로 분석하고 비교 검토하여 N<sub>2</sub>O 배출 특성을 평가하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 시험 토양 및 위치

본 연구는 질소비료원이 많이 투입되는 다비성 작물인 옥수수를 선택하였고, 옥수수를 재배하는 기간 동안 무경운과 녹비투입에 따라 농경지 토양에서 배출되는 N<sub>2</sub>O의 특성을 조사하기 위하여 전라북도 완주군 이서면에 위치한 국립농업과학원 시험포장 (위도: 35°82'N, 경도: 127°04'E)에서 수행하였다. 시험포장의 토양의 pH, 총 탄소(Total Carbon), 총 질소(Total Nitrogen), 유효인산(Available P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), 치환성 양이온으로 칼륨(Exchangeable K), 칼슘(Exchangeable Ca), 마그네슘(Exchangeable Mg)을 분석하였다. 토양분석은 토양 화학분석법(NIAST 2000)에 준하여 토양 pH는 토양을 증류수와 1:5(WV<sup>-1</sup>)로 혼합한 후 30분간 교반하여 pH meter (Orion 4 star, Thermo, Singapore)로 측정하였고, 총 탄소와 질소는 CN analyzer (Vario Max CN, Elementar, Germany)로 분석하였다. 유효인산은 Lancaster 법으로 720 nm 파장에서 비색계(AU/CARY 300, Varian, Australia)로 분석하였다. 치환성 양이온은 1 M NH<sub>4</sub>OAc (pH 7.0) 침출하여 유도결합플라즈마 분광계(ICP-OES, GBC scientific, USA)로 분석하였다.

토성은 사양질이며 토양화학적 특성은 Table 1과 같다. 토양 pH(1:5)는 7.2, 총 탄소는 9.03 g kg<sup>-1</sup>, 총 질소는 1.52 g kg<sup>-1</sup>, 유효인산은 13.7 mg kg<sup>-1</sup>, 치환성 칼륨, 칼슘, 마그네슘은 각각 0.26, 2.87, 1.08 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>이었다(Table 1).

시험기간 중 토양의 온도 측정을 위해 센서(External sensor, Spectrum, British)를 경작지의 유효토심인 토양 내 10 cm 깊이에 설치하였고 토양 수분함량 센서(SM100, Spectrum, British)도 토양 내 10 cm 깊이에 수평으로 꽂아 실시간으로 측정하였다. 각각 토양온도 및 수분 측정치는 데이터로거에 30분 단위로 기록되도록 하였다. 강수량 및

**Table 1.** Chemical properties of the studied soil before the experiment

pH (1:5)	T-C (g kg <sup>-1</sup> )	T-N (g kg <sup>-1</sup> )	Av. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	Exchangeable cation (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )		
				K	Ca	Mg
7.2 (0.1)*	9.03 (2.41)	1.52 (0.09)	13.7 (1.4)	0.26 (0.04)	2.87 (0.17)	1.08 (0.09)

\*The values in parentheses mean their standard errors. The number of samples is 3.

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. 옥수수 재배기간 중 농경지 토양에서 배출되는 온실가스 측정기간인 2018년 5월 2일부터 2018년 8월 9일까지 대기 평균온도와 총 강우량은 각각 23.7°C, 389 mm이었다(Fig. 1). 기상청(www.kma.go.kr)의 30년 평년자료와 평균기온을 비교하면 2018년 5~6월은 약 0.4~0.5°C 높았고 7월은 1.9°C 높았다.

## 2. 시험구 처리

시험구 처리는 경운 여부에 따라 무경운(NT; No-tillage)

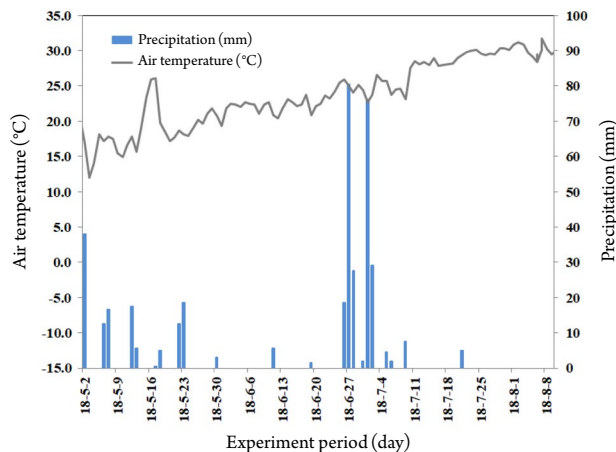


Fig. 1. Daily precipitation (mm) and daily average air temperature (°C) throughout the experimental period.

Table 2. Description of treatment used in the experiment

Treatment	N source	Chemical N rate (kg ha <sup>-1</sup> )	Types of tillage
CF-CT	Chemical fertilizer	150	Conventional tillage
HV-CT	Hairy vetch + Chemical fertilizer	110	Conventional tillage
RY-CT	Rye + Chemical fertilizer	109	Conventional tillage
CF-NT	Chemical fertilizer	150	No-tillage
HV-NT	Hairy vetch + Chemical fertilizer	110	No-tillage
RY-NT	Rye+Chemical fertilizer	109	No-tillage

Table 3. Growth and components of green manure crop

	Wet biomass (ton ha <sup>-1</sup> )	Dry biomass (ton ha <sup>-1</sup> )	T-C (g kg <sup>-1</sup> )	T-N (g kg <sup>-1</sup> )	C/N ratio
Hairy vetch	6.16 (1.21)*	0.82 (0.13)	423.7 (0.5)	48.2 (1.0)	9
Rye	14.53 (0.27)	2.63 (0.20)	417.9 (2.4)	15.5 (0.3)	27

\*The values in parentheses represent their standard errors. The number of samples is 3.

및 경운(CT; Conventional tillage) 처리구를 각각 전체 면적의 절반으로 나누었다. 다음으로, 투입되는 녹비에 따라 녹비를 투입하지 않고 화학비료만 투입한 CF (Chemical fertilizer) 처리구, 헤어리베치와 화학비료를 투입한 HV (Hairy vetch + Chemical fertilizer) 처리구 호밀과 화학비료를 투입한 RY (Rye + Chemical fertilizer) 처리구를 정하여 최종적으로 6개의 처리구를 설정하였다(Table 2).

녹비작물로 헤어리베치와 호밀을 각각 2017년 10월 16일, 11월 1일에 재식거리 70×20 cm으로 파종하였고 2018년 5월 2일 수확하여 토양에 환원하였다. 시험작물인 옥수수는 2018년 5월 14일 정식하였고 7월 24일 수확하였다. 비료 사용은 농촌진흥청 작물별 시비처방기준(RDA 2006)의 표준시비량을 기준으로 하였고, N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O를 150-130-130 kg ha<sup>-1</sup>으로 질소는 밀거름 5월 8일, 옷거름 6월 25일에 분시하였으며, 인산과 칼리는 전량 밀거름으로 공급하였다. 처리구별 질소 시비량은 CF 처리구에서는 화학비료 전량, HV, RV 처리구에서는 각각 수확된 녹비전량(Table 3)과 표준시비량 대비 질소 부족분을 화학비료로 공급하여 각 처리구당 질소 투입량은 150 kg ha<sup>-1</sup>로 맞추었다(Table 2).

## 3. N<sub>2</sub>O 시료 채취 및 분석

농경지 토양에서 배출되는 N<sub>2</sub>O는 국제적으로 공인된 밀폐형태 챔버인 Non-steady-state (Hutchinson and Livingston 1993)를 사용하였고 각 처리구 마다 3개씩 설치하였다. 설치된 챔버는 지름이 24 cm, 높이가 37 cm인 PVC

소재로 외부로 공기 유출이 없도록 하였다. 각 시험구의 대표 지점에 9 cm 깊이 설치하여 작물의 뿌리 활착의 저해를 최소화되도록 하였다. 가스시료 채취는 Yagi (1991)의 방법에 준하여 토양에서 배출되는 온실가스의 24시간 중 평균배출 시간대인 10:00~13:00시 사이에 밀폐 전과 밀폐 40분 후의 시료를 60mL 주사기로 1주일에 1회 이상 채취하여 분석하였다. 시료를 채취하지 않는 기간 동안은 상부 챔버를 열어 자연상태로 두었다. 농경지 토양에서 배출되는 온실가스 측정기간은 옥수수 정식 2주 전 5월 2일부터 수확 2주 후인 8월 9일까지 총 100일간 측정하였다.

기체시료의 N<sub>2</sub>O 농도는 전자포획검출기(ECD detector)가 내장된 가스크로마토그래피(7890B, Agilent, USA)로 분석하였으며 칼럼은 Hayesep Q(80/100 mesh)를 충전한 1/8"×3.66 m의 UltiMetal tubing column, 그리고 검출기의 온도는 350°C로 하였다. 세부조건은 Table 4와 같다. N<sub>2</sub>O efflux의 계산은 아래의(Eq. 1)을 이용하였다.

$$N_2O \text{ efflux (mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}) = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{273}{(273+T)} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\text{Cumulative N}_2\text{O efflux (mg m}^{-2}) = \Sigma (R \times D) \quad (\text{Eq. 2})$$

여기서, ρ는 기체밀도로서 N<sub>2</sub>O는 1.967 mg cm<sup>-3</sup>, V는 챔버 부피(m<sup>3</sup>), A는 챔버 표면적(m<sup>2</sup>), ΔC/Δt는 챔버 내 단위 시간당 N<sub>2</sub>O의 증가농도(mg m<sup>-3</sup> day<sup>-1</sup>), T는 시료 채취 전후의 평균온도를 의미한다. 그리고 누적 발생량은 (Eq. 2)를 이용하여 총 N<sub>2</sub>O efflux를 계산하였다. R은 N<sub>2</sub>O 발생량

**Table 4.** Analytical conditions of gas chromatographic measurement for N<sub>2</sub>O

Gas	N <sub>2</sub> O	
Detector	μECD	
Column	Packing material	Hayesep Q
	Materials	UltiMetal
	O.D. × length	1/8" × 1.83 m
Carrier gas	CH <sub>4</sub> 5.0% Ar <sup>-1</sup>	
Flow rate	Carrier	21 mL min <sup>-1</sup>
	Make up	2 mL min <sup>-1</sup>
Temperature	Oven	60°C
	Detector	350°C
Retention time	9 min	
Concentration of calibration gas	0.5 and 1.0 ppmv N <sub>2</sub> O in N <sub>2</sub>	
Loop	2 mL	

(mg m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>)이며, D는 시료채취 공백 기간을 나타낸다.

#### 4. 통계분석

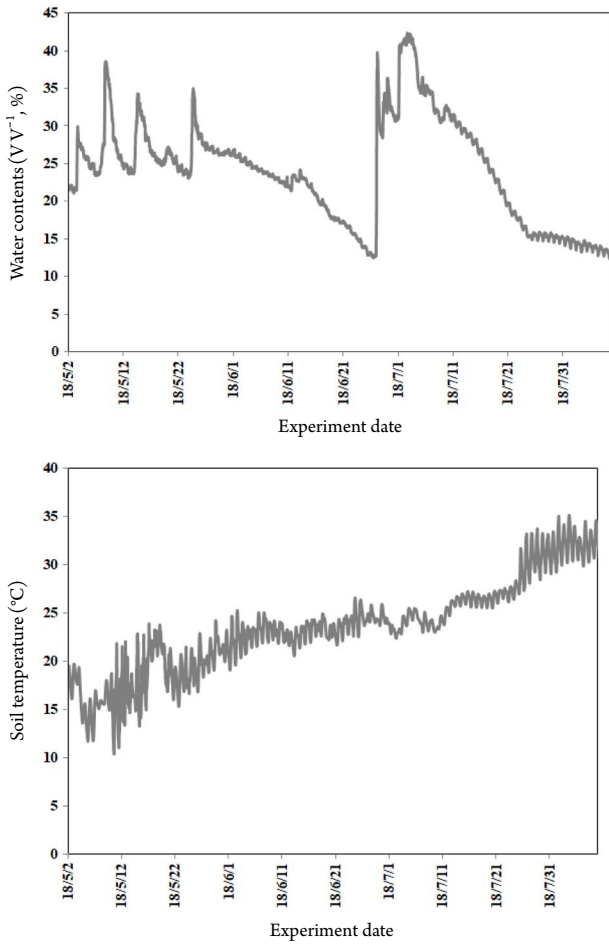
옥수수 재배기간 동안 경운 방법 및 녹비 투입에 따른 N<sub>2</sub>O 배출량 차이는 SAS 통계프로그램(ver. 9.4)을 이용하여 통계처리하였다. 처리 간의 차이를 비교하기 위하여 조사된 자료는 일반선형모형을 이용한 분산분석 검증을 통해 분석하였다. 또한, F-test 결과 값이 p < 0.05의 범위에서 Duncan's Multiple Range Test를 통해 N<sub>2</sub>O 배출량에 대한 다중비교를 실시하였다.

### 결과 및 고찰

#### 1. 토양 수분함량 및 토양온도에 따른 N<sub>2</sub>O 배출특성

본 연구 기간 동안 시험포장의 측정된 수분함량과 토양 온도의 경시적 변화는 처리구별 차이는 발생하지 않았으며 Fig. 2와 같다. 토양 수분함량은 5월 6회 이상 10 mm 이상의 강우가 발생한 직후 30% 이상 증가하였고 6월 하순까지는 강우가 적어 15% 이하로 감소하였다. 그후 70 mm 이상의 강우가 발생하면서 40% 이상 높아졌으며 6월 27일부터 7월 12일까지 16일간 30% 이상 유지하였고 그후 점차 감소하였다. 토양온도는 시험 기간 동안 10.4~35.2°C 범위였으며, 평균 23.6°C였다. 대기온도 변화와 비슷한 양상을 보였지만 약 2~3°C 높은 온도를 유지하였다. 시험 기간 동안 토양온도는 지속적으로 증가하였고, 7월 27일 이후 30°C 이상 높게 유지되었다(Fig. 2).

Kim et al. (2014)은 농경지 토양에서 고추재배 시 사양토에서 N<sub>2</sub>O 배출에 대한 상대적 기여도를 평가한 결과 토양 수분이 66.0%, 토양온도가 21.7%으로 평가되었다. 본 시험 결과 토양온도가 20~25°C 범위에서 주로 N<sub>2</sub>O 배출량이 높았고, 수분함량이 20~30% 범위에서 N<sub>2</sub>O 배출량이 높았다(Fig. 3). 이러한 경향은 토양 온도가 20~30°C이고 수분함량이 20~30% 범위일 때 N<sub>2</sub>O 배출이 증가하는 Jian-gang et al. (2007)의 연구결과와 유사한 경향을 나타냈다. 일반적으로 토양온도의 증가는 탈질에 관여하는 미생물을 증가시켜 N<sub>2</sub>O 배출량을 촉진하지만 (Renault and Sierra 1994), 30°C 이상의 고온에서는 N<sub>2</sub>O 배출이 억제됨을 확인하였다(Fig. 3). 토양 수분함량은 토양 내 질소순환 과정에 영향을 주며, 토양이 습윤상태일 때에는 질소순환 과정 중 미생

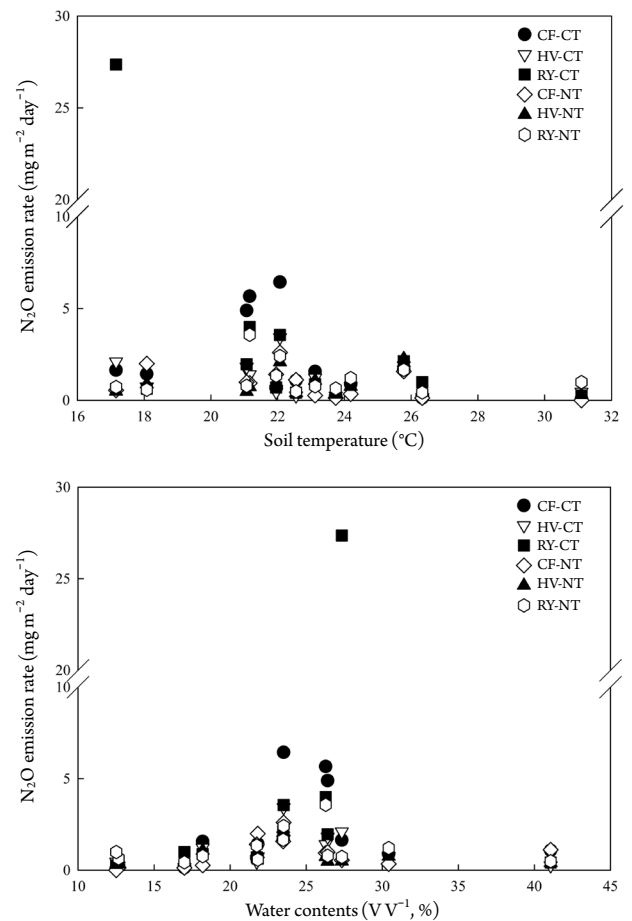


**Fig. 2.** Soil water content and temperature (at 10 cm soil depth) throughout the experimental period.

물에 의한 탈질현상이 촉진되어 토양으로부터 N<sub>2</sub>O 배출이 증가한다고 한다(Reay *et al.* 2012). 하지만 토양 수분함량이 40% 이상 초과할 경우 질소의 탈질과 N<sub>2</sub>O 생산 및 확산을 억제되었으며 (Jian-gang *et al.* 2007), 본 연구결과에서도 같은 현상을 확인하였다(Fig. 3). 대기온도와 강수량의 변화는 토양온도와 토양 수분함량에 영향을 주며 이에 따른 농경지 토양에서 배출되는 온실가스도 간접적인 영향을 받기 때문에 추후 장기적인 기상, 기후의 환경영향에 따른 온실가스 배출특성을 파악하는 연구가 필요할 것이다.

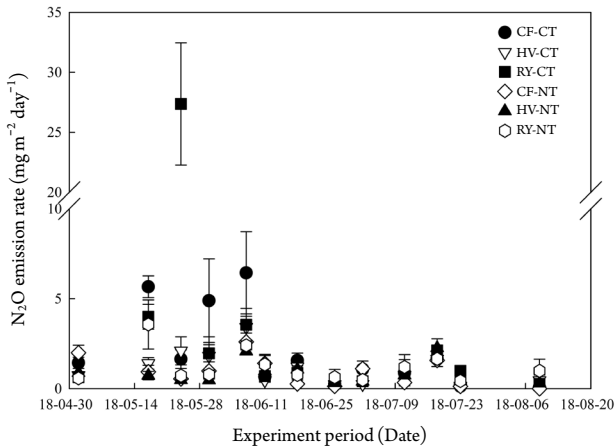
## 2. N<sub>2</sub>O 시기별 배출특성

옥수수 재배기간 동안 처리구별(Table 2) 농경지 토양에서 시기별 N<sub>2</sub>O 배출량으로 옥수수 재배 초기인 5월 중순부터 6월 초순까지 CF-CT, HV-CT, RY-CT, CF-NT, HV-



**Fig. 3.** Changes in nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emission rates in relation to soil temperature (°C) and soil water contents (V V<sup>-1</sup>, %) at 10 cm depth during the experimental period.

NT 그리고 RY-NT 처리구에서 각각 1.64~6.44, 1.41~3.42, 1.97~27.36, 0.55~2.60, 0.47~2.08 그리고 0.72~3.57 mg N<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> 범위로 배출되었다(Fig. 4). 농경지에 화학비료 및 녹비 투입으로 질소 분해가 활발히 일어나 초기 배출값이 높았다. RY-CT 처리구에서는 25 mg N<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> 이상 높게 배출되는 부분을 제외하면 관행처리구인 화학비료를 투입하고 경운한 CF-CT 처리구에서 N<sub>2</sub>O가 높게 배출되었다. 그리고 상대적으로 경운처리구에서 무경운처리구보다 N<sub>2</sub>O 배출량이 높았는데, 이는 경운을 통해 토양입자가 물리적으로 분해되고 공기 투과성이 증가하여 미생물의 활성을 촉진하였기 때문으로 판단된다(Beare *et al.* 1994). 6월 중순 이후부터 일일평균 배출량은 CF-CT, HV-CT, RY-CT, CF-NT, HV-NT 그리고 RY-NT 처리구에서 각각 0.79, 0.65, 0.83, 0.62, 0.82 그리고 0.94 mg N<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> 배출되었다(Fig. 4).



**Fig. 4.** Changes in nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emission rates from cropland during the experimental period. The daily average soil-to-atmosphere N<sub>2</sub>O flux. Vertical bars represent standard errors of the means (*n* = 3).

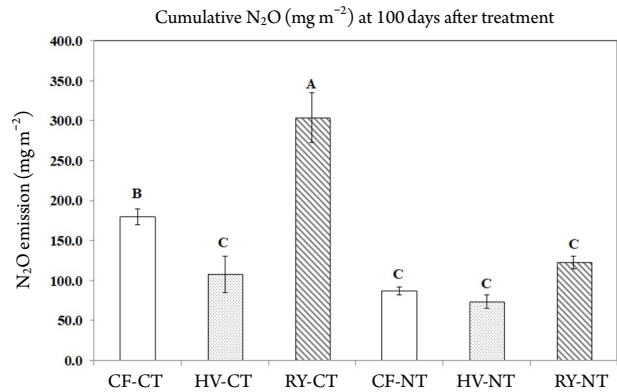
온대기후대의 밭 토양에서 수행된 다른 연구의 N<sub>2</sub>O 배출량과 유사하였다(Kim *et al.* 2016; Yoo *et al.* 2016).

우리나라 밭 토양의 N<sub>2</sub>O 국가 고유배출계수를 개발하기 위해 수원, 춘천, 예산 3지역에서 고추, 콩, 봄배추, 가을배추, 토마토 재배 동안 N<sub>2</sub>O 배출량을 평가한 결과 조사지역에 관계없이 대부분 밀거름 투입 후 한 달까지는 높은 N<sub>2</sub>O 배출 양상을 보였다(Kim *et al.* 2016). 본 연구결과에서도 농경지에서 질소원이 투입된 초기에 N<sub>2</sub>O가 높게 배출됨을 확인할 수 있었다.

### 3. 처리구별 N<sub>2</sub>O 배출특성

옥수수 재배기간 100일 동안 누적 N<sub>2</sub>O 배출량은 경운 유무와 투입된 질소원에 따른 처리구간 통계적 유의한 차이가 발생하였고(*p* < 0.001), CF-CT, HV-CT, RY-CT, CF-NT, HV-NT 그리고 RY-NT 처리구에서 각각 179.8, 108.1, 303.5, 86.7, 73.8 그리고 122.7 mg N<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> 배출되었다(Fig. 5). 재배지에 공급된 질소원에 따라 처리구마다 통계적 차이가 나타났다.

Iserman (1994)은 농경지 토양에서 N<sub>2</sub>O는 81%가 질소비료 투입에 의해 배출된다고 하였다. 질소비료로 가장 많이 이용되는 요소를 토양에 투입하면 가수분해되어 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 형태로 변하고 자급영양생물인 질화균에 의해 질산화 과정을 거쳐 질소산화물 형태로 달라지며 탈질균 호흡내의 전자 수용체의 탈질 과정을 통해 N<sub>2</sub>가 배출된다. 그중 질



**Fig. 5.** Cumulative nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emission rates from cropland during the experimental period. Vertical bars represent standard errors of the means (*n* = 3). Different letters (a, b, c) indicate significant differences between the treatment at *p* < 0.05.

산화과정과 탈질과정 중 중간 생성물인 N<sub>2</sub>O가 생성된다(Firestone and Davidson 1989; Davidson *et al.* 1993). 그러므로 질소화합비료 사용량이 많을수록 N<sub>2</sub>O 배출량은 증가한다(Kim *et al.* 2016). 따라서 경운 처리구에서 HV-CT는 CF-CT 대비 질소화합비료 사용량을 줄여 N<sub>2</sub>O 배출량이 39.9% 통계적 유의한 차이를 나타내며 줄었다. 하지만 RY-CT는 CF-CT 대비 질소화합비료 사용량을 줄였지만 N<sub>2</sub>O 배출량이 68.8% 통계적 유의한 차이를 나타내며 증가하였다(Fig. 5). 호밀의 건조수확량과 탄소함량은 2.63 t ha<sup>-1</sup>, 417.9 g kg<sup>-1</sup>이고, 헤어리배치의 건조수확량과 탄소함량은 0.82 t ha<sup>-1</sup>, 423.7 g kg<sup>-1</sup>이므로 RY-CT와 HV-CT에 각각 1.10 t ha<sup>-1</sup>와 0.35 t ha<sup>-1</sup>의 탄소가 투입되었다(Table 3). 이는 N<sub>2</sub>O 배출은 토양의 유기탄소 함량이 높을 때 증가하는데(Skiba *et al.* 1998) RY-CT 처리구에서 ha당 1t 이상의 탄소가 투입되어 N<sub>2</sub>O 배출량 증가에 영향을 주었던 것으로 사료된다. 반면에 무경운 처리구에서는 녹비 투입에 따른 N<sub>2</sub>O 배출에 미치는 영향은 경운 처리구에 비해 낮았고 통계적인 유의한 차이가 나타나지 않았다(Fig. 5).

즉 본 연구에서 경운 유무에 따라 누적 N<sub>2</sub>O 배출량은 유의하게 감소하였다(*p* < 0.001). 경운처리구인 CF-CT, HV-CT, RY-CT 대비 무경운 처리구의 CF-NT, HV-CT, RY-CT 처리구에서 각각 51.8%, 31.7% 그리고 59.6% 감축되었다. 국내외 연구결과에서도 무경운으로 N<sub>2</sub>O 배출량이 감소되었다는 연구결과가 보고되었다. 배추 재배지에서 무경운을 통해 경운 대비 33.7~76.7% N<sub>2</sub>O 배출이 저감되었고(Kim *et al.* 2011), Omonode *et al.* (2011)은 10년 이상 무경운을

지속한 토양에서 관행 대비 N<sub>2</sub>O 배출량 40%가 감축되었다. 즉 무경운을 통해 토양 교란을 방지하여 질소순환과정의 가속화를 줄일 수 있어 토양으로부터 배출되는 N<sub>2</sub>O를 저감할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 농경지에서 무경운 기간이 지속될수록 N<sub>2</sub>O 배출 저감효과가 증진되는 것으로 보고 있다(Yoo *et al.* 2016). 추후 무경운 농경지의 연차별 N<sub>2</sub>O 배출량 추이와 무경운이 토양의 이화학성에 미치는 영향을 비교 평가하여 무경운이 지속되었을 때 온실가스 배출에 미치는 원인을 파악하고 해석하는 연구가 필요하다.

농경지에서 무경운과 헤어리베치를 투입하는 것은 온실가스 감축 측면에서 두 가지의 효과가 기대된다. 첫 번째 헤어리베치를 투입함으로써 화학비료 사용량을 줄일 수 있어 농경지 토양에서 배출되는 N<sub>2</sub>O를 저감할 수 있고 농업환경 전 과정을 보았을 때, Urea 1kg 생산 시 1.01 CO<sub>2</sub>-eq kg가 배출되는데 질소화학비료 사용량을 줄이면 그만큼 생산과정에 발생하는 온실가스도 줄일 수 있다(Lee *et al.* 2012). 두 번째 무경운을 통해 토양 교란을 방지하여 배출되는 N<sub>2</sub>O 저감과 경운에너지를 사용하지 않기 때문에 농기계 사용에 따른 화석연료 소모량을 줄일 수 있고 배출되는 이산화탄소도 저감할 수 있다. 이러한 무경운과 헤어리베치 투입에 따른 온실가스 저감효과에 대한 평가를 통해 온실가스 감축사업과 연계한 연구 및 향후 농가에 도입이 필요하다. 농업분야 온실가스 감축사업인 배출권거래제 외부사업, 농업농촌 자발적 온실가스 감축사업, 저탄소농축산물 인증제 등을 통한 감축 제도 도입과 같은 정책도 병행되어 추진되어야 할 것이다.

## 적 요

농경지는 농업부문에서 발생하는 온실가스인 N<sub>2</sub>O의 배출원이다. 따라서 농경지에서 N<sub>2</sub>O를 줄일 수 연구가 필요하며, 본 연구에서는 농경지에 작물재배 시 무경운기술을 적용하고, 녹비작물로서 호밀과 헤어리베치를 각각 투입하여 N<sub>2</sub>O 배출량 비교 평가하였다. 재배 기간 중 토양에 질소원이 공급된 초기에 배출량이 높았으며, 토양온도는 20~25°C, 수분함량은 20~30% 범위에서 N<sub>2</sub>O 배출량이 높았다. 작물재배기간 동안 경운 유무와 투입된 질소원에 따른 처리구간 통계적 유의한 차이가 발생했다. 농경지 토양에서 배출되는 N<sub>2</sub>O는 무경운을 통해 CF, HV 그리고 RY

처리구에서 각각 51.8%, 31.7% 그리고 59.6% 감축되었다. 또한 무경운 헤어리베치(HV-NT) 처리구에서 관행(CF-CT) 처리구 대비 59.0% N<sub>2</sub>O 배출을 저감할 수 있었다. 헤어리베치를 투입함으로써 화학비료 사용량을 줄일 수 있고, 무경운을 통해 토양 교란을 방지하여 농경지 토양에서 배출되는 N<sub>2</sub>O를 저감할 수 있었다. 이러한 감축기술에 대한 온실가스 저감효과를 평가하는 연구와 향후 온실가스 감축사업과 연계할 수 있도록 검증 방법을 포함한 방법론 구축 등이 필요하다. 이후 농업분야 온실가스 감축사업인 배출권거래제 외부사업, 농업농촌 자발적 온실가스 감축사업, 저탄소농축산물 인증제 등과 연계하여 농업현장에서 활용할 수 있도록 해야 한다.

## 사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(과제번호: PJ01261402)의 지원에 의해 이루어진 것임.

## REFERENCES

- Beare MH, ML Cabrera, PF Hendrix and DC Coleman. 1994. Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional and no-tillage soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:787-795.
- Burney JA, SJ Davis and DB Lobell. 2010. Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 107:12052-12057.
- Davidson EA, PA Matson, PM Vitousek, R Riley, K Dunklin, G Garcia-Méndez and JM Maass. 1993. Processes of regulating soil emissions of NO and N<sub>2</sub>O in a seasonally dry tropical forest. *Ecology* 74:130-139.
- Firestone MK and EA Davidson. 1989. Microbiological basis of NO and N<sub>2</sub>O production and consumption in soil. In *Exchange of Trace Gases between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere* (Andreae and Schimel, eds.). Wiley, New York.
- Hutchinson GL and GP Livingston. 1993. Use of chamber systems to measure trace gas fluxes. pp. 63-78. In *Agricultural Ecosystem Effects on Trace Gases and Global Climate Change*. ASA Special Publication, Madison, Wisconsin.
- IPCC. 2007. Climate change. In *The Scientific Basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the*

- Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon S (ed.). Cambridge University Press, New York.
- IPCC. 2014. Climate change, synthesis report. In Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, RK Pachauri and LA Meyer (ed.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Iserman K. 1994. Agriculture's share in the emissions of trace gases affecting the climate and some cause oriented proposals for reducing this share. Environ. Pollut. 83:95-111.
- Jian-gang H, Z Yong-li, B Hong-ying, Q Dong, C Jin-yu and W Chun-du. 2007. N<sub>2</sub>O emissions under different moisture and temperature regimes. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 78:284-287.
- Kang SW, DC Seo, SG Lee, YJ Seo, JW Park, JH Ryu, MT Kim, HW Kang, JS Heo and JS Cho. 2013. Effect of incorporation times of green barley and hairy vetch on rice yield in paddy soil with liquid pig manure. Korean J. Environ. Agric. 32:287-293.
- Karlen DL, R Lal, RF Follett, JM Kimble, JL Hatfield, JM Miranowski, CA Cambardella, A Manale, RP Anex and CW Rice. 2009. Crop residues: The rest of the story. Environ. Sci. Technol. 43:8011-8015.
- Kim GY, HC Jeong, KM Shim, SB Lee and DB Lee. 2011. Evaluation of N<sub>2</sub>O emissions with different growing periods (Spring and Autumn Seasons), tillage and no tillage conditions in a Chinese cabbage field. Korean J. Soil Sci. Fertil. 44:1239-1244.
- Kim GY, HC Jeong, YK Son, SY Kim, JS Lee and PJ Kim. 2014. Effect of soil water potential on methane and nitrous oxide emissions in upland soil during red pepper cultivation. J. Korean Soc. Appl. Biol. Chem. 57:15-22.
- Kim, GY, US Na, SI Lee, HC Jeong, PJ Kim, JE Lee, YH Seo, JS Lee, EJ Choi and SU Suh. 2016. Assessment of integrated N<sub>2</sub>O emission factor for Korea upland soils cultivated with red pepper, soy bean, spring cabbage, autumn cabbage and potato. Korean J. Soil Sci. Fertil. 49:720-730.
- Kyoto protocol. 1998. United nation framework convention on climate change. Kyoto, Japan.
- Lee GZ, YS Choi, SK Yang, JH Lee and SY Yoon. 2012. Analysis of consumption of homemade organically processed food analysis of the carbon emission reduction effect from no-tillage in pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivation. Korean J. Org. Agric. 20:503-518.
- NIAST. 2000. Methods of soil and plant analysis. National Institute of Agricultural Sciences and Technology, RDA, Korea.
- Omonode RA, DR Smith, A Ga'l and TJ Vyn. 2011. Soil nitrous oxide emissions in corn following three decades of tillage and rotation treatments. Soil Sci. Soc. Am. J. 75:152-163.
- Paris agreement. 2015. United nation framework convention on climate change. Paris, France.
- RDA. 2006. Fertilizer recommendation standards for various crops. Rural Development Administration, Korea.
- Reay DS, EA Davidson, KA Smith, P Smith, JM Melillo, F Dentener and PJ Crutzen. 2012. Global agriculture and nitrous oxide emissions. Nat. Clim. Chang. 2:410-416.
- Renault P and J Sierra. 1994. Modeling oxygen diffusion in aggregated soils: II. Anaerobiosis in topsoil layers. Soil Sci. Soc. Am. J. 58:1023-1030.
- Skiba UM, LJ Sheppard, J MacDonald and D Fowler. 1998. Some key environmental variables controlling nitrous oxide emissions from agricultural and semi-natural soils in Scotland. Atmos. Environ. 32:3311-3320.
- Yagi K. 1991. Emission of biogenic gas compounds from soil ecosystem and effect of global environment. 2. Methane emission from paddy fields. Soil Fert. Japan 62:556-562.
- Yang SK, YW Seo, JH Son, JD Park, KJ Choi and WJ Jung. 2012. Properties of Pepper growth and yield, cost down with no-tillage organic cultivation in vinyl greenhouse. Korean J. Org. Agric. 20:411-422.
- Yoo J, SH Woo, KD Park and KY Chung. 2016. Effect of no-tillage and conventional tillage practices on the nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions in an upland soil: soil N<sub>2</sub>O emission as affected by the fertilizer applications. Appl. Biol. Chem. 59:787-797.