

## 밭토양에서 챔버 위치와 작물체 유·무에 따른 아산화질소 배출량 차이 분석

정현철<sup>†</sup> · 최은정 · 이종식 · 김건엽 · 소규호

국립농업과학원 농업환경부 기후변화생태과

### The Differences of Nitrous Oxide (N<sub>2</sub>O) Emissions as Crop Presence and Location of Gas Sampling Chambers in Upland

Jeong, Hyun Cheol<sup>†</sup>, Choi, Eun Jung, Lee, Jong Sik, Kim, Gun Yeob and So, Kyu Ho

*Division of Climate Change & Agroecology, Department of Agricultural Environment,  
National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea*

#### ABSTRACT

Nitrous oxide is one of the main sources of greenhouse gases and its concentration has increased from 273 ppb in 1,750 to 315 ppb in 2005. Specially, nitrogen fertilizer used in agricultural soils is considered as an important source of atmospheric N<sub>2</sub>O emission. This study was conducted to estimate the difference of nitrous oxide emission as chamber position on furrow and ridge and crop existence in gas sampling chamber on upland. Four treatments used in this experiment were ① no-fertilizer without crop in chamber on ridge, ② fertilizer application without crop in chamber on ridge, ③ fertilizer application with crop in chamber on ridge, ④ fertilizer application without crop in chamber on ridge and furrow. Nitrous oxide emission at fertilizer application with crop in chamber on ridge were the highest while were the lowest at no-fertilizer without crop in chamber on ridge. There was no significant difference of nitrous oxide emission by chamber position, but total emission by crop existence in chamber was significant difference. Therefore, in order to estimate greenhouse gases emission using chamber method in upland, it should be considered in correlation with crop existence in chamber and characteristic changes like as the soil moisture, microbial flora by crop growth stage.

**Key words:** Nitrous Oxide, Chamber, Ridge and Furrow, Greenhouse Gases

#### 1. 서 론

주요 온실가스 중 하나인 아산화질소(N<sub>2</sub>O)는 1750년 273 ppb에서 2005년 319 ppb로 매년 0.2 ppb 씩 증가하고 있고, 최근에는 그 증가속도가 빨라져 매년 0.8 ppb 증가하고 있다(IPCC, 2006). N<sub>2</sub>O의 급격한 증가는 인간 활동에 의한 것이며(Mosier, 2001), 대기 중 N<sub>2</sub>O의 80% 이상이 농업 활동에 의해 발생한다(Sehy *et al.*, 2003). 농경지에서 발생하는 N<sub>2</sub>O의 주요 원인은 질소 비료 사용 때문이며(Eichner, 1990; Parkin and kaspar, 2006), 이밖에도 유기분뇨, 질소 고정 작물, 녹비 사용 및 수확 후 작물잔사 등에 의해서도 발생한다(Chang *et al.*, 1998; Jeong *et al.*, 2011; Kilian and Werner, 1996, Mckenney

*et al.*, 1993). 2013년 우리나라 농업부문에서 발생한 N<sub>2</sub>O 배출량은 약 8.1백만 톤 CO<sub>2</sub>-eq.으로 N<sub>2</sub>O 총 배출량의 약 58%를 차지하였다(NIR, 2015). 농경지에서 배출되는 온실가스를 측정방법 중 95% 이상이 매뉴얼 챔버법(Chamber method)에 의해 이루어지고 있는데(Rochette and Ericksen-Hamel, 2008), 이 방법은 챔버 제작비용, 시험 포장에서의 설치 편의성과 용이성뿐만 아니라, 미량의 가스 시료를 검출, 포집하는데 가장 효율적이기 때문에 지금까지 가장 많이 사용되고 있다(Chirinda *et al.*, 2010; Denmead, 1979; Fassbinder *et al.*, 2013; Sehy *et al.*, 2003). 그러나 이러한 챔버법은 시간적, 공간적 제약 때문에 토양 중 수분함량이나 강우, 질소 사용 시기 등에 민감한 N<sub>2</sub>O 배출량을 측정하는 데는 한계가 있다(Fassbinder *et al.*,

<sup>†</sup> Corresponding author: [taiji152@korea.kr](mailto:taiji152@korea.kr)

Received October 17, 2016 / Revised October 31, 2016 / Accepted November 4, 2016

2013; Sehy *et al.*, 2003). 우리나라처럼 매번 경운을 하고 고랑과 이랑을 만들어 작물을 수확하는 영농방법의 경우, 챔버의 위치에 따라  $N_2O$  배출량이 달라질 수 있다. 또한, 토양의 물리·화학적 특성 변화뿐만 아니라, 작물의 종류와 온실가스 포집 챔버 내 작물체 존재 유무에 따라 근권에서의 미생물 상이나 질소 동태가 달라질 수 있기 때문에, 챔버법에 의한  $N_2O$  배출량 측정시 다양한 챔버 조건을 고려할 필요가 있다.

본 연구는 우리나라 밭토양에서  $N_2O$  배출량 측정 시 배출에 영향을 미치는 다양한 챔버설치 조건을 고려하여 배출량 차이를 분석하고자 수행하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 토양 특성 및 시험구 처리

밭토양에서  $N_2O$  배출량 측정시 챔버 내의 작물체 유무에 따른 배출량과 고랑과 이랑의 특성을 고려한 챔버 위치에 따른 배출량 차이를 분석하기 위해 전북 완주군 이서면에 위치한 400  $m^2$ 의 국립농업과학원내 밭포장에서 연구를 수행하였다. 시험 전 토양의 화학적 특성은 pH 7.9, EC 0.51  $dS m^{-1}$ , 유기물함량 15.4  $g kg^{-1}$ 으로 Table 1과 같다. 이번에 연구를 수행한 시험포장은 물빠짐이 불량하여 미사식양질 토양으로 40 cm 가량 객토한 토양이다. 우리나라 밭토양에 비해 유기물 함량이 낮은 편으로 유기물함량은 Tyurin법을 이용하여 분석하였다(NAAS, 2010).

공시품종은 배추(불암플러스)로 2015년 9월 2일 정식하였고, 재식거리는 이랑거리 60 cm, 포기거리 45 cm로 하였다. 시

비는 농촌진흥청 작물별 시비처방기준(RDA, 2010)에 준하여  $N-P_2O_5-K_2O$ 를 32.0-7.8-19.8  $kg 10a^{-1}$  표준시비하였다. 질소의 경우, 기비는 9월 1일에 사용하였고, 1차 추비는 9월 18일, 2차 추비는 10월 5일로 총 3회에 걸쳐 분시하였다. 질소 무처리구의 경우, 질소를 제외한 인산과 가리만 표준시비하였다. Table 2는 질소 시용 유무, 챔버 내 작물체 유무 및 고랑과 이랑에서의 챔버 위치에 따른 시험구 처리를 나타낸다. 시험구 처리는 이랑위에 챔버를 설치하고, 챔버 내에 작물이 없는 상태에서 질소 비료를 사용하지 않은 무처리(처리 1), 이랑위에 챔버를 설치하고, 챔버 내에 작물이 없는 상태에서 질소 비료를 표준시비한 처리(처리 2), 이랑 위에 챔버를 설치하고, 챔버 내에 작물이 있는 상태에서 질소 비료를 표준시비한 처리(처리 3), 이랑과 고랑에 걸쳐서 챔버를 설치하고, 작물이 없는 상태에서 질소 비료를 표준시비한 처리(처리 4)로 네 가지 처리를 하였다.

### 2.2 챔버 디자인

이산화탄소( $CO_2$ )와 메탄( $CH_4$ )을 측정하기 위해 처음 제작된 챔버(Static chamber)는 농경지에서  $N_2O$  배출량 측정 시에도 사용되고 있다(Raich *et al.*, 1990). 이번 연구에서 사용된 챔버는 두 가지 형태로 제작하였다. 이랑 위에 설치하는 챔버의 경우, 이랑의 넓이와 작물체 크기를 고려하여 가로, 세로, 높이가 각각 45, 45, 50 cm가 되도록 제작하였고, 이랑과 고랑 위에 설치하는 챔버의 경우, 이랑의 넓이와 고랑의 간격을 고려하여 가로, 세로, 높이를 각각 80, 45, 90 cm가 되도록 제작하였다. 챔버의 재질은 3 mm 투명 아크릴을 이용하였고, 온

Table 1. Chemical properties of soil collected shortly before this experiment

Soil texture	pH (1:5 $H_2O$ )	EC $dS m^{-1}$	OM $g kg^{-1}$	Av. $P_2O_5$ $mg kg^{-1}$	Ex. cation		
					K	Ca	Mg
					---- $cmolc kg^{-1}$ ----		
Fine silty	7.94	0.51	15.4	216	0.2	5.9	2.3

Table 2. N fertilizer application, chamber location and crop presence in chambers

	Treatment 1	Treatment 2	Treatment 3	Treatment 4
Fertilizer application	No	Yes	Yes	Yes
Crop in chamber	No	No	Yes	No
Chamber location	Ridge	Ridge	Ridge	Furrow and ridge
Chamber size (W×L×H, cm)	45×45×50	45×45×50	45×45×50	80×45×90

실가스 시료 포집 시 외부 공기 차단을 위해 바닥부분과 뚜껑 사이에 물을 넣어줄 수 있는 틀을 만들었다. 또한 주사기를 이용해 온실가스를 포집할 수 있도록 뚜껑의 상단에 가스 포집 밸브를 설치하였다.

### 2.3 시료채취 및 분석

배추 정식 후 N<sub>2</sub>O 포집은 IPCC(1996) 가이드라인과 GPG (2000, 2003)에 준하여 오전 10시와 12시 사이에 주 2회 포집하였다. 온실가스 포집 시 초기농도와 30분 후의 가스를 60 mL 주사기를 이용하여 포집하고, μ-ECD detector가 장착된 가스크로마토그래피(Agilnet, 7890A)를 이용해 분석하였다. 가스 크로마토그래피의 분석조건은 Table 3과 같다.

온실가스 포집 시 배출량 계산을 위해 챔버의 체적, 챔버 내 30분 전·후의 온도변화 등도 동시에 측정하였다. 가스 크로마토그래피에 의해 정량 분석된 N<sub>2</sub>O는 아래 식 (1)에 따라 플럭스를 계산하였다.

처리 간 통계분석은 XLSTAT 2015를 사용하여 Duncan 검정을 수행하였다.

$$N_2O \text{ flux} = \rho \cdot V \cdot A^{-1} \cdot \Delta c \cdot \Delta t^{-1} \cdot 273 \text{ T}^{-1} \quad (1)$$

ρ : 가스밀도(mg m<sup>-3</sup>)

A : Chamber 바닥면적(m<sup>2</sup>)

Table 3. Gas chromatographic analysis conditions for N<sub>2</sub>O measurement

Model	Agilent 7890A	
Detector	μ-ECD	
Packing material	Hayesep Q	
Column	Materials	UltiMetal
	O.D. × length	1/8" × 1.83 m
Carrier gas	CH <sub>4</sub> 5% /Ar 95%	
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.	
Loop	2 mL	

V : Chamber내 공기체적(m<sup>3</sup>)

Δc/Δt : Chamber 내 가스농도의 평균 증가속도(10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> hr<sup>-1</sup>)

T : Chamber 내 평균온도(K)

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 질소 처리 유·무에 따른 N<sub>2</sub>O 배출량

Fig. 1(a)는 이랑 위에 챔버를 설치하고, 챔버 내에 작물이 없는 상태에서 질소 비료 사용 유·무에 따른 N<sub>2</sub>O 배출량 변화를 나타낸다. 재배기간 동안 N<sub>2</sub>O 배출량은 비료를 처리하지 않은 처리구(처리 1)에서는 큰 변화가 없었고, 질소 비료를 표준시비한 처리구(처리 2)에서는 변화가 컸다. 특히 질소 비료를 사용한 시점인 9월 1일(기비), 9월 18일(1차 추비), 10월 5일(2차 추비) 이후 3~4일간 배출량이 급격히 증가하였고, 기비를 준 시점에서 배출량이 가장 크게 증가하였는데, 이는 기비량이 추비량보다 많았기 때문인 것으로 생각된다. 질소 비료를 준 후 N<sub>2</sub>O 배출량이 급격히 증가한 이유는 토양에 투입된 질소가 산화조건 밭토양에서 빠르게 N<sub>2</sub>O로 탈질되었기 때문이다. Eichner(1990)와 Bouwman(1996)도 농경지 토양에서의 N<sub>2</sub>O 배출은 질소 투입과 직접적으로 연관이 있다고 하였고, 특히 비료를 투입한 시점에서 배출량 변화가 급격히 일어난다고 하였다. Fig. 1(b)는 재배기간 동안의 N<sub>2</sub>O 총 누적 배출량을 나타낸다. 재배기간 동안의 총 배출량을 누적한 결과, 또한 질소를 표준사용한 처리구에서 81.8 mg m<sup>-2</sup>로 질소를 처리하지 않은 처리구의 배출량인 24.7 mg m<sup>-2</sup>보다 3배 가까이 배출량이 많음을 확인할 수 있었다.

농경지에서 발생하는 온실가스 중 메탄(CH<sub>4</sub>)은 N<sub>2</sub>O와는 달리 주로 벼재배 논에서 토양이 환원상태(Eh가 -200 mv 이하)일 때 벼의 통기조직을 통해 배출되기 때문에, 챔버 실험 시 챔버 내에 벼를 넣어둔 조건에서 온실가스를 측정한다. 반면에, 밭토양 산화조건에서 주로 배출되는 N<sub>2</sub>O는 작물체가 아닌 토양에서 직접 배출되기 때문에 챔버를 이용한 온실가스 측정 실험 시 대부분 작물을 챔버 내에 넣지 않고 실험하는게 일반적이다 (Raich *et al.*, 1990). 밭토양에서 챔버 내 작물 유·무에 따른 N<sub>2</sub>O 배출량 변화는 Fig. 2(a)와 같다. 두 처리 모두에서 N<sub>2</sub>O 배출량은 작물 수확 2주 전까지 작물 존재 유·무에 상관없이 비슷한 배출 패턴 양상을 보였다. 그러나 수확 2주 전인 11월 5일 이후 챔버 내에 작물이 있는 처리구에서 배출량이 5.3 mg m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>까지 급격히 증가하였다. 이번 시험에서는 일반적으로 작물 재배기간 중에만 온실가스

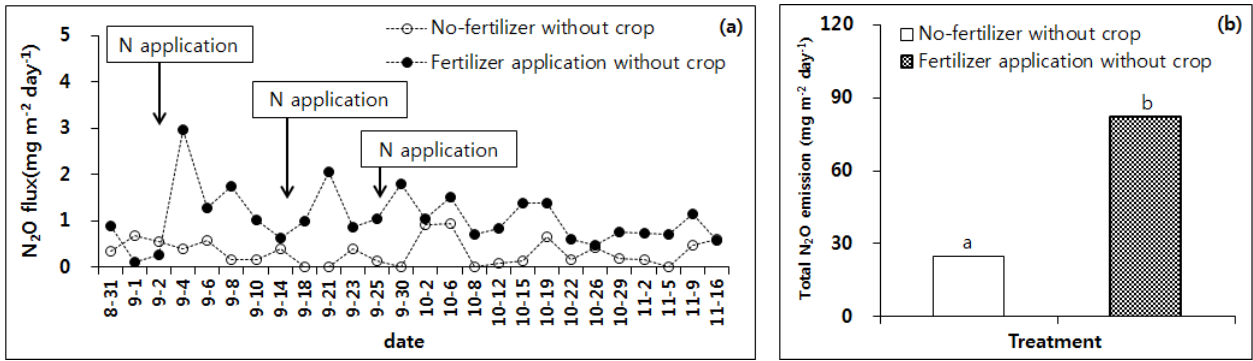


Fig. 1. Changes of N<sub>2</sub>O flux (a) and comparison of total N<sub>2</sub>O emission (b) after N fertilizer treatment. Different letters on column top indicate significant difference by Duncan's multiple range test at  $P < 0.05$ .

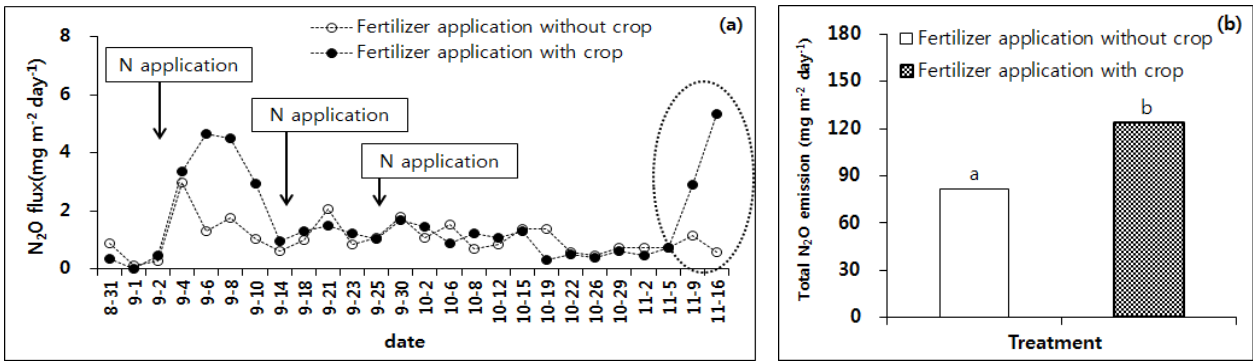


Fig. 2. Changes of N<sub>2</sub>O (a) flux and comparison of total N<sub>2</sub>O emission (b) measured chambers over growing crops. Different letters on column top indicate significant difference by Duncan's multiple range test at  $P < 0.05$ .

배출량을 측정하기 때문에 수확 후에는 배출량을 측정하지 못했다. 작물이 존재하는 챔버에서 수확 직전 배출량 증가를 볼 때 수확 후에도 배출량을 지속적으로 측정했다면 배출량은 더 증가했을 수도 있을 것으로 생각된다. 이러한 배출량 증가는 여러 측면에서 원인을 예측해 볼 수 있는데, 작물 뿌리 근권 내 미생물 상의 변화와 작물에 의한 수분함량의 변화 등도 주요 원인이라고 사료된다(Denmead, 1979; Klemetsson *et al.*, 1988; Wagner-Riddle and Thurtell 1998). Fig. 2(b)는 재배 기간 중 총 누적배출량을 나타낸다. 챔버 내 작물이 존재한 처리구에서의 수확 2주전 N<sub>2</sub>O 배출량의 급격한 증가량은 작물체가 없는 처리구의 총 배출량보다 25% 이상 많음을 확인할 수 있었다. 챔버 내 작물체 존재 유무에 따른 배출량 변화는 챔버를 이용한 온실가스 배출량 측정 시 고려되어야 하는 요인 중에 하나일 것으로 생각된다. 배출량 증가의 직접적인 원인 분석을 위해서는 생육 단계별 근권에서의 미생물상 변화, 토양 깊이별 수분함량 변화 등의 체계적인 측정이 필요할 것으로 생각된다.

우리나라 대부분의 밭토양에서 작물 재배 시 매년 경운을 하고, 고랑과 이랑을 만들어 작물을 재배하는데, 온실가스 포집 챔버를 설치할 경우 고랑과 이랑의 특성을 고려하지 않고, 일반적으로 이랑 위에 챔버를 설치한 상태에서 배출량을 측정한다. 그러나 이랑 위에서만 챔버를 설치해 가스를 포집할 경우 근권의 분포와 질소 이용 등이 달라질 수 있고, 강우 등에 의한 질소 유출 등 N<sub>2</sub>O 배출에 영향을 미칠 수 있다. Fig. 3은 챔버의 위치에 따른 밭 토양에서의 N<sub>2</sub>O 배출량 변화를 나타낸다. 이랑 위에 설치한 챔버에서의 배출량과 이랑과 고랑을 포함하여 설치한 챔버에서의 N<sub>2</sub>O 배출량은 시기에 따라 약간의 차이는 보였으나(Fig. 3(a)), 총 배출량 (Fig. 3(b))은 81.9 mg m<sup>-2</sup>와 84.4 mg m<sup>-2</sup>로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 처리 간 N<sub>2</sub>O 총 배출량 차이를 나타낸다. 챔버 내에 작물이 있는 처리구(T3)에서 배출량이 가장 많았고, 챔버 내 작물체가 없는 무처리구(T1)에서 배출량이 가장 낮은 것으로 분석되었다. 챔버 내에 작물이 없는 상태에서 이랑위에 설치한 챔버 처리구(T2)와 이랑과 고랑을 포함하여 설치한 챔버

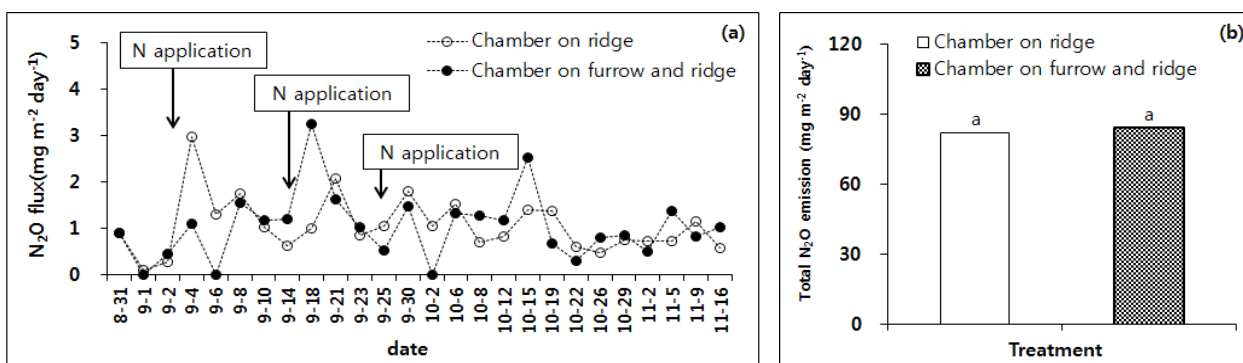


Fig. 3. Changes of N<sub>2</sub>O flux (a) and comparison of total N<sub>2</sub>O emission (b) measured chambers placed on the furrow and the ridge. Different letters on column top indicate significant difference by Duncan's multiple range test at  $P < 0.05$ . The same letters in the Figure indicate no difference at 0.05 significance level.

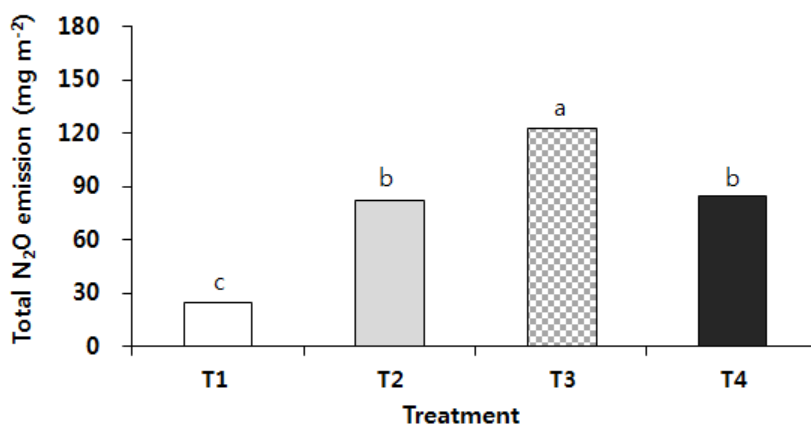


Fig. 4. Comparison of total N<sub>2</sub>O emissions affected by chamber location and presence of crops in chambers. Different letters on column top indicate significant difference by Duncan's multiple range test at  $P < 0.05$  (T1: no-fertilizer without crop in chamber on ridge, T2: fertilizer application without crop in chamber on ridge, T3: fertilizer application with crop in chamber on ridge, T4: fertilizer application without crop in chamber on ridge and furrow).

처리구(T4)간 총배출량은 차이가 없는 것으로 분석되었다.

#### 4. 결론

이번 연구를 통해 우리나라 농경지 밭토양에서 챔버를 이용한 N<sub>2</sub>O 배출량 측정 시 챔버의 위치와 챔버 내 작물체 유무에 따른 N<sub>2</sub>O 배출량 차이를 확인할 수 있었다. 농경지 토양에서의 N<sub>2</sub>O 배출량은 질소 투입에 직접적인 영향을 받으며, 챔버 위치나 작물체 유무에 상관없이 질소를 처리하지 않은 무처리구에서 배출량이 가장 적었고, 질소를 사용한 처리구에서 배출량이 높았다. 특히 질소 비료를 사용한 직후에는 배출량이 급증함을 확인할 수 있었다. 질소 비료를 표준시비한 처리구 중에서는 챔버 내에 작물이 있는 처리구에서 배출량이 가

장 높았고, 챔버가 고랑에 놓인 처리와 고랑과 이랑을 포함하여 설치한 챔버 처리구 간에 총 배출량 차이는 없었다. 일반적으로 농경지 토양에서의 N<sub>2</sub>O 배출은 질소 투입원(화학비료, 가축분뇨, 작물잔사 환원 등)과 질소 투입량, 질소 투입 방법 등에 직접적인 영향을 받지만, 챔버를 이용한 N<sub>2</sub>O 현장 실험 시 챔버 내 작물체의 영향을 고려한 온실가스 분석이 필요할 것으로 생각된다. 특히 작물의 종류와 생육 단계별 특성, 그에 따른 토양 근권 내 다양한 변화(미생물 상 변화, 질소 동태, 토양 내 수분함량 등) 등을 고려한 원인 분석뿐만 아니라, 생육단계를 고려한 작물별 N<sub>2</sub>O 배출 특성 규명이 필요할 것으로 생각된다. 우리나라 농경지 토양에서의 N<sub>2</sub>O 배출은 지구 온난화지수(Global Warming Potential)와 화학비료 생산량 그리고 향후 국가 온실가스 감축목표 달성 등을 고려할 때 주요

하게 다루어져야 할 온실가스 중 하나이다. 특히 국가 단위의 국가 고유배출계수 개발 시 우리나라 밭 토양 특성과 작물별 특성을 고려한 챔버법 적용이 반드시 필요할 것으로 생각된다. 따라서 우리나라 농경지 특성을 반영한 온실가스 측정방법(챔버법)을 정립하고, 배출 특성 구명을 위한 추가적인 연구 또한 필요할 것으로 생각된다.

## 사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(PJ01003001) 지원에 의해 이루어진 것임.

## REFERENCES

- Bouwman AF. 1996. Direct emissions of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 46: 53-70.
- Chang C, Cho CM, Janzen HH. 1998. Nitrous oxide emission from long-term manured soils. *Soil Science Society of America J* 62:677-682.
- Chirinda N, Carter MS, Albert KR, Ambus P, Olesen JE, Porter JR, Petersen SO. 2010. Emissions of nitrous oxide from arable organic and conventional cropping systems on two soil types. *Agric Ecosyst Environ* 136:199-208.
- Denmead O. 1979. Chamber systems for measuring nitrous oxide emission from soils in the field. *Soil Sci Soc Am J* 43:89-95.
- Eichner MJ. 1990. Nitrous oxide emission from fertilizer source on denitrification and nitrous oxide emissions in a maize-field. *J of Environmental Quality* 19:272-280.
- Fassbinder JJ, Schultz NM, Baker JM, Griffis TJ. 2013. Automated, low-power chamber system for measuring nitrous oxide emissions. *J of Environ Quality* 42:604-614.
- Greenhouse Gas Inventory and Research Center(GIR). 2015. National greenhouse gas inventory report of Korea. Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea. Ministry of Environment.
- IPCC. 1996. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
- IPCC. 2006. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
- Jeong HC, Kim GY, Lee DB, Shim KM, Lee SB, Kang KK. 2011. Assessment on nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions in Korea agricultural soils in 2011. *Korean J Soil Sci Fert* 44(6):1207-1213.
- Kilian S, Werner D. 1996. Enhanced denitrification in plots of N<sub>2</sub>-fixing faba beans compared to plots of a non-fixing legume and non-legumes. *Biology and Fertility of Soils* 21:77-83.
- Klemmedtsson L, Svensson BH, and Rosswall T. 1988. Relationships between soil moisture content and nitrous oxide production during nitrification and denitrification. *Biol Fertil Soils* 6:106-111.
- McKenny DJ, Wang SW, Drury CF, Findlay WI. 1993. Denitrification and mineralization in soil amended with legume, grass and corn residues oil. *Science Society of America J* 57:1013-1020.
- Mosier AR 2001. Exchange of gaseous nitrogen compounds between agricultural systems and the atmosphere. *Plant and Soil* 228:17-27.
- National Academy of Agricultural Science. 2010. Analysis of soil chemical. RDA, Suwon, pp 51-66.
- Parkin T, Kaspar T. 2006. Nitrous oxide emissions from corn-soybean systems in the Midwest. *J Environ Qual* 35: 1496-1506.
- Raich JW, Bowden RD, Steudler PA. 1990. Comparison of two static chamber techniques for determining carbon dioxide efflux from forest soils. *Soil Sci Soc Am J* 54: 1754-1757.
- RDA. 2010. Fertilizer recommendation for crops. Rural Development Administration, Suwon, Korea.
- Rochette P, Eriksen-Hamel N. 2008. Chamber measurements of soil nitrous oxide flux: Are absolute values reliable? *Soil Sci Soc Am J* 72:331-342.
- Rural Development Administration. 2010. Fertilizer recommendation for crops. Rural Development Administration, Suwon, Korea.
- Sehy U, Ruser R, Munch J. 2003. Nitrous oxide fluxes from maize fields: Relationship to yield, site-specific fertilization, and soil conditions. *Agric Ecosyst Environ* 99:97-111.
- Wagner-Riddle C, Thurtell G. 1998. Nitrous oxide emissions from agricultural fields during winter and spring thaw as affected by management practices. *Nutr Cycling Agroecosyst* 52:151-163.