

## 온실가스 배출 파라메타를 이용한 고추밭 토양의 N<sub>2</sub>O 배출 예측

김건엽\* · 송범헌<sup>1</sup> · 현병근 · 심교문 · 이정택 · 이종식 · 김원일 · 신중두

농촌진흥청 농업과학기술원 환경생태과, <sup>1</sup>충북대학교 식물자원학과

### Predicting N<sub>2</sub>O Emission from Upland Cultivated with Pepper through Related Soil Parameters

Gun-Yeob Kim\*, Beom-Heon Song<sup>1</sup>, Byung-Keun Hyun, Kyo-Moon Shim,  
Jeong-Taek Lee, Jong-Sik Lee, Won-Il Kim and Joung-Du Shin

National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon 441-707, Korea

<sup>1</sup>Department of Agronomy, College of Agriculture, Chungbuk National University, Cheeongju 361-763, Korea

An empirical model of nitrous oxide emission from agricultural soil has been applied. It is based on the relationship between N<sub>2</sub>O and three soil parameters, soil mineral N(ammonium plus nitrate) content in the topsoil(0-15cm), soil water-field pore space, and soil temperature, determined in a study on clay loam and sandy loam at the pepper field in 2004.

For comparisons between estimated and observed values of N<sub>2</sub>O emissions in the pepper field, it was investigated that N<sub>2</sub>O amount in the clay loam and sandy loam were overestimated as 12.2% and less estimated as 30%, respectively. However, N<sub>2</sub>O emissions were overestimated as 27.1% in the clay loam and 14.7% in the sandy loam from N<sub>2</sub>O gas samples collected once a week at the same time analyzing soil parameters.

This modelling approach, based as it is well established and widely used soil measurements, has the potential to provide flux estimates from a much wider range of agricultural sites than would be possible by direct measurement of N<sub>2</sub>O emissions.

**Key words :** Soil parameter, N<sub>2</sub>O emission, Empirical model

## 서 언

아산화질소(N<sub>2</sub>O)의 대기농도는 지난 몇 년간 가속화하여 증가하고 있다. 아산화질소의 대기중 농도는 1998년 현재 312 ppbv이지만 매년 0.6~0.9 ppbv 정도 증가하고 있다고 하였으며(Prinn et al, 1990), 지구온난화잠재력은 이산화탄소의 310배(메탄은 21배 ; IPCC, 1996)에 이르고 지구온난화에 5%이상 기여하는 무시할 수 없는 온실가스이다.

1997년 12월 170여 개국이 가입한 기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change: UNFCCC)의 교토의정서(Kyoto Protocol)에서 온실가스 배출량을 1990년 수준으로 감축하기로 결정하였으며, 아산화질소를 포함한 온실가스 감축을 위한 국가 전략을 수립·시행하고 이를 공개해야 하

며 온실가스배출 통계자료와 정책이행에 대한 보고서를 협약 당사국총회(Conference of the Parties, COP)에 제출하도록 합의 하였다.

현재 사용되고 있는 국가인벤토리 산출은 IPCC의 방법론 2단계(Phase II methodology)에 의해 농경지로부터 발생하는 아산화질소는 토양으로부터 부가된 전체 질소의 1.25%를 IPCC 배출계수인 디폴트 값으로 정하고 있다(IPCC, 1997; Bouwman, 1996). 이런 디폴트 값은 아산화질소 배출에 영향이 미칠 수 있는 작물의 품종 또는 종류, 토성, 물관리, 재배관리, 기후 등을 고려하지 않은 것이다. 예를 들면 국내에 농경지에서 재배되고 있는 작물의 종류, 토성, 기상 등이 다양한데 비해 IPCC 배출계수를 적용하여 국내 온실가스 배출량을 산출하고 있다. 그러나 앞으로 농경지에서 아산화질소 배출을 평가하기 위해서는 환경적인 변이를 고려한 방법론 개발이 이루어져야 할 필요가 있다.

아산화질소 배출 평가 방법을 개발하기 위한 노력들

접 수 : 2006. 6. 16 수 리 : 2006. 7. 25

\*연락처 : Phone: +82312900240,  
E-mail: gykim@rda.go.kr

중에는 모델링 접근도 포함되어야 할 것이다. 이러한 온실가스 배출 예측모델 중 처음 적용된 모델이 미국의 TRAGNET(TRAce Gas NETwork) 모델이며, 최근에 Frolking et al.(1998)에 의해 4개의 모델을 이용하여 온실가스 배출 예측을 비교하고 있다. 그러나 위의 모델들은 자연 생태계와 광역적 범위의 지역에서 적용되는 모델이며 그 외 작은 규모의 지역모델로서 적용할 수 있는 경험 모델을 이용할 수 있는데, 이 모델은 아산화질소배출과 관련된 토양 파라메타를 직접 측정할 것을 기초로 각 하부 모델을 고려하여 배출량을 결정하는 것이다.

본 연구는 고추재배 밭에서 생육기간 동안 N<sub>2</sub>O 배출과 관련된 토양 파라메타인 토양수분, 토양온도, 무기태 질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N+NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N) 등을 측정·분석하여 분석한 파라메타값을 경험 모델을 이용하여 N<sub>2</sub>O 배출의 예측량을 추정하였으며, 포장에서 발생하는 N<sub>2</sub>O 배출량을 실측하여 양자를 비교 분석 하였다.

### 재료 및 방법

시험포장은 수원시에 위치한 농업과학기술원에 위치한 고평동의 식양토와 본량동의 사양토에서 고추를 재배하였으며, 시험 전 토양의 화학성분은 Table 1과 같다. 식양토와 사양토의 2개 토성을 대상으로 토양 검정한 NPK 시비는 식양토는 질소-인산-칼리를 10a 당 19.0-7.9-20.0 kg, 사양토는 7.6-20.5-15.4 kg으로 질소는 3회 분시, 인산은 전량 기비, 칼리는 2회 분시하였고, 식양토와 사양토 각각 돈분퇴비 15 Mg ha<sup>-1</sup>을 사용하였다.

N<sub>2</sub>O flux는 비정체형(non-steady-state) 밀폐 형태인 순환형 상자법(flow-through chamber method)(Denmead, 1979)을 이용하였으며, 설치된 상자는 지름이 0.253 m, 이고 높이가 0.4 m 원통형인 PVC 소재로 제작하였다. N<sub>2</sub>O 배출량 측정은 상자를 3반복으로 설치하여 측정하였으며, N<sub>2</sub>O 배출량을 측정하기 위한 시료는 주 1회, 오전 10시~11시에 60 ml 주사기로 채취하여 분석하였다. 채취한 공기 시료의 아산화질소 기체농도는 10 port와 4 port valve를 장착한 GC-ECD(Varian 3800)를 사용하였고 칼럼은 Porapack Q(80/100 mesh)를 충전한 1/8." × 2 m의

stainless steel tubing column, 그리고 감지기의 온도는 320°C로 하였다. N<sub>2</sub>O 분석 조건은 Table 2와 같다.

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

Detector		ECD
Column	Packing material	Porapack Q(80/100)
	Materials	Stainless steel
	O.D. x length	1/8" x 2m
Carrier gas	N <sub>2</sub>	
Flow rate	30 ml /min (Carrier+make up)	
Temperature (°C)	Column	70
	Injector	80
	Detector	320
Retention time	3.2min	
Concentration of calibration gas	0.5 and 1.0 ppmv	
Loop	N <sub>2</sub> O in N <sub>2</sub> 2 ml	

N<sub>2</sub>O 배출량을 실측하기 위해 토양의 N<sub>2</sub>O가스를 1 주일에 1회 포집하였고 N<sub>2</sub>O 배출량을 예측하기 위한 분석은 같은 시간 동시에 토양 파라메타, 즉 토양수분, 토양온도 등을 측정하고, 무기태 질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N+NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)를 분석하기 위하여 토양 시료를 채취하였다. 토양수분은 관수시점인 -50 kPa내의 범위로 한정하여 텐시오미터로 측정하였다. 그리고 이 외에도 고추의 전 재배기간 동안 1주일에 2회 N<sub>2</sub>O 배출량을 측정하여 작기 기간 전체 배출량을 분석하였다. 이러한 분석 결과를 기초로, 토양 파라메타를 이용하여 경험 모델에 적용한 N<sub>2</sub>O 배출의 예측량과 실제 측정된 실측량을 비교 분석하였다.

N<sub>2</sub>O 배출 예측량은, 아래와 같이 계산하였다.

$$\text{배출량}(g\ 10a^{-1}) = \sum \{N_2O\ \text{배출량}(e_{n+1}+e_n)/2\} \times \{Day(d_{n+1}-d_n)\}$$

e: N<sub>2</sub>O 배출량, d: N<sub>2</sub>O 배출량 측정 사이 날짜 수

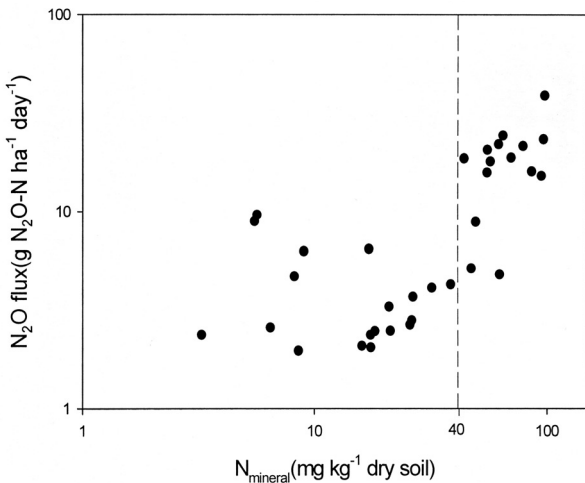
### 결과 및 고찰

N<sub>2</sub>O 플럭스가 1-10 g의 범위에서 경계선을 결정하기 위해 무기태 질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N+NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)에 대한 N<sub>2</sub>O 배출 플럭스 관계를 산포도로 표시하였다(Fig. 1).

**Table 1. Chemical properties of the soil used in the experiment.**

Soil texture	pH (1:5 H <sub>2</sub> O)	OM	Av. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	Exchangeable cation			EC
						K	Ca	Mg	
		g kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	----- mg kg <sup>-1</sup> -----		----- cmol. kg <sup>-1</sup> -----			dS m <sup>-1</sup>
Clay loam	5.4	22	362	83.1	83.9	0.6	5.8	5.2	0.31
Sandy loam	5.8	21.1	482.2	31.8	53.4	0.3	3.8	0.6	0.13

N<sub>2</sub>O 플럭스가 1-10 g의 범위에서 무기태질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N+NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)는 1-40 mg kg<sup>-1</sup>으로 나타났으며, 40 mg kg<sup>-1</sup> 이상에서는 N<sub>2</sub>O 플럭스는 대부분 10 g이상이었다. 이는 Conen(2000)의 경계선인 N<sub>2</sub>O 플럭스가 1-10 g의 경계선 범위에서 무기태질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N+NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)가 1-10 mg kg<sup>-1</sup>과는 다른 결과를 보였다. Ryden et al.(1983)은 토양 내 NO<sub>3</sub>-N 농도가 5 mg kg<sup>-1</sup> 이하이면 N<sub>2</sub>O 플럭스가 낮아지는 경향을 보인다고 보고하였다. 전체적으로 N<sub>2</sub>O 플럭스는 100 mg kg<sup>-1</sup>을 초과하지 못하였으며 N<sub>2</sub>O 플럭스는 '낮음' (1-10 g), '중간' (10-100 g)으로 경계선을 결정 할 수 있었다(Fig. 1).



**Fig. 1. Determination of threshold value(indicated by vertical dotted line) below which N<sub>mineral</sub> limits N<sub>2</sub>O flux to values <40 g N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>.**

Webb(1972)에 의하면 empirical 모델은 근본적으로 파라메타의 값의 범위와 N<sub>2</sub>O배출의 관계를 결정하기 위해 경계선으로 접근한다고 하였다. 경계선 모델은 각 파라메타의 경계선에 대한 각각의 기능을 정하고 그 기능을 전체적으로 해석하는 것이다. 그리고 N<sub>2</sub>O 배출에 대한 파라메타를 Smith et al.(1998)은 토양 중 고상을 제외한 액상과 기상부분을 고려한 WFPS(Water Filled Pore Space), 토양온도, 표토의 무기태질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N+NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)라고 하였으며 N<sub>2</sub>O배출과 3개 파라메타와 유의성이 있다고 하였다. Conen(2000)은 목초 재배토양에서 WFPS, 토양온도, 무기태질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N+NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N) 등 3개 파라메타를 이용하여 N<sub>2</sub>O 배출 플럭스의 범위를 높고 낮음에 대한 조건들을 규정하기 위해 경계선을 사용하였으며, N<sub>2</sub>O배출을 '낮음' (1-10 g), '중간' (10-100 g), '높음' (100-1000 g N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>)으로 배출 범위를 분류하였다.

Fig. 2에서 WFPS와 토양온도의 관계를 N<sub>2</sub>O 플럭스를 1-10 g, 10-100 g N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup> 등의 범위를

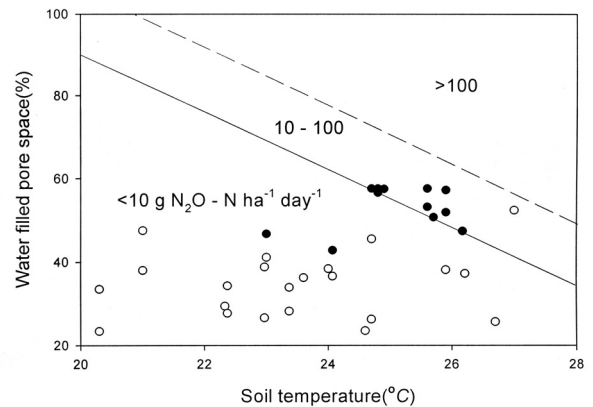
서로 다른 기호를 이용하여 산포도로 표시하였다. N<sub>2</sub>O 플럭스가 10-100 g N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup> 범위 보다 낮을 때(<10 g)와 높을 때(>100 g), 그 사이에 경계선을 정하였다. Conen에 의한 이 경계선은 10 g N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup> 이하일 때,

$$(\% \text{ WFPS}) + \{2 \times \text{토양온도} (^{\circ}\text{C})\} = 90; \quad (1)$$

그리고 100 g N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>을 초과할 때,

$$(\% \text{ WFPS}) + \{2 \times \text{토양온도} (^{\circ}\text{C})\} = 105. \quad (2)$$

의 경계선 결정식을 이용하였다. 그리고 N<sub>2</sub>O 플럭스와 토양온도의 관계에서 Powelson et al.(1988)은 토양온도가 5 이하에서는 N<sub>2</sub>O 배출이 10 g N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>을 초과하지 않는다고 하였다. 그러므로 (1), (2)의 식을 종합하여 나타낸 Table 3은 Conen(2000)의 N<sub>2</sub>O 배출 범위의 예측에 대한 경험 모델의 기준표이다. 여기에서 N<sub>2</sub>O 플럭스와 무기태질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N+NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)의 경계선 파라메타값을 40 mg kg<sup>-1</sup>으로 수정하여 적용하였다.



**Fig. 2. Defining lower limits to WFPS and soil temperature conditions, below which N<sub>2</sub>O flux is limited to values <10(continuous line) or <100 g N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>(dashed line). Symbols indicate WFPS/soil temperature combinations at which observed N<sub>2</sub>O flux was <10(○), 10-100 g N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>(●), when N<sub>mineral</sub> was not limiting.**

경험 모델을 적용하기 위하여 고추 생육기간동안 식양토와 사양토에서 고추 재배포장에서 N<sub>2</sub>O 배출량과 WFPS, 토양온도, 무기태질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N+NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N) 등을 실제 측정된 값과 Table 3의 경험 모델의 기준표를 이용하여 N<sub>2</sub>O 배출 예측량은 Fig. 3과 같다. N<sub>2</sub>O 배출량의 예측값이 식양토와 사양토 모두 실측값보다 높게 나타났다. 이는 기온이 높고 토양수분이 많으며, 무기태 질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N+NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)의 농도가 높을 때 N<sub>2</sub>O 배출량의 실측값보다 예측값이 높게 나타난다고 한 Conen의 결과와 일치하였다. 식양토와 사양토에서 예측과 실측 N<sub>2</sub>O 플럭스의 흐름은 비슷한

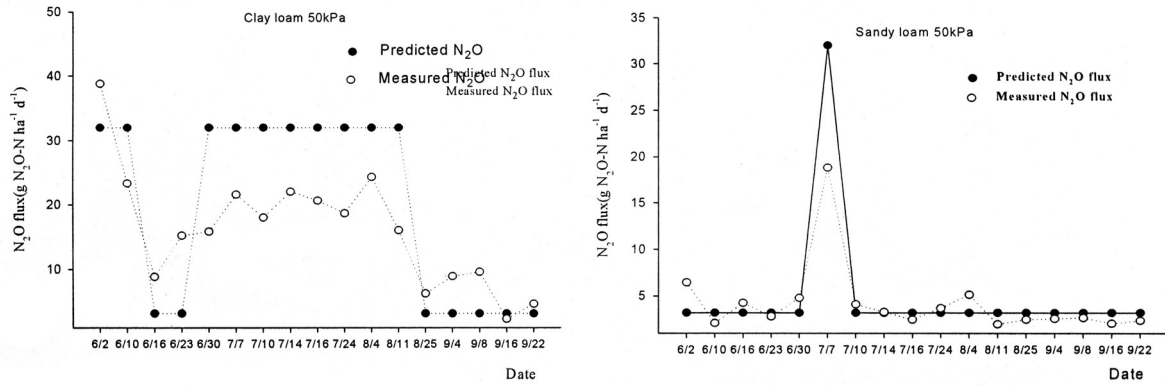
**Table 3. Criteria for prediction of N<sub>2</sub>O flux ranges.**

Flux range (g N <sub>2</sub> O-N ha <sup>-1</sup> day <sup>-1</sup> )	N <sub>mineral</sub> N(mg kg <sup>-1</sup> soil)	Soil temp. (°C)		[%WFPS] + 2[Temp in °C] (dimensionless value)
1~10	<40	<5	and/or	<90
10~100	>40	>5	and	90-105
100~1000	>40	>5	and	>105

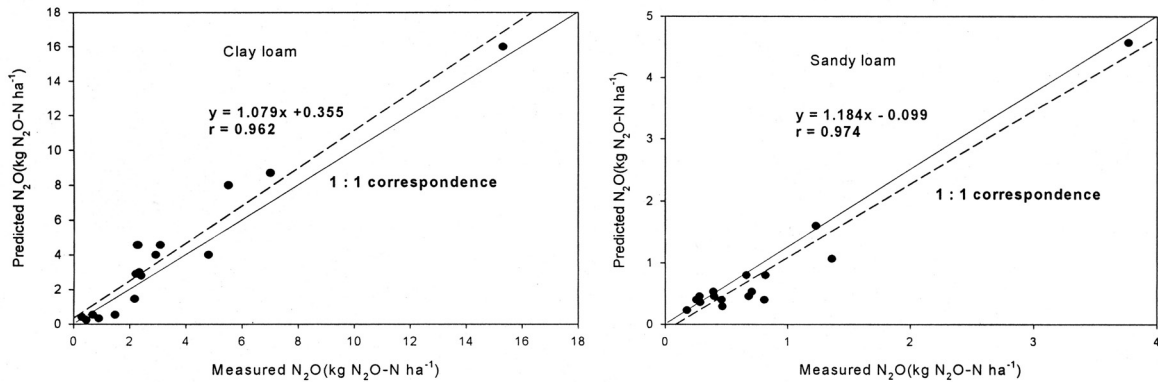
양상을 보였으며, 전체 N<sub>2</sub>O 배출량은 실측값과 예측값 모두 사양토보다 식양토에서 높게 나타났다. 그리고 식양토와 사양토에서 전 생육기간 동안 WFPS는 60% 이하로 나타났는데, Davidson (1991)은 토양이 건조한 상태(<60%)에서도 N<sub>2</sub>O 배출량이 많은 것은 질산화작용에 의한 것이라고 하였고, WFPS가 60% 이하일 때 질산화작용이 발생한다고 하였다. 식양토에서 생육초기에 N<sub>2</sub>O 배출량이 많은 것은 뿌리의 발달이 빈약하여 질소의 흡수량이 작고, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 농도가 높기 때문에 N<sub>2</sub>O에서 N<sub>2</sub>로 전환이 억제되기 때문이라고 하였다(Weier et al, 1993). 사양토에서 전체 생육기간을 통해 N<sub>2</sub>O 배출량이 많지 않은 것은 배수가 양호하여 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 용탈이 많이 일어난 것에 의한 것으로 생각된다.

N<sub>2</sub>O 배출량을 실제 측정하여 분석한 실측값과 토양 파라메타를 측정하여 N<sub>2</sub>O 배출량을 예측한 값에 대한 1:1 대응한 결과는 Fig. 4와 같다. N<sub>2</sub>O 배출량에 대한 예측값과 실측값의 상관관계가 높은 것으로 나타났다(식양토 r=0.962, 사양토 r=0.974), 이러한 관계는 Velthof et al.(1996)이 초지에서 N<sub>2</sub>O 배출에 대한 경험 모델의 결과와 유사하였다. 이 밖에 N<sub>2</sub>O 배출 예측량의 정밀성 검증은 많은 연구자에 의해 증명되었다(Li et al, 1992; Engel and Priesack, 1993; Parton et al, 1996; Potter et al, 1997).

N<sub>2</sub>O 배출량을 실측하기 위해, 토양 파라메타를 분석하기 위한 시료채취 시간과 동일한 시간에 N<sub>2</sub>O 가스를 1주일에 1회 포집하여 분석한 데이터(based on soil sampling dates only)와 고추의 전 재배기간 동안



**Fig. 3. Measured and predicted N<sub>2</sub>O fluxes from clay loam and sandy loam at the pepper field.**



**Fig. 4. Comparison of predicted and measured seasonal emissions(using only the flux measurements made on dates when soil parameters determined)**

**Table 4. Modelled and measured seasonal N<sub>2</sub>O fluxes.**

Soil texture	Seasonal N <sub>2</sub> O flux(kg N <sub>2</sub> O-N ha <sup>-1</sup> )			
	Predicted	Measured (based on soil sampling dates only)	Predicted	Measured (based on soil sampling dates only)
Clay loam	33.8(127.1)	26.6	33.8(87.8)	38.5
Sandy loam	7.8(114.7)	6.8	7.8(130.0)	6.0

( ): Predicting rate(%)

1주일에 2회 N<sub>2</sub>O 배출량을 측정하여 작기 기간 전체 배출량을 분석한 데이터(all flux measurements included)를 N<sub>2</sub>O 배출량 예측값과 비교하여 예측율을 나타냈다(Table 4). 예측량과 작기 기간 전체 N<sub>2</sub>O 배출량의 비교에서 예측량은 식양토에서 12.2%가 낮게 평가 되었고, 사양토에서는 30%가 높게 평가 되었다. 그리고 토양 파라메타 분석 동시에 1주일에 1회 N<sub>2</sub>O 가스를 포집한 N<sub>2</sub>O 배출량에서는 식양토 27.1%, 사양토 14.7%가 높게 평가 되었다.

### 적 요

수원시에 위치한 농업과학기술원 시험포장인 고평통의 식양토와 본량통의 사양토에서 고추를 재배하였다. 식양토와 사양토의 2개 토성을 대상으로 토양 검정한 NPK 시비에 등분퇴비 25 Mg ha<sup>-1</sup>를 각각 사용하였다. 토양의 N<sub>2</sub>O 배출량 측정을 한 후 동시에 N<sub>2</sub>O 배출에 기여하는 토양수분, 무기태 질소, 지온 등을 측정하였고, 토양수분은 관수시점인 -50 kPa내의 범위로 한정하여 토양의 N<sub>2</sub>O 배출량을 실제 측정하였다. 온실가스 배출량을 예측하기 위해 영국의 경험 모델을 이용하여 N<sub>2</sub>O 배출의 예측값과 실측값을 비교 분석하였다.

N<sub>2</sub>O 배출의 실측량과 무기태 질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>+NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)의 관계에서 무기태 질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N+NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)가 10 mg kg<sup>-1</sup> 이하에서 N<sub>2</sub>O 배출량이 1~10 g N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>로 나타나 N<sub>2</sub>O 배출에 대한 무기태질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N+NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)의 한계선을 구분할 수 있었으며, 실측값인 토양온도와 WFPS(water filled pore space)관계에서도 경험 모델의 배출 추정식인 (% WFPS)+{2×토양 온도(°C)}=90, (% WFPS)+{2×토양 온도(°C)}=105를 증명 하였다. N<sub>2</sub>O 배출의 실측량과 예측량을 1:1 대응한 결과, 식양토와 사양토 각 r=0.962, r=0.974로 나타났다.

고추밭의 N<sub>2</sub>O 배출량을 분석한 결과, 예측량과 작기 기간 전체 N<sub>2</sub>O 배출량의 비교에서 예측량은 식양토에서 12.2%가 낮게 평가 되었고, 사양토에서는 30%가 높게 평가 되었다. 그리고 토양 파라메타 분석 동시에 1주일에 1회 N<sub>2</sub>O가스를 포집한 N<sub>2</sub>O 배출량에서는 식양토 27.1, 사양토 14.7%가 높게 평가 되었다.

향후 경험 모델의 정밀도를 높이기 위해서는 국내 작물재배환경에 맞는 파라메타의 수정이 필요하며 다양한 작물을 대상으로 연구가 있어야 할 것으로 생각한다.

### 인 용 문 헌

Bouwman, A.F. 1996. Direct emissions of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 46:53-70.

Davidson, E.A. 1991. Fluxes of nitrous oxide and nitric oxide from terrestrial ecosystems. In: *Microbial Production and Consumption of Greenhouse Gases: Methane, Nitrous Oxide and Halomethanes*(eds Rogers JE, Whitman WB), pp.219-235. American Soc. of Microbiol., Washington, D.C.

Denmead, O.T. 1979. Chamber systems for measuring nitrous oxide emission from soils in the field. *Soil Sci. Soc. of America J.* 43: 89-95.

Engel, T.H., E. Priesack. 1993. Expert-N, a building block system of nitrogen models as a resource for advice, research, water management and policy, In: *Integrated Soil and Sediment Research: a Basis for Protection* (eds Eijsackers HJP, Hamers T), pp.503-507. Kluwer, Dordrecht.

F. Conen, K.E. Dobbie, and K.A. Smith. 2000. Predicting N<sub>2</sub>O emissions from agricultural land through related soil parameters. *Global Change Biology*. 6:417-426.

Frolking, S.E., A.R. Mosier, and D.S. Ojima. 1998. Comparison of N<sub>2</sub>O emissions from soils at three temperate agricultural sites: simulations of year-round measurements by four models. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 52:77-105.

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). 1996. Revised IPCC guideline for national greenhouse gas inventories: Reference Manual, revised in 1996, IPCC.

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). 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.

Li, C., S. Frolking, and T. Frolking. 1992. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity. *J. of Geophysical Res.* 97:9759-9776.

Parton, W.J., A.R. Mosier, D.S. Ojima, D.W. Valentine, D.S. Schimel, K. Weier, and A.E. Kulmala. 1996. Generalized model for N<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O production from nitrification and denitrification.

- Global Biochem. Cycles. 10:401-412.
- Potter, C.S., R.H. Riley, and S.A. Klooster. 1997. Simulation modelling of nitrogen trace gas emissions along an age gradient of tropical forest soils. *Ecological Modelling*. 97:179-196.
- Powlson, D.S., P.G. Saffigna, and M. Kragt-Cottaar. 1998. Denitrification at sub-optimal temperatures in soils from different climatic zones. *Soil Biol. and Biochem.* 20:719-723.
- Prinn, R.D., R. Cunnold, P. Simmonds, F. Alyea, A. Crawford, R. Fraser, and R. Rosen. 1990. Atmospheric emissions and trends of nitrous oxide deduced from 10 years of ALEGAGE data. *J. Geophys. Res.* 95:18369-18385
- Ryden, J.C. 1983. Denitrification loss from grassland soil in the field receiving different rates of nitrogen as ammonium nitrate. *J. of Soil Sci.* 34:355-365.
- Smith, K.A., P.E. Thomson, H. Clayton, I.P. McTaggart, and F. Conen. 1998. Effects of temperature, water content and nitrogen fertilisation on emissions of nitrous oxide by soils. *Atmospheric Environ.* 32:3301-3309.
- Velthof, G., J.G. Kooops., J.H. Duyzer, and O. Oenema. 1998. Prediction of nitrous oxide fluxes from managed grassland on peat soil using a simple empirical model. *Netherlands J. of Agr. Sci.* 44:339-356.
- Webb, R.A. 1972. Use of boundary line analysis of biological data. *J. of Horticultural Sci.* 47:309-319.
- Weier, K.L., J.W. Doran, J.F. Power, and D.T. Walters. 1993. Denitrification and the dinitrogen/nitrous oxide ratio as affected by soil water, available carbon, and nitrate. *Soil Sci. Soc. of Am. J.* 57:66-72.