

Assessment on Nitrous Oxide (N₂O) Emissions different Nitrogen Application Rates during the Red Pepper Cultivation in Flat Upland

Jong-Eun Lee*, Yeo-Uk Yun, Jin-Il Lee, Yun-Gyu Nam, Gun-Yeob Kim¹, and Sun-Ju Kim²

Chungcheongnam-do Agricultural Research and Extension Services, Yaesan 340-861, Korea

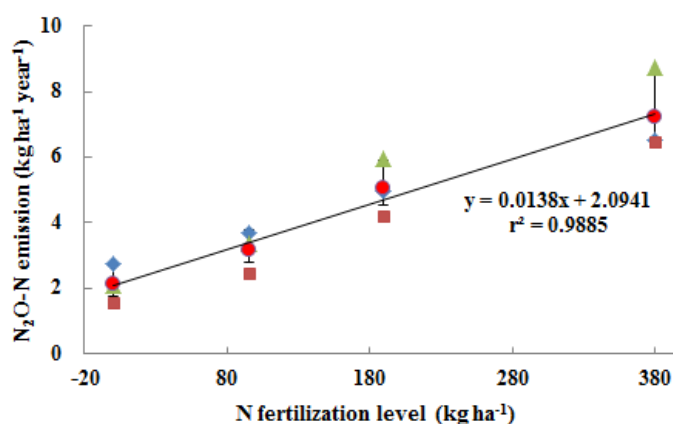
¹National Academy of Agricultural Science(NAAS), RDA, Suin-ro 150, Suwon-si 441-407, Korea

²Department of Bio-environmental Chemistry, Chungnam Natl. Univ., 99 Daehak-ro, Daejeon 305-764, Korea

(Received: January 20 2014, Accepted: February 10 2014)

Generally, nitrogen (N) fertilization higher than the recommended dose is applied during vegetable cultivation for increasing in productivity. However, excessive N application rate beyond plant requirement could cause adverse environmental impact such as nitrate leaching and nitrous oxide emission. In this experiment, the impacts of N fertilization was studied on nitrous oxide (N₂O) emission to standardize the optimum fertilization level for minimizing of N₂O emission as well as most of the crop productivity. Herein, we assessed the N₂O emission in the flat upland soil which was cultivated with different N application rates on red pepper for 3 years (2010~2012). N₂O emission was measured in chemical N fertilizer amounts 0 (N 0), 95 (N 0.5), 190 (N 1.0), 380 (N 2.0) kg ha⁻¹ by using the abnormal shape chamber closed repeating three times. In average for 3 years, the total N₂O emissions of each treatment in field of soybean were 2.110 (N 0), 3.165 (N 0.5), 5.039 (N 1.0), and 7.228 (N 2.0) kg N₂O ha⁻¹ yr⁻¹, respectively. And then the primary regression between nitrogen fertilizer amount and the total N₂O emission was showed as $y = 0.0138x + 2.0942$ ($r^2=0.9885$), and an average of the emission factor was EF₁ 0.0148(0.0118~0.0191) N₂O-N kg N⁻¹ kg⁻¹ from 2010 to 2012. The result was a little higher than the emission default of the IPCC 1996 Guideline (EF₁ 0.0125) when the results are converted into N₂O emission factor.

Key words: Greenhouse gas, N₂O, Emission factor, Red pepper, Nitrogen fertilizer



Relationships between the averaged N₂O emissions across years from 2010 to 2012 and nitrogen fertilizer application rates during red pepper cultivation in upland soil.

*Corresponding author : Phone: +82416356104, Fax: +82416357923, E-mail: lje0220@korea.kr

§Acknowledgement: This work was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ009315062013)" Rural Development Administration, Republic of Korea.

Introduction

기후변화의 근본 원인은 지구온난화 현상의 주범인 온실가스에 의한 오존층 파괴이다. 기후변화에 대한 ‘무대응에 따른 비용과 위험’을 고려한다면, 지금의 경제위기 하에서도 온실가스 배출량을 상당 수준으로 감축하는 것이 급선무라고 하겠다. 현재 정부는 2012년부터 온실가스 목표관리제를 시행해 2020년까지 예상 배출량의 30%를 감축하는 정책을 추진중이며, 농업부문에서는 이산화탄소 (CO₂) 약 152만톤 정도를 감축해야 한다고 제시한 바 있다. 이 중 경종부문에서 온실가스 배출량은 벼 재배에 의한 메탄 (CH₄) 배출, 농경지 영농활동에 따른 토양에서의 아산화질소 (N₂O) 배출 및 작물잔사 소각에 의한 CH₄와 N₂O 배출로 구분하여 평가하고 있으며 (IPCC, 1996), 일부 배출계수 및 보정계수에 대해서는 2006 IPCC 가이드라인을 적용하고 있다.

Lee et al. (2013)은 우리나라 농업부문 2010년도 온실가스 총 배출량은 21,257 천톤 CO₂-eq으로 국가 총 배출량 668.8 백만톤 CO₂-eq의 약 3.2%를 차지하고 있다 하였고, 가스 종류별로는 CH₄이 53.9%, N₂O가 46.1%를 차지한다고 하였다. 특히 아산화질소는 지구온난화 잠재력 (GWP, global warming potential)이 이산화탄소 310배이며 (IPCC, 1996), 산업화 이전보다 대기 중 무려 20% 이상이 증가하였고 최근 들어 매년 0.2~0.3%씩 매년 증가하고 있다 (Hofmann et al., 2006; Sagger et al., 2009). 농경지 토양에서의 아산화질소는 주로 질소질 화학비료, 가축분퇴액비, 질소 고정작물 및 작물잔사 환원과 같은 직접배출과 질소원의 대기나 수계 유출로 인한 간접배출로 크게 구분된다 (IPCC, 1996; IPCC, 2000; Moiser et al., 1998).

농경지 토양으로부터 아산화질소 배출은 토양 미생물 활동에 의한 질산화작용과 탈질작용 (Sahrawat and Keeney, 1986), 질소 시용량, 경작방법, 유기물원, 토성, 수분함량, 토양 pH, 식생 및 경지이용뿐만 아니라 대기 온도, 지온, 강우 등 여러 요인에 영향을 받는다 (Freney, 1997). Kim et al. (2008)은 고추밭에서 아산화질소 배출에 토성별로 보았을 때 토양 수분함량과 무기태질소의 영향이 가장 크다고 하였으며 식양토가 사양토보다 배출량이 많다고 하였다. 또한 Seo et al. (2012)은 녹비작물과 바이오숯 토양 환원이 고추밭에서 아산화질소 배출량에 각각 46.5%와 24.6%의 경감효과가 있다고 하였다. 또한 Lee et al. (2012)은 질소 수준별

배추밭에서의 아산화질소 배출량은 전형적인 1차 회귀식 정의상관을 보였다고 하였다. 제주 화산회 토양에서 콩과 당근 재배지에서 아산화질소 배출량은 토양수분의 많고 적음에 따라 크게 좌우되며, 질소 시용량이 증가할수록 같은 경향을 보였다고 보고하였다 (Yang et al., 2012a; Yang et al., 2012b).

우리나라의 온실가스 배출량을 평가하기 위해서는 배출계수와 활동자료가 필요하며, 또한 IPCC에서는 배출량 평가 방법론과 배출계수 (Emission factor)를 요구하고 있다. IPCC에서 제시하는 배출계수는 각 국가의 토양이나 기후 조건 등을 모두 반영하지 못하기 때문이다. 우리나라도 '90년대부터 논에 대한 온실가스 연구가 상당히 진행되어 왔으나 밭토양에서는 아직까지 배출계수가 없어 IPCC 임의 배출계수를 사용하고 있다. 우리나라는 1993년 기후변화에 관한 국제연합기본협약 (UNFCCC; The United Nations Framework Convention on Climate Change)에 가입한 뒤 비부속국 (Non-Annex I)으로 분류되어 감축의무는 없으나, 온실가스 국가보고서 제출은 요구되어 있으며, OECD 가입 이후 선진국들은 우리나라가 Annex I 국가와 동일한 의무를 질 것을 지속적으로 요청하고 있다. 이에 우리나라는 온실가스 배출 의무저감국 가입에 대비한 국내 농업환경에 맞는 경종부문 농경지의 아산화질소 배출량 및 배출계수 개발이 시급하다 하겠다.

따라서 본 연구는 국가 온실가스보고서 (NIR, national inventory report)를 위한 농경지 아산화질소 배출량 및 배출계수를 개발하고자 평야지 고추밭에서의 질소 수준별 아산화질소 배출 특성을 3년간 조사하여 온실가스 관리에 필요한 기초자료를 제공하고, 또한 지구온난화잠재력(GWP)를 고려하여 홍고추 최대 수확을 위한 합리적인 질소 시비량을 제시하고자 수행하였다.

Materials and Methods

시험장소 및 시험방법 본 시험은 충남 예산에 위치한 충청남도농업기술원의 시험 포장에서 질소 수준별 평야지 고추밭에서의 아산화질소 배출 계수 및 배출량을 평가하기 위해서 2010년부터 2012년까지 3년간 수행하였다. 시험 토양은 예산통 양토(N 36° 44'15", E 126° 49'07")로서 시험 전 토양 중 유기물(OM) 함량이 Table 1에서와 같이 18 g

Table 1. Physico-chemical properties of upland soils before the experiment in 2010.

Division	pH (1:5)	EC (dS m ⁻¹)	T-N (g kg ⁻¹)	O.M (g kg ⁻¹)	Ava.-P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Ex.-cations (cmolc kg ⁻¹)				Soil texture
						K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	
Pepper	6.8	0.37	0.19	18	283	0.61	6.7	1.2	0.23	Loam
Optimal ranges	6.0~6.5	<2	-	25~35	450~550	0.7~0.8	5.0~6.0	1.5~2.0	-	SL [§] ~CL

[§]SL; Sandy loam, CL; Clay loam

kg⁻¹으로 고추 재배에 적정 유기물 함량보다 다소 낮았다. 다른 토양 화학성과 토성은 Table 1과 같았으며 토양 분석은 농촌진흥청 토양화학분석법 (NIAST, 2000)에 준하여 분석하였다. 작물재배 시험에 사용된 품종은 고추는 독야청청이었고, 고추 육묘장에서 묘를 구입하여 5월 상순 재식거리 100 cm (이랑) × 30 cm (주간)로 정식하였다. 시험 처리내용은 질소 기준 N 0, 0.5, 1.0, 2.0배 수준으로 4처리 3반복으로 하여 시험하였다. 고추 시비량은 RDA (2011) 작물별 시비처방기준에 의한 표준시비방법으로 N-P₂O₅-K₂O를 190-112-149 kg ha⁻¹로, 또한 퇴비 사용량은 고추 20 Mg ha⁻¹을 처리하였다. 화학비료 사용은 N은 요소로 기비 50%, 추비 50%를 3회 분시하였고, P₂O₅는 용성인비로 전량 기비 100%, K₂O는 엽화가리를 기비로 60%, 추비 40% 2회로 분시하였다. 시험구 면적은 6 m × 40 m = 240 m²로 단구제 배치하였으며, 구 당 아산화질소 포집용 챔버는 3반복으로 설치하였다.

시료채취 및 분석방법 고추밭의 N₂O는 비정체형 밀폐형태인 순환형 상자법 (Kim et al., 2010)을 이용하여 외부로의 공기 유출이 없도록 포집하였다. N₂O 시료채취는 5월 상순 정식 후 2일째부터 재배기간 동안 주 2회 (월·목) 오전 10~11시 사이에 30분간 60 ml 주사기를 이용하여 시료를 채취하였고, 채취 전 챔버 내의 온도 등을 측정하였으며, 가스 포집에 사용된 챔버의 지름은 0.40 m, 높이가 0.25 m인 PVC 소재로 제작하였다. 토양 지온과 수분함량은 WatchDog SM100 수분측정기를 이용하였다. 대기 기온 및 강수량 측정장치는 종합기상관측시스템 (AWS)으로 조사하였다. 아산화질소 분석은 가스크로마토그래프 (CP 3800, Varian)를 활용하여 분석하였다. N₂O 분석을 위해 검출기는 ECD를 사용하였고, Porapak Q column (Stainless steel, 1/8" × 2 m) 칼럼을 사용하였으며 column oven 온도는 70°C, injector 온도는 80°C, detector 온도는 320°C로 분석하였다.

토양분석 및 기타 조사방법 토양 화학성 분석은 농촌진흥청 토양화학분석법 (NIAST, 1988)에 준하여 분석하였다. pH (1:5)는 초차전극법, 유기물은 Tyurin법, 유효인산은 Lancaster법, 치환성양이온은 1N NH₄OAc (pH 7.0) 용액으로 침출하여 유도결합플라즈마방출분광기 (Varian ESP-730)로 분석하였다. 질산태질소 (NO₃⁻-N)과 암모니아태질소 (NH₄⁺-N)은 증류수로 침출하여 이온크로마토그래피 (850 professional, Metrohm IC)을 이용하여 분석하였다. 또한 모든 통계분석은 SAS 프로그램 (ver. 9.2, SAS, Cary, NC)을 이용하였으며, 상관관계는 Pearson correlation 분석법을 이용하여 5% 수준에서 통계적 유의성을 검토하였고, 평균 배출량은 LSD 검정을 이용하였다.

아산화질소 배출량 및 배출계수 계산 아산화질소 단위시간당 배출량 (flux, F)은 아래 식 (1)에 의하여 계산하였다. 계산된 N₂O 배출량의 지구온난화 잠재력지수 (GWP)를 이산화탄소 (CO₂) 당량으로 표시하기 위하여 310을 곱하여 계산하였다 (IPCC, 1996).

$$F = \rho \cdot V \cdot A^{-1} \cdot \Delta C \cdot \Delta t^{-1} \cdot 273 \cdot T^{-1} \quad (1)$$

F : 단위시간당 단위면적에서 배출되는 N₂O 배출량 (mg m⁻² hr⁻¹)

ρ : N₂O의 밀도를 고려한 가스밀도 (mg m⁻³)

N₂O의 ρ값 (T=273 K)은 다음과 같다.

$$\rho_{N_2O} = 1.96, \rho_{N_2O-N} = 1.25$$

V : 챔버 내 공기체적 (m³),

A : 챔버 내 면적 (m²)

T : 가스포집장치 내 평균기온 (K)

ΔC Δt⁻¹ : 챔버 내 가스농도의 평균 증가속도 (10⁻⁶ m³ m⁻² hr⁻¹)

N₂O의 배출계수(Emission factor)는 다음 식에 따라 계산하였다.

$$EF \text{ (kg N}_2\text{O-N N}^{-1} \text{ kg}^{-1}) = ((\text{누적배출량}/100) \times 0.9 \times (28/44)) / N \quad (2)$$

누적배출량 : 연간 N₂O 누적배출량(kg N₂O ha⁻¹ year⁻¹)

N₂O-N 환산계수 : 28/44(N₂/N₂O)

N : 질소시비량(kg N ha⁻¹)

화학비료로 공급된 질소량 : 시비 N × 0.9

Results and Discussion

온도 및 강수량 농업부문 온실가스 연구에 있어서 아래 Fig. 1은 과학적인 기초 근거 자료로 활용하기 위한 자료로써 2010년부터 2012년의 충남 예산지역을 중심으로 대기 온도 및 강수량을 3년간 조사한 결과이다. 중부지역의 고추 재배기간은 일반적으로 5월 상순부터 9월 하순까지이다. 고추 재배기간 중 재배일수는 3년 평균 125일이었고, 평균 온도는 22.3±0.43°C이었다. 재배 중의 평균 온도 변화는 3년간 특별한 이상기후 현상은 보이지 않았으나 지구온난화로 인한 온도 증가가 다소 있었다. 반면, 같은 기간 동안 3년 평균 강수량은 984.3 mm이었으며, 2010년 고추 재배 기간 중 연평균 강수량 839.2 mm로 조사되었고, 8~9월중순까지 약 30일간 우기를 보였다. 그리고 2011년은 연평균 강수량은 1071.5 mm로 2010년보다 약 230 mm정도 더 많았

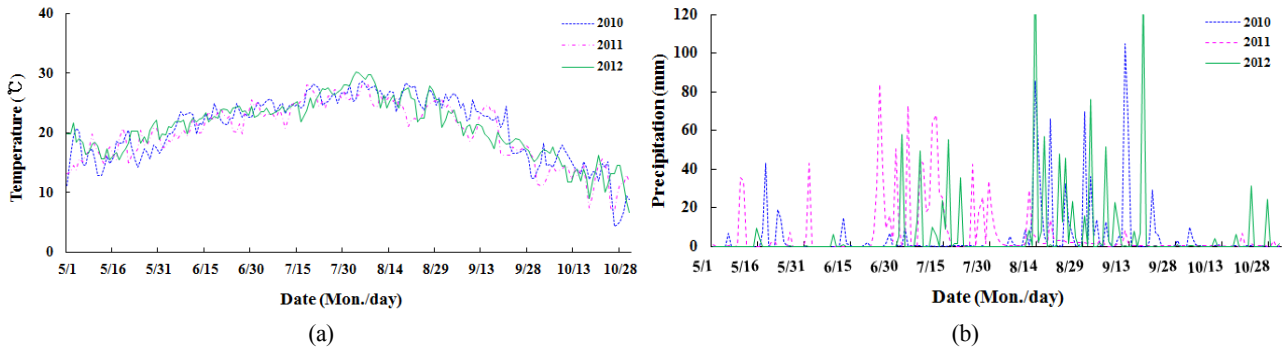


Fig. 1. Daily mean air temperature(a) and precipitation(b) during red pepper cultivation from 2010 to 2012.

며, 7월초~8월중까지 장마와 태풍 (곶파스 등)으로 고추 탄저병이 극심하였다. 그로 인하여 재배기간이 약 113일로 평균 재배일수보다 12일이나 짧았다. 2012년도는 2011년과 유사한 연평균 강수량 1042.1 mm를 보였으나, 봄철 유래 없는 약 60일간의 극심한 가뭄으로 토양 수분함량이 평균 10% 내외였으며 고추 초기생육이 현저하게 불량이었다. 그리고 8월말~9월중까지 3번 연속 태풍 (볼라벤 등) 피해로 인한 자연재해가 컸으며, 9월 17일에는 최고 130 mm 강수량 기록을 보이기도 하였다.

질소 수준별 아산화질소 배출량과 상관관계 시험재 배 3년 기간 동안 평야지 고추밭에서의 질소 수준별 아산화 질소 배출 패턴은 Fig. 2과 같았고, 대기 온도변화와 토양 수분함량도 함께 표시하였다. 고추 재배기간 중 질소 수준 별 평균 N₂O 배출양상은 질소 시비량이 증가할수록 N₂O 배출량은 3년간 같은 경향으로 증가하는 결과를 보였다. 이들 N₂O 배출은 2010년 N 0 22.4 g N₂O-N ha⁻¹ d⁻¹, N 0.5 30.5 g N₂O-N ha⁻¹ d⁻¹, N 1.0 40.8 g N₂O-N ha⁻¹ d⁻¹, N 2.0 53.3 g N₂O-N ha⁻¹ d⁻¹를 보였다. 또한 2011년 N 0 13.9 g N₂O-N ha⁻¹ d⁻¹, N 0.5 22.6 g N₂O-N ha⁻¹ d⁻¹, N 1.0 37.4 g N₂O-N ha⁻¹ d⁻¹, N 2.0 56.8 g N₂O-N ha⁻¹ d⁻¹를 나타냈 으며, 마지막 2012년도에는 N 0 13.7 g N₂O-N ha⁻¹ d⁻¹, N 0.5 21.7 g N₂O-N ha⁻¹ d⁻¹, N 1.0 39.1 g N₂O-N ha⁻¹ d⁻¹, N 2.0 60.5 g N₂O-N ha⁻¹ d⁻¹를 보였다. 이러한 패턴은 3년 간 평균 아산화질소 일평균 배출량을 비교할 때 매우 유사한 경향을 보였고, 연차별 N₂O 배출 양상은 5월 상순 정식 후 약 15일을 전후로 가장 높게 나타났다. 이러한 결과는 질 소 화학비료와 가축분퇴비 사용 후 경운에 따른 토양 공극 이 증가한 산화조건에서 *Nitrosomonas*와 *Nitrobacter* 같은 질산화균 등의 질산화 (Nitrification)과정을 거쳐 (1996, Soil science), 정식 후 고추 유묘의 토양 활착을 위해 다량의 물 을 관주함으로써 질산화 과정 중 토양 공극의 혐기조건이 질산태질소의 탈질화 (Denitrification) 과정을 조장했을 것 으로 판단되었다. 특히, N₂O 배출량은 질소 수준에 따라서

증가하는 폭이 가장 컸었고, 약 30일 간격으로 3회 질소 화 학비료 주비 후에 높아지는 경향을 보였다. Seo et al. (2012) 도 질소질비료를 처리한 구에서 고추를 정식한 다음 약 1주 일 후에 배출량이 매우 높아졌다가 이후 낮아지는 경향을

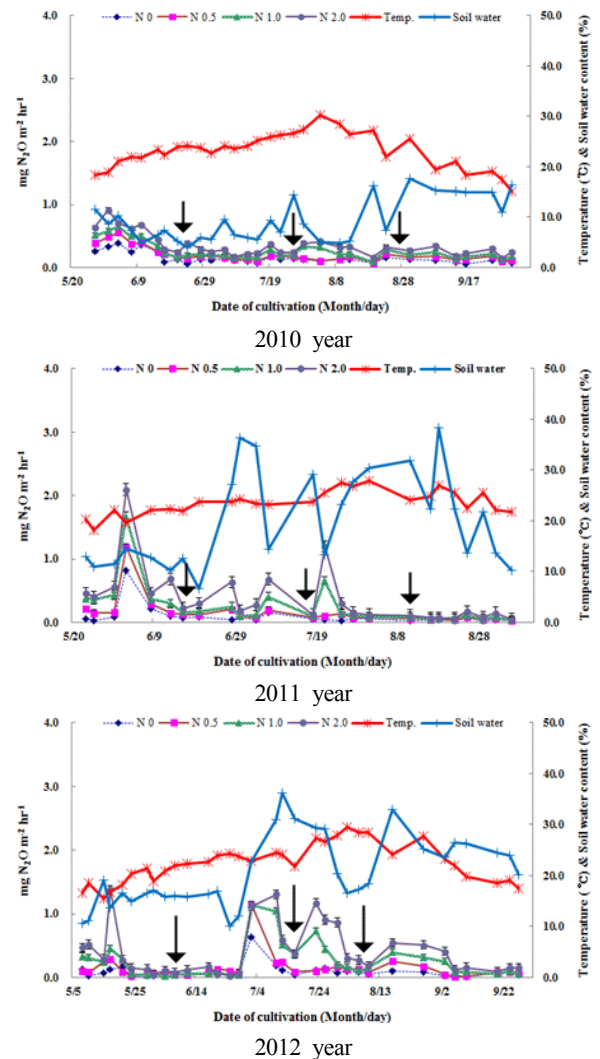


Fig. 2. Changes of N₂O emission rates in upland soils amended different rates of nitrogen fertilizer during red pepper cultivation for 3 years (2010-2012). ↓; Top dressing.

Table 2. Correlation coefficient between N₂O emission and parameters during the red pepper cultivation in 2012.

Parameter	N 1.0 [‡]	Atmosphere temperature	Rhizosphere temperature	Soil water content	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	Inorganic N	Total N
N 1.0	1	0.159	0.041	0.479*	0.314*	0.342*	0.341*	-0.063
Atmosphere temperature		1	0.668**	0.267	0.039	-0.187	-0.053	0.292
Rhizosphere temperature			1	-0.246	0.503*	0.074	0.349	0.269
Soil water content				1	-0.349	-0.216	-0.311	0.213
NO ₃ ⁻ -N					1	0.808**	0.969**	0.551*
NH ₄ ⁺ -N						1	0.927**	0.591*
Inorganic N							1	0.595*
Total N								1

[‡] Recommended N fertilizer amount (190 kg ha⁻¹), *p<0.05, **p<0.01

보였다고 하였고, 웃거름을 준 다음에 다소 높아지는 양상을 보였다고 하였다. 그리고 이들 N₂O 배출량은 Fig. 2에서와 같이 6월말부터 8월초에 대기 온도가 높아지거나 비가 온 뒤 토양 수분함량이 많아짐에 따라 증가하는 경향을 보였다. Freney (1997)은 농경지에서 N₂O 배출은 온도, 강우, 비료 사용량, 경작방법 및 식생 등에 깊은 연관성이 있다고 하였으며, Minami et al. (1994)와 Hellebrand et al. (2008)은 질소 사용량 증가는 무기태질소 함량을 증가시켜 N₂O 배출을 증가시킨다고 하였다. Smith et al. (1997)도 농경지에 투입된 질소는 질소순환 과정을 통해 N₂O로 직접 배출된다고 하였다. Kim et al. (2008)은 고추밭 토양 수분장력 -30 kPa보다 -50 kPa에서 N₂O 배출량이 감소한다 하였고, Lee et al. (2008)은 화학비료보다 화학비료와 가축분노퇴비를 사용한 처리구의 N₂O 배출량이 약 30% 많다고 하였다. Yang et al. (2012)은 제주도 화산회토의 조건에서도 질소 시비량 증가에 따라 콩과 감자 밭에서의 N₂O 배출량이 증가하였다고 보고하였다.

또한 Dobbie et al. (1999)은 기후 차이에 관계없이 N₂O 배출량은 토양 수분과 밀접한 관계가 있다고 하였는데, 본 연구에서도 고추밭에서 질소 표준시비량 처리구 2012년도 분석자료 기준으로 N₂O 배출량과 토양 수분함량의 Pearson 상관 분석한 결과 0.479* (p<0.05%)로 정의 상관성을 보였다 (Table 2). Arone and Bohlen (1998)은 N₂O 배출량과 토양 수분함량과는 정의 상관관계가 있다고 하였고, Han et al. (2007)은 토양 내 수분함량이 20~30%정도에서 그리고 지온 20~30°C정도에서 아산화질소 배출량에 유의적으로 가장 높아지는 결과를 보였다고 하였다. 그리고 토양 내 무기태질소 (NO₃⁻-N & NH₄⁺-N)도 N₂O 배출량과 0.341* (p<0.05%)로 정의 상관관계를 보였으며, Kim et al. (2010)이 0.937**라고 보고한 결과보다 낮은 유의값을 보였으나

같은 유사한 결과를 보였다. Zhang et al. (2008)의 연구 결과에서도 토양의 N₂O 배출 플럭스와 토양 중 무기태질소와는 유의한 상관성을 가진다고 하였다.

그러나 아산화질소 배출량은 무기태질소, 토양 온도, 토양 수분함량 등 다양한 조건에서 복합적으로 작용하므로 어느 단일 요인에 의해 뚜렷한 변화 양상을 보이지는 않는다고 하였다 (Seo et al., 2012; Yang et al., 2012; Kim et al., 2008, and Kim et al., 2010). 그리고 본 시험 3년간 중부지역 평야지 고추밭에서 9월 이후로는 N₂O 배출량이 질소 화학비료 무비구와 유사한 경향을 보이며 배출량이 현저히 감소하였으며, Seo et al. (2014)도 고추 재배 후반기에는 낮은 잔여 질소함량과 온도 저하로 N₂O 배출량이 감소하였다고 하였다. 이와 같이 Fig. 2에서의 분석결과를 바탕으로 일평균 N₂O 배출량에 대한 누적 배출량을 3년간의 고추 재배기간인 125일을 기준으로 연산한 결과, 질소 수준별 연평균 N₂O 총배출량은 N 0 2.110 kg N₂O-N ha⁻¹, N 0.5 3.165 kg N₂O-N ha⁻¹, N 1.0 5.039 kg N₂O-N ha⁻¹, N 2.0

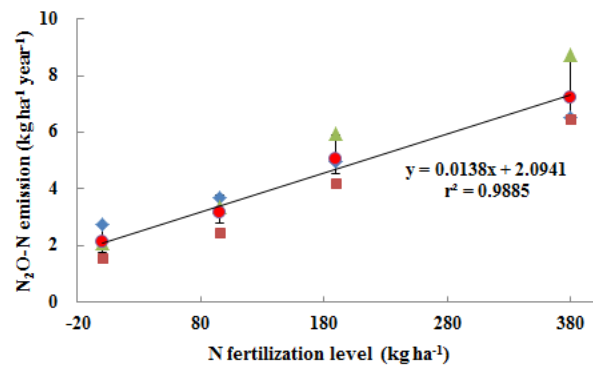


Fig. 3. Relationships between the averaged N₂O emissions across years from 2010 to 2012 and nitrogen fertilizer application rates during red pepper cultivation in upland soil.

7.228 kg N₂O-N ha⁻¹를 보였다. 3개년 평균 질소 수준별 N₂O 총배출량은 화학비료 질소 0 kg ha⁻¹ 비해 95, 190, 380 kg ha⁻¹에서 각각 150%, 239%, 343%로 증가하는 결과를 나타냈다. Fig. 3는 위의 3년간 평균 N₂O 총배출량을 질소 시비량과 상관관계를 분석한 결과를 보여주고 있으며, 이 두 요인 간의 회귀분석에서 식 $y = 0.0138x + 2.0941$ ($r^2=0.9885$, y: N₂O emission, kg N₂O-N ha⁻¹; x: N fertilizer added, kg ha⁻¹)를 도출하였다.

질소 수준별 아산화질소 배출계수와 지구온난화잠재력(GWP) IPCC 1996 가이드라인을 준하여 중부지역 평야지 고추밭에서 질소 수준별 3년 시험재배를 통한 아산화질소 배출계수 산출 결과, 연간 평균 배출계수 Ef₍₂₀₁₀₎ 0.0118, Ef₍₂₀₁₁₎ 0.0135, Ef₍₂₀₁₂₎ 0.0191로 각각 도출되었고, 이들 평균 배출계수 Ef 0.0148 (오차범위±0.00382)를 보였다 (Table 3). 이 결과는 IPCC 1996 가이드라인 배출계수 Ef 0.0125보다 약 18% 높은 결과를 보였으며, 제주 화산회토의 콩 아산화질소 배출계수도 Ef 0.0202로 다소 높은 결과를 보고하였다 (Yang et al., 2012). 또한 Akiyama et al. (2006)은 일본의 밭작물 아산화질소 배출계수 결과에서는 Ef 0.0062 (오차범위±0.0045)라 하였고, 특히 배수양호 토양보다 배수불량 토양일 경우 약 4.4배 정도로 높은 아산화질소 배출계수를 보인다고 보고하였다. 반면, 본 연구와 공동으로 3년간 지역별 (경기도, 강원도, 충청남도) 진행해온 연구결과를 볼 때, 중북부 및 고령지역인 수원과 춘천에서의 고추 아산화질소 배출계수가 각각 Ef 0.0060 (오차범위±0.00262)와 Ef

0.0061 (오차범위±0.00065)로 IPCC 1996 가이드라인 배출계수 0.0125보다 약 49% 낮은 결과를 보였다. 이러한 결과는 지역별 고추 재배기간 중 기상조건이 상이하기 때문인 것으로 생각되며, 동일한 질소 수준별 조건에서 토양 온도 및 수분함량이 N₂O 배출에 가장 큰 영향을 주는 것으로 판단된다. 이들 3개 지역별 연구결과를 근거로 한 우리나라 고추 작물 아산화질소 고유 배출계수는 Ef 0.0086 (오차범위±0.00043)였으며, 불확실성은 5%였다 (Kim et al., 2013).

그리고 Table 4는 고추 재배기간 중 질소 시비량에 따른 N₂O 총배출량에 대한 지구온난화잠재력 (GWP)을 환산한 값이다. 농업부문에서는 온실가스 중 CO₂에 대해서는 Zero로 규정하고 있으며, IPCC (1996)에서는 아산화질소의 배출과 축적에 대한 순수지 (Net balance)로 이산화탄소 (CO₂) 당량으로 표시하기 위하여 310을 곱하였다. 3년간 고추 재배지에서 분석된 아산화질소 평균 배출량에 대한 화학비료 질소 수준별 GWP는 N 0 654.1 kg CO₂, N 0.5 981.2 kg CO₂, N 1.0 1,562 kg CO₂, N 2.0 2,240 kg CO₂,으로 나타났다. 이러한 결과들로 볼 때, 고추재배를 위한 질소 과잉 시비는 지구온난화의 주범인 온실가스 총 CO₂ 발생량을 조장할 것으로 예측 평가할 수 있다 판단된다.

Conclusions

본 연구는 국가 온실가스 인벤토리 구축을 위해 평야지 고추밭에서 질소 수준별 아산화질소 배출량을 측정하고 배출에 미치는 요인 특성을 구명하고자 3년 (2010~2012년)

Table 3. Comparison emission factor with IPCC default value and the mean N2O emission by input N conditions in the flat upland during the red pepper cultivation for 3 years.

Crop	Input N (kg ha ⁻¹)	N ₂ O emission (kg N ₂ O-N ha ⁻¹)	Emission factor (kg N ₂ O-N/N kg)	IPCC default value (IPCC 1996 GL)
Red pepper	0	2.110	0.0000	> 0.0125 (IPCC default value)
	95	3.165	0.0123	
	190	5.039	0.0171	
	380	7.228	0.0150	
Average	-	-	0.0148	

Table 4. The total emission of N₂O concerted by global warming potential (GWP) on the mean N₂O emission of red pepper for 3 years (2010~2012)

Crop	Input N (kg ha ⁻¹)	Emission factor (kg N ₂ O-N/N kg)	N ₂ O emission (kg N ₂ O-N ha ⁻¹)	GWP [†] (kg CO ₂)
Red pepper	0	0.0000	2.110	654.1
	95	0.0123	3.165	981.2
	190	0.0171	5.039	1,562.1
	380	0.0150	7.228	2,240.7
Average	-	0.0148	5.144	1,594.6

[†]GWP calculated by IPCC 1996 GL

동안 충청남도농업기술원 시험포장에서 수행되었다. 고추 재배를 위한 질소 시비량은 0, 95, 190, 380 kg ha⁻¹ 4수준 3반복으로 처리하였고, 주 2회 시료를 채취하여 GC/ECD로 아산화질소를 분석하였다. 3년간 고추 재배기간 중 질소 시비량 증가에 따른 처리구별 평균 N₂O 총배출량은 N 0 2.110 kg N₂O-N ha⁻¹, N 0.5 3.165 kg N₂O-N ha⁻¹, N 1.0 5.039 kg N₂O-N ha⁻¹, N 2.0 7.228 kg N₂O-N ha⁻¹로 증가하였고, 이들 평균 N₂O 총배출량 질소 무비구보다 각각 150%, 239%, 343%로 증가하는 결과를 나타냈다. 또한 연간 평균 평균 N₂O 배출계수 Ef₍₂₀₁₀₎ 0.0118, Ef₍₂₀₁₁₎ 0.0135, Ef₍₂₀₁₂₎ 0.0191로 각각 도출되었고, 3년 평균 배출계수 Ef 0.0148 (오차범위±0.00382)로 IPCC 1996 가이드라인 배출계수 Ef 0.0125보다 약 18% 높은 결과를 보였다. 화학비료 질소 수준별 GWP는 N 0 654.1 kg CO₂, N 0.5 981.2 kg CO₂, N 1.0 1,562 kg CO₂, N 2.0 2,240 kg CO₂,으로 나타났다. 본 연구의 고추 재배에 있어 질소 시비량 증가에 따른 N₂O 배출량 식 $y = 0.0138x + 2.0941$ ($r^2=0.9885$)을 근거하여, 우리나라에서 작물 재배를 위한 관행적인 질소 과잉 시비는 IPCC (1996)에서 제시한 보정계수로 구한 경우보다 N₂O 배출량이 더 높게 산정될 우려가 있다.

References

- Akiyama, H., K. Yagi, and X. Yan. 2006. Estimations of emission factors for fertilizer-induced direct N₂O emissions from agricultural soils in Japan: Summary of available data. *Soil. Sci. Plnat Nutr.*, 52:774-787.
- Arone, J.A. and Bohln. 1998. Stimulated N₂O flux from intact grassland monoliths after two growing seasons under elevated atmospheric CO₂. *Oecologia*. 116:331-335.
- Dobbie, K.E., I.P. Mctagart, and K.A. Smith. 1999. Nitrous oxide emissions from intensive agricultural systems: variations between crop and seasons; key driving variables; and means emission factors. *J. Geophys. Rcs.* 104:26891-26899.
- Frenay, J.R. 1997. Emission of nitrous oxide from soils used for agriculture. *Nurtient Cycling in Agoecosystems*. 49:1-6.
- Han Jian-gang et al., 2007. N₂O emissions under different moisture and temperature regimes. *Bull environ contam toxicol*. 78:284-287.
- Hellebrand, H.J., V. Scholz, and J. Kern. 2008. Fertilizer induced nitrous oxide emissions during energy crop cultivation on loamy sand soils. *Atmospheric Environment*. 42:8403-8411.
- Hofmann, D.J. 2006. The role of carbon dioxide in climate forcing from 1979 to 2004: Introduction of the annual greenhouse gas index. *Tellus* 58B, 614-619.
- IPCC. 1996. IPCC guideline for national greenhouse gas inventories.
- IPCC. 2000. Good practices guideline and uncertainty management in national greenhouse gas inventories.
- Kim, G.Y., B.H. Song, K.A. Roh, and K.H. So, 2008. Evaluation of greenhouse gases emissions according to changes of soil water content, soil temperature and mineral N with Different soil texture in pepper cultivation. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 41(6):399-407.
- Kim, G.Y., K.H. So, H.C. Jeong, and D.B. Lee, 2010. Evaluation of N₂O emissions with changes of soil temperature, soil water content and mineral N in red pepper and soybean field. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(6):880-885.
- Kim, G.Y., J.S. Lee, H.C. Jeong, Y.H. Seo, and J.E. Lee, 2013. Development of nitrous oxide emission factor in fields of red pepper, soybean, and chinese cabbage. *Korean J. Soil Sci. Fert. Abstract Publish* pp. 245.
- K. Minami. 1994. CH₄ and N₂O : Global emissions and controls from rice fields and other agricultural and industrial sources, *NIAES* pp. 187-196.
- Lee, J.I., J.E. Lee, and E.S. Yang. 2008. CARES result's report. Investigation of N₂O emissions different nitrogen sources in soils during red pepper cultivation. pp. 346-353.
- Lee, J.E., Y.U. Yun, and P.J. Kim. 2012. Effect of nitrogen application rates on nitrous oxide emission during crop cultivations in upland soil. *J. Envi. Agr.* 31(3):205-211.
- Lee, J.S., G.Y. Kim, H.C. Jeong, and G.H. Soh, 2013. Assessment of greenhouse gases emissions of agricultural sector in 2010. *Korean J. Soil Sci. Fert. Abstract Publish* pp.318.
- Moiser, A., C. Kroeze, C. Nevison, O. Oenema, and O. van Cleemput. 1998. Closing the global N₂O budget: Nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 52:225-248.
- NIAS. 2000. Methods of soil chemical analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- RDA. 2011. Fertilizer recommendation for crops. Rural development administration, Suwon, Korea.
- Sahrawat, K.L. and D.R., Keeney. 1986. Nitrous oxide emissions from soils, *Adv. Soil Sci.* 4:103-148.
- Saggar, S., J. Luo, D.L. Giltrap, and M. Maddena. 2009. Nitrous oxide emissions from temperate grasslands: Processes, measurement, modelling and mitigation. In Sheldon A. I., Barnhart E. P. (eds.): *Nitrous oxide emissions research progress*. Nova Science Publishers, Inc., New York, P. 1-66.