

Research Article



CrossMark

Open Access

고추와 배추 재배지에서 요소분해효소 억제제 함유 원예용 비료 시용에 따른 아산화질소 배출 저감 효과

주옥정^{1*}, 임갑준¹, 이상덕², 원태진³, 박중수¹, 강창성¹, 홍순성¹, 강남구^{4,5}

¹경기도농업기술원 연구개발국 환경농업연구과, ²경기도농업기술원 선인장다육식물연구소,
³경기도농업기술원 연구개발국 작물연구과, ⁴한국표준과학연구원 화학의료표준본부 가스분석센터,
⁵과학기술연합대학원대학교 측정과학 전공

A Study on the Mitigation of Nitrous Oxide emission with the Horticultural Fertilizer of Containing Urease Inhibitor in Hot Pepper and Chinese Cabbage Field

Ok Jung Ju¹, Gap June Lim¹, Sang Duk Lee², Tae Jin Won³, Jung Soo Park¹, Chang Sung Kang¹, Soon Sung Hong¹ and Nam Goo Kang^{4,5} (¹Environmental Agriculture Research Division, Research and Development Bureau, Gyeonggi-do Agricultural Research and Extension Services, Hwaseong 18388, Korea, ²Cactus Research Institute, Gyeonggi-do Agricultural Research and Extension Services, Goyang 10224, Korea, ³Crop Research Division, Research and Development Bureau, Gyeonggi-do Agricultural Research and Extension Services, Hwaseong 18388, Korea, ⁴Center for Gas Analysis, Division of Chemical and Medical Metrology, Daejeon 34113, Korea Research Institute of Standards and Science, Korea, ⁵Science of Measurement Major, University of Science and Technology, Daejeon 34113, Korea)

Received: 27 September 2018/ Revised: 5 November 2018/ Accepted: 8 November 2018

Copyright © 2018 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID

Ok Jung Ju

<https://orcid.org/0000-0002-6345-0207>

Abstract

BACKGROUND: About 81% of nitrous oxide (N₂O) emissions from agricultural land to the atmosphere is due to nitrogen (N) fertilizer application. Mitigation of N₂O emissions can be more effective in controlling biochemical processes such as nitrification and denitrification in the soil rather than decreasing fertilizer application. The use of urease inhibitors is an effective way to improve N fertilizer efficiency and reduce N₂O emissions. Several compounds act as urease inhibitors, but N-(n-butyl) thiophosphoric triamide (NBPT) has been used worldwide.

METHODS AND RESULTS: Hot pepper and chinese cabbage were cultivated in five treatments: standard fertilizer of nitrogen-phosphorus-potassium(N-P-K, N-

P₂O₅-K₂O: 22.5-11.2-14.9 kg/ha for hot pepper and N-P₂O₅-K₂O: 32.0-7.8-19.8 kg/ha for chinese cabbage), no fertilizer, and NBPT-treated fertilizer of 0.5, 1.0, and 2.0 times of nitrogen basal application rate of the standard fertilizer, respectively in Gyeonggi-do Hwaseong-si for 2 years(2015-2016). According to application of NBPT-treated fertilizer in hot pepper and chinese cabbage, N₂O emission decreased by 19-20% compared to that of the standard fertilizer plot.

CONCLUSION: NBPT-treated fertilizer proved that N₂O emissions decreased statistically significant in the same growth conditions as the standard fertilization in the hot pepper and chinese cabbage cultivated fields. It means that NBPT-treated fertilizer can be applied for N fertilizer efficiency and N₂O emissions reduction.

Key words: Horticultural Fertilizer, Mitigation, NBPT, Nitrous Oxide, Urease Inhibitor

*Corresponding author: Ok Jung Ju

Phone: +82-31-229-5824; Fax: +82-31-229-5964;

E-mail: okjung3@gg.go.kr

서론

기후변화의 원인물질인 온실가스에 대한 이해 및 체계적인 대응을 위해서는 인벤토리 작성이 필요하다. 우리나라의 2014년 온실가스 총 배출량은 691 백만톤 CO₂eq.로 34개 경제협력기구(Organization for Economic Co-operation and Development, OECD) 회원국 중에서는 미국, 일본, 독일, 캐나다, 멕시코에 이어 6번째로 온실가스 배출량이 많다(GIR, 2016).

우리나라 농업분야 온실가스 배출량은 21.3 백만톤 CO₂eq.이며 국가 전체 메탄(CH₄) 배출량의 약 46%, 아산화질소(N₂O) 배출량의 약 60%를 차지한다(GIR, 2016). Isermann(1994)은 농경지에서 대기로 배출되는 N₂O 중에서 81% 정도가 사용된 질소비료에 의해 배출된다고 하였다. 농경지 토양에 요소비료를 사용하면 가수분해로 방출되는 암모늄(NH₄)은 화학적 자급영양생물인 질화균에 의해 NO₂⁻, NO₃⁻로 산화되고, 이러한 질산화작용의 여러 생화학적 과정을 거쳐서 대기 중으로 N₂O와 NO가 배출된다(Firestone and Davidson, 1989).

우리나라는 농경지에서 비료사용량을 줄이기 위하여 시비 효율 증진비료 개발, 작물 및 품종별 시비법 개발과 개선 등의 연구가 진행되었으며, 발작물 재배시 N₂O 발생 감축을 위한 재배 기술로는 유기물 사용, 경운 관리, 물 관리, 질산화 억제제 사용, 작부체계, 재배시기 등이 있다(RDA, 2011). 2013년 기후행동할당(Climate Action Reserve)에서 발간한 질소관리(nitrogen management) 보고서에 의하면 온실가스 저감을 위한 질소 관련 기술로는 질소 시비량 감축, 질산화 억제제와 요소분해억제제 사용, 질산화억제제만 사용, 무수상태에서 요소로의 변화(switch from anhydrous to urea), 추비에서 춘비로의 전환(switch from fall to spring application), 완효성비료 사용, 관비, 질소 근권시비, 피복작물을 이용한 질소 시비 등을 소개하였으며, 대부분의 방법은 N₂O 배출량 산정을 위한 표준화된 정량적 방법이 부재한 상태이다(Climate Action Reserve, 2013). Firestone과 Davidson(1989)은 토양에서 N₂O의 배출은 유기물이나 비료 사용을 줄이는 것보다 토양 중에서 발생하는 질산화 및 탈질 작용 등 생화학적 과정을 적절히 조절하는 것이 더 큰 효과를 볼 수 있다고 하였다.

우리나라에서 가장 많이 사용하고 있는 요소비료는 45% 이상의 질소성분으로 질소비료 중 가장 질소성분이 높으며 살포시 각종 식물 및 토양미생물에서 분비되는 요소 가수분해 효소인 우레아제(urease)에 의해 가수분해되어 탄산암모늄을 거쳐 이산화탄소와 암모니아로 분해된다. 첨가된 질소

중 약 40%가 특정 환경 조건하에서 NH₃로 손실되며 합성 비료에서 약 10~14%의 질소가 휘발을 통해 손실된다(Park and Park, 2017).

질소 손실을 줄이기 위한 방법으로는 토양 중 요소분해효소 즉 urease의 활성을 억제시키는 화학물질의 사용, 요소의 가수분해를 늦추기 위한 요소의 coating화, 혹은 요소 사용상의 방법개선 등이 있다(Hauck, 1984, Joo, 1992). 요소의 가수분해를 효과적으로 억제시키는 것으로 판명된 요소분해효소 억제물질(urease inhibitor)은 NBPT (N-(n-butyl) thiophosphoric triamide)와 PPD (phenylphosphorodiamidate) 등이 있으며(Bremner and Chai, 1986; Chai and Bermner, 1986, Cai et al., 1989), NBPT 처리한 요소는 NH₃ 손실을 53% 줄여주며 작물에 따라 -0.8~10.2% 생산량에 영향을 준다고 하였다(Cantarella et al., 2018). NBPT는 세계적으로 가장 안정되게 사용되고 있으며, 대단위 농장규모에서 사용하고 있으나 국내에서 사용된 실적은 없다(Park and Park, 2017). 본 연구에서는 발작물용 비료 시비효율 증진 및 온실가스 발생 저감을 위하여 경기도농업기술원과 (주)풍농이 공동으로 개발한 요소분해효소 억제제 NBPT 0.2% 함유된 원예용 비료를 사용하여 작물별 N₂O 발생 감축 효과 및 적정 사용방법을 구명하고자 하였다.

재료 및 방법

시험장소 및 시험방법

본 연구는 경기도 화성시 기산동에 위치한 경기도농업기술원 내 시험연구포장(37°13'22.50"N, 127°02'22.43"E)에서 2년(2015년~2016년) 동안 수행하였다. 시험전 토양의 이화학적 특성은 Table 1과 같다. 고추밭(예산통)의 pH는 5.1~5.6으로 국내 일반 밭토양의 pH 적정범위(6.0~6.5) 보다 다소 낮았고, 배추밭은 다소 높은 수준이었다. 유기물과 칼륨은 고추밭과 배추밭 모두 적정범위 보다 낮은 수준이었다.

요소분해효소 억제제 NBPT함유 비료 사용 효과 구명을 위해 5처리를 두었다. 처리별 시비량은 Table 2와 같으며, 처리내용은 3요소 표준시비구(N-P-K standard fertilizer, SF)를 대조로 무시비, 질소 표준시비 기비량 0.5배, 1.0배, 2.0배 해당량의 NBPT함유 비료(NBPT-treated Fertilizer, NF)를 사용하였다. 표준시비 및 추비 사용비율은 요소, 용과린, 염화칼리이며, NBPT함유 비료는 기비로만 사용하였다. 고추(배로파, 무한질주)는 2015년 2월 11일에 파종하고 5월 11일에

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

Crop	Year	pH	OM	Av. P ₂ O ₅	Ex.cations				EC	NO ₃ ⁻ -N	Soil texture
					K	Ca	Mg	Na			
		1:5	g/kg	mg/kg	-----cmol _c /kg-----				dS/m	mg/kg	
Hot pepper	2015	5.6	9	196	0.15	4.8	1.5	0.11	0.45	35	Sandy Loam
	2016	5.1	9	250	0.32	5.3	2.0	0.12	1.99	155	
Chinese cabbage	2015	7.4	12	286	0.32	6.9	2.4	0.10	0.59	28	Sandy Loam
	2016	7.0	9	213	0.36	6.0	2.1	0.26	0.73	7	

Table 2. Amount of fertilizer (N-P₂O₅-K₂O) application in the treatments

Crop	Treatment	N			P ₂ O ₅			K ₂ O		
		Total	Basal dressing	Side dressing	Total	Basal dressing	Side dressing	Total	Basal dressing	Side dressing
----- kg/10a -----										
Hot pepper	SF [†]	22.5	12.3	10.2	11.2	11.2	0	14.9	8.9	6.0
	F0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	NF0.5	16.3	6.1	10.2	3.05	3.05	0	9.05	3.05	6.0
	NF1.0	22.4	12.2	10.2	6.1	6.1	0	12.1	6.1	6.0
	NF2.0	34.6	24.4	10.2	12.2	12.2	0	18.2	12.2	6.0
Chinese cabbage	SF	32.0	12.8	19.2	7.8	7.8	0	19.8	11.8	8.0
	F0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	NF0.5	25.6	6.4	19.2	3.2	3.2	0	11.2	3.2	8.0
	NF1.0	32.0	12.8	19.2	6.4	6.4	0	14.4	6.4	8.0
	NF2.0	44.8	25.6	19.2	12.8	12.8	0	20.8	12.8	8.0

[†] SF (Standard Fertilizer), F0 (No Fertilizer), NF (NBPT-treated Fertilizer)

재식거리 100 × 40 cm로 시험구당 102주(17주 × 6열) 정식하였다. 고추 시험구의 면적은 7.0 m × 6.0 m = 42 m²이며, 처리간 유의성 검정을 위하여 난괴법 3반복으로 배치하였다. 배추(CR황금스타)는 8월 5일 파종하고 8월 24일에 재식거리 75 × 45 cm로 시험구당 126주(18주 × 7열) 정식하였다. 시험구의 면적은 6.0 m × 8.0 m = 48 m²이며, 처리간 유의성 검정을 위하여 시험구는 난괴법 3반복으로 배치하였다. NBPT 함유 원예용 비료의 성분함량은 질소 12%, 인산 6%, 칼리 6%이며, 기비로 사용하였고 추비는 3요소 표준시비구 추비방법과 동일하게 처리하였다.

아산화질소 채취 및 분석방법

N₂O 배출량 분석은 PVC 소재 폐쇄형 원형 챔버(지름 25 cm × 높이 45 cm)를 시험구당 3반복으로 설치하여 주 2회, 매회 오전 10~11시 사이에 Mininert valve가 장착된 60 mL Polypropylene syringe로 채취하였다. 시료채취 방법은 챔버의 윗뚜껑을 단자마자 1차로 채취하고 30분 경과 후 2차로 시료를 채취하였으며, 동시에 최초온도와 30분 후 온도를 기록하였다. N₂O 분석은 12 Port gas sampling valve가 장착된 GC-ECD (Varian 450)로 분석하였으며, column은 Porapak Q (80/100 mesh)이 충전된 1/8" × 3 m의 stainless steel tubing column이었고 detector의 온도는 320°C, 운반기체(carrier gas)는 N₂로 유속을 분당 30 mL로 조절하였다. 온실가스 배출량은 1차, 2차 시료채취 전·후의 챔버 내 N₂O 농도의 변화, 챔버 내 기온의 변화, 시료채취에 소요된 시간, 챔버 유효높이 등을 조사하여 식(1)에 준하여 계산하였다. N₂O 배출량에 대한 지구온난화지수(GWP; Global Warming Potential, CO₂-eq.)는 작물 재배기간 배출된 N₂O에 310을 곱하여 계산하였다(IPCC, 2007). 처리에 따른 유의검정을 위한 통계분석은 SAS 프로그램을 이용하여 일원분산분석으로 차이를 검정하였으며, 사후검정으로 Duncan LSD를 사용하였다. 처리에 따른 온실가스 저감효과는 각 집단간 3반복 온실가

스 배출량 전체 자료 평균에 대한 표준불확도의 약 2배에 해당하는 확장불확도를 평균으로부터 각각 상한구간과 하한구간으로 결정하여 각 집단간 평균의 차이를 검정하였으며, 처리 집단에 차이가 없는 경우(p<0.05) 같은 영문자로 표시하였다.

$$F = \rho \times h \times \Delta c / \Delta t \times 273 / T \quad (1)$$

F: 단위시간 당 단위면적에서 배출되는 N₂O의 양 (mgN₂O/m²/hr)

ρ: N₂O의 밀도를 고려한 변환계수 (mg/m³), ρ_{N₂O} = 1.96

h: 챔버 내 유효높이 (m)

Δc/Δt: 챔버 내 N₂O 농도의 평균증가속도 (ppmv/hr)

T: 챔버 내 평균기온 (K)

토양분석 및 기타 조사방법

토양과 식물체 분석은 토양 및 식물체 분석법(NAS, 2000)에 의거 토양분석용 시료는 오가를 이용하여 15 cm 깊이로 토양을 채취한 후 음건하여 2 mm 체를 통과시킨 것을 사용하였다. 토양 pH는 초차전극법에 의거 pH meter (ATI orion 370)로 측정하였으며, 유기물(OM)은 Tyurin법, 유효인산(Av.P₂O₅)은 Lancaster법으로 분석하였다. 토양의 치환성 양이온(Exchangeable cations)은 1N-NH₄OAC(pH 7.0) 완충용액으로 침출하여 유도결합플라즈마 발광광도계(GBC, Integra XMP)로 정량하였다. 식물체의 T-N 성분은 건시료 5 g을 습식분해(H₂SO₄ : HClO₄ : 증류수 = 1 : 9 : 4, v/v/v)하여 Kjeldahl법으로 분석하였다. 작물의 생육 및 수량조사는 농사시험연구 조사기준(RDA, 2012)에 준하여 조사하였다.

결과 및 고찰

고추 재배 시 NBPT 함유 원예용 비료 사용에 따른 아산화질소 배출량

본 연구에서는 고추 재배기간 동안의 N₂O 농도 변화와

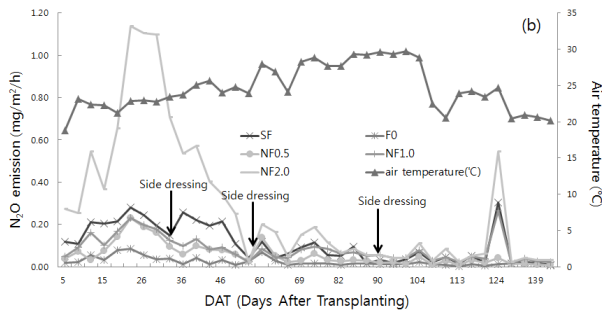


Fig. 1. Daily changes of N₂O emissions with different treatments and air temperature in hot pepper upland field in 2015(a), and 2016(b).

함께 기온과 강수량 등의 기상환경 변화를 조사하였으며 연도 별 고추 재배기간 동안의 기온과 N₂O 배출량의 변화는 Fig. 1 과 같다. 고추 재배기간(5월 1일~9월 30일) 중 2015년, 2016년 의 평균기온은 각각 23.3°C, 24.0°C로 평년에 비해 0.7°C, 1.4°C 높았으며, 강수량은 363.3 mm, 551.0 mm로 평년 대 비 33%, 51% 수준이었다. 2015년 고추 정식 후 약 60일까지 강우량은 70.8 mm로 평년 대비 27%로 비가 적게 내렸으며, 2016년에는 고추 정식 후 60일까지 강우량이 262.3 mm로 평년 대비 101%로 2015년 보다 기비 시용 후 비가 많이 오 고 기온이 높았으며 강우로 인한 토양수분이 증가함에 따라 질소비료의 탈질 현상이 활발히 일어나 N₂O 배출량이 많은 것으로 생각된다. 이는 토양으로부터 N₂O 발생에 영향을 줄 수 있는 요인으로 지온, 강수량, 토양수분함량 및 질화세균의

탈질작용 등을 지적한 선행연구(Cantarel *et al.*, 2011; Kanerva *et al.*, 2007; Wrage *et al.*, 2001)와 연관될 수 있 다. 고추 재배기간 동안의 N₂O 배출량 변화는 기비 시용 후 지속적으로 감소하는 경향으로 나타났으며, 고추 정식 후 30, 60, 90일 추비 시용 후 약간 상승하였다가 감소하는 경향을 보였다. 온실가스 배출량을 조사한 2개년의 고추 재배기간 동 안의 N₂O 배출량은 연도별 강우 패턴과 기온 등의 기상환경에 따라 다르게 나타났으나, 처리구에 따른 배출량의 경향 및 저장량은 통계적으로 유의하게 나타났다(Table 3). 고추 재배 기간 중 발생한 2개년 평균 총 N₂O 배출량은 무시비구(F0) 462 gN₂O ha⁻¹, 질소 표준시비 기비 0.5배 해당량 NBPT 함유 비료 시비구(NF0.5) 1,274 gN₂O ha⁻¹, 질소 표준시비 기비 1.0 배 해당량 NBPT 함유 비료 시비구(NF1.0) 1,860 gN₂O ha⁻¹, 3요소 표준시비구(SF) 2,339 gN₂O ha⁻¹, 질소 표준시비 기비 2.0배 해당량 NBPT 함유 비료 시비구(NF2.0) 5,953 gN₂O ha⁻¹ 순으로 시비량 증가에 비례하여 높았으며, 고추 재배기 간 동안의 지구온난화지수(GWP)로 나타낸 CO₂ 상당량 온실 가스 배출량은 질소 표준시비 기비 0.5배, 1.0배 해당량 NBPT 함유 비료 처리구에서 표준시비구 대비 각각 43%, 20% 감소 하였음을 알 수 있었다.

고추 재배 시 NBPT 함유 원예용 비료 시용에 따른 토양 중 화학성 변화

요소분해효소 억제제 NBPT 함유 비료 시용에 따른 고추 정식 후 60일의 토양중 화학성은 Table 4와 같다. 2016년의 경 우 3요소 표준시비(대조)에 비해 N₂O 배출량이 적었던 NF0.5

Table 3. Evaluation of the N fertilizer application on N₂O emissions and its GWP (Global Warming Potential) in the hot pepper cultivated field for 2015 and 2016

Treatments	Daily N ₂ O emission			Total N ₂ O emission			GWP		
	2015	2016	AVG	2015	2016	AVG	2015	2016	AVG
	----- gN ₂ O/ha/day -----			----- gN ₂ O/ha -----			----- kgCO ₂ -eq/ha -----		
SF	9.2	26.0	17.6	1,148a*	3,531a	2,339	356a (100)	1,095a (100)	725 (100)
F0	1.1	5.8	3.4	141b	783b	462	44b (12)	243b (22)	143 (17)
NF0.5	5.7	13.5	9.6	718c	1,830c	1,274	223c (63)	567c (52)	395 (57)
NF1.0	7.3	20.7	14.0	912d	2,809d	1,860	283d (79)	871d (80)	577 (80)
NF2.0	22.8	66.6	44.7	2,850e	9,055e	5,953	884e (248)	2,807e (256)	1,845 (252)

*The same letter within the same column means no significant difference at p<0.05 of LSD.

Table 4. Changes in pH, NO₃⁻-N, Av.P₂O₅, and Ex-K after 60 days after treatment (DAT) in 2015 and 2016

Treatments	pH		NO ₃ ⁻ -N		Av.P ₂ O ₅		Ex-K	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
	---- 1:5 H ₂ O ----		---- mg/kg ----		---- mg/kg ----		---- cmol _c /kg ----	
SF	5.4a	4.8b	181b	120b	261a	343a	0.26b	0.31b
F0	5.3a	5.1ab	28c	16c	224a	242b	0.20b	0.18c
NF0.5	5.4a	5.0ab	136b	53c	268a	261ab	0.25b	0.21c
NF1.0	5.3a	5.2a	178b	159ab	273a	270ab	0.26b	0.34ab
NF2.0	5.2a	5.2a	335a	196a	286a	347a	0.33a	0.41a

*The same letter within the same column means no significant difference at p<0.05 of LSD.

Table 5. Plant length, stalk diameter after 60 DAT and yield in dry weight of hot pepper after harvest in 2015 and 2016

Treatments	Plant length		Stalk diameter		Yields	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016
	----- cm -----		----- mm -----		----- kg/10a -----	
SF	90.5a*	91.5a	9.86a	14.83a	310a	402a
F0	84.8b	76.1b	8.68a	11.95b	252b	250b
NF0.5	90.2a	86.2a	9.73a	13.63ab	311a	396a
NF1.0	86.3b	90.7a	9.41a	13.86ab	278ab	446a
NF2.0	85.3b	91.7a	8.94a	14.63a	277ab	463a

*The same letter within the same column means no significant difference at p<0.05 of LSD.

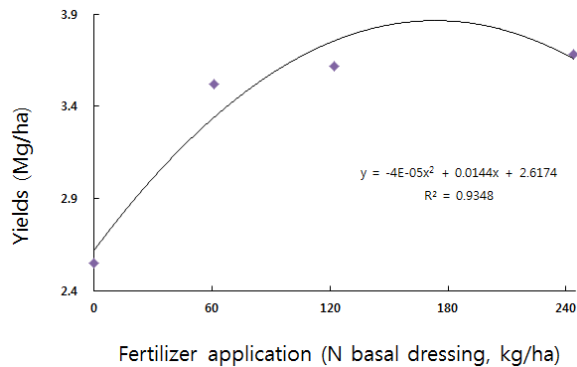


Fig. 2. Correlation between fertilizer application of N basal dressing and yields in dry weight of hot pepper after harvest for two years (2015 and 2016) average.

처리에서 질산태질소($\text{NO}_3\text{-N}$)가 낮게 나타났으며, 토양 pH와 유효인산($\text{Av.P}_2\text{O}_5$), 치환성칼륨(Ex-K) 등은 비료를 사용하지 않은 무처리를 제외한 처리간의 유의미한 차이는 없었다.

고추 재배 시 NBPT 함유 원예용 비료 시용에 따른 고추 생육 및 수량

NBPT 함유 비료 시용에 따른 고추 생육은 초장과 줄기직경 모두 무시비를 제외하고 처리간 차이 없었으며, 건고추 수량도 동일한 경향이었다(Table 5). NBPT 함유 비료 권장 시용량 산정을 위해 2개년 평균 건고추 수량과 3요소 표준시비구 질소 기비 시용량과의 관계식에서 3요소 표준시비구 질소 기비 시용량(122 kg/ha)과 수량이 대등한 NBPT 함유 비료 권장 시용량은 100.6 kg/ha로 나타났다(Fig. 2).

배추 재배 시 NBPT 함유 원예용 비료 시용에 따른 아산화질소 배출량

Fig. 3은 연도별 배추 재배기간 동안의 기온과 N_2O 배출량의 변화를 그래프로 표현하였다. 2015년과 2016년의 배추 재배기간(8월 25일~10월 31일) 중 기상환경은 평균기온은 각각 19.1, 19.5°C로 평년에 비해 0.5°C, 0.9°C 높았으며, 강수량은 75.0 mm, 186.1 mm로 평년 대비 28%, 70% 수준이었다. 2015년 N_2O 배출량의 변화는 기비 시용 후 지속적으로 감소하는 경향이었으나 2016년에는 배추 정식 후 약 15일

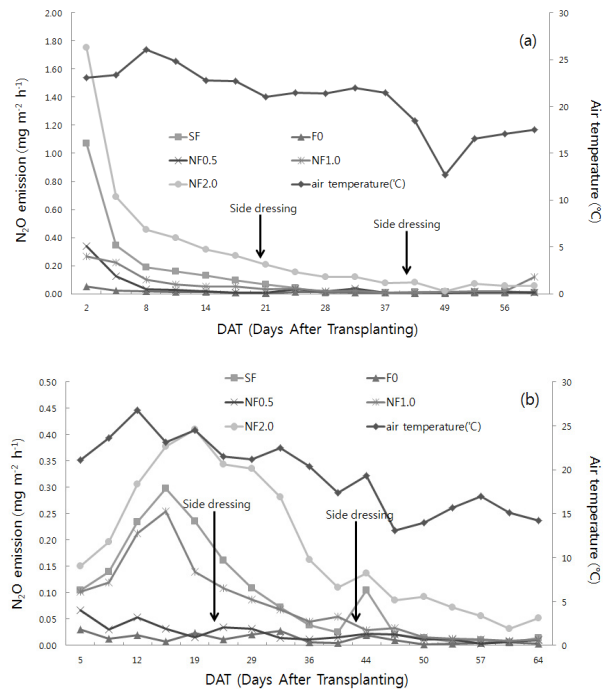


Fig. 3. Daily changes of N_2O emissions with different treatments and air temperature in chinese cabbage upland field in 2015(a), and 2016(b).

동안 77.2 mm 이상의 강우로 토양수분이 증가함에 따라 질소비료의 탈질 현상이 활발히 일어나 N_2O 배출량이 증가했다가 감소하는 패턴을 보인 것으로 생각되며, 이는 N_2O 배출량과 토양 수분함량과의 정의 상관관계 등을 지적한 선행연구와 같은 결과이다(Arone and Bohlen, 1998; Dobbie *et al.*, 1999; Cantarel *et al.*, 2011; Kanerva *et al.*, 2007). 온실가스 배출량을 조사한 2개년의 배추 재배기간 동안의 N_2O 배출량의 경향은 연도별 강우 패턴과 기온 등의 기상환경에 따라 다르게 나타났으나, 표준시비 및 NBPT 함유 비료 처리에 따른 배출량의 경향 및 저감량은 통계적으로 유의하게 나타났다(Table 6). 배추 재배기간 중 2개년 평균 총 N_2O 배출량은 무시비구(F0) 156 $\text{gN}_2\text{O/ha}$, 질소 기비 시용량 0.5배 해당량 NBPT 함유 비료 시비구(NF0.5) 512 $\text{gN}_2\text{O/ha}$, 질소 기비 시용량 1.0배 해당량 NBPT 함유 비료 시비구(NF1.0)

Table 6. Evaluation of the N fertilizer application on N₂O emissions and its GWP (Global Warming Potential) in chinese cabbage cultivated field for 2015 and 2016

Treatments	daily N ₂ O emission			total emission			GWP		
	2015	2016	AVG	2015	2016	AVG	2015	2016	AVG
	--- gN ₂ O/ha/day ---			----- gN ₂ O/ha -----			----- kgCO ₂ -eq/ha -----		
SF	20.1	24.2	22.2	1,148a*	1,431a	1,289	356a (100)	443a (100)	400 (100)
F0	2.5	2.9	2.7	141b	171b	156	44b (12)	53b (12)	48 (12)
NF0.5	12.6	5.2	8.9	718c	307c	512	223c (63)	95c (21)	159 (42)
NF1.0	16.0	19.8	17.9	912d	1,167d	1,039	283d (79)	362d (82)	322 (81)
NF2.0	50.0	49.6	49.8	2,850e	2,928e	2,889	884e (248)	908e (205)	896 (227)

*The same letter within the same column means no significant difference at p<0.05 of LSD.

Table 7. Changes in pH, NO₃⁻-N, Av.P₂O₅, and Ex-K after 60 days after treatment (DAT) in 2015 and 2016

Treatments	pH		NO ₃ ⁻ -N		Av. P ₂ O ₅		Ex-K		EC	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
	-- 1:5 H ₂ O --		--- mg/kg ---		--- mg/kg ---		-- cmol _c /kg --		--- dS/m ---	
SF	7.5ab*	6.8a	250ab	52ab	318a	236b	0.51a	0.47ab	2.27b	1.33ab
F0	7.3b	7.3a	11c	8b	228b	205c	0.30a	0.27b	0.40d	0.45c
NF0.5	7.4ab	7.1a	204b	15b	248b	214bc	0.42a	0.29b	1.52c	0.67bc
NF1.0	7.5ab	7.2a	233b	50ab	261b	227bc	0.49a	0.42ab	1.97b	1.30ab
NF2.0	7.7a	7.2a	319a	91a	304a	277a	0.53a	0.60a	2.64a	1.88a

*The same letter within the same column means no significant difference at p<0.05 of LSD.

Table 8. Efficiency of plant N uptake in dry weight of chinese cabbage after 60 DAT and chinese cabbage yields after harvest

Treatments	Efficiency of plant N uptake		Yields	
	2015	2016	2015	2016
	----- % -----		----- kg/10a -----	
SF	41ab*	33a	7,688bc	8,183b
F0	-	-	6,651d	3,425d
NF0.5	39ab	33a	7,471c	7,367c
NF1.0	45a	32a	8,008b	8,700b
NF2.0	37b	29a	8,876a	9,350a

*The same letter within the same column means no significant difference at p<0.05 of LSD.

1,039 gN₂O/ha, 3요소 표준시비구(SF) 1,289 gN₂O/ha, 질소 기비 사용량 2.0배 해당량 NBPT 함유 비료 시비구(NF2.0) 2,889 gN₂O/ha 순으로 배출량이 높게 나타났으며, 배추 재배기간 동안의 지구온난화지수(GWP)로 나타낸 CO₂ 상당량 온실가스 배출량은 요소분해효소 억제제 질소 기비 사용량 0.5배, 1.0배 해당량 NBPT 함유 비료 처리구에서 표준시비구 대비 각각 58%, 19% 감소한 결과를 보였다.

배추 재배 시 NBPT 함유 원예용 비료 사용에 따른 토양 중 화학성 변화

요소분해효소 억제제 NBPT 함유 비료 사용에 따른 배추 정식 후 60일의 토양중 화학성은 Table 7과 같다. NO₃⁻-N는 대조(표준시비)에 비해 N₂O 발생량이 적었던 NF0.5 처리구

에서 적은 경향으로 나타났으며 그 외 유효인산(Av.P₂O₅), 치환성칼륨(Ex-K) 등은 처리간의 유의미한 차이는 없었다.

배추 재배 시 NBPT 함유 원예용 비료 사용에 따른 배추 생육 및 수량

NBPT 함유 비료 사용에 따른 배추 생육 조사를 위해 배추 식물체의 건물 중 질소함량을 조사하였으며, 처리구별 질소 시비량으로 나누어 식물체 질소 이용효율을 산정하였다. 정식 후 60일의 배추 식물체의 건물 중 질소함량과 질소 시비량으로 구한 질소 이용효율은 처리간 유의한 차이가 없었으며 (Table 8), 배추 수량은 대조에 비해 NF0.5 처리구는 적고, NF1.0 처리구에서는 대등한 경향이였다. NBPT 함유 비료 권장 사용량 산정을 위해 2개년 평균 배추 수량과 3요소 표

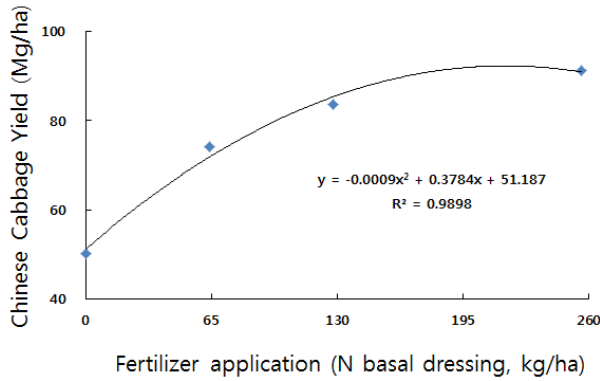


Fig. 4. Correlation between fertilizer application of N basal dressing and chinese cabbage yields after harvest for two years (2015 and 2016) average.

준시비구 질소 기비 사용량과의 관계식에서 3요소 표준시비구 질소 기비 사용량(128 kg/ha)과 수량이 대등한 NBPT함유 원예용 비료 권장 사용량은 96.7 kg/ha로 나타났다(Fig. 4).

요 약

본 연구는 고추와 배추 재배 시 요소분해효소 억제제 NBPT가 함유된 원예용 비료 사용에 따른 온실가스 저감 효과 구명을 위하여 경기도농업기술원 시험포장에서 2년간(2015~2016년) 수행하였다. 고추 재배기간 중 N_2O 배출량은 연도별 기상환경에 따라 배출양상과 배출량에는 차이가 있었으나 처리별 저감효과는 통계적으로 유의하게 나타났으며, 3요소 표준시비(대조)에 비해 질소 표준시비 기비량 0.5배, 1.0배 해당량 NBPT 함유 원예용 비료 처리에서 각각 43%, 20% 적게 발생되었다. 고추 생육(초장과 줄기직경) 및 건고추 수량은 3요소 표준시비와 NBPT 함유 비료 NF0.5, NF1.0 처리구에서 대등한 경향으로 나타났다. 고추 정식 후 60일 토양화학적 질산태질소는 3요소 표준시비에 비해 온실가스 발생량이 적었던 NF0.5 처리구에서 적은 경향이었으며, 유효인산과 치환성칼륨은 NBPT 함유 비료 처리구와 3요소 표준시비 처리구가 대등한 경향이었다. 배추 재배지에서 발생하는 온실가스 또한 재배기간 중 기상환경에 따라 N_2O 배출양상과 배출량에는 차이가 있었으나 처리별 저감효과는 통계적으로 유의하게 나타났으며, 3요소 표준시비에 비해 질소 표준시비 기비량 0.5배, 1.0배 해당량 NBPT 함유 비료 처리에서 온실가스가 각각 58%, 19% 적게 발생되었다. 배추 정식 후 60일의 토양 중 화학성 변화에서 질산태질소와 전기전도도는 3요소 표준시비에 비해 온실가스 발생량이 적었던 질소 표준시비 기비량 0.5배 해당량 NBPT 함유 비료 처리에서 적은 경향이었으며, 유효인산과 치환성칼륨은 NF0.5, NF1.0 처리구에서 적은 경향이었다. 배추 식물체 질소 이용효율은 처리간 유의한 차이가 없었으며, 배추 수량은 3요소 표준시비 7,936 kg/10a와 질소 표준시비 기비량 1.0배 해당량 NBPT 함유 비료 처리에서 대등하게 나타났다. 이와 같이 고추와 배추 재배지

에서 요소분해효소 억제제 NBPT 함유 비료를 사용하면 표준시비와 같은 생육상황에서 온실가스 저감효과를 볼 수 있는 것으로 분석되었다.

Note

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgment

This work was supported by Rural Development Administration (Project number: PJ012489032018).

References

- Arnone III, J. A., & Bohlen, P. J. (1998). Stimulated N_2O flux from intact grassland monoliths after two growing seasons under elevated atmospheric CO_2 . *Oecologia*, 116(3), 331-335.
- Bremner, J. M., & Chai, H. S. (1986). Evaluation of N-butyl phosphorothioic triamide for retardation of urea hydrolysis in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 17(3), 337-351.
- Cai, G. X., Freney, J. R., Muirhead, W. A., Simpson, J. R., Chen, D. L., & Trevitt, A. C. F. (1989). The evaluation of urease inhibitors to improve the efficiency of urea as a N-source for flooded rice. *Soil Biology and Biochemistry*, 21(1), 137-145.
- Cantarel, A. A., Bloor, J. M., Deltroy, N., & Soussana, J. F. (2011). Effects of climate change drivers on nitrous oxide fluxes in an upland temperate grassland. *Ecosystems*, 14(2), 223-233.
- Cantarella, H., Otto, R., Soares, J. R., & de Brito Silva, A. G. (2018). Agronomic Efficiency of NBPT as a Urease Inhibitor: A review. *Journal of Advanced Research*, 13, 19-27.
- Chai, H. S., & Bremner, J. M. (1986). Effects of phosphoroamides on ammonia volatilization and nitrate accumulation in soils treated with urea. *Agronomy Journal Abstract*, 176.
- Dobbie, K. E., McTaggart, I. P., & Smith, K. A. (1999). Nitrous oxide emissions from intensive agricultural systems: variations between crops and seasons, key driving variables, and mean emission factors. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D21), 26891-26899.
- Firestone, M. K., & Davidson, E. A. (1989). Microbiological basis of NO and N_2O production and consumption in soil. *Exchange of Trace Gases between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere*, 47, 7-21.

- Hauck, R. D. (1984). Technological approaches to improving the efficiency of nitrogen fertilizer use by crop plants. *Nitrogen in Crop Production*. American Society of Agronomy, Madison, WI. 551-560.
- Isermann, K. (1994). Agriculture's share in the emission of trace gases affecting the climate and some cause-oriented proposals for sufficiently reducing this share. *Environmental Pollution*, 83(1-2), 95-111.
- Joo, Y. K. (1992). The Activity and Utilization of Urease Inhibitors, *Weed and Turfgrass Science*, 6(1), 23-28.
- Kanerva, T., Regina, K., Rämö, K., Ojanperä, K., & Manninen, S. (2007). Fluxes of N₂O, CH₄, and CO₂ in a meadow ecosystem exposed to elevated ozone and carbon dioxide for three years. *Environmental Pollution*, 145(3), 818-828.
- Park, H. J., & Park, J. H. (2017). Effect of pyrolytic acids on urease inhibition, *Journal of Applied Biological Chemistry*, 60(2), 173-178.
- Wrage, N., Velthof, G. L., Van Beusichem, M. L., & Oenema, O. (2001). Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide. *Soil Biology and Biochemistry*, 33(12-13), 1723-1732.