

불확도 기반 발토양 아산화질소 배출 저감 여부 판정

주옥정^{1,2} · 강남구^{3,4*} · 임갑준²

¹서울대학교 협동과정 농림기상학전공, ²경기도농업기술원 환경농업연구과,
³과학기술연합대학원대학교 측정과학전공, ⁴한국표준과학연구원 가스분석센터
(2019년 9월 5일 접수; 2019년 12월 10일 수정; 2019년 12월 23일 수락)

Uncertainty-based Decision on Mitigation of Nitrous Oxide Emissions in Upland Soil

Okjung Ju^{1,2}, Namgoo Kang^{3,4*} and Gapjune Lim²

¹Interdisciplinary Program in Agricultural & Forest Meteorology, Seoul National University

²Environmental Agriculture Research Division, Gyeonggido Agricultural Research and Extension Services

³Science of Measurement Major, University of Science and Technology

⁴Center for Gas Analysis, Division of Chemical and Medical Metrology,

Korea Research Institute of Standards and Science

(Received September 5, 2019; Revised December 10, 2019; Accepted December 23, 2019)

ABSTRACT

In the agricultural sector, greenhouse gas emissions vary depending on the interaction of all ecosystem changes such as soil environment, weather environment, crop growth, and anthropogenic farming activities. Agricultural sector greenhouse gas emissions resulting from many of these interactions are highly variable. Uncertainty-based evaluation that defines the interval with confidence level of greenhouse gas emission and absorption is necessary to take account of the variance characteristics of individual emissions, but research on uncertainty evaluation method is insufficient. This study aims to decide on the effect of reducing N₂O emissions from upland soils using an uncertainty-based approach. An uncertainty-based approach confirmed whether there was a difference between confidence intervals in the 5 different fertilizer treatment groups to reduce greenhouse gas emissions. Unlike the statistically significant test with three repetition averages, the uncertainty-based approach method estimated in this study is able to estimate the confidence interval considering the distribution characteristics of the emissions, such as the dispersion characteristics of individual emissions. Therefore, it is considered that the reliability of emissions can be improved by statistically testing the variance characteristics of emissions such as the uncertainty-based approach. It is hoped that the direction of the uncertainty-based approach for the effect of reducing greenhouse gas emissions in agriculture will be helpful in the future development of agricultural greenhouse gas emission reduction technology, adaptation to climate change, and further development of sustainable eco-social system.

Key words: Uncertainty, Nitrous Oxide, Mitigation, NBPT Fertilizer



* Corresponding Author : Namgoo Kang
(nkang@kriss.re.kr)

I. 서 론

기후변화에 따른 농업 환경의 변화를 이해하기 위해서는 온실가스의 방출 특성을 정량적/정성적으로 분석하여 그 방출 기작을 이해함으로써 그에 맞는 대책을 수립하는 것이 중요하다. 우리나라 농업 분야 아산화질소(N_2O) 배출량은 9.8백만톤으로 국가 전체 N_2O 배출량의 약 66%를 차지하며, 농경지 토양 부문 N_2O 배출량 감소의 주요 원인을 화학비료 사용량으로 평가한 바 있다(GIR, 2018). 농경지에서 대기로 배출되는 N_2O 는 81% 정도가 사용된 질소비료에 의해 배출되며, 토양에 요소비료를 사용하면 가수분해로 방출되는 암모늄(NH_4)이 화학적 자급영양생물 질화균에 의해 NO_2^- , NO_3^- 로 산화되고, 이러한 질산화작용의 여러 생화학적 과정을 거쳐서 대기 중으로 N_2O 와 NO가 배출된다(Isermann, 1994; Firestone and Davidson, 1989). 이에 농경지에서 발생하는 N_2O 배출량을 줄이기 위해서는 비료 사용을 줄이거나 토양 중에서 발생하는 질산화 및 탈질작용 등 생화학적 과정을 적절히 조절하는 것이 효과적이다. 우리나라는 농경지에서 비료사용량을 줄이기 위하여 시비효율 증진비료 개발, 작물 및 품종별 시비법 개발과 개선 등의 연구가 진행되었으며, 발작물 재배시 N_2O 발생 감축을 위한 재배 기술로는 유기물 사용, 경운 관리, 물 관리, 질산화억제제 사용, 작부체계, 재배시기 등이 있다(RDA, 2011). 또한 토양으로부터 N_2O 발생에 영향을 줄 수 있는 요인으로는 지온과 강우량(Cantarel *et al.*, 2011; Kanerva *et al.*, 2007), 토양의 수분함량(Kanerva *et al.*, 2007), 질화세균의 탈질작용(Wrage *et al.*, 2001) 등으로 기상환경 변화에 따른 토양 내 미생물 활동 등이 유기적으로 연결되어 N_2O 배출량에 영향을 준다. FAO-IAEA 설명서에서는 측정값에 영향을 주는 중요한 요소로서, 토성, pH, 유기물 함량, 수분함량, 질산염 및 암모늄 함량, 산화 환원 특징, 식생 피복, 기온, 일사량, 상대습도 및 강우량과 같은 기상요소를 제시한 바 있다(FAO and IAEA, 1992).

농업 분야 온실가스 배출량 산정에는 토양환경, 기상환경 등 온실가스 배출량에 영향을 줄 수 있는 많은 변수들이 있으며, 이에 따라 배출량의 변동성(분산, 표준편차)이 크게 나타난다(Zhang *et al.*, 2017; Ju *et al.*, 2018). 온실가스 배출량에 영향을 미치는 제어되지 않는 혼란변수 공변량이 있고 군내변동이 크다면 집단간 평균차이를 확인하는 것이 어렵기 때문에 집단

간 처리 효과 유무를 검정하는 방법이 필요하다. 그러므로 농업 분야 온실가스 저감효과 판단을 위해서는 신뢰구간의 정량적 판단이 제시되어야 한다. 측정결과에 신뢰성에 관한 정량적인 방법의 표현으로서 오차(error)나 오차분산을 오랫동안 사용해왔으나, 참값을 알 수 없기 때문에 명시된 측정결과에 신뢰성에는 의심이 남아 있을 수 밖에 없다(Kim and Cho, 2003). 이에 따라 국제적으로 측정결과에 신뢰성을 판단할 수 있는 척도로서 불확도(uncertainty) 개념이 도입되고 국제표준화기구(International Organization for Standardization, ISO)가 여러 국제기구와 합동으로 “측정불확도 표현지침(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, GUM)”을 1993년에 발간하였으며, 2006년 IPCC 지침에서도 온실가스 배출량 산정에 따른 불확도를 제시하도록 하였다. 하지만 GUM에서는 불확도 평가를 위한 측정량의 함수표현, 측정모델의 설정방법을 구체적으로 명시하고 있지 않으며, IPCC에서도 불확도를 가능한 값들의 범위와 가능성을 특징짓는 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF)로서 기술될 수 있다고 하는 등의 모호한 정의를 내리고 있는 것은 아직까지 많은 부분에서 계량화하기 어려운 계수가 존재하기 때문인 것으로 판단된다(Bae *et al.*, 2013). “불확도”라는 단어는 의심의 의미이며, 측정불확도는 측정결과에 대한 타당성에 대한 의심을 나타낸다. 의심의 일반적 개념과 표준편차와 같은 정량적 척도의 두 가지 의미를 포함하여 측정량을 합리적으로 추정된 값의 산포특성을 나타내는 파라미터가 불확도이다(ISO/IEC Guide 98-3, 2008). 측정결과에 불확도는 측정량의 값을 정확하게 알 수 없다는 사실을 반영하며, 불확도의 요인으로는 환경조건이 측정에 미치는 영향에 대한 지식 부족 및 환경 조건에 대한 불완전한 측정 등도 포함된다. 그러므로 불확도를 산정하는 것은 측정 결과에 대한 신뢰성을 정량적으로 표현하는 것으로 정리할 수 있다.

농업 분야 온실가스 배출량 산정 시 여러 영향요소에 의하여 측정량의 산포가 존재하므로 산포에 의한 영향을 배제한 채 평균 혹은 총 배출량을 평가하여 표현하는 것은 온실가스 배출량에 대한 올바른 정보를 제공할 수 없게 되며, 경우에 따라서는 잘못된 의사결정을 유발시키는 오류를 초래할 수도 있게 된다. 그러므로 본 연구에서는 농업 분야 N_2O 배출량 저감효과의 유무를 판정하기 위하여 불확도(ISO/IEC Guide 98-3, 2008)의 개념을 도입하였다. 불확도는 측정량을

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

Crop	pH	OM	Av. P ₂ O ₅	Ex.cations				EC	NO ₃ ⁻ -N	Soil texture
				K	Ca	Mg	Na			
	1:5	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	-----cmol _c kg ⁻¹ -----				dS m ⁻¹	mg kg ⁻¹	
Hot Pepper	5.1	9	250	0.32	5.3	2.0	0.12	1.99	155	Sandy Loam
Chinese cabbage	7.0	9	213	0.36	6.0	2.1	0.26	0.73	7	

합리적으로 추정된 값의 산포 특성을 나타내는 모수 (예, 표준편차, 명시된 신뢰구간을 갖는 한 구간의 반 너비 등)이며, 합리적으로 추정된 불확도는 집단간 평균의 차이 유무를 효과적으로 검증할 수 있을 것이다. 측정불확도 표현 지침(ISO/IEC Guide 98-3, 2008)에서 제시한 측정량의 표준불확도는 표준편차로 표현된 측정결과와 불확도이며, 측정결과가 여러 개의 다른 입력량으로부터 구해질 때 이 측정결과와 불확도를 합성표준불확도라 한다. 합성표준불확도는 각 입력량의 불확도로 인해 측정결과인 출력량의 표준불확도로서 각 입력량의 분산의 합의 양의 제곱근으로 산정할 수 있다. 출력량에 대한 합리적인 추정값의 신뢰구간으로서 확장불확도는 합성표준불확도에 포함인자를 곱하여 구한다. 여기서 포함인자는 신뢰구간 추정을 위해 사전에 결정된 신뢰의 수준(포함확률)과 유효자유도에 의해 결정되는 수치 인자이다. 본 연구에서는 95% 신뢰수준에서 추정된 유효자유도(30 이상)에 대한 스튜던트 t-분포 값(약 2.0)으로 산정하였다. 처리의 유의성 검정은 평균값으로부터 확장불확도를 가감하여 상·하한 신뢰구간을 산정하여 집단간 평균의 차이를 검정하였다. 밭토양 N₂O 배출량 저감효과는 요소의 가수분해를 효과적으로 억제시키는 것으로 판명된 요소분해 효소 억제제물질(urease inhibitor) 중 세계적으로 사용되고 있는 NBPT(N-(n-butyl) thiophosphoric triamide)가 함유된 원예용 복합비료를 사용한 처리 등 5처리의 집단간 3반복 온실가스 배출량에 대하여 불확도 추정에 의한 통계적 유의성을 검증하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 시험장소 및 시험방법

본 연구는 경기도 화성시 기산동에 위치한 경기도 농업기술원 내 시험연구포장(37°13'N, 127°02'E)에서 2016년 재배한 고추, 배추 밭토양에서 측정된 온실가

스 배출량에 대하여 평가하였다. 시험전 고추, 배추 밭토양의 이화학적 특성은 Table 1과 같다. 농촌진흥청에서 작물 재배에 필요한 적정량(NAS, 2017)으로 제시한 고추, 배추 밭토양의 pH 적정범위(6.0~6.5)보다 고추밭(예산통)의 pH는 다소 낮았고, 배추밭은 다소 높은 수준이었다. 고추, 배추 밭토양의 유기물과 칼륨 함량은 모두 적정범위(유기물: 25~35g kg⁻¹, 칼륨: 0.70~0.80cmol_c kg⁻¹)보다 낮은 수준이었다.

밭토양 N₂O 배출량 저감효과 구명을 위해 사용한 요소분해효소 억제제 NBPT함유 복합비료(NBPT-treated Fertilizer, NF)는 경기도농업기술원과 ㈜풍농이 공동으로 개발한 비료로 특허등록(제10-1896295호)되어 있으며, NBPT 함유 복합비료와 표준시비 및 무시비 등 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 복합비료(NBPT-treated Fertilizer, NF)를 사용하였다. 표준시비 및 추비 사용 비중은 요소, 용과린, 염화칼리이며, NBPT함유 복합비료는 기비로만 사용하였다. 고추(배로파)는 2016년 2월 18일에 파종하고 5월 12일에 재식거리 100 × 40cm 로 시험구당 102주(17주 × 6열) 정식하여 5월 17일부터 9월 30일까지 N₂O를 측정하였다. 고추 시험구의 면적은 42m²(7.0m × 6.0m)이며, 처리간 유의성 검정을 위하여 난괴법 3반복으로 배치하였다. 배추(CR 황금스타)는 2016년 8월 5일에 파종하고 8월 24일에 재식거리 75 × 45cm 로 시험구당 126주(18주 × 7열) 정식하여 8월 26일부터 10월 27일까지 N₂O를 측정하였다. 배추 시험구의 면적은 48m²(6.0m × 8.0m)이며, 처리간 유의성 검정을 위하여 난괴법 3반복으로 배치하였다.

2.2. N₂O 채취 및 분석방법

N₂O 배출량 분석은 PVC 소재 패쇄형 원형 챔버(지

Table 2. Amount of fertilizer (N-P-K) application in the experiment (unit: kg 10 a⁻¹)

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
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(N-(n-butyl) thiophosphoric triamide-treated Fertilizer)

름 25cm, 높이 45cm)를 시험구당 3반복으로 설치하여 주 2회, 매회 오전 10~11시 사이에 Mininert valve가 장착된 60mL polypropylene syringe로 채취하였다. 시료 채취 방법은 챔버의 위 뚜껑을 닫자마자 1차로 채취하고 30분 경과 후 2차로 시료를 채취하였으며, 동시에 최초온도와 30분 후 온도를 기록하였으며, 챔버 유효높이를 조사하여 Eq. 1에 준하여 온실가스 배출량을 산정하였다. N₂O 분석은 12 port gas sampling valve가 장착된 GC-ECD(Varian 450)로 분석하였으며, column은 Porapack Q(80/100 mesh)이 충전된 1/8" × 3m 의 stainless steel tubing column이었고 검출기 온도는 320℃, 운반기체(carrier gas)는 질소(N₂)로 유속을 분당 30 mL로 조절하였다.

$$F = \rho \times V / A \times \Delta c / \Delta t \times 273 / T \quad \text{또는} \quad \text{(Eq. 1)}$$

$$F = \rho \times h \times \Delta c / \Delta t \times 273 / T$$

F: 단위시간 당 단위면적에서 배출되는 N₂O의 양 (mgN₂O m⁻² hr⁻¹)

ρ: N₂O의 밀도를 고려한 변환계수(mg m⁻³),

$$\rho_{N_2O} = 1.96$$

A: 챔버의 바닥면적(m²)

V: 챔버 내 공기의 체적(m³)

h: 챔버 내 유효높이(m)

Δc/Δt: 챔버 내 N₂O 농도의 평균증가속도 (ppmv hr⁻¹)

T: 챔버 내 평균기온(K)

2.3. 토양분석 및 기타 조사방법

토양 분석은 토양 및 식물체 분석법(NAS, 2000)에 의거 토양분석용 시료는 일체형오거(Eijkelkamp, 직경 30mm)를 이용하여 15cm 깊이로 토양을 채취한 후 음건하여 2mm 체를 통과시킨 것을 사용하였다. 토양 pH는 초자전극법에 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-NH₄OCA (pH 7.0) 완충용액으로 침출하여 유도결합플라즈마 발광광도계(GBC, Integra XMP)로 정량하였다.

2.4. 발토양 N₂O 배출량 저감 효과의 유무 판정을 위한 불확도 추정 기법

발토양에서 발생하는 N₂O 배출량의 온실가스 저감 효과 유무 판정을 위해 측정 분야에서 불확도의 표현에 관한 국제 표준 지침(ISO/IEC Guide 98-3, 2008)에 제시한 불확도 추정 방법을 착안하였다. 측정모델식에 제시된 각 입력량의 추정값의 표준불확도, 측정모델식에 제시된 출력량의 추정값의 합성표준불확도, 여기에 포함인자를 곱하여 확장불확도를 산정한 후 평균으로부터 확장불확도를 가감하여 평균 주위의 상·하한(포함구간)을 산정하였다. 이 과정을 개별적 처리구 집단에 공통적으로 적용하여 각 집단의 평균 주위의 포함구간을 산정한 후, 한 처리구 집단의 포함구간이 다른 처리구 집단의 평균을 포함하지 않으면 두 집단의 평

균 간 차이가 유의하다고 판정하였다.

본 연구에서 적용한 불확도 추정 방법의 구체적인 과정은 다음과 같다. 한 처리구 내 3반복 챔버(a, b, c)에서 측정된 N₂O 배출량 F는 각 챔버에서 산출한 N₂O 배출량에 대한 평균으로 Eq. 2와 같이 산정하였고, 작물 재배기간 동안의 N₂O 배출량 산포에 의한 표준편차(s), 표본크기(n)로 각 챔버에 대한 평균 배출량에 대해 표준불확도(u(a), u(b), u(c))를 산정하였다 (Eq. 3 and Eq. 4). 한 처리구 내 전체 평균 N₂O 배출량에 대한 합성표준불확도 u(F)는 상기 국제표준에 제시된 불확도 전파 법칙에 근거하여 각 챔버에서 발생한 N₂O 평균 배출량에 대한 감도계수(공통적으로 1)와 표준불확도(u(a), u(b), u(c))를 곱한 값을 제곱한 후 모두 합하여 양의 제곱근을 취하여 구하였다(Eq. 5). 한 처리구 내 전체 평균 N₂O 배출량에 대한 확장불확도(U)는 전술한 합성표준불확도 u(F)에 포함인자 k를 곱하여 산정한다(Eq. 6). 여기서 포함인자 k는 참값을 포함할 것으로 기대되는 신뢰의 수준(또는 포함확률 CL)에 따라 정해지며, 본 연구에서는 95% 신뢰의 수준에서 합성표준불확도 u(F)에 대한 30 이상인 유효자유도(df)를 고려하여 t-분포 값(t-value)인 근사값 2.0를 이용하였다. 95% 신뢰구간(또는 포함구간)의 상·하한은 각 처리구 내 전체 평균 N₂O 배출량의 평균값(F)으로부터 확장불확도(U)를 가감하여 산정하였다 (Eq. 7 and Eq. 8).

$$F = \frac{1}{3}(a+b+c) \quad (\text{Eq. 2})$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad \text{where } x = a, b, \text{ and } c \quad (\text{Eq. 3})$$

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad \text{where } x = a, b, \text{ and } c \quad (\text{Eq. 4})$$

$$u(F) = \frac{1}{3}\sqrt{[u(a)]^2 + [u(b)]^2 + [u(c)]^2} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$U(F) = k \cdot u(F) \quad \text{where } k = t\text{-value}(df > 30, CL 95\%) = 2.0 \quad (\text{Eq. 6})$$

$$\text{Upper limit} = F + U(F) \quad (\text{Eq. 7})$$

$$\text{Lower limit} = F - U(F) \quad (\text{Eq. 8})$$

III. 결과 및 고찰

3.1. 고추, 배추 재배 시 NBPT 함유 원예용 복합 비료 시용에 따른 N₂O 배출량

밭토양 N₂O 배출량에 미치는 토양 및 기상환경의 영향인자 고려를 위해 본 연구에서는 고추, 배추 재배기간 동안의 N₂O 농도 변화와 함께 기온과 강수량 등의 기상환경 변화를 조사하였으며 2016년 고추, 배추 재배기간 동안의 기온과 강수량, N₂O 배출량의 변화는 Fig. 1과 같다. 고추 재배기간(5월 12일~9월 30일) 중 평균기온은 24.0°C로 평년에 비해 1.4°C 높았으며, 강수량은 551.0mm로 평년 대비 51% 수준이었다. 고추 정식 후 60일까지 강수량이 262.3mm로 평년 대비 101%로 고추 생육초기에 비가 많이 내렸으며 강우로 인한 토양수분이 증가함에 따라 질소비료의 탈질 현상이 활발히 일어나 N₂O 배출량이 증가했다가 감소하는 경향으로 나타났다. 고추 재배기간 중 발생한 N₂O 배출량은 무시비구 F0 783gN₂O ha⁻¹, 질소 표준시비 기비 0.5배 해당량 NBPT 함유 복합비료 시비구 NF0.5 1,830, 질소 표준시비 기비 1.0배 해당량 NBPT 함유 복합비료 시비구 NF1.0 2,809, 3요소 표준시비구 SF 3,531, 질소 표준시비 기비 2.0배 해당량 NBPT 함유 복합비료 시비구 NF2.0 9,055gN₂O ha⁻¹ 순으로 시비량 증가에 비례하여 높았으며, 고추 재배기간 동안의 지구온난화잠재력(Global Warming Potential, GWP)으로 나타낸 CO₂ 상당량 온실가스 배출량은 요소분해 효소 억제제 NBPT 함유 비료 질소 기비 시용량 0.5배, 1.0배 해당량 비료 처리구에서 표준시비구 대비 각각 48%, 20% 감소한 결과를 보였다(Table 3).

배추 재배기간(8월 25일~10월 31일) 중 평균기온은 19.5°C로 평년에 비해 0.9°C 높았으며, 강수량은 186.1mm로 평년 대비 70% 수준이었다. 배추 정식 후 15일 동안 77.2mm 이상의 강우로 토양수분이 증가함에 따라 질소비료의 탈질 현상이 활발히 일어나 N₂O 배출량이 증가했다가 감소하는 경향으로 나타났으며, 이는 N₂O 배출량과 토양 수분함량과의 정의 상관관계 등을 지직한 선행연구와 같은 결과이며(Arone and Bohlen, 1998; Dobbie *et al.*, 1999; Cantarel *et al.*, 2011; Kanerva *et al.*, 2007), Sozanska *et al.*(2002)는 WFPS(Water Filled Pore Space)가 80~85%에서 N₂O 배출량이 최대가 된다고 보고한 바 있다. 배추 재배기간 중 발생한 N₂O 배출량은 무시비구 F0 171gN₂O ha⁻¹, 질소 표준시비 기비 0.5배 해당량

NBPT 함유 복합비료 시비구 NF0.5 307, 질소 표준시비 기비 1.0배 해당량 NBPT 함유 복합비료 시비구 NF1.0 1,167, 3요소 표준시비구 SF 1,431, 질소 표준시비 기비 2.0배 해당량 NBPT 함유 복합비료 시비구 NF2.0 2,928gN₂O ha⁻¹ 순으로 시비량 증가에 비례하여 높았으며, 배추 재배기간 동안의 지구온난화잠재력

(Global Warming Potential, GWP)으로 나타난 CO₂ 상당량 온실가스 배출량은 요소분해효소 억제제 NBPT 함유 복합비료 질소 기비 시용량 0.5배, 1.0배 해당량 비료 처리구에서 표준시비구 대비 각각 79%, 18% 감소한 결과를 보였다(Table 3).

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

Treatments	Daily N ₂ O emission (gN ₂ O ha ⁻¹ day ⁻¹)		Total emission (gN ₂ O ha ⁻¹)		GWP (kgCO ₂ ha ⁻¹)	
	Hot pepper	Chinese cabbage	Hot pepper	Chinese cabbage	Hot pepper	Chinese cabbage
SF	26.0	24.2	3,531	1,431	1,095(100)	443(100)
F0	5.8	2.9	783	171	243(22)	53(12)
NF0.5	13.5	5.2	1,830	307	567(52)	95(21)
NF1.0	20.7	19.8	2,809	1,167	871(80)	362(82)
NF2.0	66.6	49.6	9,055	2,928	2,807(256)	908(205)

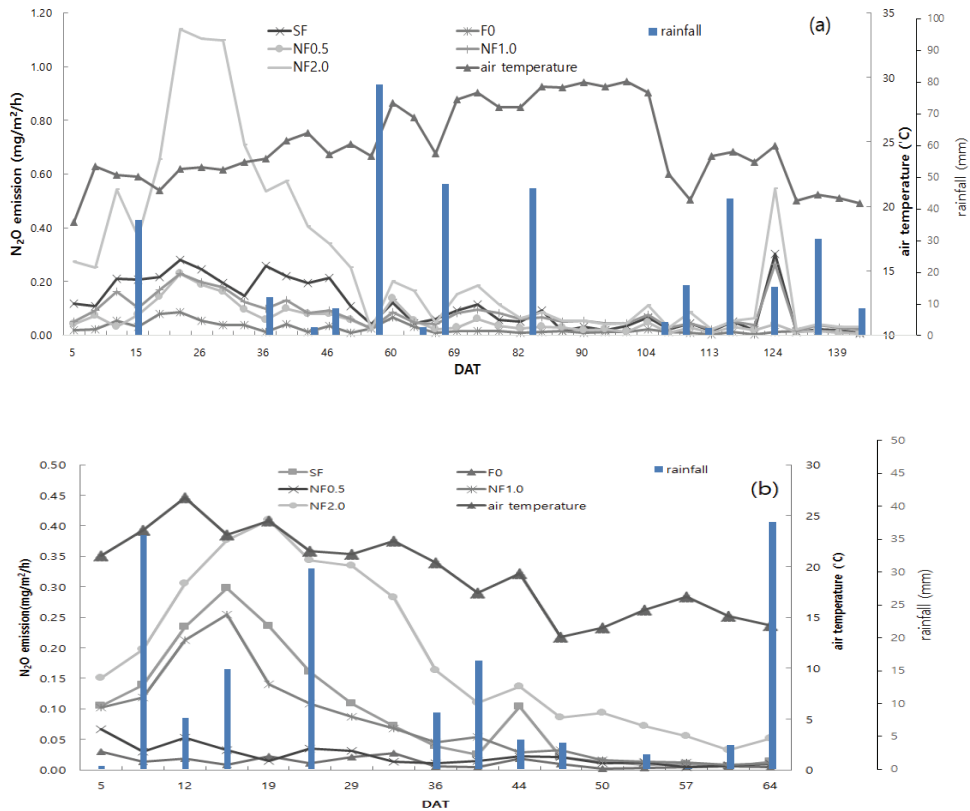


Fig. 1. Daily changes of N₂O flux with different treatments, air temperature and rainfall in the hot pepper (a) and Chinese cabbage (b) cultivated field in 2016.

Table 4. Evaluation of the N fertilizer application on total N₂O emissions and uncertainty in the hot pepper and Chinese cabbage cultivated field in 2016 (unit: gN₂O ha⁻¹)

Treat-ments	N ₂ O emissions in Hot pepper					Uncertainty		
	a	b	c	F	u(F)	U(F)	upper limit	lower limit
SF	5,866	2,397	2,329	3,531	8.74	17.81	3,549	3,513
F0	1,073	311	965	783	2.13	4.35	787	779
NF0.5	1,038	905	3,548	1,830	7.27	15.02	1,845	1,815
NF1.0	3,058	2,720	2,649	2,809	6.40	12.98	2,822	2,796
NF2.0	8,953	5,938	12,274	9,055	30.09	61.20	9,116	8,994

Treat-ments	N ₂ O emissions in Chinese cabbage					Uncertainty		
	a	b	c	F	u(F)	U(F)	upper limit	lower limit
SF	1,917	829	1,546	1,431	15.91	33.16	1,464	1,397
F0	155	115	242	171	1.23	2.55	173	168
NF0.5	342	355	223	307	2.43	5.05	312	302
NF1.0	727	2,153	620	1,167	12.26	26.08	1,193	1,140
NF2.0	4,834	902	3,048	2,928	27.04	56.93	2,985	2,871

3.2. 불확도 추정에 근거한 온실가스 저감 효과 유무의 판정

밭토양에서 발생하는 N₂O 배출량 저감 효과 유무 판정을 위한 작물별 재배기간 동안 각 처리구 내 3반복 챔버에서 발생한 N₂O 배출량 a, b, c와 3반복 챔버의 평균 N₂O 배출량 F, 각 챔버의 N₂O 배출량에 대한 표준편차와 표준편차 산정에 사용된 표본크기를 이용하여 추정된 각 챔버의 N₂O 평균 배출량의 표준불확도, 3반복 챔버에 대한 N₂O 평균 배출량의 합성표준불확도 u(F), 95% 신뢰의 수준에서의 확장불확도 U(F), 평균으로부터 확장불확도 만큼 떨어진 상한과 하한의 구간(신뢰 구간)은 Table 4와 같이 나타났다. N₂O 평균 배출량의 산포 특성의 정량적 모수로서 추정된 확

장불확도(U(F)) 추정 결과를 보면 N₂O 평균 배출량이 가장 크게 나타난 NF2.0 처리구에서 확장불확도가 가장 크게 나타났으며, N₂O 평균 배출량이 클수록 확장 불확도가 커지는 경향을 보였다. N₂O 배출량 저감 효과의 유무를 판정하기 위한 방법으로 사용되는 각 처리구들 간의 평균의 차이에 대한 통계적 유의성은 측정 결과의 산포 특성을 반영하는 확장불확도 산정을 통해 상한과 하한(upper and lower limit)의 구간인 신뢰 구간을 통해 판단할 수 있다. 총 5개 처리구의 비교 집단들에 대해 NBPT 함유 원예용 복합비료 시용(NF) 처리구의 N₂O 평균 배출량이 비교 대상인 3요소 표준 시비(SF) 처리구의 신뢰 구간에 포함되지 않고, 동시에 NF 처리구의 N₂O 평균 배출량이 SF 처리구의 N₂O

Table 5. Changes of soil chemical properties by treatment after 60 days after treatment(DAT) in 2016.

Treatments	pH(1:5)		NO ³⁻ -N (mg kg ⁻¹)		Av.P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)		Ex-K (cmol _c kg ⁻¹)	
	Hot pepper	Chinese cabbage	Hot pepper	Chinese cabbage	Hot pepper	Chinese cabbage	Hot pepper	Chinese cabbage
SF	4.8 ^{b*}	6.8 ^a	120 ^b	52 ^{ab}	343 ^a	236 ^b	0.31 ^b	0.47 ^{ab}
F0	5.1 ^{ab}	7.3 ^a	16 ^c	8 ^b	242 ^b	205 ^c	0.18 ^c	0.27 ^b
NF0.5	5.0 ^{ab}	7.1 ^a	53 ^c	15 ^b	261 ^{ab}	214 ^{ba}	0.21 ^c	0.29 ^b
NF1.0	5.2 ^a	7.2 ^a	159 ^{ab}	50 ^{ab}	270 ^{ab}	227 ^{bc}	0.34 ^{ab}	0.42 ^{ab}
NF2.0	5.2 ^a	7.2 ^a	196 ^a	91 ^a	347 ^a	277 ^a	0.41 ^a	0.60 ^a

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

Table 6. Plant length, stalk diameter after 60 DAT and yield in dry weight of hot pepper after harvest in 2016

Treatments	Plant length (cm)	Stalk diameter (mm)	Yields (kg 10a ⁻¹)
SF	91.5 ^{a*}	14.83 ^a	402 ^a
F0	76.1 ^b	11.95 ^b	250 ^b
NF0.5	86.2 ^a	13.63 ^{ab}	396 ^a
NF1.0	90.7 ^a	13.86 ^{ab}	446 ^a
NF2.0	91.7 ^a	14.63 ^a	463 ^a

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

평균 배출량의 신뢰구간에 포함되지 않는다면 해당 NF 처리구가 통계적으로 유의한 저감 효과를 가지고 있다고 판정할 수 있다. 즉, 출력량의 산포 특성의 정량적 측도로서 확장불확도를 추정하여 산정한 신뢰 구간의 비교를 통해 처리구간 평균의 차이의 유무에 대한 통계적 유의성을 판정할 수 있었다. 이는 특정 처리구 내에서 각 챔버 내 개별 배출량 데이터의 변동성과 3개의 챔버들간의 변동성을 고려한 전체 평균 배출량이 갖고 있는 산포 특성을 이용한 처리구 간의 평균의 차이의 유무를 통계적으로 판정할 수 있는 방법으로써 농경지 유래 온실가스 배출량이 갖고 있는 변동성을 반영할 수 있는 유용한 평가 방법으로 판단된다.

3.3. 작물 재배기간 중 토양 화학성 변화

요소분해효소 억제제 NBPT 함유 복합비료 시용에 따른 고추, 배추 정식 후 60일의 토양중 화학성은 Table 5와 같다. 3요소 표준시비(대조)에 비해 N₂O 배출량이 적었던 NF0.5 처리에서 질산태질소(NO₃-N)가 낮게 나타났으며, 토양 pH와 유효인산(Av. P₂O₅), 치환성칼륨(Ex-K) 등은 처리 간의 유의미한 차이는 없었다.

3.4. NBPT 함유 원예용 비료 시용에 따른 작물 생육 및 수량

요소분해효소 억제제 NBPT 함유 복합비료 시용에 따른 고추, 배추의 생육은 Table 6, 7과 같다. 고추 생육은 초장과 줄기직경 모두 무시비를 제외하고 처리간 차이 없었으며, 건고추 수량도 동일한 경향이였다. NBPT 함유 비료 시용에 따른 배추 생육 조사는 배추

Table 7. Efficiency of plant N uptake in dry weight of Chinese cabbage after 60 DAT and Chinese cabbage yields after harvest in 2016

Treatments	Efficiency of plant N uptake (%)	Yields (kg 10a ⁻¹)
SF	33 ^{a*}	8,183 ^b
F0	-	3,425 ^d
NF0.5	33 ^a	7,367 ^c
NF1.0	32 ^a	8,700 ^b
NF2.0	29 ^a	9,350 ^a

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

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, 배추 수량은 3요소 표준시비(대조)에 비해 NF0.5 처리구는 적고, NF1.0 처리구에서는 대등한 경향이였다.

IV. 요약 및 맺는 말

본 연구는 발토양 N₂O 배출 저감 효과의 통계적 유의검정을 각 집단간 3반복 N₂O 배출량 전체 자료에 표준불확도, 확장불확도, 신뢰구간을 산정하여 각 집단간 평균의 차이를 검정하였다. 3반복 평균으로 통계적 유의검정을 하는 것과 달리 본 연구에서 산정한 불확도 추정기법은 개별적 배출량의 분산 특성 등 배출량의 산포 특성을 고려한 신뢰구간을 산정할 수 있는 것이 특징이다. 이에 따라 ISO 측정불확도의 개념을 그대로 준용하여 농업 분야 발생 온실가스 저감효과를 통계적으로 유의 검정할 수 있는 것으로 판단되었다. 이는 토양환경, 기상환경, 작물 생장 등 모든 생태계의 상호작용에 따라 변화하는 농업 분야 온실가스 배출량에 대한 대표값인 평균의 산포 특성을 불확도로 추정하여 신뢰구간을 산정함으로써 온실가스 배출량이 갖고 있는 다양하고 큰 변동성을 반영하여 많은 비교 집단간 평균의 차이의 유무를 효과적으로 판정할 수 있는 유용한 평가 방법이다. 그러므로 온실가스 저감 처리 방법에 따른 온실가스 배출량의 평균이 가진 산포 특성을 이용한 불확도 산정을 통해 온실가스 저감 처리구의 영향에 대한 신뢰도를 높일 수 있을 것으

로 생각되며, 향후 농업 온실가스 평균 배출량의 저감 효과뿐 만 아니라 유효한 저감량 추정 방법으로서 확장이 기대된다. 또한 온실가스 배출량 산정을 위해 가장 많이 활용하는 폐쇄형 챔버법 등의 장비(hardware)로 인한 시료 채취 및 가스 농도 분석 등 온실가스 배출량 산포 특성에 영향을 주는 다양한 불확도 요인들에 대한 정량적 평가가 필요할 것이다. 많은 선행연구자들의 노력으로 각 부문별 신뢰성 있는 온실가스 인벤토리가 산정되어 온실가스 배출량에 미치는 여러 영향요소의 평가를 통해 기후변화 완화를 위한 온실가스 저감 정책이 수립되었다. 그러나 본질적으로 생태계에 존재하는 시·공간적인 비균질성, 자연 변동성과 인위적 요소의 상호작용과 이들이 관측 및 자료 처리에 미치는 영향에 대한 이해가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구결과에서 제시한 농업 분야 온실가스 배출량 저감효과에 대한 불확도 추정기법의 방향 제시가 향후 농업 분야 온실가스 배출량 저감기술 개발 및 기후변화 적응, 더 나아가 지속가능한 생태-사회시스템을 위한 발전방향 수립에 도움이 되기를 바란다.

적 요

농업 분야 온실가스 발생은 토양환경, 기상환경, 작물 생산 등 모든 생태계 변화와 인위적인 영농활동의 상호작용에 따라 변화하여 배출량 변동성의 크기가 매우 크므로 배출량 자료에 대한 신뢰구간 확보가 필요하다. 이에 온실가스 배출량 및 흡수량에 대한 신뢰구간을 정의하는 불확도 평가가 필요하지만 불확도 평가 방법에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 밭토양에서 발생하는 N₂O 배출량 저감 효과의 유의성을 불확도 추정기법을 통하여 판정하고자 하였다. 질소 비료 시비효과 증진 및 N₂O 배출량 감소를 위한 요소분해효소 억제제 NBPT 함유 원예용 비료, 표준시비, 무시비 등 5처리 집단들의 신뢰구간에 차이가 있는지를 불확도 평가를 통해 확인하였으며, N₂O 배출량 개별 자료들의 변동성을 모두 고려한 신뢰구간을 찾아내어 분석한 결과로 신뢰성 있는 저감 효과(처리간 차이)의 유무를 판정할 수 있었다. 또한 고추와 배추 재배지에서 요소분해효소 억제제 NBPT 함유 원예용 비료를施用하면 표준시비와 같은 생육상황에서 온실가스 저감효과를 볼 수 있는 것으로 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ012489032019)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Arone, J., and P. J. Bohlen, 1998: Stimulated N₂O flux from intact grassland monoliths after two growing seasons under elevated atmospheric CO₂. *Oecologia* **116**(3), 331-335.
- Bae, Y. J., S. J. Bae, I. H. Seo, K. Seo, J. J. Lee, and G. Y. Kim, 2013: Estimation of uncertainty on greenhouse gas emission in the agriculture sector. *Korean Rural Plan* **19**(4), 125-135. (in Korean)
- Cantarel, A. M., M. G. Bloor, N. Deltroy, and J. F. Soussana, 2011: Effects of climate change drivers on Nitrous Oxide fluxes in an upland temperate grassland. *Ecosystems* **14**, 223-233.
- Dobbie, K. E., I. P. McTaggart, and K. A. Smith, 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.
- FAO, and IAEA, 1992: *Manual on measurement of methane and nitrous oxide emissions from agriculture*. IAEA-TECDOC-674, 91pp.
- Firestone, M. K., and E. A. Davidson, 1989: Microbiological basis of NO and N₂O production and consumption in soil. *Exchange of Trace Gases between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere* **47**, 7-21.
- GIR (Greenhouse gas Inventory and Research center), 2018: *National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea*, 401pp. (in Korean with no English abstract)
- 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**(12), 95-111.
- ISO/IEC Guide 98-3, 2008: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM: 1995).
- Ju, O. K., J. Kim, J. S. Park, and C. S. Kang, 2018: Chamber method for the estimation of greenhouse gas emissions in agricultural land: A Review. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **20**(1), 34-46.

- Kanerva, T., K. Regina, K. Ramo, K. Ojanpera, and S. Manninen, 2007: Fluxes of N₂O, CH₄, and CO₂ in a meadow ecosystem exposed to elevated ozone and carbon dioxide for three years. *Environmental Pollution* **145**, 818-828.
- Kim, J. S., and N. H. Cho, 2003: A study on the modeling and propagation to evaluate uncertainties in measurement results. *Journal of the Korea Society of Computer and Information* **10**, 165-175.
- NAS (National Institute of Agricultural Science), 2000: *Soil and Plant Analysis*, 202pp. (in Korean)
- NAS (National Institute of Agricultural Science), 2017: *Fertilizer Prescription Standard by Crop*, 336pp. (in Korean with no English abstract)
- RDA (Rural Development Administration), 2011: *Assessment of Greenhouse Gas Emissions in Agricultural Land in Korea*, 99pp. (in Korean)
- Sozanska, M., U. Skiba, and S. Metcalfe, 2002: Developing an inventory of N₂O emissions from British soils. *Atmospheric Environment* **36**(6), 987-998.
- Wrage, N., G. L. Velthof, M. L. Beusichem van, and O. Oenema, 2001: Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide. *Soil Biology and Biochemistry* **33**, 1723-1732.
- Zhang, W., W. Sun, and T. Li., 2017: Uncertainties in the national inventory of methane emissions from rice cultivation: field measurements and modeling approaches. *Biogeosciences* **14**, 163-176.