

배추밭의 요소비료 사용에 따른 N₂O 배출 특성

송새nun* · 우지윤* · 강성민** · 이화수*** · 전의찬****†

*세종대학교 대학원 기후환경융합학과 박사과정 학생, **세종대학교 기후환경융합센터 선임연구원,
동의과학대학교 화학공업과 교수, *세종대학교 대학원 기후환경융합학과 교수

Characteristics of N₂O Emissions from Urea Fertilizer Application to Cabbage Fields

Song, Sae Nun* · Woo, Jiyun* · Kang, Seong Min** · Lee, Hwa Soo*** · Jeon, Eui-Chan****†

*Ph.D. Student, Department of Climate and Environment, Sejong University Graduate School, Seoul, Korea
**Senior Researcher, Department of Climate and Environment, Sejong University Graduate School, Seoul, Korea
***Professor, Department of Chemical Industry, Dong-Eui Institute of Technology, Busan, Korea
****Head Professor, Department of Climate and Environment, Sejong University Graduate School, Seoul, Korea

ABSTRACT

Nitrogen dioxide (N₂O) accounts for the third largest share of global greenhouse gas emissions after carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄). The agricultural sector produces 24% of the world's N₂O emissions, and 81% of N₂O generated from agricultural land is from the use of nitrogen fertilizers. When nitrogenous fertilizers are applied to the soil, N₂O is generated by microorganisms during the denitrification process. N₂O emissions from the soil are affected by temperature, pH, rainfall, fertilizer use, and cultivation method, among other factors. In this study, N₂O emission characteristics were analyzed according to temperature and humidity for a one-month period of urea fertilizer use in cabbage fields. Immediately after fertilizer application, N₂O flux increased and gradually decreased. Correlation analysis of N₂O flux revealed a positive correlation with temperature and a negative correlation with humidity. In the future, studies on other factors affecting N₂O emissions are needed.

Key words : Nitrogen Dioxide Emissions, Climate Change, Greenhouse Gases, Nitrogen Fertilizers, Fertilizer-Using Agricultural Land

1. 서론

지구의 온도는 1880년 이후 10년마다 0.08℃ 상승하였고, 진행속도는 빨라지고 있다. 파리기후변화협약에서는 산업화 이전 대비 지구 평균기온 상승을 2℃ 상승 이하로 제한하되, 지구 평균기온 상승을 1.5℃ 이하로 제한하기 위한 노력을 추구하기로 합의하였다. 2℃ 목표를 달성하기 위해서는 온실가스 배출량을 2030년에 기준 42 GtCO₂-eq, 2050년에 23 GtCO₂-eq로 달성해야 한다. 또한, 2015~2100년 누적 배출량은 IPCC의 누적 배출량(2012~2100)인 990 GtCO₂-eq인 대비 55%인 553 GtCO₂-eq로 감축해야 한다. 우리나라는 2017년 온실가스 배출량 709 MtCO₂-eq 대비 24.4%인 315 tCO₂-eq를 감축하는 것을 NDC (Nationally

Determined Contribution)로 제출하였다.

아산화질소(N₂O)는 6대 온실가스 중 아산화탄소, 메탄에 이어 가장 많은 양을 차지하고 있다. N₂O는 전체 배출량의 84%가 농업활동을 통해 발생되는데, 농경지로부터 대기로 배출되는 N₂O 중 81% 정도가 질소질 비료사용에 의해 배출된다. N₂O는 농경지 토양에서 질소질 비료와 가축분뇨를 투입했을 때 토양 미생물이 탈질 과정을 일으키는 동안 발생한다. 이러한 농경지 토양에서 발생하는 N₂O는 온도, pH, 강우, 비료사용량, 경작방법 등의 영향을 받는다(Freney, 1997). N₂O배출은 습도를 조절하여 줄일 수 있고, 온도변화에 따라 N₂O발생이 달라질 수 있다(Frolking et al.,1998; Parton et al., 1996; Kim et al., 2015).

농경지에서 발생하는 온실가스를 측정하는 방법의 대부분은 닫힌 챔버법(closed method)이다. closed chamber는

†Corresponding author : ecjeon@sejong.ac.kr (209, Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul, 05006, Republic of Korea Tel. +82-2-3408-4353)

ORCID 송새nun 0000-0003-0167-339X 이화수 0000-0003-2783-4550
우지윤 0000-0002-9376-0206 전의찬 0000-0001-8042-031X
강성민 0000-0001-8628-8241

저비용으로 제작할 수 있고, 이동이 편리하고 설치와 제거가 쉽다. 또한, 미량의 가스를 포집할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 챔버의 상태에 따라 오차가 발생할 수 있고, 시·공간적 제약이 있어 토양환경이나 작물의 종류 등에 따라 챔버 내 질소 흐름에 영향을 줄 수 있다. 또한, 농경지의 토양 성분은 균일하지 않으므로, 챔버의 이동에 따라 N₂O 발생량이 달라질 수 있다는 단점이 있다.

이와 같은 챔버법을 사용하여 발생량을 측정하는 가스에는 암모니아(NH₃)가 있다. NH₃측정방법에 가장 널리 쓰이는 방법은 챔버법과 풍동법(Wind tunnel method)인데, 풍동법은 화학비료 및 퇴비 등의 처리에 따른 암모니아 배출량을 측정한 다수의 연구들에 사용되어 왔다(Shah et al., 2006; Sommer and Misselbrook, 2016; Woodley et al., 2017).

본 연구에서는 농경지에서의 Wind tunnel의 적용가능성을 평가하고 농경지에서 요소비료 사용 시 온·습도 변화에 따른 N₂O 발생특성을 분석하고자 한다. 이를 위해 Wind tunnel 설치하였고, 실시간 연속측정기를 사용하여

한 달 동안 N₂O 농도를 측정하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구대상지 선정

본 연구에서는 요소비료 사용 시 온·습도 변화에 따른 N₂O 배출특성을 알아보기 위해 경기도 수원시 하광교에 소재한 밭에서 토양에서 배출되는 N₂O와 온·습도를 측정하였다. 측정기간은 2021년 4월 3일부터 5월 11일까지로 약 한 달간 연구를 수행하였다. Lee et al. (2019)의 연구결과에 따르면, 농경지에 비료를 투여한 후 한 달까지는 높은 N₂O 배출 양상을 보이고 이후 감소한다는 것을 참고하여 측정 기간을 설정하였다. 실험 재배 작물은 배추로 하였으며, 부속 유기질 비료로 한 달 전에 경운이 된 토양이다(Table 1). 시험지 토양의 이화학적 성분은 다음과 같다(Table 2).

Table. 1 Measurement location and period of this study

Measurement location	Measurement period	Soil condition
Hagwanggyo-dong, Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do.	Apr. 3 ~ May. 11	Cultivated with fertilized organic fertilizer one month before the experiment

Table. 2 Chemical properties of soil used in this study

pH (1:5)	EC (dS/m)	OM (g/kg)	Available P ₂ O ₅ (mg/kg)	mg/kg		Ex. Cations (cmol/kg)			
				NO ₃ -N	NH ₄ -N	Ca	K	Na	Mg
5.6	0.69	32.4	1,437	37.7	7.1	5.2	1.7	0.5	1.9

2.2. Wind tunnel

밭토양에 Wind tunnel을 설치한 후, 터널 안에 요소비료를 처리한 후 N₂O를 측정하였다. Wind tunnel은 터널, 임펠러 펌프로 구성되어있고, 터널의 규격은 가로 1.5 m, 세로 0.5 m, 높이 0.48 m이다. 터널은 앞, 뒤, 바닥이 뚫려있으며 임펠러 펌프에 의해 지속적으로 공기가 흐르는 구조이다(Woodley et al, 2018). 면적이 넓어 조사하고자 하는 지형이나 오염 물질 배출원은 실제와 같이 재현할 수

있는 장점이 있다(Yang, 2017). Wind tunnel의 모식도는 Fig 1과 같다. 터널 안에 배추의 재식¹⁾거리는 이랑나비 75 cm 포기사이 45 cm로 정식하였다.

비료사용량은 배추의 표준시비량인 320 kg/ha보다 3배 많은 960 kg/ha의 요소비료를 시비하였다. 이는 실제 농가에서 사용하는 비료사용량은 작물생산량을 위해 표준시비량보다 과다시비를 하고 있다는 점을 고려하였다. 봄배추의 경우 잦은 강우에 의해 비료가 용탈되는 것을 감안하기 위해 1.5배 ~ 2.4배까지 많이 시비하고 있다(Hong et al, 2017).

1) 종자 또는 식물체를 작토에 심는 것

2.3. N₂O 측정 및 배출량 산정방법

요소비료 사용에 따른 N₂O 농도를 측정하기 위해 LSE N₂O Monitor (LSE-4405)를 사용하였다. LSE N₂O Monitor (LSE-4405)는 광음향분광법(photoacoustic spectroscopy)을 통해 N₂O를 분석하는 방법으로, 물질이 일정한 주파수로 단속하는 빛을 흡수하면 흡수된 광에너지가 열로 변할 때

주위의 기체에 동일한 주파수의 음파가 발생하는 현상을 이용한 분광법이다.

N₂O의 배출특성 분석을 위한 온도와 습도 측정은 기상 관측기 SKT-003을 사용하였다.

SKT-003의 측정항목은 풍속, 풍향, 강우량, 온도, 습도이다. 기기의 온도 측정범위는 -30 ~ 65℃, 습도는 1 ~ 99%이며, 측정하는 동안 자동으로 데이터를 기록할 수 있다.

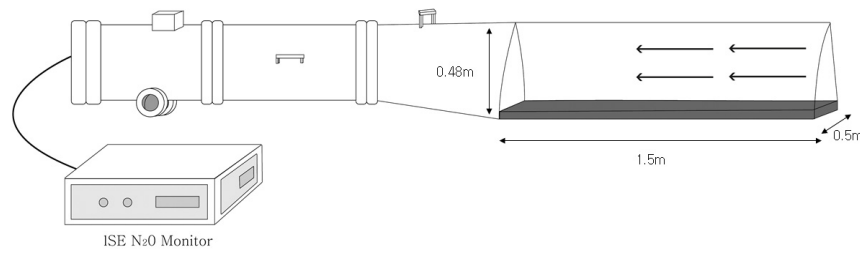


Fig. 1. Wind tunnel chamber model diagram

N₂O Flux는 아래 식 (1)을 이용하여 산정하였다.

$$F = (N_2O \times \frac{44}{22.4} \times \frac{1}{1,000,000}) \times 4,320 \times 0.75 \quad (1)$$

- F = N₂O Flux (mg/m²/min)
- N_2O = N₂O 농도 (ppb)
- 44 = N₂O 분자량
- 22.4 = 1atm에서 1mol 기체의 부피 (L)
- 4,320 = Wind tunnel를 통과하는 기체의 유량 (L/min)
- 0.75 = 터널 내부의 면적 (m²)

여기서, N₂O는 LSE N₂O Monitor로 측정한 농도(ppb), 44는 N₂O 분자량, 22.4는 1 atm에서 1 mol 기체의 부피를 의미한다. 4,320은 터널의 유량 3 L/min를 24시간으로 환산한 값이다. 그리고 0.75는 터널 내부의 면적이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. N₂O Flux 산정

배추밭 요소비료 시비에 따른 N₂O flux 변화는 Fig. 2와 같다. 시비 직후 N₂O 배출량이 가장 높았고, 이후에는 점점 감소하는 추세를 보였다. 요소비료 시비 직후인 4월 3일부터 5월 11일까지 측정한 N₂O 총 배출 flux는 303.97 mg/m²/month였다.

측정기간동안 배추밭의 요소비료 사용 시 N₂O flux와 관련 선행연구의 결과를 Table 3에 나타내었다. 본 연구에서 산정한 N₂O flux는 표준시비의 3배인 960 kg/ha를 투여하였을 때 12.1 kg/ha/yr였고, 선행 연구의 표준시비의 2배 처리와 비교결과 3.22 kg/ha/yr로 약 4배 정도 차이가 났다. 이는 현행 농가들이 비료를 과다시비하고 있는 것을 고려하여 극단적으로 표준시비보다 3배 많은 요소비료 양을 투여하였기 때문으로 판단된다. 현재 질소 비료사용에 따른 N₂O 배출량과 관련한 연구 중에서 표준시비량의 3배 처리로 N₂O Flux를 산정한 연구는 없었기 때문에 본 실험과 직접적 비교에는 한계가 있었다.

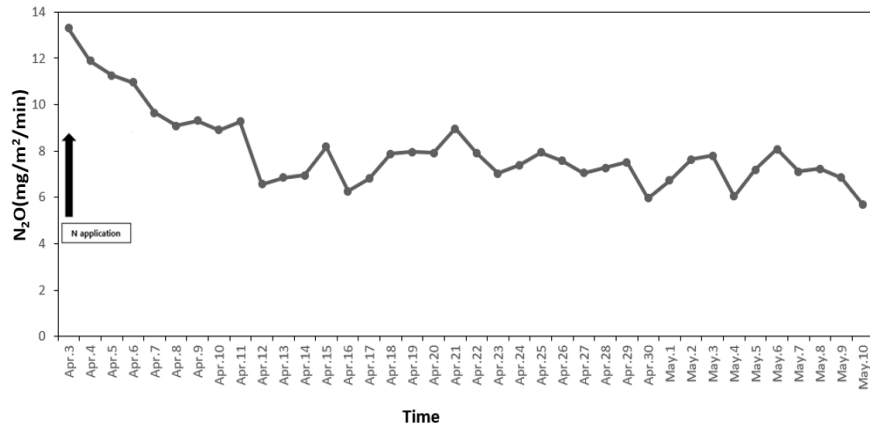


Fig. 2. Daily Average N₂O Flux Variation

Table 3. Comparison of N₂O Flux by N Application

	Amount of standard fertilizer application	N fertilizer	N ₂ O emission
		kg ha ⁻¹	N ₂ O kg ha ⁻¹ yr ⁻¹
Closed Chamber (Kim, 2015)	1	320	1.59
	2	640	3.22
This study	3	960	12.1

** Twice the standard fertilization amount

** 3 times the standard fertilization amount

요소비료 사용에 따른 N₂O 일일 배출 flux를 보기 위해 한 시간 평균으로 하여 시간대 별로 나타내었다. 분석결

과, 오전 6시를 기점으로 증가하여 오후 1시에 가장 높은 18.8 mg/m²/min로 나타났다(Fig. 3).

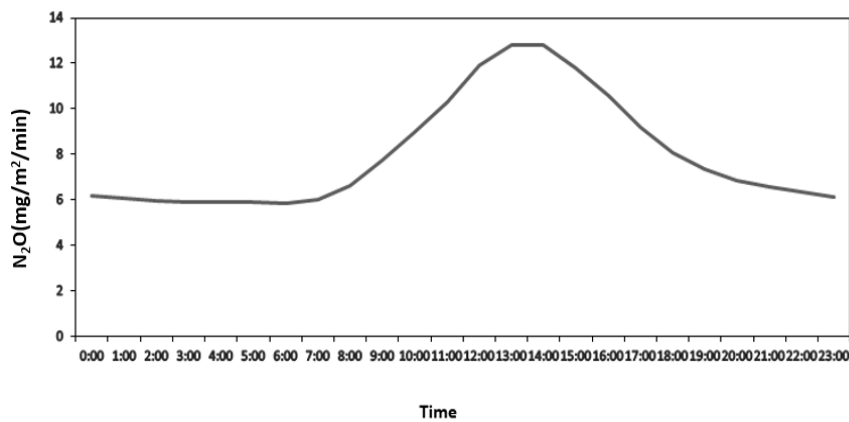


Fig. 3. N₂O flux Variation by time zone

3.2. 온도 변화에 따른 N₂O Flux의 배출특성

배추밭에서 측정한 터널의 내부온도 추이는 Fig. 4와 같다. 오전 5시를 기점으로 낮아지던 기온이 점차 올라가면서 오전 11시에 가장 높았고, 오후 3시 이후 점차 감소하여 새벽까지 이어지는 패턴을 보였다.

온도 변화에 따른 N₂O flux 변화는 Fig. 5와 같다. 온도가

높아질수록 N₂O 농도가 증가하였으며, 낮의 최고온도일 때 가장 높은 수치를 보였다. 이후 온도가 감소할수록 N₂O 농도 함께 감소하였다. N₂O 농도가 가장 높을 때는 오전 11시부터 오후 3시였고, 이때의 N₂O flux는 25.98 mg/m²/min였다. 가장 낮을 때는 오전 5시로 7.69 mg/m²/min였다. 온도가 가장 낮을 때와 높을 때의 N₂O flux의 차이는 약 3배였다.

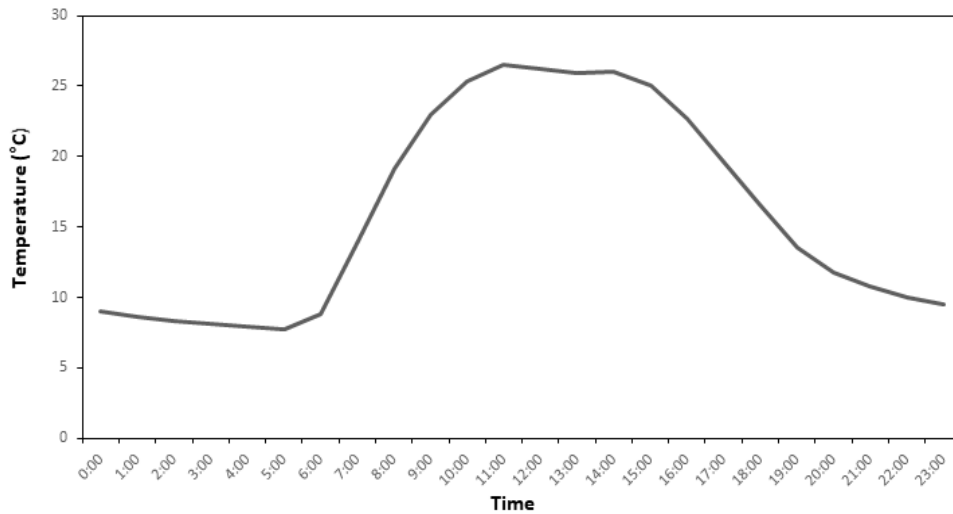


Fig. 4. Temperature Variation by time zone

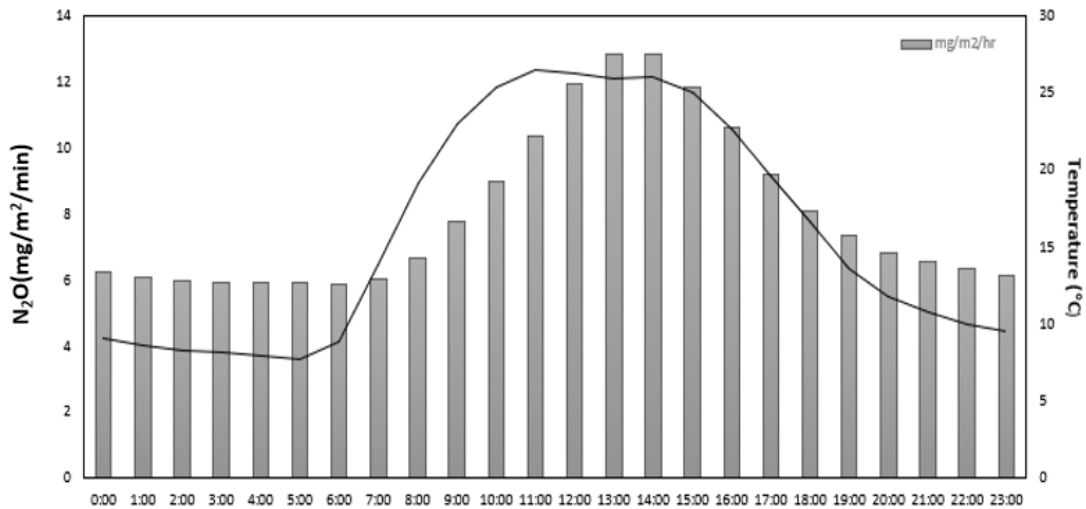


Fig. 5. N₂O flux changes with temperature changes by time zone

본 연구에서는 터널 내부의 온도 변화에 따른 N₂O flux의 상관관계를 분석하기 위하여 통계 프로그램(IBM SPSS Statistics 25)을 사용하였다. 분석결과, 0.922***로 강한 양의 상관관계를 보였다(Table 4). 이는 선행 연구의 토양온도가 증가할수록 N₂O flux가 증가하고, 양의 상관

관계를 나타낸다는 결과(Arone and Bohlen, 1998)와 일치하였다. N₂O 배출이 증가하는 이유는 터널 내부의 온도가 상승함에 따라 토양의 미생물 증식이 활발해져 탈질이 잘 되는 환경이 되기 때문이다(Gerard et al., 2003).

Table 4. Correlation between N₂O flux and temperature

		Flux	Temperature
Spearman's Rho	Flux	Correlation coefficient	1.000
		Significance Probability	.000
		N	24
	Temperature	Correlation coefficient	.922**
		Significance Probability	.000
		N	24

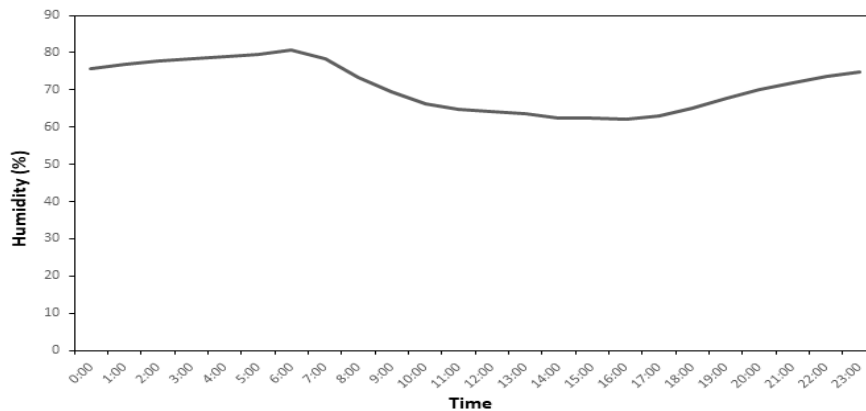


Fig. 6. Humidity Variation by time zone

3.3. 습도 변화에 따른 N₂O Flux의 배출특성

요소비료에 따른 N₂O flux 변화를 알아보기 위해 배추 밭에서 측정된 터널의 내부습도는 Fig. 6과 같다. 오전 7시를 기점으로 점점 감소하여 오후 3시경 가장 낮은 62%의 수치를 보였다. 이후 다시 증가하여 아침까지 이어지는 패턴을 보였다. 터널 내부의 습도는 평균 70%로 높은 수준이었다.

터널 내부의 습도 변화에 따른 N₂O flux 변화를 확인하기 위해 상관관계를 분석하였다. 그 결과, -0.971***로 강한 음의 상관관계를 보였다(Table 5). 이는 토양 수분이 올라감에 따라 N₂O flux가 증가하고 양의 상관관계를 보인다는 선행 연구(Kim, 2015)와는 상반된 결과를 보였다. 이는 토양 자체의 온·습도를 고려한 선행연구와는 달리 터널 내부의 온·습도를 고려하여 상관관계 분석을 진행하였기 때문으로 판단된다.

Table 5. Correlation between Humidity and N₂O Flux

		Flux	Humidity
Spearman's Rho	Flux	Correlation coefficient	1.000
		Significance Probability	.000
		N	24
	Humidity	Correlation coefficient	-.971**
		Significance Probability	.000
		N	24

4. 결론

본 연구에서는 Wind tunnel을 사용하여 농경지의 요소 비료 시비에 따른 N₂O 배출량 변화를 측정하였고, 온도와 습도가 N₂O flux에 미치는 영향을 알아보기 위해 상관관계 분석을 진행하였다. 실험은 4월 3일부터 5월 11일까지 약 한 달간 진행하였으며, 실제 농가에서 비료를 관행량 보다 과다하게 시비하고 있는 점을 고려하여 배추의 표준 시비량인 320 kg/ha보다 3배 많은 양인 960 kg/ha를 투여 하였다. 이 기간동안 배추밭의 요소비료 사용으로 인해 발생한 N₂O flux는 총 303.97 mg/m²/month로 나타났다. 본 연구결과 농경지에 질소를 과다 투여할 경우 상당량의 N₂O가 발생하는 것을 알 수 있었다.

배추밭의 요소비료 사용 시 N₂O flux 변화를 측정한 결과, 농경지 비료 시비 직후 증가하여 점차 감소하였고, 기온이 높은 낮에 증가하여 밤에 감소하는 패턴을 보였다. SPSS를 이용한 N₂O flux와 온도의 상관관계 분석결과, 0.922로 높은 양의 상관관계를 보였고, N₂O flux는 습도와 강한 음의 상관관계를 보였다.

앞서 언급한 바와 같이 화학비료를 과다 사용할 경우 표준시비량으로 사용했을 때보다 N₂O 배출이 극단적으로 높았다. 농경지에서 화학비료의 과다사용은 토양 속 양분의 불균형을 초래하며, 토양의 유기물을 낮춘다(Lee et al., 2012). 또한, 지속적으로 화학비료를 사용할 경우 토양의 질을 낮춰 작물생산을 저해하기도 한다. 작물을 안정적으로 생산하기 위해서는 농경지에서 발생하는 N₂O를 저감하고, 적절한 토양의 관리가 필요하다.

또한, 본 연구의 Wind tunnel을 사용하여 N₂O 플럭스와 온도를 상관관계 분석을 하였을 때, 선행연구와 같은 양의 상관관계를 나타내었다. 습도와는 음의 상관관계를 보였는데, Yang(2017)에 의하면 Wind tunnel은 터널 내부의 수분을 응축하여 암모니아를 흡수하기 때문에 오차를 일으킬 수도 있다고 하였다. 터널 내부의 응결을 방지하기 위해 통풍조건만 맞추어 가동한다면, Wind tunnel을 농경지의 N₂O 측정 시 적용 가능할 것이라고 판단된다.

보다 신뢰도 높은 N₂O 배출량 관련 연구를 진행하기 위해서는 실제 농경지 조건을 모두 고려할 수 있는 다양한 실험 장비 및 분석 방법 개발 및 연구방법이 마련되어야 한다. 또한, 본 연구에서의 N₂O 배출 특성은 온도와 습도 측면에서 분석이 진행되었기 때문에 향후 그 외의 영향인자인 토양의 pH와 EC 분석 등이 진행되어야 할 것이다.

사사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 “미세먼지 배출량 산정 고도화를 위한 농축산분야 활동자료 개선 및 GIS 기반 활동도 DB 구축(과제번호: PJ014909)”의 지원으로 수행되었습니다.

References

Arone, J.A, P.J. Bohlen. 1998. Stimulated N₂O flux from intact grassland monoliths after two growing seasons under elevated atmospheric CO₂. *Oecologia* 116:

- 331-335.
- Choi EJ, Jeong HC, Kim GY, Lee SI, Lee JS, 2016 Estimation of national greenhouse gas emissions in agricultural sector from 1990 to 2013: focusing on the crop cultivation. *Journal of Climate Change Research*. 7(4): 443-450.
- Freney, J.R. 1997. Emission of nitrous oxide from soils used for agriculture. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 49 (1-3): 1-6.
- Gerard L, Velthof, Peter J, Kuikman, Oene Oenema. 2003. Nitrous oxide emission from animal manures applied to soil under controlled conditions. *Biol Fertil Soils* 27:221-230.
- Kim GY, Park WK, Jeong HC, Lee Si, Choi EJ, Kim PJ, Seo YH, Na US. 2015. A Revised Estimate of N₂O Emission Factor for Spring Chinese cabbage fields in Korea.
- Hong SJ, Kim BS, Eum HL. 2018. Influence of Nitrogen Fertilization on Storability and the Occurrence of Black Speck in Spring Kimchi Cabbage. *Horticultural Science and Technology*. 727-736.
- Ju OJ, Kang Ng, Lim GJ. 2020. Measurement Uncertainty of Nitrous Oxide Concentrations from a Upland Soil Measured by an Automated Open Closed Chamber Method, *Korean Journal of Environmental Agriculture* 39.3 (2020): 237-245.
- Kim GY, So KH, Jeong HC, Shim KM, Lee SB, Lee DB. 2010. Evaluation of N₂O Emissions with Changes of Soil Temperature, Soil Water Content and Mineral N in Red Pepper and Soybean Field. 43 (6): 880-885.
- Lee YY, Lee SE, Lee JH, Choi SW, Kim SY. 2020: Impacts of Different Nitrogen Fertilization on Greenhouse Gas Emissions and Lettuce Productivity in Upland Soils during Cultivation. 4: 500-613.
- Misselbrook T.H., Nicholson F.A., and Chambers B.J. 2005a. Predicting ammonia losses following the application of livestock manure to land. *Bioresour. Technol.* 96: 159-168.
- 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 N₂ and N₂O production from nitrification and denitrification. *Global Biochem. Cycles*. 10: 401-412.
- Shah S.B., Westerman P.W., and Arogo J. 2006. Measuring ammonia concentrations and emissions from agricultural land and liquid surfaces: a review. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 56: 945-960.
- Woodley A.L., Drury C.F., Yang X., Reynolds W.D., Calder W., and Oloya T.O. 2018. Streaming UAN with/without enhanced efficiency products impacted corn yields, ammonia and N₂O emissions. *Agron. J.* 111.