



가축분 종류별 퇴비 처리에 따른 농경지 토양에서의 아산화질소 배출량 평가

최은정* · 김건엽* · 이선일* · 정현철** · 이종식*** · 권효숙**** · 오택근*****†

*국립농업과학원 기후변화생태과 농업연구사, **농촌진흥청 청장실 농업연구사, ***국립농업과학원 기후변화생태과 농업연구관,
 ****국립농업과학원 기후변화생태과 박사후연구원, *****충남대학교 생물환경화학과 교수

Estimation of Nitrous Oxide Emission from Different Livestock Manure Composts Applied to Cropland

Choi, Eunjung* · Kim, Gunyeob* · Lee, Sun il* · Jeong, Hyuncheol** · Lee, Jongsik*** ·
 Gwon, HyoSuk**** and Oh, Taekguen*****†

*Researcher, Climate Change & Agroecology Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, 55365, Korea

**Researcher, Office of the administrator, Rural Development Administration, Jeonju, Korea

***Senior Researcher, Climate Change & Agroecology Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, 55365, Korea

****Post Doctor, Climate Change & Agroecology Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, 55365, Korea

*****Professor, Department of Bio-Environmental chemistry, Chungnam Univ., Daejeon, Korea

ABSTRACT

Nitrous oxide (N₂O), a greenhouse gas, influences global warming 295 times more than carbon dioxide does. N inputs applied to croplands including fertilizers and organic amendments are a major source of N₂O emission. However, studies on N₂O-emanating organic amendments applied to croplands for improving soil fertility, especially livestock manure, are limited. Therefore, this study was conducted to measure N₂O emission from sweet potato fields amended with livestock manure composts over a one-year period. Three types of compost, cattle manure compost (CMC), swine manure compost (SMC), and poultry manure compost (PMC) were each added at rates of 10 and 20 Mg per hectare, and then the same amount of synthetic fertilizer was added to all treatments. N₂O flux from fertilized soils was measured for one year, beginning in April 2018. The cumulative N₂O flux from NPK, NPK+CMC 10 Mg ha⁻¹, NPK+SMC 10 Mg ha⁻¹, and NPK+PMC 10 Mg ha⁻¹ was 2.9, 5.5, 8.0, and 3.7 kg N₂O-N ha⁻¹ y⁻¹, respectively. The cumulative N₂O flux from NPK+CMC 20 Mg ha⁻¹, NPK+SMC 20 Mg ha⁻¹, and NPK+PMC 20 Mg ha⁻¹ was 10.0, 14.7, and 5.8 kg N₂O-N ha⁻¹ y⁻¹, respectively. Soil treated with SMC emitted the largest quantities of N₂O amongst the three composts. N₂O emission factors from soils fertilized with CMC and SMC did not differ significantly from one another on the other hand, the emission factor from PMC was the lowest. A positive correlation was found between N₂O emission and water-filled pore space, with N₂O emission drastically increasing at a WFPS >50%.

Key words: Nitrous oxide emission, Livestock manure compost, Cropland, Emission factor

1. 서 론

전 지구의 인위적 온실가스 배출량 중 10-12%는 농업으로 부터 기인하며, 이중 아산화질소는 58%, 메탄은 47%를 차지 한다 (Smith et al., 2007). 아산화질소는 질소 비료 시비에 의 해 발생되고, 메탄은 주로 담수된 논에서 벼를 재배하는 기간

중에 발생된다 (Bjoern et al., 2014).

농경지토양의 질소 투입은 아산화질소 배출에 영향을 미 치는 주요 인자이며 (Mosier et al., 1998), 토양에 질소원이 투입되면 미생물에 의해 질산화와 탈질화 과정을 거치면서 아산화질소가 생성된다. 따라서 질소 투입량은 아산화질소 배출량과 밀접한 관련이 있으며, 질소원의 종류 및 특성에 의

† Corresponding author: ok5382@cnu.ac.kr (99, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34134, Korea, T. 82-42-821-6735)

Received September 10, 2019 / Revised October 18, 2019 / Accepted November 4, 2019

해서도 배출량은 달라진다 (Gerard et al., 2003). 이러한 이유로 2006 IPCC 지침은 질소 투입원을 화학비료와 유기물, 작물잔사 등으로 구분한다 (IPCC, 2006). 뿐만 아니라 유기물의 구성은 탈질화 과정에 관여하여 최종적으로 아산화질소 배출량에 영향을 주는데 (Antonio et al., 2006), 이는 유기물이 투입되면 탄소 공급이 증가되어 토양 내 미생물의 활성이 강화되고 이로 인해 산소가 소모됨으로써 혐기적 미세환경이 형성되기 때문이다 (Hiroko and Haruo, 2003).

우리나라에서 일반적으로 사용되는 유기물은 가축분뇨인데, Bouwman 등 (1995)은 전 지구적 아산화질소 배출량의 약 1%가 가축분뇨 투입으로부터 발생된다 하였다. 특히 가축분뇨는 가축의 종류, 가축의 연령, 섭취하는 먹이 등과 같은 사육 특성에 따라 배설물 성분이 달라지기 때문에 가축분 사용에 대한 아산화질소 배출 연구 결과는 각각 다른 양상을 나타낸다. 국내에서 수행된 가축분 사용에 따른 밭토양 내 아산화질소 배출 결과를 보면 가축분 종류에 따라 아산화질소 배출량이 상이함을 알 수 있다 (Lee et al., 2003; Choi et al., 2016). 국외 연구 결과들도 가축분별 제형 및 사용시기, 토양 수분함량 등에 따라 다른 배출 양상을 보여준다 (Chadwick et al., 2000; Gerard et al., 2003). 따라서 농경지에서 배출되는 국가 아산화질소 배출량을 정확히 산정하기 위해서는 우리나라에서 보편적으로 사용되는 가축분을 이용해 국내 농업 환경에서 수행한 아산화질소 배출량 연구가 필요하다. 따라서 본 연구는 현재 농업에서 사용되는 가축분 퇴비를 종류별로 사용한 고구마 재배지에서 연간 발생하는 아산화질소 배출량을 측정하고, 배출량과 배출 경향을 비교·분석하고자 수행되었다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구 수행 장소

가축분 퇴비 처리에 따른 아산화질소 배출량 측정을 위해 전북 군산시 옥산면 (35°56' 18.44"N, 126°45' 49.38"E)에 소재한 밭 시험 포장에서 2018년 4월부터 2019년 4월까지 1년간 연구를 수행하였다. 시험포장의 토성은 모래, 미사, 점토가 각각 44.6, 40.0, 15.4%로 구성된 양토이며, 시험 작물은 고구마 (베니하루까)를 재식거리 80 × 25 cm로 재배하였다. 과거에도 고구마를 재배한 포장이며, 재배 기간 중에 토양 피복은 하지 않았다. 시험 전 토양의 화학적 특성은 Table 1과 같다 (Table 1).

기온 및 강수량 측정을 위해 시험 포장 반경 2 m 내에 AWS (Automatic Weather System)를 설치하였다.

2.2 시험 처리구 및 재배 관리

시험 처리구는 화학비료 처리구인 ① NPK와 화학비료 및 우분 (CMC: Cattle Manure Compost), 돈분 (SMC: Swine Manure Compost), 계분 (PMC: Poultry Manure Compost) 표준 시비량 처리구인 ② NPK+CMC (10 Mg ha⁻¹), ③ NPK+SMC (10 Mg ha⁻¹), ④ NPK+PMC (10 Mg ha⁻¹), 화학비료 및 우분, 돈분, 계분 2배 시비량 처리구인 ⑤ NPK+CMC (20 Mg ha⁻¹), ⑥ NPK+SMC (20 Mg ha⁻¹), ⑦ NPK+PMC (20 Mg ha⁻¹)로 총 7개이다. 시험에 사용된 가축분 퇴비는 우분, 돈분, 계분으로 각각의 가축분을 55% 이상 주재료로 하고 톱밥, 왕겨, 제올라이트 등을 부재료로 함유한 부숙된 시판 퇴비를 이용하였으며, 가축분 함유량 및 퇴비의 화학적 성분은 Table 2와 같다 (Table 2).

Table 1. Chemical properties of the soil before sweet potato cultivation

Texture	pH (1:5 H ₂ O)	EC (dS m ⁻¹)	O.M (g kg ⁻¹)	T-N (g kg ⁻¹)	T-C (g kg ⁻¹)	Av. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Ex. Cations (cmol _c + kg ⁻¹)		
							K	Ca	Mg
Loam	7.2	0.59	18.3	2.3	24.1	236	0.5	8.9	5.8

Table 2. The contents and chemical properties of the livestock manure composts

Livestock manure	Rates of manure content	T-N (g kg ⁻¹)	T-C (g kg ⁻¹)	C/N ratio	Inorganic N (mg kg ⁻¹)	
					NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻
Cattle	above 60%	14.6	775.1	53.1	476.2	45.3
Swine	above 60%	24.0	724.4	30.2	4674.2	8.7
Poultry	above 55%	20.1	558.3	27.8	195.5	65.3

시험 처리구의 크기는 4 × 4 m (16 m²)로 난괴법 (Randomized complete block design)으로 3 반복하였으며, 경운 로터리 실시와 함께 두둑을 형성하였다. 가축분 퇴비 및 화학비료는 2018년 5월 21일에 처리하였고, 2018년 6월 2일에 모종을 삼식하고 120일 후인 2018년 10월 2일에 수확하였다. 토양수분 관리는 자연 강우로 하였다. 화학비료는 모든 처리구에 질소-인산-칼리를 55-63-156 kg ha⁻¹으로 동량 사용했으며, 각 퇴비의 표준 시비량은 10 Mg ha⁻¹을 2배 시비량은 20 Mg ha⁻¹을 처리하였다. 화학비료 및 퇴비의 시비량과 재배 관리는 농업 기술길잡이 고구마재배 (농촌진흥청, 2013)를 참고하였다.

2.3 가스 측정 및 분석

각 처리구의 아산화질소 배출량은 간이폐쇄정태법 (closed chamber method)을 이용하여 측정하였다. 가스 농도 변화를 관측하기 위해 아크릴 재질의 원통형 챔버 (Φ25 × 38)를 설치하고, 60 ml syringe를 이용해 주 1~2회 가스를 포집하였다. 포집된 가스는 기체크로마토그래피 (Gas Chromatograph, Agilent 7890A, USA)의 u-ECD 검출기를 이용해 정량분석하였고, 챔버의 체적 및 시료 채취 기간 중 온도변화를 함께 측정하였다. 아산화질소 플럭스 산정을 위해 Eq. 1을 활용하였다.

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

F = N₂O Flux (μg m⁻² h⁻¹)

ρ = 가스 밀도 (kg m⁻³)

V = 챔버 내 공기체적 (m³)

A = 챔버의 바닥 면적 (m²)

Δc/Δt = 챔버 내 가스농도의 평균 증가속도 (10⁻⁹ h⁻¹)

T = 챔버 내 평균 기온 (K)

2.4 토양수분함량 및 WFPS 측정

아산화질소 배출에 영향을 주는 토양수분함량을 측정하기 위해 표토로부터 10 cm 아래에 토양수분/온도센서 (STM, decagon, USA)를 매립하여 실시간 측정하였다. 또한 토양 내 공극의 수분 포화도를 알아보기 위해 WFPS (Water Filled Pore Space)를 Eq. 2와 같이 산정하였고, 이를 위해 용적밀도 (bulk density)를 측정하였다 (Kim et al., 2017).

$$\text{WFPS (\%)} = [\text{부피수분함량 (\%,v/v)} / \text{공극률 (\%)}] \times 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\text{공극률 (\%)} = [1 - (\text{용적밀도} / 2.65)] \times 100$$

2.5 통계분석

통계분석은 SPSS 통계프로그램 (IBM SPSS Statistics 25)을 이용하여 실시하였으며, 처리간의 차이를 비교하기 위해 조사된 자료는 ANOVA 검증을 통하여 분석하였다. F-test 결

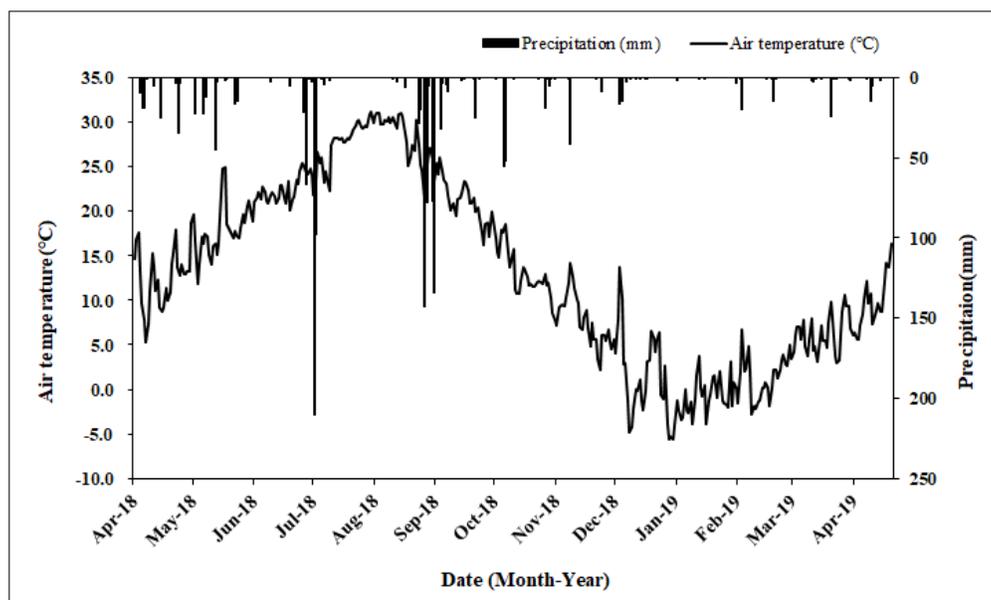


Fig. 1. Changes in daily air temperature and precipitation of study site in 2018 and 2019.

과 값이 $p < 0.05$ 의 범위에서 유의한 경우에만 Duncan 검정을 수행하였다.

3. 결과

3.1 기온 및 강수량 변화

작물 생육 기간 중 일평균 기온은 15 ~ 31°C 사이였으며, 7월 20일 경부터 8월 15일까지 30°C에 육박하는 고온 현상이 지속되었다. 작물 수확 후 기온은 점차 낮아져 일평균 최저 기온이 영하 6°C까지 하강하였다 (Fig. 1).

5월 하순과 6월 하순부터 7월 상순 사이에 비가 많이 내려 토양수분함량 및 WFPS에 영향을 주었으며, 수확이 끝난 10월 이후에는 강우일수는 많았지만 강우량은 적었다.

3.2 토양수분함량 및 WFPS 변화

퇴비 처리 후 작물 재배 기간 중 토양수분함량은 자연 강우에 의해 8 ~ 43% 범위였으며, WFPS는 15 ~ 91%였다 (Fig. 2).

강우가 내린 후 토양수분함량이 증가하는 경향을 나타냈는데, 작물 정식 후에는 작물의 뿌리를 통해 토양 내 수분이

흡수되고 작물의 잎이 부분적으로 토양을 피복하는 역할을 하기 때문에 많은 양의 강우가 내리더라도 작물이 없는 나지 상태일 때보다 토양수분함량 변화의 차이가 적었다.

3.3 시험 후 토양의 화학적 특성

시험 후 토양의 화학적 특성은 Table 3과 같다. 각 처리구의 총 질소함량은 큰 차이가 없었으나 유기물 함량은 NPK+SMC (20 Mg ha⁻¹) 처리구가 유의하게 ($p < 0.05$) 높았다. 탄질비는 NPK+CMC (20 Mg ha⁻¹) 처리구만 유의하게 ($p < 0.05$) 높게 나타났다.

3.4 아산화질소 배출량 변화

각 처리구의 일별 아산화질소 배출량 변화는 Fig. 3과 같다. 모든 처리구에서 비료 및 퇴비를 사용한 뒤 얼마 지나지 않아 아산화질소 배출량이 급격히 증가하였는데, 이를 통해 질소원의 투입이 아산화질소 배출량에 영향을 주는 주요 인자임을 확인 할 수 있었다.

또한 아산화질소 배출량이 급격히 증가한 시점과 WFPS가 증가한 시점이 비슷한 양상을 나타내고 있는데, 이러한 결과는 질소의 질산화와 탈질화가 WFPS와 관련 있다고 보고된

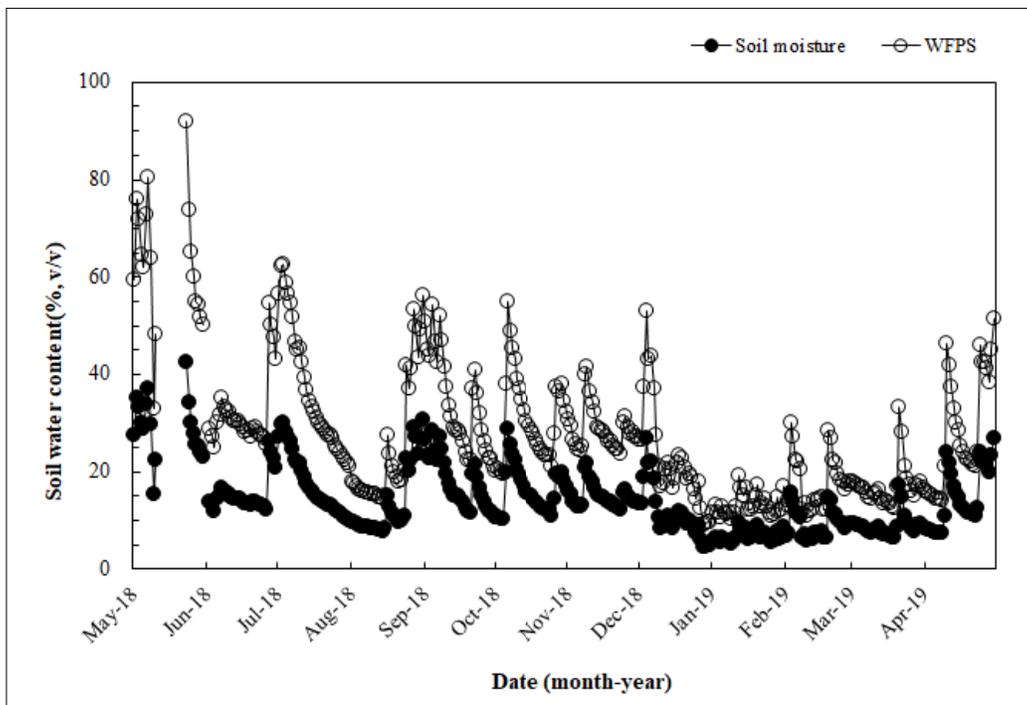


Fig. 2. Changes in daily soil moisture and WFPS of study site in 2018 and 2019.

Table 3. Soil chemical properties of each of the different treatments after sweet potato cultivation with the superscript letters indicating significant differences ($p < 0.05$)

Treatments	pH (1.5 H ₂ O)	EC (dS m ⁻¹)	O.M (g kg ⁻¹)	T-N (g kg ⁻¹)	T-C (g kg ⁻¹)	C/N ratio	NH ₄ -N (mg kg ⁻¹)	NO ₃ -N (mg kg ⁻¹)	Av. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)
NPK	7.2	0.4	17.8 ^a	1.1 ^a	11.1 ^a	10 ^{ab}	2.2	6.6	278
NPK+Cattle(10 Mg ha ⁻¹)	7.3	0.5	17.9 ^a	1.0 ^a	10.7 ^a	11 ^{ab}	2.0	3.6	256
NPK+Swine(10 Mg ha ⁻¹)	7.1	0.4	19.0 ^a	1.2 ^a	12.6 ^a	10 ^{ab}	1.8	6.2	300
NPK+Poultry(10 Mg ha ⁻¹)	7.3	0.5	18.3	1.2 ^a	11.0 ^a	9 ^a	1.9	3.5	297
NPK+Cattle(20 Mg ha ⁻¹)	7.3	0.5	21.1 ^{ab}	1.2 ^a	14.4 ^a	12 ^b	2.0	6.8	331
NPK+Swine(20 Mg ha ⁻¹)	7.3	0.4	24.8 ^b	1.5 ^a	14.9 ^a	11 ^{ab}	2.0	5.7	383
NPK+Poultry(20 Mg ha ⁻¹)	7.4	0.4	20.0 ^{ab}	1.3 ^a	13.2 ^a	10 ^a	2.1	5.9	419

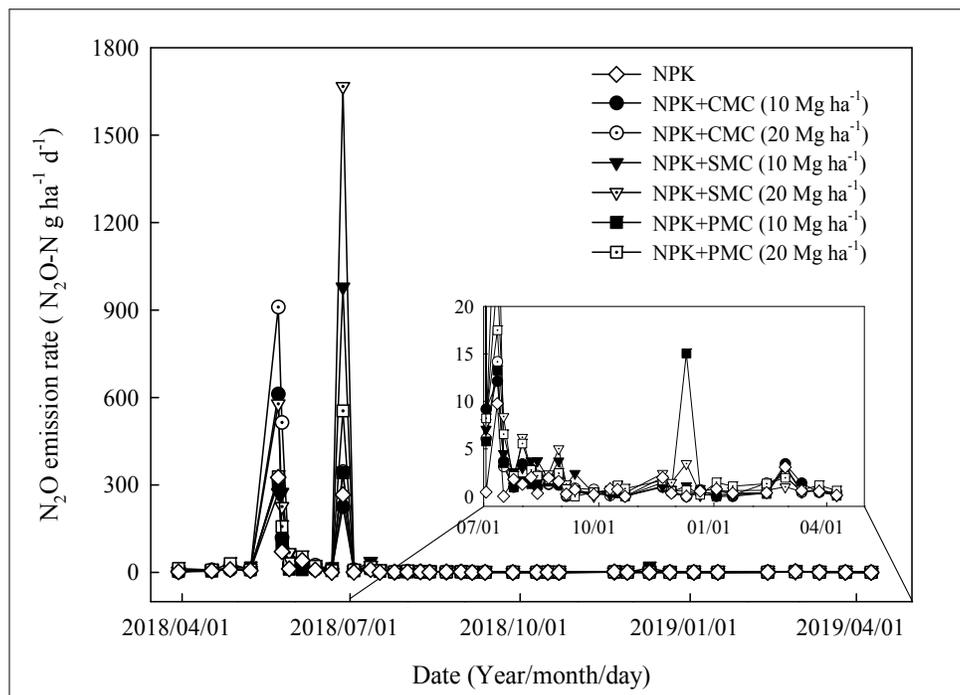


Fig. 3. N₂O emissions following application of fertilizer and each of the livestock manure composts to cropland in 2018 and 2019.

선행연구 결과들과 동일했다 (Klemetsson et al., 1988; Eric, 1993; Smith et al., 1998; Baral et al., 2017). 그러나 기존 결과들은 대부분 WFPS가 60% 이상일 때 아산화질소 배출량이 급격히 증가한 반면 본 연구에서는 50% 이상일 때 모든 처리구의 배출량이 증가하였는데 (Fig. 4) 이는 토양의 토성이나 투수속도 차이 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 5는 각 처리구에서 발생된 연중 아산화질소 배출량을 나타낸다. NPK+SMC (20 Mg ha⁻¹) 처리구의 아산화질소 배

출량이 14.7 kg N₂O-N ha⁻¹ y⁻¹로 가장 높았으며 ($p < 0.05$), 그 뒤로 NPK+CMC (20 Mg ha⁻¹) 처리구가 10.0 kg N₂O-N ha⁻¹ y⁻¹, NPK+SMC (10 Mg ha⁻¹) 처리구가 8.0 kg N₂O-N ha⁻¹ y⁻¹였다. NPK+PMC (20 Mg ha⁻¹) 처리구의 아산화질소 배출량은 5.8 kg N₂O-N ha⁻¹ y⁻¹로 NPK+SMC (10 Mg ha⁻¹) 처리구보다 낮게 나타났다.

재배 기간과 수확 후 기간에 발생된 아산화질소 배출량을 비교해보면, 화학비료, 돈분, 계분처리구는 대부분 재배 기간

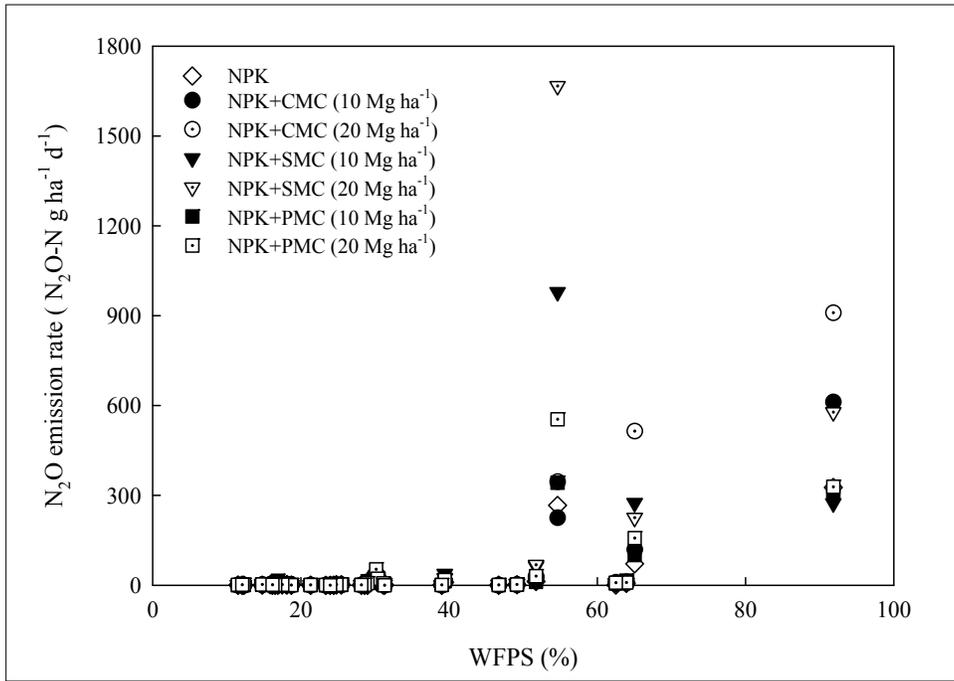


Fig. 4. Correlation of N₂O emissions from each of the treatments with WFPS.

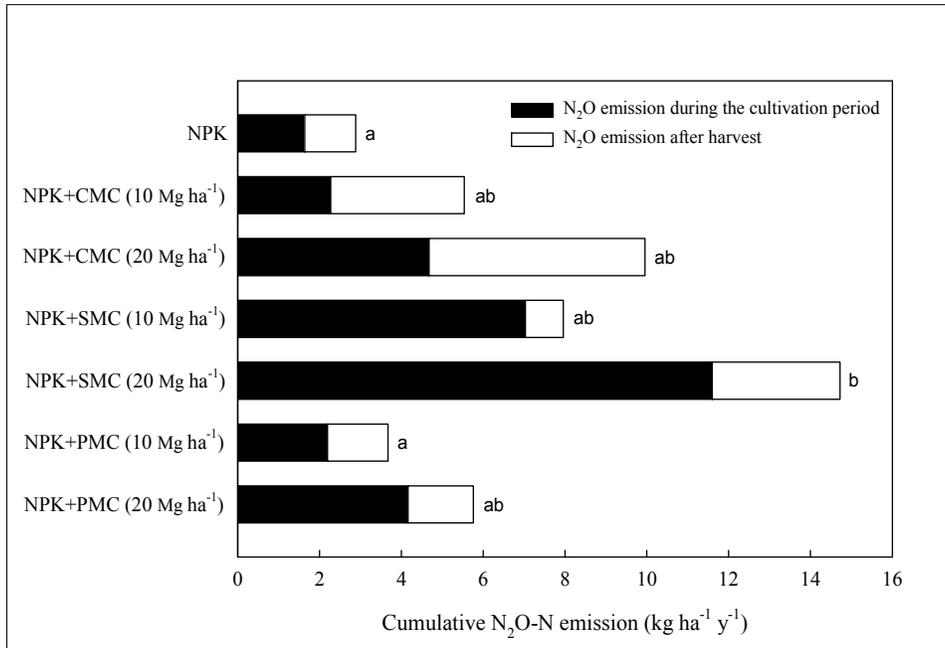


Fig. 5. Cumulative total N₂O emissions of each of the different treatments for a year period with the superscript letters indicating significant differences ($p < 0.05$).

중 아산화질소 배출 비율이 높은 반면, 우분을 사용한 처리구에서는 수확 후의 아산화질소 배출 비율이 높았다. 이는 다른

가축분 퇴비보다 우분 퇴비의 높은 탄질비에 의한 영향으로 판단되는데, 작물 잔사 중 질소 함량이 비슷하더라도 탄질비

Table 4. Comparison of IPCC default values with N₂O emission factor following application of each of the livestock manure composts to cropland

	2006 IPCC default	Livestock manure composts		
		Cattle	Swine	Poultry
----- kg N ₂ O-N (kg N) ⁻¹ -----				
N ₂ O emission factor	0.01	0.024	0.025	0.007

차이에 의해 시기별 아산화질소 배출량이 다른 선행 연구 결과들이 이를 뒷받침 한다 (Baggs et al., 2003; Yao et al., 2004). 또한 Fig. 5에서 보여주듯이 고구마를 재배하지 않는 기간에도 미미한 양이지만 각 처리구의 아산화질소가 꾸준히 배출되었다.

3.5 처리구별 아산화질소 배출계수 비교

처리구별 아산화질소 총 배출량을 각각의 질소 투입량으로 나누어 산정한 아산화질소 배출계수를 비교한 결과, 우분, 돈분, 계분 순으로 각각 0.024, 0.025, 0.007 kg N₂O-N (kg N)⁻¹ 였다 (Table 4).

돈분 사용 처리구의 아산화질소 총 배출량이 다른 처리구보다 높았으나, 돈분에 함유된 질소 함량이 다른 가축분보다 많았기 때문에 우분과 돈분의 배출계수는 큰 차이가 없었다. 그러나 IPCC에서 제시된 기본계수와 각 처리구의 배출계수 간에는 차이가 있었는데 (IPCC, 2006), 우분과 돈분 배출계수는 기본계수 0.01 kg N₂O-N (kg N)⁻¹보다 약 2배 높았고, 계분은 기본계수보다 낮게 나타났다.

4. 결론 및 고찰

가축분 퇴비는 토양 비옥도 및 작물 생육 증진을 위해 많이 사용되지만 가축분 퇴비의 성상 및 성분이 가축의 종류, 섭취 사료, 퇴비 제조 공정에 따라 차이를 나타내므로 이와 관련된 온실가스 연구는 화학비료에 비해 상대적으로 미미한 편이다. 본 연구 결과를 통해 가축분 퇴비가 아산화질소 배출량에 영향을 미치는 주요 질소원임을 확인할 수 있었다. 그러나 질소 함량이 비슷한 돈분과 계분의 배출량은 큰 차이를 보였는데, 그 이유는 함유된 질소의 형태 때문인 것으로 판단된다. 과거 선행 연구 결과들도 이를 뒷받침하고 있다. Velthof 등 (2003)은 실내에서 가축분별 아산화질소 배출계수를 평가한 결과 돈분이 가장 높았고, 우분, 계분 순으로 낮은 것을 확인하였고, Chadwick 등 (2000)도 돈분을 투입했을 때 우분보다 아산화질소 배출량이 증가하였음을 보고하였다. 이렇게

가축분 종류에 따른 투입마다 아산화질소 배출량이 차이를 보인 이유는 가축분의 성분, 특히 총질소에서 암모늄태 질소의 비율 때문이다 (Lesschen et al., 2011). 본 결과에서도 돈분과 우분의 암모늄태 함량이 계분보다 높았고 (Table 2), 배출계수 역시 높은 것을 확인할 수 있었다 (Table 4). 그러나, 정확한 원인을 파악하기 위해서는 토양수분, 토양 온도, 투입된 총 질소 함량 등을 제한한 조건에서 수행된 정밀한 연구결과가 뒷받침되어야 할 것이다. 또한, 돈분의 경우 퇴비 처리 후 초반에 아산화질소 배출이 많았던 반면 우분은 작물을 다 수확한 이후에 배출량이 많았는데, 우분 처리구의 아산화질소 배출 정점은 다른 퇴비들과 동일하게 퇴비 처리 후 초반에 분포했지만, 수확 후 휴경기에도 아산화질소가 꾸준히 배출되어 다른 처리구의 휴경기 배출량보다 많았고 결과적으로 연간 배출량이 돈분 처리구와 비슷하게 되었다. 이는 앞에서도 언급했듯이 우분의 높은 탄질비에 의해 유기물의 분해 속도가 느리기 때문이다. 토양수분함량 역시 아산화질소 배출량에 영향을 주는 주요 인자로, 가축분 퇴비를 시비 후 적정 수준의 토양수분함량을 유지하면 아산화질소 배출량이 감소될 수 있다는 것을 알 수 있었다.

가축분 퇴비 사용에 따른 아산화질소 배출계수를 국가 온실가스 산정에 적용하기 위해서는 다른 지역에서 수행된 연차별 배출량 결과가 추가되어야하며, 본 연구 결과가 국가 고유 배출계수 개발의 참고 자료로 활용될 것이라 기대한다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업 (PJ01185502)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

Agricultural Technology Guide-Sweet potato. 2013. pp. 52-138. Rural Development Administration.

- Antonio V, Ute MS, Lourdes GT, Augusto A, Susana LF, Laura SM. 2006. Nitrogen oxides emission from soils bearing a potato crop as influenced by fertilization with treated pig slurries and composts. *Soil Biology & Biochemistry* 38: 2782-2793.
- Baggs EM, Stevenson M, Pihlatie M, Regar A, Cook H, Cadisch G. 2003. Nitrous oxide emissions following application of residues and fertiliser under zero and conventional tillage. *Plant and Soil* 254: 361-370.
- Baral KR, Labouriau R, Olesen JE, Petersen SO. 2017. Nitrous oxide emissions and nitrogen use efficiency of manure and digestates applied to spring barley. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 239: 188-198.
- Bjoern OS, Marianne S, Roland JB. 2014. Methane and nitrous oxide emissions from flooded rice fields as affected by water and straw management between rice crops. *Geoderma* 355-362.
- Bouwman. AF, Van der Hoek KW, and Olivier JG. 1995. Uncertainties in global source distribution of nitrous oxide. *J Geophys Res [Atmos.]* 100: 2785-2800.
- Chadwick DR, Pain BF, and Brookman SKE. 2000. Nitrous oxide and methane emissions following application of animal manures to grassland. *Journal of Environmental Quality* 29: 277-287.
- Choi EJ, Lee JS, Seo SW, Kim GY, Lee SI, Jeong HC. 2016. Effect of livestock composts N₂O emission from sweet potato field during cultivation period. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer Proceeding* 10: 242-242.
- Eric AD. 1993. pp. 369-386. Biogeochemistry of Global Change. Soil water content and the ratio of nitrous oxide to nitric oxide emitted from soil.
- 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.
- Hiroko A and Haruo T. 2003. Nitrous oxide, nitric oxide, and nitrogen dioxide fluxes from soils after manure and urea application. *32 (2): 423-431.*
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. pp. 11.6-11.11. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- Kim SU, Choi EJ, Jeong HC, Lee JS, Hong CO. 2017. The influence of composted animal manure application on nitrous oxide emission from upland soil. *Korean K. Soil Sci. Fert.* 50 (6): 530-537.
- Klemmedtsson L, Svensson BH, Rosswall T. 1988. Relationships between soil moisture content and nitrous oxide production during nitrification and denitrification. *Biol Fertil Soils* 6: 106-111.
- Lee JI, Nam YK, Kyung KC, Chang KW, Lee JT, Shin YK. 2003. N₂O emission as affected by application of composted livestock waste and chemical fertilizer in a upland soil under red pepper. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer Proceeding* 5: 213-213.
- Lesschen JP, Velthof GL, Vries W, Kros J. 2011. Differentiation of nitrous oxide emission factors for agricultural soils. *Environmental Pollution* 159: 3215-3222.
- Mosier A, Kroeze C, Nevison C, Oenema O, Seitzinger S, Van Cleemput O. 1998. Closing the global N₂O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. *Nutr Cycl Agroecosyst* 52: 225-248.
- Smith KA, Thomson PE, Clayton H, McTaggart IP, Conen F. 1998. Effects of temperature, water content and nitrogen fertilisation on emissions of nitrous oxide by soils. *Atmospheric Environment* 32 (19): 3301-3309.
- Smith P, Martino D, Cai Z, Gwary D, Janzen H, Kumar P, McCarl B, Ogle S, O'Mara F, Rice C, Scholes B, Sirotenko O. 2007. Agriculture. In: Metz B, Davidson OR, Bosch PR, Dave R, Meyer L.A. (Eds.), *Climate change 2007: Mitigation. Contribution of working group III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Velthof GL, Kuikman PJ, Oenema O. 2003. Nitrous oxide emission from animal manures applied to soil under controlled conditions. *Biology and Fertility of Soils* 37 (4): 221-230.
- Yao H, Jianwen Z, Xunhua Z, Yuesi W, Xingkai X. 2004. Nitrous oxide emissions as influenced by amendment of plant residues with different C:N ratios. *Soil Biology & Biochemistry* 36: 973-981.