

딸기(*Fragaria* × *ananassa* Duch.) 시설재배에서 가축분 퇴비 시용이 아산화질소 배출에 미치는 영향

이창규* · 문형철** · 송은주*** · 최선우** · 고도영** · 전형권*** · 윤석인****

Effect on Nitrous Oxide Emission in Applying Livestock Manure Compost for Strawberry (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) Cultivation in Plastic Film House

Lee, Chang-Kyu · Moon, Hyung-Cheol · Song, Eun-Ju · Choi, Seon-U ·
Ko, Do-Young · Chon, Hyong-Gwon · Yun, Seok-In

This study was conducted to investigate the growth characteristics of strawberries and N₂O emission by treating the compost for each type of livestock manure, which was an organic farming material, as a basal fertilization in plastic film house. Livestock manure compost, which made from cattle manure, swine manure, and poultry manure as raw materials, were applied to this experiment, treated by mixing or single on the basis of nitrogen content with the standard amount of fertilizer for strawberries. Total emission of N₂O were 10.7% higher than those in poultry manure compost treatment compared to the inorganic fertilizer treatment, but 16.5~41.9% lower than those in other livestock manure compost treatment. The period of N₂O emission mainly was up to the 17th day after fertilizer application, accounting for 70~87% of the total amount of discharge, and 13~30% of the total amount was emitted for 158 days later. N₂O emission was decreased significantly NH₄⁺-N content in the soil, and increased NO₃⁻-N. As compared with control, the number of leaves, leaf width and crown diameter of livestock manure compost treatments were not significantly different, leaf length of cattle+poultry, cattle+swine, swine+poultry treatment higher, and SPAD (soil plant analysis development) values of cattle+poultry treatment highest. There was no significant difference in

* Corresponding author, 전라북도농업기술원 농업환경과 농업연구사, 원광대학교 생물환경화학학과 박사과정(staryck@korea.kr)

** 전라북도농업기술원 농업환경과 농업연구사

*** 전라북도농업기술원 농업환경과 농업연구관

**** 원광대학교 생물환경화학과 부교수

weight and sugar content of strawberry fruits among treatments.

Key words : *greenhouse gases, livestock manure compost, nitrous oxide, plastic film house*

I. 서 론

통계청에 따르면 2018년 우리나라 딸기재배 면적은 6,062 ha이었고, 생산량은 183,639톤이었으며, 그중 시설재배 면적은 5,969 ha (181,894톤), 노지재배 면적은 93 ha (1,745톤)이었다. 전라북도 딸기재배 면적은 557 ha이었고, 생산량은 17,508톤이었으며, 시설재배 면적은 555 ha (17,454톤), 노지재배 면적은 2 ha (54톤)로 대부분 시설하우스에서 재배되었다.

2017년 우리나라 온실가스 총배출량은 709.1백만톤 CO₂eq.로 1990년 292.2백만톤 CO₂eq.에 비해 142% 증가하였고, 농업 비에너지 분야에서 배출되는 온실가스는 20.4백만톤 CO₂eq.로 총배출량의 2.9%를 차지하고 있다(GIR, 2019). 농업분야에서 주로 발생하는 온실가스는 N₂O와 CH₄이며, N₂O는 지구온난화지수(GWP; Global Warming Potential)이 CO₂보다 310배 큰 가스 물질로 농업 활동에 의해 주로 배출되고, CH₄는 21배로 농경지 배출은 담수상태에서 혐기적인 분해 과정에서 생성된다(IPCC, 1996). N₂O의 주 배출원은 농업 활동에 사용하는 가축분뇨 및 질소질 비료이며, 지구의 온난화 기여율은 5% 이상인 것으로 알려져 있다(IPCC, 2007).

최근에는 밭에서 배출되는 온실가스를 줄이기 위해 N₂O 감축 기술과 배출계수 개발 연구를 수행하고 있다. Kim 등(2018a)은 고추에 표준시비량의 질소 기준으로 무기질비료 50%와 헤어리베치 50%를 혼합하여 처리한 경우 대조구에 비해 약 56.2% 감소하였고, Lee 등(2018)은 왕겨, 콩대, 배 전정가지로 만든 바이오차를 토양에 처리한 결과 N₂O 배출량이 81.8~86.9% 감소하였다고 보고하였다. Kim 등(2011)은 표준시비량의 질소 기준으로 돈분퇴비를 사용한 결과 무기질비료 처리구에 비해 16.7~94.9% 증가하였고, Choi 등(2019)은 온실가스 배출 계수 개발을 위해 무기질비료와 함께 가축분 종류별 퇴비를 10, 20 Mg/ha를 사용한 결과 가축분퇴비의 N₂O 배출계수는 0.007~0.024인 것으로 보고하였다.

하지만 N₂O 배출에 대한 가축분퇴비 연구는 무기질비료와 함께 유기물로 가축분퇴비를 사용한 연구는 수행되었으나(Park et al., 2015; Lee et al., 2017; Hyun et al., 2017; Kim et al., 2018b, Choi et al., 2019), 유기농업 기술적용을 위해 무기질비료를 대신하여 가축분퇴비를 사용한 연구와 가축분 종류별 퇴비의 N₂O 배출에 대한 연구는 부족한 실정이다. 그리고 우리나라에서는 주로 밭에서 발생하는 N₂O에 대한 연구가 수행되었지만, 시설하우스 같이 특이한 환경에서는 연구가 수행되지 않았다. 따라서 딸기 시설하우스에서 가축분 종류별 퇴비를 밀거름으로 사용하여 배출되는 N₂O와 작물의 생육상황을 검토하고자 본 연구를 수행하였다.

II. 재료 및 방법

1. 시험 지역 및 재배 방법

본 연구는 전라북도 익산시 용안면 석동리(36°07' 55.3" N, 126°56' 38.5" E)에 위치한 시설하우스에서 2019년 9월 9일부터 2020년 3월 2일로 175일간 실시하였다. 시험포장의 토양은 백산통이며, 토성은 미사질양토(silt loam), 용적밀도는 1.23 g/m³, 공극률은 57.7%이었다(Table 1). 시험 전 토양의 pH (1:5)는 7.6, EC는 2.5 dS/m로 약간 높았고, 교환성양이온 중 K⁺는 1.40 cmol_c/kg, Ca²⁺는 11.2 cmol_c/kg, Mg²⁺는 4.5 cmol_c/kg이었다. 토양의 총탄소(total carbon; T-C) 함량은 17.3 g/kg이었고, 총질소(total nitrogen; T-N) 함량은 1.8 g/kg으로 C/N 비율은 9.6이었으며, NO₃⁻-N은 72.0 mg/kg, NH₄⁺-N은 19.4 mg/kg이었다.

Table 1. Soil physicochemical properties of the experimented area

Parameters	Value	Parameters	Value
pH (1:5)	7.6	Total N (g/kg)	1.8
EC (dS/m)	2.5	NO ₃ ⁻ -N (mg/kg)	72.0
Available P ₂ O ₅ (mg/kg)	595.4	NH ₄ ⁺ -N (mg/kg)	19.4
Exchangeable K (cmol _c /kg)	1.40	Soil texture	Silt loam
Exchangeable Ca (cmol _c /kg)	11.2	Sand (g/kg)	631
Exchangeable Mg (cmol _c /kg)	4.5	Silt (g/kg)	218
CEC (cmol _c /kg)	13.9	Clay (g/kg)	151
Total C (g/kg)	17.3	Bulk density (Mg/m ³)	1.23
Organic matter content (g/kg)	29.8	Porosity (%)	57.7

딸기 재배를 위한 양분공급원으로 우분퇴비, 돈분퇴비, 계분퇴비로 각각 생산된 제품을 구입하였고, 가축분퇴비의 N 함량은 계분퇴비에서 3.2%로 가장 높았으며, 돈분퇴비에서 3.1%, 우분퇴비에서 2.1로 가장 낮았다(Table 2). 가축분퇴비 사용은 딸기 표준시비량의 N 함량을 기준으로 N 9.6 kg/10a를 전량 밀거름으로 각각 사용한 처리구와 우분퇴비(N 4.8 kg/10a)와 계분퇴비(N 4.8 kg/10a) 사용 처리구, 돈분퇴비(N 4.8 kg/10a)와 계분퇴비(N 4.8 kg/10a) 사용 처리구, 우분퇴비(N 4.8 kg/10a)와 돈분퇴비(N 4.8 kg/10a) 사용 처리구를 두었다. 대조구는 무기질비료 처리구를 두었고, 요소, 용성인비, 염화가리를 표준시비량으로 N 9.6 kg/10, P₂O₅ 4.9 kg/10a, K₂O 7.4 kg/10a를 처리하였다. 시험을 위한 가축분퇴비와 무기질비료는 2019년 9월 9일에 난괴법 3반복으로 처리하였고 각 처리구의 면적은 15 m²으로 하

Table 2. Chemical properties of the livestock manure compost

Livestock manure compost	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	OM (%)	OM/N ratio
Cattle	2.1	3.1	3.6	74.2	34.7
Swine	3.1	6.8	3.7	72.6	23.4
Poultry	3.2	4.0	6.4	69.6	21.5

였다. 딸기 품종은 ‘설향’이었고, 정식은 2019년 9월 10일에 실시하였으며, 재식거리는 두둑간 거리 100 cm, 주간거리 20 cm, 열간거리 20 cm로 하였다. 토양 수분관리를 위해 딸기 생육 초기부터 3~4일 간격으로 1.5톤/10a 정도 관수하였고, 모든 처리구에 동일하게 실시하였다.

2. 생육 조사 및 시료 분석

딸기 생육조사는 정식 후 50일에 실시하였고, 조사항목은 엽수(no. of leaves), 엽장(leaf length), 엽폭(leaf width), 관부직경(crown diameter), SPAD (soil plant analysis development) 값이었다. 생육조사의 편차를 줄이기 위해 각 항목을 동일한 사람이 측정하도록 하여 평균하였다. 딸기 과실특성 조사는 수확기에 시료를 채취하여 과중(fruit weight)과 당도(sugar content)를 측정하였다. 이때 당도는 딸기 과실을 착즙하여 굴절식 당도계(Master-M, Atago, Japan)로 측정하였다. 토양 시료 채취는 시험구를 대표할 수 있도록 골고루 채취하여 혼합하였고, 1 kg 정도를 그늘진 곳에서 건조하여 분석에 사용하였다. pH와 EC는 토양과 증류수를 1:5로 혼합하여 pH 미터기(A221, Thermo, USA)와 EC 미터기(A222, Thermo, USA)로 측정하였고, 유기물은 Tyurin법으로 정량하였다. 유효인산은 Lancaster법에 따라 비색계(UV-2600, Shimadzu, Japan)로 720 nm에서 정량하였고, 교환성양이온(K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺)은 1 M NH₄OAc로 추출하여 유도결합플라즈마 분광광도계(ICP-OES, Integra Dual, GBC, Australia)로 측정하였으며, T-N과 T-C는 원소분석기(Vario max cube, Elementar, Germany)로 분석하였다. NO₃⁻-N은 0.025 M Al₂(SO₄)₃로 침출하여 이온선택성 전극(A214, Thermo, USA)으로 측정하였으며, NH₄⁺-N은 2 M KCl로 침출한 용액에 MgO를 혼합하여 증류하였고 이 과정에서 발생하는 암모니아를 2% 붕산 용액에 포집하여 0.01 N 황산 용액으로 적정하였다. N₂O 포집은 내외부의 공기 유입과 유출을 방지할 수 있는 밀폐형 챔버법(Hutchinson and Livingston, 1993)을 사용하였고, 지름은 25 cm, 높이 45 cm이었다. 챔버는 두둑 상단 작물과 작물 사이의 지표면에서 깊이 약 10 cm 이내로 삽입하여 뿌리의 활착과 토양 수분 이동의 제한을 최소화하였고, 처리구마다 3반복으로 설치하였다. 가스 채취는 N₂O 배출이 많은 시기인 경우 1주일에 1회, N₂O 배출이 적은 안정화된 시기에는 2주일에 1회 실시하였다. N₂O 포집은 Yagi (1991)의 방법에 따라 오전 10시 20분에서 11시까지 40분간 방치 후 포집하였고, 포집

후에는 챔버 덮개를 개방해 두었다. 포집한 N₂O 시료는 실험실로 운반하여 가스크로마토그래피(7890B, Agilent, USA)로 분석하였고, detector는 μECD를 활용하였다(Table 3). 가스크로마토그래피 분석에 따라 정량된 N₂O는 아래 식 (1)에 따라 플럭스를 계산하였다.

$$F = p \times h \times \Delta c / \Delta t \times 273 / T \tag{1}$$

F는 단위시간 당 단위면적에 배출되는 N₂O의 양, p는 가스밀도(mg/m³, p_{N₂O}=1.96), h는 챔버의 유효높이(m), Δc / Δt = 챔버내 가스농도의 평균증가 속도(mg/m³/hr), T = 챔버내 평균기온(K)을 의미한다.

Table 3. Gas chromatographic analysis conditions for N₂O measurement

Parameters		Operating condition	Parameters		Operating condition
GC		Agilent 7890B	Retention time		8.3 min
Detector		μECD	Calibration gas		0.3 · 0.7 · 1.0 ppmv N ₂ O in N ₂
Column	Packing material	Hayesep Q	Temperature	Column	60°C/10 min (hold time)
	O.D. × length	1/8" × 1.83 m		Detector	350°C
Carrier gas		CH ₄ 5.0%/Ar	Loop		2 mL

대기온도는 농촌진흥청 농업기상정보서비스(Agricultural Weather Information Service)에서 제공하는 전라북도 익산시의 최대, 최저, 평균 온도를 조사하여 활용하였고, 통계 분석은 R-프로그램(R version 3.6.1, The R Foundation, New Zealand)을 활용하여 N₂O 배출량과 생육에 대한 던컨 다중검정(Duncan's multiple range test)을 실시하였다.

III. 결 과

1. 시설하우스에서 가축분퇴비 사용에 따른 N₂O 배출량 변화

딸기를 재배하는 시설하우스에서 토양 양분으로 가축분퇴비를 사용한 결과, N₂O 배출량은 무기질비료 처리구와 비교하여 우분퇴비와 계분퇴비 처리구를 제외한 모든 처리구에서 적은 것으로 나타났다(Table 4). 무기질비료 처리구와 비교할 경우 계분퇴비와 우분퇴비 처리구의 아산화질소 배출량은 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않았고, 돈분퇴비, 우

Table 4. Evaluation of N₂O emissions and GWP (Global Warming Potential) according to the livestock manure compost

Livestock manure compost	Daily N ₂ O emission (gN ₂ O/ha/day)	Total N ₂ O emission (gN ₂ O/ha)	GWP (kgCO ₂ eq./ha)
Control (NPK)	31.1abz	5,449ab	1,689ab
Cattle	26.0bc	4,552bc	1,411bc
Swine	18.9d	3,312d	1,027d
Poultry	34.5a	6,030a	1,869a
Cattle+Poultry	22.4cd	3,916cd	1,214cd
Cattle+Swine	18.1d	3,168d	982d
Swine+Poultry	24.1cd	4,217cd	1,307cd

^z Mean values (n=3), with different lowercase letters indicating significant difference at $p=0.05$ by Duncan's multiple range test.

분+계분퇴비, 우분+돈분퇴비 및 우분+계분퇴비 처리구에서는 22.6~41.9% 감소하였다. 처리구들 중에서 우분+돈분퇴비 처리구와 돈분퇴비 처리구는 가장 낮은 아산화질소 배출량을 보였다.

N₂O 일일 배출량은 비료를 사용한 1일 후인 2019년 9월 10일부터 급격히 증가하였다(Fig. 1). 그리고 비료사용 8일 후인 9월 17일에 가장 많이 배출되었고, 9월 26일부터는 급격히 감소하여 비교적 낮은 수준으로 배출하는 경향을 나타내었다. 배출량이 가장 많았던 9월 17일의 N₂O 배출량은 계분퇴비 처리구 59.4 mg/m²/day, 무기질비료 처리구 47.8 mg/m²/day, 우분퇴비 처리구 34.6 mg/m²/day, 돈분퇴비+계분퇴비 처리구 32.0 mg/m²/day, 우분퇴비+계분퇴비 처리구 27.8 mg/m²/day, 돈분퇴비 처리구 26.2 mg/m²/day, 우분퇴비+돈분퇴비 처리구 21.4 mg/m²/day 순으로 조사되었다.

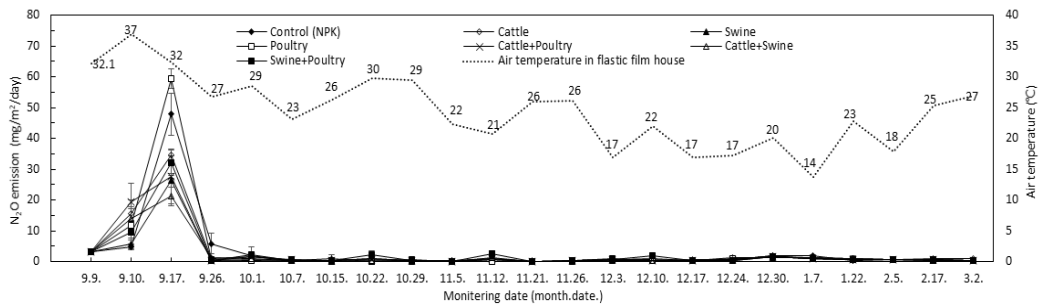


Fig. 1. Daily variation in N₂O emission and air temperature during the experimented period.

작물을 재배하는 기간 동안 N₂O 누적 배출량을 조사한 결과 비료 처리 후 17일이 경과한 9월 26일까지는 총배출량의 70.0~87.0%가 배출되었다(Fig. 2). 처리구별 아산화질소 누적 배출량은 계분퇴비 처리구에서 87.0%로 초기배출 비율이 가장 높았고, 무기질비료 처리구 78.5%, 우분퇴비+계분퇴비 처리구 76.8%, 우분퇴비 처리구 75.4%, 우분퇴비+돈분퇴비 처리구 73.2%, 돈분퇴비 처리구 70.9%, 돈분퇴비+계분퇴비 처리구 70% 순으로 나타났다. 비료 처리 후 18일이 경과한 이후부터 시험 종료일(2020년 3월 2일)까지의 누적 N₂O 배출량은 13.0~30.0%로 초기 17일간 누적 배출에 비해 비교적 낮은 수준으로 배출되었다.

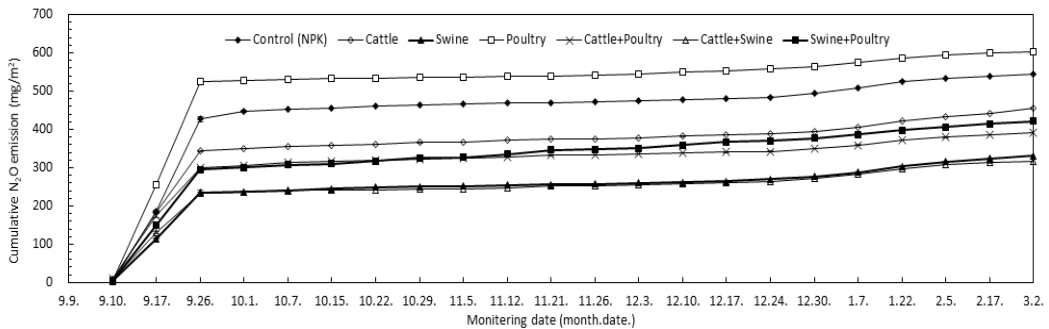


Fig. 2. Daily variation in cumulative N₂O emission during the experimented period.

N₂O 배출에 대한 온도의 영향을 알아보기 위해 전라북도 익산시의 대기온도를 조사한 결과 2019년 9월 9일부터 2020년 3월 2일까지 최고기온은 26.9°C 이었고, 최저기온은 -4.4°C, 평균기온은 8.6°C 이었다(Fig. 3). 평균온도가 가장 높은 시기는 2019년 9월로 22.2°C 이었고, 그 이후 계속 감소하여 2020년 2월에 3.2°C로 가장 낮았으며, 3월에는 7.6°C로 약 4.4°C 증가하였다. 최고온도는 2020년 9월에 26.9°C로 가장 높았으나 지속적으로 감소하여 12월에

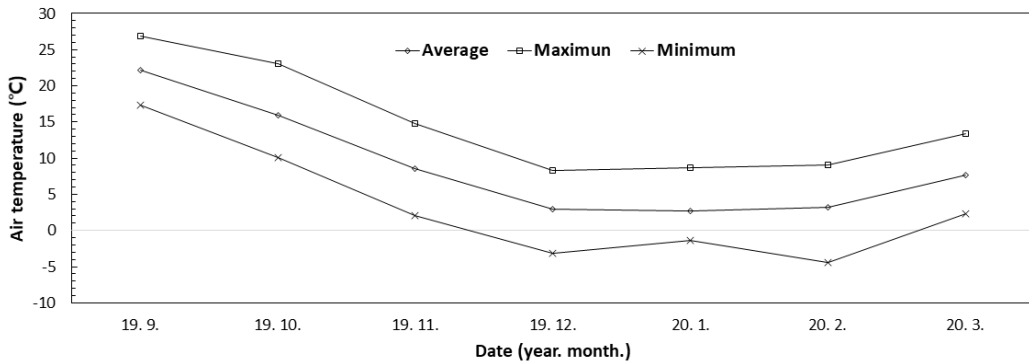


Fig. 3. Monthly variation in maximum, minimum, and average temperature during the experimented period.

8.3°C까지 감소하였고, 다음해 3월에 13.4°C로 약간 증가하였다. 최저온도가 가장 낮은 시기는 2020년 2월로 -4.4°C이었고, 가장 높은 시기는 2019년 9월로 17.3°C이었다.

2. 토양 무기태질소 함량과 N₂O 배출량

N₂O 총배출량과 토양 NH₄⁺-N 농도는 부의 상관성을 나타내었다(Fig. 4). N₂O 배출량이 가장 많았던 딸기 생육초기인 2019년 9월 26일의 토양 NH₄⁺-N 농도는 낮을수록 N₂O 배출량은 증가하는 유의한 부의 상관성($r = -0.779$, $p < 0.05$, $n=7$)을 나타내었다. 반면 다음 조사 시기인 10월 7일에는 토양 NH₄⁺-N 농도 감소와 함께 N₂O 배출량이 증가하였지만 유의한 상관성($r = -0.513$, $p > 0.05$, $n=7$)을 보이지 않았다. N₂O 총배출량과 토양 NO₃⁻-N 농도는 정의 상관성을 나타내었다(Fig. 5). 9월 26일의 토양 NO₃⁻-N 농도는 높을수록 N₂O 배출량이 증가하였으나 유의한 상관성($r = 0.496$, $p > 0.05$, $n=7$)을 보이지 않았다. 하지만 10월 7일의 토양 NO₃⁻-N 농도가 높을수록 N₂O 배출량이 유의하게 증가하였다($r = 0.765$, $p < 0.05$, $n=7$).

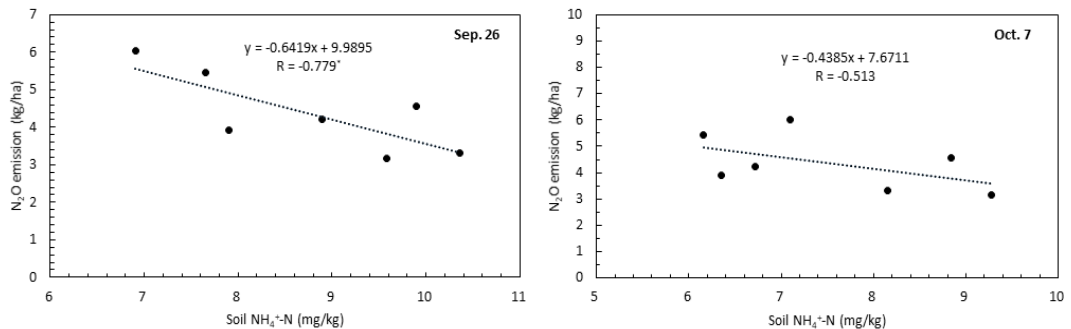


Fig. 4. Correlation between N₂O emission and NH₄⁺-N concentration in soil on the 26th of September and the 7th of October.

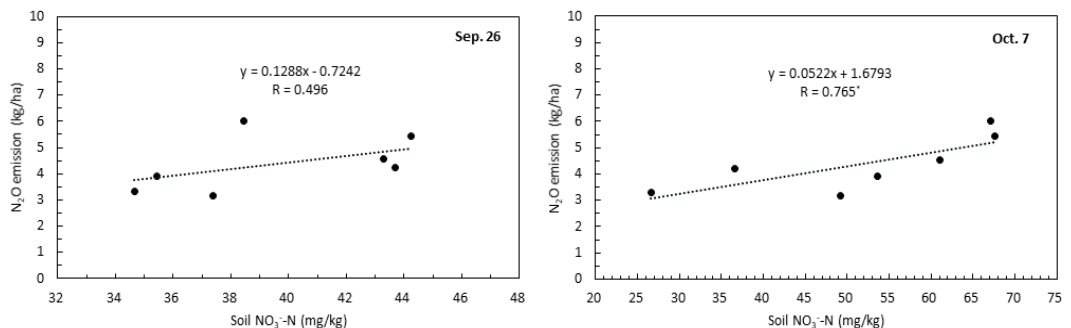


Fig. 5. Correlation between N₂O emission and NO₃⁻-N concentration in soil on the 26th of September and the 7th of October.

3. 딸기 생육 및 과실 특성

시설하우스에서 가축분퇴비를 밑거름으로 사용한 결과 딸기의 생육은 무기질비료(NPK) 처리구와 비슷한 경향을 나타내었다(Table 5). 딸기의 엽수와 엽폭, 관부직경은 모든 처리구에서 유의한 차이를 보이지 않았다($p > 0.05$). 돈분퇴비, 우분+돈분퇴비, 우분+계분퇴비 및 돈분+계분퇴비 처리구의 엽장은 8.0~8.2 cm로 무기질비료 처리구(7.0 cm)보다 증가하였다. 엽록소 지수를 나타내는 SPAD 값은 우분퇴비+계분퇴비 처리구에서 46.4로 무기질비료 처리구보다 증가하였고, 다른 처리구들은 통계적 유의차를 나타내지 않았다. 딸기의 과중과 당도는 모든 처리구에서 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않았다(Fig. 6).

Table 5. Growth characteristics of strawberries on after planting

Livestock manure compost	No. of leaves (each/plant)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Crown diameter (mm)	SPAD value
Control (NPK)	5.0a ^a	7.0b	5.9a	22.9a	43.5b
Cattle	4.9a	7.8ab	6.3a	23.1a	44.8ab
Swine	5.2a	8.0a	6.6a	23.5a	44.9ab
Poultry	5.3a	7.9ab	6.4a	23.6a	44.9ab
Cattle+Poultry	5.1a	8.2a	6.5a	23.2a	46.4a
Cattle+Swine	5.1a	8.2a	6.2a	23.2a	44.9ab
Swine+Poultry	5.1a	8.2a	6.5a	23.0a	45.1ab

^a Mean values (n = 3), with different lowercase letters indicating significant difference at $p = 0.05$ by Duncan's multiple range test.

IV. 고 찰

시설하우스에서 가축분퇴비를 밑거름으로 사용한 후 딸기를 재배하는 기간 동안의 총 N₂O 발생량은 가축분퇴비 처리구에서 무기질비료(NPK) 처리구에 비해 적었다. 가축분퇴비는 지효성 유기질비료로 속효성인 무기질비료에 비해 느리게 분해되기 때문에 가을과 겨울의 낮은 온도의 영향으로 N₂O 배출이 적었을 것으로 판단된다(Fig. 3). 하지만 계분퇴비 처리구에서 N₂O 배출량이 무기질비료 처리구에 비해 10.7% 높게 나타났는데, 이는 두 가지 요인으로 생각할 수 있다(Table 4). 첫 번째는 계분퇴비 처리 시 초기 아산화질소 배출량이 많았기 때문이고, 두 번째는 계분퇴비는 C/N 비율이 다른 퇴비보다 낮아 분해가 빠르게 진행되었기 때문이라 생각된다. 가축분 종류에 따른 N₂O 배출량은 가축분에 함유된 무기태

질소인 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 함량이 높을수록 많았고(Choi et al., 2019; Lesschen et al., 2011), 유기물 중 C/N비율이 낮은 헤어리베치는 분해속도가 빨라 온실가스 배출을 높인다고 하였다(Kim et al., 2018a). N_2O 총 배출량 대비 비료살포 후 17일 동안 배출 비율을 보면 무기질비료와 돈분퇴비, 우분퇴비 처리구보다 계분퇴비 처리구에서 배출비율이 87.0%로 가장 높았던 것은 앞서 설명한 바와 같이 C/N비율이라고 판단된다(Fig. 2). 계분퇴비의 N_2O 배출 영향은 우분퇴비, 돈분퇴비, 계분퇴비를 질소 표준시비량 기준 50:50으로 혼합한 처리구에서도 나타났다. 계분퇴비가 포함되지 않은 우분퇴비+돈분퇴비 처리구에서 무기질비료 처리구 대비 41.9% 적게 배출되었던 반면 계분퇴비가 포함된 우분퇴비+계분퇴비 처리구와 돈분퇴비+계분퇴비 처리구에서는 감소량이 22.6~28.1% 수준으로 감소폭이 적었다. 이는 우분과 돈분 또는 계분을 혼합하여 퇴비를 사용하면 N_2O 배출이 많은 축분의 영향이 배출이 적은 축분에 의해 감소하는 것으로 판단된다.

N_2O 발생량은 토양 온도가 낮아지면 감소하는 양상을 나타낸다(Gödde and Conrad, 1999; Kim et al., 2008). 토양에서 질소순환 과정 중 질산화와 탈질에 중요한 역할을 하는 미생물의 활성은 각각 5°C와 2°C에서 급격히 감소한다(Brady and Weil, 2010). N_2O 일일 배출량을 보면, 시설하우스 내부 온도가 30°C 이상인 시기인 9월 17일까지 배출량이 많았고, 30°C 이하로 내려간 시기인 9월 26일부터는 급격히 감소하였다. 시설하우스는 보온효과가 있는 재배장소이지만 가을인 9월부터 대기온도가 급격히 감소하여 시설하우스 내부의 온도도 낮아진다. 이와 같이 낮아진 온도는 미생물의 활성을 현저하게 감소시켜 유기물 분해를 더디게 하였고, 이러한 영향은 N_2O 배출량 감소의 원인 중 하나가 되었을 것이라 생각된다. Kim 등(2018b)은 고구마 재배 토양에서의 N_2O 배출은 10월 이후부터 급격히 감소한 후 다음해 2월까지 유지하였다고 보고하였는데 이와 비슷한 결과였다.

N_2O 배출량과 토양 무기태질소는 유의한 상관성을 나타내었다($p < 0.05$). N_2O 배출량이 많았던 생육초기의 토양에 존재하는 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도와 N_2O 배출량은 부의 상관성을 나타내었다. 이는 토양에 존재하는 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 이 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 으로 변화가 진행되면서 중간물질로 N_2O 가 발생하였기 때문으로 같은 시기에 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 과 N_2O 배출량이 정의 상관성을 보이며 증가하는 것이 이를 설명해주는 것으로 생각된다. Kim 등(2018a)은 N_2O 배출에 가장 영향을 미치는 요인으로 토양 무기태질소라고 하였고, Hellebrand 등(2008)은 N_2O 배출량과 토양의 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 함량과 상관관계가 있으며, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 이 높으면 N_2O 배출량도 많다고 하였다.

딸기 생육과 과실 특성은 무기질비료 처리구와 비교하여 가축분퇴비 처리구에서 통계적으로 유의적인 차이를 나타내지 않았다(Fig. 6). 이는 무기질비료의 질소를 기준으로 가축분퇴비를 사용하였기 때문에 딸기 생육에 필요한 양분이 부족함 없이 공급되었기 때문이라고 판단된다.

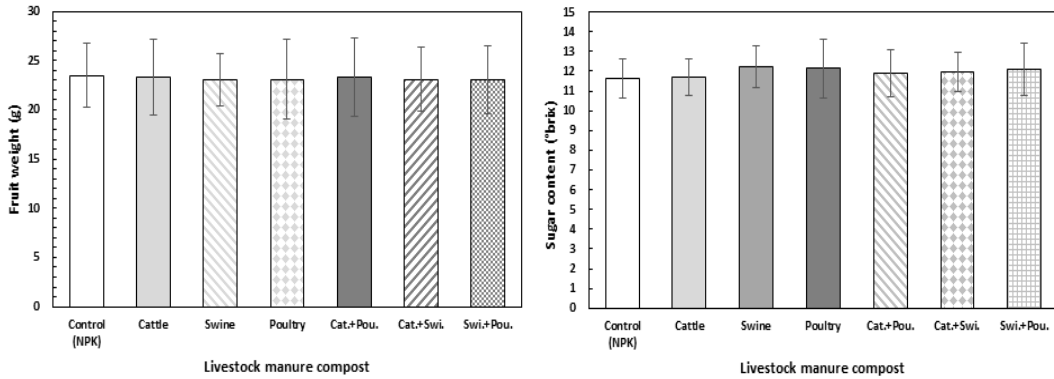


Fig. 6. Fresh-fruit weight of strawberry (g) and sugar content (°brix) at harvest period.

V. 적 요

시설재배지에서 토양 양분으로 유기농업자재인 가축분 종류별 퇴비를 밀거름으로 처리한 후 발생하는 N_2O 와 딸기의 생육 특성을 조사하기 위해 본 연구를 수행하였다. 가축분퇴비는 돈분과 우분, 계분을 원료로 하여 각각 만들어진 제품을 사용하였고, 딸기 표준시비량의 질소를 기준으로 단독 그리고 혼합 처리하였다. N_2O 의 총배출량은 무기질비료 처리구와 비교하여 계분퇴비 처리구에서 10.7% 많았으나 다른 가축분퇴비 처리구에서는 16.5~41.9% 적게 배출되었다. N_2O 가 주로 배출되는 기간은 비료살포 후 17일차까지로 전체 배출량의 70~87%를 차지하였고, 이후 158일간 13~30%가 발생하였다. N_2O 배출량은 토양의 NH_4^+-N 함량과 부의 상관성을 나타내었다. 딸기의 생육 중 엽수, 엽폭, 관부직경은 처리구간 유의한 차이를 보이지 않았고, 엽장은 무기질비료 처리구보다 가축분퇴비 처리구에서 컸으며, SPAD 값은 우분퇴비와 계분퇴비를 혼합하여 사용한 처리구에서 가장 높았다. 딸기 과실의 무게와 당도는 처리구간 유의한 차이를 보이지 않았다.

[Submitted, December. 29, 2020; Revised, February. 3, 2021; Accepted, February. 19, 2021]

References

1. Agricultural Weather Information Service. <http://weather.rda.go.kr>
2. Brady, N. C. and R. R. Weil. 2010. Elements of the nature and properties of soils. third

- edition. Pearson. USA. p. 366.
3. Choi, E. J., G. Y. Kim, S. I. Lee, H. C. Jeong, J. S. Lee, H. S. Gwon, and T. K. Oh. 2019. Estimation of nitrous oxide emission from different livestock manure composts applied to cropland. *J. Climate Change Res.* 10(4): 325-332.
 4. Gödde, M. and R. Conrad. 1999. Immediate and adaptational temperature effects on nitric oxide production and nitrous oxide release from nitrification and denitrification in two soils. *Biol. Fertil. Soils.* 30(1): 33-40.
 5. Greenhouse Gas Inventory and Research Center (GIR). 2019. National greenhouse gas inventory report of Korea.
 6. Hellebrand, H. J., V. Scholz, and J. Kern. 2008. Fertilizer induced nitrous oxide emissions during energy crop cultivation on loamy sand soils. *Atmos. Environ.* 42(36): 8403-8411.
 7. Hutchinson, G. L. and G. P. Livingston. 1993. Use of chamber systems to measure trace gas fluxes. *Agricultural ecosystem effects on trace gases and global climate change.* 55(1): 63-78.
 8. Hyun, J. G., S. Y. Yoo, X. Y. Yang, J. E. Lee, and G. Y. Yoo. 2017. Annual variability in nitrous oxide emission from agricultural field soils. *J. Climate Change Res.* 8(4): 305-312.
 9. IPCC. 1996. Revised IPCC guideline for national greenhouse gas inventories: Reference manual, revised in 1996. Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland.
 10. IPCC. 2007. Climate change 2007. The physical science basis: Summary for policymakers. Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland.
 11. Kim, G. Y., B. H. Song, K. A. Roh, S. Y. Hong, B. G. Ko, K. M. Shim, and K. H. So. 2008. Evaluation of green house 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.
 12. Kim, G. Y., H. C. Jeong, K. M. Shim, S. B. Lee, and D. B. Lee. 2011. Evaluation of N₂O emissions with different growing periods (spring and autumn seasons), tillage and no tillage conditions in a chinese cabbage field. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(6): 1239-1244.
 13. Kim, G. Y., S. I. Lee, J. S. Lee, H. C. Jeong, and E. J. Choi. 2018a. Evaluation of N₂O emissions by nutrient source in soybean and pepper fields. *Korean J. Environ. Biol.* 36(4): 680-686.
 14. Kim, S. U., C. Ruangcharus, H. H. Lee, H. J. Park, and C. O. Hong. 2018b. Effect of application rate of composted animal manure on nitrous oxide emission from upland soil supporting for sweet potato. *Korean J Environ Agric.* 37(3): 172-178.
 15. Lesschen, J. P., G. L. Velthof, W. Vries, and J. Kros. 2011. Differentiation of nitrous oxide

- emission factors for agricultural soils. *Environmental Pollution*. 159(11): 3215-3222.
16. Lee, S. I., G. Y. Kim, E. J. Choi, J. S. Lee, and H. C. Jung. 2017. Decreases nitrous oxide emission and increase soil carbon via carbonized biomass application of orchard soil. *Korean J. Environ Agric.* 36(2): 73-79.
 17. Lee, S. I., G. Y. Kim, E. J. Choi, J. S. Lee, and H. C. Jung. 2018. Reduction of carbon dioxide and nitrous oxide emissions through various biochars application in the upland. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*. 26(2): 11-18.
 18. Park, W. K., G. Y. Kim, S. I. Lee, J. D. Shin, H. Y. Jang, U. S. Na, and K.H. So. 2015. Effects of biomass application on soil carbon storage and mitigation of GHGs emission in upland. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 48(5): 340-350.
 19. Yagi, K. 1991. Emission of biogenic gas compounds from soil ecosystem and effect of global environment. 2. Methane emission from paddy fields. *Soil and Fert. Japan*. 62(5): 556-562.