Korean J. Soil Sci. Fert. Vol.55, No.2, pp.162-174, 2022

Korean Journal of Soil Science and Fertilizer

Article

https://doi.org/10.7745/KJSSF.2022.55.2.162
pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

Crop Growth and Nitrous Emission in Red Pepper Soils: Effects of Chemical Fertilizer and Livestock Manure Compost Treatments

Hyo-Jung Choi[1]*, Sang-Young Seo[2], Seon-Wu Choi[1], Chang-Kyu Lee[1], Min-Sil An[2], and Seok-In Yun[3]

[1]Researcher, Division of Agricultural Environment, Jeonbuk Agricultural Research and Extension Services, Ilksan 54591, Korea
[2]Senior Researcher, Division of Agricultural Environment, Jeonbuk Agricultural Research and Extension Services, Ilksan 54591, Korea
[3]Professor, Department of Life and Environmental Science, Wonkwang University, Iksan 54538, Korea

***Corresponding author:** soilchoi80@korea.kr

Received: May 19, 2022
Revised: May 30, 2022
Accepted: May 30, 2022

Edited by
Woo-Jung Choi,
Chonnam National University,
Korea

ORCID
Hyo-Jung Choi
https://orcid.org/0000-0002-0584-8006
Seok-In Yun
https://orcid.org/0000-0002-0456-9216

A B S T R A C T

Livestock manure compost (LMC) can be used as an alternative nitrogen source instead of chemical fertilizer in order to reduce nitrous oxide (N_2O) emission. To evaluate the effect of LMC on reducing N_2O emission, we cultivated red pepper by treating with no treatment (Con), chemical fertilizer (CF), and the powder (LMCPD) and pellet type (LMCPE) of livestock manure compost for two years, and analyzed N_2O emission and plant growth. The N_2O emissions were 5.6 and 5.5 kg N_2O ha^{-1} for the LMCPD and LMCPE treatments, respectively, which were lower by 48% than that of the CF treatment, 11.6 kg N_2O ha^{-1}. The yields of red pepper fruits of LMC treatments were 70.8 - 94.7% of that of CF treatment, but the yields were not significantly ($p > 0.05$) different between CF and LMC treatments. The lower yields of LMC treatment were attributable to deficiency of some other nutrients such as potassium (K) rather than nitrogen. Those results suggested that LMC can contribute more positively to reducing N_2O emission than to reducing red pepper yield.

Keywords: Chemical fertilizer, Crop growth, Greenhouse gas emission, Livestock manure

Emissions of nitrous oxide in soil after the first and second cultivations.

Treatments	N_2O emissions (kg ha^{-1})			GWP[†] (kg CO_2-eq. ha^{-1})		
	1st year	2nd year	Average	1st year	2nd year	Average
Con[‡]	2.4 c[§]	1.0 c	1.7 c	743 c	313 c	528 c
CF	18.5 a	4.6 a	11.6 a	5,735 a	1,440 a	3,588 a
LMCPD	7.2 b	4.0 ab	5.6 b	2,228 b	1,244 ab	1,736 b
LMCPE	8.8 b	2.3 b	5.5 b	2,724 b	702 b	1,713 b

[†]GWP (Global Warming Potential) means an index that measures how much each greenhouse gas affects global warming compared to carbon dioxide.
[‡]Con, no fertilization; CF, application with inorganic fertilizers; LMCPD, application with the power type of livestock manure compost; LMCPE, application with the pellet type of livestock manure compost.
[§]Mean values (n = 3), with different lowercase letters indicating significant difference at $p = 0.05$ by Duncan's multiple range test.

© The Korean Society of Soil Science and Fertilizer. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Introduction

농경지에서 배출되는 온실가스 중에 아산화질소 (N_2O)는 비료 사용과 함께 배출량이 증가해왔고, 이를 줄이려는 노력이 필요하다. 농경지에 사용한 질소질 비료가 아산화질소 농도 증가의 주요 원인이고 (Park et al., 2012), 농경지 토양은 연간 4.3 - 5.8 Tg N을 배출하고 있으며 이 수치는 지구 전체 N_2O 배출량의 23 - 31%에 해당한다 (Syakila and Kroeze, 2011). 또한 1990 - 2005년 사이에 화학비료 및 퇴비의 사용량 증가에 따라 대기 중 N_2O 배출량이 17% 증가하였다 (Flynn and Smith, 2010; Qin et al., 2012). 아산화질소는 지구온난화 지수가 이산화탄소에 비해 298배 높기 때문에 (Forster et al., 2007), 실제 배출량이 적음에도 불구하고, 지구온난화 및 온실효과에 크게 기여할 수 있다. 따라서 농경지 토양에서 N_2O 배출량을 저감시키기 위한 영농 방법에 대한 연구가 요구된다.

토양에 유기물을 투입할 경우 N_2O 발생량을 증가시킬 수도 있다 (Chantigny et al., 2010). 먼저, 아산화질소가 토양에서 배출되는 기작에는 토양 미생물이 관여하는 질산화 반응과 탈질 반응이 있다 (Venterea et al., 2015). 농경지에 유기물을 투입하면 질산화와 탈질 과정에 필요한 에너지원과 질소원이 증가하게 되고, 그 결과 두 과정에 관여하는 미생물 활성을 증가시킨다 (Granli and Bockman, 1994). 토양의 호기 조건에서는 유기태질소의 암모니아화 반응으로 암모늄태 질소 농도에 영향을 주고 그 결과 질산화 과정 및 아산화 질소 방출에 영향을 주게 된다. 토양의 혐기 조건에서는 유기물에 의한 토양환원상태 발달에 기여하고 그 결과 탈질 반응을 가속시킬 수 있다.

미생물에 의한 아산화질소 생성 및 배출은 토양의 무기태 질소량뿐만 아니라 토양의 통기성, 온도, 수분 등 여러 환경 요인의 영향을 받는다 (Lin et al., 2017). 또한, 아산화질소는 연간 변동이 크게 나타나는 경우가 많고, 이는 화학 비료의 종류, 토지이용 형태, 기상환경 변동 등 여러 요인이 관여하기 때문이다 (Scheer et al., 2008). 여러 측면의 환경이 아산화질소 배출량 산정에 영향을 줄 수 있기 때문에 실험 반복을 통해 환경 인자의 변동과 아산화질소 배출 변화의 관계를 도출해 내는 것이 필요하다 (Hyun et al., 2017). 하지만 아직까지 국내에서 퇴비 투입에 따른 아산화질소의 2년 이상의 연간 배출 변동을 보고하고 분석한 사례는 많지 않다.

향후 농경지, 특히 밭토양에서 N_2O 발생량 저감을 위한 영농방법 개발을 위해서는 비료 종류별 사용량에 따른 N_2O 발생량에 대한 정확한 평가가 이루어져야 한다. 이에 본 연구에서는 동일한 농경지에 동일한 종류 및 양의 퇴비를 2년 연속 투입하였을 때에 연간 아산화질소 배출량의 변동을 파악하기 위해 실외 포장실험을 실시하였다. 고추 재배 밭 토양에서 질소 비료의 시용이 온실가스 배출 저감 및 고추 생산성 향상에 미치는 영향을 평가하기 위해 질소비료별 (화학비료와 가축분퇴비) 시용에 따른 1) 고추의 수량 및 생육 특성과 2) 토양특성변화를 조사하고, 3) 온실가스로서 아산화질소 배출량을 평가하여, 고추 생산성을 유지시키면서 온실가스 배출량을 줄일 수 있는 합리적인 시비 방법을 제시하고자 한다.

Materials and Methods

공시토양 및 재료특성 본 연구를 수행하기 위해 전북 익산시 신흥동에 소재하는 전북농업기술원 원내 시험포장 밭토양 (35°56'23.6"N 126°59'26.9"E)을 공시토양으로 선정하였다. 대상지역의 토양은 부용통에 속하며, 점토 함량은 11.7%, 실트는 31.3%, 모래는 57.0%로 사양토이다. 토양 pH는 7.1이었으며 총질소 함량은 0.24%이었다. 자세한 공시토양의 화학적 특성은 Table 1에 나타냈다. 공시퇴비는 돈분과 계분 및 톱밥을 원료로 하여 부숙한 가축분 퇴비이고, 분상 (powder)형태와 입상 (pellet)형태로 시중에서 구입하여 시험에 사용하였으며, 자세한 화학적 특성은

Table 2에 나타냈다.

Table 1. Physical and chemical properties of soil used in the experiment.

Parameter	Before	After cultivation			
		Con†	CF	LMCPD	LMCPE
Sand (%)	57.0				
Silt (%)	31.3				
Clay (%)	11.7				
Soil texture	Sandy loam				
Porosity (%)	56.5	55.4	55.8	56.1	56.5
Bulk density (Mg m^{-3})	1.15	1.18	1.17	1.16	1.15
$pH_{1:5}$	7.1	6.8	6.1	6.4	6.4
EC (dS m^{-1})	0.8	0.8	3.7	2.3	2.5
Organic matter (g kg^{-1})	29.0	32.9	30.6	38.7	37.8
Total C (g kg^{-1})	17.1	19.1	17.8	22.4	21.9
Total N (g kg^{-1})	2.4	2.0	2.5	2.9	2.6
C/N ratio	7.9	8.7	7.0	7.8	7.9
Available P_2O_5 (mg kg^{-1})	302	236	256	402	333
Exchangeable K ($cmol_c$ kg^{-1})	0.9	0.4	3.6	0.6	1.8
Exchangeable Ca ($cmol_c$ kg^{-1})	8.5	12.6	9.8	13.2	12.0
Exchangeable Mg ($cmol_c$ kg^{-1})	2.1	2.8	2.6	3.8	3.2

†Con, no fertilization; CF, application with inorganic fertilizers; LMCPD, application with the power type of livestock manure compost; LMCPE, application with the pellet type of livestock manure compost.

Table 2. Nutrient content of livestock manure compost used in the experiment.

	Compost type	N (%)	P_2O_5 (%)	K_2O (%)	Mg (%)	CaO (%)
1st year	Powder	0.9	0.8	3.4	-	-
	Pellet	1.3	1.1	4.5	-	-
2nd year	Powder	1.9	1.3	1.8	1.3	3.2
	Pellet	2.9	2.3	2.7	1.4	4.0

시험 처리구 및 재배관리 각 처리구의 크기는 3 × 4 m이고, 3반복으로 난괴법에 따라 처리구를 배치하였으며, 경운로터리 실시와 함께 두둑을 설치하였다. 시험에 사용된 재배작물은 고추 (*Capsicum annuum*)로 품종은 '큰사랑'이고, 재식거리는 이랑폭 100 × 포기사이 35 cm였으며, 각 시험구당 30주를 재배하였다. 1년차의 경우 2020년 5월 4일에 모종을 삽식하였고, 2020년 8월14일, 8월 28일, 9월11일 등 3회에 걸쳐 고추를 수확하였다. 2년차의 경우 2021년 5월 4일에 모종을 삽식하였고, 2021년 7월 29일부터 8월 20일까지 1주일 간격으로 4회에 걸쳐 고추를 수확하였다. 토양수분 관리는 관수시설을 이용한 관수와 자연 강우로 하였다. 실험기간 동안 일 강수량, 일 평균온도 등의 기상자료는 농진청 농사로 농업 기술 포털 시스템의 농업 기상정보 서비스 (농업날씨365, http://weather.rda.go.kr)를 참고하였으며, 관측 장소는 전라북도 익산시 함열읍으로 설정된 데이터를 사용하였다. 시험기간의 평균기온은 20.6°C로 평년 (22.5°C)보다 다소 낮았고, 강수량은 1,011 mm로 평년 기록인 1,444 mm의 70% 수준이었다 (Fig. 1).

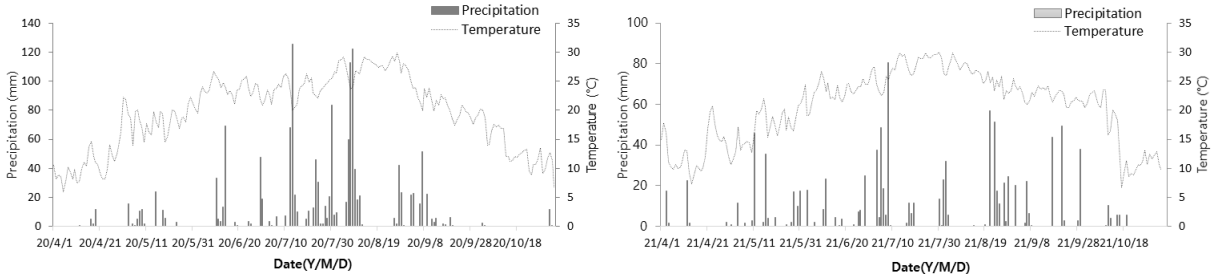

Fig. 1. Changes in mean daily air temperature and precipitation during red pepper cultivation.

처리내용 가축분 퇴비는 고추의 인산 표준시비량 (RDA, 2010)인 11.2 kg P_2O_5 $10a^{-1}$를 기준으로 전량 밑거름 처리하였고, N 및 K_2O 부족량은 화학비료를 이용하여 밑거름과 웃거름으로 시용하였다. 1차년도 밑거름은 5월 6일, 웃거름은 6월 19일, 7월 17일, 8월 18일이었으며, 2차년도 밑거름은 4월 6일, 웃거름은 5월 26일, 6월 24일, 7월 26일이었다. 화학비료는 고추 표준시비량 (RDA, 2010)에 준하여 질소-인산-칼리 (19.0-11.2-14.9 kg $10a^{-1}$)를 시비하였다. 가축분 퇴비는 고추 정식 4주 전에 시용하였고, 무기질비료는 고추 정식 1일 전에 시비하였다.

챔버 설치 및 N_2O 가스 채취 고추작물의 N_2O 포집 방법은 비정체형, 밀폐형 챔버법을 적용하였고 (Hutchinson and Livingston, 1993), 챔버는 면적이 0.05 m^2로 지름 0.25 m, 높이 0.45 m인 아크릴 소재로 제작하였다. 챔버는 두둑 상단 작물과 작물 사이의 지표면에서 약 10 cm 깊이로 삽입하여 뿌리의 활착과 토양 수분 이동의 제한을 최소화하였고, 처리구마다 3반복으로 설치하였다. N_2O 분석은 포집한 기체를 실험실에서 μECD (micro-electron capture detector)검출기가 내장된 기체크로마토그래피 (7890B GC, Agilent, USA)로 분석하였다. 설치된 챔버는 가축분 퇴비 처리전 시험 토양의 기본 N_2O 배출량을 확인하기 위해서 시험전 토양에 각 반복 구간을 대표할 수 있는 곳에 챔버 설치 후 가스 시료를 채취 하였다. 챔버는 각 처리구 두둑의 정중앙에 1개의 챔버를 설치하였으며 1주 간격으로 N_2O 배출량을 측정하였다. 재배기간 동안에는 챔버 안에 식물체가 자라지 않게 하였다. 챔버 설치 후 매주 1회 간격으로 N_2O 배출량을 측정하였으며, 기비 (가축분퇴비, 화학비료) 처리 후에는 아산화질소 방출량의 변동이 큰 것을 감안하여 주 3회 시료를 채취하였다. 가스 시료채취는 오전 9:00부터 오후 12:00 사이에 실시하였고 (Cosentino et al., 2012), 가스채취 시간은 0, 40분으로 하였으며, 가스 시료채취 시작 전, 후에 대기 중 가스시료도 채취하였다. 또한 포집 후에는 챔버 덮개를 개방해 두었다. 가스 시료채취 시 각 처리구의 챔버 내 온도와 토양수분은 디지털 펜타입 온도계 (SDT-312, SUMMIT)와 이동형 토양 수분센서 (PMS-714, LUTRON)를 이용하여 측정하였다. 대기 중 N_2O의 농도는 가스크로마토그래피 (7890B, Agilent, USA)로 분석하였고, 검출기는 μECD를 활용하였다 (Table 3). 가스크로마토그래피 분석에 따라 정량된 N_2O는 아래 Eq. 1에 따라 플럭스를 계산하였다.

$$F = p \times h \times \Delta c / \Delta t \times 273 / T \qquad \text{(Eq. 1)}$$

F는 단위시간 당 단위면적에 배출되는 N_2O의 양, p는 가스밀도 (mg m^{-3}, p_{N_2O} = 1.96), h는 챔버의 유효높이 (m), $\Delta c / \Delta t$는 챔버 내 가스농도의 평균 증가속도 (mg m^{-3} hr^{-1}), T는 챔버 내 평균기온 (K)을 의미한다.

Table 3. Operating condition of gas chromatography for the measurement of N_2O.

Parameter		Operating condition
GC		Agilent 7890B
Detector		μECD
Column		1/8" × 1.83 m, Hayesep Q columns
Carrier gas		CH_4 5.0%/Ar
Calibration gas		0.3, 0.7, and 1.0 ppmv N_2O in N_2
Temperature	Column	60°C
	Detector	350°C
Loop		2 mL
Retention time		8.3 min

토양특성 및 고추 생산성 평가 고추 모를 포장에 정식한 후 90일에 고추를 수확하였고, 작물 제거 및 정지작업을 한 후 토양시료를 채취하였다. 토양 오거를 이용하여 15 cm 깊이로 각 처리구의 5지점에서 채취하여 하나로 썩어 시료를 만들었다.

토양 분석은 농촌진흥청 토양 및 식물체 분석법 (RDA, 2000)과 토양화학 분석법 (RDA, 2010)에 준하여 수행하였다. 채취한 토양은 풍건 후 2 mm 체로 거른 후 분석에 이용하였다. 토성은 비중계법으로 입자밀도를 조사하고, 판정은 미국 농무부 분류기준에 준하였다 (Gee and Bauder, 1986). 토양 pH는 토양과 증류수의 비율을 1:5로 하여 침출한 후 pH 측정기 (Orion3 star, Thermo Scientific, Singapore)를 이용하여 측정하였다. 토양 혼탁액은 pH를 측정 후 거름종이를 이용하여 거른 후 전기전도도 (EC) 측정기 (PW 9509/20, Philips, GT Britain)를 이용하여 EC를 측정하였고, 여기에 5를 곱하여 포화침출액 기준으로 환산하였다. 토양유기물은 Tyurin법, 토양의 유효인산 함량은 Lancaster법, 교환성 양이온은 1 M NH_4OA_C (pH 7.0) 완충용액으로 침출하여 유도결합플라즈마 분광광도계 (ICP-OES, Integra Dual, GBC, Australia)로 측정하였으며, T-N과 T-C는 원소분석기 (Vario max cube, Elementar, Germany)로 분석하였다.

고추 생산성으로 건물중은 수확한 후 70°C 오븐에서 72시간 이상 건조하여 측정하였다. 생육특성 조사는 고추 정식 후 30일, 60일에 초장, 절간길이, 분지수, 엽색 (SPAD) 및 건물중을 측정하였고, 고추과실은 정식 후 60일 이후 20일 간격으로 수확하여, 즉시 각 처리별로 구분하여 무게를 측정하고 생산량을 산출하였고, 각 처리구에서 수확한 작물은 하나로 묶어서 3개의 시료를 만든 후 3반복으로 분석에 이용하였다.

통계분석 질소원 종류별 고추의 생산량과 아산화질소 배출량에 관해 각 처리구 사이의 유의적인 차이를 비교하기 위하여 R 프로그램 (R i368 4.0.0 <The R Foundation, Vienna, Austria>)을 이용하여 통계분석 하였다. 처리 간 차이에 대한 유의성은 5%의 유의수준에서 Duncan의 다중검정 (Duncan's multiple range test)을 이용하여 분석하였다.

Results and Discussion

시비 종류에 따른 토양 특성의 변화 고추를 재배한 토양의 탄소 함량은 재배 전과 비교하여 점차 증가하는 경향을 보였다 (Table 4). 재배 전 토양의 탄소 함량은 17.1 g kg^{-1}이었으나, 1년 재배 후에 18.0 - 19.0 g kg^{-1}으로 증가하

였고, 2년 재배 후에 17.8 - 22.4 g kg^{-1}의 범위로 증가하였다. 무처리구 및 화학비료 처리구에서도 토양 탄소 함량이 증가하는 경향을 보였는데 이는 작물 재배 따른 지상부 및 지하부 작물 잔재물의 공급 효과로 판단된다. Oh and Kim (2013)의 연구에서도 유기질 비료를 시비하지 않더라도 다른 요인들에 의해 토양 유기물 함량이 증가할 수 있음을 언급하였다. 유기질 비료로 가축분 퇴비를 처리하였을 때에는 2년차 재배 후에 그 효과가 뚜렷하게 나타났고, 화학비료 처리구에 비해 LMCPD에서 25.8%, LMCPE에서 23.0% 유의적으로 ($p < 0.05$) 증가하였다. 가축분 퇴비 처리구의 경우 작물 잔재물 공급뿐만 아니라 유기물 공급 효과가 더해져 더욱 뚜렷하게 나타났다고 판단된다. 토양의 질소 함량은 1년차 재배까지 처리 전후 유의적인 차이가 없었고, 2년차 재배에서 처리간에 유의적인 변화를 보였다 (Table 4). 2년 재배 후 토양의 질소 함량은 재배전과 비교하여 무처리구 (Con)에서 낮아졌고, CF 처리구에서는 큰 변화가 없었다. 반면에 가축분퇴비 처리구에서는 재배전과 비교하여 2년차에 크게 증가하였고, 재배 전과 비교하여 LMCPD에서 21%, LMCPE에서 8% 증가하였으며, CF 처리구와 비교하여 LMCPD에서 16%, LMCPE에서 4% 증가하였다. 가축분 퇴비의 경우 유기물 분해가 느리게 진행되는 것을 반영하였고 (Yun et al., 2007), 또한 분해되지 않은 유기물이 잔류하거나 미생물에 의해 부동화된 탄소와 질소가 잔류한 것이 반영된 결과라고 판단된다.

Table 4. Concentration of total C and N in soil before the cultivation and after the first and second cultivations.

Treatments	Total C (g kg^{-1})			Total N (g kg^{-1})		
	Before	1st year	2nd year	Before	1st year	2nd year
Con†	17.1	18.5 a‡	19.1 b	2.4	2.3 a	2.0 c
CF		19.0 a	17.8 b		2.3 a	2.5 b
LMCPD		18.0 a	22.4 a		2.2 a	2.9 a
LMCPE		18.9 a	21.9 a		2.3 a	2.6 b

†Con, no fertilization; CF, application with inorganic fertilizers; LMCPD, application with the power type of livestock manure compost; LMCPE, application with the pellet type of livestock manure compost.
‡Mean values (n = 3), with different lowercase letters indicating significant difference at $p = 0.05$ by Duncan's multiple range test.

토양 화학성은 고추 재배 후 비료 처리에 따라 인자별로 다른 경향의 변화를 보였다 (Table 1). 토양 pH는 화학비료 처리구에서 6.1로 가장 크게 낮아졌고, 가축분 퇴비 처리구에서도 6.4로 무처리구 (6.8)보다 낮았다. 토양의 염농도 (EC, 전기전도도)는 재배전 (0.8 dS m^{-1}) 및 무처리구 (0.8 dS m^{-1})와 비교하여 화학비료 처리구 (3.7 dS m^{-1})와 가축분 퇴비 처리구 (2.3 - 2.5 dS m^{-1}) 모두 증가하였다. 토양 유효인산의 경우 무처리구에 비해 화학비료 처리구에서는 변화가 없었으나, 가축분 퇴비 처리구에서 1.4 - 1.7배 증가되었다. 이는 퇴비시용이 근권 주위에 많은 미생물이 서식하게 하면서 불용화된 인산을 더 가용화 시킬 수 있었던 것으로 판단된다 (Sharma et al., 2013). 토양 내 유기물 함량의 경우 무처리구 (32.9 g kg^{-1}) 대비 CF 처리구에서 감소된 것을 확인할 수 있었으나 (30.6 g kg^{-1}), LMCPD 및 LMCPE에서는 각각 38.7, 37.8 g kg^{-1}을 보여 다소 증가되는 경향을 보였다. 토양 내 전기전도도와 유기물함량의 경우 가축분 퇴비 처리구에서 유사하게 증가한 것은 가축분 퇴비가 유기질 및 무기질 성분이 복합적으로 구성되어 있고, 질소, 인산, 칼리 이외에도 여러 종류의 염류가 많이 포함되어 있기 때문에 유기물 함량과 전기전도도를 증가시키는 요인이 될 수 있다 (Chun et al., 2021). 이를 반영하여 재배 후 가축분퇴비 처리구에서 교환성 양이온 (Ca, Mg)함량이 각각 13.2, 3.8 $cmol_c$ kg^{-1}로 나타나 재배 전 토양과 비교하여 각각 60, 80% 증가하였다 (Table 1).

비료를 시비하여 2년 동안 고추를 재배한 토양의 물리적 성질은 무처리구 (Con)와 비교하여 유의적인 변화가 없었다 (Table 5). 전체 처리구의 작물 재배 전후 토양 전용적 밀도는 1.11 - 1.18 Mg m^{-3}의 범위였고, 시기 및 처리별 유의적인 변화는 없었다. 또한 공극률도 전체 처리구의 작물 재배 전후 55.4 - 57.9%로 시기 및 처리별 유의적인 변화가 없었다.

Table 5. Changes of bulk density and porosity in soil before the cultivation and after the first and second cultivations.

Treatments	Bulk density (Mg m^{-3})			Porosity (%)		
	Before	1st year	2nd year	Before	1st year	2nd year
Con†	1.15	1.17 a‡	1.18 a	56.5	55.9 a	55.4 a
CF		1.11 a	1.17 a		57.9 a	55.8 a
LMCPD		1.16 a	1.16 a		56.2 a	56.1 a
LMCPE		1.13 a	1.15 a		57.4 a	56.5 a

†Con, no fertilization; CF, application with inorganic fertilizers; LMCPD, application with the power type of livestock manure compost; LMCPE, application with the pellet type of livestock manure compost.
‡Mean values (n = 3), with different lowercase letters indicating significant difference at p = 0.05 by Duncan's multiple range test.

시비 종류에 따른 고추 생육 및 생산성 평가 비료를 시비한 처리구에서 고추의 전반적인 생육은 무처리구 (Con)와 비교하여 개선되었고, 화학비료 처리구 (CF)와 비교하여 유의적인 차이는 없었다 (Table 6). 또한 가축분 퇴비 분상 (LMCPD)와 가축분 퇴비 입상 (LMCPE) 사이에 유의적인 차이는 없었지만, LMCPD 처리구에 비해 LMCPE 처리구에서 다소 생육이 낮은 경향을 보였다. 1년차 고추 과실의 수확량은 화학비료 (CF) 처리구와 가축분 퇴비 처리구

Table 6. Growth characteristics of red pepper plants at 30 and 60 days after transplanting.

Treatments	30 DAT†			60 DAT			
	Plant height (cm)	Stem diameter (mm)	No. of stem (No. $plant^{-1}$)	Plant height (cm)	Stem diameter (mm)	No. of stem (No. $plant^{-1}$)	Fruit yield (kg $10a^{-1}$)
1st year							
Con‡	58.0 c§	6.8 c	10.2 b	102.8 b	12.7 a	54.1 c	1,023 b
CF	67.0 a	8.1 a	14.6 a	109.5 a	13.8 a	64.4 ab	1,814 a
LMCPD	64.8 ab	7.7 ab	14.8 a	108.0 ab	13.9 a	63.8 ab	1,548 a
LMCPE	63.6 b	7.2 b	14.2 a	107.1 ab	13.7 a	66.8 a	1,600 a
2nd year							
Con	38.4 c	4.8 c	3.7 b	75.1 c	12.9 b	38.7 c	1,022 b
CF	47.8 b	6.5 a	6.2 a	93.9 a	16.3 a	61.9 a	2,392 a
LMCPD	49.7 a	6.8 a	6.2 a	90.9 b	16.2 a	58.4 ab	2,271 a
LMCPE	41.9 c	5.5 b	4.0 b	84.9 c	15.1 a	54.1 b	1,851 a

†DAT, days after transplanting.
‡Con, no fertilization; CF, application with inorganic fertilizers; LMCPD, application with the power type of livestock manure compost; LMCPE, application with the pellet type of livestock manure compost.
§Mean values (n = 3), with different lowercase letters indicating significant difference at p = 0.05 by Duncan's multiple range test.

사이에 유의적인 차이가 없었지만, CF 처리구에 비해 LMCPD 처리구에서 17.2% 낮았고, LMCPE 처리구에서 13.4% 낮았다. 2년차에서도 유의적인 차이는 없었지만, CF 처리구에 비해 LMCPD 처리구에서 5.3% 낮았고, LMCPE 처리구에서 29.2% 낮았다. 가축분 퇴비의 경우 느린 분해속도로 인해 (Yun et al., 2007), 유효한 양분의 공급 효과가 화학비료보다 낮아 작물 증수 효과가 다소 낮았지만, 가축분 퇴비의 종류에 따라 70.8 - 94.7% 수준으로 화학비료를 대체할 수 있음을 보여주었다.

식물체 질소 함량은 재배 연차별로 다른 경향을 보였고, 작물 생육을 반영하지는 않았다. 1차 재배에서 무처리구 (21.6 g kg^{-1})에 비해 비료 처리구 (24.2 - 27.9 g kg^{-1})에서 질소 함량은 증가하였고, 화학비료 처리구와 분상형의 가축분 퇴비 (LMCPD) 처리구 사이에 유의적인 차이가 없었으며 (Table 7), 고추 수량 변화와 일치하지는 않았다. 또한 2차 재배에서는 유의적인 차이는 없었지만, 입상형의 가축분 퇴비 (LMCPE) 처리구의 작물 질소 함량이 화학비료 처리구보다 높았고, 고추 수량 변화와 반대의 경향을 보였다. 따라서 작물 수량에 질소 이외의 다른 인자가 영향을 주었다고 판단된다.

Table 7. Concentrations of total C and N in plants after the first and second cultivations.

Treatments	Total C (g kg^{-1})		Total N (g kg^{-1})	
	1st year	2nd year	1st year	2nd year
Con†	415 a‡	415 a	21.6 c	20.6 a
CF	422 a	413 a	27.9 a	21.9 a
LMCPD	404 a	413 a	26.2 a	21.9 a
LMCPE	410 a	406 a	24.2 b	22.3 a

†Con, no fertilization; CF, application with inorganic fertilizers; LMCPD, application with the power type of livestock manure compost; LMCPE, application with the pellet type of livestock manure compost.
‡Mean values (n = 3), with different lowercase letters indicating significant difference at p = 0.05 by Duncan's multiple range test.

가축분 퇴비의 경우 전반적으로 토양 물리화학성이 화학비료 처리구에 비해 개선되거나 비슷한 수준을 보였다. 그러나 교환성 K의 경우 화학비료 처리구 (3.6 $cmol_c$ kg^{-1})에 비해 LMCPD (0.6 $cmol_c$ kg^{-1})와 LMCPE 처리구 (1.8 $cmol_c$ kg^{-1})에서 낮았고 (Table 1), 이는 특정 양분 부족에 의한 불균형 문제가 해소된다면 고추 생산성을 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한 토양 염농도가 높을 경우 작물 생육에 부정적 영향을 줄 수 있지만, 본 연구에서 화학비료 처리구에 비해 가축분 퇴비 처리구의 토양 염농도가 낮았기 때문에 가축분 퇴비에서의 염류 피해는 없었다고 판단된다.

N_2O 일일 배출량 및 누적 배출량 시험 기간 동안의 아산화질소 배출량은 질소질 비료 시비에 따라 크게 증가하다 점차 감소하는 경향을 보였다 (Fig. 2). 질소질 비료를 시용한 처리구에서 아산화질소 배출량은 밑거름을 처리한 후 약 2주간 매우 높은 농도를 보이다가 점차 감소하는 경향을 보였고, 웃거름으로 화학비료를 시비할 때마다 배출량이 일시적으로 증가하다 감소하는 양상을 나타내었다. 질소질 비료를 시비할 경우 토양 무기태 질소를 증가시켜 질산화 반응 또는 탈질 반응이 활발하게 일어날 수 있고, 그 결과 아산화질소 방출 증가에 영향을 준 결과이다 (Venterea et al., 2015). 1차 재배기간 동안 아산화질소의 누적 배출량은 Con, CF, LMCPD, LMCPE 처리구에서 각각 32.8, 296.9, 118.4, 147.7 mg m^{-2}였고 (Fig. 3), LMCPD와 LMCPE 처리구에서 아산화질소 발생량이 CF보다 각각 40%와 50%

수준으로 낮았다. 또한 2차 재배기간 동안 아산화질소의 누적 배출량은 Con, CF, LMCPD, LMCPE 처리구에서 각각 15.4, 79.4, 68.1, 38.1 mg m^{-2}이었고, LMCPD와 LMCPE 처리구에서 아산화질소 발생량은 CF보다 각각 86%와 48% 수준으로 감소했다. 가축분 퇴비의 형태별 (분상 또는 입상) 일관된 경향은 없었으나, 화학비료 처리구에 비해 아산화질소 배출량이 크게 감소하였다. 1차 및 2차 재배 동안에 아산화질소 방출량의 평균값은 Con, CF, LMCPD, LMCPE 처리구에서 각각 1.7, 11.6, 5.6, 5.5 kg ha^{-1}이었고, 지구온난화잠재능 (GWP)로 환산할 경우 각각 528, 3,588, 1,736, 1,713 kg CO_2-eq ha^{-1}이었다 (Table 8).

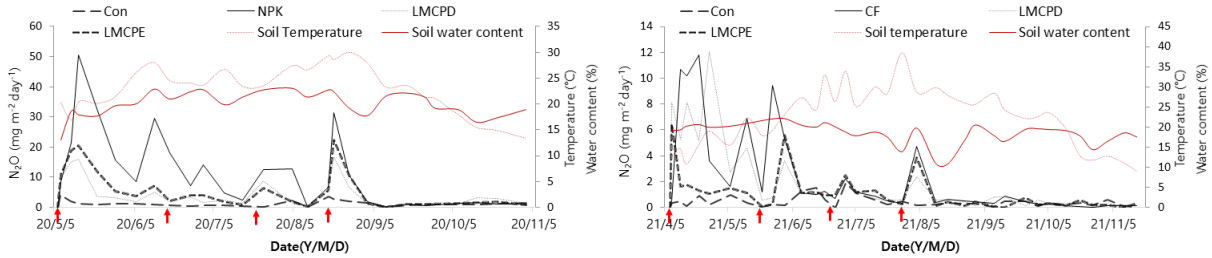

Fig. 2. Changes in average daily nitrous oxide emissions during red pepper cultivation. The arrows indicate the application of the inorganic or organic fertilizers.

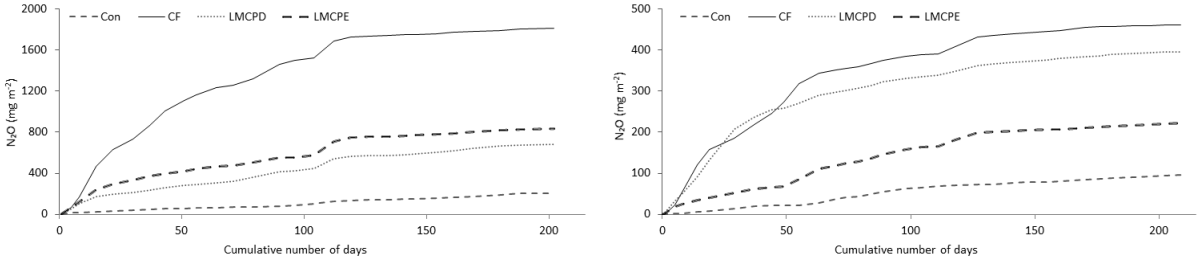

Fig. 3. Cumulative emissions of nitrous oxide during red pepper cultivation.

Table 8. Emissions of nitrous oxide in soil after the first and second cultivations.

Treatments	N_2O emissions (kg ha^{-1})			GWP† (kg CO_2-eq. ha^{-1})		
	1st year	2nd year	Average	1st year	2nd year	Average
Con‡	2.4 c§	1.0 c	1.7 c	743 c	313 c	528 c
CF	18.5 a	4.6 a	11.6 a	5,735 a	1,440 a	3,588 a
LMCPD	7.2 b	4.0 ab	5.6 b	2,228 b	1,244 ab	1,736 b
LMCPE	8.8 b	2.3 b	5.5 b	2,724 b	702 b	1,713 b

†GWP (Global Warming Potential) means an index that measures how much each greenhouse gas affects global warming compared to carbon dioxide.

‡Con, no fertilization; CF, application with inorganic fertilizers; LMCPD, application with the power type of livestock manure compost; LMCPE, application with the pellet type of livestock manure compost.

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

질소 함량이 높은 질소원은 토양 중의 무기태질소 함량을 높여 아산화질소 배출량을 증가시킬 수 있다. 본 연구에서는 질소기준으로 처리구별 시비량을 동일하게 처리하였기 때문에, 질소원 종류 및 형태에 따라서 무기화되는 속도를 비교할 수 있었다. 화학비료 처리구의 경우 빠른 무기화 반응으로 인해 무기태 질소 농도를 크게 증가시켜 그 결과 질산화 및 탈질 과정, 그리고 용탈에 의한 질소 손실의 기회가 커지고 (Kim et al., 2020), 그 결과 오히려 작물의 질소 흡수량이 본 연구 결과에서처럼 유기질 비료 처리에 비해 높지 않을 수도 있다 (Table 7). 반면에 가축분 퇴비 처리구의 경우 서서히 유기물이 분해되면서 무기태 질소가 공급되기 때문에 (Yun et al., 2007) 식물 혹은 미생물이 이용하기 쉬운 형태의 질소 공급을 더 오랫동안 지속할 수 있다. 그 결과 아산화질소 방출에 의한 질소 손실이 적게 나타났고 (Fig. 3), 또한 무기화되는 질소양이 화학비료에 비해 적음에도 불구하고 작물의 질소 흡수량이 화학비료 수준만큼 높았다고 판단된다 (Table 7). 특히 충분히 부숙된 퇴비의 유기물은 미생물에 대한 저항성을 가져 분해가 천천히 일어나고 (Yun et al., 2007), 작물생육 후기까지 무기태 질소를 서서히 공급하면서 아산화질소 배출량도 감소시킬 수 있다.

가축분퇴비의 입자 형태에 따른 1차, 2차 재배별로 반대의 양상을 보여 일관된 특성을 보이진 않았다. 유기물의 무기화속도는 입자표면적과 미생물 접근성의 영향을 받을 수 있지만 (Jastrow, 1996), 가축분 퇴비의 입자 형태 (입상, 분상) 차이에 의한 영향은 적었다고 판단된다. 단지, 가축분 퇴비를 밑거름으로 시비할 때 N_2O 배출량의 증가 및 입자 형태 별 차이는 가축분 퇴비 내에 존재하고 있었던 무기태 질소에 의한 것으로 사료된다. Kim et al. (2018) 연구에서 밭토양에 가축분퇴비 처리량을 증가시키면 아산화질소 배출량이 증가한다고 보고하였고, 이는 퇴비 내 암모늄이온의 함량과도 높은 상관관계가 있다고 하였다. 따라서 가축분 퇴비의 형태보다는 초기 존재하는 암모늄태 질소의 양이 더 큰 영향을 줄 것으로 판단된다.

본 연구에서 아산화질소의 배출은 년차별로 변동이 크게 나타났고 (Figs. 2, 3), 이는 주로 기상 인자와 토양 내 잔존 무기태 질소에 의해 영향을 받는다. 또한 유기태 질소의 무기화율은 토양의 통기조건, 수분조건 등의 영향을 받는다. 예를 들어, 토양 수분 함량의 변화는 토양의 통기성과 산화환원전위에 영향을 주고, 호기 조건에서 질산화작용이 촉진되고 혐기 조건에서 탈질 반응이 증가하여 (Davidson, 1991), 이들 반응에 의해 서로 다르게 아산화 질소 방출에 영향을 준다. 본 연구에서 아산화질소 배출량과 토양 수분 및 온도 사이의 회귀 분석을 한 결과, 1차 및 2차 재배에서 각각 0 - 10%, 1 - 17%로 낮은 상관성을 보였고, 통계적 유의성도 없었다 (Figs. 4, 5). 선행 연구에 따르면 아산화질소 배출량은 무기태 질소의 함량, 토양 온도와 수분 함량 등에 의해 복합적으로 영향을 받는다고 하였다 (Mosier et al., 1998;

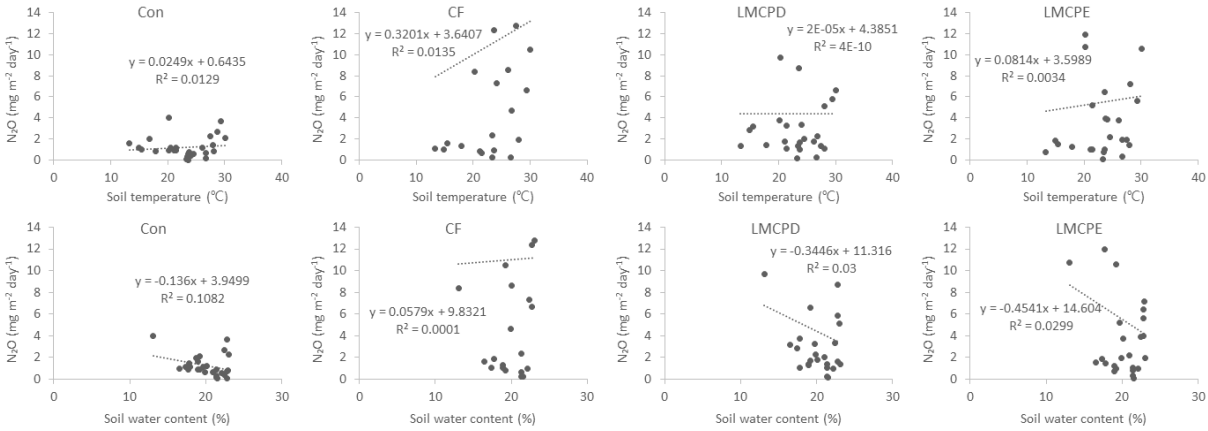

Fig. 4. Correlations between N_2O emissions and soil temperature and water content in red pepper field in 2020.

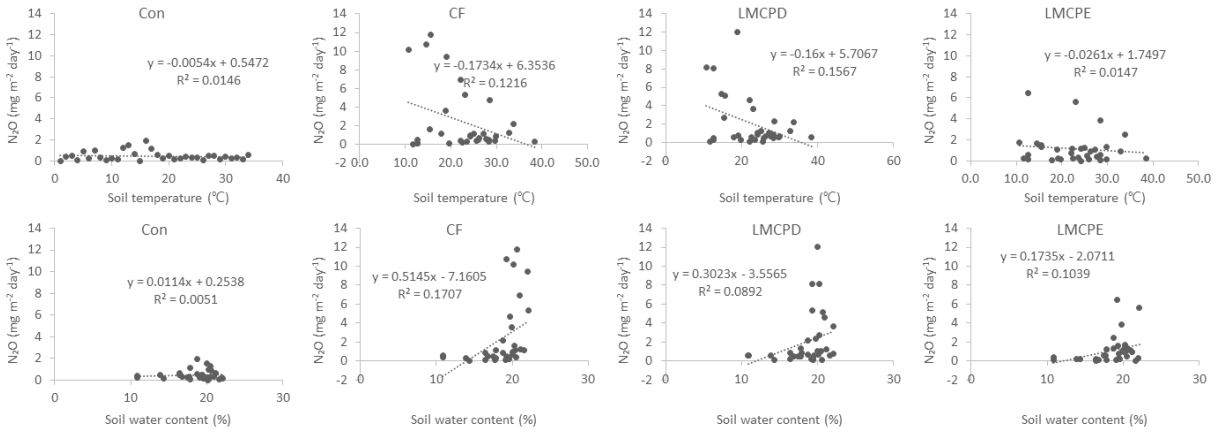

Fig. 5. Correlations between N_2O emissions and soil temperature and water content in red pepper field in 2021.

Kim et al., 2008; Yang et al., 2012). Arone and Bohlen (1998)은 N_2O 배출량과 토양 수분함량은 서로 정의 상관관계가 있다고 보고하였고, Dobbie and Smith (2003)는 N_2O 배출량이 조사지역과 기후 차이에 관계없이 토양수분과 밀접한 관계가 있다고 보고하였다. 또한 Frolking et al. (1998)과 Parton et al. (1996)은 토양수분을 조절하여 N_2O 배출을 줄일 수 있다고 하였다. 그러나 본 연구에서는 N_2O 배출과 토양온도 및 토양수분과의 관계에서 20% 미만의 낮은 상관관계가 나타났다. 이는 Fig. 2에 제시된 결과처럼 아산화질소 방출에 대한 비료 시비의 영향이 크게 나타났고, N_2O 배출에 대한 비료공급의 효과를 제거할 수 없었기에 기상환경 및 토양 온도·수분 함량의 영향을 도출하기에는 한계가 있다고 판단된다. 또한 재배기간의 후반기는 강수량이 높아졌더라도 아산화질소 배출이 전혀 증가하지 않았는데, 본 연구에서 측정하진 않았지만 이는 이용할 수 있는 무기태 질소 함량이 낮았기 때문이라고 판단된다.

Conclusions

온실가스 배출에 대한 가축분퇴비의 효과를 평가하기 위해, 화학비료, 분상과 입상 형태의 가축분 퇴비를 처리하여 2년에 걸쳐 고추를 재배하였고 아산화질소 배출량 및 작물 생산성을 분석하였다. 화학비료 처리구의 아산화질소 배출량은 11.6 kg N_2O-N ha^{-1}이었고, 가축분 분상퇴비와 가축분 입상퇴비 처리구의 아산화질소 배출량은 각각 5.6와 5.5 kg N_2O ha^{-1}로 화학비료 처리 대비 온실가스 배출을 평균 48% 줄였다. 고추 수확량은 화학비료와 가축분 퇴비 처리구 사이에 유의적인 차이는 없었지만, 가축분 퇴비 처리구에서 화학비료 처리구의 70.8 - 94.7% 수준이었고, 이는 질소 이외에 다른 영양 성분의 부족에 따른 결과라고 판단된다. 본 연구결과는 작물 수량 변동과 아산화질소 방출량 변동을 비교하였을 때 화학비료에 비해 가축분 퇴비의 아산화질소 방출 저감 효과가 더 컸음을 보여주었다. 또한 가축분 퇴비에서 질소 이외에 다른 양분의 균형을 조절할 경우 아산화질소 방출 감소와 함께 작물 수확량 증가도 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This work was carried out by the support of Jeollabuk-do Agricultural Research and Extension services, Republic of Korea.

References

Agricultural Weather Information Service. http://weather.rda.go.kr

Arone, J.A. and P.J. Bohlen. 1998. Stimulated N_2O flux from intact grassland monoliths after two growing seasons under elevated atmospheric CO_2. Oecologia 116:331-335.

Chantigny, M.H., P. Rochette, D.A. Angers, S. Bittman, K. Buckely, D. Masse, G. Belanger, N. Eriksen-Hamel, and M.O. Gasser. 2010. Soil nitrous oxide emissions following band-incorporation of fertilizer nitrogen and swine manure. J. Environ. Qual. 39(5):1545-1553.

Chun, H.C., S. Lee, D.H. Gong, K.Y. Jung, H.J. Choe, Y.N. Kim, and Y.B. Lee. 2021. Differences in soil chemistry and microbial community between the upland converted from paddy and the existing soybean upland. Korean J. Soil Sci. Fert. 54:525-537.

Cosentino, V.R.N., P.L. Fernandez, S.A. Figueiro Aureggi, and M.A. Taboada. 2012. N_2O emissions from a cultivated Mollisol: Optimal time of day for sampling and the role of soil temperature. Rev. Bras. Cienc. Solo 36:1814-1819.

Davidson, E.A. 1991. Fluxes of nitrous oxide and nitric oxide from terrestrial ecosystems. p. 219-235. In J.E. Rogers and W.B. Whitman (eds.) Microbial production and consumption of greenhouse gases: methane, nitrous oxide and halomethanes. American Society for Microbiology, Washington, D.C., USA.

Dobbie, K.E. and K.A. Smith. 2003. Nitrous oxide emission factors for agricultural soils in Great Britain: The impact of soil water-filled pore space and other controlling variables. Global Change Biol. 9(2):204-218.

Flynn, H.C. and P. Smith. 2010. Greenhouse gas budgets of crop production-current and likely future trends. p. 1-67. International Fertilizer Industry Association, Paris, France.

Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, and G. Myhre. 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing, Chapter 2. p. 129-234. In S. Solomon et al. (ed.) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Frolking, S.E., A.R. Mosier, and D.S. Ojima. 1998. Comparison of N_2O emissions from soils at three temperate agricultural sites: Simulations of year-round measurements by four models. Nutr. Cycling Agroecosyst. 52:77-105.

Gee, G.W. and J.W. Bauder. 1986. Particle size analysis. p. 383-412. In G.S. Campbell et al. (ed.) Physical and mineralogical methods. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.

Granli, T. and O.C. Bockman. 1994. Nitrogen oxide from agriculture. Norw. J. Agric. Sci. 12:7-127.

Hutchinson, G.L. and G.P. Livingston. 1993. Use of chamber systems to measure trace gas fluxes. Agric. Ecosyst. Effects Trace Gases Global Clim. Change 55:63-78.

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. Clim. Change Res. 8(4):305-312.

Jastrow, J.D. 1996. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. Soil Biol. Biochem. 28:665-676.

Kim, D.H., Y.J. Kang, J.J. Choi, and S.I. Yun. 2020. Lettuce growth and nitrogen loss in soil treated with corn starch carbamate produced using urea. Korea J. Soil Sci. Fert. 53:13-21.

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 greenhouse 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. 41:399-407.

Kim, S.U., C. Ruangcharus, H.H. Lee, H.J. Park, and C.O. Hong. 2018. 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.

Lin, Y.W. Ding, D. Liu, T. He, G. Yoo, J. Yuan, Z. Chen, J. Fan. 2017. Wheat straw-derived biochar amendment

stimulated N_2O emissions from rice paddy soils by regulating the *amo*A genes of ammonia-oxidizing bacteria. Soil Biol. Biochem. 113:89-98.

Mosier, A.R., W.J. Parton, and S. Phongpan. 1998. Longterm large N and immediate small N additions effects on trace gas fluxes in the Colorado shortgrass steppe. Biol. Fertil. Soils 28:44-50.

Oh, T.S. and C.H. Kim. 2013. Effect of using organic fertilizer on the growth of rice and soil. Korean J. Crop Sci. 58:36-42.

Park, S., P. Croteau, K.A. Boering, D.M. Etheridge, D. Ferretti, P.J. Fraser, K.R. Kim, P.B. Krummel, R.L. Langenfelds, T.D. van Ommen, L.P. Steele, and C.M. Trudinger. 2012. Trends and seasonal cycles in the isotopic composition of nitrous oxide since 1940. Nat. Geosci. 5:261-265.

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 N_2 and N_2O production from nitrification and denitrification. Global Biogeochem. Cycles 10:401-412.

Qin, S., Y. Wang, C. Hu, O. Oenema, X. Li, Y. Zhang, and W. Dong. 2012. Yield-scaled N_2O emissions in a winter wheat − summer corn double-cropping system. Atmos. Environ. 55:240-244.

RDA. 2000. Methods of soil and plant analysis. Rural Development Administration, National Institute of Agricultural Science and Technology, Suwon, Korea.

RDA. 2010. Method of soil chemical analysis. Rural Development Administration, National Academy of Agricultural Science, Suwon, Korea.

Scheer, C.R. Wassmann, K. Kienzler, N. Ibragimov, and R. Eschanov. 2008. Nitrous oxide emissions from fertilized, irrigated cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in the Aral Sea Basin, Uzbekistan: Influence of nitrogen applications and irrigation practices. Soil Biol. Biochem. 40:290-301.

Sharma, S.B., R.Z. Sayyed, M.H. Trivedi, and T.A. Gobi. 2013. Phosphate solubilizing microbes: Sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. SpringerPlus 2:587.

Syakila, A. and C. Kroeze. 2011. The global nitrous oxide budget revisited. Greenhouse Gas Meas. Manage. 1(1):17-26.

Venterea, R.T., T.J. Clough, J.A. Coulter, F. Breuillin-Sessoms. 2015. Ammonium sorption and ammonia inhibition of nitrite-oxidizing bacteria explain contrasting soil N_2O production. Sci. Rep. 5:12153.

Yang, S.H., H.J. Kang, S.C. Lee, H.J. Oh, and G.Y. Kim. 2012. Influence of N fertilization level, rainfall, and temperature on the emission of N_2O in the Jeju black volcanic ash soil with soybean cultivation. Korean J. Soil Sci. Fert. 45:451-458.

Yun, H.B., Y. Lee, C.Y. Yu, S.M. Lee, B.K. Hyun, and Y.B. Lee. 2007. Effect of crude carbohydrate content in livestock manure compost on organic matter decomposition rate in upland soil. Korean J. Soil Sci. Fert. 40:364-368.