Impacts of Different Nitrogen Fertilization on Greenhouse Gas Emissions and Lettuce Productivity in Upland Soils during Cultivation

Yeomyeong Lee¹, Sieun Lee², Juhee Lee¹, Seongwoo Choi¹, and Sang Yoon Kim^{3*}

¹Graduate Student, Department of Bio-Environmental Sciences, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

²Undergraduate Student, Department of Bio-Environmental Sciences, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

³Professor, Department of Bio-Environmental Sciences, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

*Corresponding author: sykim@snu.ac.kr

ABSTRACT

Received: November 2, 2020

Revised: November 18, 2020

Accepted: November 24, 2020

ORCID

Sang Yoon Kim

<http://orcid.org/0000-0003-4914-3080>

Nitrogen (N) fertilization improves crop growth and productivity, but can cause adverse environmental problems in particular nitrous oxide (N₂O) emissions, requiring reasonable fertilization strategy for a better agroecosystem. Our goal was to understand how different N fertilizations influence greenhouse gas (GHG) emissions (CO₂, CH₄, and N₂O) and global warming potential (GWP), soil properties, and productivity from lettuce (*Lactuca sativa*) cultivated fields [control (No fertilizer), urea ((NH₂)₂CO), ammonium sulfate ((NH₄)₂SO₄), and compost (10 Mg ha⁻¹)]. Inorganic N fertilizations significantly increased GWP as compared to the control, mainly increasing N₂O emissions. However, CH₄ and CO₂ were not significantly different among all treatments, indicating N₂O emissions were main contributors to be influenced by N fertilizations. Ammonium sulfate showed higher GWP than the urea. However, GWP was lowest in the control, but was not significantly different as compared to the compost. Lettuce yield was significantly enhanced by chemical N fertilizations, showing much greater biomass in ammonium sulfate than the urea. Lettuce yield with the compost was less than with chemical fertilizations, but significantly greater than control. GWP per productivity as an indicator for sustainability was lowest in compost treatment among all treatments mainly due to reduced GHG emissions by less mineralization. Conclusively, compost application could be a sustainable way to mitigate GHG emissions, maintaining soil quality and productivity in upland soils.

Keywords: Compost, Fertilization, Greenhouse gas emissions, *Lactuca sativa*, Methane, Nitrous oxide

GWP per lettuce yield under different fertilization regimes.

Parameters	Total emission (Mg CO ₂ ha ⁻¹)			Total GWP (Mg CO ₂ ha ⁻¹)	Total GWP per N added (kg CO ₂ kg N ⁻¹)	Total GWP per yield (kg CO ₂ kg ⁻¹)
	N ₂ O	CO ₂	CH ₄			
No fertilizer	0.49b	4.82	-0.87	4.44b	-	677.4a
Urea	4.44a	4.43	-0.83	8.04a	18.0b	668.1a
Ammonium sulfate	4.30a	6.40	-0.93	9.76a	26.6a	680.5a
Compost	0.50b	6.35	-0.81	6.05ab	11.0c	593.1b
F	11.16	2.29	0.80	17.82	10.54	10.72
P	0.003	0.155	0.527	<0.001	0.011	0.004

[†] Different letters for each column are significantly different at $P \leq 0.05$ according to Tukey's test. No letters indicate no significant differences among treatments.

Introduction

질소 (N, nitrogen)는 식물 생장에 필요한 핵심 영양소이며, 생육에 있어서 없어서는 안되는 필수 원소 중 하나다. 질소비료 사용은 농업부분에서 농작물의 생산성과 품질을 향상시킨다는 점에서 매우 중요하다. 최근 인구 증가와 산업화로 인해 경지면적은 지속적으로 감소하고 있는 추세이며, 식량문제를 해결하고, 작물의 안정적인 생산을 위해 집약적인 농업 생산이 이루어지고 있다. 이로 인해 세계적으로도 비료의 수요가 지속적으로 증가하고 있는 추세이며, 약 연평균 2.6%씩 증가할 것으로 추산된다 (IFA, 2011).

국내 일반농가에서는 추천량에 비해 질소를 과량으로 시비하고 있는 것으로 조사된 바 있으며 (Kim et al., 2018a), 질소의 과다한 사용은 다양한 경로로 질소 손실을 유발하여, 농업 생태계에서 많은 문제를 일으킬 수 있다. 토양에서 질소는 일반적으로 산도 (pH)가 높은 알칼리 조건일 경우 암모니아 (NH_3)로 휘산되어 미세먼지 전구체를 생성하며 (Backes et al., 2016), 토양 질소가 용탈되어 지하수 오염을 일으킬 뿐만 아니라 (Carpenter et al., 1998), 아산화질소 (N_2O)와 같은 온실가스를 배출하는 등 다양한 환경문제를 유발시킬 수 있다.

특히 주요 온실가스인 아산화질소는 전체배출량의 약 80% 정도가 농업 활동에 의해 발생하며 (Sehy et al., 2003), 농업 활동 중에서도 대부분 질소 비료 투입에 의해 배출된다고 보고된 바 있다 (Parkin and Kaspar, 2006; Lee et al., 2019b). 아산화질소는 지구온난화 지수 (Global Warming Potential)가 이산화탄소에 비해 298배 높기 때문에 (Forster et al., 2007) 실제 배출량이 적음에도 불구하고, 지구온난화 및 온실효과에 크게 기여할 수 있기 때문에 이를 저감하고, 안정적으로 작물을 생산하기 위한 합리적인 토양관리 기술 개발이 시급하다.

상추는 비교적 서늘한 기후에서 잘 자라며, 일반적으로 봄과 가을에 재배되고 있다. 최근 시설 재배가 보편화 되면서 상추는 연중 재배가 가능해졌으며, 채소 작물로서 배추, 양배추 다음으로 국내에서 많이 생산되고 있다 (MAFRA, 2017). 국내 상추의 총 재배면적은 2015년 기준 4,022 ha (Korean Statistics Information Service, 2015) 정도인 것으로 보고 된 바 있으며, 최근 육류 수요 증가와 더불어 그 재배면적 또한 지속적으로 증가될 것으로 전망한다. 하지만 상추 연중 재배가 가능해지면서 토양 내 질소 비료의 투입량이 크게 증가될 수 있는 가능성이 높아졌음에도 불구하고, 재배기간이 짧다는 이유 등으로 인해 그 중요성이 간과되고 있고, 일부 연구가 이루어졌더라도 대부분의 연구가 생육과 생산량 증진 또는 생리적인 특성 규명에 초점을 두고 이루어져 왔다 (Hwang et al., 2017; Lee et al., 2018; Lee et al., 2019a).

퇴비 (compost)는 토양에 유기물 공급할 뿐만 아니라 토양을 개량하고, 미생물의 활성을 향상시킴으로써 토양의 질을 향상시킴과 동시에 식물의 주요 양분공급원으로도 알려져 있다 (Nayak et al., 2007; Nair and Ngouajio, 2012; Park et al., 2020). 퇴비에 포함된 양분은 속효성인 무기질 비료와 달리 완효성이며, 식물이 직접적으로 흡수할 수 없는 유기태 형태가 대부분이기 때문에 미생물의 분해과정을 거쳐 이용가능한 무기태형태로 용출된 이후에 식물이 흡수할 수 있다 (Laakso et al., 2000). 퇴비 사용을 통해 유기물의 분해속도 및 양분용출 속도를 조절함으로써 작물 생산성을 증진하고, 토양질 개선 및 온실가스 배출량을 저감 할 수 있을 것으로 기대하나, 이와 관련한 연구는 여전히 부족한 실정이다.

본 연구에서는 상추 재배 발 토양에서 질소 비료의 사용이 온실가스 배출량 저감 및 상추 생산성 향상에 미치는 영향을 평가하기 위해 질소비료 사용에 따른 1) 온실가스로서 아산화질소, 이산화탄소 및 메탄 배출량을 평가하고, 2) 상추의 수량 및 생육 특성과 3) 토양특성변화를 조사하여 상추 생산성을 유지시키면서 온실가스 배출량을 줄일 수 있는 합리적인 시비 방법을 제시하고자 하였다.

Materials and Methods

공시토양 및 재료특성 본 연구는 전라남도 순천시에 위치한 순천대학교 내 시험 포장에서 수행되었다. 공시토양의 토성은 사양토 (Sandy loam)였으며, 평균적인 토양 이화학적 특성은 Table 1과 같았다. 시험 토양의 pH가 8.0으로 다소 높고, 토양 내 유효인산 및 치환성 칼슘과 마그네슘 함량이 일반적인 밭 토양에 비해 다소 낮은 특성을 보였다.

시험 처리구 및 재배관리 밭 토양에서 질소비료 투입에 따른 온실가스 (아산화질소, 이산화탄소, 메탄) 배출 특성과 상추 생산성 및 토양 화학성 변화를 조사하기 위하여 2019년 4월 19일 상추 모종을 정식하였고, 2019년 6월 20일 수확하였다. 공시작물은 적치마상추 (*Lactuca sativa*)로 품종을 선발하였다. 처리구의 크기는 1.2×0.8 m (1 m^2)이며, 각 처리구에 상추 모종을 15×20 cm 재식간격으로 1 시험구 (plot)당 18주씩 정식하였다. 물 관리는 재배기간 중 매주 1회 관수 하였다.

시비 처리구는 무처리 (control), 무기질 비료인 요소 (urea, $[(\text{NH}_2)_2\text{CO}]$), 유안 (ammonium sulfate, $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$), 유기질 비료인 퇴비 (compost)로 구성하였다. 요소와 유안처리구에는 농촌진흥청의 상추재배 표준시비량 (NIAST, 1999)을 기준으로 질소 (N) - 인산 (P_2O_5) - 가리 (K_2O)를 각각 $200 - 59 - 128 \text{ kg ha}^{-1}$ 로 정식 직전에 전량 기비 처리하였으며, 퇴비처리구는 농촌진흥청의 상추 표준시비량을 근거로 하여 일반 관행량인 10 Mg ha^{-1} 을 상추 정식 직전에

Table 1. Chemical properties of soils before the experiment.

Parameters	Optimum range	Soil used
pH (H_2O , 1:5)	6.5 - 7.0	8.03 ± 0.03
EC (dS m^{-1})	≤ 2	0.58 ± 0.02
Total C (g kg^{-1})	11.6 - 17.4	14.2 ± 0.77
Total N (g kg^{-1})	-	1.04 ± 0.34
C/N ratio	-	14.3 ± 3.51
Available P_2O_5 (mg kg^{-1})	250 - 400	58.4 ± 1.79
Exchangeable cations ($\text{cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$)		
K	0.4 - 0.6	0.19 ± 0.02
Ca	6.0 - 7.0	6.65 ± 0.29
Mg	2.0 - 2.5	0.45 ± 0.02
Soil texture	Sandy loam	Sandy loam

[†]Optimum range of soil chemical properties for lettuce cultivation was reported in NAS (2017).

Table 2. Characteristics of manure compost used.

Parameters	Value
pH (H_2O , 1:5)	9.14 ± 0.02
EC (dS m^{-1})	51.1 ± 3.18
Water content (% wt wt ⁻¹)	22.3 ± 0.37
Total contents (g kg^{-1})	
C	276.2 ± 6.31
N	18.9 ± 0.41
P_2O_5	2.32 ± 0.05
K_2O	15.3 ± 0.36
C/N ratio	14.6 ± 0.63

전량 기비 처리하였다. 본 연구에서 퇴비를 통해 토양에 투입된 질소의 총량은 약 147 kg N ha^{-1} 로 일반 시판 퇴비를 사용하였다. 공시퇴비의 자세한 화학적 특성은 Table 2에 나타내었다. 각 처리구는 완전임의배치구로 배치하였으며, 모든 처리구는 3반복으로 하여 실험을 수행하였다.

온실가스 배출량 평가 및 Net GWP 산정 상추 재배기간 중 배출되는 온실가스는 폐쇄정태챔버법 (static closed chamber)을 이용하여 시료를 채취하였다 (Lim et al., 2011). 가스시료 채취는 headspace 부피 0.0047 m^3 의 원통형 플라스틱 챔버를 각 처리구의 상추 포기과 포기 사이 토양에 5 cm 깊이로 설치하여, 상추 재배기간 동안 1주 1회 이상 온실가스 배출량이 평균값을 보이는 오전 10 - 11시 사이에 30분 간 포집 하였으며 (Lim et al., 2011), 3 way stopper를 부착한 60 mL 주사기를 이용해 시료를 채취하였다. 이 때 챔버 내부온도를 온도계를 이용하여 측정하였다.

포집한 가스 시료는 가스크로마토그래피 (GC-2014, Shimadzu, Japan)를 이용하여 정량하였으며, 아산화질소 및 이산화탄소, 메탄 배출량은 (Eq. 1, 2)를 이용해 계산하였다. 재배기간 중 각 처리구의 토양으로부터 배출되는 온실가스 배출량은 아래의 식을 이용하여 계산하였다 (Rolston, 1986).

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

F : 단위시간당 N_2O , CO_2 , CH_4 배출량 ($\text{mg m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$)

ρ : 해당 가스 밀도 (mg m^{-3})

V : 챔버 부피 (m^3)

A : 챔버 표면적 (m^2)

Δc : 시료 채취 전과 후의 농도차 ($\mu\text{L L}^{-1}$)

Δt : 시료 채취 시간 (hr)

$T = 273 + \text{측정시간 중 평균온도 } (^{\circ}\text{C})$

재배기간 중 발생된 총 온실가스 배출량은 아래 식을 이용하여 평가하였다 (Singh et al., 1999).

$$\text{Total } \text{N}_2\text{O or } \text{CO}_2 \text{ or } \text{CH}_4 \text{ flux} = \sum_i^n (F_i \times D_i) \quad (\text{Eq. 2})$$

F_i : i 번째 시료채취 기간 내 일 가스 배출량

D_i : i 번째 기간 내 시료 채취 간격 일수

n : 시료채취 간격

전체 상추 재배기간 중 배출된 총 아산화질소, 이산화탄소, 메탄 배출량에 지구온난화지수를 아래와 같이 곱하여 CO_2 당량으로 환산하였다 (Forster et al., 2007).

$$\text{Total GWP}(\text{kg } \text{CO}_2 \text{ eq. } \text{ha}^{-1}) = (298 \times \text{N}_2\text{O}) + (1 \times \text{CO}_2) + (25 \times \text{CH}_4) \quad (\text{Eq. 3})$$

질소 투입량의 차이를 보정하기 위해 총 질소 투입량 대비 온실가스 배출량을 아래와 같이 계산하여 평가하였다.

$$\frac{\text{Total GWP per N added}(\text{kg CO}_2 \text{ eq. kg}^{-1} \text{ N added by fertilizers and compost})}{\text{Total GWP}(\text{treatment} - \text{control})(\text{kg CO}_2 \text{ eq. ha}^{-1}) / \text{N input}(\text{kg N ha}^{-1})} = \quad (\text{Eq. 4})$$

토양 특성 및 상추 생산성 평가 공시토양 및 수확 후 토양시료는 풍건하여 체 통과(< 2 mm) 후 화학성 분석에 이용하였다. 토양과 물을 1:5 비율로 침출 후 pH meter (Orion star A212, Thermo Scientific, Indonesia)로 토양 산도 (pH)를 측정하였고, 동일 용액을 이용하여 전기 전도도 (EC meter, Precise Benchtop Conductivity Meter 30014097, METTLER TOLEDO, Switzerland)를 측정하였다. 토양 총 탄소 및 질소 함량은 원소분석기 (EA2400II, PERKIN ELMER, USA)를 이용하여 측정하였으며, 유효인산은 토양시료 5 g에 Lancaster 용액 (pH 4.25) 20 mL를 넣은 후 10분간 진탕, 여과 (ADVANTEC, No.2) 하여 증류수로 희석하여 UV/VIS Spectrometer (UV1900, Shimadzu, Japan)를 이용해 720 nm 파장에서 흡광도를 측정하였다. 치환성 양이온은 1N NH₄OAc 용액으로 침출하여 ICP-OES (Inductively coupled plasma-optical emission spectrophotometer, Perkin Elmer Model OPTIMA 4300DV, USA)를 이용하여 측정하였다 (NIAST, 1988). 양이온치환용량 (CEC)은 Brown 간이법으로 정량분석 하였다.

토양 내 무기태 질소 변동을 조사하기 위해 주요 상추 재배기간 중 시기별로 3회 습토를 채취하여 체 통과(< 2 mm) 후 토양 5 g에 2M KCl 25mL을 넣어 30분간 진탕한 후 여과 (ADVANTEC, No.2)한 침출액을 분석하였다. 암모니아태 질소 (NH₄⁺-N)는 Indophenol-blue 비색법 (Searle, 1984)을 이용 분석하였으며, 침출액 2 mL에 EDTA 용액 0.5 mL, salicylate 용액 2 mL, hypochlorite 용액 1 mL, 증류수 7 mL을 넣고 혼합하여 37°C에 30분간 비색시킨 후 UV/VIS Spectrometer (UV1900, Shimadzu, Japan)를 이용해 667 nm 파장에서 흡광도를 측정하였다. 질산태 질소 (NO₃⁻-N)는 brucine 법 (Wolf, 1944)을 이용하였으며, 침출액 2 mL에 sodium arsenite 용액 0.05 mL, 증류수 8 mL, 30% NaCl 2 mL, H₂SO₄ (1+4) 용액 10 mL를 가하고 혼합한 후 냉각하였다. 다음으로 brucine-sulfanilic acid 용액 0.5 mL를 가하고 혼합하여 95°C에서 20분간 중탕시킨 후 충분히 식힌 다음 UV/VIS Spectrometer (UV1900, Shimadzu, Japan)를 이용해 410 nm 파장에서 흡광도를 측정하였다. 토양 내 용존 유기태 질소 (dissolved organic nitrogen)는 습토 3 g에 3차 증류수 30 mL를 넣어 1시간 동안 진탕, 여과 (0.45 µm, acrodisc syringe filter)한 침출액을 이용해 정량분석 하였다 (TOC-VCPN, Shimadzu, Japan). 토양 내 총 무기태질소함량 (total mineralized Ns)는 무기태 질소 형태인 암모니아태와 질산태 질소를 합산하여 산출하였다 (Masunga et al., 2016).

상추 생산성 및 생육특성 조사는 농촌진흥청 농사시험연구 기준 (RDA, 2012) 에 근거하여 수확한 후 드라이 오븐에서 70°C, 72시간 이상 건조시킨 후 지상부, 지하부를 구분하여 건물중 (dry weight)을 측정하였다.

통계 분석 통계 처리는 SAS package (SAS Institute Inc., 1995)를 이용하여 ANOVA 분석을 수행하였다. 처리 간 통계적 유의성이 인정되는 경우 사후 분석을 수행하였으며 이때 Tukey test를 이용하여 5% (p ≤ 0.05) 확률의 유의수준에서 처리 간 효과를 비교하였다.

Results and Discussion

시비 방법에 따른 온실가스 배출 특성 평가 상추 전체 재배기간 동안 온실가스 배출량을 평가하였다 (Fig. 1). 아산화질소 배출량은 전반적으로 상추 생육 초기에는 적었으나, 약 30일 경과 후 높게 증가되는 경향을 보인 이후 점차 감소하였다. 토양에서 아산화질소는 일반적으로 환원조건에서 탈질과정을 통해 일어나는 것으로 알려져 있으며 (Cai et al., 1997) 토양 온도와 수분상태 및 무기태질소 함량 등에 의해 영향을 받는다 (Kim et al., 2010; Butterbach-Bahl

Fig. 1. Meteorological characteristics at experimental field over the whole cultivation period (A) and greenhouse gas emissions (B-D) under different N fertilization in upland soils during lettuce cultivation. Vertical bars represent standard deviations (n=3).

et al., 2013; Kim et al., 2014a; Kim et al., 2018b). 실제 토양 공극 내 수분이 차지하는 비율 (water filled pore space; WFPS)이 증가함에 따라 아산화질소의 배출량이 증가한다고 알려져 있다 (Kim et al., 2010; Han et al., 2019). 본 연구에서는 상추 재배기간 중 WFPS를 따로 정량 할 수 없었으나, 상추정식 30일 이후 지속적인 기온상승과 집중된 강우로 인한 토양 WFPS 상승 및 토양 내 증가된 무기태질소함량 등으로 인해 아산화질소가 생성되기 좋은 토양 환경이 형성된 것으로 보여진다 (Fig. 1, Fig. 3). 특히 무처리 ($\sim 0.53 \text{ mg m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$)에 비해 무기질 비료 처리구 (요소와 유안) 전체에서 아산화질소 배출량은 큰 폭으로 증가하는 것 ($\sim 4.9 \text{ mg m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$)으로 나타났으며, 두 비종 간 배출 양상은 비슷한 경향을 보였다. 상추 재배 기간 중 총 아산화질소 배출량을 평가한 결과 (Fig. 2A), 무기질 질소 비료 처리는 무처리 (0.16 g m^{-2})에 비해 총 배출량을 유의하게 증가시킨 것으로 나타났으며, 두 비종 간의 유의한 차이는 없었다. 유안 처리구 (1.44 g m^{-2})에 비해 요소 처리구 (1.49 g m^{-2})에서 다소 높게 나타났으나 퇴비처리구에서는 아산화질소 배출량이 (0.17 g m^{-2}) 크게 증가하지 않았다. 퇴비시용을 통해 투입된 총질소량은 약 147 kg N ha^{-1} 로 무기질비료 처리구 (200 kg N ha^{-1})에 비해 약 73% 수준인 점을 감안하면, 퇴비처리구에서 단위 질소함량 당 아산화질소 배출량이 가장 적은 것으로 나타났다 (Table 3). 하지만 일반적으로 밭토양에서 가축분퇴비 처리량 증가는 아산화질소 배출량을 크게 증가시키는 것으로 조사된 바 있으며, 이는 축분 내 암모늄이온의 함량과도 높은 상관관계가 있는 것으로 조사되었다 (Kim et al., 2018b). 따라서 암모늄이온함량이 상대적으로 낮은 퇴비 시용을 통해 농경지에서 아산화질소 배출량

Fig. 2. Total N₂O (A), CO₂ (B), CH₄ (C) fluxes under different fertilization regimes during lettuce cultivation. Vertical bars represent standard deviations (n=3). N.S means not significant.

을 효과적으로 저감할 수 있을 것으로 판단된다.

상추 재배 토양에서 무기질 비료 시비에 따라 토양 내 질소무기화가 증가되면서 토양 내 무기태질소가 증가하였고, 질산화 및 탈질작용이 활발하게 촉진되어 아산화배출의 증가가 뚜렷하게 나타난 것으로 판단된다. 하지만 퇴비처리구는 무처리와 비교하여 배출양상과 배출량의 차이가 거의 없었던 것으로 조사되었다. 충분한 부숙과정을 거친 안정한 형태의 퇴비 투입으로 인해 토양 내 유기물 분해가 느리게 진행된 것으로 판단되며 (Kim et al., 2014b; Kim et al., 2018b), 이로 인해 재배기간 중 아산화질소 배출량이 퇴비의 사용에도 불구하고 크게 증가하지 않았던 것으로 보인다.

상추 생육시기에 따른 이산화탄소 배출량을 평가한 결과 (Fig. 1C), 기비 처리 직후 전반적으로 배출량이 증가되는 경향을 보이다가, 생육 중기 (약 30일 경과)에 가장 높은 배출량을 보인 이후 지속적으로 감소되는 경향을 보였다. 시비 처리에 따라 총 이산화탄소 배출량은 무처리 대비 유안과 퇴비처리구에서 다소 증가되는 경향을 보였으나, 요소 처리구에서는 다소 감소되는 경향을 보였다 (Fig. 2B). 이는 초기 퇴비 투입과 무기질 비료 시비에 따른 탄소원 (기질)과 양분유효도 및 토양 pH 변동에 의해 토양미생물의 호흡량 및 활성의 차이가 생긴 것으로 인해 배출량의 차이가 난 것으로 추정된다 (Ko et al., 2016). 하지만 총 이산화탄소 배출량의 경우 처리 간 유의한 차이는 없는 것으로 평가되었다 (Fig. 2B).

상추 재배기간 중 메탄 배출량 특성을 조사한 결과 (Fig. 1D), 전체 기간 동안에 대부분의 메탄은 소화 (consumption) 되는 것으로 조사되었으며, 시비 처리에 따른 큰 차이는 확인할 수 없었다. 정식 후 30일 경과 후 메탄 배출량이 급격하게 증가되는 경향을 보였다. 일반적으로 메탄은 산화환원전위가 -200 mV 이하의 혐기조건에서 주로 생성되며 (Garcia et al., 2000), 토양수분함량과도 매우 상관관계가 높은 것으로 알려져 있다 (Kim et al., 2014a). 본 연구에서는 산화환원전위와 수분함량을 측정할 수 없었으나, 아마도 이 시기에 집중된 강우의 영향으로 메탄 생성에 유리한 혐기조건이 토양 공극 내부에 부분적으로 형성되었기 때문으로 판단된다 (Le Mer and Roger, 2001).

시비처리에 따른 지구온난화잠재능 (GWP, global warming potential)을 평가하기 위해 전체 메탄과 아산화질소 배출량에 각각 25, 298 배를 곱하여, CO₂ 당량으로 환산하여 비교하였다 (Table 3). 무처리 (4.44 Mg CO₂ eq. ha⁻¹)에 비해 무기질 질소비료 시용에 따른 지구온난화잠재능은 유의하게 증가하는 것으로 조사되었다. 유안처리구 (9.76 Mg CO₂ eq. ha⁻¹)가 요소처리구 (8.04 Mg CO₂ eq. ha⁻¹)에 비해 더욱 높게 나타났으나, 두 비종 간 유의한 차이는 보이지 않았다. 퇴비처리의 경우 무처리에 비해 지구온난화잠재능이 증가하였고, 무기질 비료 처리보다는 더 낮은 값을 보였으나, 처리구 간에 통계적인 차이는 없는 것으로 나타났다. 본 연구에서 퇴비 처리구 내 총 질소투입량이 무기질

Table 3. GWP per lettuce yield under different fertilization regimes and results of ANOVA (F-value and P-value).

Parameters	Total emission (Mg CO ₂ ha ⁻¹)			Total GWP (Mg CO ₂ ha ⁻¹)	Total GWP per N added (kg CO ₂ kg N ⁻¹)	Total GWP per yield (kg CO ₂ kg ⁻¹)
	N ₂ O	CO ₂	CH ₄			
No fertilizer	0.49b	4.82	-0.87	4.44b	-	677.4a
Urea	4.44a	4.43	-0.83	8.04a	18.0b	668.1a
Ammonium sulfate	4.30a	6.40	-0.93	9.76a	26.6a	680.5a
Compost	0.50b	6.35	-0.81	6.05ab	11.0c	593.1b
F	11.16	2.29	0.80	17.82	10.54	10.72
P	0.003	0.155	0.527	<0.001	0.011	0.004

[†]Different letters for each column are significantly different at $P \leq 0.05$ according to Tukey's test. No letters indicate no significant differences among treatments.

비료 처리구에 비해 상대적으로 적어 직접적인 온실가스 배출을 평가하기 위해 투입된 질소량 대비 온실가스 배출 잠재능을 평가하였다 (Table 3). 전체 처리구에서 퇴비처리구가 가장 낮은 $11.0 \text{ kg CO}_2 \text{ eq. kg}^{-1} \text{ N added}$ 으로 조사되었고, 요소 ($18.0 \text{ kg CO}_2 \text{ eq. kg}^{-1} \text{ N added}$)와 유안 ($26.6 \text{ kg CO}_2 \text{ eq. kg}^{-1} \text{ N added}$) 순으로 높게 나타났다. 결과적으로 상추 재배 토양에서 퇴비를 사용하는 것은 재배기간 중 온실가스 배출을 줄일 수 있는 합리적인 시비 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

시비 방법에 따른 상추 생육 및 생산성 평가 시비 처리에 따른 상추의 생육 특성과 생산성을 평가한 결과 (Table 4), 시비에 따라 상추의 전반적인 생육 특성이 개선되었다. 특히 무기질 비료 처리에 따른 생육 개선 효과가 퇴비에 비해 더욱 높은 것으로 나타났다. 특히 무기질 비료 사용에 따라 엽장 (leaf length)과 엽폭 (leaf width)이 무처리와 퇴비처리구에 비해 유의하게 증가하였다. 특히 무기질 비료 사용에 따라 상추 총 생산량 (지상부 및 지하부, $1467 - 1655 \text{ kg d.w. ha}^{-1}$)은 무처리 ($822 \text{ kg d.w. ha}^{-1}$) 대비 약 56 - 61% 증가하였다. 상품가치가 있는 지상부의 생산성의 경우 무기질 질소 비료의 경우 ($1229 - 1429 \text{ kg d.w. ha}^{-1}$)으로 무처리 ($644 \text{ kg d.w. ha}^{-1}$)에 비해 월등히 높았으며, 퇴비 처리 ($1021 \text{ kg d.w. ha}^{-1}$)에 비해서도 유의하게 증수된 것으로 조사되었다. 상추의 생육특성과 생산성은 전반적으로 유안처리가 요소처리에 비해 더 생육 개선효과가 큰 것으로 보였으나, 통계적으로 유의한 차이를 보이지는 않았다. 따라서 무처리에 비해 시비처리구에서 상추의 생산성을 크게 증진할 수 있는 것으로 조사되었으며, 특히 퇴비만 사용하였을 경우도 무처리 대비 약 37% 증수 효과가 있는 것으로 나타났다.

시비 관리에 따른 상추 생산성 증진과 온실가스 배출 저감 효과를 평가하기 위해 작물 수량당 온실가스배출지수 (GWP per yield)를 지표로 활용하여 비교 분석하였다 (Kim et al., 2014b; Gwon et al., 2019, Table 3). 무처리와 무기질 비료 처리구에서는 수량당 온실가스배출지수의 통계적인 차이가 없는 것으로 나타났으며, 이는 무기질 비료 사용에 따른 생육 개선 및 생산성 효과가 큰 만큼 온실가스의 배출이 많았다는 의미로 해석된다. 하지만 퇴비 사용의 경우 전체 처리구 중에서 가장 낮게 조사되었다 ($593.1 \text{ kg CO}_2 \text{ eq. kg}^{-1} \text{ yield}$). 농업생산의 지속성을 고려할 때 퇴비 사용이 온실가스 배출을 저감하면서, 수량성을 확보할 수 있는 방안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

시비 방법에 따른 토양 특성 변화 시비 처리에 따른 상추 주요 생육기간 중 무기태질소 함량 (암모니아태 및 질산태 질소)과 용존 유기태질소 함량의 변화를 조사하였다 (Fig. 3). 일반적으로 아산화질소 배출량은 토양 수분, 토양

Table 4. Characteristics of lettuce growth and productivity under different N fertilization.

Treatment	Control	Urea	Ammonium sulfate	Compost
Growth characteristics				
Number of leaves	31.3	33.0	37.0	33.7
Leaf length (cm)	17.2c	22.6a	24.7a	19.9b
Leaf width (cm)	9.5b	14.4a	15.0a	11.3b
Lettuce productivity (kg d.w ha^{-1})				
Shoot	664.0c	1228.5a	1429.3a	1021.0b
Root	158.2b	238.0a	225.8a	239.1a
Total	822.2c	1466.5a	1655.0a	1260.1b

[†]Different letters for each row are significantly different at $P \leq 0.05$ according to Tukey's test. No letters indicate no significant differences among treatments.

온도, 무기태 질소의 함량과 밀접한 관계를 지니며 (Conen et al., 2000; Sozanska et al., 2002; Butterbach-Bahl et al., 2013), 토양 내 무기태 질소가 추가적으로 공급될 경우 아산화질소의 배출량 또한 유의하게 증가한다고 보고된 바 있다 (Mosier et al., 1998; Kim et al., 2010). 전체 상추 재배 기간에 걸쳐 총 무기태질소의 함량은 무기질 비료 처리구에서 가장 높게 나타났으며, 유안처리구에서 요소처리구보다 더 높은 무기태 질소함량을 보였다 (Fig. 3C). 이 결과를 통해 유안처리구에서 가장 많은 무기태 질소가 흡수될 수 있었던 것으로 판단되며, 유안처리구에서 가장 높은 수량성을 보였던 것으로 추정된다. 추가적으로 상추의 생육 증가로 인해 다량의 무기태질소가 상추 체내로 흡수되어 실제 아산화배출량 증가에는 크게 기여하지 않았던 것으로 판단된다. 토양 내 유기태질소 함량도 무기태 질소함량의 변동과 동일한 경향을 보였다 (Fig. 3D). 무기질 비료 처리가 토양 내에서 무기화 되면서 암모니아태 및 질산태 질소 함량이 전반적으로 증가되었고, 이로 인해 아산화질소 배출량 증가와 작물 생육 개선효과가 나타날 수 있었던 것으로 보인다. 하지만 퇴비 처리의 경우 암모니아태 질소의 함량은 무처리와 차이가 없었으며, 질산태 질소의 함량은 무처리에 비해 다소 높았던 것으로 조사되었다. 총 무기태질소함량을 조사한 결과 무처리에 비해 퇴비처리구에서 다소 높은 경향을 보였다. 퇴비 자체의 느린 무기화 속도가 토양 내 식물 혹은 미생물이 이용하기 쉬운 형태의 질소 공급을 더 길게 지속될 수 있게 하여, 상추 재배기간 중 아산화질소의 배출량을 줄일 수 있었던 것으로 판단된다. 퇴비의 시용은 작물의 생육 및 수량 증진에 긍정적인 영향을 줄 수 있는 것으로 판단되나, 무기질 비료만큼 큰 생육증진효과는 나타나지 않았던 것으로 나타났다. 하지만 전체적으로 투입된 질소량이 무기질비료에 비해 낮았던 점을 감안하면, 퇴비사용량 및 시비방법 조절 및 개선을 통해서 생육 증진 효과를 더 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

상추 수확 후 토양 특성을 조사한 결과 (Table 5), 시비 처리에 따라 토양 산도, 전기전도도 (EC), 총유기탄소함량, 유효인산 농도에서 유의한 차이를 보였다. 토양 산도의 경우 요소와 퇴비처리구는 무처리에 비해 증가하는 경향을 보였다. 반면, 유안처리구의 경우 오히려 토양 산도가 감소된 것으로 나타났다. 본 연구에서 사용된 토양은 약알칼리성 토양으로 (Table 1) 유안처리에 따른 토양 산도 개선 효과가 나타난 것으로 보이며, 이로 인해 상추 생육 증진 효과가

Fig. 3. Changes in mineralized Ns in lettuce cultivated soils during cultivation season under different fertilization regimes during cultivation. Vertical bars represent standard deviations (n=3).

가장 컸던 것으로 보여진다. 전기전도도의 경우 무기질 비료 처리구 둘다 무처리에 비해 유의하게 증가되었으나, 퇴비 처리구의 경우 증가하는 경향을 보이기는 했으나 유의한 차이를 보이지는 않았다. 토양 내 총 유기탄소함량의 경우 무처리 (11.9 g kg⁻¹) 대비 퇴비 처리에서만 유의하게 증가된 것을 확인할 수 있었으나 (12.7 g kg⁻¹), 요소와 유안 처리구에서는 큰 변화가 없거나 다소 감소되는 경향을 보였다. 토양 내 유효인산의 경우 무처리에 비해 퇴비 처리구에서 유의한 수준으로 증가되었다. 이는 퇴비사용에 따라 뿌리 생육이 확연하게 증진되어 (Table 4), 상추 근권 주변으로 삼출물 (exudate) 배출 증가로 인해 근권 (rhizosphere) 주위에 많은 미생물이 서식하면서 주변의 불용화된 인산을 더 가용화시킬 수 있었던 것으로 판단된다 (Sharma et al., 2013). 토양 내 치환성 양이온과 양이온 치환용량 (CEC)의 경우 전체적으로 무처리 대비 퇴비 처리구에서 가장 높은 것을 확인할 수 있었으나, 처리 간 통계적인 차이는 없는 것으로 조사되었다.

시비 처리에 따른 토양 내 질산화 잠재능 (nitrification potential)을 평가한 결과 (Fig. 4), 정식 후 28일 까지 요소 처리구에서 가장 높게 나타났으며, 이후 평균적으로 유안 > 퇴비 > 무처리 순으로 나타났다. Fan and Yoh (2020) 의 연

Fig. 4. Nitrification potentials that were estimated to calculate the ratio of NO₃-N to NH₄-N in soils at the major lettuce growing periods under different fertilization regimes. Vertical bars represent standard deviations (n=3). N.S means not significant.

Table 5. Chemical properties of soils at lettuce harvesting stage.

Parameters	No fertilizer	Urea	Ammonium sulfate	Compost
pH (H ₂ O, 1:5)	8.06ab	8.21a	7.93b	8.13a
EC (dS m ⁻¹)	0.44b	0.53a	0.54a	0.47ab
Total C (g kg ⁻¹)	11.9	11.3	11.9	12.7
Total N (g kg ⁻¹)	0.97	1.00	1.05	1.25
C/N ratio	12.5	11.4	12.7	10.4
Available P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	44.1b	46.3ab	45.3ab	58.8a
Exchangeable cations (cmol ⁺ kg ⁻¹)				
Ca	6.93	7.67	7.30	7.65
Mg	0.47	0.41	0.48	0.49
K	0.32	0.28	0.32	0.37
Cation exchangeable capacity (cmol ⁺ kg ⁻¹)	9.8	9.9	10.1	10.3

[†]Different letters for each row are significantly different at $P \leq 0.05$ according to Tukey's test. No letters indicate no significant differences among treatments.

구에 따르면, 질산화가 활발하게 진행될수록 아산화질소의 배출량이 비율적으로 증가한다고 보고한 바 있다. 본 연구에서도 동일한 연구결과가 관찰되었으며, 요소와 유안 처리구에서 가장 높았던 아산화질소 배출량은 무기질 비료 사용에 따른 질산화 잠재능의 증가에 기인하는 것으로 판단된다. 수확기 토양에서는 통계적인 유의차는 없었으나, 퇴비가 가장 높은 것으로 나타났다. 유기물의 분해가 느린 퇴비의 특성으로 인해서 서서히 암모니아태 질소가 형성되고, 질산화가 진행되면서 수확기에서 가장 높은 질산화 잠재능을 나타낸 것으로 보인다. 따라서 무기질 비료의 사용은 빠른 무기화로 인해 아산화질소의 배출량을 촉진 시킬 수 있는 것이다. 상추 재배 토양에서 퇴비의 사용은 재배기간 중 온실가스 배출량을 저감하고, 일정한 수량성을 확보하여 지속가능한 생산기반을 마련하는데 필수적인 시비 방법이 될 수 있을 것으로 본다. 단, 질소시비량과 기타 비료사용량을 최대한 동일하게 처리하고, 작물의 생육과 온실가스 배출량 등을 종합적으로 고려하여, 퇴비사용효과가 평가되어야 할 것으로 판단된다.

Conclusions

상추 재배 토양에서 무기질 질소비료(요소와 유안) 및 퇴비의 사용은 무처리 대비 온실가스 중 아산화질소의 배출량을 유의하게 증가시키는 것으로 조사되었으나, 이산화탄소와 메탄의 배출량은 크게 증가시키지 않았다. 퇴비 처리에 따른 아산화질소 배출량은 무처리와 통계적인 차이를 보이지 않았다. 무기질 비료 사용이 가장 효과적으로 상추의 생육과 생산성을 증진하는 것으로 조사되었다. 하지만 퇴비의 경우 무기질 비료보다는 증수효과가 다소 낮기는 하였지만, 무처리보다는 수량이 유의하게 개선되는 것으로 평가되었다. 지속가능성의 지표로서 단위 수량당 온실가스 배출량을 평가한 결과 퇴비가 가장 효과적으로 온실가스 배출량을 줄이면서 생산량을 유지하는 시비 방법으로 평가되었다. 이는 아마도 퇴비 자체의 느린 분해속도로 인해 토양 내에서 무기화가 지연되었기 때문으로 판단된다. 유기물 공급 효과로 인해 토양 산도, 유효인산 등의 토양 화학성이 개선되었고, 작물 생산성에도 긍정적인 영향을 준 것으로 판단된다. 결론적으로 상추재배 시 퇴비의 사용은 온실가스 배출량을 줄이면서 토양의 질과 생산성을 유지할 수 있는 지속가능한 시비 방안으로 판단된다. 하지만 최근 들어 상추 재배가 연간 2 - 3회 이상 가능한 점을 고려한다면 추후 년 단위로 배출량과 생산성을 평가할 수 있는 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다. 또한 퇴비사용 효과를 극대화시킬 수 있는 다양한 시비 기술(무기질비료와 퇴비 혼용 등) 개발을 통해 농경지에서 온실가스 배출량 저감과 동시에 작물의 생산성을 효과적으로 증진시킬 수 있을 것으로 기대한다.

Acknowledgement

This work was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science and Technology Development (Project No. PJ014205022020)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Backes, A.M., A. Aulinger, J. Bieser, V. Matthias, and M. Quante. 2016. Ammonia emissions in Europe, part II: How ammonia emission abatement strategies affect secondary aerosols. *Atmos Environ.* 126:153-161.
- Butterbach-Bahl, K., E.M. Baggs, M. Dannenmann, R. Kiese, and S. Zechmeister-Boltenstern. 2013. Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? *Philos Trans R Soc Lond B*

- Biol Sci. 368:20130122.
- Cai, Z., G. Xing, X. Yan, H. Xu, H. Tsuruta, K. Yagi, and K. Minami. 1997. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilisers and water management. *Plant Soil*. 196(1):7-14.
- Carpenter, S.R., N.F. Caraco, D.L. Correll, R.W. Howarth, A.N. Sharpley, and V.H. Smith. 1998. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecol. Appl.* 8:559-568.
- Conen, F., K. Dobbie, and K.A. Smith. 2000. Predicting N₂O emissions from agricultural land through related soil parameters. *Global Change Biol.* 6(4):417-426.
- Fan, S. and M. Yoh. 2020. Nitrous oxide emissions in proportion to nitrification in moist temperate forests. *Biogeochemistry*. 148(3):223-236.
- 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, in *Climate Change 2007. The Physical Science Basis*, edited. Cambridge University Press, Cambridge, p. 129-234.
- Garcia, J.L., B. Patel, and B. Ollivier. 2000. Taxonomic, phylogenetic, and ecological diversity of methanogenic archaea. *Anaerobe* 6:205-226.
- Gwon, H.S., G.Y. Kim, E.J. Choi, S.I. Lee, and J.S. Lee. 2019. Evaluation of greenhouse gas emission characteristics and intensity by management of water and nutrients in rice paddy soil during cropping season. *J. Climate Change Res.* 10(4):351-359.
- Han, H.R., H.H. Lee, and C.O. Hong. 2019. Effect of incorporation of hairy vetch on nitrous oxide emission from soils cultivated with maize. *K Korean J Environ Agric.* 38(4):237-244.
- Hwang, J.Y., S.E. Jun, N.J. Park, J.S. Oh, Y.J. Lee, E.J. Sohn, and G.T. Kim. 2017. Growth-promoting effect of new iron-chelating fertilizer on lettuce. *Journal of Life Science*. 27(4):390-397.
- IFA (International Fertilizer industry Association). 2011. www.fertilizer.org.
- Kim, G.Y., K.H. So, H.C. Jeong, K.M. Shim, S.B. Lee, and D.B. Lee. 2010. Evaluation of N₂O emissions with changes of soil temperature, soil water content and mineral N in red pepper and soybean field. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(6):880-885.
- Kim, G.Y., J. Gutierrez, H.C. Jeong, J.S. Lee, M.D.M. Haque, and P.J. Kim. 2014a. Effect of intermittent drainage on methane and nitrous oxide emissions under different fertilization in a temperate paddy soil during rice cultivation. *J Korean Soc Appl Biol Chem.* 57(2):229-236.
- Kim, S.Y., P. Pramanik, J. Gutierrez, H.Y. Hwang, and P.J. Kim. 2014b. Comparison of methane emission characteristics in air-dried and composted cattle manure amended paddy soil during rice cultivation. *Agric. Ecosyst. Environ.* 197:60-67.
- Kim, S.C., M.S. Kim, S.J. Park, S.H. Kim, and C.H. Lee. 2018a. Estimation of nutrient balance in field crops applied with different fertilization. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 51(4):427-434.
- 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.
- Ko, B.G., C.H. Lee, M.S. Kim, G.Y. Kim, S.J. Park, and S.G. Yun. 2016. Effect of soil respiration on light fraction C and N availability in soil applied with organic matter. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49(5):510-516.
- Korean Statistics Information Service. 2015. <https://kosis.kr/index/index.do>.
- Laakso, J., H. Setälä, and A. Palojarvi. 2000. Influence of decomposer food web structure and nitrogen availability on plant growth. *Plant Soil*. 225(1-2):153-165.
- Le Mer, J. and P. Roger. 2001. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. *Eur. J. Soil Biol.* 37(1):25-50.
- Lee, S.B., Y.M. Kim, J.K. Sung, Y.J. Lee, and D.B. Lee. 2018. Characteristics of growth-stage-based nutrient uptake of lettuce grown by fertigation supply in a greenhouse. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 51(4):626-635.

- Lee, S.B., Y.M. Kim, Y.J. Lee, Y.S. Song, D.B. Lee, and J. Sung. 2019a. Growth stage-based fertigation guideline for greenhouse spring Chinese cabbage. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 52(4):429-437.
- Lee, S.I., C.K. Lee, G.Y. Kim, H.S. Gwon, J.S. Lee, E.J. Choi, and J.D. Shin. 2019b. Analysis of research trends in nitrous oxide emissions from upland in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 52(4):307-317.
- Lim, C.H., S.Y. Kim, and P.J. Kim. 2011. Effect of gypsum application on reducing methane (CH₄) emission in a reclaimed coastal paddy soil. *Korean J Environ Agric.* 30(3):243-251.
- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs). 2017. <https://www.mafra.go.kr/english/index.do>.
- Masunga, R.H., V.N. Uzokwe, P.D. Mlay, I. Odeh, A. Singh, D. Buchan, and D.N. Stefaan. 2016. Nitrogen mineralization dynamics of different valuable organic amendments commonly used in agriculture. *Appl Soil Ecol.* 101:185-193.
- 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.
- Nair, A. and M. Ngouajio. 2012. Soil microbial biomass, functional microbial diversity, and nematode community structure as affected by cover crops and compost in an organic vegetable production system. *Appl Soil Ecol.* 58:45-55.
- NAS (National Institute of Agricultural Science). 2017. Fertilizer recommendation for crops. Third edition. Rural Development Administration, Wanju, Korea.
- Nayak, D.R., Y.J. Babu, and T.K. Adhya. 2007. Long-term application of compost influences microbial biomass and enzyme activities in a tropical Aerobic Endoaquept planted to rice under flooded condition, *Soil Biol. Biochem.* 39(8):1897-1906.
- NIAS (National Institute of Agricultural Science and Technology). 1988. Methods of soil chemical analysis. National institute of agricultural science and technology, RDA, Suwon, Korea.
- NIAS (National Institute of Agricultural Science and Technology). 1999. Fertilization standard of crop plants. National institute of agricultural science and technology, RDA, Suwon, Korea.
- Park, H.S., K.H. Lee, H.K. Oh, C.W Kim, H.J. Kang, S.H. Choi, and H.M Shin. 2020. Effect of organic materials amendment on growth of jujube (*Zizyphus jujuba* Mill.) and soil chemical properties. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 53(3):277-286.
- Parkin, T.B. and T.C. Kaspar. 2006. Nitrous oxide emissions from corn – soybean systems in the Midwest. *J Environ Qual.* 35(4):1496-1506.
- RDA (Rural Development Administration). 2012. Standard investigation methods for agriculture experiment. p. 313-756.
- Rolston, D.E. 1986. Gas flux. *Methods of soil analysis: Part 1-Physical and mineralogical methods.* sssabookseries. p. 1103-1119.
- Searle, P.L. 1984. The Berthelot or indophenol reaction and its use in the analytical chemistry of nitrogen. A review. *Analyst.* 109(5):549-568.
- Sehy, U., R. Ruser, and J.C. Munch. 2003. Nitrous oxide fluxes from maize fields: relationship to yield, site-specific fertilization, and soil conditions. *Agric. Ecosyst. Environ.* 99(1-3):97-111.
- 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.
- Singh, S., J.S. Singh, and A.K. Kashyap. 1999. Methane flux from irrigated rice fields in relation to crop growth and N-fertilization. *Soil Biol. Biochem.* 31:1219-1228.
- Sozanska, M., U. Skiba, and S. Metcalfe. 2002. Developing an inventory of N₂O emissions from British soils. *Atmos Environ.* 36(6):987-998.
- Wolf, B. 1944. Determination of nitrate, nitrite, and ammonium nitrogen rapid photometric determination in soil and plant extracts. *Ind. Eng. Chem. Res.* 16(7):446-447.