

Article

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2022.55.4.261>

pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

Effects of Combined Application of Organic and Inorganic Fertilizers on Mitigating Greenhouse Gas Emissions and Improving Maize Productivity in a Field Condition

Hyerin An¹, Seungjun Bae², Yeomyeong Lee¹, Juhee Lee¹, Seung Ho Jeon³, and Sang Yoon Kim^{3*}

¹Graduate Student, Department of Agricultural Chemistry & Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

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

³Professor, Department of Agricultural Life Science, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

*Corresponding author: sykim@snu.ac.kr

ABSTRACT

Received: August 9, 2022

Revised: August 30, 2022

Accepted: September 1, 2022

Edited by

DongCheol Seo,
Gyeongsang National University,
Korea

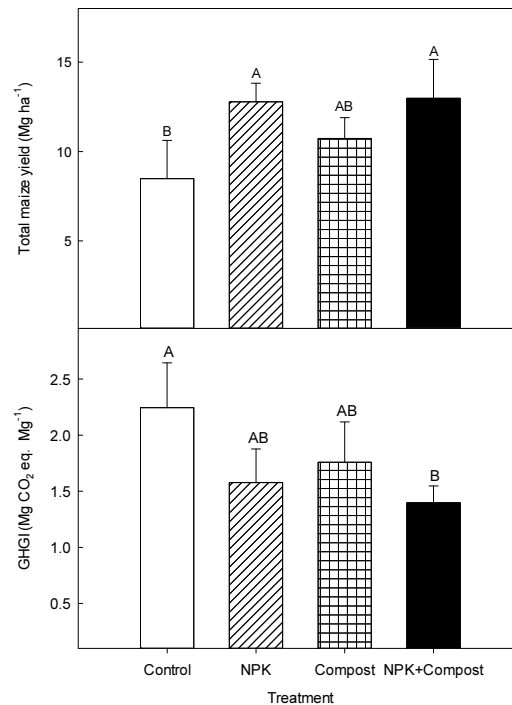
ORCID

Sang Yoon Kim
<https://orcid.org/0000-0003-4914-3080>

Nitrogen (N) is one of the most important elements in agriculture. However, excessive fertilization may cause serious global environmental issues including increasing greenhouse gases (GHGs) in agricultural environments. Combination of organic and inorganic fertilizations may enhance nutrient holding capacity and productivity, mitigation potential N losses during cultivation. However, these effects remain unclear. We investigated GHGs emissions, their intensity (GHGI), soil characteristics, and productivity in a maize field under different N fertilization regimes with equivalent N rate including NPK (urea), Compost (compost), NPK+Compost (urea and compost) except control (no fertilizer). Inorganic fertilizations significantly stimulated N₂O emission as compared to the control. Compost and NPK+Compost treatments effectively mitigated N₂O emissions by ca. 50% as compared to NPK treatment (0.8 g m⁻²). CO₂ and CH₄ emissions were not mainly influenced or negligible by N fertilizations during cultivation. Overall soil qualities were improved by compost and NPK+Compost applications including extractable NH₄⁺-N and CEC. The GHGI, a sustainable indicator, was lowest in NPK+Compost treatment, suggesting the promising N management practice. Conclusively, combined amendments of inorganic and organic fertilizers could be a better way to reduce potential N losses and increase productivity and soil quality in maize cultivated soils.

Keywords: Combined incorporation, Compost, Corn, Greenhouse gas flux, Nitrogen, Organic matter





- The GHGI, a sustainable indicator, was lowest in NPK+Compost treatment, suggesting the promising N management practice.
- Combined amendments of inorganic and organic fertilizers could be a better way to reduce potential N losses and increase productivity and soil quality in maize cultivated soils.

Total maize productivity and greenhouse gas intensity under different N fertilization regimes.

Introduction

산업혁명 이후 세계 인구의 급격한 증가로 인해 식량 부족 문제가 심화되고 있다 (Prasad, 2013). 하지만 1990년대, 화학공정을 통해 제조된 무기질 비료가 개발됨에 따라 작물 생산량을 대폭 증가시키는 것이 가능해졌다. 무기질 비료는 근대의 집약적 농업과 더불어 요구가 점점 높아지며 소비량 또한 매년 증가하고 있는 추세이다 (FAO, 2019). 특히, 그 중에서도 식물의 필수 원소로서 작물의 생산성 증진에 가장 중요한 역할을 하는 질소비료가 과도하게 사용되고 있으며 (Novoa and Loomis, 1981; Mengel et al., 2006), 전 세계 수요 또한 지속적으로 증가할 것으로 추산된다 (IFA, 2011). 이러한 질소 비료는 질소 순환 과정 중 암모니아 및 아산화질소 등의 형태로 대기 중에 배출되며 이는 주요한 질소 손실 경로로써 (Harrison and Webb, 2001), 비료와 에너지를 낭비하고, 토양 및 기후에 부정적인 영향을 미친다. 특히 아산화질소는 농업 활동을 통해 전체배출량의 약 60% (~6 Tg N₂O-N)가 배출되며 (Reay et al., 2012), 1800년 이전 대기 중 농도가 270 ppb에서 최근 330 ppb로 20% 증가하였다 (Tian et al., 2019). 또한, 아산화질소는 이산화탄소보다 약 298 - 310배 높은 지구 온난화 지수를 가지며, 대기 잔류기간이 길기 때문에 지구온난화에 대한 기여도가 높은 온실가스다 (Bordoloi et al., 2018). 따라서 농경지에서 질소 비료 사용에 따른 작물 생육을 증진시키면서, 기후 변화 등과 같은 환경 부하를 완화시키기 위한 합리적인 시비 방안의 마련이 시급하다.

다양한 토양 관리 방안 중 간편한 무기질 비료와 유기 비료의 혼합 사용이 주목받고 있다 (Amujoyegbe et al., 2007; Yang et al., 2020; Liu et al., 2021). 유기 비료는 무기질 비료에 비해 성분 함량은 다소 부족하지만, 다량의 유기물을 함유하고 있어 토양의 물리·화학·생물학적 특성을 개선하고, 양분이 서서히 분해되어 작물에 지속적인 비효를 나타

낼 수 있다 (Ros et al., 2006; Diacono and Montemurro, 2011). 또한, 유기물의 투입은 토양에서 양이온치환용량 (CEC)을 증가시켜, 작물 재배기간 중 질소 손실을 효과적으로 저감시킬 수 있다 (Liu et al., 2021). Lee et al. (2020)의 최근 연구에 따르면, 상추 재배지에서 무기질 질소비료 대비 퇴비의 사용은 느린 무기화 속도로 인해 온실가스인 아산화질소 배출량을 효과적으로 저감할 수 있으나, 수량 증수효과는 다소 낮은 것으로 평가된 바 있다. 따라서 유기비료와 무기질 비료를 혼용할 경우, 무기질 비료의 높은 양분 함량과 유기질 비료의 양분 보유력 증진 효과가 상호 보완적으로 작용하여 아산화질소 배출과 같은 질소의 손실을 줄이고, 작물의 생산성 증진에도 긍정적인 효과를 나타낼 것으로 판단되나, 이에 대한 연구는 여전히 부족한 실정이다.

옥수수 (*Zea mays* L.)는 밀, 벼와 더불어 세계 3대 작물 중 하나이며, 사료 및 바이오에너지 생산 등 다양한 용도로 폭넓게 활용되고 있다 (Heo et al., 2017). 특히 국내에서는 2018년 기준으로 약 15천 ha (KOSIS, 2019) 면적에서 재배되고 있으며, 농가 소득작물로도 수익성이 비교적 높은 작물 중 하나이다. 일반적으로 옥수수는 비료 흡수능력이 좋고, 비료 사용에 따른 수량 증수 효과가 큰 편이어서 (Kang et al., 1985) 다른 작물에 비해 상대적으로 과다시비에 노출될 수 있기 때문에, 합리적이고 지속적인 비료 관리가 필요한 실정이다. 최근 옥수수 재배지를 중심으로 유무기질 혼용처리에 따른 아산화질소 배출량 저감 및 수량 증진 효과에 대한 평가가 이루어진 바가 있으나 (Yang et al., 2020), 전체 온실가스를 포함한 평가는 여전히 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 옥수수 재배기간 중 유무기질 비료 혼용처리가 온실가스의 배출량 특히 아산화질소 배출량 저감 및 옥수수의 생산성 증수 효과를 평가하기 위해 작기 중 1) 온실가스 (아산화질소, 이산화탄소 및 메탄) 배출량 평가, 2) 옥수수의 생육 및 생산성 평가, 3) 토양 화학성 변화를 조사하여, 질소의 손실을 최소화하고 작물의 생산성과 토양질을 높이는 합리적인 시비 방법을 찾고자 하였다.

Materials and Methods

토양시료 채취 및 재배 관리 본 연구는 전라남도 순천시 석현동에 위치한 순천대학교 시험 연구 포장에서 수행되었으며, 공시토양의 이화학적 특성은 Table 1과 같다. 공시작물로는 옥수수 (*Zea mays* L.)를 선발하였으며, 2020년 6월 2일부터 2020년 8월 20일까지 총 80일간 재배하였다. 재배기간 중 토양 피복은 비닐 멀칭하였으며, 재식거리는

Table 1. Chemical properties of soils before the experiment.

Parameters	Soil used
pH (H ₂ O, 1:5)	7.82 ± 0.04
EC (dS m ⁻¹)	0.39 ± 0.01
Total C (g kg ⁻¹)	7.47 ± 0.51
Total N (g kg ⁻¹)	0.57 ± 0.05
C/N ratio	13.2 ± 0.69
Available P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	47.1 ± 0.80
Exch. cations (cmol _c kg ⁻¹)	
K ⁺	0.18 ± 0.15
Ca ²⁺	3.80 ± 0.11
Mg ²⁺	0.24 ± 0.01
Soil texture	Silt loam

20 × 30 cm로, 한 시험구 당 8주씩 정식하였다. 물 관리는 옥수수 정식 후 1주일간 2-3일 간격으로 땅이 충분히 젖을 만큼 공급하여 주었으며, 이후에는 충분한 강우가 내려 대부분의 기간 동안 자연 강우에 의존하였다 (Fig. 1).

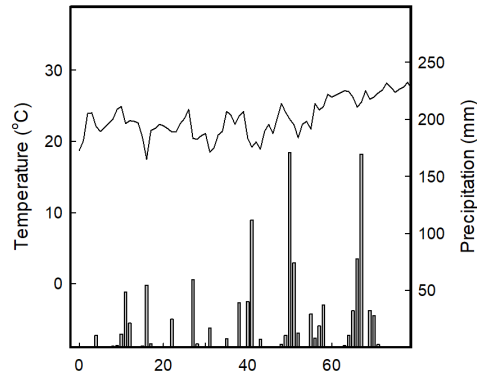


Fig. 1. Changes in air temperature and precipitation during cultivation period.

시험 처리구 시험구는 완전 임의배치로 3반복 처리하였으며, 처리구는 비료 처리를 하지 않은 Control (무처리), 무기질 비료만 100% 처리한 NPK (무기질단용), 퇴비를 100% 처리한 Compost (유기질단용), 무기질 비료와 유기비료를 1:1 비율로 처리한 NPK+Compost (유무기질 혼용)로 각각 설정하였다. 모든 처리구는 농촌진흥청 국립농업과학원 작물별 비료사용처방 (NIAST, 1999)에 준하여 N-P₂O₅-K₂O (158-30-63 kg ha⁻¹)를 토양에 투입하였다. 각 비료의 질소 함량을 고려하여 동일량이 투입될 수 있도록 사용량을 설정하였으며, 기비와 추비로 각각 79 kg N ha⁻¹씩 분시하였다. 단, 퇴비처리구의 경우 전량 기비로 사용하였다. 시험에 사용된 가축분 퇴비는 시판 제품을 구매하여 사용하였으며, 화학적 특성은 Table 2와 같다. 단, 처리구 중 NPK 처리구 대비 인산과 칼리가 부족한 경우, 무기질 비료로 보충하여 동일한 시비량이 되도록 맞춰 주었다.

Table 2. Characteristics of manure compost used.

Parameters	Soil used
pH (1:10)	7.53 ± 0.02
Total C (g kg ⁻¹)	268.0 ± 3.2
Total N (g kg ⁻¹)	19.7 ± 1.4
C/N ratio	13.7 ± 1.2
2 M KCl NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹)	1,089 ± 83
Total P (g kg ⁻¹)	2.75 ± 0.04
Total K (g kg ⁻¹)	4.3 ± 0.7
Total S (g kg ⁻¹)	5.3 ± 0.1
Moisture content (% wt wt ⁻¹)	13.9 ± 0.26

온실가스 (N₂O, CO₂, CH₄) 배출량 조사 옥수수 재배기간 중 배출되는 온실가스는 Static closed chamber method (Lee et al., 2020)을 이용하여 포집하였다. 주 2회 온실가스 배출량의 평균값을 나타내는 오전 10시에서 11시 사이에 30분간 원통형 플라스틱 챔버를 이용하여 각 처리구의 옥수수 주와 주 사이의 토양에 5 cm 깊이로 설치하여

포집하였다. 이때 3 way stopper를 부착한 60 mL 주사기를 이용하여 가스 시료를 채취하였다. 동시에 챔버 내 온도를 온도계로 측정하였다. 포집한 가스 시료는 가스크로마토그래피 (GC-2014, Shimadzu, Japan)를 이용하여 정량하였다 (Choi et al., 2020; Lee et al., 2020, 2021a).

재배기간 중 배출되는 온실가스의 배출량은 아래 Eq. 1을 이용하여 계산하였다 (Rolston, 1986).

$$\text{N}_2\text{O}, \text{CO}_2, \text{CH}_4 \text{ 배출량 (mg m}^{-2} \text{ hr}^{-1}) = \rho \times (V/A) \times (\Delta c/\Delta t) \times (273/T) \quad (\text{Eq. 1})$$

ρ : 해당 가스 밀도 (mg m⁻³) V : 챔버 부피 (m³)
 A : 챔버 표면적 (m²) Δc : 시료 채취 전과 후의 농도차 (μL L⁻¹)
 Δt : 시료 채취 시간 (hr) T : 273 + 측정시간 중 평균온도 (°C)

옥수수 재배기간 중 배출되는 총 온실가스의 배출량은 아래 Eq. 2를 이용하여 평가하였다 (Singh et al., 1999).

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

F_i : i 번째 시료 채취기간 내 일 가스 배출량
 D_i : i 번째 기간 내 시료 채취 간격 일수
 n : 시료 채취 간격

총 옥수수 재배기간 중 배출된 전체 온실가스(아산화질소, 이산화탄소, 메탄) 배출량에 아래 지구온난화지수를 곱하여 CO₂ 당량으로 환산하였다 (Eq. 3) (Watson et al., 1996).

$$\text{Total GWP (kg CO}_2 \text{ eq. ha}^{-1}) = (310 \times \text{N}_2\text{O}) + (1 \times \text{CO}_2) + (21 \times \text{CH}_4) \quad (\text{Eq. 3})$$

토양 화학성, 옥수수 생육 및 생산성 조사 공시 및 수확 후 토양시료의 분석을 위해 그늘에서 건조한 토양을 2 mm 체에 통과시킨 후 화학성 분석에 사용하였다. 토양과 증류수를 1:5 비율로 침출하여 pH meter (Orion stat A212, Thermo Scientific, Indonesia)로 토양 산도를 측정하였고, 같은 용액을 이용하여 전기전도도 (electrical conductivity) (Orion star A212, Thermo Scientific, Indonesia)를 측정하였다. 토양 내 총 탄소와 질소함량은 원소분석기 (EA2400II, PERKIN ELMER, USA)를 이용하여 분석하였고, 유효인산 분석 시 Lancaster법을 이용하여 추출 및 분석하였다. 치환성 양이온은 1 N 암모늄아세테이트 (NH₄OAc) 용액으로 추출하여 ICP-OES (inductively coupled plasma-optical emission spectrophotometer, Perkin Elmer Model OPTIMA 4300DV, USA)를 이용하여 정량 분석하였다. 양이온치 환용량은 Brown 간이법을 이용하여 분석하였으며, 토양 내 암모니아태 질소는 습도 5 g을 2 M KCl 용액으로 30분간 진탕 후 여과 (ADVANTEC, No.2)한 침출액을 Indophenol-blue 비색법을 이용하여 정량하였다 (Lee et al., 2021b).

옥수수 생육을 조사하기 위해 재배기간 중 생육 조사를 정식 40일 후 실시하였으며, 옥수수의 엽수, 초장, 경태를 측정하였다. 옥수수의 생산성을 조사하기 위하여 옥수수 이삭을 수확한 후 건조기 (dry oven)에 넣고 70°C, 72시간 건조 후 건물중 (dry weight)을 측정하였다.

통계분석 본 연구에서는 SAS package (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)를 사용하여, 일원 분산분석 (one-way ANOVA)을 수행하였다. 처리간 유의차가 확인될 경우 사후 분석을 수행하였으며, 이때 Tukey’s test를 이용하여 5% ($p \leq 0.05$) 확률의 유의수준에서 처리간 효과를 분석하였다.

Results and Discussion

온실가스 (N₂O, CO₂, CH₄) 배출량 옥수수 재배기간 동안 질소비료 처리에 따른 시기별 N₂O 배출과 총배출량을 조사한 결과, 시기별 N₂O 배출은 시비 직후 크게 증가하는 경향을 보였다(Fig. 2). 특히, 기비 처리 후 약 10일이 경과한 시점부터 전반적으로 배출량이 증가하는 경향을 보였으며, 추비 직후 (이양 후 28일) 다소 증가하는 경향을 보였다. 이후 배출량은 크게 감소하여 수확기까지 매우 낮은 배출량을 유지하였다. 일반적으로, 토양에서 N₂O는 환원

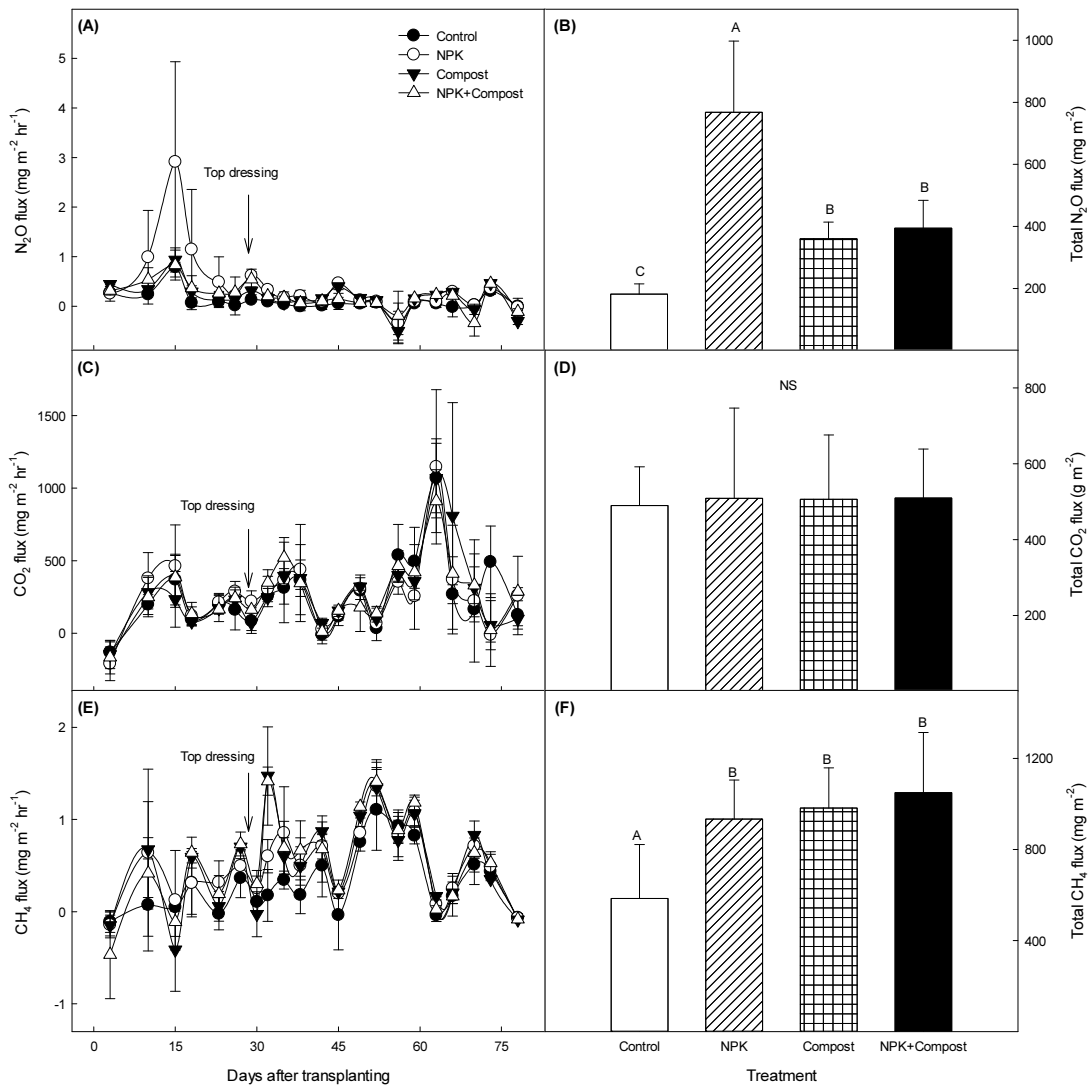


Fig. 2. Greenhouse gas emissions (A, C, E) and total fluxes (B, D, F) under different N fertilization regimes in maize cultivated soils during cultivation. Vertical bars represent standard deviations ($n = 3$). NS means not significant. Different letters for each bar indicate significant difference at $p \leq 0.05$ according to Tukey’s test.

조건에서 탈질과정과 질산화과정을 통해 배출되는 것으로 알려져 있으며 (Cai et al., 1997), 다양한 환경요인 중 기후, 토양온도, 수분함량, 무기태 질소함량 등과 밀접한 관계가 존재한다 (Kim et al., 2010, 2014, 2018; Butterbach-Bahl et al., 2013; Lee et al., 2020). NPK 처리구의 경우 전체 처리구에 비해 옥수수 재배 초기에 N_2O 일 배출량이 가장 큰 폭의 증가를 보였다. 무기질 질소 비료의 빠른 무기화로 인해 토양 내 무기태 질소 공급이 증가되어, 가장 높은 N_2O 배출량을 보인 것으로 판단된다. 혼용처리구와 퇴비 단독 처리구에서는 비교적 안정된 유기태 질소 형태인 퇴비의 투입으로 인해 토양 내 유기물 분해가 상대적으로 더디게 진행되어 NPK 처리구와 비교하여 N_2O 배출량이 크게 저감될 수 있었던 것으로 판단된다. 또한, 토양에 무기질 비료와 유기물을 함께 사용하면 토양에 더 많은 질소를 흡착시킬 수 있어 질소 손실을 효과적으로 줄일 수 있다 (Ren et al., 2014). 따라서 옥수수 재배기간 동안 총 N_2O 의 배출량이 NPK+퇴비 처리구에서 가장 낮았던 것은 아마도 퇴비 투입으로 인해 토양 내 무기태 질소 보유량을 증진시켜 N_2O 로 손실되는 것을 유의하게 저감시킨 것으로 판단된다.

총 N_2O 배출량의 경우 무처리에 비해 시비처리 후 전반적으로 증가하였으며, 특히 NPK 처리구에서 가장 높은 배출을 보였다. 흥미롭게도 무처리를 제외한 모든 처리구에서 동량의 질소가 투입되었음에도 유기퇴비 단용과 유무기질 혼용 처리구에서 N_2O 배출량이 $360 - 394 \text{ mg m}^{-2}$ 수준으로 조사되었다. 이 결과를 통해 NPK 처리구 (768 mg m^{-2})와 비교하여 혼용처리의 경우 약 49% 가량 배출량 저감 효과가 있는 것으로 확인할 수 있었으며, 이는 유기퇴비 단용 처리와 비교하더라도 통계적 유의차가 없는 것으로 조사되었다. 따라서 옥수수 재배지에서 유무기질 비료의 혼용 처리는 작기 중 N_2O 배출량을 효과적으로 저감할 수 있는 합리적인 시비 방안인 것으로 평가하였다.

옥수수 재배기간 동안 질소비료 처리에 따른 CO_2 의 배출을 평가한 결과, 시기별로 모든 처리구에서 비슷한 경향으로 배출되었으며, 총배출량을 평가한 결과 또한 처리 간 유의한 차이가 없는 것으로 조사되었다. 동일 재배기간 중 질소비료 처리에 따른 CH_4 의 배출을 평가한 결과, 시기별로 비슷한 경향으로 배출된 것을 확인할 수 있었다. 총배출량을 평가한 결과 무처리에 비해 시비처리에서 유의하게 증가하였으나, 총 온실가스 배출 증가에 크게 기여하지 않는 것으로 조사되었으며, 시비처리 간에는 유의한 차이가 없는 것으로 조사되었다.

질소비료 처리에 따른 총 온실가스 배출량을 평가하기 위하여 총 온실가스 배출량을 지구온난화지수 (global warming potential, GWP)로 나타냈다 (Fig. 3). 지구온난화지수란 온실가스 CO_2 한분자와 비교해 각각의 온실가스가

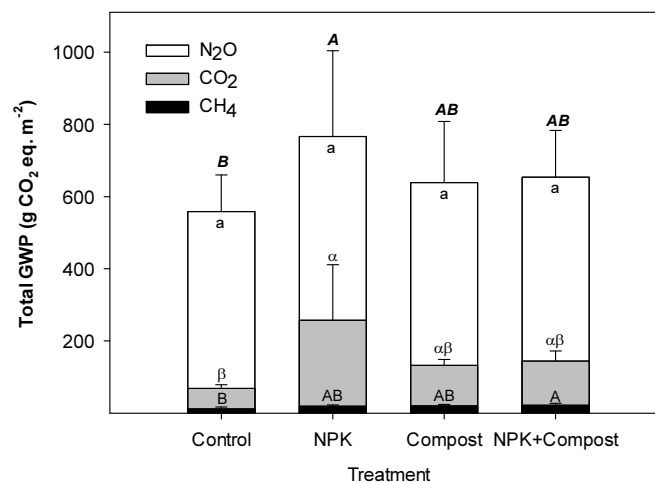


Fig. 3. Total global warming potential (GWP) under different N fertilization regimes in maize field during cultivation. Different letters for each bar indicate significant difference at $p \leq 0.05$ according to Tukey's test.

지구온난화에 기여하는 영향 정도를 나타내는 값으로, 전체 온실가스 배출량을 평가하기 위하여 각각의 GWP 지수 ($\text{CO}_2 = 1$, $\text{CH}_4 = 21$, $\text{N}_2\text{O} = 310$)를 곱한 뒤 이를 합하여 나타낸다 (Watson et al., 1996). 그 결과, 무처리에 비해 시비 처리에서 유의하게 증가한 값을 보였으며, 특히 NPK 처리구에서 가장 높았다. 하지만 NPK+퇴비 처리구에서는 NPK 처리구에 비해 약 15% 낮은 값을 보였다. 이는 유기퇴비와 무기질 비료의 혼용 처리가 NPK보다 N_2O 의 배출량을 크게 줄여 총 온실가스 배출량 또한 감소하였기 때문으로 보인다. 최근 메타분석 연구결과에 따르면, 무기질 질소 비료 단독사용에 비해, 유무기질 비료 혼용은 총 온실가스 배출량을 28 - 35% 저감할 수 있는 것으로 보고된 바 있다 (Liu et al., 2021). 본 연구에서 기존 연구에 비해 다소 낮은 온실가스 배출 저감 효율을 보였는데, 이는 퇴비 혼합비율 및 퇴비 내 유기물 함량, 토양 특성 등의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

옥수수 생육 및 생산성 시비처리에 따른 옥수수의 재배기간 중 엽수, 초장, 경태 등 전반적인 생육을 평가한 결과, 무처리와 비교하여 시비처리는 옥수수의 전반적인 생육을 개선시키는 것으로 조사되었다 (Fig. 4). 특히, NPK+

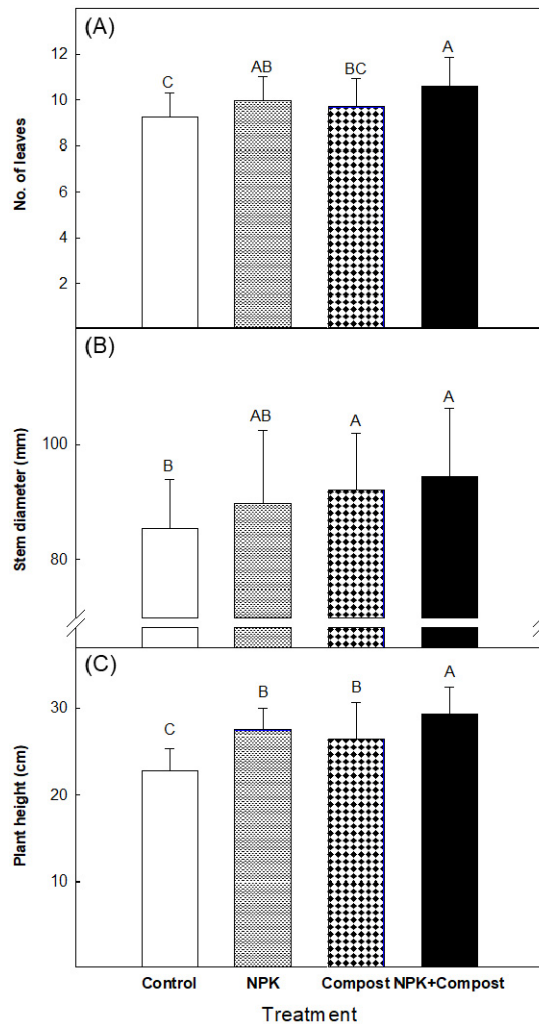


Fig. 4. Growth characteristics of maize including number of leaves (A), stem diameter (B), and plant height (C) under different N fertilization regimes at 40 days after transplanting. Vertical bars represent standard deviations ($n = 3$). Different letters for each bar indicate significant difference at $p \leq 0.05$ according to Tukey's test.

퇴비 처리구에서는 실제 무기질 비료 투입량이 NPK 처리구에 비해 적었음에도 불구하고, 세 항목 모두 가장 좋은 생육을 보였다. 이는 첫째, 유기질 비료 혼용을 통해 더 장기간 질소가 작물로 공급될 수 있는 효과가 나타난 점 (Liu et al., 2021), 유기물의 공급으로 인해 토양 내 유기물 함량 증진으로 인한 미생물 활성과 다양성 증진으로 인한 양분순환 개선 (Watts et al., 2010) 및 토양 구조 개선 및 수분 보유력 등이 개선되었기 때문인 것으로 사료된다 (Naved et al., 2014).

옥수수 생산량을 조사한 결과, 무처리에 비해 시비처리 했을 때 유의하게 증가하는 것을 볼 수 있었고, NPK+퇴비 처리구에서 가장 높은 생산성을 보였다 (Fig. 5A). 특히, NPK 처리구와 비교하였을 때도 유의한 차이가 없을 정도이며, 혼용 처리를 통해 무기질 비료에 버금가는 수량을 충분히 얻을 수 있다는 점에서 시사하는 바가 크다. 따라서 무기질 비료와 유기퇴비의 혼용 처리는 옥수수 생산성 증진에 긍정적인 효과를 줄 수 있을 것으로 판단된다.

질소비료 시비 방법에 따른 옥수수의 단위 수량당 총 온실가스 잠재능을 평가하기 위해 옥수수 단위수량당 온실가스 배출지수 (GWP per yield)라는 지표를 사용하여 지속가능성에 대한 효과를 비교 분석하였다 (Choi et al., 2020; Lee et al., 2020, 2021b). 옥수수 단위 수량당 온실가스 배출지수의 경우 NPK+퇴비에서 가장 낮은 값을 나타냈다. 이는 무처리에 비해 38%, 동량 질소 처리한 NPK 처리구에 비해 11% 가량 낮은 값이었다 (Fig. 5B). 따라서 유무기질 비료의 혼용 처리가 온실가스 배출량을 최소화하면서 최대 수량을 확보할 수 있는 합리적인 시비 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 재배 작물에 따라서 추천 시비량과 표준 재배방식이 다를 수 있고, 작물 자체의 질소 흡수량,

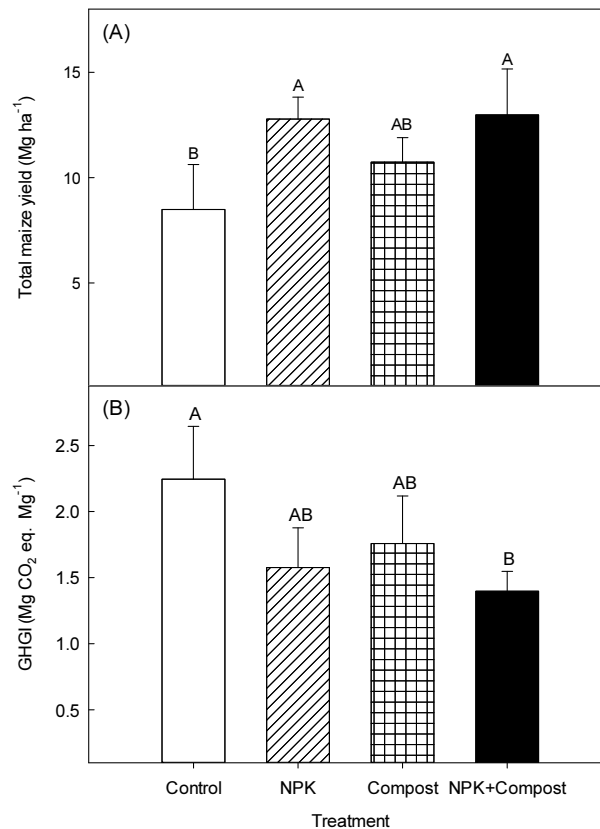


Fig. 5. Maize productivity (A) and greenhouse gas intensity (GHGI) (B) under different N fertilization regimes. Vertical bars represent standard deviations ($n = 3$). Different letters for each bar indicate significant difference at $p \leq 0.05$ according to Tukey's test.

이용효율 등의 생리적인 차이로 인해 혼용처리 효과의 차이가 다소 차이가 있을 것으로 판단된다. 다만, 최근 Liu et al. (2021)의 메타 분석 연구에 따르면 혼용 효과의 경우 비료사용량, 혼합비율, 유기질원의 종류 등에 의해서 효과가 더 크게 나타날 수 있는 것으로 분석한 바 있다. 따라서 추후 유무기질 비료 혼용 방식에 따른 세부 효과에 대한 검증 연구가 더 필요할 것으로 사료된다.

토양 화학성 옥수수 수확 후 토양의 화학성을 조사한 결과, 퇴비를 함께 처리한 모든 처리구에서 전반적인 화학성이 개선되는 경향을 보였다(Table 3). 퇴비와 같은 유기물 사용을 통해 토양 내 총 탄소함량이 유의하게 증가하였으며, 이로 인해 관련 인자들 특히 총 질소 함량, 암모니아태 질소, 양이온 치환용량 등이 유기물 무시용구에 비해 개선되는 것으로 조사되었다. 일반적으로 퇴비사용은 유기물을 공급해주고, 토양 내 양이온 치환용량을 향상시켜 토양 완충 능력과 양분 보유능력 및 수분 보유능력 등을 개선시킨다(Roba, 2018). 따라서 유무기질 비료 혼용 처리는 토양 전반적인 화학성 특히 양이온 치환용량을 개선시켜 질소 손실을 억제하고, 토양질 개선을 통해 농경지에서 온실가스 배출량을 저감하고, 작물 수량을 증진할 수 있는 합리적인 시비방법이 될 수 있을 것으로 기대한다.

Table 3. Chemical properties of soils after the harvesting.

Parameters	Control	NPK	Compost	NPK+Compost
pH (H ₂ O, 1:5)	8.03 a [†]	7.85 a	7.87 a	7.94 a
EC (dS m ⁻¹)	0.59 a	0.54 a	0.54 a	0.53 a
Total C (g kg ⁻¹)	7.34 a	6.35 a	9.23 c	8.01 b
Total N (g kg ⁻¹)	0.58 b	0.50 b	0.79 a	0.66 a
C/N ratio	12.7 a	13.4 a	12.2 a	12.2 a
NH ₄ ⁺ -N (mg kg ⁻¹)	1.66 b	1.72 b	1.85 ab	1.94 a
Available P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	52.0 b	46.5 b	75.5 a	59.2 b
Exch. cations (cmol _c kg ⁻¹)				
Ca ²⁺	4.36 b	4.36 b	4.43 b	4.68 a
Mg ²⁺	0.79 a	0.63 ab	0.78 a	0.57 b
K ⁺	0.11 a	0.33 a	0.25 a	0.17 a
Cation exchangeable capacity (cmol _c kg ⁻¹)	9.72 b	9.93 b	10.1 a	10.3 a

[†]Different letters for each row showed a significant difference at $p \leq 0.05$ according to Tukey's test.

Conclusions

옥수수 재배 토양에서 NPK+퇴비 혼용 처리는 무기질 비료 NPK 단독 처리에 비해 N₂O의 배출량 또한 약 50% 정도 감소시켜 전체적인 온실가스의 배출을 저감하는 우수한 효과를 보였다. 질소비료 처리에 따른 CO₂의 배출량에는 유의한 차이가 나타나지 않았고, CH₄의 경우 무처리에 비해 시비처리 했을 때 유의하게 증가하였으나, 시비처리 간에는 유의한 차가 나타나지 않았다. 옥수수의 생육을 조사한 결과 NPK+퇴비 처리구에서 옥수수의 엽수, 초장, 경태 등의 생육이 개선되었고, 생산성 또한 가장 높은 경향을 보였다. 단위 수량 당 온실가스 배출 잠재능을 평가한 결과 NPK+퇴비 처리구에서 온실가스 배출량을 가장 효과적으로 줄이면서 높은 생산성을 가질 수 있는 합리적인 시비 방법으로 평가되었다. 토양의 화학성을 조사한 결과 퇴비를 함께 사용한 처리구에서 암모니아태 질소 및 양이온 치환용량 등의

전반적인 토양 화학성이 개선된 것을 확인할 수 있었다. 따라서 퇴비와 같은 유기비료와 무기질 비료의 혼용 처리는 질소 손실을 줄이고, 생산성과 토양 질을 개선시키는 합리적인 시비 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This work was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science and Technology Development (Project No. PJ015136012022)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Amujoyegbe, B.J., J.T. Opabode, and A. Olayinka. 2007. Effect of organic and inorganic fertilizer on yield and chlorophyll content of maize (*Zea mays* L.) and sorghum *Sorghum bicolor* (L.) Moench. *Afr. J. Biotechnol.* 6(16): 1869-1873.
- Bordoloi, N., K.K. Baruah, and A.J. Thakur. 2018. Effectiveness of plant growth regulators on emission reduction of greenhouse gas (nitrous oxide): An approach for cleaner environment. *J. Clean Prod.* 171:333-344.
- 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. 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.
- Choi, S., J. Lee, Y. Lee, P.J. Kim, J.S. Cho, Y.H. Cheong, Y.S. Rim, and S.Y. Kim. 2020. The effects of ethephon application on suppressing methane emission and stimulating rice productivity in a rice paddy soil: A pot experiment. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 53:489-501.
- Diacono, M. and F. Montemurro. 2011. Long-term effects of organic amendments on soil fertility. p. 761-786. In E. Lichtfouse et al. (ed.) *Sustainable Agriculture Volume 2*. Springer, Dordrecht, Netherlands.
- FAO. 2019. *World fertilizer outlook and trends to 2022*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Harrison, R. and J. Webb. 2001. A review of the effect of N fertilizer type on gaseous emissions. *Adv. Agron.* 73:65-108.
- Heo, T.H., Y.J. Choi, S.J. Sa, H.W. Kang, S.Y. Kim, H.B. Lee, S.I. Park, J.B. Lee, J. Lee, and J.K. Lee. 2017. Changes in ear and growth characteristics of the waxy corn cultivar of ‘Mibaek 2’ at different sowing times. *J. Agric., Life Environ. Sci.* 29:172-177.
- IFA. 2011. www.fertilizer.org. International Fertilizer industry Association.
- Kang, Y.K., S.U. Park, K.Y. Park, H.G. Moon, and S.J. Lee. 1985. Effects of compost, rate and split application of nitrogen on growth and yield of sweet corn. *Korean J. Crop Sci.* 30:140-145.
- Kim, G.Y., J. Gutierrez, H.C. Jeong, J.S. Lee, M.D.M. Haque, and P.J. Kim. 2014. 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, 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, 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.
- KOSIS. 2019. https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_2KAA405. Korean Statistical Information Service.
- Lee, J.H., S.W. Choi, Y.M. Lee, and S.Y. Kim. 2021b. Impact of manure compost amendments on NH₃ volatilization in rice paddy ecosystems during cultivation. *Environ. Pollut.* 288:117726.
- Lee, Y.M., S.E. Lee, J.H. Lee, S.W. Choi, and S.Y. Kim. 2020. Impacts of different nitrogen fertilization on greenhouse gas emissions and lettuce productivity in upland soils during cultivation. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 53(4):600-613.
- Lee, Y.M., S.W. Choi, J.H. Lee, C.H. Lee, P.H. Yi, S.T. Jeong, and S.Y. Kim. 2021a. Characteristics of distribution and decomposition of organic matter in soils cultivated with various fruits and vegetables in plastic film house fields. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 54(4):401-412.
- Liu, B., X. Wang, L. Ma, D. Chadwick, and X. Chen. 2021. Combined applications of organic and synthetic nitrogen fertilizers for improving crop yield and reducing reactive nitrogen losses from China's vegetable systems: A meta-analysis. *Environ. Pollut.* 269:116143.
- Mengel, K., B. Hütsch, and Y. Kane. 2006. Nitrogen fertilizer application rates on cereal crops according to available mineral and organic soil nitrogen. *Eur. J. Agron.* 24(4):343-348.
- Naveed, M., P. Moldrup, H.J. Vogel, M. Lamande, D. Wildenschild, M. Tuller, and L.W. deJonge. 2014. Impact of long-term fertilization practice on soil structure evolution. *Geoderma* 217:181-189.
- NIAST. 1999. Fertilization standard of crop plants. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- Novoa, R. and R.S. Loomis. 1981. Nitrogen and plant production. *Plant Soil* 58(1):177-204.
- Prasad, R. 2013. Fertilizer nitrogen, food security, health and the environment. *Proc. Indian Natl. Sci. Acad.* 79:997-1010.
- Reay, D.S., E.A. Davidson, K.A. Smith, P. Smith, J.M. Melillo, F. Dentener, and P.J. Crutzen. 2012. Global agriculture and nitrous oxide emissions, *Nat. Clim. Change* 2(6):410-416.
- Ren, T., J. Wang, Q. Chen, F. Zhang, and S. Lu. 2014. The effects of manure and nitrogen fertilizer applications on soil organic carbon and nitrogen in a high-input cropping system. *PLoS ONE* 9(5):e97732.
- Roba, T.B. 2018. Review on: The effect of mixing organic and inorganic fertilizer on productivity and soil fertility. *Open Access Library J.* 5(06):1.
- Rolston, D.E. 1986. Gas flux. p. 1103-1119. In A. Klute (ed.) *Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. SSSA Book Series, Madison, WI, USA.
- Ros, M., S. Klammer, B. Knapp, K. Aichberger, and H. Insam. 2006. Long-term effects of compost amendment of soil on functional and structural diversity and microbial activity. *Soil Use Manage.* 22(2):209-218.
- Singh, S., J.S. Singh, and A.K. Kashya. 1999. Methane flux from irrigated rice fields in relation to crop growth and N-fertilization. *Soil Biol. Biochem.* 31(9):1219-1228.
- Tian, H., J. Yang, R. Xu, C. Lu, J.G. Canadell, E.A. Davidson, R.B. Jackson, A. Arneeth, J. Chang, and P. Ciais. 2019. Global soil nitrous oxide emissions since the preindustrial era estimated by an ensemble of terrestrial biosphere models: Magnitude, attribution, and uncertainty, *Global Change Biol.* 25(2):640-659.
- Watson, R.T., M.C. Zinyowera, R.H. Moss, and D.J. Dokken. 1996. *Climate change 1995 - Impacts, adaptations and mitigation of climate change: Scientific-technical analyses*. p. 880. Cambridge University Press, New York, USA.
- Watts, D.B., H.A. Torbert, Y. Feng, and S.A. Prior. 2010. Soil microbial community dynamics as influenced by composted dairy manure, soil properties, and landscape position. *Soil Sci.* 175:474-486.
- Yang, Q., P. Liu, S. Dong, J. Zhang, and B. Zhao. 2020. Combined application of organic and inorganic fertilizers mitigates ammonia and nitrous oxide emissions in a maize field. *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 117(1):13-27.