



## 옥수수 재배지에서 헤어리베치의 토양환원이 아산화질소 배출에 미치는 영향

한해리<sup>1</sup>, 이현호<sup>1</sup>, 홍창오<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 생명자원과학대학 생명환경화학과, <sup>2</sup>부산대학교 생명융합연구원

### Effect of Incorporation of Hairy Vetch on Nitrous Oxide Emission from Soils Cultivated with Maize

Hae Ri Han<sup>1</sup>, Hyun Ho Lee<sup>1</sup> and Chang Oh Hong<sup>1,2\*</sup> (<sup>1</sup>Department of Life Science and Environmental Biochemistry, College of Natural Resource and Life Sciences, Pusan National University, Miryang 50463, Korea, <sup>2</sup>Life and Industry Convergence Research Institute, Pusan National University, Miryang 50463, Korea)

Received: 25 September 2019/ Revised: 15 October 2019/ Accepted: 25 October 2019

Copyright © 2019 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID

Hae Ri Han

<https://orcid.org/0000-0002-6587-5452>

Chang Oh Hong

<https://orcid.org/0000-0001-6456-804X>

### Abstract

**BACKGROUND:** Impact of incorporating hairy vetch into soil on mitigating nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions from maize field in South Korea has not been investigated, whereas impacts on soil properties and nutrients for crops have been investigated. Therefore, this study was conducted to examine N<sub>2</sub>O emission from upland soil incorporated with hairy vetch for one year in maize field.

**METHODS AND RESULTS:** Hairy vetch was grown in an upland soil from November, 2017 to May, 2018 and incorporated into soil on May 25 of 2018. Control and conventional treatment (NPK) were included for comparison. Gas samples were collected weekly for a year to examine N<sub>2</sub>O emissions from the soil. Chemical nitrogen (N) fertilizer stimulated N<sub>2</sub>O emission in short term resulting in the greatest cumulative N<sub>2</sub>O emission in NPK (6.72 kg N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>) compared to the control (4.04 kg N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>) and hairy vetch-incorporated field (5.43 kg N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>), and the greatest yield of maize from NPK, because total N input was much greater by NPK (186 N kg ha<sup>-1</sup>) than by

hairy vetch (81.6 N kg ha<sup>-1</sup>).

**CONCLUSION:** Incorporation of hairy vetch reduced N<sub>2</sub>O emissions from the maize compared to the NPK-treated field. However, further research on improving crop productivity with incorporation of hairy vetch is needed.

**Key words:** Green manure, Hairy vetch, N<sub>2</sub>O emission, Tillage, Upland soil

### 서 론

아산화질소(N<sub>2</sub>O)는 성층권의 오존 파괴와 지구온난화를 유발하는 주된 온실가스 중 하나이며(Ravishankara et al., 2009), 지구온난화 지수(GWP; Global Warming Potential)가 이산화탄소에 비해 298배로 매우 높다(Klaus et al., 2013). 특히 인간 활동 중 농업활동에서 발생하는 N<sub>2</sub>O 배출량이 전체의 65%를 차지하며(Søren et al., 2006), 관행농법에서 시행하는 경운, 시비, 그리고 관개는 온실가스의 배출을 더욱 유발하는 것으로 알려져 있다(Upendra et al., 2012). 토양환경이 호기적인 조건일 때 토양 내 암모늄 이온(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)은 질산화과정을 거치는 과정에서 N<sub>2</sub>O가 발생되고 혐기적 조건에서는 질산 이온(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)의 탈질화에 의해 N<sub>2</sub>O가 발생한다(Maag and Vinther, 1996). 영농기 퇴비 및 쪼갬작물과 같은 유기질 비료나 질소 무기질 비료의 사용은 질소가 무기화 되는

\*Corresponding author: Chang Oh Hong  
Phone: +82-55-350-5548; Fax: +82-55-350-5549 ;  
E-mail: soilchem@pusan.ac.kr

과정에서  $N_2O$ 가 발생하기 때문에 지구온난화를 야기하는 주요 요인 중 하나이며, 수확 후 휴경기의 잔여 질소원은 질산태질소로서 용탈될 수 있고 용탈된 질산태질소는  $N_2O$ 의 배출원이 된다(Aguilera et al., 2013; Gabriel and Quemada, 2011; Sanz-Cobena et al., 2012). 이에 대한 환경보전 방법으로 휴경기의 풋거름작물 재배는 토양의 질소 유실을 줄이고  $N_2O$  가스 배출을 저감시킬 수 있다고 보고되고 있다(Liebig et al., 2012).

풋거름작물은 겨울과 봄 동안 재배하여 후작물을 파종하기 직전 수확하고 토양에 환원하는데, 또한 두과작물은 대기의 질소를 고정 함으로서 무기질 비료 없이도 충분한 양의 질소원을 공급해줄 수 있다. Forte 등(2017)의 연구에 따르면 두과작물인 헤어리베치를 휴경기에 재배하여 수확하였을 때, 생산량이  $3,300 \text{ kg ha}^{-1}$  (건물중) 이었는데 이는  $130 \text{ kg ha}^{-1}$ 의 질소 시비 효과와 같다. 질소 무기질 비료는 토양수분에 쉽게 용해되어 빠른 시일 내에  $NH_4^+$  또는  $NO_3^-$ 의 이온으로 전환된다. 무기태 질소들은 식물이 이용하기 쉽다는 장점이 있지만, 흡수되지 못한 질소 이온들은 쉽게 지하수로 용탈되거나  $N_2O$  가스 형태로 배출되어 환경문제를 일으킨다. 헤어리베치는 유기물로서 화학비료에 비해 비효가 완효성이며 지속적으로 나타나고, 토양의 유용미생물의 영양원이 되기 때문에 토양의 비옥도를 증진시킨다고 알려진 반면, 무기질 비료에 비해 식물의 질소 양분 공급이 불안정하다는 단점이 있다(Tuomisto et al., 2012; Smith, 2004).

우리나라의 경우, 과거 벼 재배시 부족한 질소비료를 대체하기 위해 논에서의 헤어리베치 재배가 대부분 이루어졌지만, 최근 밭작물에서의 헤어리베치 이용도가 확대되고 있다. 현재까지 국내에서 풋거름작물 재배에 따른 농경지에서의  $N_2O$  배출에 대해 수행된 연구들은 주로 논토양에서의  $N_2O$  배출에 국한되어 있거나(Haque et al., 2015; Kim et al., 2013),  $N_2O$  가스 배출 조사가 일부 기간에만 이루어져 연간의 총 배출량을 구하는데 어려움이 있다(Lee et al., 2018; Seo et al., 2012).

다수의 연구에 따르면, 풋거름작물의 재배 및 환원은 무기질비료를 대체함으로써, 온실가스 배출을 저감시킬 수 있다고 보고된 한편(Alluvione et al., 2010), 풋거름작물이 토양에서 분해가 되면서 오히려 더 많은 양의 온실가스가 배출 된다는 연구결과도 있다(Frimpong and Baggs, 2010; Huang et al., 2004). 따라서 본 연구에서는 옥수수 재배 밭토양에서 관행 무기질 질소비료를 풋거름작물인 헤어리베치로 대체 시, 연간  $N_2O$  배출량과 후작물인 옥수수의 수량은 관행에 비해

증가 혹은 감소할 것이라는 가설을 세웠다. 이러한 가설을 검증하기 위해 옥수수 재배 밭토양에 무처리구, 관행 무기질 질소비료 처리구, 헤어리베치 환원 처리구를 설정하여 연간  $N_2O$ 의 배출량과 옥수수량의 수량을 비교 분석하였다.

## 재료 및 방법

### 공시토양 특성과 기상 데이터

본 연구는 경남 밀양시 삼랑진읍 청학리에 위치한 밭토양(위도:  $35^{\circ}45'N$ , 경도:  $128^{\circ}81'E$ )에서 실시하였다. 공시토양은 질곡토으로 USDA Soil Taxonomy에 의하면 Anthraquic Hapludalfs로 분류된다. 포장의 경사는 7-15%, 배수등급은 약간 양호였다. 토성은 양토로 모래, 미사, 점토의 함량이 각각 42.2%, 39.3%, 18.5% 이었다. 시험 토양의 pH는 6.95, 총 탄소는  $10.6 \text{ g kg}^{-1}$ , 총 질소 함량은  $1.55 \text{ g kg}^{-1}$ 로서 자세한 공시토양 특성은 Table 1과 같다.

시험기간 중 토양수분을 측정하기 위해 센서(5TE Water Content, Temperature, and Electrical Conductivity, Decagon, USA)를 챔버 부근 유효토심 10 cm 깊이에 수직으로 설치하여 3시간 간격으로 측정하였다. 2018년 3월 7일 이전에는 센서 설치가 이루어지지 않아 가스시료 채취일에 portable 토양 수분센서를 이용하여 측정하였다. 한 달에 한번씩 토양 core 시료를 채취하여 전용적밀도를 구하였고 일 평균 용적수분함량 값을 공극률로 나눠주어 토양 공극 내 토양수분이 차지하는 비율(Water Filled Pore Space, WFPS)을 구하였다. 강수량과 대기평균 온도는 밀양에 위치한 기상관측망(밀양자동기상관측소, 경남밀양시 점필재로 5, 위도:  $35^{\circ}49'N$  경도:  $128^{\circ}74'E$ , 시험포장에서 이격거리: 7.48 km)에서 측정하여 기상청 날씨누리(weather.go.kr)에서 제공하는 자료를 이용하였다.

### 시험구 처리 및 재배관리

동절기의 풋거름작물로서 헤어리베치를 2017년 11월 4일 직접 손으로 산파하였다. 헤어리베치 파종량은  $90 \text{ kg ha}^{-1}$ 이었다. 다음 해 2018년 5월 25일 헤어리베치를 수확하여 작두로 자른 뒤 해당 처리구 토양에 그대로 환원시켰다. 후작물인 옥수수를 정식하기 전 헤어리베치 잔재가 토양과 고르게 섞이게 하기 위해 2018년 6월 1일 경운로터리를 시행하였고 두둑을 설치하였다. 2018년 7월 24일 옥수수 모종을 이식하였고 10월 4일 수확하였다. 대조군으로 무처리구(Control), 관행처리구(NPK)를 배치하였으며, 옥수수를 정식할 때, 관행처

Table 1. Chemical and physical properties of the studied soil

pH	EC	Total carbon	Total nitrogen	Available $P_2O_5$	Bulk density	DOC <sup>a)</sup>	$NH_4^+$	$NO_3^-$	Exchangeable cations (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )		
(1:5, H <sub>2</sub> O)	(dS/m)	(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	(mg kg <sup>-1</sup> )	(g cm <sup>-3</sup> )	(mg kg <sup>-1</sup> )	(mg kg <sup>-1</sup> )	(mg kg <sup>-1</sup> )	K	Ca	Mg
6.98 (0.11)	0.20 (0.04)	10.7 (4.58)	1.55 (0.64)	107 (48.4)	1.22 (0.14)	249 (63.7)	71.8 (2.82)	3.84 (0.40)	0.62 (0.18)	7.59 (0.30)	1.91 (0.12)

<sup>a)</sup> DOC: dissolved organic carbon.

**Table 2. Concentrations of carbon and nitrogen, biomass yield, and total input amount of carbon and nitrogen of hairy vetch**

Total C content (%)	Total N content (%)	C/N ratio	Total biomass yield (kg ha <sup>-1</sup> )	Total C input (kg C ha <sup>-1</sup> )	Total N input (kg N ha <sup>-1</sup> )
46.3 (0.20)	3.2 (0.06)	14.5 (0.37)	2,550 (726)	1,181 (336)	81.6 (23.2)

리구는 농촌진흥청의 옥수수 시비처방기준(Rural Development Administration, 2017)에 따라 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O를 186-35-74 kg ha<sup>-1</sup> 시비하였고 무처리구와 헤어리베치 처리구는 질소 비료를 시비하지 않고 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O를 35-74 kg ha<sup>-1</sup> 시비하였다. 헤어리베치의 수확량은 2,550 kg ha<sup>-1</sup> (건물중)이었으며, 식물체내 질소함량은 3.2% (wt/wt)로 헤어리베치 환원에 의한 총 질소 투입량은 81.6 N kg ha<sup>-1</sup>이었다(Table 2). 각 처리구의 크기는 3 × 4 m<sup>2</sup> (12 m<sup>2</sup>)이었으며 난괴법(Randomized complete block design)에 따라 4반복으로 실시하였다.

### 토양의 화학적 특성 분석

토양 pH와 전기전도도는 토양을 증류수와 1:5로 혼합한 후 30분간 교반하여 pH meter(Orion Star A215, Thermo Scientific Orion, USA)로 측정하였고, 총 탄소는 tyurin 법으로(Allison, 1965), 총 질소는 Kjeldahl 법으로(Bremner, 1965) 분석하였다. 치환성 양이온 K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>은 1 N NH<sub>4</sub>-acetate(pH 7.0) 용액으로 침출하여 원자흡수 분광광도계(Perkinelmer model 3300, Norwalk, CT, USA)로 분석하였고 유효인산은 Lancaster 법(National Institute of Agricultural Sciences, 2010)을 이용하여 분석하였다.

토양 내 용존유기탄소(Dissolved organic carbon, DOC)는 풍건토양 5 g을 0.01 M NaOH 용액 30 ml를 넣고 30분 실온에서 진탕한 뒤 Whatman No.2로 여과하여 침출하였고 침출액 10 ml에 0.04 N 증크롬산칼리 황산혼합액 20 ml를 가한 뒤 유기물분석법과 동일하게 실험하였으며 적정액으로 0.02 N 황산 제1철 암모니움 용액을 사용하였다. 토양 내 무기태 질소는 풍건토양 5 g에 25 ml의 2 M KCl을 넣고 30분간 실온에서 진탕한 뒤 Whatman No.2로 여과시키고 침출액을 분석에 사용하였다. 암모늄태 질소(NH<sub>4</sub>-N)를 분석하기 위해서 Indophenol Blue 비색법으로(Searle, 1984), 질산태 질소(NO<sub>3</sub>-N)는 brucine 법으로(Wolf, 1944) 각각 667 nm, 410 nm 파장에서 UV/VIS Spectrophotometer (Optizen 3220 UV, Mecasy Co. Ltd, Korea)로 분석하였다.

### 시료채취 및 N<sub>2</sub>O 가스 분석방법

N<sub>2</sub>O 배출량을 조사하기 위해 closed 챔버방법(Conen and Smith, 1998)을 이용하였고 챔버는 각 처리구 중앙부분에 설치되었다. 챔버 설치 후 2주간의 안정기간을 가진 후 헤어리베치 파종일부터 옥수수 수확 후까지 1년 동안 매주 가스시료를 채취하였고 챔버 안에는 식물체가 자라지 않게 하였다. 가스시료채취는 토양에서 배출되는 온실가스의 24시간 중 평균 배출 시간대인 오전 10시부터 오후 1시 사이에(Cosentino

et al., 2012) 30 ml 주사기로 채취하였고 포집시간은 40분으로 설정하였다(Chadwick et al., 2014). 가스시료채취 시 챔버 내 온도는 온도계로 측정하였고, 각 챔버의 토양 표면으로부터의 높이를 측정하였다. 채취한 가스시료는 가스 크로마토그래프 질량분석계(GC-MS OP2020, Simadzu, HP-PLOT Q Column)를 이용하여 N<sub>2</sub>O를 분석하였다. N<sub>2</sub>O flux의 계산식에서 ρ는 N<sub>2</sub>O의 기체밀도 1.967 mg cm<sup>-3</sup>이고, V는 챔버 부피(m<sup>3</sup>), A는 챔버 바닥 면적(m<sup>2</sup>), Δc/Δt는 챔버 내 N<sub>2</sub>O 가스 농도의 평균증가속도(mg m<sup>-1</sup> hr<sup>-1</sup>), T는 챔버 내 평균온도(K)를 의미한다. N<sub>2</sub>O 가스 누적 배출량은 하루 동안의 N<sub>2</sub>O 가스 배출량을 일수만큼 더하여 일정 기간 동안 배출된 총 배출량이다. R은 N<sub>2</sub>O flux(g ha<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>)이며 D는 일정 기간을 의미한다.

$$\begin{aligned} \text{N}_2\text{O flux (g ha}^{-1} \text{ day}^{-1}) \\ = \rho \times (V/A) \times (\Delta c/\Delta t) \times (273/T) \end{aligned}$$

$$\text{N}_2\text{O 가스 누적 배출량(kg ha}^{-1} \text{ season}^{-1}) = \sum_i^n (R_i \times D_i)$$

### 통계분석

질소비료 종류에 따른 N<sub>2</sub>O 배출량과 토양 이화학적 특성, 작물 수확량의 변화를 알아보기 위해 Statistix 통계프로그램(버전9.0)을 이용하여 통계분석을 실시하였다(Statistix, 2008). 처리 간의 차이를 비교하기 위하여 조사된 자료는 ANOVA 검증을 통하여 분석하였다. F-test 결과 값이 P<0.05의 범위에서 유의한 경우에만 최소유의차 검정(LSD)을 실시하였다.

## 결과 및 고찰

### 기상환경 및 WFPS와 N<sub>2</sub>O 배출 경향

휴경기와 옥수수 재배기간 동안 토양에서 발생하는 N<sub>2</sub>O 배출량의 변화와 같은 기간 동안의 기상환경과 WFPS는 Fig. 1과 같다. 2018년 5월까지 N<sub>2</sub>O flux는 처리구간에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다(Fig. 1 (A)). Brady 등(2010)은 질산화과정과 탈질과정에 관여하는 미생물의 활성이 각각 5℃와 2℃에서 눈에 띄게 감소한다고 하였는데, 본 포장시험의 동절기인 2017년 12월부터 2018년 2월까지 일일 기상은 5℃ 이하였고 평균 토양온도가 -0.2℃이었다(Fig. 1 (B)). 2018년 3월 이후 N<sub>2</sub>O flux가 증가한 이유는 평균 기온이 9℃로 상승하면서 얼어있던 토양이 녹고 강수량이 증가하면서 WFPS가 45% 이상으로 증대되어 질산화에 의한 N<sub>2</sub>O가 발생되기 유리한 조건이 형성되었기 때문으로 판단된다(Fig. 1). 토양 내 WFPS가 30% 이상 60% 이하일 때, 질산

화과정을 통해 암모늄 이온( $\text{NH}_4^+$ )이 질산 이온( $\text{NO}_3^-$ )로 전환되는 과정 중  $\text{N}_2\text{O}$ 가 발생할 수 있다(Bouwman, 1998). 이와 유사한 결과가 여러 연구들에서 발견되었으며 해당 연구결과에 따르면 토양환경 및 농경지에서 겨울을 지나 봄에 해빙기가 되어 토양 내 미생물 활성이 회복되었고 많은 양의  $\text{N}_2\text{O}$ 가 발생했다(Cates and Keeney, 1987; Goodroad and Keeney, 1984; Wagner-Riddle and Thurtell, 1998). 헤어리베치는 퇴비와 같은 다른 유기체에 비해 C/N 율이 낮기 때문에 미생물 활동에 필요한 탄소와 질소를 쉽게 공급할 수 있고(Huang et al., 2004; Gomes et al., 2009; Guardia et al., 2016; Baruah et al., 2016) 무기화 속도가 빨라 2-3주 내에  $\text{N}_2\text{O}$  가스로 소실될 수 있다(Forte et al., 2017). 토양에 환원 후 헤어리베치 처리의  $\text{N}_2\text{O}$  플럭스는 점차 증가하여, 3주가 지난 2018년 6월 14일에 다소 높게 발생하였다. 8월까지 헤어리베치 처리에서 control 보다 대부분 높은 배출량을 보이다가, 9월부터 모든 처리구에서  $\text{N}_2\text{O}$  일일 배출량이 유사하게 나타났다.

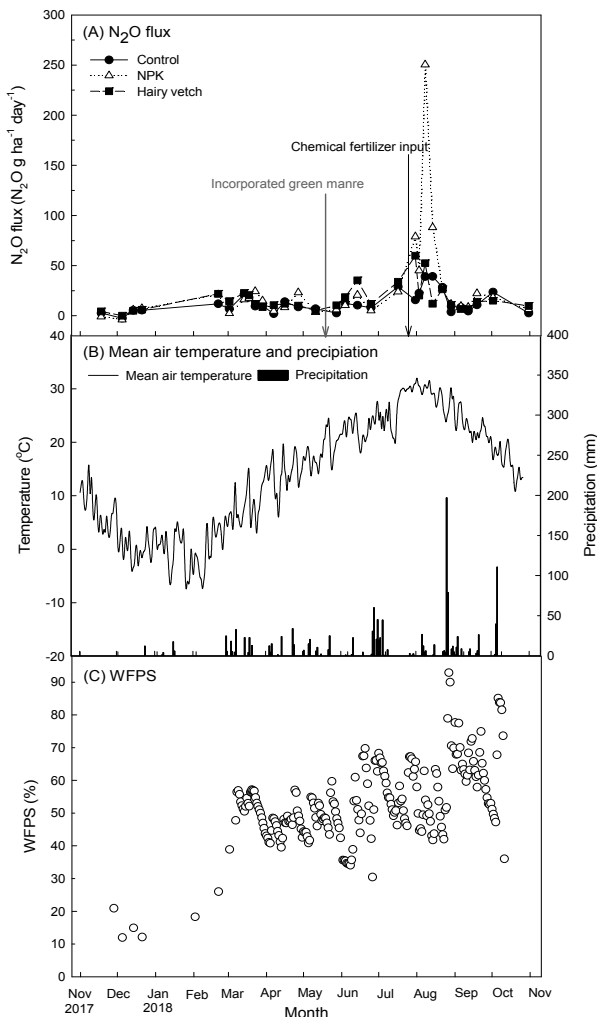


Fig. 1. The  $\text{N}_2\text{O}$  flux (A), air temperature and precipitation (B), and water filled pore space (WFPS) (C) for 1 year.

NPK 처리에서 2018년 8월 7일  $\text{N}_2\text{O}$  배출량이 250  $\text{N}_2\text{O}$  g  $\text{ha}^{-1}$ 로 높게 나타났고 이는 control 보다 6.4 배, 헤어리베치 처리 보다 4.8 배 많은 양이었다. 요소비료는 일반적으로 무기화되기 까지 2주 정도 소요되고, 충분한 물이 공급이 되어야 한다(Brady et al., 2010). 한편 WFPS는 질산화과정과 탈질과정에 관여하는 미생물의 활성을 나타내는 간접적인 지표가 될 수 있는데(Linn and Doran, 1984), WFPS가 60% 이상 80% 이하일 때 탈질과정에 의해  $\text{N}_2\text{O}$ 가 가장 많이 발생한다. 반면 80% 이상으로 증가하면 완전탈질에 의해  $\text{N}_2$ 의 형태로 질소가 배출된다(Bouwman, 1998). 본 포장시험에서 요소비료를 시비하고 2주 뒤, 8월 6일에 26 mm의 강수가 내렸고 WFPS가 63%이었기 때문에 무기화된 질소의 탈질에 의해  $\text{N}_2\text{O}$  발생량이 급격히 증가한 것으로 판단된다(Fig. 1 (C)). 하지만 8월 말에 많은 강수가 있었음에도 불구하고,  $\text{N}_2\text{O}$  배출량 증가가 발견되지 않았는데, WFPS가 약 92%이었기 때문에  $\text{N}_2\text{O}$ 가 아닌  $\text{N}_2$  가스가 발생한 것으로 판단된다.

#### $\text{N}_2\text{O}$ 누적배출량

평균  $\text{N}_2\text{O}$  누적배출량은 휴경기보다 옥수수 재배기간에서 더 높았다(Table 3). 휴경기  $\text{N}_2\text{O}$  누적배출량은 비록 통계적 유의한 차이는 없었으나 평균 배출량은 헤어리베치 처리에서 control과 NPK 처리보다 높게 나타났다. Sanz-Cobena 등 (2014)의 보고에 따르면 휴경기에 헤어리베치를 재배하면 청보리를 재배한 처리구와 무처리구 보다 토양 내  $\text{NO}_3^-$ 의 함량이 높아지고, 탈질화 과정을 통해  $\text{N}_2\text{O}$  배출량이 높아진다고 보고하였다. 옥수수 재배기간 동안  $\text{N}_2\text{O}$  누적배출량은 NPK 처리에서 4.92 kg  $\text{ha}^{-1}$ 로 가장 높았다. 유기물인 헤어리베치는 토양에서 천천히 분해가 되는 반면, 요소비료는 분해속도가 빨라 짧은 기간 안에  $\text{N}_2\text{O}$  가스로 질소가 유실되었고 누적배출량 또한 높았던 것으로 판단된다. 휴경기와 옥수수 재배기간 동안의 총 연간 누적배출량은 NPK 처리가 6.70 kg  $\text{ha}^{-1}$ 로 가장 높게 나타났으며, 헤어리베치 처리는 5.41 kg  $\text{ha}^{-1}$ , control은 4.33 kg  $\text{ha}^{-1}$ 로 가장 낮았다. 헤어리베치 처리구에서  $\text{N}_2\text{O}$  누적 배출량이 NPK 처리구에 비해 유의하게 낮았던 이유는 헤어리베치의 수확량이 높지 않아, NPK 처리에 비해 투입된 질소량이 현저히 적었기 때문으로 판단된다(Table 2). 헤어리베치의 파종 시기는 9월부터 시작하여 10월 중순까지로, 파종이 빠를수록 수확량과 질소 함량이 증가한다(Seo et al., 2000). Jeon 등(2009, 2011)의 연구에 따르면, 9월 10일, 9월 26일에 헤어리베치를 파종하여 6,000 kg  $\text{ha}^{-1}$ , 5070 kg  $\text{ha}^{-1}$ 의 헤어리베치를 수확하였고, 총 질소량이 각각 209 N kg  $\text{ha}^{-1}$ , 169 N kg  $\text{ha}^{-1}$  이었다. 반면 본 포장시험에서는 11월 초 늦은 시기에 파종하였고, 평균 기온이 약 11 $^{\circ}\text{C}$ 으로 씨앗이 발아하기에는 낮은 온도였기 때문에 헤어리베치의 수확량이 2,550 kg  $\text{ha}^{-1}$ 로 다소 낮아 헤어리베치 환원에 의한 총 질소의 투입량(81.6 N kg  $\text{ha}^{-1}$ ) 또한 낮았다.

Table 3. Cumulative N<sub>2</sub>O emissions during fallow season, maize season, and total season

Season	Fallow season (kg ha <sup>-1</sup> )			Maize season (kg ha <sup>-1</sup> )			Total season (kg ha <sup>-1</sup> )		
Treatment	Control	NPK	Hairy vetch	Control	NPK	Hairy vetch	Control	NPK	Hairy vetch
Cumulative N <sub>2</sub> O emissions	1.53 <sup>a</sup> (0.14)	1.80 <sup>a</sup> (0.17)	2.04 <sup>a</sup> (0.21)	2.51 <sup>b</sup> (0.17)	4.92 <sup>a</sup> (0.41)	3.38 <sup>b</sup> (0.20)	4.04 <sup>b</sup> (0.16)	6.72 <sup>a</sup> (0.52)	5.43 <sup>ab</sup> (0.13)
Mean		1.79 <sup>c</sup> (0.12)			3.60 <sup>b</sup> (0.35)			5.39 <sup>a</sup> (0.38)	

### 옥수수 수량

옥수수의 이삭 수량은 6.4 kg ha<sup>-1</sup>로 NPK 처리에서 유의하게 가장 높았으며, control 과 헤어리베치 처리는 각각 3.9, 3.7 kg ha<sup>-1</sup> 이었다(Fig. 2). 옥수수는 질소요구량이 높은 작물이기 때문에(Al-Kaisi and Yin, 2003; Di Paolo and Rinaldi, 2008; Eghball and Power, 1999; Liang and MacKenzie, 1994), 상대적으로 많은 양의 질소를 시비한 NPK 처리에서 옥수수의 수량이 높았다. 반면, 헤어리베치의 환원에 의해 옥수수의 수량 증수 효과가 나타나지 않았는데, 옥수수를 정식하기 전 헤어리베치의 무기화가 일어나 옥수수를 정식한 후 옥수수가 분얼하는 동안에 요구하는 질소량을 충족시키지 못했던 것으로 판단된다. Sievers와 Cook (2018)의 보고에 따르면 헤어리베치는 토양에 환원 후 지상부와 지하부의 식물체가 매우 빨리 분해되기 때문에 질소 유실을 줄이기 위해서는 풋거름작물 환원시기와 주작물 파종시기의 간격을 줄여야 한다고 보고하였다. 옥수수를 수확 후 헤어리베치 환원과 NPK 처리에 따른 토양 내 총 질소와 탄소함량의 유의한 증대는 나타나지 않았다(Table 4). 비록 통계적 유의차는 없었으나 총 질소 함량은 헤어리베치에서 가장 높았다. 그러나 무기태 질소함량은 무처리에 비해 높지 않았다. 즉 헤어리베치가 완전히 분해되지 않고 상당부분 유기태 질소 형태로 남아있는 것으로 판단된다. 반면에 NPK 처리구의 총질소 함량은 증대되지 않았으나 무기태 질소 함량은 무처리에 비해 증가하였는데, 요소형태의 비료 투입으로 인한 결과로 판단된다.

이상의 결과들로 미루어 볼 때 헤어리베치 파종 시기를 앞당겨서 헤어리베치의 발아 및 수확량을 확보하고, 헤어리베치 토양 환원과 옥수수 파종 시기의 간격을 좁혀서 적절한 시기

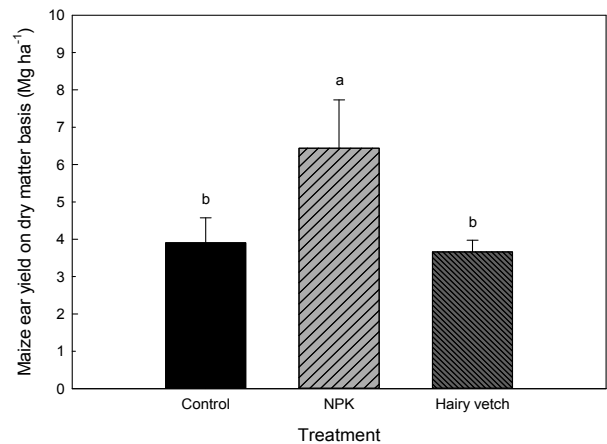


Fig. 2. Ear yield response to different nitrogen fertilization.

에 질소가 공급될 수 있도록 한다면 옥수수의 질소 이용 효율이 증가하여 더욱 높은 옥수수 수확량을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

### 결론

풋거름작물은 무기질 비료를 대체하여 N<sub>2</sub>O 가스 배출 저감효과가 있다고 보고되어졌다. 하지만 국내의 연구결과들은 대부분 논토양에서 이루어졌거나 휴경기를 고려하지 않고 경작기에만 집중되어 있어 자료가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 옥수수를 재배하는 밭토양 조건에서 헤어리베치의 재배 및 토양 환원이 연간 N<sub>2</sub>O 배출특성에 어떠한 영향을 미치는

Table 4. Chemical properties of soil at harvest time

Treatment	pH	EC	Total carbon	Total nitrogen	Available P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Bulk density	DOC <sup>a)</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Exchangeable cations (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )		
	(1:5)	(dS/m)	(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	(mg kg <sup>-1</sup> )	(g cm <sup>-3</sup> )	(mg kg <sup>-1</sup> )	(mg kg <sup>-1</sup> )	(mg kg <sup>-1</sup> )	K	Ca	Mg
Control	6.90 <sup>a</sup> (0.07)	0.63 <sup>a</sup> (0.05)	14.3 <sup>a</sup> (3.44)	1.37 <sup>a</sup> (0.08)	98 <sup>a</sup> (21)	1.37 <sup>a</sup> (0.13)	158 <sup>a</sup> (9)	4.87 <sup>a</sup> (0.66)	0.75 <sup>a</sup> (0.38)	0.74 <sup>a</sup> (0.11)	8.04 <sup>a</sup> (0.20)	2.60 <sup>a</sup> (0.03)
NPK	6.91 <sup>a</sup> (0.26)	0.67 <sup>a</sup> (0.03)	13.6 <sup>a</sup> (3.24)	1.35 <sup>a</sup> (0.09)	145 <sup>a</sup> (91)	1.37 <sup>a</sup> (0.10)	157 <sup>a</sup> (13)	5.14 <sup>a</sup> (0.32)	0.82 <sup>a</sup> (0.33)	0.72 <sup>a</sup> (0.14)	8.04 <sup>a</sup> (0.17)	2.56 <sup>a</sup> (0.09)
Hairy vetch	6.81 <sup>a</sup> (0.10)	0.66 <sup>a</sup> (0.04)	13.0 <sup>a</sup> (3.71)	1.45 <sup>a</sup> (0.10)	99 <sup>a</sup> (9)	1.41 <sup>a</sup> (0.10)	164 <sup>a</sup> (12)	4.83 <sup>a</sup> (0.43)	0.75 <sup>a</sup> (0.18)	0.74 <sup>a</sup> (0.12)	8.06 <sup>a</sup> (0.26)	2.58 <sup>a</sup> (0.10)

<sup>a)</sup> DOC: dissolved organic carbon.

는지 조사하였다. 헤어리베치는 늦은 파종으로 수확량이 적었고, NPK 처리와 비교했을 때 총 질소 투입량이 현저히 낮았다. NPK 처리에서 요소비료는 빠른 무기화와 탈질화로 인해  $\text{N}_2\text{O}$  일일 배출량을 급격하게 증가시켰으며 연간 총 누적배출량이 NPK 처리에서 유의하게 높았다. 헤어리베치의 환원 후 식물체는 서서히 분해되어  $\text{N}_2\text{O}$  배출량 증가를 보였지만, 연간 총 누적배출량은 관행농법에 비해 낮은 것으로 조사되었다. 옥수수의 이삭 수량은 NPK 처리에서  $6.4 \text{ kg ha}^{-1}$ 로 헤어리베치 처리에 비해 유의하게 높았다. 본 포장시험에서 헤어리베치 처리는 옥수수의 질소 이용 효율이 낮아 옥수수의 수량을 증대시키지 못하였다. 추후, 휴경기의 헤어리베치 재배는 파종 시일을 앞당겨, 수확량을 증수해야 할 것이고, 이때 발생하는  $\text{N}_2\text{O}$  가스와 옥수수 수량에 대해 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### Note

The authors declare no conflict of interest.

### Acknowledgement

This study was carried out with the support of "Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ01340104)", National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Republic of Korea.

### References

- Aguilera, E., Lassaletta, L., Sanz-Cobena, A., Garnier, J., & Vallejo, A. (2013). The potential of organic fertilizers and water management to reduce  $\text{N}_2\text{O}$  emissions in Mediterranean climate cropping systems. A review, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 164, 32-52.
- Al-Kaisi, M. M., & Yin, X. (2003). Effects of nitrogen rate, irrigation rate, and plant population on corn yield and water use efficiency. *Agronomy journal*, 95(6), 1475-1482.
- Allison, L. E., Bollen, W. B., & Moodie, C. D. (1965). *Total carbon. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties, (methods of soil analysis)*. pp. 1346-1366, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.
- Alluvione, F., Bertora, C., Zavattaro, L., & Grignani, C. (2010). Nitrous oxide and carbon dioxide emissions following green manure and compost fertilization in corn. *Soil Science Society of America Journal*, 74(2), 384-395.
- Baruah, A., Bordoloi, N., & Baruah, K. K. (2016). Effect of organic amendments with varied CN ratios on grain productivity and nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ ) emission from wheat grown in alluvial soil. *Australian Journal of Crop Science*, 10(4), 460-469.
- Bouwman, A. F. (1998). Nitrogen oxides and tropical agriculture. *Nature*, 392, 866-867.
- Brady, N. C., & Raymond, R. W. (2010). *Elements of the nature and properties of soils*. p. 366, third ed., Pearson, USA.
- Bremner, J. M. (1965). Total nitrogen. In *Methods of Soil Analysis Part II*. (eds. Black, C. A.), pp. 1149-1178. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
- Cates, R. L., & Keeney, D. R. (1987). Nitrous oxide production throughout the year from fertilized and manured maize fields<sup>1</sup>. *Journal of Environmental Quality*, 16(4), 443-447.
- Chadwick, D. R., Cardenas, L., Misselbrook, T. H., Smith, K. A., Rees, R. M., Watson, C. J., McGeough, K. L., Williams, J. R., Cloy, J. M., Thorman, R. E., & Dhanoa, M. S. (2014). Optimizing chamber methods for measuring nitrous oxide emissions from plot-based agricultural experiments. *European Journal of Soil Science*, 65(2), 295-307.
- Conen, F., & Smith, K. A. (1998). A re-examination of closed flux chamber methods for the measurement of trace gas emissions from soils to the atmosphere. *European Journal of Soil Science*, 49(4), 701-707.
- Cosentino, V. R. N., Fernandez, P. L., Figueiro Aureggi, S. A., & Taboada, M. A. (2012).  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from a cultivated Mollisol: optimal time of day for sampling and the role of soil temperature. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36(6), 1814-1819.
- Di Paolo, E., & Rinaldi, M. (2008). Yield response of corn to irrigation and nitrogen fertilization in a Mediterranean environment. *Field Crops Research*, 105(3), 202-210.
- Eghball, B., & Power, J. F. (1999). Composted and noncomposted manure application to conventional and no-tillage systems: corn yield and nitrogen uptake. *Agronomy Journal*, 91(5), 819-825.
- Forte, A., Fagnano, M., & Fierro, A. (2017). Potential role of compost and green manure amendment to mitigate soil GHGs emissions in Mediterranean drip irrigated maize production systems. *Journal of Environmental Management*, 192, 68-78.
- Frimpong, K. A., & Baggs, E. M. (2010). Do combined applications of crop residues and inorganic fertilizer lower emission of  $\text{N}_2\text{O}$  from soil?. *Soil Use and Management*, 26(4), 412-424.
- Gabriel, J. L., & Quemada, M. (2011). Replacing bare fallow with cover crops in a maize cropping system:

- Yield, N uptake and fertiliser fate. *European Journal of Agronomy*, 34(3), 133-143.
- Gomes, J., Bayer, C., de Souza Costa, F., de Cássia Piccolo, M., Zanatta, J. A., Vieira, F. C. B., & Six, J. (2009). Soil nitrous oxide emissions in long-term cover crops-based rotations under subtropical climate. *Soil and Tillage Research*, 106(1), 36-44.
- Goodroad, L. L., & Keeney, D. R. (1984). Nitrous oxide emissions from soils during thawing. *Canadian Journal of Soil Science*, 64(2), 187-194.
- Guardia, G., Abalos, D., García-Marco, S., Quemada, M., Alonso-Ayuso, M., Cárdenas, L. M., Dixon, E. R., & Vallejo, A. (2016). Integrated soil fertility management drives the effect of cover crops on GHG emissions in an irrigated field. *Biogeoscience*, 13, 5245-5257.
- Haque, M. M., Kim, S. Y., Ali, M. A., & Kim, P. J. (2015). Contribution of greenhouse gas emissions during cropping and fallow seasons on total global warming potential in mono-rice paddy soils. *Plant and Soil*, 387(1-2), 251-264.
- Huang, Y., Zou, J., Zheng, X., Wang, Y., & Xu, X. (2004). Nitrous oxide emissions as influenced by amendment of plant residues with different C:N ratios. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(6), 973-981.
- Jeon, W. T., Seong, K. Y., Lee, J. K., Kim, M. T., & Cho, H. S. (2009). Effects of seeding rate on hairy vetch (*Vicia villosa*)-rye (*Secale cereale*) mixtures for green manure production in upland soil. *Korean Journal of Crop Science*, 54(3), 327-331.
- Jeon, W. T., Seong, K. Y., Kim, M. T., Oh, I. S., Choi, B. S., & Kang, U. G. (2011). Effect of biomass and N production by cultivation methods of leguminous and gramineae green manures on rice growth in central regions of Korea. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 44(5), 853-858.
- Kim, S. Y., Lee, C. H., Gutierrez, J., & Kim, P. J. (2013). Contribution of winter cover crop amendments on global warming potential in rice paddy soil during cultivation. *Plant and Soil*, 366(1-2), 273-286.
- Klaus, B. B., Elizabeth, M. B., Michael, D., Ralf, K., & Sophie, Z. B. (2013). Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls?. *Biological Sciences*, 368, 1621.
- Lee, S. I., Kim, G. Y., Choi, E. J., Lee, J. S., & Jeong, H. C. (2018). Nitrous oxide and carbon dioxide efflux of cropland soil during fallow season. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 20(4), 386-396.
- Liang, B. C., & MacKenzie, A. F. (1994). Corn yield, nitrogen uptake and nitrogen use efficiency as influenced by nitrogen fertilization. *Canadian Journal of Soil Science*, 74(2), 235-240.
- Liebig, M. A., Franzluebbers, A. J., & Follett, R. F. (2012). Chapter 1 - Agriculture and Climate Change: Mitigation Opportunities and Adaptation Imperatives. (eds. Liebig, M. A., Franzluebbers, A. J., Follett Managing, R. F.), pp. 3-11, Academic Press, San Diego, CA.
- Linn, D. M., & Doran, J. W. (1984). Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils 1. *Soil Science Society of America Journal*, 48(6), 1267-1272.
- Maag, M., & Vinther, F. P. (1996). Nitrous oxide emission by nitrification and denitrification in different soil types and at different soil moisture contents and temperatures. *Applied Soil Ecology*, 4(1), 5-14.
- Ravishankara, A. R., Daniel, J. S., & Portmann, R. W. (2009). Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O): the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century. *Science*, 326 (5949), 123-125.
- Sanz-Cobena, A., García-Marco, S., Quemada, M., Gabriel, J. L., Almendros, P., & Vallejo, A. (2014). Do cover crops enhance N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> or CH<sub>4</sub> emissions from soil in Mediterranean arable systems?. *Science of The Total Environment*, 466-467, 164-174.
- Sanz-Cobena, A., Sánchez-Martín, L., García-Torres, L., & Vallejo, A. (2012). Gaseous emissions of N<sub>2</sub>O and NO and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> leaching from urea applied with urease and nitrification inhibitors to a maize (*Zeamays*) crop. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 149, 64-73.
- 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.
- Seo, J. H., Lee, H. J., & Kim, S. J. (2000). Changes of green manure and nitrogen yield of hairy vetch according to seeding date in autumn. *Korean Journal of Crop Science*, 45(6), 400-404.
- Seo, Y. H., Kim, S. W., Choi, S. C., Kim, I. J., Kim, K. H., & Kim, G. Y. (2012). Effect of green manure crop and biochar on nitrous oxide emission from red pepper field. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 45(4), 540-543.
- Sievers, T., & Cook, R. L. (2018). Aboveground and root decomposition of cereal rye and hairy vetch cover crops. *Soil Science Society of America Journal*, 82(1), 147-155.
- Smith, P. (2004). Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context. *European Journal of Agronomy*, 20(3), 229-236.
- Søren, O. P., Kristiina, R., Alfred, P., Elisabeth, R., Laura,

- V., Sirwan, Y., Martti, E., Claudio, F., Eija, S., & Finn, P. V. (2006). Nitrous oxide emissions from organic and conventional crop rotations in five European countries. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 112(2-3), 200-206.
- Tuomisto, H. L., Hodge, I. D., Riordan, P., & Macdonald, D. W. (2012). Does organic farming reduce environmental impacts?—A meta-analysis of European research. *Journal of Environmental Management*, 112, 309-320.
- Uppendra, M. S., William, B. S., Thecan, C. T. T., & Mark, A. L. (2012). Soil greenhouse gas emissions affected by irrigation, tillage, crop rotation, and nitrogen Fertilization. *Journal of Environmental Quality*, 41(6), 1174-1786.
- Wagner-Riddle, C., & Thurtell, G. W. (1998). Nitrous oxide emissions from agricultural fields during winter and spring thaw as affected by management practices. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 52(2-3), 151-163.
- Wolf, B. (1944). Determination of nitrate, nitrite, and Ammonium Nitrogen rapid photometric determination in soil and plant extracts. *Industrial and Engineering Chemistry*, 16(7), 446-447.