

PLANT&FOREST

# Effects of biochar-based fertilizer on ammonia volatilization under controlled conditions

Yun-Gu Kang, Jae-Han Lee, Jun-Yeong Lee, Jun-Ho Kim, Taek-Keun Oh\*

Department of Bio-Environmental Chemistry, College of Agriculture and Life Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

\*Corresponding author: [ok5382@cnu.ac.kr](mailto:ok5382@cnu.ac.kr)

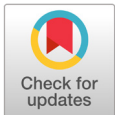
## Abstract

As the interest in sustainable and environmentally friendly agriculture continues to grow, there is a corresponding increase in organic fertilizers utilization. However, studies on ammonia (NH<sub>3</sub>) emissions, which are primarily generated in the agricultural sector, by organic fertilizers are lacking. Additionally, the reliance on imported ingredients in the production of organic fertilizers hinders the widespread adoption of organic fertilizers. This study aims to evaluate NH<sub>3</sub> volatilization by incorporating rice husk biochar into organic fertilizers. The study also aims to assess whether domestically produced rice husk biochar can serve as a viable substitute for imported ingredients. Here, the dynamic chamber method was used under controlled conditions. Results show that inorganic fertilizers readily undergo hydrolysis, thereby rapidly generating significant amounts of NH<sub>3</sub>, particularly in the initial stages. In contrast, organic fertilizers decompose gradually, leading to relatively long-term NH<sub>3</sub> emissions. The incorporation of rice husk biochar into organic fertilizers demonstrated diminished daily NH<sub>3</sub> emissions compared to those from commercial organic fertilizers, resulting in decreased total NH<sub>3</sub> volatilization. These findings show that the combination of rice husk biochar can reduce NH<sub>3</sub> volatilization and serve as an alternative to imported ingredients for organic fertilizers. The results of this study can be utilized as fundamental information for the assessment of biochar as a potential ingredient for organic fertilizers.

**Key words:** biochar, dynamic chamber method, NH<sub>3</sub>, rice husk, sustainable agriculture

## Introduction

작물 생육 증진을 위한 비료는 화학적 형태에 따라 무기질비료와 유기질비료로 구분된다 (Kim et al., 2020). 국내 농업은 과거 생산량 증대 위주 정책으로 인해 무기질비료를 선호하였으나, 1980년대 시행된 농경지 양분 종합관리 정책(integrated nutrient management, INM)과 1997년에 제정 및 시행된 친환경농업육성법으로 인해 유기질비료 및 퇴비의 사용량이 점차 증가하는 추세이다(Parris, 2011; Jeon et al., 2014; Kim et al., 2020). 유기질비료는 비료공정규



### OPEN ACCESS

**Citation:** Kang YG, Lee JH, Lee JY, Kim JH, Oh TK. Effects of biochar-based fertilizer on ammonia volatilization under controlled conditions. Korean Journal of Agricultural Science 50:437-446. <https://doi.org/10.7744/kjoas.500313>

**Received:** May 30, 2023

**Revised:** August 07, 2023

**Accepted:** August 23, 2023

**Copyright:** © 2023 Korean Journal of Agricultural Science



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.

격상 부산물비료로 분류되며, 2종 이상의 동·식물성 원료를 혼합하여 제조한다(Kim et al., 2019). 유기질비료는 무기 양분이 높은 수준이며, 미생물에 의한 분해 과정 중 각종 아미노산 및 유기산, 핵산 등이 생성되어 인위적인 부속 과정이 필요하지 않다(Yang et al., 2008). 유기질비료를 토양에 투입 시 작물 생산성 증대, 토양개량, 미생물의 활성 증가 등 여러 긍정적인 효과가 있다고 보고된 바 있으나, 과다 사용 시 토양 내 염류집적현상을 유발하여 작물의 수분 및 양분이용효율을 저해시킨다(Mer et al., 2000; Ramoliya and Pandey, 2002; Kim et al., 2020). 하지만, 현재 사용되고 있는 유기질비료는 대부분의 원료를 수입해 제조하여 원료의 가격변동 등에 의해 안정적인 공급이 어려운 실정이며, 이는 수입 의존도가 높은 원료의 국산화가 필요함을 시사한다.

최근 친환경 농업 기술로 각광받고 있는 바이오차(biochar)는 다양한 농업 부산물 및 바이오매스를 열 분해하여 얻을 수 있는 고형 물질이며, 다양한 유기 자원을 환경친화적으로 재활용할 수 있는 방안이다(Oh et al., 2017; Kang et al., 2021b). 바이오차의 이화학적 특성은 열 분해 조건(온도, 시간, 방식 등)과 원료의 종류 및 특성에 따라 달라진다(Woo, 2013; Kang et al., 2021c). 바이오차는 토양 내에서 보수력, 통기성, 산도, 양이온 교환 용량 등 토양의 이화학을 개선하여 작물 재배에 적합한 환경을 조성하며, 표면의 여러 작용기를 이용해 양분을 흡착하여 토양 내에 일정 시간 고정할 수 있다(Kang et al., 2021a). 이러한 바이오차의 양분 고정 효과는 작물에게 양분을 천천히 공급한다는 점에서 유기질비료의 양분 용출 특성과 유사하다.

농경지에서 발생하는 암모니아(ammonia,  $\text{NH}_3$ )는 2차 미세먼지(particulate matter smaller than 2.5  $\mu\text{m}$  in diameter,  $\text{PM}_{2.5}$ )의 전구 물질로 전세계적으로 매년  $\text{NH}_3$  배출량이 증가하고 있다(Behera et al., 2013; Park et al., 2020). 국내  $\text{NH}_3$  배출량 중 약 80%는 농업분야에서 배출되는 것으로 조사되었으며, 이는 대부분 가축 사육 시 발생하거나 혹은 토양에 투입한 비료 및 가축분퇴비에 의해 발생한다고 보고되었다(Lim et al., 2012; NIAST, 2019). 특히, 비료 투입에 의한  $\text{NH}_3$  배출량은 약 7%로 산정되나, 대부분 무기질비료 투입에 따른  $\text{NH}_3$  배출량으로 최근 사용량이 증가하고 있는 유기질비료의 투입에 따른  $\text{NH}_3$  배출량에 대한 연구가 필요한 실정이다(Choi et al., 2019).

본 연구는 왕겨 바이오차를 활용한 유기질비료와 시판되고 있는 유기질비료의  $\text{NH}_3$  배출량과 토양 특성 변화를 dynamic chamber method를 이용하여 평가하였다.

## Materials and Methods

### Official materials

공시 토양은 충남대학교 농업생명과학대학 부속 밭 포장에서 채취하였으며, 유리온실에서 2주간 충분히 건조시킨 후 2 mm sieve에 통과시켜 실험에 이용하였다. 공시 토양의 토성은 모래(sand), 미사(silt), 점토(clay)가 각각 65.6, 14.0, 20.4%인 사양토(sandy loam)로 분류되었다.

본 연구에서 사용한 유기질비료는 제조 원료의 종류 및 배합 비율에 따라 구분하였으며, Table 1에 나타내었다. Organic fertilizer 1 ( $\text{OF}_1$ )과 organic fertilizer 2 ( $\text{OF}_2$ )는 시판되고 있는 유기질비료를 나타내며, 본 연구에서는 효성 오엔비(Hyosung O&B, Korea)와 삼화그린텍(Sanhwa Greentech, Korea)에서 생산되는 제품을 이용하였다. Biochar-based fertilizer (BF)는 왕겨 바이오차를 활용하여 제조한 유기질비료이다. 유기질비료 원료로 사용된 왕겨 바이오차의 제조 조건 및 화학적 특성은 Table 2에 나타내었으며, 바이오차를 제외한 다른 원료의 화학적 특성은 Table 3에 나타내었다.

**Table 1.** Mixing ingredients and ratio of organic fertilizers used in this experiment.

Treatment	Carbide	Castor oil-cake	Soybean-cake	Coffee meal	Rice bran	Rapeseed oil-cake
	(% <sub>v</sub> , v·v <sup>-1</sup> )					
OF <sub>1</sub>	-	47	23	-	20	10
OF <sub>2</sub>	-	78	-	-	14	8
BF	10	30	45	5	10	-

OF, organic fertilizer; BF, organic fertilizer including rice husk biochar.

**Table 2.** Chemical properties of the rice husk biochar used in this experiment.

Temperature (°C)	Time (min)	pH (1 : 10, H <sub>2</sub> O)	EC (dS·m <sup>-1</sup> )	T-N	T-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	OM	CEC (cmol <sub>c</sub> ·kg <sup>-1</sup> )
				(% <sub>v</sub> )				
600	120	9.80 ± 0.01	8.80 ± 0.80	0.44 ± 0.10	0.33 ± 0.08	1.56 ± 0.04	62.90 ± 1.05	38.60 ± 0.12

EC, electrical conductivity; T-N, total nitrogen; T-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, total phosphate; OM, organic matter; CEC, cation-exchange capacity.

**Table 3.** Chemical properties of the ingredients of organic fertilizer.

Sample	pH (1 : 10, H <sub>2</sub> O)	EC (dS·m <sup>-1</sup> )	T-N	T-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	OM	CEC (cmol <sub>c</sub> ·kg <sup>-1</sup> )
			(% <sub>v</sub> )				
Castor oil-cake	6.61 ± 0.07	16.12 ± 1.10	4.03 ± 0.05	1.60 ± 0.11	1.17 ± 0.02	80.21 ± 3.17	38.71 ± 0.12
Coffee meal	4.62 ± 0.02	15.91 ± 0.03	2.34 ± 0.02	0.30 ± 0.02	0.87 ± 0.05	86.60 ± 1.85	34.20 ± 1.13
Rice bran	6.90 ± 0.05	15.30 ± 1.02	1.94 ± 0.08	5.32 ± 0.08	2.17 ± 0.31	81.82 ± 3.22	105.20 ± 8.12
Soybean-cake	6.44 ± 0.12	35.31 ± 1.28	6.51 ± 0.17	1.42 ± 0.19	2.32 ± 0.11	84.62 ± 0.95	90.81 ± 1.18
Rapeseed oil-cake	5.62 ± 0.21	11.28 ± 1.15	5.31 ± 0.28	2.11 ± 0.13	1.19 ± 0.25	87.93 ± 1.15	37.29 ± 0.29

EC, electrical conductivity; T-N, total nitrogen; T-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, total phosphate; OM, organic matter; CEC, cation-exchange capacity.

## Experimental setup

종류별 유기질비료 처리에 따른 NH<sub>3</sub> 배출량과 토양 특성 변화를 평가하기 위해 처리구는 총 8개로 구성하였으며, 무처리구(Control, non-fertilization), 무기질비료 단독 처리구(NPK, only inorganic fertilizer treatment), 유기질비료 단독 처리구(OF<sub>x</sub>, only organic fertilizer treatment; BF, only biochar-based fertilizer treatment), 유기질비료와 무기질비료 혼합 처리구(OF<sub>x</sub> + NPK, coapplication of organic and inorganic fertilizer; BF + NPK, coapplication of biochar-based and inorganic fertilizer)로 설정하였다. 일반적으로 유기질비료는 친환경농업을 위해 무기질비료를 절감하거나 대체하기 위해 사용된다고 알려져 있으나, 퇴비와 같이 무기질비료와 혼합하여 사용하는 경우가 많아 본 연구에서는 유기질비료를 단독 처리하였을 때와 무기질비료와 혼합 처리하였을 때의 NH<sub>3</sub> 배출량을 비교하기 위해 모두 처리구로 설정하였다(Kim et al., 2018).

이에 따라, 유기질비료는 질소(N)를 기준으로 1 ha당 120 kg·N을 처리하였으며, 무기질비료(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O, 요소-용성인비-염화칼륨)는 N 소요량이 가장 많은 노지 배추의 농촌진흥청 시비처방기준에 준하여 320-78-198 kg·ha<sup>-1</sup>를 처리하였다(NAAS, 2010). 시험기간 중 토양 수분함량은 격일로 일정량의 증류수를 첨가하여 20%로 유지하였다.

## NH<sub>3</sub> volatilization

종류별 유기질비료 처리에 따른 NH<sub>3</sub> 배출량은 dynamic chamber method를 이용하여 평가하였다. 아크릴로 제작한 dynamic chamber의 규격은 12 cm (Ø) × 50 cm (H)이며, 모식도는 Fig. 1에 나타내었다. 토양에서 배출된 NH<sub>3</sub>는 0.05 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 이용하여 47일간 매일 오전 9시에 채취하였으며, 채취한 NH<sub>3</sub> 시료는 Indophenol blue법을 이용하여 640 nm에서 UV/Vis-spectrophotometer (GENESYS 50 UV-Vis spectrophotometer, Thermo Scientific Inc., USA)로 비색

정량하였다. 원활한 NH<sub>3</sub> 배출을 위해 유량은 dynamic chamber method를 이용한 선행 연구의 조건을 참고하여 시험 기간 중 2 m<sup>2</sup>·min<sup>-1</sup>로 유지하였다(Kang et al., 2021b). 일별 NH<sub>3</sub> 배출량은 식(1)을 이용하여 계산하였다. NH<sub>3</sub> 배출량 평가를 실시한 기간은 모든 처리구의 NH<sub>3</sub> 배출량이 control과 유사하였을 때 종료되었다고 판단하였다.

$$J = Q/A_L \times ((C \times V)/(Q \times t) \times R) \times 10 \quad (1)$$

J. NH<sub>3</sub>-N flux (g·ha<sup>-1</sup>·day<sup>-1</sup>)

Q. 시료채취 기간 동안 유량(m<sup>2</sup>·min<sup>-1</sup>)

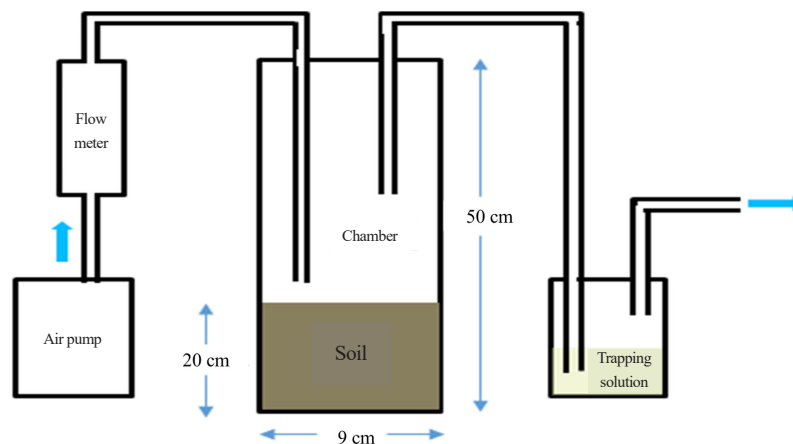
A<sub>L</sub>. chamber 내 headspace의 면적(m<sup>2</sup>)

C. chamber 내의 NH<sub>3</sub>-N의 농도(μg·m<sup>-3</sup>)

V. 포집액의 용량(L)

t. 포집한 시간(min)

R. NH<sub>3</sub>의 전체 분자량 중 N이 차지하는 비율



**Fig. 1.** Schematic diagram of the dynamic chamber method used in this experiment.

## Characterization of materials

토양의 이화학적 특성은 토성(soil texture), pH, electrical conductivity (EC), total carbon (T-C), total nitrogen (T-N), available phosphate (Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), exchangeable cations (Ex. cations, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>) 함량을 분석하였다. 토성의 경우 hydrometer method를 이용하여 분석하였으며, 토양의 pH와 EC는 토양과 증류수를 1 : 5 (w·v<sup>-1</sup>)의 비율로 혼합하여 30분간 진탕한 후 Benchtop Meter with pH and EC (ORION™ Versa Star Pro™, Thermo Scientific Inc., USA)로 측정하였다. T-C와 T-N 함량의 경우 Elemental Analyzer (TruSpec Micro, USA)를 이용하여 분석하였다. Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>는 Lancaster 법을 이용하여 UV/Vis-spectrophotometer로 분석하였다. Ex. cations의 함량은 pH 7.0으로 교정한 1 M NH<sub>4</sub>OA<sub>C</sub>과 토양을 1 : 10 (w·v<sup>-1</sup>)의 비율로 혼합하여 침출한 시료를 ICP-OES (Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer, ICAP 7000series ICP spectrometer, Thermo Scientific Inc., USA)를 이용하여 분석하였다.

유기질비료 및 원료의 화학적 특성은 pH, EC, T-C, T-N, total phosphate (T-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), inorganic contents (K<sub>2</sub>O, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O)를 분석하였다, 유기질비료의 pH와 EC는 시료와 증류수를 1 : 10 (w·v<sup>-1</sup>)의 비율로 혼합한 뒤 진탕하여 Benchtop Meter with pH and EC로 측정하였으며, T-C와 T-N 함량은 Elemental Analyzer로 분석하였다. T-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 함량과

Inorganic contents ( $K_2O$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $Na_2O$ ) 함량은 nitric acid와 perchloric-nitric acid 용액으로 분해한 후 ICP-OES로 분석하였다.

## Statistical analysis

본 연구는 3반복 수행하였으며, 처리구간 통계적 유의차를 확인하기 위해 SPSS 프로그램(IBM SPSS Statistics version 26, IBM, USA)을 이용하여 95% 신뢰수준에서 유의성 검증을 수행하였다. 사후 검정은 Duncan의 multiple range test를 이용하여 처리구 사이의 유의차를 확인하였다.

## Results and Discussion

### Chemical properties of fertilizer

유기질비료의 화학적 특성을 분석한 결과는 Table 4에 나타내었다. 왕겨 바이오차 기반의 BF는  $OF_1$ 과  $OF_2$ 에 비해 T-C와  $K_2O$  및  $CaO$  함량이 높게 분석되었으며, pH를 비롯한 T-N 함량,  $T-P_2O_5$  함량,  $MgO$  함량은 낮게 분석되었다. 이는 유기질비료 제조에 사용된 원료의 종류 및 배합 비율에 따른 것으로 판단되며, 특히, BF 제조 시 사용한 커피박(pH 4.62)은 타 원료에 비해 낮은 pH를 갖는 것으로 나타났다(Table 3).

**Table 4.** Chemical properties of organic fertilizers used in this experiment

Treatment	pH (1 : 10, $H_2O$ )	EC ( $dS \cdot m^{-1}$ )	T-C	T-N	$T-P_2O_5$	$K_2O$ (%)	CaO	MgO	$Na_2O$
$OF_1$	6.70 ± 0.01b	20.41 ± 0.20b	37.10 ± 0.00b	5.35 ± 0.00a	2.20 ± 0.53a	0.19 ± 0.01b	1.21 ± 0.07b	1.78 ± 0.25a	0.19 ± 0.01a
$OF_2$	7.57 ± 0.01a	66.56 ± 1.02a	37.50 ± 0.00b	5.99 ± 0.00a	2.14 ± 0.56a	0.32 ± 0.01b	1.57 ± 0.14b	0.72 ± 0.13b	0.32 ± 0.01a
BF	6.30 ± 0.01b	25.17 ± 1.56b	47.70 ± 0.00a	5.17 ± 0.00a	0.94 ± 0.00b	1.99 ± 0.00a	2.03 ± 0.01a	0.16 ± 0.02c	0.18 ± 0.04a

OF, organic fertilizer; BF, organic fertilizer including rice husk biochar; EC, electrical conductivity; T-C, total carbon; T-N, total nitrogen;  $T-P_2O_5$ , total phosphate.

a - c: Different small letters indicate statistically significant difference among different organic fertilizers, which was determined by Duncan's multiple range test ( $p < 0.05$ ).

유기질비료의 pH는 BF (pH 6.30)에 비해  $OF_1$ 과  $OF_2$ 가 각각 pH 6.70과 pH 7.57로 높게 측정되었다. 일반적으로 열분해 온도와 시간이 증가할수록 바이오차의 pH는 증가하여 pH 9 이상의 강한 알칼리성을 나타내는 것으로 알려져 있다(Kang et al., 2021b). 본 연구에서도 바이오차의 pH는 pH 9.80으로 강한 알칼리성으로 조사되었으나, 구성 비율(10%)이 낮아 BF의 pH를 증가시키지 않은 것으로 판단하였다. EC는 BF의  $25.17 dS \cdot m^{-1}$ 에 비해  $OF_1$ 은  $20.41 dS \cdot m^{-1}$ 로 비교적 낮은 편이었으며,  $OF_2$ 는  $66.56 dS \cdot m^{-1}$ 로 2.64배 높게 측정되었다.

비료 내 T-C 함량의 경우  $OF_1$ 과  $OF_2$ 는 각각 37.10%와 37.50%로 측정되었으며, 왕겨 바이오차를 활용한 BF는  $OF_x$ 에 비해 약 10% 이상 높은 47.70%로 측정되었다. T-N 함량은  $OF_2$ 에서 5.99%로 가장 높게 측정되었으나, 각 비료 사이의 통계적 유의차는 확인되지 않았다.  $T-P_2O_5$  함량은 BF에 비해  $OF_1$ 과  $OF_2$ 에서 높게 나타났으며,  $OF_1$ 이 약 2.20%로 가장 높게 조사되었다.

무기 조성의 경우,  $CaO$  함량과  $K_2O$  함량은 BF가 각각 2.03%와 1.99%로 시판 유기질비료( $OF_x$ )에 비해 높았으며, 특히,  $K_2O$ 의 경우 5.60배 높게 나타났다.  $MgO$ 은  $OF_1$ 에서 1.78%로  $OF_2$ 와 BF에 비해 2.01배 이상 높았으며,  $Na_2O$ 는  $OF_2$ 에서 0.32%로 가장 높게 조사되었다. 본 연구에서 사용한 유기질비료 원료 중  $K_2O$  함량은 대두박(2.32%)에서 가장 높았으며, BF는  $OF_1$ 과  $OF_2$ 에 비해 대두박의 포함 비율이 높아  $K_2O$  함량이 가장 높게 증가한 것으로 판단된다(Table 3).



## Changes in soil chemical properties

토양의 화학적 특성 변화를 조사한 결과는 Table 5에 나타내었다. 토양의 pH 변화를 조사한 결과, 실험 전 토양 (pH 6.89)에 비해 실험 종료 후 토양의 pH가 감소하였으며, 특히 NPK에서 pH 6.56으로 가장 낮게 감소하였다. 작물 재배 시 BF의 사용은 비료 사용에 의한 토양 pH 감소를 방지할 수 있으며, 무기질비료 사용에 의한 pH 감소를 저해하여 적정 pH 범위(pH 6.0 - 7.0) 유지에 유리할 것으로 판단된다. 본 연구에서 비료의 사용은 토양 EC를 증가시켰으며, 실험 전 토양의  $0.29 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 에 비해 2.69배 증가한  $\text{OF}_1 + \text{NPK}$  ( $0.78 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ )에서 최대 증가 폭을 나타내었다. 또한, 토양 EC는 유기질비료를 단독 처리한  $\text{OF}_x$ 와 BF에 비해 무기질비료 단독 및 혼합 처리한 NPK와  $\text{OF}_x + \text{NPK}$ , BF + NPK에서 높게 조사되었으며, 이를 통해 토양 EC는 유기질비료에 비해 무기질비료 투입 시 높게 증가함을 확인하였다.

토양에 비료 투입 시 실험 전 토양의 T-C 함량(0.41%)에 비해 모두 증가하였으나, 각 처리구 사이의 통계적으로 유의한 차이는 나타나지 않았다. 토양 내 T-N 함량은 무기질비료 처리 시 0.02%에서 0.04%까지 증가하였으나, 통계적으로 유의한 차이를 나타내진 않았다. 토양에 투입된 바이오차는 높은 탄소 함량을 기초로 토양의 T-C 함량을

**Table 5.** Chemical properties of the soil after the experiment.

Treatment	pH (1 : 5, H <sub>2</sub> O)	EC (dS·m <sup>-1</sup> )	T-C (%)	T-N (%)	Av. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg·kg <sup>-1</sup> )	Exchangeable cations (cmol <sub>c</sub> ·kg <sup>-1</sup> )			
						K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>
Initial soil	6.89 ± 0.08a	0.29 ± 0.05b	0.41 ± 0.00b	0.03 ± 0.00a	62.39 ± 1.28e	0.24 ± 0.04b	4.42 ± 0.12ab	1.66 ± 0.04b	0.09 ± 0.01a
Control	6.77 ± 0.07ab	0.37 ± 0.01b	0.41 ± 0.03b	0.02 ± 0.01a	64.81 ± 6.29e	0.23 ± 0.00b	4.20 ± 0.09b	1.64 ± 0.04b	0.08 ± 0.01a
OF <sub>1</sub>	6.74 ± 0.04bc	0.45 ± 0.03b	0.51 ± 0.01a	0.03 ± 0.02a	78.85 ± 6.39d	0.22 ± 0.00b	3.98 ± 0.05c	1.62 ± 0.03b	0.07 ± 0.00a
OF <sub>2</sub>	6.72 ± 0.05bc	0.40 ± 0.06b	0.50 ± 0.01a	0.03 ± 0.00a	82.41 ± 1.95c	0.24 ± 0.00b	4.08 ± 0.05c	1.66 ± 0.03b	0.08 ± 0.00a
BF	6.78 ± 0.09ab	0.44 ± 0.01b	0.50 ± 0.01a	0.03 ± 0.00a	99.82 ± 2.13a	0.24 ± 0.02b	4.42 ± 0.14ab	1.78 ± 0.08b	0.08 ± 0.00a
NPK	6.56 ± 0.05d	0.74 ± 0.09a	0.52 ± 0.02a	0.04 ± 0.00a	89.64 ± 0.05b	0.33 ± 0.00a	4.17 ± 0.04b	1.68 ± 0.00b	0.08 ± 0.00a
OF <sub>1</sub> +NPK	6.63 ± 0.01cd	0.78 ± 0.03a	0.50 ± 0.00a	0.04 ± 0.00a	90.64 ± 0.12b	0.34 ± 0.01a	4.02 ± 0.02c	1.66 ± 0.01b	0.08 ± 0.00a
OF <sub>2</sub> +NPK	6.61 ± 0.10cd	0.68 ± 0.08a	0.52 ± 0.04a	0.04 ± 0.00a	82.49 ± 4.19c	0.35 ± 0.01a	4.18 ± 0.11b	1.71 ± 0.03b	0.08 ± 0.00a
BF+NPK	6.75 ± 0.08bc	0.76 ± 0.12a	0.50 ± 0.02a	0.04 ± 0.00a	93.33 ± 7.90a	0.43 ± 0.04a	4.70 ± 0.00a	1.98 ± 0.01a	0.11 ± 0.01a
Optimum range	6.0 - 7.0	≤ 2.0	-	-	300 - 550	0.5 - 0.8	5.0 - 6.0	1.5 - 2.0	≤ 0.2

Control, untreated treatment; NPK, treated only inorganic fertilizer; OF, organic fertilizer; BF, organic fertilizer including rice husk biochar; EC, electrical conductivity; T-C, total carbon; T-N, total nitrogen; Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, available phosphate.

a - d: Different small letters indicate significant difference of the soil chemical properties among different treatments, which was determined by Duncan's multiple range test ( $p < 0.05$ ).

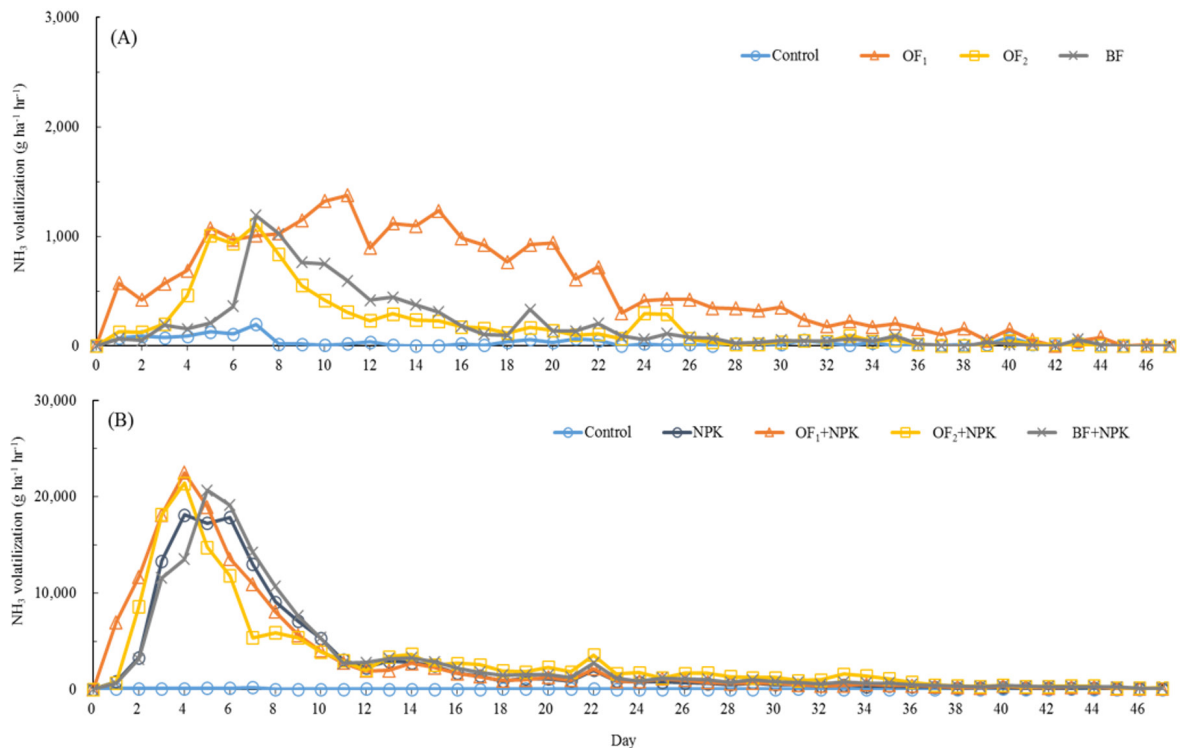
증가시키고, 표면의 작용기를 통해 암모늄(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)을 흡착하여 천천히 공급하는 특징을 가지고 있다(Park et al., 2020; Kang et al., 2021a; 2021c). 또한, 무기질 혹은 유기질비료의 경우 양분 공급의 목적을 가지고 토양에 처리하는 농업 자재 중 하나이다(Lee et al., 2001; NAAS, 2010).

토양 내 Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 함량은 비료 투입 전( $62.39 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )에 비해 control은  $64.81 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 로 유사한 반면 비료를 투입한 경우에는 모두 통계적으로 유의하게 증가하였다. 특히, BF의 단독 투입은  $62.39 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 에서  $99.82 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 로 약 1.60 배 증가하였다. 밭 토양 내 Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 적정 함량은  $300 - 550 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 이며, 본 연구는 Av. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 함량이 낮은 토양 조건에서 수행되어 BF의 효과가 OF<sub>1</sub>과 OF<sub>2</sub>에 비해 높은 인산 공급 효율을 나타내는 것으로 분석되었다.

Ex. cations (Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>) 중 교환성 K<sup>+</sup> 함량의 경우 무기질비료 투입 시 유의하게 증가한 반면 유기질비료 단독 처리는 큰 변화를 나타내지 않았다. 교환성 Ca<sup>2+</sup> 함량은 BF를 처리 시 유의하게 높은 값을 나타내었으며, 이는 BF의 높은 CaO 함량에 의한 것으로 판단된다. 본 연구에서 교환성 Mg<sup>2+</sup> 함량은 BF + NPK에서 유일하게 유의하게 증가한 반면 교환성 Na<sup>+</sup>은 비료 투입 유무에 상관없이 모든 처리구에서 유의한 차이를 나타내지 않았다.

## NH<sub>3</sub> volatilization

비료 처리에 따른 NH<sub>3</sub> 배출량 변화는 Fig. 2에 나타내었다. NH<sub>3</sub> 배출량 변화를 나타내는 Fig. 2는 유기질비료 단독 처리에 따른 NH<sub>3</sub> 배출량(Fig. 2A)과 유기질비료와 무기질비료의 혼합 처리에 따른 NH<sub>3</sub> 배출량(Fig. 2B)으로 구분하였다. 이는 비료 처리 방식에 따라 NH<sub>3</sub> 배출량의 차이가 유의하여 정확한 배출 경향을 확인하기 위해 Fig. 2A와 Fig. 2B로 구분하여 제시하였다. 유기질비료를 단독 처리한 OF<sub>2</sub>와 BF의 NH<sub>3</sub> 배출량은 비료 처리 후 약 7일째까지 지속적으로 증가하였으며, OF<sub>1</sub>은 11일까지 배출되었다. 최대 NH<sub>3</sub> 배출량을 보인 이후 점차 감소하여 43일째 이후 control과 유사한 배출 경향을 나타내었다(Fig. 2A). 이때, 최대배출량을 보인 OF<sub>1</sub>에서는 시간당 1,374.94 g·ha<sup>-1</sup>가 배출되었다. 무기질비료를 단독 및 혼합 처리한 NPK와 OF<sub>x</sub>+NPK, BF+NPK에서는 유기질비료 단독 처리에 비해 NH<sub>3</sub> 배출이 급격하게 이루어졌으며, 4-5일 내에 시간당 최대배출량에 도달하였다(Fig. 2B). 이때, OF<sub>1</sub>+NPK에서 약 22,496.09 g·ha<sup>-1</sup>·hr<sup>-1</sup>로 가장 많이 배출되었으며, 무기질비료를 단독 처리한 NPK에서는 약 18,116.93 g·ha<sup>-1</sup>·hr<sup>-1</sup>가 배출되었다.

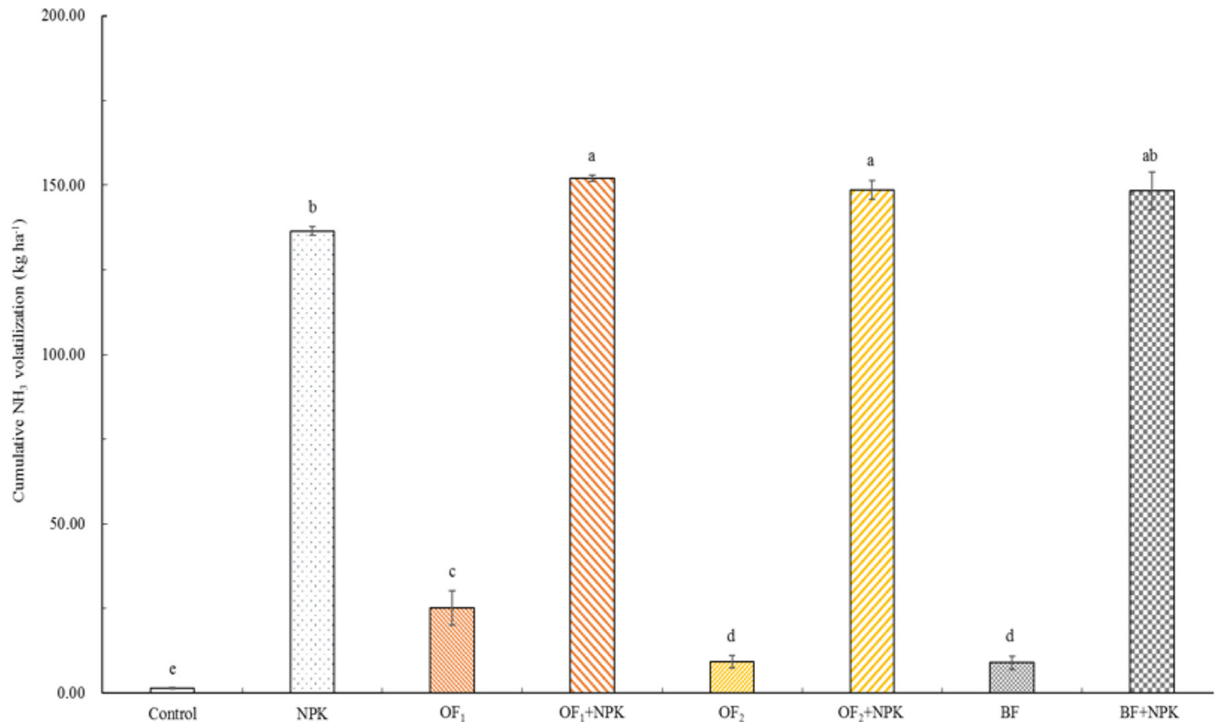


**Fig. 2.** Change in NH<sub>3</sub> volatilization by fertilizer treatment; (A), treatment applied with only organic fertilizers; (B), treatment treated with organic fertilizers and inorganic fertilizers. Control, untreated treatment; NPK, treated only inorganic fertilizer; OF, organic fertilizer; BF, organic fertilizer including rice husk biochar.

요소 등 암모늄(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) 형태를 가지는 비료는 N 손실에 취약한 반면 유기질비료 내 질소 성분은 미생물에 의한 분해를 통해 천천히 공급된다(Kim et al., 2022). 이러한 특성으로 인해 유기질비료를 투입한 토양에서는 NH<sub>3</sub>가 비교적 장기간 배출된 반면 무기질비료로서 요소 투입 시 초기에 급격하게 NH<sub>3</sub>가 발생한다. 또한, 비료를 투입한 깊이 및 경운의 유무는 NH<sub>3</sub> 배출량에 영향을 주며, 일반적으로 유기질비료는 경운 전에 처리하여 토양 내부에서 분해되는 반면 무기질비료는 정식 전 토양의 표면에 처리하여 수분에 의해 쉽게 가수분해된다(Kim et al., 2022). 이에 따라 토양 표면에서부터 발생하는 무기질비료의 N 손실과 토양 내부에서 발생하는 유기질비료의 N 손실의 속도

차이가 존재한다. 본 연구에서도 유기질비료는 토양과 혼합하여 처리한 반면, 무기질비료는 표층에 시비하여  $\text{NH}_3$  형태의 N 손실의 속도 차이가 존재하였으며, 무기질비료에 비해 유기질비료의 N 손실이 적은 것으로 분석되었다.

실험 기간 중 총 배출된  $\text{NH}_3$ 는 Fig. 3에 나타내었다. 47일간 control에서 배출된  $\text{NH}_3$ 는  $1.50 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 이었으며, NPK에서 배출된  $\text{NH}_3$ 는  $136.46 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 이었다. NPK에서 배출된  $\text{NH}_3$ 의 총량은 투입한 N ( $320 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}$ )의 약 42.6%이었으며, 다른 선행연구의 결과와 비교 시, 비교적 높은 수준으로 조사되었다(Uddin et al., 2021). 본 연구에서 사용한 dynamic chamber method는 wind-tunnel method이나 static chamber method와 달리 기온, 강수량, 풍속 등 환경 요인을 제한한 상태에서 이루어지기 때문에 선행연구의 결과에 비해  $\text{NH}_3$  배출이 용이했던 것으로 판단된다(Scotto di Perta et al., 2020).



**Fig. 3.** Total  $\text{NH}_3$  volatilization by organic and inorganic fertilization. Error bars indicate standard deviations of the means ( $n = 3$ ). Control, untreated treatment; NPK, treated only inorganic fertilizer; OF, organic fertilizer; BF, organic fertilizer including rice husk biochar. a - e: Different small letters indicate significant difference of the  $\text{NH}_3$  volatilization among different treatments, which was determined by Duncan's multiple range test ( $p < 0.05$ ).

유기질비료를 단독 처리 시 OF<sub>1</sub>에서  $25.12 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 로 가장 많이 배출되었으며, BF에서  $9.00 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 로 가장 적게 배출되었다. 이는 투입한  $120 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}$  대비 각각 20.93%와 7.50% 수준이었다. OF<sub>1</sub>+NPK와 OF<sub>2</sub>+NPK, BF+NPK는 도합  $440 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}$ 를 처리하였으며, 그에 따른 배출량은 각각  $152.05$ ,  $148.63$ ,  $148.32 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 를 나타내었다.  $\text{NH}_3$  총 배출량이 가장 적은 BF+NPK는 투입량 대비 약 33.71%의 N 손실이 발생하였으며, 가장 많은 배출량을 보인 OF<sub>1</sub>+NPK에서는 약 34.56%가  $\text{NH}_3$  형태로 N이 유실되었다. 앞선 선행연구에서 유기물 함량은  $\text{NH}_3$  배출량에 영향을 미치는 요인이며, 유기물 함량이 증가함에 따라  $\text{NH}_3$  배출량도 증가한다고 보고하였다(Verdi et al., 2018). 본 연구에서 유기질비료 제조 시 사용된 원료 중 가장 높은 유기물 함량을 나타낸 채종유박은 87.93%이었으며, 채종유박을 가장 많이 포함하고 있는 OF<sub>1</sub>은 82.32%로 OF<sub>2</sub> (81.05%)와 BF (78.51%)에 비해 총 유기물 함량이 가장 높게 분석되었다.



## Conclusion

본 연구는 왕겨 바이오차를 활용한 유기질비료와 시판되고 있는 유기질비료의  $\text{NH}_3$  배출량과 토양 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 수행하였으며, dynamic chamber method를 이용하여 환경 요인이 제한된 조건에서 연구를 진행하였다. 실험에 사용한 유기질비료는 왕겨 바이오차 활용 유기질비료 1종과 시판 유기질비료 2종으로 구분하였다. 왕겨 바이오차를 활용한 유기질비료는 토양에 단독 혹은 무기질비료와 혼합 처리 시 시판 유기질비료에 비해 낮은  $\text{NH}_3$  배출량을 보이는 것으로 조사되었다. 시판 유기질비료의 질소 손실률은 최대 20.93% 수준이었으며, 바이오차를 활용한 유기질비료의 질소 손실률은 그보다 2.79배 낮은 7.50%로 조사되었다. 종류별 유기질비료가 토양의 특성에 미치는 영향을 조사한 결과, 왕겨 바이오차를 활용한 유기질비료는 높은 유효 인산 함량과 교환성  $\text{K}^+$  및  $\text{Ca}^{2+}$  함량을 나타내어 인산 및 교환성 양이온 함량 증진에 유리할 것으로 판단하였다. 본 연구의 결과를 요약하였을 때, 왕겨 바이오차를 활용한 유기질비료는 농경지 토양에서 발생하는  $\text{NH}_3$ 의 배출량을 감소시켜 대기 환경을 정화할 수 있을 뿐만 아니라 토양 내 질소 고정, 수입산 원료 대체 등 농업 분야에서 여러 긍정적인 기능을 수행할 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 실제 농경지에서는 2~3회에 걸쳐 분시하는 반면 본 연구에서는 요소를 전량 밀거름으로 사용하여 실제 농경지에 적용하기 전 분시에 따른  $\text{NH}_3$  배출량 및 토양 특성에 미치는 영향을 확인하는 것이 필요하다고 판단된다.

## Conflict of Interests

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

## Acknowledgements

This research study was conducted with support from a research grant awarded by the Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development of Rural Development Administration, Republic of Korea (Project No. PJ017028).

## Authors Information

Taek-Keun Oh, <https://orcid.org/0000-0003-0215-0427>

Jae-Han Lee, <https://orcid.org/0000-0001-5761-2006>

Yun-Gu Kang, <https://orcid.org/0000-0001-5368-5910>

Jun-Yeong Lee, <https://orcid.org/0000-0001-7486-3405>

Jun-Ho Kim, <https://orcid.org/0000-0001-7678-1657>

## References

- Behera SN, Betha R, Balasubramanian R. 2013. Insights into chemical coupling among acidic gases, ammonia and secondary inorganic aerosols. *Journal of Aerosol and Air Quality Research* 13:1282-1296.
- Choi HM, Hyun HJ, Kim YJ, Yoo GY. 2019. Improvement of ammonia emission inventory estimation methodology for

- fertilizer application in the agricultural sector. *Journal of Climate Change Research* 10:237-242. [in Korean]
- Jeon BJ, Lim SS, Lee KS, Lee SI, Ham JH, Yoo SH, Yoon KS, Choi WJ. 2014. Understanding spatial variations of water quality using agricultural nutrient indices in chonnam province. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 33:44-51. [in Korean]
- Kang YG, Lee JY, Chun JH, Lee JH, Yun YU, Oh TK. 2021c. Adsorption characteristics of  $\text{NH}_4\text{-N}$  by biochar derived from pine needles. *Korean Journal of Agricultural Science* 48:589-596. [in Korean]
- Kang YG, Lee JH, Chun JH, Oh TK. 2021a. Adsorption characteristics of  $\text{NH}_4^+$  by biochar derived from rice and maize residue. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 40:161-168. [in Korean]
- Kang YG, Lee JH, Chun JH, Yun YU, Oh TK, Sung JK. 2021b. Evaluation of  $\text{NH}_3$  emissions in accordance with the pH of biochar. *Korean Journal of Agricultural Science* 48:787-769. [in Korean]
- Kim GY, Lee YJ, Cho EJ, Lee JI, Im EC, Hwang HC, Kim SY, Hong SC, Kim JH, Park SJ. 2022. Investigation of factors influencing on ammonia emission from soils in agricultural land. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 44:444-452. [in Korean]
- Kim SC, Ko BG, Park SJ, Kim MS, Kim SH, Lee CH. 2018. Estimation of optimum organic fertilizer application under fertilizer recommendation system. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 51:296-305. [in Korean]
- Kim SH, Hwang HY, Kim MS, Park SJ, Shim JH, Lee YH. 2020. Assessment of fertilizer usage by food crops at the national level. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 53:231-236. [in Korean]
- Kim SH, Hwang HY, Park SJ, Kim SC, Kim MS. 2019. Evaluation of preplant optimum application rate of mixed expeller cake in chinese cabbage cultivation at the field. *Journal of Korea Organic Resource Recycling Association* 27:41-48. [in Korean]
- Lee GJ, Kang BK, Kim HJ, Park SK, Min KB. 2001. Effect of nitrogen fertilizers on soil pH, EC,  $\text{NO}_3\text{-N}$  and lettuce (*Lactuca Sativa* L.) growth. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 34:122-128. [in Korean]
- Lim JE, Lee SS, Jeong SH, Choi YB, Kim SW, Lee YB, Ok YS. 2012. Evaluation of C and N mineralization in soil incorporated with green manure. *Korean Journal of Agricultural, Life and Environmental Sciences* 24:8-16. [in Korean]
- Mer RK, PraJith PK, Pandya DM, Pandey AN. 2000. Effect of salts on germination of seeds and growth of young plants of *Hordeum vulgare*, *Triticum aestivum*, and *Brassica Juncea*. *Journal of Agronomy and Crop Science* 185:209-217.
- NAAS (National Academy of Agricultural Science). 2010. Fertilizer application recommendations for crop plants. NAAS, Suwon, Korea. [in Korean]
- NIAS (National Institute of Agricultural Sciences). 2019. Ammonia emission inventory in agriculture. *Climate Change & Agroecology*. NIAS, Jeonju, RDA. [in Korean]
- Oh TK, Lee JH, Kim SH, Lee HC. 2017. Effect of biochar application on growth of Chinese cabbage (*Brassica chinensis*). *Korean Journal of Agricultural Science* 44:359-365. [in Korean]
- Park SY, Choi HY, Kang YG, Park SJ, Luyima D, Lee JH, Oh TK. 2020. Evaluation of ammonia ( $\text{NH}_3$ ) emissions from soil amended with rice hull biochar. *Korean Journal of Agricultural Science* 47:1049-1056. [in Korean]
- Parris K. 2011. Impact of agriculture on water pollution in OECD countries: Recent trends and future prospects. *International Journal of Water Resources Development* 27:33-52.
- Ramoliya PJ, Pandey AN. 2002. Effect of Increasing salt concentration on emergence, growth and survival of seedlings of *Salvadora oleoides* (Saladoraceae). *Journal of Arid Environments* 51:121-132.
- Scotto di Perta E, Fiorentino N, Carozzi M, Cervelli E, Pindozi S. 2020. A review of chamber and micrometeorological methods to quantify  $\text{NH}_3$  emissions from fertilisers field application. *International Journal of Agronomy* 8909784.
- Uddin S, Nitu TT, Milu UM, Nasreen SS, Hossenuzzaman M, Haque ME, Jahangir MMR. 2021. Ammonia fluxes and emission factors under an intensively managed wetland rice ecosystem. *Environmental Science: Processes&Impacts* 23:132-143.
- Verdi L, Macini M, Ljubojevic M, Orlandini S, Dalla Marta A. 2018. Greenhouse gas and ammonia emissions from soil: The effect of organic matter and fertilization method. *Italian Journal of Agronomy* 13:260-266.
- Woo SH. 2013. Biochar for soil carbon sequestration. *Clean Technology* 19:201-211. [in Korean]
- Yang CH, Yoo CH, Kim BS, Park WK, Kim JD, Jung KY. 2008. Effect of application time and rate of mixed expeller cake on soil environment and rice quality. *Korean Society of Soil Science and Fertilizer* 41:103-111. [in Korean]