

FOOD&CHEMISTRY

Effects of application rate and pH of carbonized rice husk on the reduction of NH₃ volatilization and soil quality

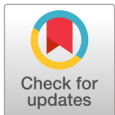
Yun-Gu Kang, Jae-Han Lee, Jun-Yeong Lee, Taek-Keun Oh*

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

*Corresponding author: ok5382@cnu.ac.kr

Abstract

Ammonia (NH₃) emitted from the use of fertilizers during agricultural practice generates particulate matter and odors. The application of carbonized rice husk, an eco-friendly material, is one of the measures used to reduce NH₃. The objective of this study was to evaluate the effect of the application rate and pH of carbonized rice husk on NH₃ emissions and soil quality. An experiment to assess NH₃ emissions was performed in a glasshouse using a static chamber method. The pH of the carbonized rice husk was divided into acidic, neutral, and basic groups, and the carbonized rice husk application rates were 1, 3, and 5% of the soil weight. NH₃ emissions showed a sharp increase within three days after the inorganic fertilizer was applied. Subsequently, NH₃ emissions decreased rapidly after basal fertilization compared to primary and secondary top-dressing. When carbonized rice husks were applied to soil, NH₃ emissions decreased in all treatments, and neutral carbonized rice husk was the most effective in comparison with acidic and basic carbonized rice husk. The application rate of carbonized rice husk and NH₃ emissions showed a negative correlation, and the lowest emissions were found in units with a 5% application rate. Also, there was no statistically significant difference between NH₃ emissions according to the application rate of carbonized rice husk, and when carbonized rice husks were applied at a 5% rate, soil OM increased excessively. Therefore, it is recommended to apply only 1% neutral carbonized rice husk to most effectively reduce NH₃ emissions in the soil.



OPEN ACCESS

Citation: Kang YG, Lee JH, Lee JY, Oh TK. Effects of application rate and pH of carbonized rice husk on the reduction of NH₃ volatilization and soil quality. Korean Journal of Agricultural Science 50:231-239. <https://doi.org/10.7744/kjoas.20230018>

Received: January 13, 2023

Revised: March 20, 2023

Accepted: April 26, 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.

Key words: ammonia (NH₃), application rate, biochar, particulate matter, pH

Introduction

미세먼지(particulate matter, PM)는 입자의 크기에 따라 크게 PM₁₀와 PM_{2.5}로 나뉜다. 그 중 PM₁₀은 입자의 크기가 2.5 - 10 μm인 대기 오염물질이며, PM_{2.5}는 입자 크기가 2.5 μm이하인 대기 오염물질을 총칭하여 일컫는다. 인체에 대한 PM의 여러 부작용은 다양한 선행연구들을 통해 소개되었으며, 특히 천식을 비롯한 호흡기 질환, 심혈관계 질환 등을 유발한다 (Anderson et al., 2012; Atkinson et al., 2015). 국내 PM_{2.5}의 농도는 1 m³당 약 24 μg이며, 이는 OECD 국가 중 2번째로 높은 것으로 보고된 바 있다(Park et al., 2020). PM_{2.5}는 대기 중 암모니

아(NH₃)와 각종 산화물(NO_x, SO_x)이 반응하여 생성되며, 대기 중에 존재하는 NH₃의 약 80%는 농업부문에 의해 배출된다. 경작 시 작물의 생육 증진 및 토양의 질 향상을 위해 투입한 비료나 퇴비는 토양 내에서 무기화 과정을 거치면서 NH₄⁺ 혹은 NO₃⁻ 형태로 전환된다(Kang et al., 2021b). 토양 내 존재하는 NH₄⁺와 NO₃⁻ 중 약 60%는 작물에 의해 흡수되며, 남은 40%는 토양에 잔류하거나 혹은 NH₃와 N₂O 형태로 유실된다(Allison, 1966; Kang et al., 2021c). 토양에서 발생하는 NH₃는 pH와 밀접한 연관이 있는 것으로 보고되었으며, 토양의 pH가 7.0 이상일 때 급격하게 배출된다(Hillel and Hatfield, 2005). 이에 따라 농업분야에서는 토양 pH를 낮추거나 인위적인 투입 방법(농업잔재물, 미생물 제제 등)을 이용하여 대기중으로 배출되는 NH₃를 저감시키기 위해 노력하고 있다(Kim et al., 2020; Park et al., 2020; Kang et al., 2021b; Kang et al., 2022). 그 중 농업잔재탄화물을 이용한 NH₃ 배출 저감은 최근 각광받는 방식 중 하나로 최대 25%까지 저감할 수 있는 것으로 보고되었다(Kang et al., 2021b). 하지만 대부분의 연구는 처리 유무에 따른 NH₃ 배출량 차이를 비교하였으며, 처리량에 따른 NH₃ 배출량의 변화를 평가한 연구는 비교적 미비한 수준이다.

농업잔재탄화물은 바이오매스를 열 분해하여 얻을 수 있는 물질이며, 왕겨, 벚짳, 과수 전정가지 등 다양한 농업잔재물을 친환경적으로 재활용할 수 있는 방안이다(Oh et al., 2017; Lee et al., 2018; Lee et al., 2019). 농업잔재탄화물은 탄화 조건(온도, 시간)이 증가할수록 pH와 탄소 함량은 증가하고, 회수율과 수소 함량은 감소한다(Lee et al., 2019; Kang et al., 2021a). 이로 인해 일반적인 농업잔재탄화물은 알칼리성이며, 표면에 음전하를 띠고 있어 토양에 처리 시 pH 조절 및 중금속과 영양물질 흡착, 수분 보유력 증가 등 다양한 긍정적인 효과를 갖는다(Lee et al., 2018). 이러한 긍정적인 영향으로 인해 농업잔재탄화물은 작물 생육 및 농업 생산성 향상을 위한 친환경농자재로 주목받고 있으며, 다양한 연구를 통해 농업적 활용이 입증되었다(Oh et al., 2017; Lee et al., 2019; Chun et al., 2022; Kang et al., 2022).

따라서 본 연구는 탄화 왕겨의 pH와 처리량이 토양에서 배출되는 NH₃와 토양의 화학성에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 평가 결과로부터 탄화 왕겨의 적정 사용량 적정 기준을 제시하고자 하였으며, 이는 친환경적이고 지속가능한 농업을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Materials and Methods

Experimental materials

실험에 사용한 토양은 충남대학교 농업생명과학대학 내 시험 포장에서 채취하였으며, 비닐하우스에서 충분히 건조한 후 2 mm 체에 걸러 사용하였다. Table 1은 실험 전 토양의 이화학적 성을 나타내었으며, 재배 시험에 이용한 토양의 토성은 사양토로 모래, 미사, 점토의 함량이 각각 45.8, 41.4, 12.8%로 조사되었다.

탄화 왕겨는 왕겨를 제조 온도와 시간을 달리하여 각각 주문 제작한 제품을 푸른네이처(Purnnature, Suncheon, Korea)와 유기산업(Yoogi Industry, Gochang, Korea)에서 구매하여 사용하였다. 탄화 왕겨의 pH에 따라 산성 탄화 왕겨(acidic rice husk, AH), 중성 탄화 왕겨(neutral rice husk, NH), 염기성 탄화 왕겨(basic rice husk, BH)로 구분하였다. pH별로 분류한 탄화 왕겨의 경우 pH가 증가함에 따라 T-C (total carbon) 및 T-N (total nitrogen) 함량은 증가한 반면 T-H (total hydrogen)와 T-O (total oxygen) 함량은 감소하였다. 실험에 사용한 pH별 탄화 왕겨의 화학적 특성을 분석한 결과는 Table 2에 나타내었다.

Table 1. Physico-chemical properties of the soil used in this experiment.

Sample	Sand	Silt (%)	Clay	pH (1 : 5, D.H ₂ O)	T-C	T-N (g·kg ⁻¹)	OM	Av. P ₂ O ₅ (mg·kg ⁻¹)
Soil	45.8	41.4	12.8	6.55 ± 0.33	6.10 ± 0.80	0.14 ± 0.03	10.52 ± 1.38	95.43 ± 0.97

D. H₂O, distilled water; T-C, total carbon; T-N, total nitroge; OM, organic matter; Av. P₂O₅, available phosphate.

Table 2. Pyrolysis conditions and chemical properties of biochar used in this experiment.

Sample	Temp.	Time	pH	SA	T-C	T-N	T-H	T-O	H : C ratio	O : C ratio
	(°C)	(min)	(1 : 10, D.H ₂ O)	(m ² ·g ⁻¹)	(%)					
AH	330	15	6.10 ± 0.01	2.55 ± 0.04	42.33 ± 0.84	0.40 ± 0.02	5.39 ± 0.11	34.61 ± 0.59	1.52	0.61
NH	400	15	7.10 ± 0.02	6.49 ± 0.03	43.47 ± 0.12	0.40 ± 0.05	5.32 ± 0.03	32.50 ± 1.33	1.46	0.56
BH	600	30	11.00 ± 0.01	5.30 ± 0.05	55.50 ± 0.30	0.60 ± 0.01	2.11 ± 0.03	5.88 ± 1.98	0.45	0.08

AH, acidic rice husk; NH, neutral rice husk; BH, basic rice husk; Temp., temperature; D.H₂O, distilled water; SA, surface area; T-C, total carbon; T-N, total nitrogen; T-H, total hydrogen; T-O, total oxygen; H : C, hydrogen : carbon; O : C, oxygen : carbon.

Experimental setup

본 연구는 충남대학교 농업생명과학대학 부속 유리 온실에서 2022년 09월 11일부터 11월 08일까지 진행하였으며, 무기질비료(N-P₂O₅-K₂O, 320-78-198 kg·ha⁻¹)는 재배 시 질소(N)가 가장 많이 사용되는 배추(*Brassica rapa* L.)를 기준으로 처리하였다. 질소(N) 공급원으로는 요소를 사용하였으며, 인산(P₂O₅)과 칼륨(K₂O) 공급원으로 각각 용성 인비와 염화칼륨을 사용하였다. 또한, 무기질비료는 60일간 총 3회에 걸쳐 처리하였으며, 기비(DAT 0, 0 day after treatment) 1회와 추비 2회(DAT 17, DAT 31)로 나누어 실시하였다. 탄화 왕겨는 기비 전 토양에 각각 1, 3, 5% (w·w⁻¹)를 충분히 혼합하였으며, 탄화 왕겨의 처리 비율은 이전에 선행 연구들을 참조하여 설정하였다(Oh et al., 2017; Park et al., 2020; Kang et al., 2021b; Chun et al., 2022).

탄화 왕겨의 pH 및 처리량이 NH₃ 배출에 미치는 영향을 평가하기 위해 처리구는 완전 무처리인 control을 포함하여 무기질비료만 처리한 대조구(NPK, inorganic fertilizers treatment), pH별 탄화 왕겨 1%와 무기질비료 혼합 처리구(AH1% + NPK; NH1% + NPK; BH1% + NPK), pH별 탄화 왕겨 3%와 무기질비료 혼합 처리구(AH3% + NPK; NH3% + NPK; BH3% + NPK), pH별 탄화 왕겨 5%와 무기질비료 혼합 처리구(AH5% + NPK; NH5% + NPK; BH5% + NPK)로 설정하였다.

NH₃ volatilization

NH₃ 배출량 평가는 plastic pot (w 88 cm × d 27 cm × h 20 cm)와 static chamber method를 이용하여 수행하였다. Static chamber method는 아크릴로 제작한 chamber (h 30 cm × Ø 12 cm)와 2개의 sponge (h 2 cm × Ø 12.5 cm)를 이용하여 NH₃를 포집하는 방식이며, NH₃ 포집을 위해 sponge를 glycerol-phosphoric acid solution에 충분히 적셔 사용하였다. Sponge에 포집한 시료는 2 M KCl solution으로 추출한 후 Indophenol blue method를 이용하여 640 nm에서 UV/Vis-spectrophotometer (GENESYS 50, Thermo Scientific Inc., Waltham, Massachusetts, USA)로 비색정량하였다. NH₃ 배출량을 계산한 방법은 다음과 같다.

$$J = ((C \times V) / (T \times A) \times R) \times 10 \quad (1)$$

J, daily NH₃ flux (g·ha⁻²·day⁻¹)

C, concentration of NH₄⁺ in chamber (µg·m⁻²)

V, volume of extract (L)

T, time (day)

A, headspace area in chamber (m²)

R, ratio of N in NH₄⁺

Analysis of soil and carbonized rice husk

토양의 이화학적 특성은 토성(soil texture), pH, T-C, T-N, OM (organic matter), Av. P₂O₅ (available phosphate) 함량을 분석하였다. 토성은 hydrometer method를 이용하여 분석하였으며, 토양의 pH는 토양과 증류수를 1 : 5 (w·v⁻¹)의 비율로 혼합하여 진탕한 후 Benchtop Meter (Orion Versa Star Pro, Thermo Scientific Inc., Waltham, Massachusetts, USA)를 이용하여 측정하였다. T-C와 T-N 함량은 CHN analyzer (TruSpec Micro, Leco, Michigan, USA)로 측정하였다. OM 함량은 T-C 함량을 분석한 결과를 이용하여 계산하였다. Av. P₂O₅는 UV/Vis-spectrophotometer와 Lancaster method를 이용하여 720 nm에서 비색정량하였다.

탄화 왕겨의 화학적 특성은 pH, T-C, T-N, T-H, T-O, T-P₂O₅ (total phosphate) 함량을 분석하였으며, 분석한 결과를 이용하여 H : C ratio와 O : C ratio를 계산하였다. 바이오차의 pH는 바이오차와 증류수를 1 : 10 (w·v⁻¹)의 비율로 혼합하여 진탕한 후 Benchtop Meter로 측정하였다. 바이오차의 surface area (SA)는 비표면적 분석기(using a surface area analyzer (ASAP 2420, Micromeritics Inc., Norcross, GA, USA))를 이용하여 측정하였다. T-C와 T-N, T-H, T-O 함량은 CHN analyzer를 이용하여 측정하였으며, T-P₂O₅ 함량은 UV/Vis-spectrophotometer와 Vanadate method를 이용하여 470 nm에서 비색정량하였다.

Statistical analysis

본 연구에서 제시한 토양 및 탄화 왕겨의 특성을 분석한 결과와 NH₃ 배출량을 조사한 결과는 모두 3반복 수행한 결과의 평균값을 제시하였다. 이에 따라 실험 결과는 ANOVA (one way analysis of variance)를 통해 95% 신뢰수준에서 유의성 검정을 수행하였으며, 각 처리구간 유의차는 Duncan's multiple range test로 사후 검정을 수행하였다. 통계 분석에는 SPSS statistical software (IBM SPSS Statistics version 26, IBM, New York, USA)를 이용하였다.

Results and Discussion

Characterization of soil

실험 후 토양의 화학적 특성을 분석한 결과는 Table 3에 나타내었다. 실험 전 토양의 pH는 pH 6.55로 배추 재배 시 밭 토양의 적정 범위(pH 5.5 - 6.5)에 비해 소폭 높은 수준이었다(Table 1). 실험 후 토양은 control, NH5% + NPK, BH1% + NPK, BH3% + NPK, BH5% + NPK를 제외한 처리구에서 모두 감소하였으며, NPK에서 pH 5.99로 가장 큰 감소폭을 나타내었다. 토양의 pH가 가장 높게 증가한 처리구는 BH5% + NPK이며, pH 7.29로 약 11% 증가하였다. BH 처리에 의한 토양 pH 증가는 탄화 왕겨의 높은 pH로 인한 것으로 판단되며, BH의 경우 pH 11.0으로 다른 탄화 왕겨(AH, NH)에 비해 높은 pH를 가지고 있다(Table 2). 또한 Oh 등(2017)은 바이오차 처리량에 따른 토양의 화학성 및 작물의 생육 변화를 확인하였으며, 바이오차 처리량이 1%에서 5%로 증가할수록 토양의 pH가 pH 7.70에서 pH 8.40으로 증가한다고 보고하였다. 이에 따라 본 연구에서도 탄화 왕겨 처리량이 증가함에 따라 토양 pH가 증가하였으며, pH별 탄화 왕겨 5% 처리 시 가장 높게 증가하였다.

Table 3. Chemical properties of the soil after this experiment.

Treatments	pH	T-C	T-N	OM	Av. P ₂ O ₅
	(1 : 5, D.H ₂ O)		(g·kg ⁻¹)		(mg·kg ⁻¹)
Control	6.62 ± 0.05c	5.80 ± 0.20f	0.09 ± 0.03b	10.00 ± 0.34f	103.83 ± 2.12h
NPK	5.99 ± 0.22e	6.00 ± 0.70f	0.16 ± 0.06ab	10.34 ± 1.21f	212.68 ± 2.77g
AH1%+NPK	6.23 ± 0.63de	11.60 ± 2.70ef	0.2 ± 0.06a	20.00 ± 4.65ef	231.11 ± 11.54fg
AH3%+NPK	6.27 ± 0.25de	12.60 ± 2.40e	0.22 ± 0.06a	21.72 ± 4.14e	261.59 ± 9.95de
AH5%+NPK	6.32 ± 0.18d	22.90 ± 3.20bc	0.23 ± 0.08a	39.48 ± 5.69bc	372.01 ± 17.65b
NH1%+NPK	6.26 ± 0.39de	13.10 ± 1.20de	0.2 ± 0.06a	22.58 ± 2.07de	216.65 ± 9.64fg
NH3%+NPK	6.33 ± 0.58d	17.00 ± 1.30cde	0.23 ± 0.05a	29.31 ± 2.24cde	258.64 ± 8.6de
NH5%+NPK	6.71 ± 0.08b	24.60 ± 2.40b	0.24 ± 0.06a	42.41 ± 4.14b	312.62 ± 14.57c
BH1%+NPK	6.57 ± 0.34cd	19.30 ± 3.20bcd	0.18 ± 0.07ab	33.27 ± 5.52bcd	239.19 ± 0.52ef
BH3%+NPK	6.89 ± 0.25ab	24.90 ± 2.90b	0.2 ± 0.05a	42.93 ± 4.45b	270.24 ± 9.52d
BH5%+NPK	7.29 ± 0.32a	37.30 ± 4.80a	0.22 ± 0.03a	64.31 ± 6.45a	402.11 ± 30.8a

Control, untreated treatment; NPK, treatment applied with inorganic fertilizer; AH, acidic rice husk; NH, neutral rice husk; BH, basic rice husk; D.H₂O, distilled water; T-C, total carbon; T-N, total nitrogen; OM, organic matter; Av. P₂O₅, available phosphate.

a - h: Each value with different letters within a column are statistically significant difference from each other as determined by Duncan's multiple range test ($p < 0.05$).

실험 후 토양의 T-C 함량은 실험 전 토양의 6.10 g·kg⁻¹에 비해 control과 NPK에서는 각각 5.80 g·kg⁻¹과 6.00 g·kg⁻¹으로 감소하였으며, 탄화 왕겨를 처리한 처리구에서는 모두 증가하였다. 특히, BH5% + NPK에서 37.30 g·kg⁻¹으로 가장 높게 증가하였으며, AH와 NH를 처리한 처리구에서도 5%를 처리하였을 때 각각 22.90 g·kg⁻¹과 24.60 g·kg⁻¹으로 가장 높게 증가하였다. 이는 탄화 왕겨의 높은 T-C 함량에서 기인한 것으로 판단되며, 탄화 왕겨의 T-C 함량 분석 시 토양 pH가 증가함에 따라 T-C 함량도 증가하였다. 탄화 왕겨에 의한 토양 내 총 탄소 함량 증가는 Kang 등 (2021b)에서도 보고된 바 있으며, 본 연구와 유사하게 pH가 높은 탄화 왕겨를 처리하였을 때 가장 높게 증가한다고 보고하였다. 토양의 OM 함량은 control에서 10.00 g·kg⁻¹으로 가장 낮았으며, BH5% + NPK에서 64.31 g·kg⁻¹으로 가장 높았다. 또한 OM 함량은 탄화 왕겨의 pH 및 처리량과 양의 상관관계를 나타내었으며, 이는 T-C 함량을 이용하여 계산한 결과이기도 하며 T-C 함량의 경향과 유사하게 나타난 것으로 판단된다. Kim 등(2019)은 국내 밭 토양의 화학성 변화를 조사하였으며, 조사 결과와 함께 작물 재배 시 토양의 적정 화학성 범위를 함께 제시하였다. 그 중 OM 함량의 적정 범위는 25 - 35 g·kg⁻¹이었으며, 이는 탄화 왕겨를 5% 미만으로 처리하였을 때 해당하는 수치였다.

토양 T-N 함량의 경우 control은 0.09 g·kg⁻¹으로 실험 전 토양(1.40 g·kg⁻¹)에 비해 감소하였으며, 다른 모든 처리구에서는 증가하였다. 토양 T-N 함량이 2.40 g·kg⁻¹으로 가장 높게 증가한 NH5% + N는 실험 전 토양에 비해 약 72% 증가하였다. 또한 토양 T-N은 탄화 왕겨 처리량과 양의 상관관계를 나타내었으며, 이는 T-C 함량과 유사한 경향을 나타내었다. Av. P₂O₅은 실험 전 토양의 95.43 mg·kg⁻¹에 비해 모든 처리구에서 증가하였으며, BH5% + N에서 402.11 mg·kg⁻¹으로 가장 높게 증가하였다. 또한 Av. P₂O₅은 탄화 왕겨 처리량이 같을 시 BH, AH, NH 순으로 높게 증가하였으며, 처리량에 따라서는 처리량이 증가함에 따라 Av. P₂O₅도 증가하였다. 이는 앞서 수행된 연구와 유사한 경향을 나타내었으며, Kang 등(2022)에서 본 연구와 같은 320 kg·N·ha⁻¹ 처리 시 탄화 왕겨의 pH (pH 5.7, 6.7, 11.0)에 따른 토양 내 Av. P₂O₅ 각각은 121.07, 63.72, 134.88 mg·kg⁻¹이었다고 보고하였다.

Evaluation of NH₃ volatilization

탄화 왕겨의 pH 및 처리량에 따른 NH₃ 일일 배출량 변화는 Fig. 1에 나타내었다. NH₃ 일일 배출량은 기비(DAT 0) 투입 직후 급격하게 증가하여 DAT 3에 가장 많이 배출되었으며, DAT 6 이후 모든 처리구의 NH₃ 일일 배출량이 유사한 경향을 나타내었다. 이때 가장 많은 NH₃ 배출량을 보인 처리구는 NPK이었으며, 약 4,401.78 g·ha⁻¹·day⁻¹로 가장 NH₃ 배출량이 낮은 control의 450.06 g·ha⁻¹·day⁻¹에 비해 약 9.8배 가량 높은 수치였다. 1차 추비(DAT 17)와 2차 추비(DAT 31) 직후에도 NH₃ 배출량이 급격하게 증가하였으나, DAT 1 - 16에 나타난 경향에 비해 점진적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 1차 추비 직후 가장 많이 NH₃를 배출한 처리구는 약 2,224.85 g·ha⁻¹·day⁻¹를 배출한 NH3% + N이었으며, 2차 추비 직후에는 약 1,492.286 g·ha⁻¹·day⁻¹를 배출한 BH1% + N에서 가장 많이 배출되었다. 또한 NH₃ 일일 배출량의 최댓값은 비료 처리 횟수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었으며, 이를 통해 비료 처리에 의한 NH₃ 배출은 대부분 초기 단계에서 이루어지는 것을 확인하였다. NH₃ 일일 배출량은 모든 처리구의 NH₃ 배출량이 요소 비료를 처리하지 않은 control과 유사할 때 NH₃가 모두 배출되었다고 판단하였으며, DAT 43 이후 요소 비료에 의한 NH₃ 배출은 종료되었다고 판단하였다. 앞선 선행연구에서는 요소 비료 처리 시 처리 후 5일째에 NH₃ 일일 배출량이 가장 높았으며, 이후 NH₃ 일일 배출량이 점차 감소한다고 보고하였다(Kang et al., 2021b). 또한 Park 등(2020)의 연구에서는 요소 비료와 제조 조건이 다른 왕겨 바이오차 처리 시 비료 처리 후 3일째에 NH₃가 가장 많이 배출되었다고 보고하였다. 여러 선행 연구의 보고와 본 연구의 결과를 비교하였을 때 초반에 NH₃ 일일 배출량이 활발하게 진행되는 점이 유사하였으나 각 연구 내용 및 방법에 따라 종료되는 시점이 다소 상이하게 나타났다.

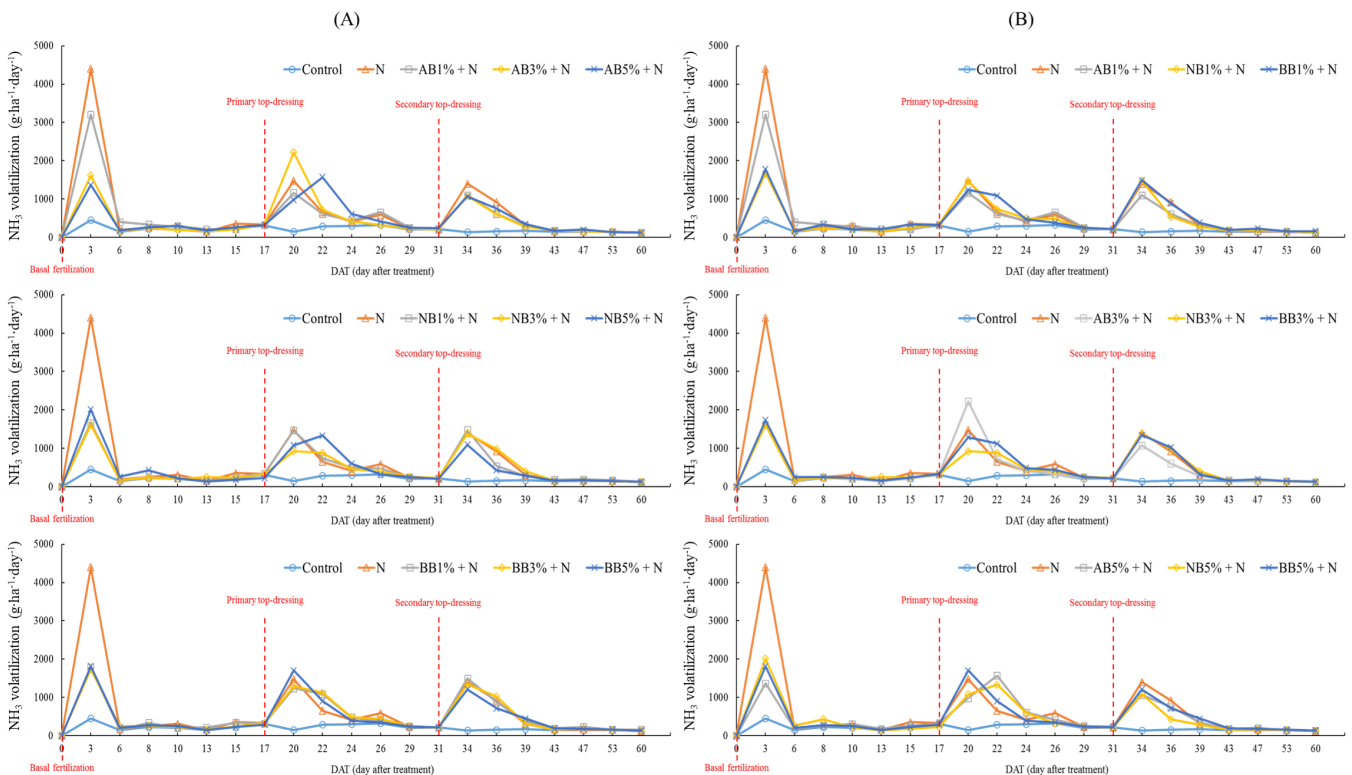


Fig. 1. Effect of application rate and pH of biochar in NH₃ volatilization. (A) Changes in NH₃ volatilization affected by biochar pH, (B) Changes in NH₃ volatilization affected by biochar application rate. Control, untreated treatment; NPK, treatment applied with inorganic fertilizer; AH, acidic rice husk; NH, neutral rice husk; BH, basic rice husk.

실험 기간 중 배출된 NH₃ 총 배출량은 Fig. 2에 나타내었다. NH₃ 총 배출량은 NH₃ 일일 배출량을 모두 합하여 계산하였다. 실험 기간 중 control의 NH₃ 총 배출량은 10.78 kg·ha⁻¹이었으며, NPK은 26.79 kg·ha⁻¹로 요소 비료 처리량 (320 kg·N·ha⁻¹) 대비 약 5% 수준이었다. 탄화 왕겨의 pH에 따른 NH₃ 총 배출량은 탄화 왕겨를 동일한 양(5%) 처리하였을 때 NPK에 비해 NH (22.33 kg·ha⁻¹)에서 가장 많이 감소하였으며, BH (24.31 kg·ha⁻¹)에서 가장 적게 감소하였다. 탄화 왕겨의 흡착 능력을 나타내는 지표인 SA는 가장 높은 저감 효율을 나타낸 NH에서 가장 높았다(Table 2). 또한, AH의 경우 가장 낮은 SA를 나타내었으며, 이는 곧 낮은 NH₃ 저감 효율을 의미하였다. 그러나 탄화 왕겨의 pH에 따른 NH₃ 총 배출량의 통계적 유의차는 나타나지 않았다. pH별 탄화 왕겨 처리에 따른 NH₃ 배출량 차이는 다양한 선행연구를 통해 조사되었으며, 대부분 탄화 왕겨의 pH가 중성(pH 7.0)에 가까울수록 NH₃ 배출 저감에 효과가 있다고 알려져 있다(Park et al., 2020; Kang et al., 2021b). 본 연구에서도 탄화 왕겨의 처리량이 같을 때 NH를 처리한 처리구에서 NH₃ 총 배출량이 가장 낮았으며, NPK과 비교 시 약 13%가량 저감된 수준이었다.

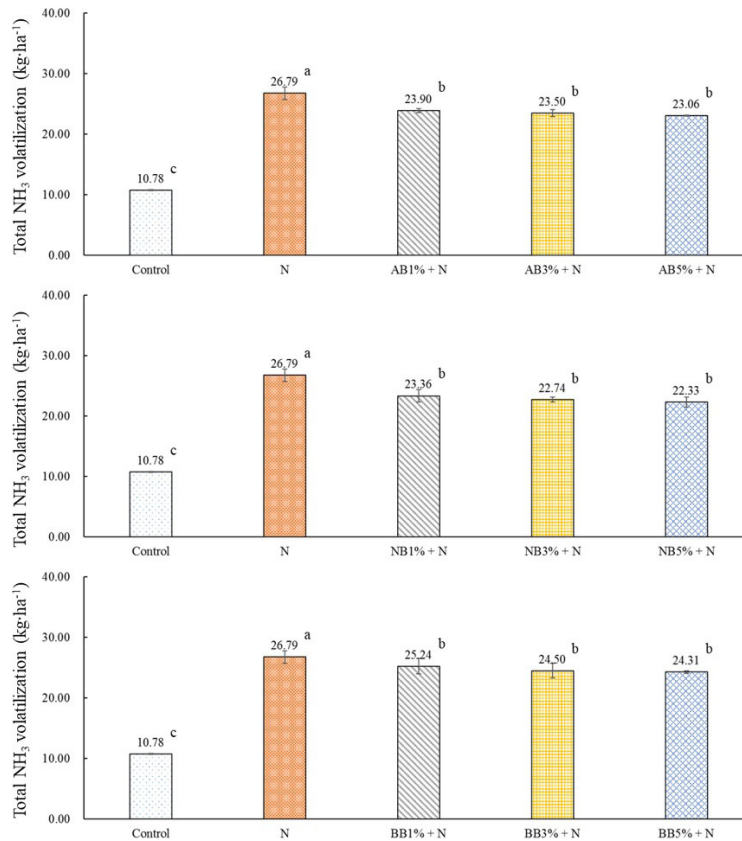


Fig. 2. Total NH₃ emission by application rate and pH of biochar. Error bars indicate standard deviations of the means (n = 3). a - c: Each value with different letters within a column are statistically significant difference from each other as determined by Duncan's multiple range test (p < 0.05).

Conclusion

본 연구는 탄화 왕겨의 pH 및 처리량이 NH₃ 배출에 미치는 영향을 평가하고자 수행하였으며, 탄화 왕겨는 pH에 따라 산성(pH 6.1, AH), 중성(pH 7.1, NH), 염기성(pH 11.0, BH)으로 구분하였다. 토양의 화학적 특성은 대부분 탄화 왕겨의 처리량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타낸 반면 탄화 왕겨 5% 처리는 토양 OM을 적정 범위 이상을 과도하게 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다. NH₃ 배출량은 요소 비료만 처리하였을 때에 비해 요소 비료와 탄화

왕겨를 함께 처리하였을 때 감소하였으며, NH₃ 5%를 처리하였을 때 가장 적게 배출되었다. 하지만 각각의 pH별 탄화 왕겨 처리량에 따른 NH₃ 총 배출량 사이의 통계적 유의차는 나타나지 않았다. 따라서 본 연구의 결과를 종합하여 살펴보면 농경지에 중성 pH를 갖는 탄화 왕겨를 투입 시 처리한 요소 비료가 NH₃ 형태로 유실되는 것을 효과적으로 방지할 수 있을 것으로 판단하였다. 또한 탄화 왕겨 처리량에 따라 NH₃ 배출량이 감소하였으나 통계적 유의차는 나타나지 않았으며, 경제적 측면과 토양의 화학성을 고려하였을 때 1% (w·w⁻¹)만 처리하는 것이 친환경 및 지속가능한 농업을 위한 적정 탄화 왕겨 처리량으로 사료된다.

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

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

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

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

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

References

- Allison FE. 1966. The fate of nitrogen applied to soils. *Advances in Agronomy* 18:219-258.
- Anderson JO, Thundiyil JG, Stolbach A. 2012. Clearing the air: A review of the effects of particulate matter air pollution on human health. *Journal of Medical Toxicology* 8:166-175.
- Atkinson RW, Mills IC, Walton HA, Anderson HR. 2015. Fine particle components and health: A systematic review and meta-analysis of epidemiological time series studies of daily mortality and hospital admissions. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology* 25:208-214.
- Chun JH, Kang YG, Lee JH, Yun YU, Oh TK, Yoon MH. 2022. The combined effect of nitrogen and biochar amendments on the yield and glucosinolate contents of the Chinese cabbage. *Journal of King Saud University* 35:101799.
- Hillel D, Hatfield JL. 2005. *Encyclopedia of soils in the environment*. pp. 56-64. Elsevier, New York, USA.
- Kang YG, Chun JH, Lee JH, Park SY, Luyima D, Oh TK, Yun YU. 2022. Effects of varying rates of nitrogen and biochar pH on NH₃ emissions and agronomic performance of Chinese cabbage (*Brassica rapa* ssp. *pekinensis*). *Agronomy* 12:61.
- Kang YG, Lee JH, Chun JH, Oh TK. 2021a. Adsorption characteristics of NH₄⁺ 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 NH₃ emissions in accordance with the pH of biochar. *Korean Journal of Agricultural Science* 48:787-796. [in Korean]

- Kang YG, Lee JY, Chun JH, Lee JH, Yun YU, Oh TK. 2021c. Adsorption characteristics of NH₄-N by biochar derived from pine needles. *Korean Journal of Agricultural Science* 48:589-596. [in Korean]
- Kim MS, Koo N, Kim JG. 2020. A comparative study on ammonia emission inventory in livestock manure compost application through a foreign case study. *Korean Journal of Environmental Biology* 38:71-81. [in Korean]
- Kim YH, Kong MS, Lee EJ, Lee TG, Jung GB. 2019. Status and changes in chemical properties of upland soil from 2001 to 2017 in Korea. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 38:213-218. [in Korean]
- Lee JH, Luyima D, Ahn JY, Park SY, Choi BS, Oh TK, Lee CH. 2019. Effect of different biochar formulations on the growth of cherry tomatoes. *Korean Journal of Agricultural Science* 46:931-939. [in Korean]
- Lee JH, Seong CJ, Kang SS, Lee HC, Kim SH, Lim JS, Kim JH, Yoo JH, Park JH, Oh TK. 2018. Effect of different types of biochar on the growth of Chinese cabbage (*Brassica chinensis*). *Korean Journal of Agricultural Science* 45:197-203. [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 (NH₃) emissions from soil amended with rice hull biochar. *Korean Journal of Agricultural Science* 47:1049-1056. [in Korean]