

FOOD&CHEMISTRY

Evaluation of NH₃ emissions in accordance with the pH of biochar

Yun-Gu Kang¹, Jae-Han Lee¹, Jin-Hyuk Chun¹, Yeo-Uk Yun², Taek-Keun Oh^{1,*}, Jwa-Kyung Sung^{3,*}

¹Department of Bio-Environmental Chemistry, College of Agriculture and Life Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²Chungnam Agricultural Research and Extension Services, Yesan 32418, Korea

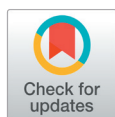
³Department of Crop Science, College of Agriculture, Life Science and Environmental Chemistry, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

*Corresponding authors: ok5382@cnu.ac.kr, jksung73@chungbuk.ac.kr

Abstract

Nitrogen (N) is the most important element during the process of plant growth, and the quality of crops varies depending on the amount of nitrogen present. Most of the nitrogen is used for plant growth, but approximately 10 - 20% of Nitrogen is carried away by the wind in the form of NH₃. This volatilized NH₃ reacts with various oxides in the atmosphere to generate secondary particulate matter. To address this, the present study attempts to reduce NH₃ occurring in the soil using biochar at a specific pH. Biochar was used as a treatment with 1% (w-w⁻¹) of the soil, and urea was applied at different levels of 160, 320, and 640 kg-N·ha⁻¹. NH₃ generated in the soil was collected using a dynamic column and analyzed using the indophenol blue method. NH₃ showed the maximum emission within 4 - 7 days after the fertilizer treatment, decreasing sharply afterward. NH₃ emission levels were reduced with the biochar treatment in all cases. Among them, the best reduction efficiency was found to be approximately 25% for the 320 kg·ha⁻¹ + pH 6.7 biochar treatment. Consequently, in order to reduce the amount of NH₃ generated in the soil, it is most effective to use pH 6.7 biochar and a standard amount (320 kg·N·ha⁻¹) of urea.

Keywords: biochar, dynamic column, NH₃, particulate matter, pH



 OPEN ACCESS

Citation: Kang YG, Lee JH, Chun JH, Yun YU, Oh TK, Sung JK. Evaluation of NH₃ emissions in accordance with the pH of biochar. Korean Journal of Agricultural Science 48:787-796. <https://doi.org/10.7744/kjoas.20210066>

Received: July 23, 2021

Revised: October 03, 2021

Accepted: October 14, 2021

Copyright: © 2021 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.

Introduction

작물의 성장 과정에서 질소(N, nitrogen)는 필수적인 다량 원소 중 하나이며, 작물 내에서 단백질과 엽록소 합성에 중요한 요소이다(Meng et al., 2017; Jung et al., 2020). 재배 기간 중 질소 결핍은 작물의 양분 불균형을 초래하며, 과도한 질소 공급은 작물의 수분 및 질소이용효율을 낮추고, 질소 용탈을 일으키며, 작물의 과도한 성장을 유발하여 품질을 저하시킨다고 보고되었다(Kim et al., 2007; Bassi et al., 2018; Xu et al., 2019). 이러한 이유로 인해 작물의 수량 증대 및 품질 향상을 포함하는 지속 가능한 농업을 위해 질소 시비량 개선 등의 효율적인 관리 방안이 필요하다. 토양에 투입된 질소의 대부분은 작물 생육에 사용되지만 투입된 질소의 약 10 - 20%는 탈질 과정에 의해 암모니아(NH₃) 또는 아산화질소(N₂O)와 같은 가스 형태로 휘산된다(Allison,

1966; Kundler, 1970). 특히 2016년 기준 국내 농업부문 NH₃ 총 배출량은 전체 NH₃ 총 배출량의 약 78.7%에 해당하는 237,017 톤이 배출되었다(NIER, 2019). 토양에서 발생한 NH₃는 대기 중에 존재하는 질소산화물(NO_x)이나 황산화물(SO_x)과 반응하여 질산암모늄(NH₄NO₃)과 황산암모늄(NH₄SO₄) 등의 2차 미세먼지를 생성한다(Anderson et al., 2003). 또한 NH₃는 악취를 유발하고, 토양과 작물 사이에서 양분의 불균형을 일으키며, 자연생태계 및 생물다양성에 큰 영향을 미친다(Gundersen and Rasmussen, 1990; Bobbink et al., 1992; Asman, 1994).

NH₃는 농업부문에서 주로 가축분퇴구비 및 비료 사용에 의해 배출되며, 토양 내에서 NH₄⁺가 OH⁻와 결합하면서 배출된다(Lim et al., 2012). 그로 인해 농업부문에서는 환경으로 배출되는 NH₃를 저감을 목적으로 황산알루미늄을 이용해 토양의 pH를 7 이하로 낮추거나, 무기질비료를 대신하여 유기질비료를 사용하는 등 다양한 방법을 제시 및 개발하였다(Wang et al., 2016). 하지만 대부분의 방법들이 경제성이 낮고, 다른 오염을 유발할 수 있기에 현실적으로 적용이 매우 어려운 실정이다(Guo et al., 2019). 그에 따라 적용이 용이하며, 경제적으로 농경지 토양에서 발생하는 NH₃를 저감시킬 수 있는 새로운 방안이 필요한 실정이다.

바이오차(biochar)는 바이오매스(biomass)와 숯(charcoal)의 합성어로 다양한 부산물을 산소가 제한된 조건에서 열분해한 탄소 함량이 높은 고형물질이다(Sohi, 2010; Oh et al., 2017; Lee et al., 2019; Hong et al., 2020). 바이오차는 토양에 처리되었을 때 토양의 pH 조절, 물 유지 능력 증가, 미생물 주거지 제공 등 다양한 특성에 의해 농업 생산성을 향상시킬 수 있다(Woo, 2013; Lee et al., 2018). 바이오차 처리에 따른 농업 생산성 증가 효과는 산성토양과 같은 척박한 토양에서 연구를 수행함으로써 입증되었다(Crane-Droesch et al., 2013). 바이오차는 다양한 물질을 흡착하는 미세공극을 가지고 있어 흡착을 통한 NH₃를 포함한 다양한 오염물질 및 중금속을 저감·제거시키는 수단으로 활용이 가능하다(Park et al., 2020). 이외에도 토양의 유기탄소를 증가시키고, 온실가스를 저감하는 능력으로 인해 세계적으로 주목받고 있는 친환경소재이다(Lehmann et al., 2008; Han et al., 2011). 바이오차 제조를 위해 왕겨를 사용하였으며, 왕겨는 국내에서 2번째로 많이 발생하는 농업 부산물이며, 매년 약 114만 6,800 톤이 발생하고 있다(NAAS, 2012).

따라서 본 연구는 매년 대량으로 발생하는 왕겨를 환경친화적으로 재활용할 수 있는 방안 중 하나인 바이오차를 활용하여 무기질비료를 시비한 토양에 pH가 다른 바이오차를 처리했을 때 바이오차에 의한 NH₃ 저감 효율을 평가하고자 하였다.

Materials and Methods

공시 재료

실험에 사용된 토양은 충남대학교 농업생명과학대학 부설 시험포장에서 채취하여 유리온실에서 2주간 풍건 후 2 mm 이하로 체거름하여 사용하였다. 바이오차는 pH에 따라 산성(pH 5.7), 중성(pH 6.7), 알칼리성(pH 11.0) 바이오차로 구분하기 위해 조건을 달리하여 제조한 바이오차를 푸른네이처(Pumnature, Suncheon, Korea)와 유기산업(Yoogi Industry, Gochang, Korea)에서 구매하여 이용하였다. 실험에 사용된 토양과 바이오차의 화학적 특성은 Table 1과 2에 나타내었다.

Table 1. Chemical properties of soil before this experiment.

Treatment	pH (1 : 5, D.H ₂ O)	EC (dS·m ⁻¹)	Av. P ₂ O ₅ (mg·kg ⁻¹)	T-C (%)	T-N	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺
						(cmol _c kg ⁻¹)			
Initial soil	6.89±0.08	0.29±0.05	62.39±1.57	0.49±0.03	0.15±0.09	1.66±0.04	4.42±0.15	0.09±0.01	0.24±0.05

D.H₂O, distilled water; EC, electrical conductivity; Av. P₂O₅, available phosphate; T-C, total carbon; T-N, total nitrogen; T-H, total hydrogen.

Table 2. Pyrolysis conditions and chemical properties of rice hull biochar.

Treatment	Temp.	Time	pH	EC	T-C	T-N	T-H	T-O	TP ₂ O ₅	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O
	(°C)	(min)	(1:10, D.H ₂ O)	(dS·m ⁻¹)					(%)				
Biochar	350	15	5.70±0.00	3.40±0.04	41.33±0.06	0.38±0.04	4.03±0.13	37.91±0.55	0.14±0.03	0.14±0.03	0.34±0.01	0.04±0.00	0.02±0.00
	450	15	6.70±0.00	1.33±0.11	44.10±0.00	0.36±0.04	5.39±0.58	27.27±0.17	0.06±0.01	0.15±0.03	0.48±0.09	0.05±0.01	0.01±0.00
	600	30	11.00±0.00	1.83±0.12	54.93±0.25	0.58±0.03	1.87±0.25	8.47±1.13	0.21±0.00	0.33±0.01	0.81±0.04	0.12±0.00	0.05±0.02

Temp., temperature; D.H₂O, distilled water; EC, electrical conductivity; T-C, total carbon; T-N, total nitrogen; T-P₂O₅, total phosphate.

처리구 설정

처리구는 무처리구(control), 대조구(N), 바이오차처리구(BC + N)로 설정하였다. 비료는 노지 배추의 시비처방기준에 준하여 요소(Urea, N), 용성인비(P₂O₅), 염화칼륨(K₂O)를 시비하였다. NH₃ 배출에 직접적인 영향을 주는 요소는 반량(160 kg·ha⁻¹), 기준량(320 kg·ha⁻¹), 배량(640 kg·ha⁻¹)으로 구분하여 처리하였으며, 용성인비와 염화칼륨은 모든 처리구에 동일한 양을 처리하였다. 바이오차는 pH (pH 5.7, 6.7, 11.0)에 따라 토양의 중량 대비 1% (w·w⁻¹)으로 처리하였으며, 실험 기간 중 토양의 수분함량은 매일 증류수를 첨가하여 20%로 유지하였다.

NH₃ 배출량 평가

NH₃ 배출량 평가는 dynamic column을 이용하였다. Column은 아크릴을 이용하여 제작하였으며, 내부 크기는 90 cm (Ø) × 50 (H) cm이다. NH₃ 포집은 매일 오전 9시에 0.05 N H₂SO₄으로 포집하였다. 포집한 NH₃ 시료는 Indophenol blue 비색법을 이용하여 640 nm에서 분광광도계(GENESYS 50 UV-Vis spectrophotometer, Thermo Scientific Inc., Waltham, Massachusetts, USA)를 이용하여 비색정량하였다.

NH₃ 배출량을 계산한 계산식은 다음과 같다.

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

J, NH₃-N flux (g·ha⁻²·min⁻¹);

Q, 시료채취 기간 동안 유량(m²·min⁻¹);

A_L, chamber 내 headspace의 면적(m²);

C, chamber 내의 NH₃-N의 농도(μg·m⁻²);

V, 포집액의 용량(L);

T, 포집한 시간(min);

R, NH₃의 전체 분자량 중 N이 차지하는 비율.

토양 및 바이오차 분석

토양의 화학적 특성은 pH, 전기전도도(EC, electrical conductivity), 총 탄소(T-C, total carbon), 총 질소(T-N, total nitrogen), 유효 인산(Av. P₂O₅, available phosphate), 치환성 양이온(Ex. cations, exchangeable cations, Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺, Na⁺)을 분석하였다. 토양의 pH와 EC는 토양과 증류수를 1 : 5 (w·v⁻¹)로 혼합하여 30분간 진탕 후 1시간 동안 방치한 혼합액을 pH·EC meter (ORIONTM Versa Star ProTM, Thermo Scientific Inc., Waltham, Massachusetts, USA)를 이용하여 측정하였다. T-C와 T-N는 Element Analyzer (TruSpec Micro, Leco, Michigan, USA)을 이용하여 분석하였다. Av. P₂O₅는 Lancaster법을 이용하여 720 nm에서 분광광도계(GENESYS 50 UV-Visible spectrometer, Thermo Scientific Inc., Waltham, Massachusetts, USA)를 이용하여 분석하였다. Ex. cations (Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺, Na⁺)는 pH 7.0으로 교정한 1 M NH₄OAc로 침출하여 ICP-OES (Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer, PerkinElmer Avio 500, Thermo Scientific Inc., Waltham, Massachusetts, USA)를 이용하여 분석하였다.

바이오차의 pH와 EC는 바이오차와 증류수를 1 : 10 (w·v⁻¹)로 혼합하여 30분간 진탕 후 1시간 동안 방치한 혼합액을 pH·EC meter (ORION™ Versa Star Pro™, Thermo Scientific Inc., Waltham, Massachusetts, USA)를 이용하여 측정하였다. T-C, T-N, 총 수소(T-H, total hydrogen), 총 산소(T-O, total oxygen)는 Element Analyzer (TruSpec Micro, Leco, Michigan, USA)을 이용하여 분석하였다. T-P₂O₅와 Cations (CaO, K₂O, MgO, Na₂O)는 Nitric acid와 Perchloric – Nitric acid 용액으로 산분해하여 ICP-OES (Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer, ICAP 7000series ICP spectrometer, Thermo Scientific Inc., Waltham, Massachusetts, USA)로 분석하였다.

통계 분석

통계 분석은 SPSS (IBM SPSS Statistics version 26, IBM SPSS, NY, USA) 일원배치분산분석(ANOVA, ONE way analysis of variance)을 통해 95% 신뢰수준에서 유의성 검정을 수행하였으며, Duncan의 다중 범위 검정(Duncan's multiple range test)을 통해 각 처리구 사이의 유의차를 확인하였다.

Results and Discussion

NH₃ 배출량 평가

160 kg·N·ha⁻¹를 처리한 처리구의 일별 배출량 변화 추이와 총 배출량을 나타낸 그래프는 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 무처리구를 제외한 모든 처리구에서 DAT (day after treatment) 4 - 5에 일일 최대배출량을 보였으며, 대조구에서 약 8.46 kg·ha⁻¹로 가장 많은 배출량을 보였다. DAT 5 이후 전체적으로 배출량이 감소하였으며, DAT 25에 무처리구 (Control)와 유사한 경향을 보였다. 대조구인 N 160 kg·ha⁻¹ 처리구의 NH₃ 총 배출량은 약 58.24 kg·ha⁻¹이었으며, 대조구에 바이오차 처리 시 pH에 따라 각각 약 52.38, 49.71, 51.11 kg·ha⁻¹이었다. pH 6.7 바이오차를 처리한 처리구에서 NH₃ 배출량이 최대 15% 감소하였으며, 다른 처리구에서도 약 10 - 12% 감소하였다.

320 kg·N·ha⁻¹를 처리한 처리구의 배출량 변화 추이 및 배출량은 Fig. 2와 같다. 무처리구를 제외한 모든 처리구에서 DAT 5에 일일 최대배출량을 나타냈으며, 대조구에서 약 20.20 kg·ha⁻¹로 가장 많이 배출되었다. DAT 5 이후 모든 처리구에서 배출량이 감소하였으며, DAT 26 이후 무처리구와 유사한 배출 경향을 나타냈다. N 320 kg·ha⁻¹ 처리구의 총 배출량은 약 136.87 kg·ha⁻¹이었으며, 바이오차 처리 시 각각 110.29, 102.31, 102.49 kg·ha⁻¹이었다. pH 6.7 biochar + N 320 kg·ha⁻¹와 pH 11.0 biochar + N 320 kg·ha⁻¹의 배출량은 약 25% 감소하였으며, pH 5.7 바이오차 처리 시 NH₃ 배출량이 약 19% 감소하였다.

640 kg·N·ha⁻¹를 처리한 처리구의 일별 배출량 변화 추이 및 총 배출량은 Fig. 3와 같다. 무처리구를 제외한 모든 처리구는 DAT 7에 일일 최대배출량을 보였으며, 대조구에서 38.12 kg·ha⁻¹로 가장 많은 배출량을 보였다. DAT 7 이후 배출량이 점차 감소하였다. DAT 29에 무처리구와 유사한 배출량을 보였다. N 640 kg·ha⁻¹ 처리구의 총 배출량은 231.53 kg·ha⁻¹이었으며, 바이오차 처리 시 각각 206.10, 205.99, 206.72 kg·ha⁻¹이었다. 바이오차를 처리한 모든 처리구에서 약 11%의 배출량 저감 효과를 보였다. 토양에 요소 시용에 따른 NH₃ 배출은 Sun 등(2017)의 보고와 유사하게 실험 초반에 매우 빠른 속도로 진행되었다. 바이오차 처리에 따른 NH₃ 배출량 감소는 다양한 연구를 통해 확인되었으며, 이는 표면의 작용기, pH, CEC, 바이오차의 침투 깊이 등 다양한 인자의 영향을 받는 것으로 보고되었다. 그 중에서도 바이오차 제조 시 열 분해 온도, 바이오차 및 토양의 pH가 가장 밀접한 관련을 갖는다고 첨언하였다(Mandal et al., 2016; 2018; Kim et al., 2021). 또한 요소는 토양 내에서 NH₄⁺ 형태로 가수분해된 후, NH₃로 배출되지 않고 질산화과정을 거쳐 N₂O 형태로도 유실될 수 있다(Han and Hong, 2019).

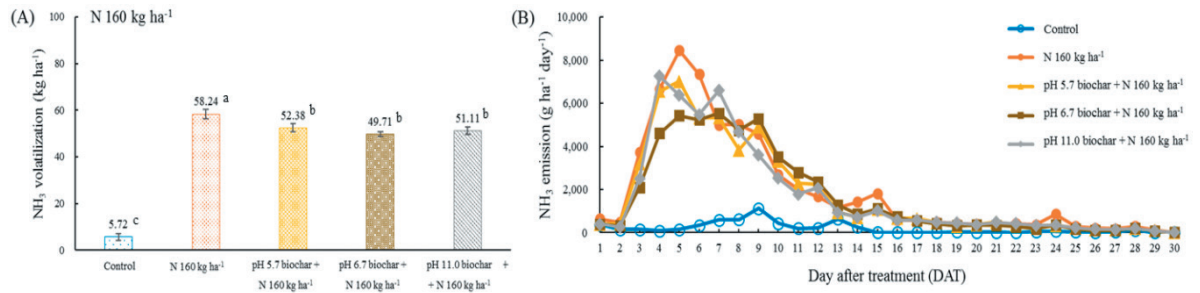


Fig. 1. NH₃ emission by N 160 kg·ha⁻¹ and biochar's pH. (A) Total NH₃ emissions during the experiments, (B) daily NH₃ emission trend. a - c: Each value with different letters within a column are significantly different from each other as determined by Duncan's multiple range test (p < 0.05).

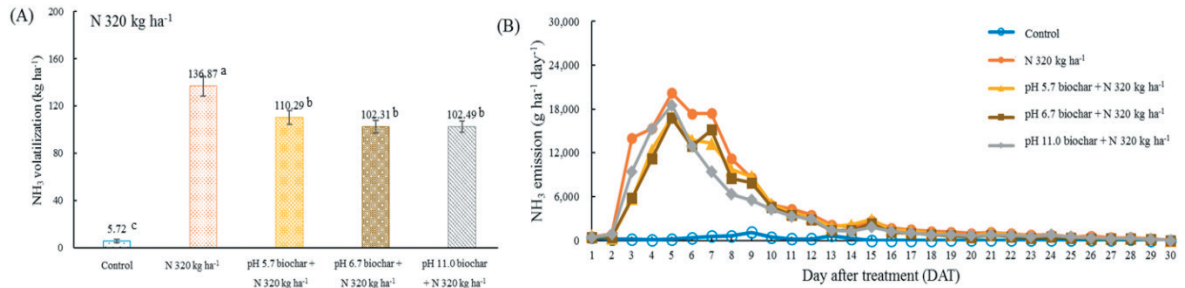


Fig. 2. NH₃ emission by N 320 kg·ha⁻¹ and biochar's pH. (A) Total NH₃ emissions during the experiments, (B) daily NH₃ emission trend. a - c: Each value with different letters within a column are significantly different from each other as determined by Duncan's multiple range test (p < 0.05).

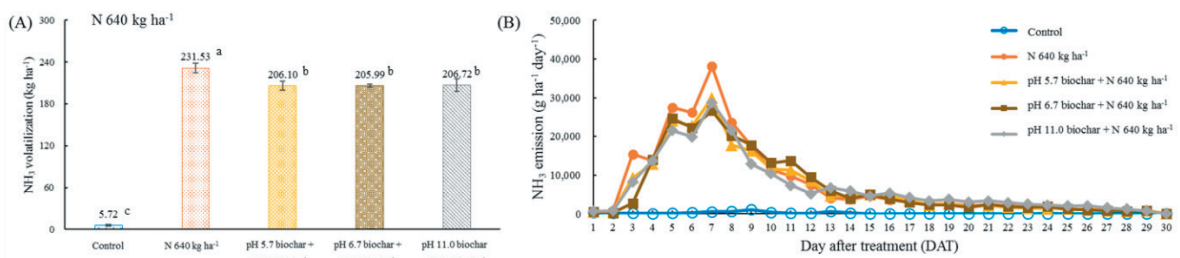


Fig. 3. NH₃ emission by N 640 kg·ha⁻¹ and biochar's pH. (A) Total NH₃ emissions during the experiments, (B) daily NH₃ emission trend. a - c: Each value with different letters within a column are significantly different from each other as determined by Duncan's multiple range test (p < 0.05).

토양의 화학적 특성 평가

실험 후 토양의 화학적 특성은 Table 3에 나타내었다. 실험 후 토양의 pH는 pH 6.7 biochar + N 160 kg·ha⁻¹ 처리구에서 pH 6.34로 가장 낮았으며, pH 11.0 biochar + N 640 kg·ha⁻¹ 처리구에서 pH 6.90으로 가장 높았다. 실험 전 토양(pH 6.89)에 비해 실험 후 모든 처리구에서 비슷하거나 감소하였다. 이는 비료 사용으로 인해 토양이 산성화된 것으로 판단되는데, 무기질비료 사용에 따른 토양의 산성화는 본 연구 외에도 다양한 연구에서 확인되고 있다(Lawson et al., 2013; Um et al., 2019). 토양 내 과도한 EC는 작물의 생장에 악영향을 주며, 적절한 조치를 취하지 못하면 생리적 장애로 인해 작물의 죽음을 초래한다(Lee et al., 2001). 또한 바이오차 처리 시 토양의 EC값을 상승시키는 것으로 보고되어 있다(Raison, 1979). 본 연구에 사용된 토양의 EC는 실험 후 모든 처리구에서 실험 전 토양(0.34 dS·m⁻¹)에 비해 0.54 - 0.85 dS·m⁻¹로 증가하였다. 이는 바이오차를 열분해하는 과정에 휘발성물질이 손실됨으로써 회분 내 다양한 염들이 농축되는 효과에 의해 EC가 증가되었을 것으로 판단된다(Cantrell et al., 2012). 탄소 함량의 경우 실험 전 토양의 0.49%에 비해 무처리구와 대조구에서는 감소하였으며, 바이오차 처리구에서는 증가하였다. 특히 pH 11.0 바이오차를 처리했을 때 약 1.40%로 가장 높은 탄소 격리 효과를 나타내었다. 토양 내 질소 함량은 실험 후 감소하였으며, 처리구간 유의차를 나타내지 않았다. 치환성 양이온(Mg²⁺, Ca²⁺, Na⁺, K⁺) 중 Mg²⁺는 실험 전 토양에 비해 실험 후 감소하였으며, Ca²⁺, Na⁺, K⁺는 실험 후 증가하였다.

바이오차의 화학적 특성 평가

바이오차의 pH가 NH₃ 배출에 미치는 영향을 평가하기 위해 제조 조건을 달리하여 바이오차의 pH를 구분하였다(Table 2). 바이오차의 pH는 열 분해 온도 및 시간이 증가함에 따라 증가하였으며, 350°C에서 15분 동안 열분해 시 pH 5.70으로 산성을 나타내었고, 600°C에서 30분간 열 분해 시 pH 11.0으로 강염기를 나타내었다. 바이오차의 T-C와 T-N은 pH와 유사하게 열 분해 조건이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었으며, T-H와 T-O는 pH와 대조적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 바이오차의 H : C 비율과 O : C 비율은 각각 바이오차의 구조적 안정성과 극성 정도를 나타낸다(Oh and Chang, 2020). 본 연구에 사용된 바이오차의 H : C 비율은 1.16, 1.46, 0.41로 pH 11.0 바이오차는 H : C 비율이 0.7 이하이므로 토양에 처리시 구조적 안정성을 유지할 것으로 기대되며, pH 5.7 바이오차와 pH 6.7 바이오차는 반영구적으로 저장하기 어려울 것으로 판단된다(Kang et al., 2021). 바이오차의 O:C 비율은 바이오차의 pH가 증가함에 따라 0.69, 0.46, 0.12로 점차 감소하였으며, 이는 열 분해 과정에서 발생한 탈수 반응으로 바이오차의 친수성이 점차 감소함을 나타낸다(Oh and Chang, 2020). 바이오차의 T-P₂O₅는 pH 11.0 바이오차에서 가장 높았으며, pH 6.7 바이오차가 가장 낮은 함량을 나타내었다. 바이오차의 무기 조성(CaO, K₂O, MgO, Na₂O)는 pH가 증가함에 따라 대부분 증가하는 경향을 보였다.

Conclusion

본 연구는 pH가 다른 바이오차 처리가 농경지에서 발생하는 NH₃에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 무기질비료를 처리한 토양에 바이오차(pH 5.7, 6.7, 11.0) 혼합 처리 시 농경지에서 발생하는 NH₃ 배출량을 저감시킬 수 있었다. 특히 pH 6.7 바이오차를 처리하였을 때 약 15, 25, 11%로 가장 높은 배출량 저감 효과를 나타내었으며, pH 5.7 바이오차를 처리 시 약 10, 19, 11%로 비교적 낮은 저감 효율을 나타내었다. 또한 요소 비료 기준량(320 kg·ha⁻¹)을 시비하였을 때 바이오차의 NH₃ 저감 효율이 최대 약 25%로 가장 뛰어났다. 따라서 2차 미세먼지의 전구 물질인 NH₃의 배출량 저감을 위해서는 pH 6.7 바이오차를 농경지 내 혼합 처리한 뒤, 요소를 기준량(320 kg·ha⁻¹) 처리하는 것이 NH₃ 배출량 저감에 가장 효과적일 것으로 사료된다.

Table 3. Chemical properties of soil after this experiment.

Treatment	pH (1:5, D.H ₂ O)	EC (dS·m ⁻¹)	Av.P ₂ O ₅ (mg·kg ⁻¹)	T-C (%)	T-N	Mg ²⁺ (μ mol·kg ⁻¹)	Ca ²⁺ (μ mol·kg ⁻¹)	Na ⁺	K ⁺
Control	6.84 ± 0.05ab	0.34 ± 0.01d	65.78 ± 4.17c	0.56 ± 0.10de	0.12 ± 0.18a	1.44 ± 0.03 a	4.34 ± 0.13abc	0.11 ± 0.01bcd	0.20 ± 0.01bc
N 160 kg·ha ⁻¹	6.81 ± 0.09abc	0.60 ± 0.08bc	73.88 ± 9.95bc	0.46 ± 0.05e	0.07 ± 0.07a	1.54 ± 0.08cdef	4.65 ± 0.30bc	0.10 ± 0.02abcd	0.27 ± 0.04c
N 320 kg·ha ⁻¹	6.79 ± 0.04abcd	0.55 ± 0.04c	73.26 ± 4.82bc	0.48 ± 0.02de	0.07 ± 0.04a	1.38 ± 0.07b	4.26 ± 0.14abc	0.09 ± 0.00abcd	0.28 ± 0.04abc
N 640 kg·ha ⁻¹	6.89 ± 0.11a	0.55 ± 0.08c	75.81 ± 7.71abc	0.47 ± 0.03de	0.12 ± 0.12a	1.43 ± 0.06fg	4.40 ± 0.13c	0.09 ± 0.00d	0.28 ± 0.02abc
pH 5.7 biochar + N 160 kg·ha ⁻¹	6.64 ± 0.13bcde	0.54 ± 0.06c	81.3 ± 2.63abc	0.68 ± 0.15d	0.09 ± 0.05a	1.5 ± 0.05cdef	4.43 ± 0.08abc	0.10 ± 0.01d	0.26 ± 0.02abc
pH 5.7 biochar + N 320 kg·ha ⁻¹	6.62 ± 0.15cdef	0.55 ± 0.05c	78.91 ± 4.11abc	0.67 ± 0.05d	0.01 ± 0.01a	1.53 ± 0.06bcd	4.44 ± 0.13abc	0.10 ± 0.02cd	0.35 ± 0.12bc
pH 5.7 biochar + N 640 kg·ha ⁻¹	6.60 ± 0.03cdef	0.85 ± 0.23a	88.99 ± 13.13ab	0.65 ± 0.06de	0.07 ± 0.05a	1.44 ± 0.07bc	4.53 ± 0.08abc	0.11 ± 0.01abcd	0.30 ± 0.04ab
H 6.7 biochar + N 160 kg·ha ⁻¹	6.34 ± 0.02g	0.63 ± 0.05bc	82.79 ± 0.99abc	0.88 ± 0.05c	0.07 ± 0.07a	1.49 ± 0.03bcdef	4.62 ± 0.10abc	0.12 ± 0.00abc	0.28 ± 0.01abc
pH 6.7 biochar + N 320 kg·ha ⁻¹	6.49 ± 0.10efg	0.63 ± 0.06bc	72.66 ± 4.07bc	1.09 ± 0.26bc	0.04 ± 0.03a	1.40 ± 0.01bcde	4.34 ± 0.08ab	0.12 ± 0.00a	0.29 ± 0.03abc
pH 6.7 biochar + N 640 kg·ha ⁻¹	6.40 ± 0.010fg	0.62 ± 0.00bc	77.29 ± 9.38abc	1.06 ± 0.12bc	0.07 ± 0.06a	1.31 ± 0.08defg	4.30 ± 0.30bc	0.11 ± 0.01ab	0.37 ± 0.15abc
pH 11.0 biochar + N 160 kg·ha ⁻¹	6.60 ± 0.12cdef	0.57 ± 0.03bc	75.64 ± 4.84abc	1.40 ± 0.11a	0.09 ± 0.07a	1.49 ± 0.03g	4.55 ± 0.12c	0.10 ± 0.00abcd	0.28 ± 0.02a
pH 11.0 biochar + N 320 kg·ha ⁻¹	6.58 ± 0.09def	0.63 ± 0.15bc	80.90 ± 4.91abc	1.22 ± 0.09ab	0.06 ± 0.04a	1.39 ± 0.06bcde	4.37 ± 0.13abc	0.11 ± 0.01abcd	0.29 ± 0.03abc
pH 11.0 biochar + N 640 kg·ha ⁻¹	6.90 ± 0.29a	0.76 ± 0.16ab	94.83 ± 27.98a	1.32 ± 0.08a	0.09 ± 0.07a	1.40 ± 0.06defg	4.50 ± 0.08abc	0.11 ± 0.00abc	0.34 ± 0.02abc

D.H₂O, distilled water; EC, electrical conductivity; Av. P₂O₅, available phosphate; T-C, total carbon; T-N, total nitrogen.

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

Conflict of Interests

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

Acknowledgements

본 논문은 농촌진흥청(Rural Development Administration of Korea)의 연구사업(세부과제번호: PJ01425302)의 지원에 의해 수행되었습니다.

Authors Information

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

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

Jin-Hyuk Chun, <http://orcid.org/0000-0002-3802-6834>

Yeo-Uk Yun, Chungnam Agricultural Research and Extension Service, Agricultural researcher

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

Jwa-Kyung Sung, <http://orcid.org/0000-0002-0758-6644>

References

- Allison FE. 1966. The fate of nitrogen applied to soils. *Advances in Agronomy* 18:219-258.
- Anderson N, Strader R, Davidson C. 2003. Airborne reduced nitrogen: ammonia emissions from agriculture and other sources. *Environment International* 29:277-286.
- Asman WA. 1994. Emission and deposition of ammonia and ammonium. *Nova Acta Leopoldina* 70:263-297.
- Bassi D, Menossi M, Mattiello L. 2018. Nitrogen supply influences photosynthesis establishment along the sugarcane leaf. *Scientific Reports* 8:2327.
- Bobbink R, Heil GW, Raessen MB. 1992. Atmospheric deposition and canopy exchange processes in heathland ecosystems. *Environmental Pollution* 75:29-37.
- Cantrell KB, Hunt PG, Uchimiya M, Novak JM, Ro KS. 2012. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresource Technology* 107:419-428.
- Crane-Droesch A, Abiven S, Jeffery S, Torn MS. 2013. Heterogeneous global crop yield response to biochar: A meta-regression analysis. *Environmental Research Letters* 8:044049-044057.
- Gundersen P, Rasmussen L. 1990. Nitrification in forest soils: Effects from nitrogen deposition on soil acidification and aluminum release. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* 113:1-45.
- Guo C, Ren T, Li P, Wang B, Zou J, Hussain S, Cong R, Wu L, Lu J, Li X. 2019. Producing more grain yield of rice with less ammonia volatilization and greenhouse gases emission using slow/controlled-release urea. *Environmental Science and Pollutant Research* 26:2569-2579.
- Han HR, Hong CO. 2019. Effect of incorporation of hairy vetch on nitrous oxide emission from soils cultivated with maize. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 38:237-244. [in Korean]
- Han JH, Seo DC, Kang SW, Choi IK, Jeon WT, Kang UG, Kang SJ, Heo JS, Kim SD, Cho JS. 2011. Evaluation of fertilizer value of biochars using water plants. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 44:794-800. [in Korean]
- Hong SC, Yu SY, Kim KS, Lee GH, Song SN. 2020. Effect of biochar on early growth and nutrient content of vegetable seedlings. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 39:50-57. [in Korean]

- Jung JG, Lee YH, Choi JE, Song GE, Ko JH, Lee KD, Shim SI. 2020. Changes in the hyperspectral characteristics of wheat plants according to N top-dressing rates at various growth stages. *Korean Journal of Crop Science* 65:377-385. [in Korean]
- Kang YG, Lee JY, Chun JH, Lee JH, Yun YU, Oh TK. 2021. Adsorption characteristics of NH₄-N by biochar derived from pine needles. *Korean Journal of Agricultural Science* 48:589-596. [in Korean]
- Kim MS, Min HG, Koo NM, Kim JG. 2021. Response to ammonia emission flux to different pH conditions under biochar and liquid fertilizer application. *Agriculture* 11:136-144.
- Kim SJ, Yang JE, Cho BO, Kim JJ, Shin YO. 2007. Factor controlling the losses of urea through ammonia volatilization. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 40:77-82.
- Kundler P. 1970. Utilization, fixation, and loss of fertilizer nitrogen. *Albrecht-Thaer-Arch* 14:191-210.
- Lawson A, Fortuna AM, Cogger C, Bary A, Stubbs T. 2013. Nitrogen contribution of rye-hairy vetch cover crop mixtures to organically grown sweet corn. *Renewable Agriculture and Food Systems* 28:59-69.
- Lee GJ, Kang BK, Kim HJ, Park SK, Min KB. 2001. Effect of nitrogen fertilizers on soil pH, EC, NO₃-N and lettuce (*Lactuca Sativa* L.) growth. *Journal of Soil Science and Fertilizer* 34:122-128. [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]
- Lehmann A, Jechow K, Enenkel C. 2008. Blm10 binds to pre-activated proteasome core particles with open gate conformation. *EMBO Reports* 9:1237-1243.
- 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]
- Mandal S, Donner E, Vasileiadis S, Skinner W, Smith E, Lombi E. 2018. The effect of biochar feedstock, pyrolysis temperature, and application rate on the reduction of ammonia volatilization from biochar-amended soil. *Journal of Science of the Total Environment* 327:942-950.
- Mandal S, Thangarajan R, Bolan NS, Sarkar B, Khan N, OK YS, Naidu R. 2016. Biochar-induced concomitant decrease in ammonia volatilization and increase in nitrogen use efficiency by wheat. *Chemosphere* 142:120-127.
- Meng F, Dungait JAJ, Xu X, Bol R, Zhang X, Wu W. 2017. Coupled incorporation of maize (*Zea mays* L.) straw with nitrogen fertilizer increased soil organic carbon in Fluvic Cambisol. *Geoderma* 304:19-27.
- NAAS (National Institute of Agricultural Sciences). 2012. Research and analysis criteria for crops. RDA, Jeonju, Korea. [in Korean]
- NIER (National Institute of Environmental Research). 2019. Departmental emission. Accessed in <http://airemiss.nier.go.kr> on 12 June 2021. [in Korean]
- Oh HS, Chang JS. 2020. Comparison of cation anion dye removal characteristics between kelp-based magnetic biochar and pine-based magnetic biochar. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 42:308-318. [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* 7:359-365. [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]
- Raison RJ. 1979. Modification of the soil environment by vegetation fires, with particular reference to nitrogen transformations: A review. *Plant and Soil* 51:73-108.
- Sohi SP, Krull E, Lopez-Capel E, Bol R. 2010. A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy* 105:47-82.
- Sun H, Lu H, Chu L, Shao H, Shi W. 2017. Biochar applied with appropriate rates can reduce N leaching, keep N retention and not increase NH₃ volatilization in a coastal saline soil. *Journal of Science of the Total Environment* 545:820-825.
- Um IS, Lee MJ, Nam JH, Rho IR. 2019. Effects of additional fertilization after cultivating green manure crops on the growth and saponin content of codonopsis lanceolata Trautv. *Korean Journal of Medicinal Crop Science* 27:1-8. [in Korean]

- Wang H, Hegazy AM, Jiang X, Hu Z, Lu J, Mu J, Zhang X, Zhu X. 2016. Suppression of ammonia volatilization from rice-wheat rotation fields amended with controlled-release urea and urea. *Agronomy Journal* 108:1214-1224.
- Woo SH. 2013. Biochar for soil carbon sequestration. *Clean Technology* 19:201-211. [in Korean]
- Xu J, Cai H, Wang X, Ma C, Lu Y, Ding Y, Wang X, Chen H, Wang Y, Saddique Q. 2019. Exploring optimal irrigation and nitrogen fertilization in a winter wheat-summer maize rotation system for improving crop yield and reducing water and nitrogen leaching. *Agricultural Water Management* 228:105904.