

Article

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2020.53.4.528>

pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

Characteristics of Ammonia Gas Emission from Soybean Cultivation Soil with Biochar, Fly ash and Microorganisms

Su-Lim Lee^{1†}, Jae-Hoon Lee^{2†}, Jong-Hwan Park³, Se-Wook Hwang¹, and Dong-Cheol Seo^{4*}¹MSc Student, Division of Applied Life Science (Institute of Agriculture and Life Science), Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea²BSc Student, Department of Agricultural Chemistry and Food Science & Technology (Institute of Agriculture and Life Science), Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea³Research Professor, Department of Agricultural Chemistry and Food Science & Technology (Institute of Agriculture and Life Science), Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea⁴Professor, Department of Agricultural Chemistry and Food Science & Technology (Institute of Agriculture and Life Science), Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea*Corresponding author: dcseo@gnu.ac.kr

†Both authors contributed equally to this work and are considered as co-first authors.

ABSTRACT

Received: October 21, 2020

Revised: November 5, 2020

Accepted: November 6, 2020

ORCID

Su-Lim Lee

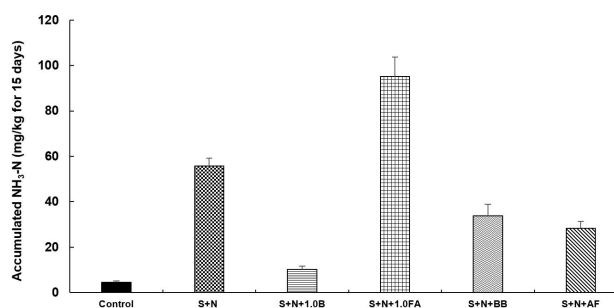
<https://orcid.org/0000-0001-8857-2895>

Dong-Cheol Seo

<https://orcid.org/0000-0001-8515-0670>

As ammonia gas caused by nitrogen supply source such as urea in soil is identified as a source of particulate matter, an eco-friendly method to reduce ammonia gas emission while using chemical fertilizers to provide the nutrients required by crops is needed. Therefore, this study evaluated the effects of microorganisms, biochar and fly ash, known as soil conditioners, on the amount of ammonia gas generated in urea-treated soil. The ammonia gas emissions from the soils treated with urea rapidly increased in 2 days, and then declined sharply between days 3 and 15. On the other hand, as a result of adding biochar to the soil treated with urea, the amount of ammonia gas that occurred rapidly in 2 days was reduced, which was dependent on the added amount of biochar. Both *Alcaligenes faecalis subsp.* and *Brevibacillus* sp. was effective in reducing ammonia gas generated from urea treated soil. However, the amount of ammonia gas generated from urea-treated soil under different fly ash dosage increased gradually as the amount of fly ash increased, which was considered to be closely related to the pH variation of soil. Above all, biochar and microorganisms have a positive effect on reducing ammonia gas generated from urea-treated soil, while fly ash has a negative effect.

Keywords: Ammonia gas emission, Particulate matter, Urea, Soil amendments, Biochar



Biochar and microorganisms have a positive effect on reducing ammonia gas generated from urea-treated soil, while fly ash has a negative effect. [Control (soil 50 g), S+N (soil 50 g+urea 1 g), S+N+1.0B (soil 50 g+urea 1 g+biochar 1.0 g), S+N+1.0FA(soil 50 g+urea 1 g+fly ash 1.0 g), S+N+BB (soil 50 g+urea 1 g+ *Brevibacillus* sp. 5 mL), S+N+AF (soil 50 g+urea 1 g+ *Alcaligenes faecalis subsp. Faecalis* 5 mL)]



Introduction

질소는 식물의 정상적인 성장을 위해 필요한 다량원소 중의 하나이다 (Meng et al., 2017). 특히, 식물체 내에서 질소는 엽록소 합성과정에 필요할 뿐만 아니라 엽록소의 구성성분으로 이것이 결핍되면 잎의 황화현상을 초래한다 (Bassi et al., 2018). 또한 질소의 결핍은 종자 및 식물체에 단백질 합성을 저해하여 양분 불균형을 초래한다고 알려져 있다. 반면에, 과도한 질소의 공급은 식물의 과잉성장을 초래하여 상품의 수량과 품질을 저하시킨다고 보고되었다 (Kim et al., 2007). 이와 같이 작물 수량과 품질을 충족시키기 위해서는 질소의 효율적인 관리가 필요하다.

일반적으로 토양내에서 질소의 손실은 식물 바이오매스의 제거, 암모니아 휘산, 질산염 용출 및 탈질 반응을 통하여 일어난다 (Venterea et al., 2020). 특히, 토양내에서 암모니아 휘산은 토양과 식물사이 양분의 불균형을 초래할 뿐만 아니라 농업환경에서 발생하는 초미세먼지의 원인물질로 보고됨에 따라 이들을 저감하기 위한 연구는 많은 연구자들부터 주목받기 시작하였다 (Zhang et al., 2015; Wu et al., 2018; Choi et al., 2019; Tao et al., 2014).

농업부문에 암모니아 휘산을 저감하기 위해서 완효성 비료사용, 유기·자연농법의 확대 보급, 슬러리 적용, 새로 개발된 urease 처리와 같은 다양한 기술들이 개발되어 왔다 (Wang et al., 2016). 하지만 기존 방법들은 실제 농가에 적용하기에 경제성이 낮고, 그로부터 발생하는 2차오염의 위험성으로 인해 적용이 제한적이라 보고되었다 (Guo et al., 2019). 이와 같이 암모니아 휘산을 저감하기 위해 다양한 기술들이 보급 및 실시되었음에도 불구하고, 여전히 많은 농가는 작물 생산성을 향상시키기 위해 화학비료를 사용하고 있고, 이에 해마다 휘산되는 암모니아 양은 증가하는 추세이다. 그래서, 작물이 필요한 양분을 만족하기 위해 화학비료를 시비하면서도 암모니아 발생량을 저감시킬 수 있는 친환경적인 방안이 필요하다.

최근 폐자원을 재활용한 친환경 농자재에 대한 연구가 활발히 진행됨에 따라 토양 및 환경 오염을 최소화하고, 작물생산성을 향상시킬 수 있는 토양개량용 친환경 소재가 각광받고 있다. 그 중, biochar는 폐기물로 버려지는 다양한 바이오매스를 열분해하여 생성된 탄소소재로서 (Chan et al., 2007), 토양의 질을 향상시키기 위한 토양개량제로 사용될 수 있으며 (Yao et al., 2012), 실제로 토양에 처리하였을 때 작물의 수확량이 증가하고 토양품질개선의 효과가 있다고 보고되었다 (Major et al., 2010). Fly ash는 고온에서 석탄을 연소하여 생성된 잔류물로 전세계적으로 문제가 되는 산업폐기물로 분류되어 있지만 이들을 토양에 적용할 경우 물리적, 화학적 및 생물학적 특성을 개선할 수 있는 농자재로 활용될 수 있고, 또한 많은 무기성분을 함유하고 있어 식물의 생산성을 향상시킬 수 있는 제재로 활용될 수 있다고 보고되어졌다 (Jala et al., 2006). Hu and Qi (2013)에 따르면, 토양 내에 유용미생물의 처리는 토양 근권의 활성화 촉진을 할 수 있으며, 다양한 생리활성 기능의 역할을 하여 토양개량효과와 더불어 작물의 성장을 촉진할 수 있다고 보고하였다.

하지만, biochar, fly ash 및 유용 미생물과 같은 친환경 소재들의 토양처리시 암모니아 휘산에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구는 미비한 실정이다. 또한, Kim et al. (2007)은 토양내에서 암모니아 휘산이 토양 pH, 토성, 토양수분 및 비료종류와 같은 토양특성과 환경변이의 지배적인 영향을 받는다고 보고하였기 때문에 이론적으로 biochar, fly ash 및 유용 미생물의 토양처리가 암모니아 휘산에 어떠한 영향을 미칠지에 대한 예측이 가능할지 모르나 이들 처리에 따른 정량적인 암모니아 휘산량을 산출하고 비교한 연구는 전무한 실정이다. 이에 본 연구진은 동일한 조건에서 다른 특성을 가진 토양개량용 친환경 소재 (biochar, fly ash 및 유용 미생물)들의 토양처리에 따른 암모니아 발생량을 비교하여 농경지에서 발생하는 암모니아 저감을 위한 최적 친환경 소재를 선정할 수 있다고 판단하였다.

따라서 본 연구에서는 콩 재배지 토양에서 biochar, fly ash 및 유용 미생물 처리에 따른 암모니아 가스 배출량을 정

량적으로 비교평가하고, 그 결과를 기반으로 토양내에서 암모니아 배출량 저감에 가장 효과적인 토양개량용 친환경 소재를 선정하고자 하였다.

Materials and Methods

공시재료 본 실험에 사용한 공시토양은 사천 두렁에 위치한 콩 재배지에서 채취하였고, 화학적특성은 Table 1과 같다. pH, EC, 유기물, 총질소 및 유효인산은 각각 6.1, 0.06 dS m⁻¹, 26.1 g kg⁻¹, 5.5 g kg⁻¹ 및 149 mg kg⁻¹ 이었다.

본 실험에 사용된 토양개량용 친환경 소재로 biochar, fly ash, 유용 미생물 2종 등 3가지 소재를 사용하여 실험하였다. Biochar는 낙엽을 이용하여 제조하였다. 낙엽은 가을철 자연적으로 떨어진 것을 수거하여 사용하였으며, 표면에 잔존하는 이물질과 수분을 제거하기 위하여 증류수로 세척한 후 80°C dry oven에서 24시간 건조하였다. 건조된 낙엽은 도가니에 압착하여 주입하여 밀폐한 후 biochar 제조장치에 넣고 600°C에서 2시간동안 열분해하였다. 열분해 과정동안 biochar 제조장치 내부를 혐기적 조건을 만족하기 위하여 N₂가스를 연속적으로 주입하였다. 제조된 낙엽 biochar는 0.5 mm로 체 거름하였고, 대기 중의 수분이 흡수되지 않게 밀봉하여 용기에 보관하였다. 본 실험에 사용된 낙엽 biochar의 화학적 특성은 Table 2와 같이 대부분이 탄소로 구성되어져 있으며, 그들의 특성은 일반적인 농업 및 산림부산물에 제조된 biochar와 유사한 특성을 보였다(Ahmad et al., 2014; Park et al., 2019). 본 실험에서 사용한 fly ash는 바이오매스 전소발전소로부터 수거하였으며, 실험에 앞서 fly ash내에 잔존하는 수분을 제거하기 위해 dry oven (80°C)에서 24시간 동안 건조하였다. Fly ash의 화학적 특성은 Table 3과 같다. 상기 언급된 biochar와는 달리 fly ash는 강알칼리를 띄며, 대부분 무기성분으로 구성되어져 있었다. 실험에 사용한 미생물은 *Brevibacillus sp.* (BB) 및 *Alcaligenes faecalis subsp. Faecalis* (AF)의 2종을 사용하였으며, 두 종 모두 생물자원센터 (KCTC)에서 분양을 받아서 실험에 사용하였다. BB 및 AF는 nutrient broth 배양액에서 미생물 균수가 10⁹ CFU mL⁻¹이 되도록 shaking incubator (180 rpm, 30°C; HAN BAEK SCIENTIFIC, Co. Ltd., South Korea)에서 24시간 배양하였다.

Table 1. Chemical characteristics of soil used.

pH	EC	OM	T-N	Avail. P ₂ O ₅
1:5	dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹
6.1 ± 0.1	0.06 ± 0.01	26.1 ± 0.4	5.5 ± 0.1	149 ± 1

Table 2. Chemical characteristics of biochar derived from fallen leaves.

pH	C	O	N	T-P	K	Ca	Mg
1:10	----- % -----						
8.1 ± 0.1	58.7 ± 1.4	20.4 ± 0.8	2.0 ± 0.1	0.42 ± 0.1	2.1 ± 1.0	1.5 ± 0.2	0.4 ± 0.1

Table 3. Chemical characteristics of fly ash.

pH	T-C	CaO	MgO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	K ₂ O
1:5	----- % -----					
13.1 ± 0.06	1.10 ± 0.02	3.44 ± 1.38	3.90 ± 0.23	1.35 ± 0.05	1.35 ± 0.04	1.29 ± 0.15

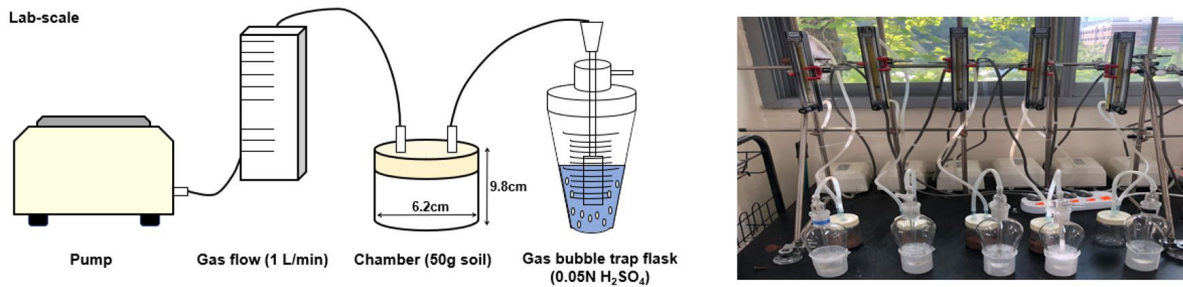


Fig. 1. Apparatus for collecting ammonia gas.

실험 방법 Biochar 투입량에 따른 암모니아 가스의 배출특성을 조사하기 위해 아크릴 포트 (295.9 cm³)에 토양 50 g을 충전하고, 무처리를 제외한 처리구에 토양 g당 urea를 0.02 g 처리하였다. Urea를 처리해 준 토양 g당 biochar의 시비량을 0.002, 0.01, 0.02 및 0.05 g으로 달리하였다. 밀폐형 포트내로 이동상 가스 주입 유량은 유량계로 1 L min⁻¹ 속도로 맞추어 일정하게 공기가 주입되게 하였으며, 발생된 암모니아 가스는 gas bubble trap flask (0.05 N H₂SO₄)에 일일 간격으로 15일간 포집하였다.

Fly ash 투입량에 따른 암모니아 가스 배출특성을 조사하기 위해 토양 50 g에 urea 1 g이 충전된 아크릴 포트에 fly ash 투입량을 토양 g당 0.005, 0.01 및 0.02 g으로 달리하여 조사하였으며, 그 이외의 실험 방법은 상기 언급된 실험방법과 모두 동일하게 수행하였다.

미생물 종에 따른 암모니아 가스 배출특성을 조사하기 위해 아크릴 포트 내에 토양 50 g에 urea 1 g을 주입하고, 배양한 BB 및 AF를 각각 토양 g당 0.1 mL씩 일정량 가하였다. 밀폐형 포트로부터 발생된 암모니아 가스는 gas bubble trap flask (0.05 N H₂SO₄)에 일일 간격으로 20일 동안 포집하였다.

암모니아 가스 포집 및 분석 본 실험에 사용된 암모니아 가스 포집장치는 Fig. 1과 같이 이동상 가스부, 암모니아 가스 발생부, 암모니아 가스 포집부의 3단계로 구분되어 제작되었다. 밀폐가 가능한 아크릴 포트에 공시 토양과 질소비료, biochar, fly ash 및 미생물 등을 정해진 조건비율에 따라 처리하였고 (암모니아 가스 발생부), 여기에서 발생하는 암모니아는 air pump (이동상 가스부; Kosung Valve, Co. Ltd., South Korea)에서 나오는 이동상 공기에 의해서 gas bubble trap flask (암모니아 가스 포집부, 0.05N H₂SO₄)에 포집되게 된다. 이때 air pump에서 나오는 공기의 유량을 일정하게 조절하기 위해서 가스 유량계 (cole parmer®)를 사용하였다. 포집된 용액내 암모니아 농도는 환경부 수질오염공정시험기준 중 자외선가시선 분광법 (인도페놀법)에 의해 분석되었다 (APHA, 2005).

통계분석 본 연구에서 모든 시험은 3반복으로 수행하였으며, 모든 데이터의 통계처리는 Statistical Analysis Software (SAS ver. 9.2) 프로그램을 이용하여 처리간 분산분석 (ANOVA)을 실시하였다. 처리의 효과는 Duncan 다중검정 ($p = 0.05$)을 통하여 유의성 유무를 판단하였고 데이터는 평균값 ± 표준오차로 표현하였다.

Results and Discussion

Biochar 투입량에 따른 암모니아 가스 배출특성 Biochar 투입량에 따른 암모니아 가스 배출특성은 Fig. 2와 같다. 콩재배지 토양에 urea 처리유무에 따른 암모니아 배출특성을 비교한 결과 urea가 주입되지 않은 토양 (Control

처리구)에서는 암모니아가 거의 배출되지 않았다. Biochar를 처리하지 않고 urea만 투입한 처리구 (S+N 처리구)의 토양에서 암모니아 가스 배출량은 2일차에 7.9 mg kg^{-1} 으로 급격히 증가하였으며, 2일차 이후로 점진적으로 감소하여 13일차 이후에는 $1.1\text{-}1.2 \text{ mg kg}^{-1}$ 까지 감소하였다.

Urea가 처리된 토양에 0.1g 의 biochar를 투입한 처리구 (S+N+0.1B 처리구)의 토양에서도 유사한 경향으로 2일차에 암모니아 가스 발생량이 3.4 mg kg^{-1} 으로 증가하다가 2일차 이후로 점진적으로 감소하여 $0.6\text{-}0.9 \text{ mg kg}^{-1}$ 까지 감소하였다. 암모니아 가스 발생 패턴은 바이오차 유무에 상관없이 유사한 경향이었지만, S+N+0.1B 처리구가 S+N 처리구에 비해 암모니아 가스 배출량은 약 2배 정도 감소하였다.

바이오차 투입량에 따른 암모니아 가스 배출량은 바이오차 투입량이 증가할수록 암모니아 배출량은 감소하는 패턴이었고, 가장 바이오차 투입량이 적은 S+N+0.1B처리구를 제외한 모든 바이오차 처리구에서 2일차에 급격히 증가하는 구간이 사라지고 일정한 농도 ($0.1\text{-}1.6 \text{ mg kg}^{-1}$) 수준으로 유지되었다.

총 15일간 누적 암모니아 가스 발생량은 S+N 처리구의 토양에서 55 mg kg^{-1} 이었던 반면에 biochar를 처리한 처리구인 S+N+0.1B, S+N+0.5B, S+N+1.0B, S+N+2.5B에서 각각 $23.8, 14, 10.2$ 및 6.1 mg kg^{-1} 으로 biochar의 주입량이 증가함에 따라 암모니아 배출량이 감소하는 경향이었다. Mandal et al. (2016)의 연구에서 질소비료를 투입한 토양에

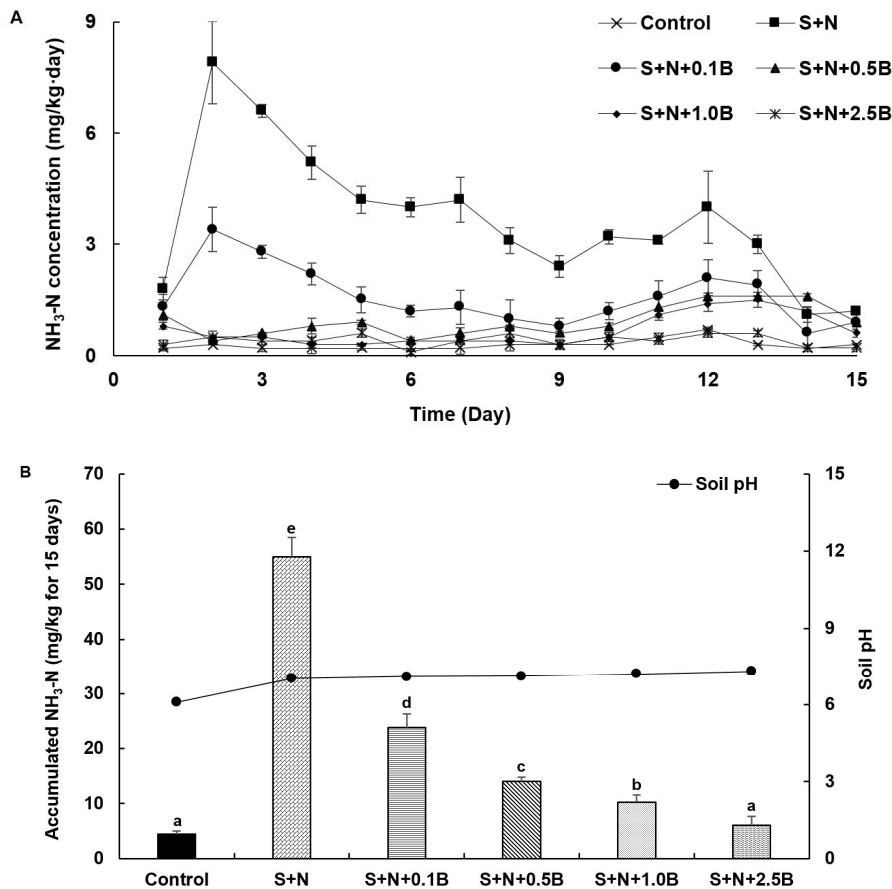


Fig. 2. Ammonia gas emission and soil pH change in soybean cultivation soil (S) with urea (N) under different biochar dosage. [A: Ammonia gas emissions per day according to amount of biochar treatment, B: Accumulated ammonia gas emissions for 15 days, S+N (soil 50 g+urea 1 g), S+N+0.1B (soil 50 g+urea 1 g+biochar 0.1 g), S+N+0.5B (soil 50 g+urea 1 g+biochar 0.5 g), S+N+1.0B (soil 50 g+urea 1 g+biochar 1.0 g), S+N+2.5B (soil 50 g+urea 1 g+biochar 2.5 g)].

poultry litter biochar 및 macadamia nut shell biochar를 처리하여 암모니아 가스 배출 특성을 조사한 결과, 이들은 질 소비료만 처리된 토양에 비해 각각 70.5% 및 64.1% 감소된다고 보고하였다. 이와 같은 결과는 biochar가 암모니아 이온에 대해 흡수력을 가지고 있을 뿐만 아니라 토양내에 원활한 산소공급을 통한 질산화 과정이 더 많이 일어났기 때문이다. 또한 Spokas et al. (2012) 및 Mandal et al. (2016)는 암모니아 가스가 biochar 표면의 carboxyl group에 NH_4^+ 와 amide radical group을 형성할 수 있고, 이러한 biochar 표면의 산화로 인하여 암모니아 가스가 NH_4^+ 상태로 양이온화 되며, 이들은 biochar 표면에서 양이온 교환 반응에 의해 흡착됨에 따라 암모니아 가스 발생량을 감소시킬 수 있다고 보고하였다.

이와 달리 Sha et al. (2019)는 질소비료가 처리된 토양에 biochar의 투입수준을 달리하여 암모니아 가스 배출량을 조사하였을 때, biochar의 시비량이 증가함에 따라 암모니아 배출량은 증가한다고 보고하였다. 이와 같은 결과는 시험에 사용된 토양이 산성토양이고 biochar는 강알칼리성을 띠기 때문에 biochar의 시비량이 증가함에 따라 토양의 pH가 증가되어 암모니아 휘산을 더욱 가속화시켰기 때문이라고 판단된다.

하지만 본 실험에서는 약산성 토양에 비교적 중성 pH를 가진 biochar를 투입하였기 때문에 biochar 투입량을 달리 하여 토양에 처리하였을 때 토양 pH는 무처리와 비교하여 유의적인 차이를 나타내지 않았다 (Fig. 2). 이러한 이유에서 biochar 투입량이 증가함에도 불구하고 암모니아 배출량이 증가하지 않았고, biochar에 의해 암모니아 가스 흡착 및 질산화과정에 의해 암모니아 배출량이 감소한 것으로 판단된다.

이와 같이, biochar는 화학비료가 처리된 토양으로부터 발생하는 암모니아 가스를 저감할 수 있는 친환경 농자재로 활용이 가능할 것으로 판단된다. 하지만 biochar를 이용하여 암모니아 가스를 효율적으로 저감하기 위해서는 토양 및 biochar의 특성을 파악할 필요가 있으며, 그에 맞게 비료를 시비해야 할 것으로 판단된다.

Fly ash 투입량에 따른 암모니아 가스 배출특성 Fly ash 투입량에 따른 암모니아 가스 배출특성은 Fig. 3과 같다. Urea만 처리한 토양에서 2일차에 암모니아 가스 발생량은 7.52 mg kg^{-1} 이었던 반면에 토양 g당 0.005 (S+N+0.1FA), 0.01 (S+N+0.5FA) 및 0.02 g (S+N+1.0FA)의 fly ash를 처리해 주었을 때 암모니아 가스 발생량은 각각 8.3, 12.6 및 17.2 mg kg^{-1} 으로 fly ash의 투입량이 증가함에 따라 증가하는 경향이였다. 총 15일 동안 누적 암모니아 가스 발생량은 무처리를 제외한 urea만 처리한 토양에서 41.9 mg kg^{-1} 으로 가장 낮았으며, fly ash 투입량이 0.005, 0.01 및 0.02 g일 때 암모니아 가스 발생량은 각각 53.7, 70.5 및 95.2 mg kg^{-1} 으로 토양내에 fly ash의 사용량이 증가함에 따라 증가하는 경향이였다.

상기 재료 및 방법에서 언급된 바와 같이 fly ash의 pH는 13.1로 매우 높은 것을 확인할 수 있었다 (Table 3). 이러한 강알칼리성을 나타내는 fly ash가 토양 pH에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위하여 fly ash 시비량을 달리하여 토양 pH를 조사한 결과, 토양에 fly ash 처리량이 증가할수록 토양 pH가 높아지는 경향이였으며, 특히 S+N+1.0FA 처리구 (pH 9.27)의 pH는 fly ash가 투입되지 않은 S+N처리구 (pH 7.49)에 비해 1.8정도 증가되는 것을 확인할 수 있다 (Fig. 3). 본 연구결과에서 fly ash 투입량이 증가함에 따라 토양 pH와 암모니아 가스 발생량이 비례적으로 증가하는 것을 보아 둘 사이의 정의 상관관계가 있음을 예측할 수 있었다. 이는 urea가 토양에 가해지게 되면 ammonification 과정 (Eq. 1)을 통해서 NH_4^+ , CO_2 및 OH^- 로 분해가 되고 pH가 높은 토양 내에서 다량의 OH^- 와 NH_4^+ 가 반응하여 (Eq. 2) NH_3 (암모니아 가스)와 H_2O 가 생성되기 때문에 토양 pH가 증가함에 따라 암모니아 휘산량은 더욱 증가한다고 보고된 바 있다 (Bolan et al., 2004; Mandal et al., 2016).



이상의 결과로, fly ash의 토양처리는 토양 pH를 증가시켜 암모니아 배출량을 더욱 증가시키기 때문에 암모니아 저감을 위한 토양개량용 친환경 농자재로 사용은 제한적일 것으로 판단된다.

미생물 종에 따른 암모니아 가스 배출 특성 미생물 종에 따른 암모니아 가스 배출 특성은 Fig. 4와 같다. 미생물을 처리하지 않고 urea만 처리한 토양에서는 2일차에 6.88 mg kg^{-1} 으로 암모니아 가스 발생량이 급격하게 증가하였으며, 3일차부터 점진적으로 감소하다가 12일 및 17일 차에 증가하였고, 20일차에는 2.12 mg kg^{-1} 으로 암모니아 가스 발생량이 감소하였다. 토양에 BB를 가한 처리구(S+N+BB)는 urea만 처리한 처리구와 동일하게 2일차에 암모니아 가스 발생량이 6.09 mg kg^{-1} 으로 증가하였고 2일차 이후로 급격히 감소하여 $1.38 - 2.82 \text{ mg kg}^{-1}$ 정도로 낮은 암모

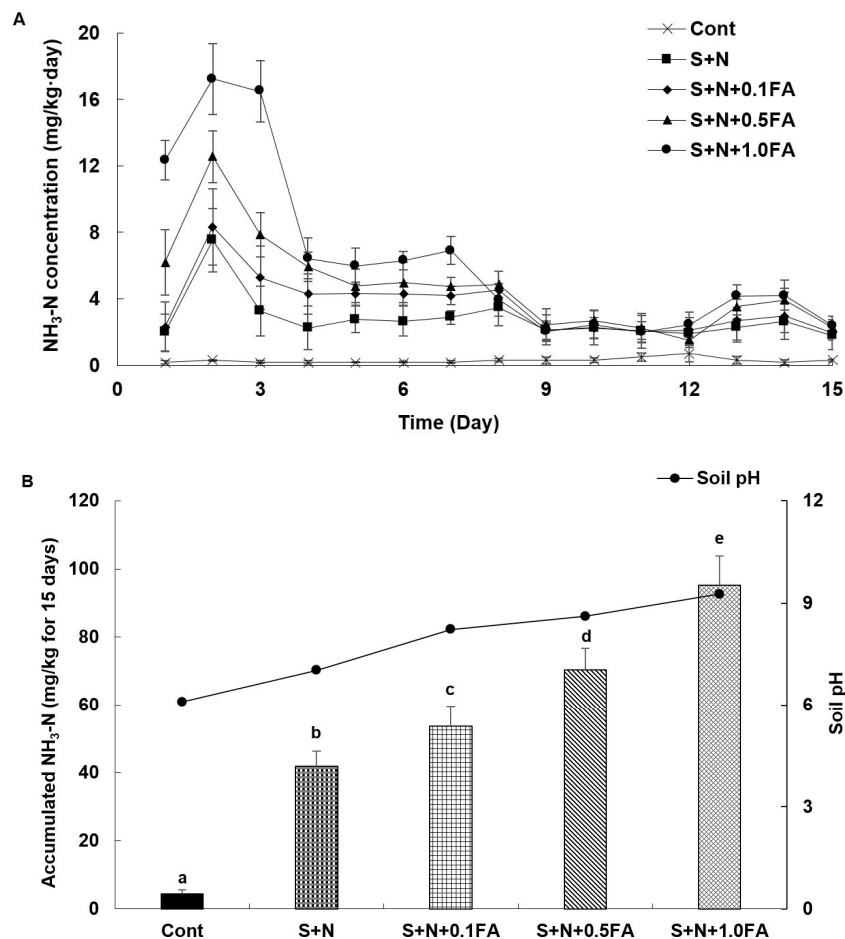


Fig. 3. Ammonia gas emission and soil pH change in soybean cultivation soil (S) with urea (N) under different fly ash dosage. [A: Ammonia gas emissions per day according to different fly ash dosage, B: Accumulated ammonia gas emissions for 15 days, S+N (soil 50 g+urea 1 g), S+N+0.1FA (soil 50 g+urea 1 g+Fly ash 0.1 g), S+N+0.5FA (soil 50 g+urea 1 g+Fly ash 0.5 g), S+N+1.0FA (soil 50 g+urea 1 g+Fly ash 1.0 g)].

니아 가스 발생량을 보이다가 17일차에 4.85 mg kg^{-1} 으로 증가하였으며 이후로 2.29 mg kg^{-1} 으로 감소하였다. 하지만, 토양에 AF를 가한 처리구(S+N+AF)에서 암모니아 가스 발생량은 급격하게 증가하는 구간 없이 각각 $1.22 - 2.22 \text{ mg kg}^{-1}$ 범위를 유지하였다. 총 20일 동안 누적 암모니아 가스 발생량은 urea만 처리한 토양에서 61.8 mg kg^{-1} 이었으며, AF 및 BB를 가한 토양에서 발생하는 누적 암모니아 발생량은 각각 37.4 및 48.5 mg kg^{-1} 으로 두 미생물 모두 암모니아 저감에 효과적이었다. 본 실험에 사용된 미생물은 암모니아 산화-탈질화 과정에 관여하는 미생물로서 알려져 있다. 특히, AF는 호기적 조건에서 질산화와 탈질화를 동시에 진행할 수 있는 미생물로서 고농도의 암모니아 환경에서도 생장이 저해되지 않으며 암모니아 가스 발생량 감소에 큰 영향을 미친다고 보고하였다 (Jung et al., 2016). 또한 BB는 암모니아 산화 미생물로 질산화 과정 중 암모늄을 아질산염으로 산화시키는 역할을 한다 (Matsuno et al., 2012). 이러한 이유에서 BB는 urea로부터 분해된 NH_4^+ 이온을 산화하여 NO_2^- 로 전화하였기 때문에 암모니아 배출량이 감소한 것으로 판단된다. 이상의 결과를 미루어 볼 때, BB 및 AF는 토양에서 발생하는 암모니아 가스를 저감하기 위한 효과적인 친환경 농자재로 활용 가능할 것으로 판단된다.

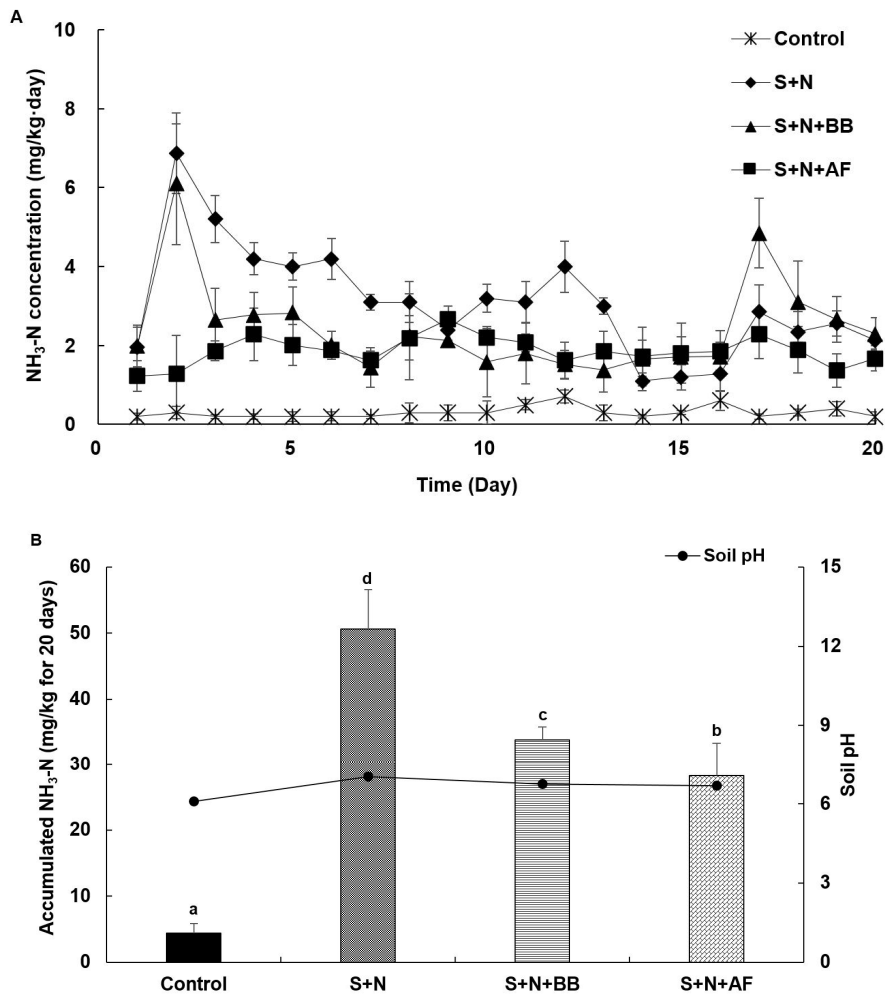


Fig. 4. Ammonia gas emission and soil pH change in soybean cultivation soil (S) with urea (N) under different microbial species. [A: Ammonia gas emissions per day according to different microbial species, B: Accumulated ammonia gas emissions for 15 days, S+N (soil 50 g+urea 1 g), S+N+BB (soil 50 g+urea 1 g+ *Brevibacillus sp.* 5 mL), S+N+AF (soil 50 g+urea 1 g+ *Alcaligenes faecalis subsp.* 5 mL)].

Conclusions

본 연구는 콩 재배지 토양에서 biochar, fly ash 및 미생물 처리에 따른 암모니아 가스 배출량을 조사하여 농경지에 서 사용가능한 암모니아 배출저감용 농자재를 선정하고자 하였다. 콩 재배 토양에서 urea 처리에 따른 암모니아 가스 배출량은 2일차에 급격히 증가하는 하였으나 2일차 이후에는 점진적으로 감소하였다. Urea가 처리된 토양에 biochar를 투입한 결과 2일차에 급격히 증가하던 암모니아 배출량이 현저하게 감소되었으며, 15일간 누적 암모니아 배출량은 biochar의 투입량이 증가함에 따라 감소하는 경향이였다. 반면에 urea가 처리된 토양에 fly ash를 처리한 결과 암모니아 배출량은 urea만 처리한 토양에 비해 더 많이 배출되었으며, 특히 fly ash의 처리수준이 증가함에 따라 암모니아 배출량 또한 증가되었다. 본 실험에 사용된 미생물인 AF 및 BB 모두 urea가 처리된 토양에서 배출되는 암모니아를 저감하는데 효과적이었다. 이상의 결과를 미루어 볼 때, biochar와 미생물 (AF 및 BB) 처리는 토양에서 배출되는 암모니아 가스를 저감하는데 효과가 있었으며, 향후 농경지에서 암모니아 저감용 재료로 활용 가능할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This study was carried out with the support of “Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ014253042020)”, National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Republic of Korea. This work was supported by Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology in Food, Agriculture and Forestry (IPET) through Animal Disease Management Technology Development Program, funded by Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA)(319078-2).

References

- Ahmad, M., A.U. Rajapaksha, J.E. Lim, M. Zhang, N. Bolan, D. Mohan, M. Vithanage, S.S. Lee, and Y.S. Ok. 2014. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. *Chemosphere* 99:19-33.
- APHA-AWWA-WEF. 2005. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21st ed. American Public Health Association. Washington, DC.
- Bassi, D., M. Menossi, and L. Mattiello. 2018. Nitrogen supply influences photosynthesis establishment along the sugarcane leaf. *Sci. Rep.* 8:2327.
- Bolan, N.S., S. Saggar, J. Luo, R. Bhandral, and J. Singh. 2004. Gaseous emissions of nitrogen from grazed pastures: processes, measurements and modelling, environmental implications, and mitigation. *Adv. Agron.* 84, pp. 37-120.
- Chan, K.Y., L. Van Zwieten, I. Meszaros, A. Downie, and S. Joseph. 2007. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Aust. J. Soil Res.* 45:629-634.
- Choi, H., J. Hyun, Y.J. Kim, and G. Yoo. 2019. Improvement of ammonia emission inventory estimation methodology for fertilizer application in the agricultural sector. *Journal of Climate Change Research* 10(3):237-242.
- Guo, C., T. Ren, P. Li, B. Wang, J. Zou, S. Hussain, R. Cong, L. Wu, J. Lu, and X. Li. 2019. Producing more grain yield of rice with less ammonia volatilization and greenhouse gases emission using slow/controlled-release urea. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 26:2569-2579.
- Hu, C, and Y. Qi. 2013. Long-term effective microorganisms application promote growth and increase yields and nutrition of wheat in China. *Eur. J. Agron.* 46:63-67.

- Jala, S., and D. Goyal. 2006. Fly ash as a soil ameliorant for improving crop production-a review. *Bioresour. Technol.* 97:1136-1147.
- Jung, T.K., C.S. Ra, K.S. Joh, and H.G. Song. 2016. Characterization of heterotrophic nitrification and aerobic denitrification by *Alcaligenes faecalis* NS13. *Korean Journal of Microbiology* 52(2):166-174.
- Kim, S.J., J.E. Yang, B.O. Cho, J.J. Kim, and Y.O. Shin. 2007. Factor controlling the losses of urea through ammonia volatilization. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 40:77-82.
- Major, J., M. Rondon, D. Molina, S.J. Riha, and J. Lehmann. 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil* 333:117-128.
- Mandal, S., R. Thangarajan, N.S. Bolan, B. Sarkar, N. Khan, Y.S. Ok, and R. Naidu. 2016. Biochar-induced concomitant decrease in ammonia volatilization and increase in nitrogen use efficiency by wheat. *Chemosphere* 142:120-127.
- Matsuno, T., S. Horii, T. Sato, Y. Matsumiya, and M. Kubo. 2012. Analysis of nitrification in agricultural soil and improvement nitrogen circulation with autotrophic ammonia-oxidizing bacteria. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 169:795-809.
- Meng, F., J.A.J. Dungait, X. Xu, R. Bol, X. Zhang, and W. Wu. 2017. Coupled incorporation of maize (*Zea mays* L.) straw with nitrogen fertilizer increased soil organic carbon in Fluvic Cambisol. *Geoderma* 304:19-27.
- Park, J.H., J.J. Wang, S.H. Kim, S.W. Kang, C.J. Jeong, J.R. Jeon, K.H. Park, J.S. Cho, R.D. Delaune, and D.C. Seo. 2019. Cadmium adsorption characteristics of biochars derived using various pine tree residues and pyrolysis temperature. *J. Colloid Interface Sci.* 553:298-307.
- Sha, Z., Q. Li, T. Lv, T. Misselbrook, X. Liu. 2019. Response of ammonia volatilization to biochar addition: A meta-analysis. *Sci. Total Environ.* 655:1387-1396.
- Spokas, K.A., J.M. Novak, and R.T. Venterea. 2012. Biochar's role as an alternative N-fertilizer: ammonia capture. *Plant Soil* 350:35-42.
- Tao, J., J. Gao, L. Zhang, R. Zhang, H. Che, Z. Zhang, Z. Lin, J. Jing, J. Cao, and S.C. Hsu. 2014. PM_{2.5} pollution in a megacity of southwest China: source apportionment and implication. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 14:5147-5196.
- Venterea, R.T., J.A. Coulter, and T.J. Clough. 2020. Nitrate accumulation and nitrogen gas production increase with decreasing temperature in urea-amended soils: Experiments and modeling. *Soil Biol. Biochem.* 142:107727.
- Wang, H., A.M. Hegazy, X. Jiang, Z. Hu, J. Lu, J. Mu, X. Zhang, and X. Zhu. 2016. Suppression of ammonia volatilization from rice-wheat rotation fields amended with controlled-release urea and urea. *Agronomy Journal* 108:1214-1224.
- Wu, W., Y. Jin, and C. Carlsten. 2018. Inflammatory health effects of indoor and outdoor particulate matter. *J. Allergy. Clin. Immunol.* 141:833-844.
- Yao, Y., B. Gao, M. Zhang, M. Inyang, and A.R. Zimmerman. 2012. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil. *Chemosphere* 89:1467-1471.
- Zhang, Q., J. Quan, X. Tie, X. Li, Q. Liu, Y. Gao, and D. Zhao. 2015. Effects of meteorology and secondary particle formation on visibility during heavy haze events in Beijing, China. *Sci. Total Environ.* 502:578-584.