

Article

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2023.56.1.060>

pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

## Dissolution Characteristics of Ammonium and Nitrate in Soil with Bottom Ash from Biomass Power Plant

So-Hui Kim<sup>1</sup>, Seung-Gyu Lee<sup>1</sup>, Jae-Hurk Park<sup>2</sup>, Jin-Ju Yun<sup>2</sup>, Se-Won Kang<sup>3</sup>, and Ju-Sik Cho<sup>4\*</sup><sup>1</sup>Master's Degree, Department of Agricultural Chemistry & Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea<sup>2</sup>Ph.D. Student, Department of Agricultural Chemistry & Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea<sup>3</sup>Associate Professor, Department of Agricultural Life Science, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea<sup>4</sup>Professor, Department of Agricultural Life Science & Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

\*Corresponding author: chojs@scnu.ac.kr

### ABSTRACT

Received: October 6, 2022

Revised: December 26, 2022

Accepted: December 29, 2022

### Edited by

Seong-Soo Kang,  
Rural Development  
Administration, Korea

### ORCID

So-Hui Kim

<https://orcid.org/0000-0002-5216-9364>

Seung-Gyu Lee

<https://orcid.org/0000-0003-4022-7237>

Jae-Hurk Park

<https://orcid.org/0000-0001-6073-0185>

Jin-Ju Yun

<https://orcid.org/0000-0002-5433-7325>

Se-Won Kang

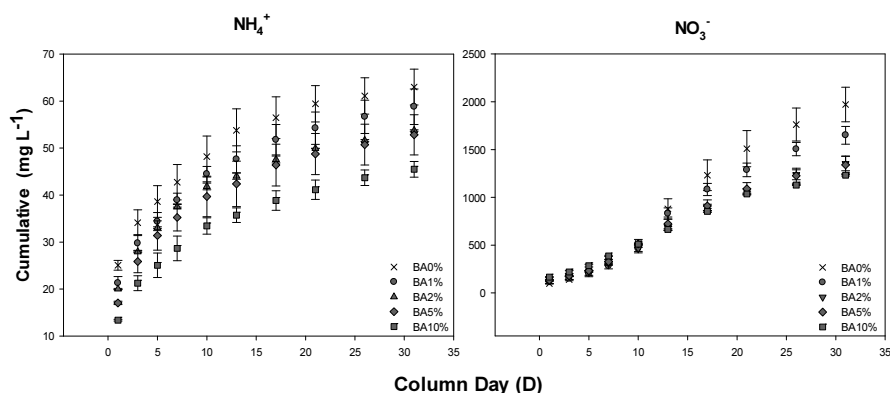
<https://orcid.org/0000-0003-2038-5465>

Ju-Sik Cho

<https://orcid.org/0000-0001-9610-5373>

Recently, biomass power plants are increasing as an alternative energy source to reduce the carbon emissions from fossil fuels. The amount of waste from biomass power plants increases and bottom ash is generally buried in soil. However, there is little research on the dissolution characteristics of nitrogen, a macronutrient in soil, using bottom ash (BA). To evaluate nitrogen dissolution in soil with BA, we mixed BA with soil, collected leachate for 5 weeks, and measured  $\text{NH}_4^+$ -N and  $\text{NO}_3^-$ -N concentration in leachate. As a results, BA reduced the leaching of  $\text{NH}_4^+$ -N and  $\text{NO}_3^-$ -N by up to 18% and 38%, respectively. The decrease of  $\text{NH}_4^+$ -N leaching is judged to be the result of increased  $\text{NH}_4^+$ -N adsorption due to the high pH of the bottom ash, and these results are often confirmed in other biochar. The  $\text{NO}_3^-$ -N leaching also decreased, but it is not related to the adsorption capacity of BA, so further research is needed. These results suggested that BA reduces the contents of  $\text{NH}_4^+$ -N and  $\text{NO}_3^-$ -N in the soil effluent, which can be used as an important indicator for using bottom ash in the soil.

**Keywords:** Bottom ash, Column, Dissolution, Nitrogen



The amount of  $\text{NH}_4^+$ -N and  $\text{NO}_3^-$ -N dissolution in soil using bottom ash from biomass power plant (average and standard deviation; 3 replicate). (left) Accumulation of  $\text{NH}_4^+$ -N; (right) Accumulation of  $\text{NO}_3^-$ -N.



## Introduction

한국은 ‘2050 탄소 중립정책’을 발표하면서, 다양한 산업 부문 중 미세먼지와 지구온난화의 주된 원인 중 하나인 석탄화력발전소를 단계적 폐쇄 또는 저탄소 발전소로 전환하는 등의 계획을 추진 중이다. 실제로 2017년 이후부터 목질계 바이오매스 발전소인 영동 발전소 1호기와 2호기를 가동 중에 있으며, 폐기물 중 하나인 저회(木屑)가 매해 약 2.7만 톤이 발생되고 있지만 재활용 용도가 없어 대부분 토양에 매립되고 있다 (Hur, 2020). 바이오차는 다량의 공극과 비표면적이 넓어 흡착능력이 뛰어나 토양 내 질소의 보유력을 향상시키는 등 토양개량제로서 가치가 높다고 평가되고 있다 (Kim et al., 2020; Lee et al., 2021; Park et al., 2021). 최근 바이오매스 발전소에서 발생하는 저회(木屑)가 바이오차의 물리적 특성과 매우 유사하며 (Tomczyk et al., 2020), 이를 바탕으로 저회를 활용한 폐수의 오염물질 제거 또는 중금속 고정 등 저회를 자원으로써 활용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다 (Ondrasek et al., 2021; Cui et al., 2022).

현재 우리나라는 토양에 무기질 비료 사용량이 높은 국가 중 하나로, 많은 양의 질소가  $\text{NO}_3^-$ -N 형태로 용탈되어 지하수 오염 등의 피해가 발생하고 있다 (Lee et al., 2015). 이에 바이오차를 활용한 토양의 무기태 질소 보유 및 침출에 대한 연구는 많지만 (Ding et al., 2010), 저회를 이용한 토양의 질소 보유력에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 저회 처리에 의해 용출되는 토양의  $\text{NH}_4^+$ -N와  $\text{NO}_3^-$ -N에 미치는 영향을 확인하고, 토양의 무기태질소 보유력에 대해 평가하고자 한다.

## Materials and Methods

**공시재료** 연구에서 사용된 토양은 순천의 시설재배지 (37°88'N, 127°44'E)에서 채취하였다 (Fig. 1). 샘플링한 토양은 건조 후 분쇄하여 체질하고 (<2 mm), 균질화하여 화학적 특성을 분석하였다. 토양에 대한 화학적 특성은 Table 1에 제시하였다. 실험에 사용된 토양은 pH, EC, CEC가 각각 7.32, 11.6  $\text{dS m}^{-1}$ , 13.2  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ 이며,  $\text{NH}_4^+$ -N와  $\text{NO}_3^-$ -N은 각각 65.1  $\text{mg kg}^{-1}$ , 138.7  $\text{mg kg}^{-1}$ 으로 이 시설재배지 토양은 단일작물의 장기간 재배를 통해 토양에 염분과 양분이 집적되어 작물 성장에 장애를 일으키는 토양이다. 연구에서 사용된 저회는 대한민국의 영동발전에서 운영하는 영동 1호기에서 공급받아 진행되었으며, 105°C에서 24 h 건조하여 실험에 사용했다. 저회에 대한 화학적



Fig. 1. The location on the plastic film house collected soil for the column experiment (35°00'N, 127°50'E).

특징을 Table 2에 제시하였다. 저회는 pH와 EC가 각각 9.13, 22.53 dS m<sup>-1</sup>이며, C의 함량은 62.53%으로 내부에 다량의 탄소를 함유하고 있는 물질이다.

**Table 1.** Soil chemical properties of the column test.

pH (1:5 H <sub>2</sub> O)	EC (dS m <sup>-1</sup> )	OM (g kg <sup>-1</sup> )	T-N (g kg <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (mg kg <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (mg kg <sup>-1</sup> )	Avail. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	Exch. cations (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )				
							K	Na	Ca	Mg	CEC
7.32	11.6	38.8	2.31	65.07	138.74	128.82	3.91	1.63	6.81	3.92	13.2

**Table 2.** Chemical properties of bottom ash.

Parameters	Value
pH (H <sub>2</sub> O, 1:10)	9.13
EC (dS m <sup>-1</sup> )	22.53
Total C (%)	62.53
Total N (%)	0.21
B (mg kg <sup>-1</sup> )	235
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	ND <sup>†</sup>
Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	1,366
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	691
Ni (mg kg <sup>-1</sup> )	ND
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	24.2
As (mg kg <sup>-1</sup> )	51.3
Cd (mg kg <sup>-1</sup> )	ND
Co (mg kg <sup>-1</sup> )	0.70
Cr (mg kg <sup>-1</sup> )	6.83
Pb (mg kg <sup>-1</sup> )	ND

<sup>†</sup>ND, not detected.

**실험방법** 저회가 토양의 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N와 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N용출에 미치는 영향을 평가하기 위해 컬럼 실험을 실시하였으며, Fig. 2에 모식도를 제시하였다. 사용된 컬럼 기둥은 내경 14 cm, 높이 30 cm이며, 아크릴 파이프로 제작되었다. 기둥의 하단은 토양 손실을 방지하고, 물의 배수를 위해 내경 1.5 cm의 구멍을 사각 아크릴에 뚫어 부착하였고, 컬럼 바닥에는 마사토 (6 - 8 mm)를 높이 5 cm만큼 채워 넣었다. 기둥 상단은 호기성 상태를 유지하기 위해 열린 상태로 유지하였으며, 저회를 혼합하지 않은 처리구를 대조군으로 사용하였다. 저회는 토양의 1, 2, 5, 10% (w/w)를 준비하여 혼합하였으며, 모든 처리는 3회 반복되었다 (BA 0%, BA 1%, BA 2%, BA 5%, BA 10%). 컬럼은 약 5주 동안 정해진 날짜에 (1, 3, 5, 7, 10, 13, 17, 21, 26, 31 day) 증류수 100 mL를 첨가하여 침출하였으며, 침출수는 수질오염공정기준에 준하여 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N은 자외선 흡광광도법, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N은 Brucin법으로 분석하였다. 실험 종료 후 컬럼 토양을 분석하여 잔류한 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N와 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N를 분석을 통해 저회 처리에 의한 무기태 질소 보유함량을 조사하였다.

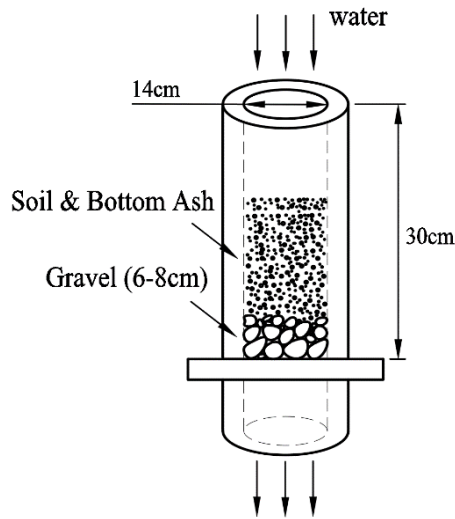


Fig. 2. Schematic diagram for BA column experiment.

**토양 및 저회 분석방법** 토양 분석은 토양 및 식물체 분석법 (NIAST, 2000)에 준하여 실시하였다. 토양의 화학적 특성을 평가하기 위해 pH와 EC는 토양과 증류수를 1:5 (w/v) 비율로 침출하여 침출액을 pH meter 및 EC meter (S230, Mettler Toledo, Zurich, Switzerland)으로 측정하여 분석하였으며, 유기물 (organic matter, OM) 함량은 Tyurin 법으로 분석하였다. CEC는 1.0 N  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$  (pH 7.0)으로 침출한 후 여과액을 ICP-OES (ICPE-9000, Shimadzu, Kyoto, Japan)으로 분석하였고, 유효인산은 Lancaster 법, 암모니아태 질소와 질산태 질소는 2 M-KCl로 용출한 후 여과액을 Brucin 법 ( $\text{NO}_3^-$ -N)과 Salicylate 법 ( $\text{NH}_4^+$ -N)으로 분석하였다. 저회의 화학적 특성분석을 위해 pH와 EC는 저회와 증류수를 1:10 (w/v) 비율로 침출하여 측정하였으며, EC에 대한 측정값에 희석배수를 곱하여 제시하였다. C, N 등은 원소분석기 (EA2400II, PerkinElmer, USA)를 이용하여 측정하였고, 습식분해법 ( $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{HClO}_4$ )으로 전처리한 여과액을 ICP-OES 측정을 하여 중금속을 분석하였다.

## Results and Discussion

**용출시기별 pH, EC 변화** 저회 처리에 따른 토양 용출수의 pH와 EC의 변화를 Fig. 3에 제시하였다. 용출수의 pH에 대한 변화는 1일차에 저회 처리구들이 (pH 7.1 - 7.5) 대조구 (pH 7.1)에 비해 용출수의 pH가 더 높게 측정되었으며, 이후 실험 종료까지 모든 처리구의 pH가 상승하는 경향이 나타났다. 1일차의 저회 처리구의 pH 증가는 저회의 pH에 따른 영향으로 판단되며, 혐기성을 띠는 바이오차 처리에 의해 수용액의 pH가 상승하는 것은 다양한 연구에서 자주 관찰되는 현상이다 (Kizito et al., 2015; Yang et al., 2018). 용액의 pH는 흡착제 표면의 활성화에 큰 영향을 주어 흡착 용량에 변화를 주는 요인 중 하나이다 (Zhang et al., 2015). pH는 다양한 방식으로 흡착과정에 영향을 미치는데, 가장 대표적으로는 표면의 정전기적 인력으로 인한 변화이며, pH가 낮은 환경에서는 음전하 이온을 흡착시키고 pH가 높은 환경에서는 양전하를 띠는 이온을 흡착시킨다 (Yin et al., 2018).

EC는 용해된 염 또는 이온의 총량을 확인할 수 있다. Fig. 3B를 통해 1일차에 모든 처리구에서 최대값이 측정되었으며, BA 0%, 1%, 2%, 5%, 10%가 각각 26.06, 26.03, 26.53, 20.6, 17.7  $\text{mS cm}^{-1}$ 으로 측정되었다. 이후 모든 처리구에서 실험 종료까지 점차적으로 감소하는 경향이 나타났다. 1일차에 대조구보다 저회 처리구들이 더 낮은 EC를 나타

낸 것으로 보아 토양의 염분과 이온성 물질이 저회 처리에 의해 감소된 것으로 판단된다. 저회와 유사한 특성을 지닌 바이오차를 활용한 컬럼의 EC 분석 결과, 바이오차 처리에 따라 대조구에 비해 침출수의 EC가 더 낮게 측정되었으며, 이러한 결과는 바이오차가 단순한 이온교환뿐만 아니라 물리적 흡착 및 기타 과정에 의해 다양한 이온을 흡착함으로써 용출수의 EC가 감소하였다고 보고하였다 (Ding et al., 2010).

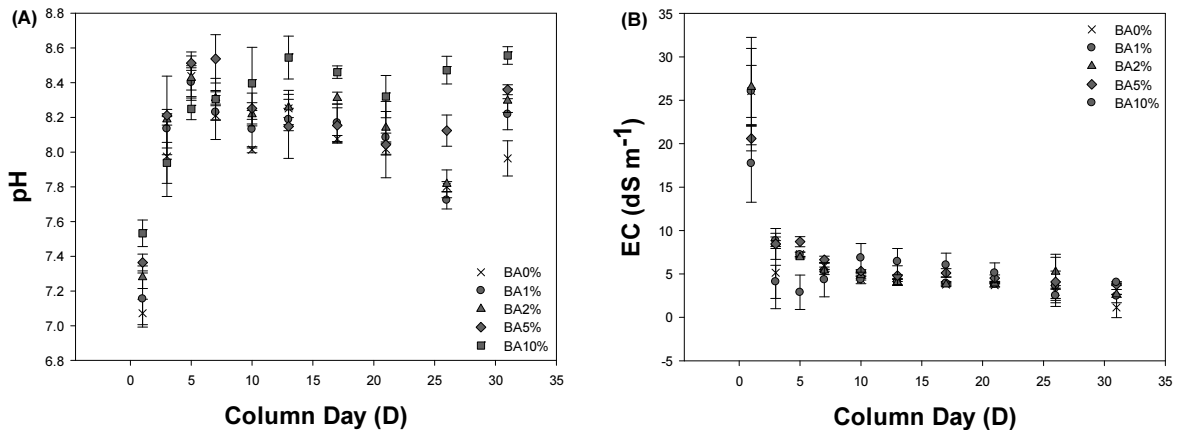


Fig. 3. pH and EC concentrations during column experiment with three replications. Error bar means average and standard deviation.

**용출시기별 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 변화** 용출수의 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N과 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N에 대한 변화는 Fig. 4와 Fig. 5에 나타냈다. Fig. 4A를 통해 1일차에 저회 처리구들의 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 농도는 대조구에 비해 각각 16 - 47%의 감소율을 나타냈으며, BA 10%에서 가장 높은 감소율이 관찰되었다. 5일차부터는 모든 처리구에서 용출되는 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 함량이 급격히 줄어들어 실험 종료까지 비슷한 함량을 유지하였다. 이러한 결과는 Ding et al. (2010)의 결과와 유사한 경향으로 4일차까지 높은 함량의 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N이 용출되었으며, 이후 실험 종료일까지 처리구에 따른 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 용출 함량은 뚜렷한 차이를 보이지 않고 점차적으로 감소하는 경향이 나타났다고 보고하였다. 또한, Fig. 4B를 통해 누적 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 용출 함량은 대조구에 비해 BA 1% 처리구에서 7%의 감소가 나타났으며, BA 2% 처리구에서는 15%, BA 5%는 17%, BA10%는 18%의

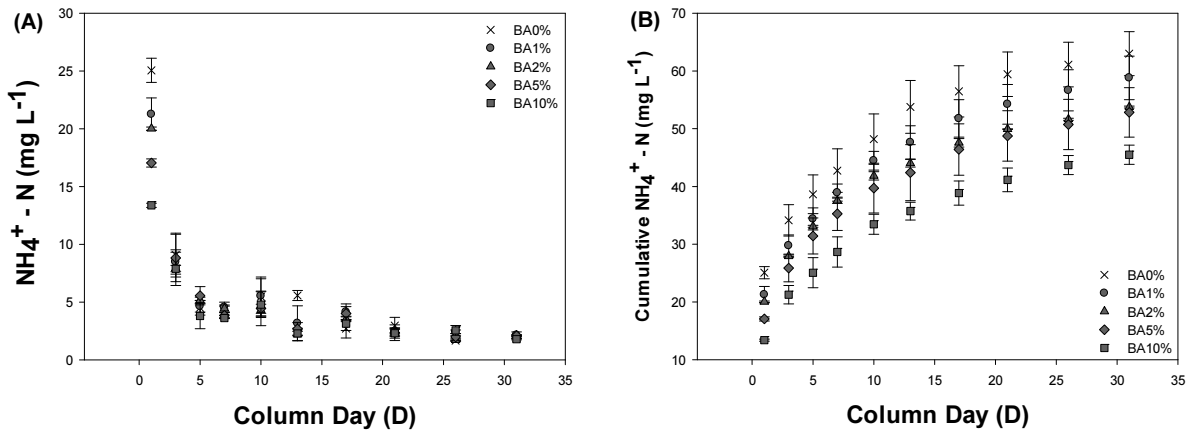


Fig. 4. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N concentrations during column experiment. (A) comparison NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N during column experiment, (B) comparison cumulative NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N concentrations (average and standard deviation; 3 replicate).

감소를 나타냈다.  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 는 용출수의 pH에 따라 흡착하는 세기가 달라지는 이온으로 pH가 낮은 환경에서는  $\text{H}^+$ 와 경쟁으로 흡착제의 표면에 흡착하는 함량이 감소하며, pH가 증가할수록 흡착하는 함량이 증가하는 특징이 있다 (Wang et al., 2006). 또한 pH 7.0 이상의 환경에서는  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 가  $\text{H}^+$ 의 해리로 인해  $\text{NH}_3$ 으로 전환되지만, Zhu et al. (2012)의 보고에 따르면, 바이오차의 경우 탄소가 알칼리성을 나타내며, OH가 수용액 내에서 해리되기 때문에  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 흡착량을 유지할 수 있다고 보고하였다. 따라서 본 연구의 저회도 알칼리성을 나타내는 물질으로써 수용액의 pH가 증가하여도  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 흡착량이 유지되어 용출되는 함량을 감소시킬 수 있다고 판단된다.

Fig. 5A를 통해, 모든 처리구에서 감소하던  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 함량이 7일차 이후 다시 증가하는 경향을 나타냈다. 또한,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 와는 다르게 1 - 7일차에는 저회 처리구에서 가장 많은  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 함량이 용출되었으며, 7일차 이후부터 저회를 처리하지 않은 대조구에서 더 높게 나타났다. 1 - 7일차까지 저회 처리구에서 무처리보다  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 함량이 높은 이유는 저회 처리로 인해 토양의 공극과 수분보유력 향상되어 질산화 미생물의 활성화로  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 함량이 증가한 것으로 판단된다 (Kanthle et al., 2016). Fig. 5B를 통해 실험 종료까지 용출된 누적  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 함량은 저회 처리구가 대조군보다 낮았으며, BA 1%, 2%, 5%, 10%가 대조구에 비해 각각 17%, 32%, 33%, 38%의 감소율을 확인할 수 있었다. Fig. 5A와 Fig. 5B를 비교하였을 때, 저회 처리구에서 용출되는 함량이 더 높게 나타난 것과 반대로 누적  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  함량은 감소하는 결과를 나타냈는데, 이는 실험 7일차 이후 용출되는  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 함량이 모든 처리구에서 증가하더라도, 무처리구가 저회 처리구보다 용출되는 함량이 더 많아 무처리구에서 용출된 누적  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 함량이 가장 많은 것으로 판단된다. Sika and Hardie (2013)의 결과와 비교하였을 때, 바이오차 시용 (0.5, 2.5 w/w)에 따른  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 감소율은 각각 26%, 42%으로 보고하였는데, 본 연구의 BA 1%와 BA 2%의 감소율인 17%, 32%와 비슷한 감소율을 확인할 수 있다.  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 는 pH가 높은 환경에서 흡착능력이 감소하는 경향이 있으며, Zhang et al. (2020)에 따르면 바이오차는 수용액의 pH를 상승시켜 표면의 작용기 해리 및 탈양성자화로 인한 정전기적 반발로  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 흡착이 불가능하지만, 바이오차 제조 온도가 높을수록 흡착 능력이 존재한다고 한다 (Laird et al., 2010). 바이오차가  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  용출을 감소시키는 경우는 두 가지가 존재하는데, 첫 번째는 600°C 이상의 높은 온도로 제작한 바이오차가 낮은 온도로 제작한 바이오차보다 높은 표면적과 더 낮은 O 함유 작용기로 인해  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 흡착량이 증가할 수 있으며 (Ahmad et al., 2014), 또는 흡착제 표면에  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  고정으로 미생물에 의해 나타나는 질산화 작용이 감소하여 전환되는  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  함량 감소에 따라 용출되는 함량이 감소하는 경우이다 (Sika and Hardie, 2013). 저회는 바이오매스 발전소의 특성상 높은 온도에서

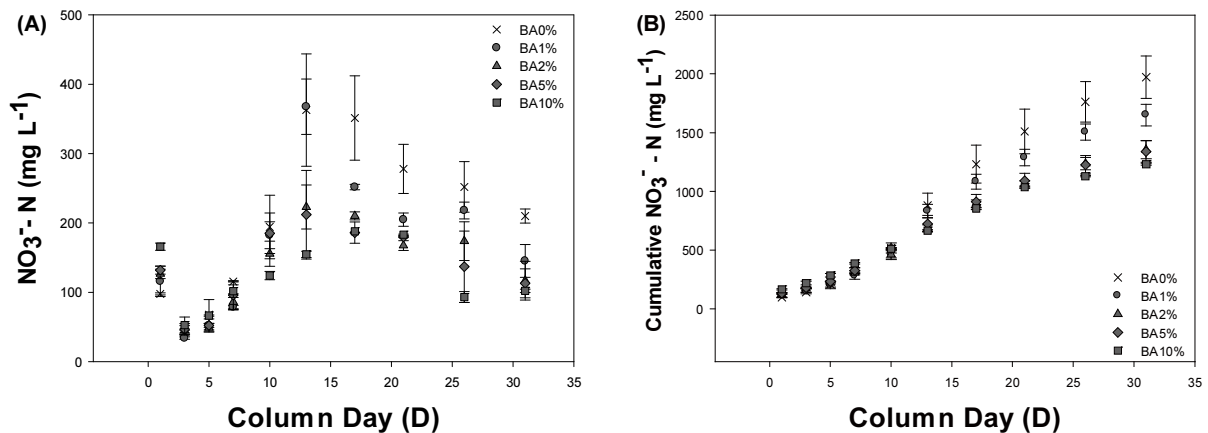


Fig. 5.  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  concentrations during column experiment. (A) comparison  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  during column experiment, (B) comparison cumulative  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  concentrations (average and standard deviation; 3 replicate).

연소되어 생산되기 때문에  $\text{NO}_3^-$ -N 흡착 능력이 존재할 가능성이 있지만, 컬럼실험을 통해 저회가  $\text{NO}_3^-$ -N에 대한 흡착 능력이 존재한다고 보기에는 어려워 추가적인 연구가 필요하다. 하지만 Fig. 4B와 Fig. 5B를 통해 저회 처리구의 용출된 누적  $\text{NO}_3^-$ -N와  $\text{NH}_4^+$ -N 함량이 무처리구에 비해 감소하는 것으로 보아 저회의 표면에 흡착된  $\text{NH}_4^+$ -N로 인해 질화 작용 감소로 생성되는  $\text{NO}_3^-$ -N 함량이 감소하여 용출된 누적  $\text{NO}_3^-$ -N 함량이 감소된 것으로 판단된다.

## Conclusions

본 연구는 바이오매스 발전소의 저회를 토양에 적용시 토양의 용출수의  $\text{NH}_4^+$ -N와  $\text{NO}_3^-$ -N에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 결과에 따르면 저회는 토양 용출수의 pH를 증가시켰고, 용출수의  $\text{NH}_4^+$ -N 함량을 감소시켰다. 용출수의 누적  $\text{NH}_4^+$ -N 함량은 BA 10%에서 대조구에 비해 18%의 감소율을 나타냈으며, 이는 수용액 내 pH 상승으로  $\text{H}^+$ 와의 경쟁이 줄어들어  $\text{NH}_4^+$ -N의 흡착 향상으로 인한 감소로 판단된다.  $\text{NO}_3^-$ -N의 경우 용출되는 누적 함량이  $\text{NH}_4^+$ -N와 유사하게 감소하는 경향을 나타냈으며, BA 10%에서 38%의 감소율을 나타냈다. 하지만 이러한 결과는  $\text{NO}_3^-$ -N의 흡착이 아닌 저회가  $\text{NH}_4^+$ -N를 흡착하여 질화 작용을 통한  $\text{NO}_3^-$ -N 생성 감소로 용출되는 함량이 감소한 것으로 판단되며,  $\text{NO}_3^-$ -N의 흡착 능력에 대해서는 추가적인 실험이 필요하다. 하지만 저회 사용을 통해 토양의  $\text{NH}_4^+$ -N와  $\text{NO}_3^-$ -N의 용출 함량을 감소시킬 수 있으며, 이는 토양에서 저회를 사용하기 위한 중요한 지표로 사용 가능할 것으로 사료된다.

## Acknowledgement

This work was carried out with the support of the Field Technology Research Project through the Korea South-East Power Co., Ltd. (KOEN).

## 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* 99:99-13.
- Cui, J., J. Li, J. Cui, W. Wang, Y. Wu, B. Xu, Y. Chang, X. Liu, H. Li, and D. Yao. 2022. Removal effects of a biomass bottom ash composite on tailwater phosphate and its application in a rural sewage treatment plant. *Sci. Total Environ.* 812:152549.
- Ding, Y., Y. Liu, W. Wu, D. Shi, M. Yang, and Z. Zhong. 2010. Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns. *Water, Air, Soil Pollut.* 213(1):47-55.
- Hur, S.B. 2020. A study on the improvement of transfer facilities for recycling of bottom ash and unburned wood pellet fuels from coal to wood pellets. Master Thesis, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea.
- Kanthle, A.K., N.K. Lenka, S. Lenka, and K. Tedia. 2016. Biochar impact on nitrate leaching as influenced by native soil organic carbon in an Inceptisol of central India. *Soil Tillage Res.* 157:65-72.
- Kim, H.S., S. Park, S.I. Yun, H. Choi, and J. Shin. 2020. Phosphate adsorption characteristics of activated palm biochar in aqueous solution. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 53(3):301-308.
- Kizito, S., S. Wu, W.K. Kirui, M. Lei, Q. Lu, H. Bah, and R. Dong. 2015. Evaluation of slow pyrolyzed wood and rice husks biochar for adsorption of ammonium nitrogen from piggy manure anaerobic digestate slurry. *Sci. Total Environ.* 505:102-112.

- Laird, D., P. Fleming, B. Wang, R. Horton, and D. Karlen. 2010. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma* 158(3-4):436-442.
- Lee, J.M., D.G. Park, S.S. Kang, E.J. Choi, H.S. Gwon, and H.S. Lee. 2021. Greenhouse gas emissions according to application of biochar by soil type in the closed chamber. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 54(4):451-466.
- Lee, Y.J., H.B. Yun, Y.S. Song, C.H. Lee, J.K. Sung, and S.K. Ha. 2015. Effects of organic matter sources on nitrogen supply potential in arable land. *CNU J. Agric. Sci.* 42:431-437.
- NIAST. 2000. Methods of soil and plant analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- Ondrasek, G., F. Kranjčec, L. Filibovič, V. Filipovič, M.B. Kovačić, I.J. Badovinac, R. Peter, M. Petravič, J. Macan, and Z. Rengel. 2021. Biomass bottom ash & dolomite similarly ameliorate an acidic low-nutrient soil, improve phytonutrition and growth, but increase Cd accumulation in radish. *Sci. Total Environ.* 753:141902.
- Park, J.H., S.W. Kang, J.J. Yun, S.G. Lee, S.H. Kim, J.S. Beak, and J.S. Cho. 2021. Effects of co-application of biochars and composts on lettuce growth. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 54(2):151-160.
- Sika, M.P. and A.G. Hardie. 2013. Effect of pine wood biochar on ammonium nitrate leaching and availability in a South African sandy soil. *Eur. J. Soil Sci.* 65(1):113-119.
- Tomczyk, A., Z. Sokolowska, and P. Boguta. 2020. Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Rev. Environ. Sci. Bio/Technol.* 19(1):191-215.
- Wang, Y., S.Z. Xu, T. Han, S. Chuan, and T. Zhu. 2006. Ammonia removal from leachate solution using natural Chinese clinoptilolite. *J. Hazard. Mater.* 136(3):735-740.
- Yang, H.I., K. Loy, A.U. Rajapaksha, Y.S. Ok, A.O. Anyia, and S.X. Chang. 2018. Adsorption of ammonium in aqueous solutions by pine sawdust and wheat straw biochars. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25:25638-25647.
- Yin, Q., B. Zhang, R. Wang, and Z. Zhao. 2018. Phosphate and ammonium adsorption of sesame straw biochars produced at different pyrolysis temperatures. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25:4320-4329.
- Zhang, M., G. Song, D.L. Gelardi, L. Huang, E. Khan, O. Mašek, S.J. Parikh, and Y.S. Ok. 2020. Evaluating biochar and its modifications for the removal of ammonium, nitrate, and phosphate in water. *Water Res.* 186:116303.
- Zhang, Q., Z. Zhang, J. Teng, H. Huang, Q. Peng, T. Jiao, L. Hou, and B. Li. 2015. Highly efficient phosphate sequestration in aqueous solutions using nanomagnesium hydroxide modified polystyrene materials. *Ind. Eng. Chem. Res.* 54:2940-2949.
- Zhu, K., H. Fu, J. Zhang, X. Lv, J. Tang, and X. Xu. 2012. Studies on removal of  $\text{NH}_4^+$ -N from aqueous solution by using the activated carbons derived from rice husk. *Biomass Bioenergy* 43:18-25.