

Research Article



CrossMark

Open Access

## 우드펠릿 기반 바이오매스 발전소로부터 배출된 저회를 활용한 염류토양 및 작물성장에 미치는 영향

김소희<sup>1</sup>, 이승규<sup>1</sup>, 윤진주<sup>1</sup>, 박재혁<sup>1</sup>, 강세원<sup>2</sup>, 조주식<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>순천대학교 일반대학원 농화학과 & IT-Bio융합시스템전공, <sup>2</sup>순천대학교 생명산업과학대학 농생명과학과

### Effect of Saline Soil and Crop Growth with Bottom Ash from Biomass Power Plant Based Wood Pellet

So-Hui Kim<sup>1</sup>, Seung-Gyu Lee<sup>1</sup>, Jin-Ju Yun<sup>1</sup>, Jae-Hyuk Park<sup>1</sup>, Se-Won Kang<sup>2</sup>, Ju-Sik Cho<sup>1,2\*</sup> (<sup>1</sup>Department of Agricultural Chemistry & Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea, <sup>2</sup>Department of Agricultural Chemistry & Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea)

Received: 4 December 2022/ Revised: 15 December 2022/ Accepted: 19 December 2022

Copyright © 2022 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

#### ORCID

So-Hui Kim

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

Seung-Gyu Lee

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

Jin-Ju Yun

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

Jae-Hyuk Park

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

Se-Won Kang

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

Ju-Sik Cho

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

#### Abstract

**BACKGROUND:** The salt in soil interrupts crop growth. Therefore, water resources are used to remove any salt found in the soil. However, water resources have been reduced by global warming; thus, a new study is required in reducing the salt in soil. Recently, the bottom ash (BA) of a biomass power plant was found to be similar to biochar. Hence, it can be used to remove heavy metals and wastewater through the adsorption characteristics of BA. The objective of this study was to evaluate the improvement effects on crop growth in saline soil containing the BA from biomass power plants.

**METHODS AND RESULTS:** The effect on crop growth

in the saline soil supplemented with BA was studied with the crop-planted pots, which were packed by reclaimed greenhouse soils collected from Byongyang, Suncheon. The BA application level was 25, 50, 100, 200, and 400 kg/10a (referred as BA25, BA50, BA100, BA200, and BA400, respectively). The BA increased the fresh weights of the leaf and root, while nitrogen uptake increased by approximately 24-102% and 54-77%, respectively for the leaf and root. The phosphorous uptake increased by 38%, although only in the leaf of the lettuce. In the case of soil, BA increased water content, pH, EC, CEC, and  $\text{NH}_4^+$  and the SAR of the soil decreased by 5-15%. The bottom ash increased the contents of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$ , and fixed the amount of  $\text{Na}^+$ .

**CONCLUSION(S):** It was confirmed the bottom ash of a biomass power plant, based on wood pellets, improved crop growth, and increased the nutrient uptake of crops in

\* Corresponding author: Ju-Sik Cho

Phone: +82-61-750-5182; Fax: +82-61-750-8011;

E-mail: chojs@scnu.ac.kr

saline soil. In addition, bottom ash, which has a wide range of porosity and high values of pH and EC, improved properties of the saline soil. However, the BA has a large amount of B, As, and heavy metals. Finally, it may require a study on the safety and contamination of heavy metals contained in the bottom ash, which would be applied in soil for a long time.

**Key words:** Biomass power plant, Bottom ash, Improvement, Saline soil

## 서론

탄소배출을 감소시키기 위해 국내에서는 지구온난화의 주된 원인 중 하나인 석탄화력발전소를 바이오매스 발전소로 전환하고 있으며, 매년 그 수가 증가하고 있다. 또한 바이오매스 발전소에서 발생하는 폐기물의 수도 점차 증가하고 있는 가운데, 대부분 폐기물은 재활용되지 않고 토양에 매립 처리되고 있는 실정이다[1]. 또한, 발전소의 폐기물 매립지 대부분이 포화상태이며, 매립지에서 빗물과 바람에 의해 주변의 환경 오염을 일으켜 원인 물질로 보고된 바 있다[2]. 이에 따라, 바이오매스 발전소에서 발생하는 폐기물을 활용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있는 가운데[3], 그 중 저희의 흡착능력을 활용하여 중금속, 폐수 오염물질 제거 등 다양한 연구를 통해 흡착능력이 효과적인 것으로 보고된 바 있다[4-6].

염분은 토양의 비옥도와 질에 영향을 미치는 환경 요인 중 하나이다[7]. 염분 집적이 밀집한 토양은 대부분 시설재배지에서 쉽게 관찰할 수 있으며, 이러한 원인은 과도한 양분 투입 및 폐쇄적 특성으로 인해 용탈에 의한 염분 제거가 어려워 염분 집적이 촉진되기 때문이다[8, 9]. 토양의 염분은 작물의 삼투압 스트레스, 이온 독성, 지상부의 CO<sub>2</sub> 동화와 호흡 및 수분과 영양소 흡수를 방해하여 작물의 생산성 및 품질을 감소시킨다[10]. 토양에서는 염분에 의한 투기성과 통기성이 낮아지며 이에 따른 삼투포텐셜 감소로 인해 미생물 활성 저하 등의 문제가 발생한다[11]. 토양의 염분을 제거하기 위해 염분을 추출하는 작물 정식, 개량제 처리를 통한 Na 치환, 천연 퇴비나 풋거름 시비, 과도한 관수를 통해 축적된 염분을 근권 아래 또는 밖으로 억제시키는 방식들이 있다[12]. 그 중 관수를 통한 제거 방식은 적용 방식이 간단하여 많이 활용하는 방식으로 상당한 수자원을 소비하는 것이 특징인데, 최근 지구온난화로 인해 농업용 수자원이 급격히 줄어들어 토양 염분화를 감소시키기 위한 새로운 연구가 필요한 실정이다[13, 14].

이에 염분토양 개량을 목적으로 바이오매스를 열로 분해하여 생산하는 바이오차를 활용하는 연구가 활발히 진행되고 있

Table 2. Chemical properties of bottom ash

Parameters	Value
pH (H <sub>2</sub> O, 1:10)	9.38
EC (dS m <sup>-1</sup> )	23.12
Total C (%)	63.78
Total N (%)	0.28
Total H (%)	1.975
H/C	0.039
Surface area (m <sup>2</sup> /g)	28.48
Pore volume (cm <sup>3</sup> /g)	0.00614
Pore diameter (nm)	1.513
B (mg/kg)	189
Cu (mg/kg)	ND <sup>†</sup>
Fe (mg/kg)	1044
Mn (mg/kg)	478
Ni (mg/kg)	ND
Zn (mg/kg)	16.9
As (mg/kg)	43.8
Cd (mg/kg)	ND

<sup>†</sup>ND; Not detected

다[15, 16]. 바이오차를 염류토양에 투입 시 토양의 염분 흡착, 교환 가능한 입자의 Na<sup>+</sup> 흡착, 수분 함량 증가로 인한 토양의 탈염 등을 통해 개선 가능하며, 작물에는 Na<sup>+</sup> 흡수를 감소시키고 K<sup>+</sup> 흡수량을 증가시켜 식물의 염분을 감소를 통해 작물 성장을 향상시킨다[17-19].

따라서 본 연구에서는 바이오매스 발전소에서 배출되는 저희를 염류토양에 적용시 토양 및 작물 성장에 미치는 영향을 평가하기 위해 진행되었으며, 포트 실험을 통해 조사하였다.

## 재료 및 방법

### 공시재료

실험에 사용한 토양은 순천시 별량면에 위치한 시설재배지에서 채취하였다. 이 시설재배지는 장기간동안 단일작물 재배로 인해 토양에 다량의 염분과 양분이 집적되어 있으며, 채취한 토양은 자연건조 후 분쇄하고 체질하여(<2 mm) 균질화 후 화학적 특성을 분석하였다. Table 1에서 보는 바와 같이 토양은 pH 7.36으로 측정되었으며, EC (Electrical Conductivity)와 SAR(Sodium Adsorption Ratio)이 각각 12.8 dS/m, 9.56 mmol<sub>c</sub>/kg으로 염분토양에 해당하는 토양이다.

저희는 대한민국 남동발전소의 영동 에코발전본부에서 우

Table 1. Soil chemical properties of saline soil

pH (1:5 H <sub>2</sub> O)	EC (dS/m)	SAR (mmol <sub>c</sub> /kg)	OM (g/kg)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/kg)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/kg)	Avail. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg)	K	Na	Ca	Mg	CEC
Exchangeable cation (cmol <sub>c</sub> /kg)											
7.36	12.8	9.56	32.8	68.58	151.21	116.74	1.83	4.35	8.60	3.84	11.6

드펠렛을 연소한 후 생성된 저회를 사용하였으며, 저회는 105 °C에서 48시간 건조하여 수분을 제거하였다. Table 2을 통해 저회의 pH는 9.38을 띠며, 탄소함량은 63.78%, 표면적은 28.48 m<sup>2</sup>/g으로 조사되었다. 또한 내부에 다량의 중금속이 함유되어 있음을 확인할 수 있었다.

### 포트실험

염류토양에 저회 처리시 토양 및 작물 성장 개선 효과를 조사하기 위해 포트 실험을 실시하였다. Wagner pot (1/5000 a size)에 자갈과 모래를 각각 1.5 kg, 1 kg으로 충전하여 여과층을 형성하였으며, 토양과 저회를 혼합하여 1.5 kg이 되도록 처리하였다. 토양에 처리한 저회는 25, 50, 100, 200 및 400 kg/10a (BA25, BA50, BA100, BA200, BA400) 수준으로 시용하였고 저회를 처리하지 않은 처리구를 대조구(CN)으로 하였으며, 농촌진흥청 표준 시비량에 근거하여 질소, 인 및 칼륨을 각각 7.0-3.0-3.6 kg/10a으로 전충 시비한 처리구를 NPK 처리구로 하였다. 실험 포트는 무작위로 배치되었으며, 모든 처리구는 3반복으로 수행하였다. 작물은 상추를 재배하였으며 수확은 재배 5주 후 수확을 진행하였다.

### 분석방법

식물체 및 토양 분석은 토양 및 식물체 분석법(NIAST, 2000)에 준하여 실시하였다. 수확 후 상추의 생육조사를 실시하였으며, 상추 시료는 70°C dry oven에서 48시간 동안 건조시킨 시료를 습식분해법(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + HClO<sub>4</sub>)으로 전처리하여 T-N은 Kjeldahl법, T-P는 Vanadate법(Optizen 2120UV, Mecasys, Daejeon, Korea)으로 분석하였으며, 지상부와 지하부의 질소와 인의 양분흡수량을 식(1)에 대입하여 계산하였다. 전처리한 여과액은 ICP(ICPE-9000, Shimadzu, Kyoto, Japan)를 이용하여 As와 B를 분석하였다.

총 양분 흡수량(mg/plant)

$$= \text{식물체 건중량(g)} \times \text{무기성분 함량(mg/kg)} \quad (1)$$

토양의 pH와 EC는 1:5(w/v) 비율로 침출한 침출액을 pH meter 및 EC meter(S230, Mettler Toledo, Zurich, Switzerland)으로 측정하여 분석하였으며, 유기물(OM, Organic matter)함량은 Tyurin법, Total-N은 Kjeldahl 증류법으로 분석하였다. CEC는 1.0N-CH<sub>3</sub>COONH (pH 7.0)으로 침출한 후 여과액을 ICP-OES (ICPE-9000, Shimadzu, Kyoto, Japan)으로 분석하였고, 유효인산은 Lancaster법, 암모니아태 질소와 질산태 질소는 2M-KCl로 용출한 후 여과액을 Brucin법과 Salicylate법으로 분석하였다.

### 통계분석

염류 토양에서 저회 처리함량에 따른 토양의 화학성과 상추의 생육에 대한 통계분석은 SAS software (version 9.4; SAS Institute Inc., 1995)을 이용하여 one-way ANOVA 분석을 수행하였으며, 5% 유의수준에서 Tukey test를 이용하

여 처리 간의 효과를 비교하였다.

## 결과 및 고찰

### 저회 처리에 따른 상추 생육조사

염류토양에 저회 처리에 따른 상추의 생육조사결과 Fig. 1을 통해 지상부의 생육이 NPK에 비해 BA25, 50, 100, 200, 400이 각각 12.2, 22.8, 38.8, 46.5, 75.2% 증가하였으며, 상추의 지하부는 지상부와 다르게 저회 처리에 따른 생육 변화가 관찰되지 않았다. 지상부의 건물중 증가는 생체중과 유사하게 저회 투입에 따라 증가하는 경향을 나타냈으며 NPK 처리구보다 32.3-47.8%의 증가율을 나타냈다. 지하부의 건중량의 경우 생체중과 동일하게 저회 함량에 따른 차이가 미미한 것으로 조사되었다. Cui 등[20]에 따르면 염분 및 알칼리 토양에 바이오차 처리시 작물의 엽면적과 생중량이 각각 36.1, 40.0% 증가하였으며, 밀 수확량은 49.6-54.7%, 옥수수 수확량은 49.2-56.7%까지 증가하였다고 보고하였대[21]. 지하부 발달은 작물의 양분 및 수분 흡수에 더 유용하다는 것을 의미한다[22, 23]. Akhtar 등[24]에 따르면 염분토양에 바이오차 처리시 작물 성장 및 지하부 길이 역시 증가하였는데, 이러한 이유는 바이오차 처리로 인해 영양분 및 수분 등의 흡수 특성의 개선으로 인한 지하부의 발달로 이어졌다고 보고하였다.

### 저회 처리에 따른 작물 양분 분포 특성

지상부와 지하부의 질소 및 인의 양분흡수량을 조사한 결과, 질소 양분흡수량은 지상부와 지하부 모두 증가하였으며, 지상부는 최대 54%, 지하부는 최대 38%까지 증가하는 것을 확인하였다(Fig. 2). 인의 양분흡수량의 경우 질소와 다르게 지상부에서만 인의 흡수량이 증가하였으며, 최대 77%까지 증가한 것을 확인할 수 있었다(Fig. 2). 지하부에서는 저회 처리에 따른 인의 흡수량에서는 큰 변화가 관찰되지 않았다. 염분 토양에 바이오차 처리시 작물의 양분 증가는 바이오차가 토양의 염이온을 고정하여 작물의 염분 스트레스를 감소시키고, 토양내 교환 가능한 영양분 공급을 통해 작물의 영양분 흡수 향상을 촉진시킨다[25]. 이외에도 수분 보유력 향상과 미생물 및 효소 활동에 영향을 미쳐 토양의 물리화학적 특성 개선에 따른 작물성장이 가능하다고 보고되고 있다[26]. Jeffery 등[25]에 따르면 염분토양에 석탄회 처리시 작물의 양분함량이 증가하였으며, 이러한 결과는 개량제 처리에 따라 토양 내 식물의 유효태인산 등을 증가시켜 작물의 성장에 도움을 준 결과와 일치한다고 보고하였다. 하지만 본 실험의 경우 지상부와 지하부 모두 질소 흡수량은 증가하지만 지하부의 인 흡수량은 저회 처리에 따른 변화가 미미하여 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다. 또한 지상부와 지하부의 As, B 흡수량을 조사한 결과 전체처리구에서 저회 처리량에 관계없이 유사한 흡수량을 보였으며, 지하부의 경우 저회 처리구들이 무처리구에 비해 더 낮은 함량을 나타냈다(Fig. 3). 이 결과를 토대로 저회 내부에 존재하는 As와 B는 작물에 흡수되지 않는 형태인 것으로 판단된다.

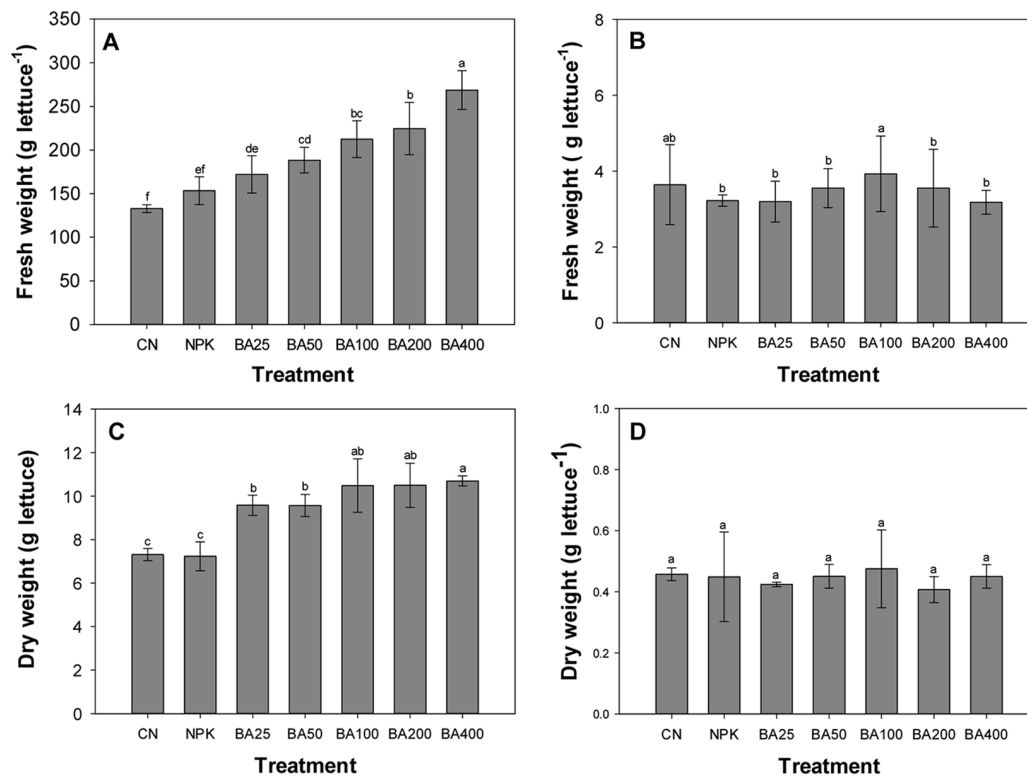


Fig. 1. Fresh(Up) and dry(Down) weight of the lettuce under the different throughput of bottom ash in saline soils(Left, Weight of shoot about lettuce, Right, Weight of root about lettuce). Different letter indicates significantly different at the 5% level by Tukey's test. Vertical bars represent standard deviations (n=3).

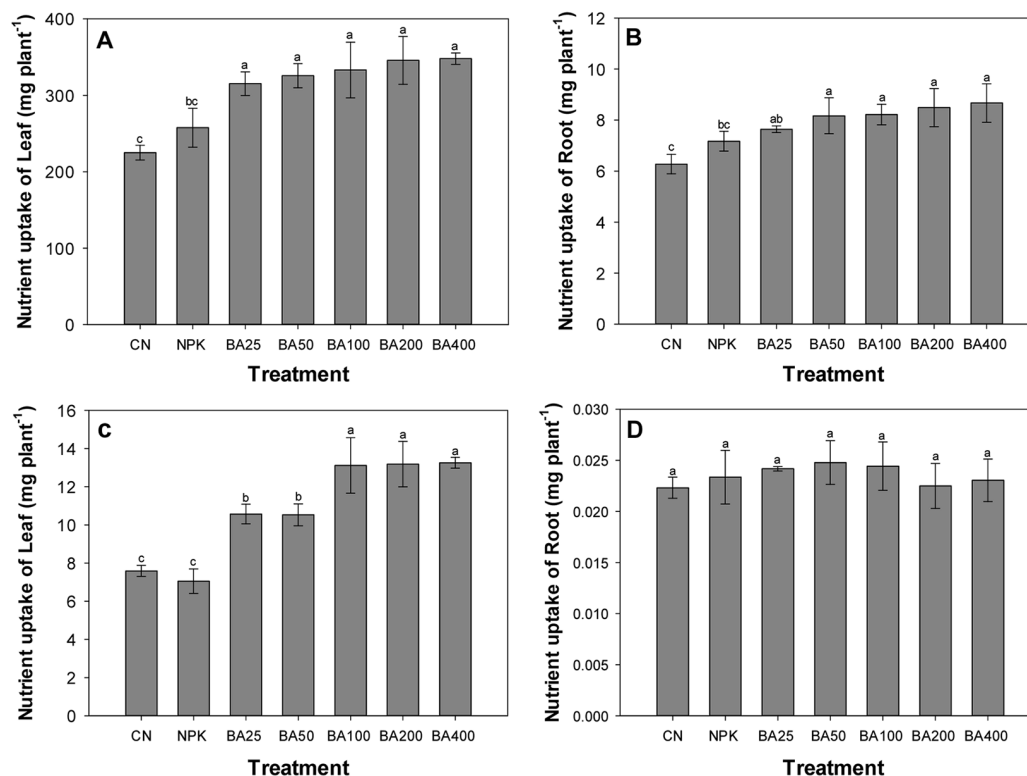


Fig. 2. Nutrient uptake of leaf(Left)and root(Right) of the lettuce under the different throughput of bottom ash in saline soils (Up, Nitrogen uptake of leaf and root, Down, Phosphorus uptake of leaf and root). Different letter indicates significantly different at the 5% level by Tukey's test. Vertical bars represent standard deviations (n=3).

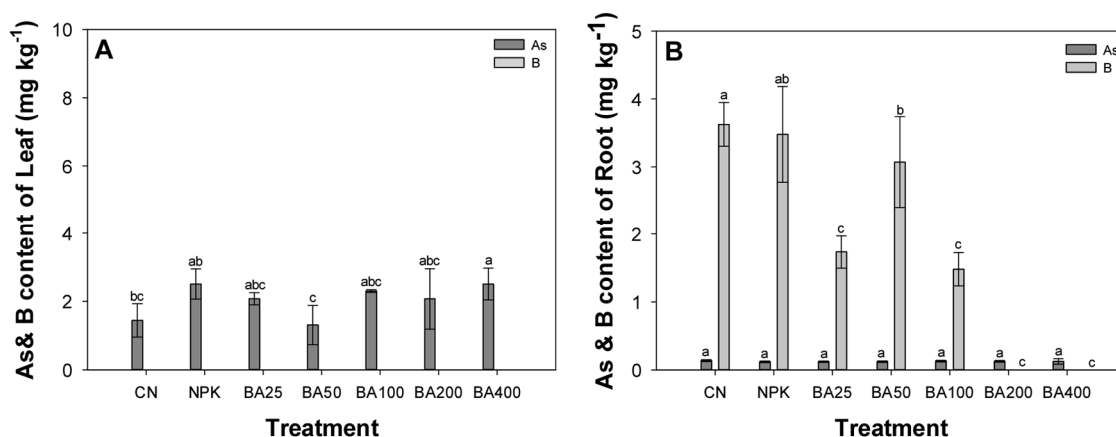


Fig. 3. As & B content of leaf(Left) and root(Right) of the lettuce. Different letter indicates significantly different at the 5% level by Tukey's test. Vertical bars represent standard deviations (n=3).

### 저회 처리에 따른 토양 특성 변화

상추 수확 후 저회 처리에 따른 토양의 화학적 특성을 분석하였다. 재배 후 토양 분석 결과, Table 3에서 보는 바와 같이 저회 처리에 따라 토양의 수분함량, pH 및 EC가 증가하는 것을 확인하였다. 수분함량은 저회 처리구들이 CN에 비해 21-34% 증가하였고, EC는 26-58%의 증가량을 나타냈다. 토양의 pH는 시비한 저회의 pH 9.38에 비해 pH 7.0-8.0으로 저회의 pH보다 낮은 pH가 조사되었다. 토양의 pH 증가는 바이오차 시비에 따른 토양 변화에서 쉽게 관찰되는 경향으로, 토양의 수분함량과 pH가 증가하는 이유는 저회의 높은 비표면적, pH 및 EC에 따른 변화이며[26, 27], 특히 Dahlawi 등 [28]에 따르면 EC는 포트와 같이 염류제거를 위한 침출이 없는 경우, 바이오차로 인해 장기적으로 증가하며 이러한 경향은 바이오차의 EC가 토양의 EC보다 높을 경우에만 해당이 된다고 보고하였다. 본 연구에서 사용한 저회의 EC는 23.12 dS/m으로 매우 높은 수치이며(Table 2), 이러한 저회를 토양에 처리할 경우 토양의 EC를 증가시키는 것으로 판단된다.

또한 저회 처리에 따라 토양의 SAR은 감소하고 CEC는 증가하는 경향이 나타났는데, 토양의 SAR이 감소한 이유는 저회 처리에 따라 토양의  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^{+}$ 의 함량은 증가량이  $\text{Na}^{2+}$ 의 증가량에 비해 더 높기 때문으로 판단되며, 토양의 CEC는 Ca, Mg, Na, K의 함량이 저회 처리에 의해 모두 증가하였기 때문이다. 이미 바이오차를 활용하여 토양의 SAR 감소 및 CEC 증가에 대한 효과는 많이 보고되었는데[29, 30], Clark 등[31]에 따르면, 바이오차는 다공성 물질이기 때문에 염분 토양의 전체 공극률, 보수력과 밀도를 향상시키고, 토양의 Ca 응집 향상 및 Na의 침출을 촉진 및 Ca 함량 증가를 통해 염분토양의 물리적 특성을 개선시키는데 큰 도움을 준다고 보고하였다.

암모니아태 질소의 토양 내 함량은 저회 처리에 따라 NPK에 비해 최대 46%까지 증가하는 경향을 보였으며, 이 중 BA25의 암모니아태 질소 함량은 대조구와 함량이 유사한 것으로 조사되었다. 바이오차는 표면이 음전하로 구성되어 있어  $\text{NH}_4^{+}$ 에 대한 고정능력이 뛰어나며[32], Zhu 등[33]에 따르면

Table 3. Chemical properties of the saline soils with different level of BA

	CN	NPK	BA25	BA50	BA100	BA200	BA400
Soil water (%)	45.88 <sup>f</sup>	59.92 <sup>e</sup>	55.78 <sup>d</sup>	57.63 <sup>cd</sup>	58.66 <sup>bc</sup>	60.38 <sup>ab</sup>	61.54 <sup>a</sup>
pH (1:5)	7.65 <sup>ab</sup>	7.55 <sup>b</sup>	7.72 <sup>b</sup>	7.77 <sup>a</sup>	7.76 <sup>a</sup>	7.81 <sup>a</sup>	7.82 <sup>a</sup>
EC (dS/m)	9.50 <sup>d</sup>	10.20 <sup>d</sup>	11.97 <sup>c</sup>	12.05 <sup>c</sup>	13.20 <sup>b</sup>	14.11 <sup>ab</sup>	15.03 <sup>a</sup>
SAR (mmol <sub>c</sub> /kg)	6.40 <sup>c</sup>	8.94 <sup>a</sup>	8.34 <sup>ab</sup>	7.36 <sup>bc</sup>	6.73 <sup>c</sup>	6.72 <sup>c</sup>	6.34 <sup>c</sup>
Ca (cmol <sub>c</sub> /kg)	6.99 <sup>ab</sup>	6.88 <sup>bc</sup>	7.12 <sup>a</sup>	6.97 <sup>b</sup>	6.92 <sup>b</sup>	6.82 <sup>c</sup>	6.97 <sup>b</sup>
Mg (cmol <sub>c</sub> /kg)	2.01 <sup>e</sup>	2.24 <sup>de</sup>	2.51 <sup>cd</sup>	2.67 <sup>de</sup>	2.79 <sup>c</sup>	2.98 <sup>b</sup>	3.10 <sup>a</sup>
K (cmol <sub>c</sub> /kg)	5.69 <sup>f</sup>	5.90 <sup>e</sup>	6.43 <sup>d</sup>	6.40 <sup>d</sup>	6.93 <sup>c</sup>	7.84 <sup>b</sup>	8.61 <sup>b</sup>
Na (cmol <sub>c</sub> /kg)	2.01 <sup>f</sup>	2.24 <sup>e</sup>	2.51 <sup>d</sup>	2.67 <sup>cd</sup>	2.79 <sup>bc</sup>	2.88 <sup>ab</sup>	2.91 <sup>a</sup>
CEC (cmol <sub>c</sub> /kg)	18.17 <sup>f</sup>	18.62 <sup>e</sup>	19.72 <sup>d</sup>	19.51 <sup>d</sup>	20.50 <sup>c</sup>	21.81 <sup>b</sup>	23.57 <sup>a</sup>
$\text{NH}_4^{+}$ (mg/kg)	41.93 <sup>de</sup>	45.82 <sup>cd</sup>	40.58 <sup>e</sup>	41.99 <sup>de</sup>	48.35 <sup>c</sup>	60.00 <sup>b</sup>	67.03 <sup>a</sup>
$\text{NO}_3^{-}$ (mg/kg)	143.96 <sup>e</sup>	181.82 <sup>d</sup>	220.81 <sup>a</sup>	191.37 <sup>cd</sup>	213.68 <sup>ab</sup>	202.59 <sup>cd</sup>	208.62 <sup>ab</sup>
Avail. $\text{P}_2\text{O}_5$ (mg/kg)	234.85 <sup>ab</sup>	261.98 <sup>ab</sup>	263.95 <sup>ab</sup>	259.47 <sup>ab</sup>	293.59 <sup>a</sup>	276.82 <sup>a</sup>	278.71 <sup>a</sup>

pH가 높은 환경에서는  $\text{NH}_4^+$ 가  $\text{NH}_3$ 로 전환되어 휘산으로 유실되는 경향이 있는데, 바이오차는 탄소가 알칼리성을 나타내어, 수용액에  $\text{OH}^-$ 를 해리하여  $\text{NH}_4^+$ 의 흡착량을 유지시킬 수 있다고 보고하였다.

## 결론

본 연구는 염류토양에 우드펠릿을 기반으로 한 바이오매스 발전소에서 발생하는 저회를 토양에 처리시 작물의 성장 및 토양 개선효과에 대해 조사하였다. 실험 결과 저회는 지상부와 지하부의 생육을 각각 24-102%, 30-46%까지 향상시켰으며, 작물의 양분흡수량은 질소와 인을 각각 77%와 38%까지 향상시켜 염분토양에서의 저회 처리에 따른 작물성장 개선 효과를 확인하였다. 그러나 지하부의 인 흡수량의 경우 저회 처리에 따른 개선효과가 발견되지 않았으며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 저회에 다량 함유된 B와 As가 작물의 성장기간동안 흡수되지 않으며, 처리량에 따른 증가 역시 관찰되지 않았다. 저회는 염류토양의 수분함량, pH, EC, CEC,  $\text{NH}_4^+$ 를 향상시켰다. 이러한 경향은 저회의 높은 비표면적, pH 및 EC에 의한 증가로 판단되며, 토양의 유효인산 및 질산태 질소의 변화는 미미하였다. 또한 토양의 Ca, Mg, K을 향상시키고 Na 고정에 따른 토양의 SAR 감소를 통해 저회가 염류토양의 물리적 조건 개선 가능성을 확인하였다. 따라서 저회는 염류토양에 처리시 작물의 생육 및 토양 개선제로서 활용 가능성을 확인하였지만, 중금속 함량이 많기 때문에 장기 시용에 따른 중금속에 대한 안전성 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## Note

The authors declare no conflict of interest.

## 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

- Lee JC, Oh SJ, Kang MW, Kim YH, Kim YH, Kim DJ, Lee SS (2021) Improvement of salt accumulated soil and crop growth using coal ash. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 40(2), 83-91. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2021.40.2.10>.
- Singh M, Siddique R (2014) Compressive strength, drying shrinkage and chemical resistance of concrete incorporating coal bottom ash as partial or total replacement of sand. *Construction and Building Materials*, 68, 39-48. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.034>.
- Agrela F, Cabrera M, Morales MM, Zamorano M, Alshaaer M (2019) Biomass fly ash and biomass bottom ash: In New trends in eco-efficient and recycled concrete. Woodhead Publishing, 23-58. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102480-5.00002-6>.
- Park JH, Eom JH, Lee SL, Hwang SW, Kim SH, Kang SW, Yun JJ, Cho JJ, Lee YH, Seo DC (2020) Exploration of the potential capacity of fly ash and bottom ash derived from wood pellet-based thermal power plant for heavy metal removal. *Science of the Total Environment*, 740, 140205. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140205>.
- Hashim KS, Ewadh HM, Muhsin AA, Zubaidi SL, Kot P, Muradov M, Aljefery M, Al-Khaddar R (2021) Phosphate removal from water using bottom ash: Adsorption performance, coexisting anions and modelling studies. *Water Science and Technology*, 83(1), 77-89. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.561>.
- Cho HN, Lee SG, Kim SH, Yun JJ, Park JH, Cho JS, Kang SW (2022) Evaluation of growth characteristics and lead uptake of lettuce under different application levels of bottom ash. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 41(3), 185-190. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2022.41.3.22>.
- Mona S, Bhateria R, Deepak B, Kiran B, Nisha R (2019) Biochar for reclamation of saline soils. *Microorganisms in Saline Environments: Strategies and Functions*, 56, 451-466. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-18975-4\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-030-18975-4_20).
- Lee YJ, Choi JH, Sim SJ, Ha TH, Lee HG (2004) A field study on electrokinetic removal of salts from greenhouse soil. *Korean Chemical Engineering Research*, 52(1), 126-132. <https://doi.org/10.9713/kcer.2014.52.1.126>.
- Acosta-Motos JR, Ortuno MF, Bernal-Vicente A, Diaz Vivancos P, Sanchez-Blanco MJ, Hernandez JA (2017) Plant responses to salt stress: adaptive mechanisms. *Agronomy*, 7(1), 18. <https://doi.org/10.3390/agronomy7010018>.
- Soliman M, Elkelish A, Souad T, Alhaithloul H, Farooq M (2020) Brassinosteroid seed priming with nitrogen supplementation improves salt tolerance in soybean. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 26(3), 501-511. <https://doi.org/10.1007/s12298-020-00765-7>.
- Kang CH, Lee IS, Go DY, Kim HJ, Na YE (2018) The growth and yield differences in kenaf (*Hibiscus can-*

- nabinus L.) in reclaimed land based on the physical types of organic materials. *Korean Journal of Crop Science*, 63(1), 64-71. <https://doi.org/10.7740/kjcs.2018.63.1.064>.
12. Lee S, Khanal A, Nogrado K, Song HG, Cho YS, Lee JH (2021) Enhancement of salt stress tolerance of *Hordeum vulgare* L. by salt-tolerant bacteria. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 40(4), 345-352. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2021.40.4.39>.
  13. Amini S, Ghadiri H, Chen C, Marschner P (2016) Salt-affected soils, reclamation, carbon dynamics, and biochar: A review. *Journal of Soils and Sediments*, 16(3), 939-953. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1293-1>.
  14. Leiwen J, Yufen T, Zhijie Z, Tianhong L, Jianhua L (2005) Water resources, land exploration and population dynamics in arid areas-the case of the Tarim River basin in Xinjiang of China. *Population and Environment*, 26(6), 471-503. <http://doi.org/10.4491/KSEE.2020.42.6.308>.
  15. Bhaduri D, Saha A, Desai D, Meena HN (2016) Restoration of carbon and microbial activity in salt-induced soil by application of peanut shell biochar during short-term incubation study. *Chemosphere*, 148, 86-98. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.12.130>.
  16. Xiao L, Meng F (2020) Evaluating the effect of biochar on salt leaching and nutrient retention of Yellow River Delta soil. *Soil Use and Management*, 36(4), 740-750. <https://doi.org/10.1111/sum.12638>.
  17. Zhang J, Bai Z, Huang J, Hussain S, Zhao F, Zhu C, Zhu L, Cao X, Jin Q (2019) Biochar alleviated the salt stress of induced saline paddy soil and improved the biochemical characteristics of rice seedlings differing in salt tolerance. *Soil and Tillage Research*, 195, 104372. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104372>.
  18. Sadegh-Zadeh Z, Parichehreh M, Jalili B, Bahmanyar MA (2018) Rehabilitation of calcareous saline-sodic soil by means of biochars and acidified biochars. *Land Degradation & Development*, 29(10), 3262-3271. <https://doi.org/10.1002/ldr.3079>.
  19. Laird DA, Fleming P, Davis DD, Horton R, Wang B, Karlen DL (2010) Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158(3-4), 443-449. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.05.013>.
  20. Cui L, Liu Y, Yan J, Hina K, Hussain Q, Qiu T, Zhu J (2022) Revitalizing coastal saline-alkali soil with biochar application for improved crop growth. *Ecological Engineering*, 179, 106594. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106594>.
  21. Xiao L, Yuan G, Feng L, Bi D, Wei Jing (2020) Soil properties and the growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) and maize (*Zea mays* L.) in response to reed (*Phragmites communis*) biochar use in a salt-affected soil in the Yellow River Delta. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 202, 107124. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107124>.
  22. Bengough AG, McKenzie BM, Hallett PD, Valentine TA (2011) Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany*, 62(1), 59-68. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq350>.
  23. Mahmoud E, El Baroudy A, Ali N, Sleem M (2020) Spectroscopic studies on the phosphorus adsorption in salt-affected soils with or without nano-biochar additions. *Environmental Research*, 184, 109277. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109277>.
  24. Akhta SS, Andersen MN, Liu F (2015) Biochar mitigates salinity stress in potato. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 201(5), 368-378. <https://doi.org/10.1111/jac.12132>.
  25. Jeffery S, Verheijen FG, Van de Velde M, Bastos AC (2011) A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144, 175-187. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.015>.
  26. Thomas SC, Frye S, Gale N, Garmon M, Launchbury R, Machado N, Melamed S, Murrery J, Petroff A, Winsborough C (2013) Biochar mitigates negative effects of salt additions on two herbaceous plant species. *Journal of Environmental Management*, 129, 62-68. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.05.057>.
  27. Lee IB, Jung DH, Yi PH, Lee JG, Bhandari SR (2021) Analysis of changes in growth, nutrient absorption characteristics, and glucosinolate contents of Chinese cabbage (*Brassica rapa pekinensis*) grown in reclaimed land according to irrigation with different salt concentrations. *Horticultural Science and Technology*, 39(5), 572-582. <https://doi.org/10.7235/HORT.2021.10051>.
  28. Dahlawi S, Naeem A, Rengel Z, Naidu R (2018) Biochar application for the remediation of salt-affected soils: Challenges and opportunities. *Science of the Total Environment*, 625, 320-335. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.257>.

29. Obia A, Mulder J, Martinsen V, Cornelissen G, Borresen T (2016) In Situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils. *Soil and Tillage Research*, 155, 35-44. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.08.002>.
30. Fletcher AJ, Smith MA, Heinemeyer A, Lord R, Ennis CJ, Hodgson EM, Farrar K (2014) Production factors controlling the physical characteristics of biochar derived from phytoremediation willow for agricultural applications. *BioEnergy Research*, 7(1), 371-380. <https://doi.org/10.1007/s12155-013-9380-x>.
31. Clark GJ, Dodgshun N, Sale PWG, Tang C (2007) Changes in chemical and biological properties of a sodic clay subsoil with addition of organic amendments. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(11), 2806-2817. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.06.003>.
32. Kang YG, Lee JH, Chu JH, Oh TK (2021) Adsorption characteristics of  $\text{NH}_4^+$  by biochar derived from rice and maize residue. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 40(3), 161-168. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2021.40.3.19>.
33. Zhu K, Fu H, Zhang J, Lv X, Tang J, Xu X (2012) Studies on removal of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  from aqueous solution by using the activated carbons derived from rice husk. *Biomass and Bioenergy*, 43, 18-25. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.04.005>.