

Research Article



CrossMark

Open Access

저희의 시용수준에 따른 상추의 생육 및 납 흡수 특성 평가

조한나^{1†}, 이승규^{1†}, 김소희¹, 윤진주¹, 박재혁¹, 조주식^{1,2}, 강세원^{1,2*}

¹순천대학교 일반대학원 농화학과, ²순천대학교 생명산업과학대학 농생명과학과

Evaluation of Growth Characteristics and Lead Uptake of Lettuce under different application levels of Bottom Ash

Han-Na Cho^{1†}, Seung-Gyu Lee^{1†}, So-Hui Kim¹, Jin-Ju Yun¹, Jae-Hyuk Park¹, Ju-Sik Cho^{1,2} and Se-Won Kang^{1,2*}
(¹Department of Agricultural Chemistry, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea, ²Department of Agricultural Life Sciences, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea)

Received: 12 August 2022/ Revised: 31 August 2022/ Accepted: 1 September 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

Han-Na Cho

<https://orcid.org/0000-0002-5143-9545>

Seung-Gyu Lee

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

So-Hui Kim

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

Jin-Ju Yun

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

Jae-Hyuk Park

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

Ju-Sik Cho

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

Se-Won Kang

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

Abstract

BACKGROUND: Most of the bottom ash(BA) from wood pellet-based thermal power plants that is not recycled is placed into landfill. BA has a function and structure similar to biochar. Hence, BA is classified as waste, but, it is predicted that BA can be used agricultural utilization.

METHODS AND RESULTS: To investigate the effect of BA application on lettuce, growth characteristics and Pb contents were examined with BA application levels(0, 1, 2, 3 and 4 g/L), respectively, in hydroponic cultivation with Pb solution. Irrespective with BA application levels, the length, leaf number and fresh weight of lettuce in BA

treatments were increased by 84.3~120, 36.2~39.0, and 215~322%, respectively, compared to the BA-0 treatment. The groups with BA treatments, Pb in the nutrient solution was adsorbed to the BA due to the surface area and functional groups of the BA, and the lettuce growth was maintained more smoothly than in the BA-0 treatment. BA application is considered to have created a favorable environment for lettuce growth in hydroponic cultivation with Pb solution.

CONCLUSION(S): Although direct comparing the removal effect of heavy metal between BA and biochar is not present, the BA application in contaminated area suggested a significant meaning on the recycling waste, and increasing potential crop productivity by immobilizing heavy metal.

Key words: Agricultural utilization, Biochar, Bottom ash, Heavy metal, Hydroponic cultivation

[†]These authors contributed equally to this work.

* Corresponding author: Se-Won Kang

Phone: +82-61-750-5192; Fax: +82-61-750-8011;

E-mail: kangsw@scnu.ac.kr

서론

급속한 산업화와 도시화는 심각한 환경오염을 초래하여 생태계를 위협하고 있으며, 중금속에 의한 토양 오염도 그중 하나이다[1]. 중금속은 밀도가 4.5 g/cm^3 이상인 금속으로 정의되며, 산업, 광업 및 농업 활동 등과 같이 인위적인 활동을 통해서 배출이 되기도 하고, 대기중의 중금속도 강수를 통해 토양으로 이동 및 축적될 수 있다[2]. 중금속은 유기성물질과 달리 자연적인 분해가 어려워 토양에 유입되면 토양의 비옥도, 작물 수확량을 감소시킬 수 있다[3, 4]. 또한, 중금속에 의한 토양 오염은 잠재적으로 먹이사슬을 통해 살아있는 동식물과 인간의 건강을 위협할 수 있어 토양내 중금속의 부동화 또는 제거를 통해 이동을 억제할 필요가 있다[5].

한편, 우리나라는 2030년 국가 온실가스 배출전망치 대비 37%의 온실가스 감축목표를 설정하면서 각 산업분야별로 온실가스를 감축하기 위한 노력을 하고 있다. 또한, 세계 탄소 중립 정책에 맞춰 국내 일부 석탄원료 기반 화력발전소들은 에너지를 생산하면서 발생하는 대기오염물질을 저감하기 위해 바이오매스 기반 화력발전소로 전환하여 운영되고 있다. 바이오매스 기반 화력발전소는 화석연료 대신 우드펠렛을 사용하여 에너지를 생산하고 있으며, 부산물로 회(ash)가 발생되는데 저회(bottom ash)와 비회(fly ash)로 나뉜다. 이중 저회는 산업적으로 활용하기 어려워 대부분 매립을 통해 관리되고 있지만, 매립지가 만지상태에 이르러 이를 해결하기 위한 방안이 필요한 상황이다. 바이오매스 기반 화력발전소에서 발생하는 저회는 석탄원료 기반 화력발전소에서 발생하는 저회와 달리 pH와 탄소함량이 높은 물질이며, 다양한 작용기를 가지고 있다[6]. 이와 같은 저회의 특성은 환경분야 개선을 위해 많이 활용되고 있는 바이오차와 유사한 기능을 가질 것으로 예상된다. 유기성 바이오매스를 혐기조건에서 열분해하여 생산되는 바이오차는 수용액과 토양내에서 중금속을 제어하는데 효과적인 것으로 보고된 바 있다[7-10]. 따라서 바이오차와 유사한 특성을 가진 저회를 토양 중금속 제어에 활용한다면 발전소 부산물의 매립문제를 해결할 수 있고 장기적으로 볼 때 농업환경적 측면에서 유익한 효과를 가져다 줄 수 있다고 판단된다.

이에 본 연구에서는 중금속으로 오염된 양액에 저회를 적용하여 저회가 작물의 생육과 중금속 흡수 특성에 미치는 영향을 평가하여 향후 중금속 오염지역에 저회를 적용하기 위한 기초자료를 얻고자 하였다.

재료 및 방법

공시 재료

공시 작물로는 상추(*Lactuca sativa* L.)를 선정하였으며 Leaf type의 청치마를 사용하였고, 상추 종자를 육묘용 포트에 파종하여 시험목적에 따라 일정기간 키운 후 사용하였다.

본 실험에 사용된 저회는 한국남동발전 영동 에코발전본부에서 우드펠렛이 연소된 후 보일러 호퍼 내부에 쌓인 저회를 105°C 에서 24시간 동안 dry oven에서 건조 후 사용하였다. 저회의 특성은 Table 1에서 보는 바와 같이 표면적이 $76.5 \text{ m}^2/\text{g}$ 이었고, pH가 9.26으로 높은 물질이었다.

양액 및 Pb 용액 제조

본 실험에 사용한 양액은 Table 2의 조성으로 구성된 일본원예시험장 표준양액을 1/2배액으로 조제하여 사용하였으며, Pb 용액은 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 를 이용하여 100 mg/L 의 농도로 조제하여 사용하였다.

실험방법

Pb 용액이 첨가된 양액재배 실험에서 저회 사용이 상추 생육에 미치는 영향을 조사하기 위해 저회 사용수준에 따른 상추의 Pb 흡수 특성, 생육 특성, 그리고 양분 함량을 조사하였다.

Table 2. Prescription of standard culture solution by Horticultural Experiment Station in Japan

Components	Concentration	
	1.0×	0.5×
	-- (mg/L)--	
KNO_3	810	405
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	950	475
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	500	250
$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	155	77.5
Fe-EDTA	20	20
H_3BO_3	3	3
$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	2	2
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.22	0.22
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.05	0.05
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.02	0.02
EC (dS m^{-1})	2.2	1.7
pH	6.2	6.8

Table 1. Properties of bottom ash

Surface area (m^2/g)	pH (1:10)	Elemental composition					Molar ratio	
		C	H	O	N	H/C	O/C	(O+N)/C
		----- (%) -----						
76.5	9.26	65.8	1.19	21.2	0.32	0.22	0.24	0.25

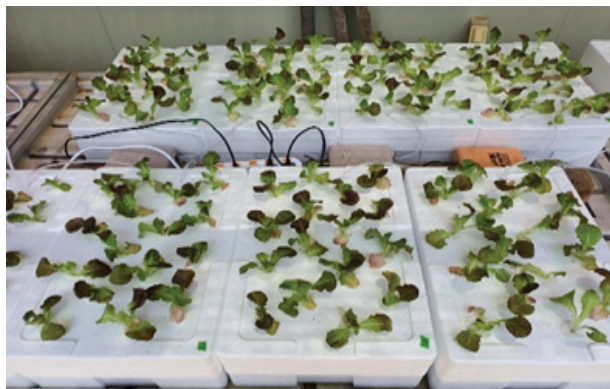


Fig. 1. Experimental preparation in greenhouse.

양액재배는 담수식 수경재배로 진행되었으며, 스티로폼 재질에 부피는 15 L에 해당하는 용기를 사용하였고, 상추는 처리구별로 16주를 정식하였다. 상추의 뿌리는 물에 잠겨 있기 때문에 상추의 생육을 위해 모든 처리구에 공기펌프를 설치하여 상추의 생육기간 동안 작동되도록 관리하였다. 저회는 1, 2, 3 및 4 g/L(BA-1, BA-2, BA-3, BA-4) 수준으로 사용하였고, 저회를 사용하지 않은 BA-0 처리구를 대조구로 하였다.

실험은 유리온실에서 이루어졌으며, 실내 온도 조건은 낮에는 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 밤에는 $10 \pm 2^\circ\text{C}$ 를 유지하였고, 광조건은 일반적으로 많이 사용하는 식물 생장용 LED 조건(640-700nm 파장)에서 상추를 재배하였다. 상추의 생육기간 동안 증산과 증발에 의한 수분 손실량은 2일 간격으로 증류수를 총 양액 부피가 15 L가 되도록 조정하였다. 상추 생육조사는 정식 9일 후의 표본식물 10개체를 선별하여 상추의 길이, 잎수, 생체중, 건물중을 조사하였고, 상추의 양분 및 Pb 함량과 흡수량을 조사하였다.

분석방법

식물체 및 배양 양액 내 Pb 함량과 일반 양분 함량 분석은 수확한 상추 시료를 70°C dry oven에서 48시간 동안 건

조시킨 시료를 습식분해법($\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{HClO}_4$)으로 전처리하여 N은 Kjeldahl법, P는 vanadate법, 그리고 K, Ca, Mg 및 Pb는 ICP(ICPE-9000, Shimadzu)를 사용하여 분석하였다. 저회의 표면 관찰은 주사전자현미경(SEM, Hitachi, Japan)과 Energy Dispersive Spectroscopy(EDS, Serial IT, Noran, USA)을 이용하였다.

저회 사용수준에 따른 상추의 생육과 Pb 흡수에 대한 통계분석은 SPSS27 버전(SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA)을 사용하여 5% 유의수준에서 Duncan's multiple range test를 수행하였다.

결과 및 고찰

상추의 Pb 흡수 특성

저회의 사용수준에 따른 상추의 Pb 함량과 흡수량을 조사한 결과는 Fig. 2에서 보는 바와 같다. 저회 사용에 따른 상추의 건물중량은 BA-0, 1, 2, 3 및 4 처리구에서 각각 0.12, 0.22, 0.23, 0.27 및 0.22 g/plant으로 저회를 사용한 처리구가 대조구에 비해 약 90% 이상이 증가되었다. 상추의 Pb 함량은 BA-0 처리구에서 234 mg/kg으로 조사되었고, 전반적으로 저회 사용수준이 많아질수록 Pb 함량이 낮아지는 경향을 보였으며, BA-3 및 BA-4 처리구에서는 50 mg/kg 미만으로 검출되었다. 상추의 건물중량과 Pb 함량을 이용하여 상추의 Pb 흡수량을 조사한 결과 BA-0 처리구에서는 27.0 ug/plant으로 가장 높은 Pb 흡수를 보였고, BA-4 처리구에서 8.1 ug/plant으로 가장 낮은 Pb 흡수를 보였다. 저회를 농업 및 환경적으로 활용한 연구가 부족하지만, 저회는 기본적인 구조와 특성이 바이오차와 유사하다[6]. 바이오차는 넓은 표면적과 다양한 관능기(C-O, C-H, C=C, C=C/C=O)를 가지고 있어 중금속을 비롯한 오염물질 흡착에 활용되고 있다[11, 12]. 이와 같은 저회의 특성으로 인해 양액 내 존재하는 Pb가 저회에 흡착되었을 것으로 예상되며, 이로 인해 처리구 내 상추의 Pb 함량은 저회를 사용하지 않은 BA-0 처리

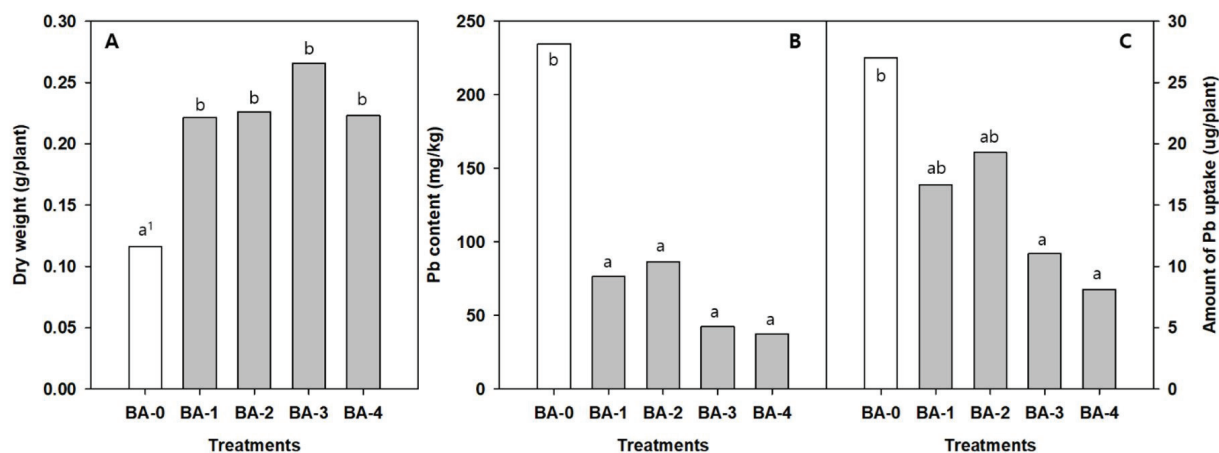


Fig. 2. Dry weight(A), Pb content(B) and uptake(C) in lettuce by bottom ash applications.

¹Different letters indicate significant differences among treatments at 5% probability level.

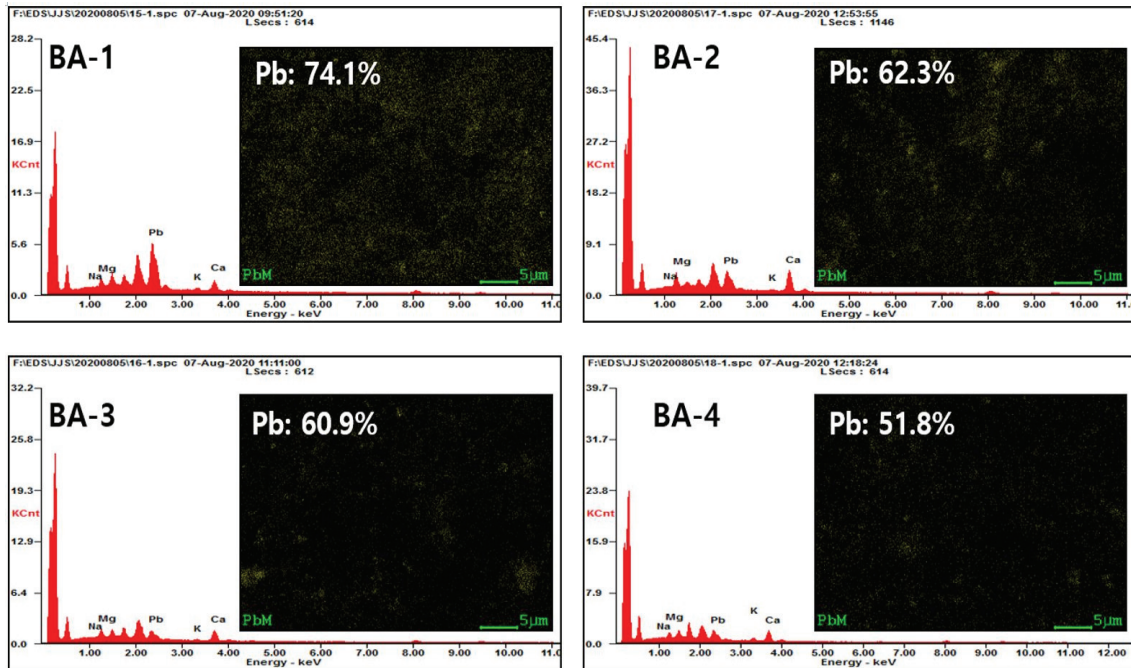


Fig. 3. Surface analysis in bottom ash after harvesting lettuce.

구에서 높게 나타난 것으로 판단된다. 또한, BA-3 및 BA-4 처리구에서 상추의 건물중량이 높았음에도 불구하고 상추의 Pb 함량이 낮아서 최종적으로 상추의 Pb 흡수량이 낮았던 것으로 보인다.

양액 내 저희의 표면 분석

상추 수확 후 양액 내에 남아있는 저희가 실제로 Pb를 흡착했는지를 조사하기 위해 SEM을 이용하여 표면을 분석하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 저희의 표면에 Pb가 관찰되었다. 저희 표면에서 관찰된 Pb 함량은 BA-1 처리구에서 가장 높은 74.1%로 조사되었고, 저희의 사용수준이 많아질수록 Pb 함량이 낮아지는 경향을 보였다. 본 연구와 직접적인 비교는 어렵지만, 박 등[6]의 연구에서 Langmuir 등온흡착식을 이용하여 Cd에 대한 저희의 최대흡착능이 존재한 것으로 미루어 볼 때, 현재 연구에서도 박 등[6]의 연구와 유사한 경향으로 Pb에 대한 최대흡착능이 존재할 것으로 예상된다. 따라서, 이

와 같은 결과는 총량적인 관점에서 볼 때, 저희가 흡착할 수 있는 Pb 이온에 한계가 있었을 것으로 보이고, 이로 인해 저희의 사용수준이 많아질수록 Pb 이온이 저희에 골고루 흡착되어 표면에 관찰된 Pb 함량이 낮아졌을 것으로 판단된다.

저희 사용수준별 상추의 생육 특성

Pb 용액이 포함된 양액 재배에서 상추의 생육 특성을 조사한 결과는 Table 3, Fig. 4에서 보는 바와 같이 저희의 사용수준은 상추의 생육에 큰 영향을 주었다. 상추의 지상부 길이는 저희를 사용한 BA-1, BA-2, BA-3 및 BA-4 처리구가 BA-0 처리구에 비해 각각 84.3, 103.0, 120.0 및 109.6% 증가한 결과를 보였다. 상추의 엽수도 지상부 결과와 유사한 경향으로 처리조건에 상관없이 BA 처리구가 BA-0 처리구에 비해 36.2~39.0% 증가된 것을 확인할 수 있었다. Table 3에서 확인할 수 있듯이 모든 생육지표에서 저희를 사용한 처리구가 저희를 사용하지 않은 처리구에 비해 상당히 증가하였

Table 3. Growth characteristics of lettuce by bottom ash in hydroponic cultivation with Pb solution

Treatments	Length (cm/plant)	Leaf number (no./plant)	Fresh weight (g/plant)
BA-0	11.2±1.5a ¹	6.56±1.8a	1.63±0.4a
BA-1	20.6±2.7b	9.13±1.9b	5.14±0.9b
BA-2	22.7±2.5c	8.94±1.4b	5.81±1.4b
BA-3	24.6±1.7d	9.13±1.4b	6.89±1.7b
BA-4	23.5±2.4cd	9.06±1.6b	6.31±1.5b

¹ Means by the same within a column are not significantly different at 0.05 probability level according to Duncan's Multiple Range Test



Fig. 4. Growth characteristics of lettuce.

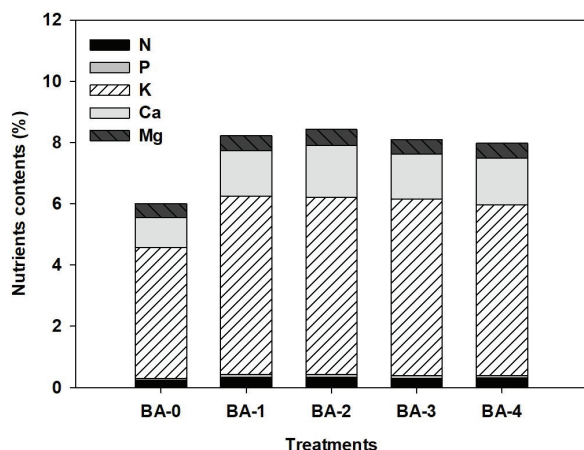


Fig. 5. Nutrients contents in lettuce by bottom ash applications.

으며, 상추의 생체중은 최소 2배에서 최대 3배 이상의 증수효과를 보였다. 일반적으로 식물이 성장할 때 필요이상의 중금속을 흡수할 경우 피해를 본다고 알려져 있다[5, 13]. 본 연구에서 조사된 상추의 생육 특성은 양액 내에 Pb를 첨가하여 상추의 정상적인 생육이 억제되었을 것으로 판단되며, 특히 BA-0 처리구에서 Pb의 의한 영향이 가장 컸을 것으로 판단된다. 그러나, 전반적으로 저희의 시용수준이 증가할수록 상추의 생육은 증가하는 경향을 나타냈으며, BA-3 처리구, 즉 L당 3 g을 적용한 처리구에서 가장 높은 성장량을 보였다. 이와 같은 결과는 저희에 의한 Pb 흡착으로 인해 상추로의 Pb 흡수가 제한되어 저희 시용 처리구에서 상추의 생장이 더 활발했던 것으로 판단된다.

상추의 양분 함량 분포 특성

상추 수확 후 건조된 식물체를 이용하여 주요 양분의 분포 특성을 조사한 결과는 Fig. 5와 같다. 처리조건에 상관없이 주요 양분은 K가 가장 많았고, Ca, Mg, N, P 순으로 높았다. BA 처리구는 주요 양분함량이 7.98~8.43% 범위로 조사된 반면에 BA-0 처리구에서는 6.00%로 BA 처리구에 비해 낮은 함량을 보였다.

결론

중금속으로 오염된 환경에서 저희의 효과를 확인하고자 양액 재배 시스템에 Pb 용액을 추가하여 상추를 재배하였다. Pb가 포함된 양액에서 저희 처리구는 대조구에 비해 높은 수준의 상추 성장량을 보여주었으며, 길이, 엽수, 생체중이 BA-0

처리구에 비해 각각 84.3~120, 36.2~39.0 및 215~322%의 증가 효과를 나타내었다. BA-1, 2, 3, 그리고 4 처리구에서는 저희의 표면적과 작용기로 인해 양액 내 Pb가 저희로 흡착되어 상추의 생육이 BA-0 처리구에 비해 원활하게 유지되었고, Pb의 흡수 또한 제한되어 상추가 생육하는데 유리한 환경을 조성한 것으로 판단된다. 본 연구의 결과로 미루어 볼 때, 저희의 중금속 오염지역 활용은 작물의 생육을 안정화시키는데 가능할 것으로 예상되지만, 아직 저희를 활용한 연구가 거의 없어서 시비관리와 관련된 추가적인 연구가 필요하고 판단된다.

Note

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement

This research was supported by "Regional Innovation Strategy (RIS)" through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (MOE)(2021RIS-002). Also, this work was supported, in part, by Field Technology Research Project through the Korea South-East Power Co., Ltd. (KOEN).

References

- Jeong TU, Cho EJ, Jeong JE, Ji HS, Lee KS, Yoo PJ, Kim GG, Choi JY, Park JH, Kim SH, Heo JS, Seo DC (2015) Soil contamination of heavy metals in national industrial complexes, Korea. Korean Journal of Environmental Agriculture, 34(2), 69-76. <http://doi.org/10.5338/KJEA.2015.34.2.19>.
- Li Y, Yu H, Liu L, Yu H (2021) Application of coprolysis biochar for the adsorption and immobilization of heavy metals in contaminated environmental substrates. Journal of Hazardous Materials, 420, 126655. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126655>.
- Yeo IH, Chang YY (2021) Assessment of soil stabilization for the reduction of environmental risk of lead-contaminated soil near a smelter site. Journal of Environmental Impact Assessment, 30(4), 215-224. <https://doi.org/10.14249/eia.2021.30.4.215>.

4. Liu B, Ai S, Zhang W, Huang D, Zhang Y (2017) Assessment of the bioavailability, bioaccessibility and transfer of heavy metals in the soil-grain-human systems near a mining and smelting area in NW China. *Science of the Total Environment*, 609, 822-829. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.215>.
5. Hur JH, Jeong SW (2011) Effect of water-thoroughly-rinsing in the artificially metal-contaminated soil preparation on final soil metal concentrations. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 33(9), 670-676. <https://doi.org/10.4491/KSEE.2011.33.9.670>.
6. Park JW, Eom JH, Lee SL, Hwang SW, Kim SH, Kang SW, Yun JJ, Cho JS, Lee YH, Seo DC (2020) Exploration of the potential capacity 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>.
7. Bogusz A, Oleszczuk P, Dobrowolski R (2015) Application of laboratory prepared and commercially available biochars to adsorption of cadmium, copper and zinc ions from water. *Bioresource Technology*, 196, 540-549. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.006>.
8. Park JH, Wang JJ, Zhou B, Mikhael JER, DeLaune RD (2019) Removing mercury from aqueous solution using sulfurized biochar and associated mechanisms. *Environmental Pollution*, 244, 627-635. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.069>.
9. Farrell M, Perkins WT, Hobbs PJ, Griffith GW, Jones DL (2010) Migration of heavy metals in soil as influenced by compost amendments. *Environmental Pollution*, 158(1), 55-64. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.08.027>.
10. Igalavithana AD, Kwon EE, Vithanage M, Rinklebe J, Moon DH, Meers E, Tsang DCW, Ok YS (2019) Soil lead immobilization by biochars in short-term laboratory incubation studies. *Environmental International*, 127, 190-198. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.031>.
11. Ahmad Z, Gao B, Mosa A, Yu H, Yin X, Bashir A, Ghousei H, Wang S (2018) Removal of Cu (II), Cd (II) and Pb (I) ions from aqueous solutions by biochars derived from potassium-rich biomass. *Journal of Cleaner Production*, 180, 437-449. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.133>.
12. Park JW, Wang JJ, Xiao R, Wang M, Lee YH, Kang SW, Seo DC (2022) Characteristics of adsorption behavior of potentially toxic metals by biochar derived from fallen leaves (*Platanus*) and its mechanism. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 29, 100776. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100776>.
13. Jung GB, Kim WI, Lee JS, Shin JD, Kim JH, Lee JT (2006) Availability of heavy metals in soil and their translocation to water dropwort (*Oenanthe javanica* DC.) cultivated near industrial complex. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 25(4), 323-330. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2006.25.4.323>.