

랜더링 부산물 바이오차 사용에 따른 카드뮴 식물 이용성 저감효과

윤진주¹, 조주식^{2*}

Effect of Reducing Cadmium Phytoavailability Using Biochar Derived from Rendered Animal Carcass Residues

Jin-Ju Yun ¹ and Ju-Sik Cho ^{2*}¹국립농업과학원 토양비료과, ²국립순천대학교 농생명과학과¹Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea, ²Department of Agricultural Life Science, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

* Correspondence: chojs@scnu.ac.kr

Abstract: This study evaluated the chemical properties of cadmium (Cd)-contaminated soil and reduction in Cd bioavailability following the application of biochar derived from rendered animal carcass residues (RACR-C). The results demonstrated that RACR-C improved soil quality by increasing soil pH, organic matter content, available phosphate, and exchangeable cations. The Cd fractionation analysis revealed the decrease in the highly mobile exchangeable form (F1) and an increase in the carbonate-bound form (F2) derived from biochar. Furthermore, as the RACR-C application rate increase, plant growth improved, while Cd content and uptake decreased. Especially, Cd immobilization led to 60% reduction in Cd uptake in the 10% RACR-C treatment compared to untreated control, effectively suppressing Cd translocation to crops. Therefore, RACR-C is expected to function as a soil amendment and heavy metal stabilizer by improving soil conditions and reducing Cd transfer to plants. Further long-term studies are needed to assess its environmental impact and effectiveness across various crop and soil conditions.

Keywords: Bioavailability, Biochar, Cadmium, Contaminated soil, Rendering animal carcass residue

<https://doi.org/10.5338/KJEA.2025.44.15>

Agric. Environ. Sci. 2025, 44, 143-151

Received: February 11, 2025

Revised: February 19, 2025

Accepted: February 25, 2025

Published: April 18, 2025

Online ISSN: 2233-4173

Print ISSN: 1225-3537



© The Korean Society of Environmental Agriculture 2025



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://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.

서론

한국광해광업공단(2021)에 따르면 국내에 존재하는 폐광산은 5,115개소이며, 그 중 43.5%는 폐금속광산이다. 폐금속광산 주변 지역에서는 과거 채광, 선광 및 제련 과정에서 배출된 폐석, 광미, 광산폐수 등과 같은 광산폐기물들이 그대로 방치되고 있다. 방치된 광산폐기물은 집중 강우나 강풍 시 중금속(카드뮴(Cd), 구리(Cu), 납(Pb) 및 비소(As) 등)과 같은 오염물질이 하부로 분산되어 주변 토양과 수계의 환경오염을 일으키고 있다[1,2]. 특히, 카드뮴은 토양 내에서 이동성이 높아 식물에 흡수가 용이하고, 토양 내 카드뮴은 용탈수에 의해 지하수로 유입되어 많은 문제가 발생한다[3]. 이 외에도 유기 오염물질과 달리 난분해성 물질로 자연적으로 분해되

지 않고 장기간 존재하면서 다양한 경로를 통해 인간에게 전이·축적됨으로써 건강에 심각한 위협을 초래하므로 카드뮴 오염 토양에 대한 복원 대책이 요구된다[4,5].

토양의 카드뮴 및 중금속 오염을 정화하기 위해 토양 세척(soil washing), 토양 세정(soil flushing), 동전기법(electrokinetic separation), 안정화/고형화(stabilization/solidification) 등 다양한 방법이 사용되고 있다. 그러나 중금속이 복합 오염되거나 넓은 오염 부지의 경우 물리적 방법으로 중금속을 제거하기에는 큰 비용이 소모된다[6-8]. 이에 최근에는 중금속의 생물유효성(bio-availability)와 위해성을 저감하는 안정화 방법이 현실적인 방법으로 평가되고 있다. 안정화 방법은 무·유기 물질을 사용하여 오염물질의 잠재적 위해성을 저감하는 기술로 오염물질이 완전히 제거되지는 않지만, 단기간에 용출 저감 효율이 높게 나타난다. 또한, 토양세정법이나 토양세척법과 같이 2차 처리 비용이 발생하지 않아 경제성이 우수하다는 장점이 있다[9].

현재 토양 중금속을 안정화하기 위해 바이오차를 활용한 연구가 많이 진행되고 있다. 바이오차는 넓은 표면적과 풍부한 산소 함유 관능기를 가지고 있어 중금속을 효과적으로 흡착할 수 있으며, 알칼리성 무기물이 축적, 탈수소화 반응으로 높은 pH를 나타낸다. 이러한 높은 pH는 토양의 음전하를 증가시켜 양이온성 수산화물 침전이나 중금속의 흡착을 통해 중금속의 이동성을 감소시킨다[10]. 뿐만 아니라 재활용률이 낮은 폐기물인 농업 부산물, 축산 부산물 및 유기성 부산물을 사용하기 때문에 생산비용 저감과 폐기물 자원화 등 많은 장점이 있다[11].

랜더링(Rendering)은 가축 사체를 고온고압으로 열처리하여 가축의 수분과 지방을 용출, 정제시키는 방법으로 다른 처리 방법에 비해 신속하고 안정적인 처리 방법이다. 랜더링 처리 후 가축 사체 중량의 약 15%에 해당하는 랜더링 가축 사체 부산물(Rendering animal carcass residue; RACR)이 배출되고 있으며, 연간 배출량은 97,220톤에 달한다. 랜더링 가축 사체 부산물은 일부 가축 사료와 퇴비로 사용하고 있지만 2차 추가 과정을 거쳐야 하는 어려움으로 인해 대부분 매립하고 있다[12-14]. 랜더링 가축 사체 부산물은 많은 뼈와 단백질이 포함되어 있고, 풍부한 양을 확보할 수 있어 활용 가치가 매우 높을 것으로 판단된다. 하지만 국내에서 랜더링 가축 사체 부산물 활용에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 랜더링 가축 사체 부산물을 바이오차로 제조하고, 토양 안정화제로서의 가능성을 확인하기 위해 실제 카드뮴 오염토양에 처리하여 토양의 화학적 특성과 식물 이용성 저감효과를 알아보고자 하였다.

재료 및 방법

랜더링 가축 사체 부산물 바이오차

랜더링 가축 사체 부산물 바이오차(Rendering animal carcass residue biochar; RACR-C)는 건조된 랜더링 가축 사체 부산물(RACR)을 밀폐형 챔버에 넣고 열분해 장치(B400, Nabertherm GmbH, Germany)에 질소가스를 주입하여 산소 유입을 차단한 후 500°C에서 2시간 동안 열분해하여 제조하였다. RACR은 국내 랜더링 업체에서 제공받아 사용하였으며, 제조된 바이오차의 물리 화학적 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. Physicochemical properties of rendering animal carcass residue biochar (RACR-C)

Bulk density	Surface area	pH	EC	C	H	N	T-P	Exch. cations (cmol _c kg ⁻¹)		
(g cm ⁻¹)	(m ² kg ⁻¹)	(1:5)	(dS m ⁻¹)		(%)			K	Ca	Mg ²⁺
0.736	99.1	9.5	22.9	28.6	0.4	2.7	9.1	16.0	3.2	1.9

오염토양

본 연구에서 사용한 카드뮴 오염 토양은 전남 순천에 위치한 폐광산 주변 토양을 채취하였다(Fig. 1). 오염토양 시료는 표토층(0~30 cm)에서 채취하였으며, 화학적 특성은 Table 2와 같다. 토양의 pH는 5.21로 약산성을 나타냈으며, 유기물(Organic matter)과 유효인산(Avail. P₂O₅) 함량은 각각 22.9 g kg⁻¹, 67 mg kg⁻¹이었다. 공시토양 내 카드뮴 함량은 22.2 mg kg⁻¹으로 토양환경보전법상 토양오염우려기준(4 mg kg⁻¹)과 대책기준(12 mg kg⁻¹)을 초과하였다.

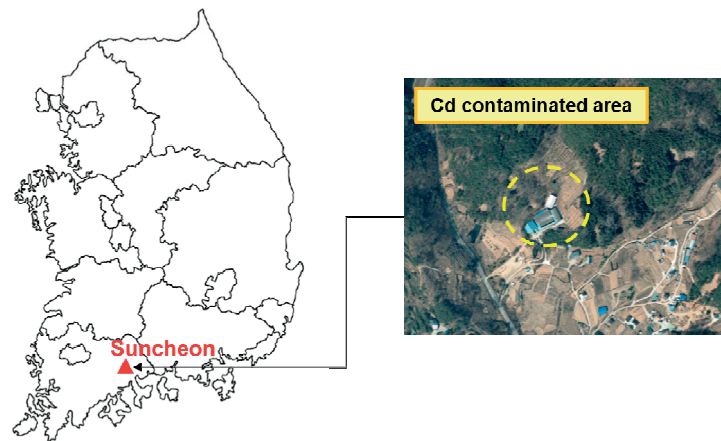


Fig. 1. Sampling location in the study.

Table 2. Chemical properties of experimental raw soil used in the study

pH	EC	OM	T-N	Av. P ₂ O ₅	Exch. cations (cmol _c kg ⁻¹)			Cd
(1:5)	(dS m ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	K	Ca	Mg	(mg kg ⁻¹)
5.2	0.2	22.9	2.7	67	0.4	2.0	0.5	22.2

포트실험

RACR-C 처리에 따른 카드뮴 오염토양의 화학적 특성과 식물 이용성 저감효과를 평가하기 위하여 순천대학교 내 유리온실에서 열무(*Raphanus sativus* L.)를 40일간 재배하였다. 작물 재배는 2 mm 체에 통과시켜 균질화된 오염토양을 사용하여 포트(15000 a⁻¹)에서 수행되었으며, 모든 처리구는 3반복으로 진행하였다. 포트에 토양은 자갈 및 모래를 각 1 kg씩 채워 여과층을 형성시켰다. 그 이후 오염토양 2 kg에 RACR-C를 처리하지 않은 무처리구(0%)를 대조구로 하여 RACR-C를 토양 무게 대비 1%, 2%, 5%, 10%를 첨가하여 혼합 후 충진하였다. 작물 재배는 농촌진흥청의 영농 기술 재배 방법에 따라 실시하였으며, 모든 처리구에 열무 표준시비량(N-P₂O₅-K₂O : 7.5-3.0-3.0 kg 10a⁻¹)을 시비하였다.

토양 화학성 분석

토양 화학성 분석은 농촌진흥청의 토양 및 식물체 분석법에 따라 분석하였다. 토양 시료는 열무 수확 후 채취한 토양을 풍건 후 2 mm 체를 통과시켜 분석 시료로 사용하였으며, pH는 토양과 증류수를 1:5 (w/v%) 비율로 혼합한 후 30분 동안 진탕하여 pH meter (S220, Mettler Toledo, Switzerland)를 사용하여 측정하였다. 유기물은 Tyurin법, 유효인산은 Lancaster법(UV2550PC, Pekinlmer, USA)을 사용하여 분석하였다. 교환성 양이온(Exchangeable Cation)은 1N-NH₄OAc (pH 7.0) 용액으로 침출 후 여과하여 ICP-OES (ICPE-9000, Shimadzu, Japan)를 이용하여 K, Ca, Mg의 농도를 분석하였다.

연속 추출법

토양 내 존재하는 카드뮴의 형태와 함량을 파악하기 위해 Fig. 2와 같이 연속 추출법을 실시하였다[15]. 추출 용액은 0.45 µm filter paper (PTFE syringe filter, Whatman)로 여과 후 ICP-OES (ICPE-9000, Shimadzu, Japan)를 이용하여 분석하였다. 연속 추출법에서 1단계는 이온 교환 형태, 2단계는 탄산염 형태, 3단계는 철/망간 수산화물 형태, 4단계는 유기물 결합 형태, 5단계는 잔류물 형태이다.

통계분석

본 연구에서는 RACR-C 처리에 따른 카드뮴 오염토양의 화학적 특성과 식물 이용성 저감효과를 평가하기 위하여 SPSS (SPSS

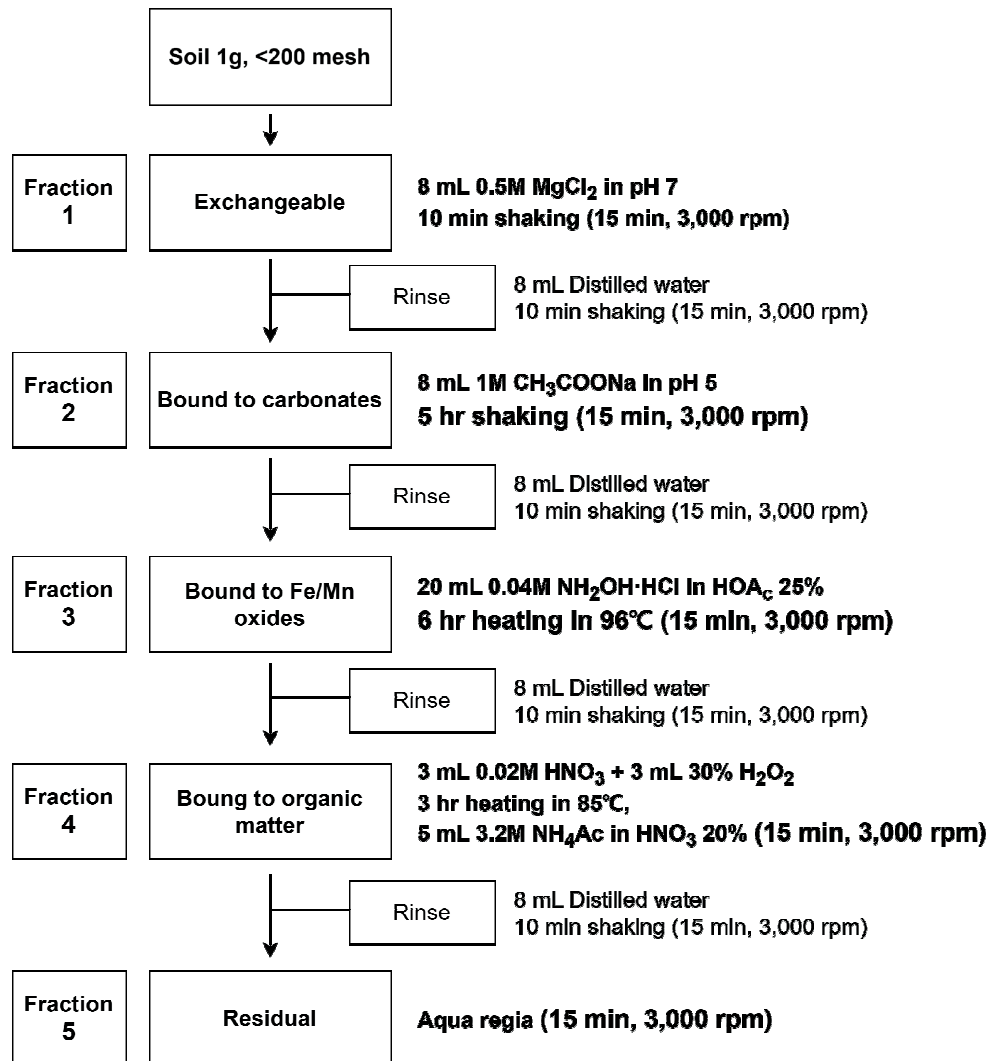


Fig. 2. Procedure of sequential extraction used in this study.

version 26.0, SPSS Inc., Chicago, IL, USA)를 사용하여 DMRT (Duncan's multiple range test)를 실시하여 $p < 0.05$ 수준의 유의성 검정을 수행하였다.

결과 및 고찰

토양 화학적 특성

수확 후 토양의 화학적 특성 변화를 분석한 결과는 Fig. 3과 같다. 토양의 pH는 RACR-C의 처리량에 증가함에 따라 증가하는 경향이었으며 10% 처리구에서 6.8로 가장 높게 나타났다. 이는 처리된 RACR-C의 높은 pH에 의하여 처리량이 증가함에 따라 증가한 것으로 판단되며, Almaroai et al.[16]은 토양에 바이오차를 5% 수준으로 처리 시 바이오차의 알칼리성에 기인하여 토양의 pH가 상승된다고 하였다. 유기물, 유효인산 함량은 토양 pH와 같이 RACR-C 처리량이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 선행연구 결과 바이오차의 처리량이 증가할수록 유기물 함량이 증가하는 경향을 보이며, 토양 내 유효인산은 바이오차가 함유한 인(P)으로 인해 증가한다고 하였는데, 본 연구에서도 유사한 결과를 보였다[17,18]. 토양의 교환성 칼륨, 칼슘 및 마그네슘의 함량 또한 10% 처리구에서 4.18, 7.59, 6.61 cmol_c kg⁻¹으로 가장 높게 나타났는데, 이러한 결과는 열분해 과정을 거쳐 농축된 무기양분이 토양에 처리되었기 때문으로 판단된다[19].

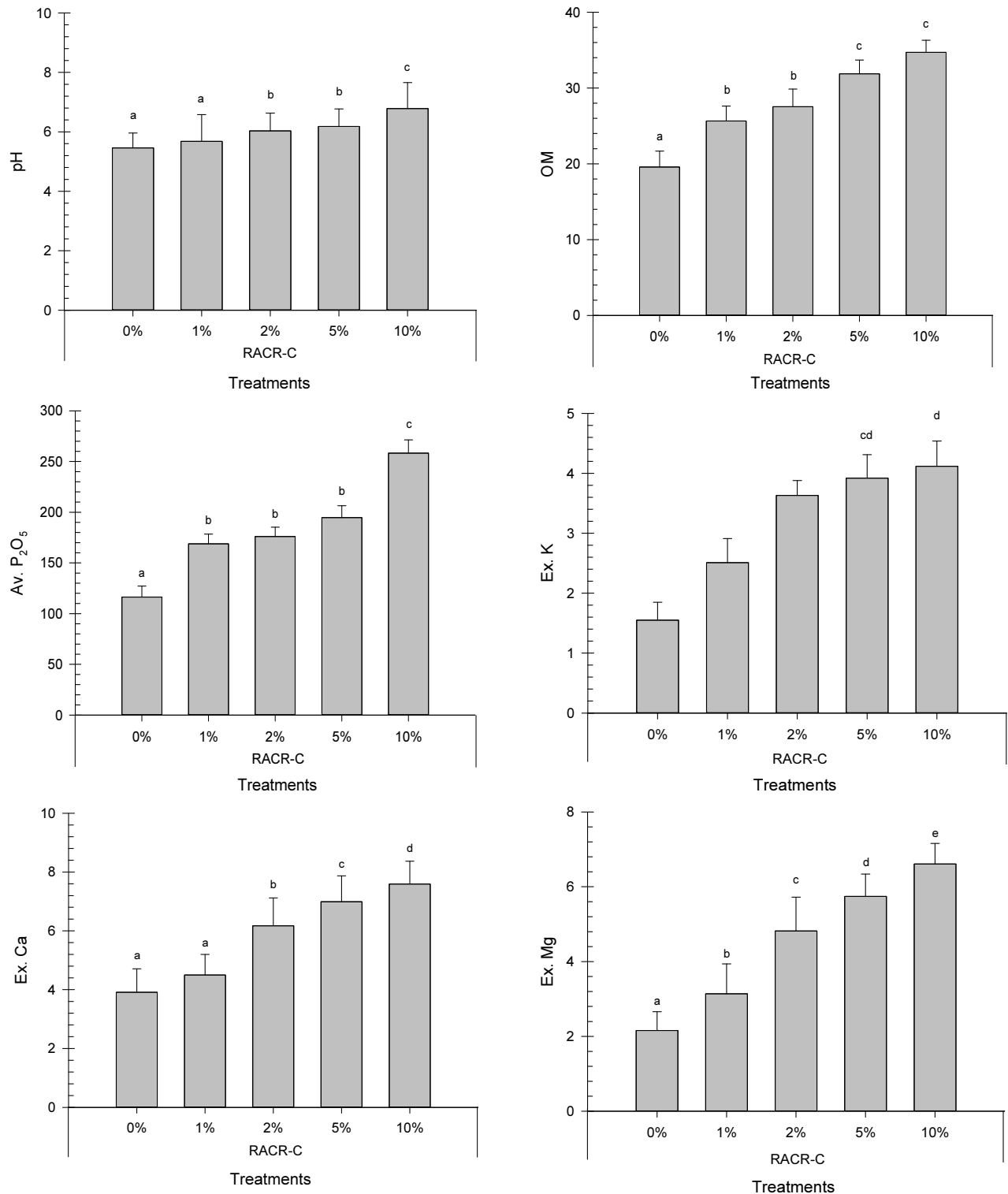


Fig. 3. Change in soil chemical properties according to the different rates of RACR-C after radish harvesting *Different letter indicates significant different at the 5% level by DMRT.

토양 카드뮴 분획 특성

RACR-C 처리에 따른 토양 내 카드뮴 분획 특성 결과는 Fig. 4와 같다. 토양 내 카드뮴 함량은 RACR-C 처리량이 증가함에 따라 이동성이 높은 교환성 형태(F1)의 카드뮴은 감소하고, 탄산염 형태(F2) 증가하였다. 이는 RACR-C의 대부분이 $CaCO_3$ 로

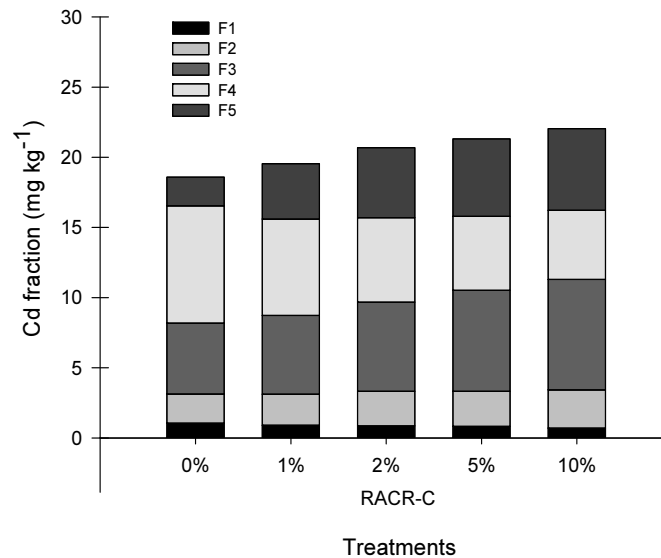


Fig. 4. Cd fractionation of in contaminated soil according to the different rates of RACR-C after radish harvesting.

구성되어 있어 수중에 용해되기 쉬운 형태(exchangeable)의 중금속이 탄산염으로 침전하여 이동성이 감소한 것으로 판단된다 [20]. Pb, Zn과 같은 양이온 중금속 분획 연구 결과, 알칼리 안정화제는 대체적으로 교환성 형태가 감소하고, 탄산염 형태는 증가한다고 보고되고 있다[21]. 또한 Yuan et al.[22]의 선행연구 결과 농업 부산물로 제조한 바이오차에서 CaCO_3 , MgCO_3 로 존재하는 탄산염이 유기성 음이온과 함께 알칼리도를 증가시킨다고 보고한 바 있다. 반면에 잔류물 형태(F5)의 경우 RACR-C 처리량이 증가함에 따라 증가하였다. 토양 내 잔류물 형태로 존재하는 양분들의 경우 수용성 또는 교환성 형태로 존재하는 양분들과는 달리 식물에 의해 거의 흡수되지 못한다고 알려져 있다[23]. 10% 처리구에서는 RACR-C 처리에 의해 식물이 이용하기 쉬운 탄산염 형태(F2)에서 이용하기 어려운 잔류물 형태(F5)로 전환되어 무처리구에 비해 높게 증가한 것으로 판단된다. 따라서 RACR-C를 토양개량제로 사용 시 카드뮴을 불용성의 형태로 전환시켜 식물의 카드뮴 흡수를 저감시킬 것으로 판단된다.

열무 카드뮴 흡수 특성

RACR-C 처리에 따른 열무의 카드뮴 흡수 특성을 조사한 결과는 Fig. 5와 같다. RACR-C 처리에 따른 열무의 지상부 건중량은 10% 처리구에서 $0.20 \text{ g plant}^{-1}$ 로 무처리구(0%)에 비해 약 54% 이상 증가되었다. RACR-C 처리량이 증가함에 따라 증가하였으며, 지하부의 건물중량 또한 유사한 결과를 보였다(Fig. 3A, 3D). 카드뮴 함량은 처리량이 증가함에 따라 감소하였으며, 10% 처리구에서 지상부와 지하부 각각 0.25 mg kg^{-1} , 0.1 mg kg^{-1} 으로 무처리구에 비해 75%, 79% 감소하였다(Fig. 3B, 3E). 열무의 카드뮴 흡수량은 무처리구(0%)에서 $130.0 \text{ } \mu\text{g plant}^{-1}$ 로 가장 높게 나타났으며 처리량이 증가함에 따라 감소하여 10% 처리구에서 $50.1 \text{ } \mu\text{g plant}^{-1}$ 로 가장 낮은 흡수량을 보였다. 지하부의 카드뮴 흡수량 또한 10% 처리구에서 가장 낮게 나타났다. 이는 RACR-C 처리에 따라 카드뮴 오염토양에서 카드뮴이 식물과 토양생물이 토양에서 흡수할 수 없는 용해도가 낮은 형태로 변화되어 카드뮴 부동화에 영향을 미친 것으로 판단된다. Koh et al.[24]의 연구 결과에서는 중금속 오염토양에 단풍잎돼지풀 기반 바이오차 사용 시 NH_4NO_3 로 침출되는 식물 유효태 중금속 감소뿐만 아니라 상층 체내로의 중금속 전이 또한 감소한다고 보고한 바 있으며, 본 연구에서도 이와 유사한 결과를 보였다.

결론

본 연구에서는 랜더링 가축 사체 부산물 바이오차 처리에 따른 카드뮴 오염토양의 화학적 특성과 식물 이용성 저감효과를 평가하였다. 연구 결과, RACR-C에 따라 카드뮴 오염토양의 pH, 유기물, 유효인산 함량 및 교환성 양이온을 증가시키는 토양개량 효과가 확인되었다. 토양 내 카드뮴 분획 특성 결과 이동성이 높은 교환성 형태(F1)의 감소와 바이오차로부터 유래된 탄산염

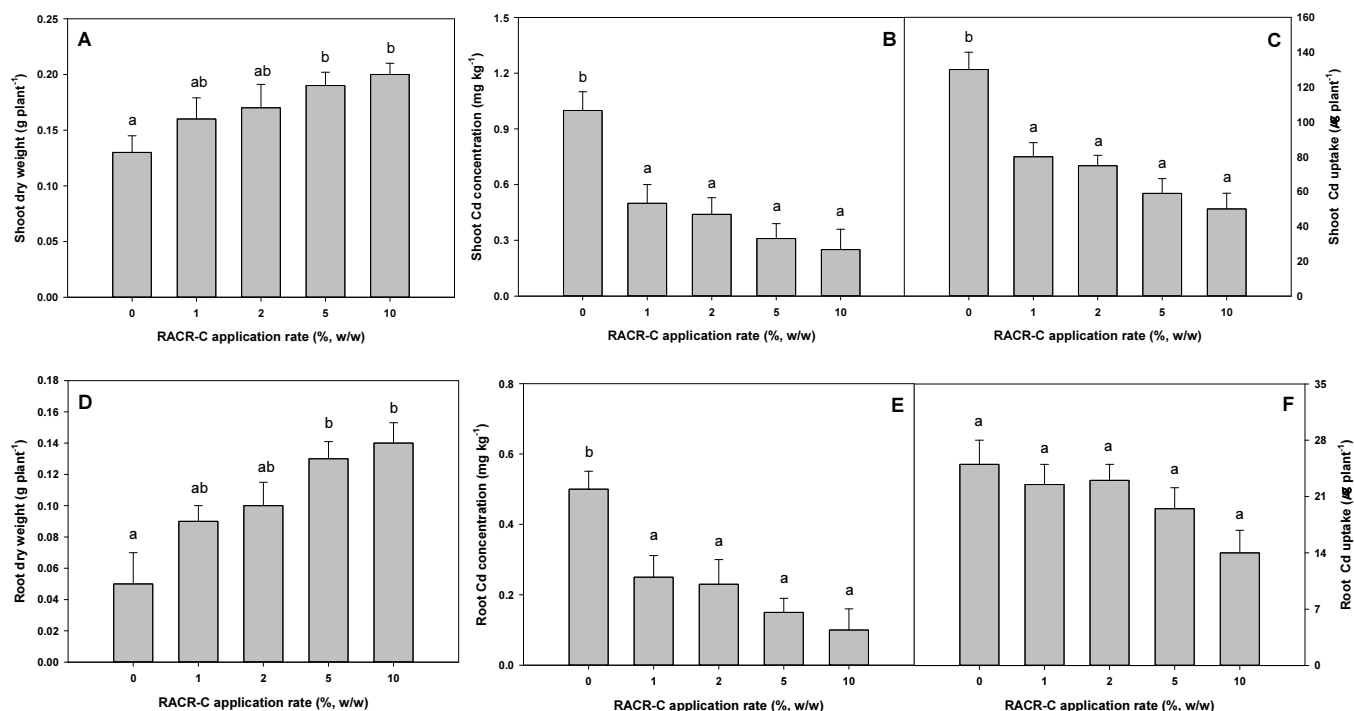


Fig. 5. Dry weight (A, D) Cd concentration (B, E) and uptake (C, F) of young radish under different RACR-C rates applications.

*Different letter indicates significant different at the 5% level by DMRT.

형태(F2)의 증가가 확인되었다. 또한 RACR-C 처리량이 증가할수록 생육이 개선되고 카드뮴 함량과 흡수량 모두 감소하였다. 특히, 카드뮴이 부동화되어 10% 처리구에서 카드뮴 흡수량이 무처리구 대비 60% 감소하였으며, 작물로의 전이가 억제되었다. 따라서 RACR-C는 카드뮴 오염토양에 처리 시 토양개량과 식물체로의 카드뮴 전이를 감소시키는 것으로 보아 토양개량제 및 중금속 안정화제로서의 활용이 가능할 것으로 판단되며, 향후 다양한 작물과 토양조건에서 장기적인 효과 및 환경적 영향의 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

Data Availability: All data are available in the main text or in the Supplementary Information.

Author Contributions: Y.J.J. wrote the manuscript; C.J.S. reviewed the manuscript. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Notes: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments: This paper was supported by(in part) Sunchon National University Research Fund in 2022 (Grant number: 2022-0286).

Additional Information:

Supplementary information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.5338/KJEA.2025.44.15>
Correspondence and requests for materials should be addressed to Ju-Sik Cho.

Peer review information Korean Journal of Environmental Agriculture thanks the anonymous reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Reprints and permissions information is available at <http://www.korseaj.org>

References

1. Park CK, Kim JW, Jung MC, Park HS, Kim DK, Oh YS (2018) Current occurrence and heavy metal contamination assessment of seepage from mine waste dumping sites in Korea. *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 55(6), 588-595. <https://doi.org/10.32390/ksmer.2018.55.6.588>.
2. Oh SJ, Yeo IH, Jung AL, Kim JW, Kwon JC, Jeon SW, Park HM, Park SH, Jung MC (2023) Evaluation on stabilizers for fluorine-contaminated cultivated land around the Sambo Pb-Zn mine. *Journal of Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 60(6), 469-479. <https://doi.org/10.32390/ksmer.2023.60.6.469>.
3. Cai Y, Ma LQ (2003) Metal tolerance, accumulation, and detoxification in plants with emphasis on arsenic in terrestrial plants. In *ACS Symposium Series* (Vol. 835, pp. 95-114). Washington, DC: American Chemical Society.
4. Kumpiene J, Lagerkvist A, Maurice C (2008) Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments—A review. *Waste Management*, 28, 215-225. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.12.012>.
5. Ahmad M, Lee SS, Yang JE, Ro HM, Lee YH, Ok YS (2012) Effects of soil dilution and amendments (mussel shell, cow bone, and biochar) on Pb availability and phytotoxicity in military shooting range soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 79, 225-231. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.01.003>.
6. Oh SJ, Kang MW, Lee JC, Lee HH, Roh HS, Jeon J, Kim DJ, Lee SS (2022) Remediation of As-contaminated soil using magnetite and bottom ash. *Korean Journal Society of Environmental Agriculture*, 41(4), 223-229. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2022.41.4.27>.
7. Park JH (2016) Assessment of metal immobilization and bioavailability affected by bacteria in soil. *Journal of Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 53(5), 431-439. <https://doi.org/10.12972/ksmer.2016.53.5.431>.
8. Jeong DH, Cha JM (2022) Physical separation of heavy metals in contaminated soil simulant near abandoned metal mines. *Journal of Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 59(1), 1-9. <https://doi.org/10.32390/ksmer.2022.59.1.001>.
9. Moon DH, Jung SP, Koutsospyros A (2022) Assessment of the stabilization of mercury contaminated soil using starfish. *Agriculture*, 12(4), 542. <https://doi.org/10.3390/agriculture12040542>.
10. Ok YS, Oh SE, Ahmad M, Hyun S, Kim KR, Moon DH, Yang JE (2010) Effects of natural and calcined oyster shells on Cd and Pb immobilization in contaminated soils. *Environmental Earth Sciences*, 61, 1301-1308. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0674-4>.
11. Sun L, Wan S, Luo W (2013) Biochars prepared from anaerobic digestion residue, palm bark, and eucalyptus for adsorption of cationic methylene blue dye: characterization, equilibrium, and kinetic studies. *Bioresource technology*, 140, 406-413. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.04.116>.
12. Park JH, Kim DW, Kang SW, Cho JS (2023) Effects of application of rendered carcass residue on greenhouse gases and pepper growth. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 42(4), 457-464. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2023.42.4.52>.
13. Park JH, Yun JJ, Kang SW, Kim SH, Cho JS, Wang JJ, Seo DC (2021) Removal of potentially toxic metal by biochar derived from rendered solid residue with high content of protein and bone tissue. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208, 111690. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111690>.
14. Jeong TU, Lee JH, Rho JS, Lee DY, Lee JM, Park JH, Seo DC (2023) Application effect of rendering livestock carcass-based carbonized material in Chinese cabbage cultivation. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 42(3), 177-183. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2023.42.3.21>.
15. Tessier APGC, Campbell PC, Bisson MJAC (1979) Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, 51(7), 844-851. <https://doi.org/10.1021/ac50043a017>.
16. Almaroai YA, Usman AR, Ahmad M, Moon DH, Cho JS, Joo YK, Ok YS (2014) Effects of biochar, cow bone, and eggshell on Pb availability to maize in contaminated soil irrigated with saline water. *Environmental Earth Sciences*, 71, 1289-1296. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2533-6>.
17. Chan KY, Xu Z (2009) *Biochar for Environmental Management Science and Technology*. pp. 67-84, 1st edition, Routledge, UA.
18. Park DG, Hong SG, Jang E, Shin JD (2019) Assessment of an optimum biochar application rate for tomato (*Solanum lycopersicum* L.) cultivation. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 27(1), 39-48. <https://doi.org/10.17137/korrae.2019.27.1.39>.
19. Zhang P, Zhang X, Yuan X, Xie R, Han L (2021) Characteristics, adsorption behaviors, Cu (II) adsorption mechanisms by cow manure biochar derived at various pyrolysis temperatures. *Bioresource Technology*, 331, 125013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125013>.
20. Park JH, Yun JJ, Kang SW, Kim SH, Cho JS, Wang JJ, Seo DC (2021) Removal of potentially toxic metal by biochar derived from rendered solid residue with high content of protein and bone tissue. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208, 111690. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111690>.
21. Li X, Coles BJ, Ramsey MH, Thornton I (1995) Sequential extraction of soils for multielement analysis by ICP-AES. *Chemical Geology*, 124(1), 109-123. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(95\)00029-L](https://doi.org/10.1016/0009-2541(95)00029-L).
22. Yuan JH, Xu RK, Zhang H (2011) The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource Technology*, 102(3), 3488-3497. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.018>.

23. Adriano DC (2001) Trace elements in terrestrial environments, Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals. Vol. 860, Springer New York, USA. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-21510-5>.
24. Koh IH, Kim J, Kim GS, Park MS, Kang DM, Ji WH (2016) Stabilization of agricultural soil contaminated by arsenic and heavy metals using biochar derived from buffalo weed. Journal of Soil and Groundwater Environment. 21(6), 87-100. <https://doi.org/10.7857/JSGE.2016.21.6.087>.