

Short Communication



CrossMark

Open Access

중금속 오염 농경지 토양에서 바닥재 시용에 의한 카드뮴 식물이용성 저감효과

김성은¹, 김용균¹, 이상몽¹, 박현철¹, 김근기¹, 손흥주¹, 윤성욱², 김상윤³, 홍창오^{1*}

¹부산대학교 생명자원과학대학 생명환경화학과, ²농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부

³농촌진흥청 국립농업과학원 농업생명자원부

The Effect of Bottom ash in Reducing Cadmium Phytoavailability in Cadmium-contaminated Soil

Sung Un Kim¹, Yong Gyun Kim¹, Sang Mong Lee¹, Hyeon Cheal Park¹, Keun Ki Kim¹, Hong Joo Son¹, Sung Wook Yun², Sang Yoon Kim³ and Chang Oh Hong^{1*} (¹Department of Life Science and Environmental Biochemistry, College of Natural Resource and Life Sciences, Pusan National University, Miryang 50463, Korea, ²Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea, ³Department of Agricultural Biotechnology, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea)

Received: 4 May 2016 / Revised: 23 June 2016 / Accepted: 26 June 2016

Copyright © 2016 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

Chang Oh Hong

<http://orcid.org/0000-0001-6456-804X>

Sung Un Kim

<http://orcid.org/0000-0002-8314-2906>

Abstract

BACKGROUND: Since bottom ash (BA) contains considerable amounts of CaO and MgO, it could be a useful amendment to increase soil pH and to immobilize cadmium (Cd). This study was conducted to evaluate effect of BA application in reducing Cd phytoavailability.

METHODS AND RESULTS: Bottom ash was applied at the rate of 0, 20, 40, and 80 Mg/ha to Cd contaminated soil, and then lettuce was cultivated under field condition. soil pH and net negative charge increased slightly with increasing BA application; however, there was no statistical difference among the rates. Water soluble, exchangeable+acidic, reducible, and oxidizable fraction of Cd decreased with increasing bottom ash application rate, whereas residual fraction of Cd increased with increasing

bottom ash application rate. Lettuce yield increased with rate of bottom ash up to 40 kg/ha. Visual evidences of cadmium toxicity and growth inhibition were not found during lettuce cultivation.

CONCLUSION: Bottom ash was effective to reduce phytoextractability of Cd and to increase lettuce yield. Conclusively, BA could be a good soil amendment to reduce Cd phytoavailability in contaminated arable soil.

Key words: Bottom ash, Cadmium, Phytoavailability

서론

토양 내 카드뮴은 이동성이 높아 작물에 의해 쉽게 이용되어지며 작물에 흡수된 카드뮴은 직접적으로 인간과 동물에 영향을 미치기 보다는 먹이연쇄를 통해 인간과 동물에게 간접적으로 영향을 미친다(Bolan *et al.*, 2003). 그리고 토양 내 카드뮴은 용탈수에 의해 지하수로 유입되어 환경적으로도 많은 문제를 유발하고 있다 (Cai and Ma., 2003). 이러한 카드뮴은 저농도에서도 인간과 동물에 강한 독성을 나타내어 심각한 문제를 일으키는데 대표적인 예로 이따이이따이 질병이

*Corresponding author: Chang Oh Hong
Phone: +82-55-350-5548; Fax: +82-55-350-5549;
E-mail: soilchem@pusan.ac.kr

Table 1. Selected chemical properties of the studied soil

| Item | Concentration | Warning criteria* |
|--------------------------------------------------|---------------|-------------------|
| pH (1:5 with H ₂ O) | 4.90 | |
| Organic matter (g/kg) | 18.9 | |
| Total nitrogen (g/kg) | 3.5 | |
| Available phosphorus (mg/kg) | 101 | |
| Cation exchange capacity (cmol _c /kg) | 7.54 | |
| Exchangeable cation (cmol _c /kg) | | |
| K | 0.17 | |
| Ca | 3.97 | |
| Mg | 0.87 | |
| Na | 0.03 | |
| Total Cd (mg/kg) | 9.1 | 4 |

*Means warning criteria of each heavy metals established by Korean Soil Environmental Conservation Act.

있다 (Tsuchiya, 1978).

석탄회는 화력발전소에서 석탄이 화로에서 고온으로 연소될 때 발생하는 잔류물로 석탄회에 대한 재활용 방안이 더 확대 되어야 한다는 주장이 제기되고 있다. 현재 우리나라에서는 비산재(fly ash)의 경우 포집해 레미콘/콘크리트 혼화재나 시멘트 연료로 재활용하고 있으나 바닥재(bottom ash)의 경우 대부분 폐기물관리법 시행규칙에 의해 매립지 성토재로 활용하고 있는데 이는 오히려 운송비 등의 지출에 대한 부분을 재활용으로 볼 수 있는지에 대해 의문시하고 있다. 또한 정부의 전력수급계획에 따라 향후 화력발전소의 추가 계획돼 있고 석탄재 발생량도 지속적으로 증가해 2020년 이후 석탄재 발생 예상량은 매년 1,600만톤으로 2015년 대비 약 2배 이상 많을 것으로 예상되어지나 사회간접시설이 점진적으로 줄어들고 있기 때문에 단순히 건설용으로 재활용 되는 석탄재에 대한 수요는 계속해서 줄어들 전망이다. 하지만 바닥재를 농업적으로 재사용 시 바닥재의 텍스처, 용수량, 용적밀도, pH 등의 우수한 물리적 특성은 좋은 토양 개량제로서의 높은 잠재력을 가지고 있어 작물 생산에 농업적 활용 가치가 높을 뿐 아니라 바닥재의 95%를 차지하는 칼슘, 철, 마그네슘, 칼륨, 실리콘은 식물의 필수 영양소로 작물 생산시 식물영양 공급원으로서의 가치평가를 위한 연구가 진행되어져 왔다 (Wearing *et al.*, 2004; Hong *et al.*, 2006; Singh *et al.*, 2011). 뿐만 아니라 바닥재 고유의 큰 입자 크기, 마이크로 크기의 많은 기공 및 넓은 표면적을 가지는 특성 때문에 최근 중금속으로 오염된 다양한 환경 분야 복원에 있어 바닥재를 흡착제로 사용에 관한 관심이 증가되고 있는 실정이다(Shim and Lee, 2001; Kim *et al.*, 2002; Shim *et al.*, 2003).

일부 연구에서는 비산재를 이용하여 토양 내 중금속을 부동화하기 위한 시도가 이루어졌으며 비산재는 토양의 pH를 증대시켜 중금속의 용출성을 감소시킨다고 보고됐다(Knox *et al.*, 2000). 그러나 현재까지 바닥재의 사용에 따른 토양의 이화학적 특성 개선에 대한 연구는 실시되었으나(Mukhtar *et al.*, 2003; Mukhtar *et al.*, 2008) 바닥재 사용에 의한 카드뮴의 용출성과 식물이용성에 대해 미치는 효과에 대한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구는 중금속으로 오염된

토양에 바닥재를 시용하여 토양 내 카드뮴의 용출성 및 카드뮴의 식물이용 저감에 대한 영향을 조사하기 위하여 실시되었다.

재료 및 방법

현장시험

공시토양으로는 경남 합천군 술곡리의 봉산광산(128°01' N 34°37' E) 인근 밭토양을 공시토양으로 선정하였다. 대상지역의 토양은 칠곡통에 속하는 토양이었으며 점토 6.1%, 미사 35.0%, 모래 58.9%를 포함하는 사질양토(sandy loam)이었다. 자세한 공시토양의 이화학적 특성은 Table 1에 나타났다. 공시토양 내 조사된 중금속 중 카드뮴(Cd)의 총 함량은 9.1 mg/kg으로 토양오염우려기준을 2배 이상 초과하였다. 공시재료인 바닥재는 경남 하동에 위치한 화력발전소에서 채취되었다. 채취된 바닥재는 CaO와 MgO를 각각 7.82%와 3.60% 포함하고 있었으며 pH는 8.75이었다(Table 2).

토양 내 카드뮴의 농도변화와 작물의 카드뮴 흡수특성을 조사하기 위해 포장시험 조건으로 2015년 4월에 청치마 상추 (*Lactuca sativa* L. var. *crispa* cv. *Chungchima*)(홍농종 묘사)를 파종하여 90일간 재배 후 수량 및 식물체 내 카드뮴 농도를 조사하였다. 처리구는 3반복 난괴법으로 배치되었으며 바닥재(bottom ash)를 0, 20, 40, 80 Mg/ha으로 처리하였다.

토양과 식물체 이화학적 특성 및 카드뮴 함량 조사

공시토양의 이화학적 분석방법은 다음과 같은 방법을 따랐다: pH(1:5 토양:물), 유기물 함량(Wakley and Black method; Allison 1965), 총질소 함량(Kjeldahl method; Brenner, 1965), 치환성 양이온 K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺(1 M NH₄-acetate, pH 7.0 ICP-OES, Inductively Coupled Plasma Absorption Emission Spectrophotometer, Perkin Elmer model DV 4300, Shelton, CT, USA). 유효 인산의 함량은 Lancaster method (RDA, 1988)를 이용하여 분석하였다. 유효태 카드뮴의 함량은 토양:용액 비 1:5의

Table 2. Chemical and physical properties of bottom ash used in this study

| Item | Content |
|----------------------------------------------------------|---------|
| pH (with KCl 1:5) | 8.75 |
| Electrical conductivity (dS/m, with H ₂ O1:5) | 50.5 |
| Total content (g/kg) | |
| C | 36.2 |
| N | 3.29 |
| P | |
| K | |
| XRF1)analysis(%wt/wt) | |
| Al ₂ O ₃ | 22.2 |
| CaO | 7.82 |
| Fe ₂ O ₃ | 10.2 |
| K ₂ O | 0.76 |
| MgO | 3.60 |
| Na ₂ O | 0.38 |
| P ₂ O ₅ | 0.69 |
| SiO ₂ | 50.9 |
| SO ₃ | 1.09 |
| TiO ₂ | 1.06 |
| Bulk density (g/cm ³) | 1.05 |
| Particel density (g/cm ³) | 2.65 |
| Porosity (%) | 60.3 |

비로 1M NH₄OAc로 1시간 침출한 후 여과하여 ICP-OES로 Cd의 함량을 분석하였다. 토양의 음하전도를 측정하기 위하여 토양 5 g을 centrifuge tube에 담고 1M NaCl 30 ml을 가하여 1시간 동안 교반한 후 원심분리하여 상등액을 따라내고 남아있는 토양에 ethyl alcohol 20 ml을 가하여 남아있는 침출액을 3회 반복하여 씻어냈다. Ethyl alcohol을 분리시킨 후 상등액은 따라내고 남은 토양에 1M NH₄OAc 30 ml을 가하여 1시간 동안 침출하였다. 침출 수 여과시켜 여과액 내의 나트륨(Na)의 함량을 ICP-OES로 분석하여 음하전도를 구하였다. 카드뮴 형태별 함량은 연속추출법에 의해 조사하였다.(Ure *et al.*, 1993). Total Cd fraction (카드뮴 총 함량)은 왕수(HNO₃:HCL, 1:3) 분해법에 의해 측정되었다. 각형태의 중금속을 침출 후 상등액을 0.2 μm cellulose acetate membrane filter로 여과 후 ICP-OES로 중금속 함량을 측정하였다.

상추 내 중금속 함량은 상추를 70°C에서 48시간 건조 후 분쇄하였다. 분쇄된 시료 1 g을 채취하여 ternary solution으로 분해시킨 후 ICP-OES로 Cd의 함량을 측정하였다.

통계분석

통계분석을 위한 ANOVA는 Statistix 9 (Analytical Software, 2009)을 사용하여 바닥재 처리기간에 따른 토양의 pH, 음하전도 및 식물체 내 중금속 함량 및 수량의 유의성을 검증하였으며, p < 0.05 수준에서 LSD를 이용하여 처리구 내 평균간의 차이를 검증하였다.

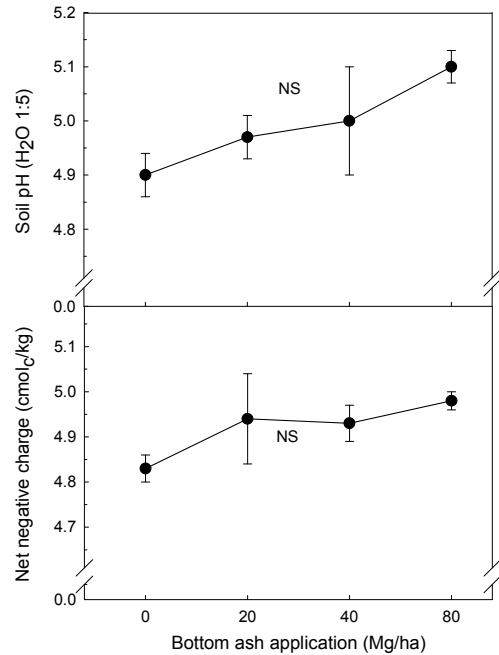


Fig. 1. Changes of pH and negative charge of soil amended with different rate of bottom ash.

결과 및 고찰

토양 내 화학적 특성

본 연구에서는 바닥재 시용량 증가에 따른 pH 및 음하전도 값의 통계적 유의차는 없었으나 바닥재 시용량이 증가 할수록 토양의 pH 및 음하전도가 각각 4.90에서 5.10, 4.83에서 4.98 cmolc/kg까지 증가하였다 (Fig.1). Hong *et al.* (2014)은 바닥재를 처리한 토양에 알타리 무를 재배 하여 수확 후 토양의 pH를 측정하였을 때 바닥재 시용량이 증가할수록 토양의 pH가 5.97에서 6.22까지 증가 하였다고 보고하였으며, Singh *et al.* (2011)은 병아리콩(Cicer arientinum), 녹두(Phaseolus aureus), 흑녹두(Phaseolus mungo) 재배를 위해 비산재를 토양 볼륨의 0에서 50%까지 처리하였을 때 pH가 6.65에서 6.96까지 증가하였다고 보고하였다.

토양 내 카드뮴의 분획특성

본 연구에서 바닥재 처리에 따른 토양 내 카드뮴의 분획특성을 조사한 결과, 바닥재 처리량이 증가 할수록 토양 내 수용성(Water soluble), 치환성 및 carbonate 결합태(Exchangeable + Acidic), 유기물 결합태 형태(Oxidizable)의 카드뮴 함량이 감소되었으며, 특히 바닥재를 80 Mg/ha으로 처리하였을 때 Fe/Mn 결합태(Reducible)의 카드뮴의 함량은 무처리의 37.1%에서 31.0%로 감소하였다. 반면, 광물 내 고정태(Residual) 카드뮴의 경우 바닥재의 처리량이 80 Mg/ha까지 증가하였을 때 무처리의 9.2%에서 20.7%로 증가하였다(Table. 3). 토양 내 존재하는 카드뮴 분획들의 이동성은 Water soluble > Exchange+Acidic > Reducible > Oxidizable > Residual의 순으로 높다. 토양 내 수용성이나

Table 3. Distribution of Cd fractions in soils amended with the different rates of bottom ash

| Bottom ash application (Mg/ha) | Cd fraction (%) | | | | |
|--------------------------------|-----------------|-----------------------|-----------|------------|----------|
| | Water soluble | Exchangeable + Acidic | Reducible | Oxidizable | Residual |
| 0 | 0.31 | 12.61 | 37.07 | 40.81 | 9.21 |
| 20 | 0.25 | 12.02 | 34.62 | 39.61 | 13.50 |
| 40 | 0.24 | 11.84 | 32.37 | 37.07 | 18.48 |
| 80 | 0.23 | 11.46 | 31.03 | 36.60 | 20.68 |
| LSD _{0.05} | ns | ns | 1.24 | ns | 5.39 |

치환성의 형태로 존재하는 양분들은 식물에 의해 흡수되어지는 반면에 광물 내 고정태로 존재하는 양분은 식물에 의해 거의 흡수되어지지 못한다(Adriano, 2001). 따라서 Table 3과 같은 결과는 바닥재의 처리가 카드뮴의 식물이용성을 저감시킬 가능성이 있음을 보여준다.

토양 내 존재하는 Residual 형태 카드뮴은 광물 내 고정된 형태이거나 침전반응을 통해 이동성이 낮은 광물형태로 생성된 것이다. 바닥재의 처리에 의해 생성될 수 있는 카드뮴 광물은 octavite (CdCO_3), $\text{Cd}(\text{OH})_2$, $\text{Cd}_3(\text{PO}_4)_2$ 로 예상된다. CdCO_3 와 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 는 알칼리성 토양에서 생성되어 카드뮴의 이동성을 낮추게 된다. CdCO_3 의 침전은 토양의 pH가 9.0 이상인 조건에서 발생될 수 있으며(Hong *et al.*, 2014) $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 의 침전발생은 토양의 pH가 10이상인 조건에서 발생된다(Naidu *et al.*, 1994). 본 연구에서 바닥재의 처리에 의한 토양의 pH는 5.10이었으므로 바닥재처리에 의한 CdCO_3 와 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 의 형성을 발생하지 않은 것으로 판단된다(Fig. 1). 시험에 사용된 바닥재 내 포함된 인산이 0.69% 포함되어 있어 바닥재의 처리에 의해 카드뮴과 인산이 반응하여 $\text{Cd}_3(\text{PO}_4)_2$ 를 형성할 가능성이 있다. Hong *et al.* (2015)은 총 카드뮴의 함량이 5.57 mg/kg인 토양에서 카드뮴이 $\text{Cd}_3(\text{PO}_4)_2$ 의 형태로 침전하기 위해서는 인산을 16,000 mg/kg 이상 처리하여야 한다고 보고하였다. 본 연구에서 공시토양 내 카드뮴의 총 함량은 9.1 mg/kg이고 바닥재를 최고처리량인 80 Mg/ha로 처리하였을 때 첨가되는 인산의 양은 약 300 mg/kg(용적밀도 1.25 g/cm³, 표토 15 cm 깊이 토양무게 기준)에 해당되어 바닥재의 처리에 의한 $\text{Cd}_3(\text{PO}_4)_2$ 의 침전은 발생되지 않는 것으로 판단된다. 따라서 바닥재의 처리에 따른 Residual 형태 카드뮴 함량의 증대는 침전반응을 통해서 보다는 바닥재의 물리적 표면 특성에 의한 것으로 판단된다. Table 2에 제시된 바와 같이 바닥재는 다공성이어서 토양에 바닥재를 처리함에 따라 카드뮴이 바닥재의 기공에 흡착되거나 끼어들어 이동성이 낮은 형태의 카드뮴으로 전환되어진 것으로 판단되어진다. 하지만 바닥재에 의한 카드뮴의 부동화 기작을 명확하게 하기 위해서는 추가적인 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

상추 수량 및 카드뮴 흡수특성

상추의 재배기간 동안 가시적인 독성현상은 관찰되지 않

았다. 바닥재 처리에 따른 상추의 수량은 Fig. 2와 같다. 바닥재의 사용량을 40 Mg/ha까지 증가시키에 따라 상추의 수량은 증가하는 경향을 나타내다가 40 Mg/ha 이상 처리함에 따라 다소 감소하는 경향을 나타냈다. 하지만 바닥재 처리량에 따른 상추수량 간의 통계적 유의차는 나타나지 않아 바닥재 사용에 따른 상추의 생육저해 현상은 발견되지 않았다. 바닥재를 41.6 Mg/ha로 처리하였을 때 상추의 최대수량인 11.7 Mg/ha에 도달하였으며 무처리에 비해 15% 증수의 효과를 보였다. Wearing *et al.* (2004)의 연구결과에 따르면 땅콩 재배 토양에 바닥재를 198 Mg/ha까지 처리 하였을 때 식물에 필요한 양분을 공급할 수 있었으며 토양의 포장용수량 및 토양 공극 내 기상을 증가시켜 땅콩의 수확량이 무처리에 비해 2배 정도 높았다고 보고하였다. 바닥재의 물리적 및 화학적 구성 특성은 바닥재가 발생하는 화력발전소의 처리과정 및 석탄의 원료에 따라 달라질 수 있다. 따라서 채취된 바닥재의 종류에 따라 작물의 수량증대를 나타내는 데 필요한 바닥재의 처리량에 차이가 나타날 수 있는 것으로 판단된다. 바닥재 처리에 따른 상추의 카드뮴 흡수특성은 Fig. 3에 나타난 바와 같다. 바닥재의 처리량이 증가할수록 상추 내 카드뮴의 농도는 감소하였다. 바닥재 사용량이 0, 20, 40, 80 kg/ha로 증가할수록 상추내 카드뮴의 농도는 72.0, 68.4, 62.3, 53.7 mg/kg로, 이는 무처리구와 비교 하였을 때 5.0, 13.5, 25.4% 감소되었음을 알 수 있었다. 바닥재의 사용에 따른 상추 내 카드뮴의 농도에 대한 2차 회귀곡선식을 이용하여 상추의 최대수량을 나타내었던 41.6 Mg/ha의 바닥재 사용 시 상추 카드뮴의 흡수농도는 62.9 mg/kg으로 무처리에 비해 약 13% 감소되는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 카드뮴 오염 농경지 토양에 바닥재를 약 40 Mg/ha으로 사용하면 상추 내 카드뮴 함량을 저감시키고 동시에 수량의 증대효과를 얻을 수 있다는 것을 나타낸다.

바닥재의 처리량 증가에 따른 상추 내 카드뮴 함량의 저감은 바닥재 처리에 따른 토양 내 Reducible 형태의 카드뮴 함량 감소와 Residual 형태의 카드뮴 함량 증대와 관련이 있는 것으로 판단된다. 상추 내 카드뮴의 함량에 대하여 Exchangeable + Acidic와 Reducible 형태의 카드뮴은 유의한 정적 상관관계를 나타내었으며 Oxidizable과 Residual 형태의 카드뮴은 유의한 부의 상관관계를 나타냈다(Table 4). 본 연구와 유사한 연구결과로 Hong *et al.* (2010)은 카드뮴

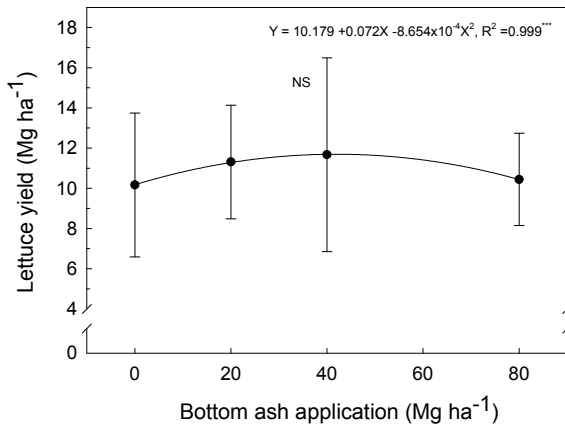


Fig. 2. Response of lettuce yield to different rate of bottom ash application.

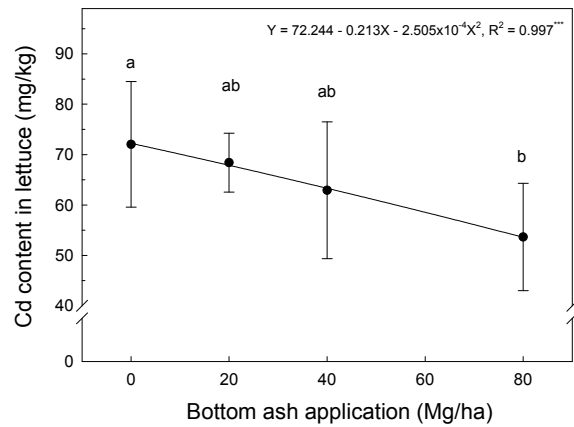


Fig. 3. Changes of Cd concentration in lettuce with different rate of bottom ash application.

Table 4. Correlation coefficients between Cd concentration in lettuce and concentration of Cd fractions in soil

| | Cd fraction | | | | |
|-------------------------|---------------|----------------------|-----------|------------|-----------|
| | Water soluble | Exchangeable+ Acidic | Reducible | Oxidizable | Residual |
| Correlation coefficient | 0.194 | 0.614*** | 0.511*** | -0.341* | -0.502*** |

*, **, and *** denotes significance at 95%, 99%, and 99.9%, respectively.

오염 농경지에 폐화석을 처리하면 Residual 형태의 카드뮴의 함량이 증대하여 알타리무 내 카드뮴의 함량이 감소한다고 보고하였다. 본 연구에서 바닥재의 처리에 의한 카드뮴의 식물이용성 저감 기작은 명확히 구명할 수 없어 추후 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

라 상추내 카드뮴의 농도 역시 감소되었다고 판단된다.

요 약

바닥재에 의한 토양 내 카드뮴의 부동화기작 구명 및 바닥재 시용에 의한 상추의 카드뮴 흡수량 저감 효과를 확인하고자 카드뮴으로 오염된 토양에 바닥재를 0, 20, 40, 80 kg/ha로 처리 한 후 상추 내 카드뮴 흡수특성과 토양 내 카드뮴의 특성을 조사하였다. 바닥재 시용량 증가에 따른 pH 및 음하전도 값의 통계적 유의차는 없었으나 바닥재 시용량이 증가할수록 토양의 pH 및 음하전도가 증가하였다. 바닥재 처리에 따른 토양 내 카드뮴의 분획특성을 조사한 결과 수용성 카드뮴의 경우 바닥재 처리량이 증가 할수록 토양 내 수용성, 치환성 및 carbonate 결합태, 유기물 결합태 형태의 카드뮴 함량이 감소되었으며, 특히 Fe/Mn 결합태의 카드뮴의 경우 바닥재 처리량이 증가 할수록 유의하게 감소되어졌다. 반면, 바닥재의 처리량이 증가할수록 광물내 고정태 카드뮴의 경우 유의하게 증가하였다. 상추의 재배기간 동안 가시적인 독성현상 및 생육저해 현상은 나타나지 않았다. 바닥재의 처리량이 증가할수록 상추 내 카드뮴의 농도는 감소하였다. 이는 토양 내 카드뮴 분획특성에서 나타난 것처럼 바닥재 시용량이 증가 할수록 식물이 이용 가능한 카드뮴의 형태가 감소됨에 따

Acknowledgment

This work was supported by a 2-Year Research Grant of Pusan National University

References

Adriano, D. C., (2001). Trace elements in terrestrial environments; biogeochemistry, bioavailability and risks of metals, p. 866, second ed. Springer, New York.
 Allison, L. E., (1965). Organic carbon, in: Black C. A. (Eds), Methods of Soil Analysis. Part II. Am. Soc. Agron. Inc. Publ., Madison, WI, pp. 1367-1376.
 Bolan, N. S., Adriano, D. C., Mani, P. A., & Duraisamy, A. (2003). Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils. II. Effect of lime addition. Plant and Soil, 251(2), 187-198.
 Bremner, J. M., (1965). Total nitrogen, in: Black C. A. (Eds), Methods of Soil Analysis. Part II. Am. Soc. Agron. Inc. Publ., Madison, WI, pp. 1149-1178.
 Cai, Y., & Ma, L. Q. (2003). Metal tolerance, accumulation, and detoxification in plants with emphasis on arsenic in terrestrial plants. In ACS symposium Series (Chapter 8, pp. 95-114). Washington, DC, USA.

- Hong, C. O., Kim, S. Y., Gutierrez, J., Owens, V. N., & Kim, P. J. (2010). Comparison of oyster shell and calcium hydroxide as liming materials for immobilizing cadmium in upland soil. *Biology and fertility of soils*, 46(5), 491-498.
- Hong, C. O., Noh, Y. D., Kim, S. Y., & Kim, P. J. (2014). Determining Effect of Oyster Shell on Cadmium Extractability and Mechanism of Immobilization in Arable Soil. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 33(4), 245-253.
- Hong, C. O., Owens, V. N., Kim, Y. G., Lee, S. M., Park, H. C., Kim, K. K., Son, H. J., Suh, J. M. & Kim, P. J. (2014). Soil pH effect on phosphate induced cadmium precipitation in arable soil. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 93(1), 101-105.
- Kim, S. Y., Tanaka, N., & Matsuto, T. (2002). Solubility and adsorption characteristics of Pb in leachate from MSW incinerator bottom ash. *Waste management & research*, 20(4), 373-381.
- Kim, Y. G., Lim, W. S., Hong, C. O., & Kim, P. J. (2014). Effect of Combined Application of Bottom Ash and Compost on Heavy Metal Concentration and Enzyme Activities in Upland Soil. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 33(4), 262-270.
- Knox, A. S., Seaman, J. C., Mench, M. J., & Vangronsveld, J. (2000). Remediation of metal-and radionuclides-contaminated soils by in situ stabilization techniques. *Environmental restoration of metals-contaminated soils*. Lewis, New York, 21-60.
- Mukhtar, S., Kenimer, A. L., Sadaka, S. S., & Mathis, J. G. (2003). Evaluation of bottom ash and composted manure blends as a soil amendment material. *Bioresource technology*, 89(3), 217-228.
- Mukhtar, S., Sadaka, S. S., Kenimer, A. L., Rahman, S., & Mathis, J. G. (2008). Acidic and alkaline bottom ash and composted manure blends as a soil amendment. *Bioresource technology*, 99(13), 5891-5900.
- Naidu, R., Bolan, N. S., Kookana, R. S., & Tiller, K. G. (1994). Ionic-strength and pH effects on the sorption of cadmium and the surface charge of soils. *European Journal of Soil Science*, 45(4), 419-429.
- Shim, Y. S., Kim, Y. K., Kong, S. H., Rhee, S. W., & Lee, W. K. (2003). The adsorption characteristics of heavy metals by various particle sizes of MSWI bottom ash. *Waste management*, 23(9), 851-857.
- Sim, Y. S., & Lee, W. K. (2001). Preparation of Adsorbent from MSWI Ash (I). *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 23(8), 379-388.
- Singh, S., Gond, D. P., Pal, A., Tewary, B. K., & Sinha, A. (2011, May). Performance of several crops grown in fly ash amended soil. In *World of Coal Ash (WOCA) Conferences May* (pp. 9-12).
- Tsuchiya K (ed) (1978) *Cadmium Studies in Japan*. A review. Elsevier/North-Holland Biomedical Press, Tokyo/Amsterdam/New York/Oxford, pp. 129-132.
- Ure, A. M., Quevauviller, P., Muntau, H., & Griepink, B. (1993). Speciation of heavy metals in soils and sediments. An account of the improvement and harmonization of extraction techniques undertaken under the auspices of the BCR of the Commission of the European Communities. *International journal of environmental analytical chemistry*, 51(1-4), 135-151.
- Wearing, C., Nairn, J. D., & Birch, C. (2004). An assessment of tarong bottom ash for use on agricultural soils. *Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing*, 12(5/6), 531-544.