

광산 인근 밭토양에서 중금속 안정화제 처리 및 복토층 처리에 의한 토양 중 중금속 식물유효도 변화 및 고추의 중금속 흡수

김권래 · 박정식 · 김민석 · 구남인 · 이상환¹ · 이진수¹ · 김성철² · 양재의² · 김정규*

고려대학교 환경생태공학부, ¹한국광해관리공단 광해기술연구소, ²강원대학교 바이오자원환경학과

Changes in Heavy Metal Phytoavailability by Application of Immobilizing Agents and Soil Cover in the Upland Soil Nearby Abandoned Mining Area and Subsequent Metal Uptake by Red Pepper

Kwon-Rae Kim, Jeong-Sik Park, Min-Suk Kim, Nam-In Koo, Sang-Hwan Lee¹, Jin-Su Lee¹,
Sung-Chul Kim², Jae-E Yang², and Jeong-Gyu Kim*

Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University

¹*Technology Research Center, Mine Reclamation Corporation, Korea*

²*Department of Biological Environment, Kangwon National University*

At the current situation of continuous utilization of heavy metal contaminated upland for agricultural purpose in Korea, minimizing transport of heavy metals from soil to crops is important for securing safety of human health. The present study (in field scale) examined the efficiency of several soil amendments (dolomite, steel slag, lime, zeolite, and compost) on reduction of phytoavailable heavy metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) in soil through comparison with no amendment treatment and clean soil cover treatment. For determination of the phytoavailability, 1 M NH₄NO₃ extraction and red pepper cultivation were introduced. Among the amendments, in general, dolomite and steel slag were the most effective in reduction of metal (Cd, Pb, and Zn) phytoavailability resulting in less accumulation of these metals in shoot and fruit of red pepper. However, dolomite and steel slag treatment was not as effective as clean soil cover treatment which showed the least metal accumulation in red pepper fruit. Nevertheless, with taking into account the cost, treatment of dolomite or steel slag can be competitive method because the current study showed that dolomite or steel slag treatment reduced accumulated heavy metal concentration effectively in both shoot and fruit of red pepper compared to those from control soil and the concentration in fruit was within the standard value (<0.2 mg kg⁻¹ for both Cd and Pb).

Key words: Dolomite, Slag, Zeolite, Compost, Phytoavailability

서 언

중금속은 지표층을 구성하는 성분으로써 모암의 성분 특성상 자연적으로 발생하여 토양 및 수계를 오염시킬 수 있다. 그러나 인간에 의해 자원으로써 중금속을 이용하게 되면서 인위적인 오염 발생이 증가하게 되었고, 이로 인해 동식물은 물론 인간의 건강이 위협을 받고 있다 (Lee et al., 1996; Park and Lee, 2002). 인간의 활동에 의한 환경으로의 중금속 유입은 크게 광산과 공단

에 의한 오염원으로 나눌 수 있는데, 우리나라의 경우 광산에 의한 중금속 오염이 공단에 비해 더 큰 비중을 차지하고 있다. 현재까지 우리나라에는 936개의 폐광산이 존재하는 것으로 조사되었다 (환경부, 2006). 이들 중 토양오염도가 높으며 인근 농경지에서 농산물을 생산하고 있는 44개 광산을 중심으로 조사한 결과 오염된 농산물을 생산하고 있는 농경지가 109 ha인 것으로 나타났다 (환경부, 2006). 그러나 이는 일부의 광산 조사에 의한 결과이므로 936개 광산 전체를 감안한다면 더 많은 농경지가 중금속에 의해서 오염되었을 것으로 추정되며 이들 농경지에서 여전히 농산물이 생산되고 있을 것으로 판단된다. 이에 이미 우리나라는 2005년부터 국제식품규격위원회 (Codex) 기준과 연계하여 우리나라에

접수 : 2010. 11. 1 수리 : 2010. 11. 24

*연락처 : Phone: +82232903024

E-mail: lemonkim@korea.ac.kr

서 생산되는 10대 소비 작물에 대한 카드뮴과 납의 허용기준 농도를 만들어 중금속 오염 농작물의 유통을 차단하고 있다 (Lee et al., 2005). 또한 농림부는 2001년부터 32개 광산지역 농경지에서 생산된 쌀을 조사하여 Codex 기준 0.2 mg kg^{-1} 을 초과하는 쌀에 대해서는 전량 수매하여 폐기해 오고 있다 (환경부, 2006). 그러나 이와 같은 노력에도 불구하고 오염된 농경지에서 생산된 농산물이 생산자들 자체에 의해서 소비되는 것이나 지역단위 유통을 통해서 지역 소비자에게 전달되는 것을 모두 차단하기는 어렵다. 따라서 근본적으로는 안전한 농산물을 생산해 내는 것이 필요하며, 이와 같은 목적을 달성하기 위해서 필요한 것이 바로 중금속으로 오염된 농경지를 복원하는 것이다.

중금속으로 오염된 농경지의 복원이라 하면 먼저 중금속의 농도를 기준치 이하로 낮추는 것인데, 이를 위해서는 외부에서 비오염토양을 유입하여 기존 토양을 복토하는 방법이 이용될 수 있다. 그러나 이 방법은 넓은 오염 농경지를 복토하기 위해서 필요한 양의 비오염토양을 확보하는 것과 더불어 많은 비용이 필요하다는 단점이 있다. 따라서 이를 대체하기 위해서 토양 중 중금속의 안정화를 꾀하여 유효도를 떨어뜨리고 이로 인해서 작물체 이행이 줄이는 방법을 적극 검토할 필요가 있다. 이미 많은 연구에서 식물체의 중금속 흡수가 토양 중 중금속의 총 함량 보다는 유효태 함량과 정의 상관관계가 있음이 보고되었다 (DIN, 1995; Krishnamurti and Naidu, 2000). 물론 이 방법은 토양 내 중금속 총 함량이 줄어드는 것이 아니므로 궁극적으로 오염농경지를 비오염농경지로 바꾸는 것은 아니다. 그렇지만, 중금속의 농도가 높은 농경지에서 중금속으로부터 안전한 농산물을 지속적으로 생산함으로써 오염 농경지를 농경지로서의 기능을 지속할 수 있도록 할 수 있을 것이다.

중금속의 안정화를 위해서 지금까지 다양한 개량제들의 효과가 이미 많은 선행 연구에서 진행되었다 (Udeigwe et al., 2010). 이들을 중금속 안정화 원리별로 분류해보면 크게 토양 pH 증가를 꾀하여 토양수 중 중금속을 토양 교질에 흡착시키고 침전시키기 위해 이용되는 개량제와 (Cheng and Hseu, 2002; Hong et al., 2009) 개량제 자체의 흡착력을 이용하여 중금속을 안정화시키는 개량제로 나눌 수 있다 (Uchimiya et al., 2010). pH 교정에 이용하는 것들은 대부분 석회 성분을 가지는

물질로 주로 칼사이트 (calcite)와 같은 천연광물이나 재강슬래그, 폐각과 같은 산업부산물들이다 (Hong et al., 2007; Ok et al., 2010; Yang et al., 2006). 흡착제로 쓰이는 것들은 자체의 넓은 비표면적과 많은 작용기를 가지는 물질로 제올라이트, 영가철 등의 무기성 물질과 퇴비와 같은 유기성 물질을 포함한다 (Baldantoni et al., 2010; Panayotova and Velikov, 2002). 이들 개량제의 중금속 안정화 효율을 시험하기 위해서 지금까지는 주로 실험실 수준에서 각 중금속의 침출률 저감을 시험하는 것에 국한되어 있었으며, 식물유효도 실험에서도 단기간 생육을 통한 어린 식물체의 중금속 이행 정도를 측정하는 것에 그쳤다. 그러나 현장 적용을 위해서는 포장 수준의 시험을 통해서 재배되는 농작물의 가식부로 전이되는 중금속의 양을 측정하여 개량제의 중금속 유효도 저감 능력과 이로 인한 안전한 농산물 생산 가능성에 대한 검증이 필요하다.

본 연구는 pH교정용 개량제와 흡착제로 쓰이는 개량제 중 기존에 실험실 수준에서 효율성이 인정된 개량제의 현장 검증과 이들 화학적 처리 방법을 물리적 처리법인 복토 처리와 비교하기 위해서 실시하였다.

재료 및 방법

실험 포장의 토양 특성 본 실험이 실시된 밭은 경상북도 봉화군 법전리에 위치해 있으며 이 지역은 주변에 산재해 있는 금속광산의 영향권으로 이미 중금속으로 오염되어 있었다 (Table 1). 토양의 일반적인 물리화학적 특징을 Table 1에 나타내었다.

공시 작물 현장 인근에서 대표적으로 재배되고 있는 고추 (*Capsicum annuum* L.)를 선택하였으며, 사전 실험실 수준의 실험에서 3가지 품종 (파리, 마니파, 청양)의 고추 중 중금속 흡수를 가장 적게 하는 청양고추를 이용하였다.

개량제 pH 교정을 목적으로 선택한 개량제로는 백운석 (dolomite, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), 농용석회, 재강슬래그를 이용하였고 흡착제 및 착화물 형성을 목적으로 이용한 개량제는 제올라이트 (zeolite)와 퇴비였다. 이들 개량

Table 1. Selected physicochemical properties of the upland soil.

	pH	EC [†]	Sand	Silt	Clay	OM [‡]	Cd	Cu	Pb	Zn
	(1:5)	dS m ⁻¹	----- % -----			-----	----- mg kg ⁻¹ -----			
Soil	6.3	0.13	65	26	9	2.4	6	178	2877	403

[†]EC=electrical conductivity, [‡]OM=organic matter.

제는 토양의 작토층 (0.5 m)과 가밀도 (1.25 g cm^{-3})를 고려하여 농용석회 (1%)를 제외하고 각각 3% 수준으로 처리하였다. 농용석회는 완충곡선법으로 시험해 본 결과 과도한 pH 상승으로 작물체의 생육에 악영향을 미칠 것으로 판단하여 그 처리량을 1% 수준으로 하였다.

처리 및 작물재배 각 시험구는 밭 토양을 1 m 깊이로 굴착하여 밑면이 뚫린 플라스틱 상자 ($1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$)를 설치하고 굴착된 토양은 필요한 양의 개량제를 각각 처리한 후 고루 섞어서 다시 플라스틱 상자 안에 충전하는 방식으로 진행하였다. 본 작업에서 토양의 균질성을 확보하기 위해서 필요한 개수의 처리구 (21개)를 고려하여 토양을 $3 \text{ m} \times 7 \text{ m}$ 넓이로 한 번에 굴착하고 굴착한 토양을 고루 섞은 후 각 개량제 처리구별로 필요한 양의 토양을 분획하여 개량제와 혼합하였다. 굴착된 곳에는 21개의 플라스틱 상자를 설치하고 준비된 토양을 충전하였다. 복토 처리구를 위해서는 현장 토양을 0.5 m 충전하고 그 위에 중금속으로 오염되지 않은 토양을 0.5 m 복토하였다. 본 시험구에는 5개의 개량제 처리구와 대조구 그리고 복토층 처리구를 포함하며 각 처리구당 3개의 plot을 준비하여 3반복 시험으로 하였다. 시험구는 2009년 8월에 설치하였으며 이듬해 4월까지 자연상태에서 에이징 (aging) 시킨 후 5월 초에 고추를 정식하였다.

청양고추묘는 육묘장에서 기른 것을 이용하였고 (5엽기), 각 plot당 3대의 고추묘를 정식하였다. 고추 재배는 관행 농법에 따라 원예용 비료를 시비하고 비닐로 멀칭하여 정식한 후 필요한 제초작업 등을 해주며 8월 말까지 약 4개월 동안 재배하였다. 8월 말에 홍고추 1차 수확 시기가 되었을 때 고추 과실 및 식물체를 수거하여 생중량을 측정하고 전처리를 거쳐 분석에 필요한 시료로 이용하였다.

시료의 채취 및 전처리 처리 후 7개월이 되는 4월 초에 토양의 이화학적 특성 변화 및 중금속의 유효도 검정을 위해서 각 처리구별 시험구에서 토양 시료를 채취하여 분석하였다. 토양시료채취 장비인 오거 (auger)를 이용하여 각 시험구에서 총 3개의 토양시료 (20 cm 깊이)를 채취한 후 하나의 시료로 균일하게 혼합하였다. 채취한 토양은 풍건한 후 2 mm 체로 걸러서 분석에 이용하였다. 고추 과실 시료는 한 시험구당 3개의 각 식물체에서 서로 다른 분지에서 착과한 3개의 홍고추를 선발하고 (시험구당 9개 고추) 혼합하여 이용하였다. 식물체 시료는 과실 시료를 수거한 분지들을 수거하여 혼합하여 하나의 시료로 하였다. 과실 및 식물체 시료는 수돗물로 한번 씻어 내고 70°C 오븐에서 72시간 동안 건조한 후 분쇄하여 분석용 시료로 이용하였다.

시료의 분석 토양의 pH와 EC는 토양과 증류수를 1:5의 비율로 한 시간 교반 후 pH-EC 측정기 (Thermo Orion 920A)로 측정하였다. 토양 유기물의 함량은 Walkely-Black법 (Nelson and Sommers, 1996)으로, 점토 함량은 마이크로피펫법 (Miller and Miller, 1987)으로 분석하였다. 토양 중 용존유기탄소 (DOC) 함량은 토양 10 g을 20 mL의 증류수로 2시간 진탕 후 침출하여 TOC 분석기 (Shimadzu TOC-VCPH)로 측정하였다. 양이온 치환용량은 1 N 초산 암모니아법을 이용하여 분석하였다 (Sumner and Miller, 1996). 토양 중 중금속의 총 함량 측정을 위해서 각 토양 시료 0.5 g에 10 mL의 왕수를 넣고 불록분해기 (Buchi digest system K-437, Buchi labortechnik, Switzerland)로 분해하고 분해 용액을 Whatman No. 42 (pore size $2.5 \mu\text{m}$) 여과지로 거른 후 용액 중 중금속의 함량을 ICP-OES (Vista PRO, Varian, USA)로 측정하였다. 토양 분해를 위한 각각의 분해 세트에는 표준시료 (Montana Soil SRM2711, National Institute of Standards & Technology)와 공시료를 포함시켜 분해가 적절히 완료되었는지를 검토하였다. 토양 중 중금속의 식물유효도 평가를 위해서 1 M NH_4NO_3 침출법을 이용하였다 (DIN, 1995). 토양 10 g을 20 mL의 1 M NH_4NO_3 로 침출하여 여과한 후 침출액 속의 중금속 함량을 ICP-OES로 측정하였다.

과실 및 식물체 중 중금속 농도를 측정하기 위해서 0.5 g의 시료와 진한 질산을 분해관에 넣고 불록분해기를 이용하여 완전 분해한 후 Whatman No. 42 여과지로 걸러서 분해액 중의 중금속을 ICP-OES로 측정하였다.

데이터 분석 실험 결과는 3반복 시험구의 평균값과 표준편차를 이용하여 그래프 등으로 나타내었고 처리별 유의성 분석은 SAS 9.1 프로그램을 이용한 ANOVA 검정으로 실시하였다.

결과 및 고찰

토양 pH와 용존유기탄소 (DOC) 변화 개량제 처리 후 7개월간의 반응 이후에 각 처리구의 pH 평균값을 비교해 보았을 때 pH 증가를 목적으로 처리한 백운석, 제강슬래그, 농용석회 처리구에서 pH 증가가 뚜렷이 나타났다 ($P < 0.01$) (Fig. 1). 백운석 처리에 의해서 토양 pH는 대조구 6.3보다 1.8 높은 8.1을 나타냈으며 그 뒤로 제강 슬래그 농용석회의 순서였다. 퇴비를 처리한 시험구의 pH는 대조구와 유의한 차이를 나타내지는 않았으나 다소 떨어진 수치를 보였으며 제올라이트 처리구에서는 예상과는 달리 대조구보다 다소 높은 수치를

보였다. 물리적 처리구인 복토 처리에서는 대조구와 거의 같은 수치의 pH를 보였다. 토양 중 중금속의 식물유효도에 가장 크게 영향을 미치는 단일 환경인자는 토양 pH라는 것이 이미 많은 문헌들을 통해서 입증되었으며, 본 연

구에서 개량제 처리에 의해서 변화한 pH는 추후 토양 중 중금속의 유효도 변화에 영향을 미칠 것으로 판단되었다.

이와 같은 pH 변화는 중금속 자체의 유효도 뿐만 아니라 중금속과 용존유기복합물 (organo-metal)을 형성하는 용존유기탄소 (DOC)의 함량에도 영향을 미쳐 간접적으로도 중금속의 토양 중 식물유효도에 영향을 미친다 (Kim et al., 2010). 일반적으로 용존유기탄소는 pH가 증가할 때 음으로 하전되는 가변전하 때문에 토양교질 및 유기성 콜로이드와 반발력이 발생하여 토양수 중 농도가 증가한다. 이 처럼 본 연구에서도 개량제 처리에서 기인한 pH 증가는 용존유기탄소의 농도를 증가시켜 (Fig. 1), 대조구에 비해서 백운석, 제강슬래그, 농용석회를 처리한 시험구에서 유의하게 증가하였다 ($P < 0.05$). 제올라이트 처리구 토양은 제올라이트 자체의 흡착 특성 때문에 오히려 용존유기탄소를 흡착하여 그 농도가 감소한 것으로 보이며 ($P < 0.05$) 퇴비를 처리한 시험구에서는 퇴비에서 녹아 나온 용존유기탄소 때문에 농도가 대조구에 비해서 높게 나타났다 ($P < 0.05$).

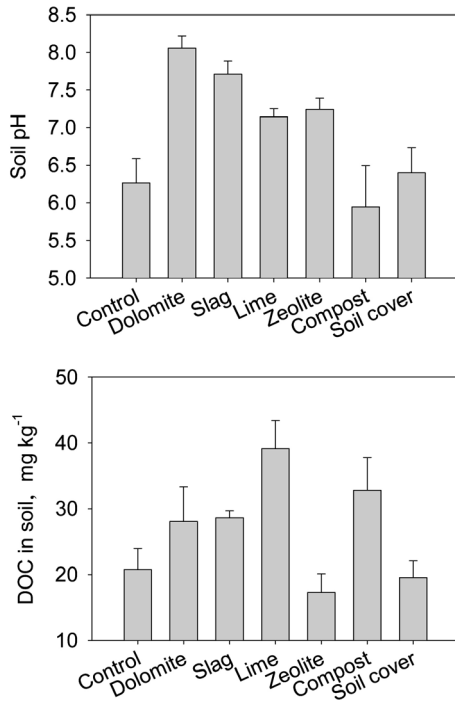


Fig. 1. Soil pH and DOC concentrations in the soils 7 month after amendment treatment (Error bar indicates standard deviation).

중금속의 식물유효도 변화 개량제 처리 후 중금속의 식물유효도 (1 M HN_4NO_3 침출법에 의한 농도) 변화는 개량제의 종류와 상관없이, 모든 처리구에서 카드뮴, 납, 아연의 농도가 대조구에 비해서 감소하였다 ($P < 0.05$) (Fig. 2). 감소 정도는 백운석 > 제강슬래그 > 농용석회 순이었다. 반면에 구리의 식물유효도는 백운석, 제강슬래그, 농용석

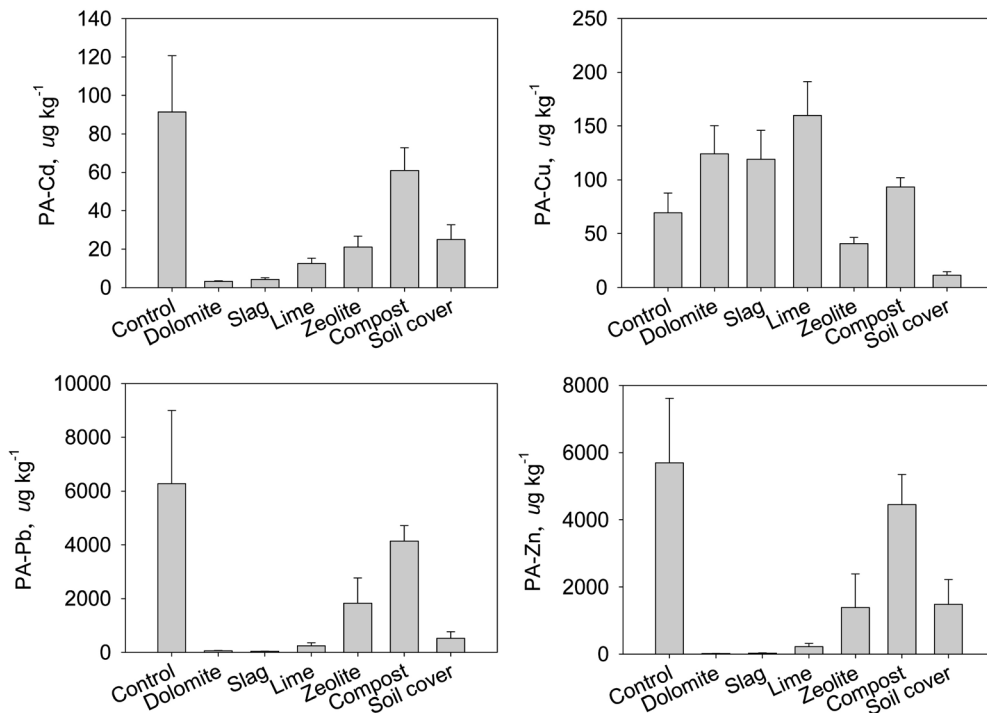
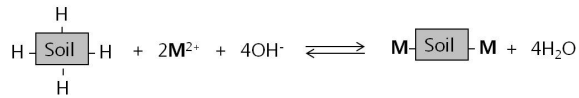


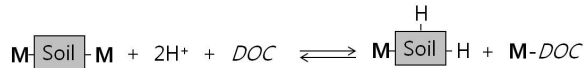
Fig. 2. Phytoavailable (1 M NH_4NO_3 extractable) heavy metal concentrations in the soils 7 month after amendment treatment (PA, phytoavailable; Error bar indicates standard deviation).

회 처리구에서 대조구에 비해서 높아졌는데, 이는 pH를 증가시킨 이들 처리구에서 용존유기탄소의 함량이 증가했기 때문인 것으로 판단되었다.

토양 중 중금속의 식물유효도 변화는 중금속의 종류와 토양 pH, 용존유기탄소, 토양의 양이온치환능력, 철-망간 산화물의 함량 등에 의해서 결정된다 (Kim et al., 2007). 이들 중 토양 pH는 다음 식에 나타난 바와 같이 pH가 증가할 때 토양교질에서 수소이온들이 떨어져 나가고 그 자리에 중금속들이 달라붙어 식물유효도가 떨어지게 된다.



중금속들 중 토양 pH의 변화에 민감한 중금속들은 흡착교질과 친화력이 떨어지는 카드뮴, 납, 아연과 같은 중금속들이며 (Kim et al., 2009) 이와 같은 결과가 백운석, 제강슬래그, 농용석회 처리구에서 식물유효도가 급격하게 떨어진 카드뮴, 납, 아연에서 잘 나타나고 있다. 구리와 같이 흡착교질과 친화력이 높은 중금속은 식물유효도가 토양의 pH 보다는 용존유기탄소의 함량에 의해서 결정되며 (Kim et al., 2009) 다음 반응식에서처럼 용존유기탄소의 함량이 많아질수록 중금속의 식물유효도가 증가한다.



본 연구에서도 구리의 식물유효도가 용존유기탄소 함량이 높아진 백운석, 제강슬래그, 농용석회 처리구에서 증가한 결과를 볼 수 있었다 ($P < 0.05$). 그러나 납과 아연과 같은 다른 중금속들의 식물유효도가 수천 $\mu\text{g kg}^{-1}$ 감소한 것에 비하면 구리의 식물유효도 증가는 겨우 약 10–20 $\mu\text{g kg}^{-1}$ 에 불과하였다. 이는 pH 증가로 인해 발생하는 토양교질로의 중금속 흡착량 증가 현상과 용존유기탄소와 결합하여 용존유기복합물을 형성하여 유효도를 증가시키는 현상이 서로 상쇄현상을 발현하기 때문인 것으로 볼 수 있다 (Kim et al., 2010).

개량제 물질 자체에 중금속을 흡착시키기 위해서 처리한 제올라이트와 퇴비 처리구에서는 카드뮴, 납, 아연은 물론 구리에서도 식물유효도가 감소하였다 ($P < 0.05$). 그러나 1 M HN_4NO_3 침출법을 이용하여 식물유효도 측정한 본 연구에서는 그 감소 정도가 석회성분 개량제를 처리한 시험구에 비해서는 덜 하였다 (Fig. 2).

개량제의 화학작용에 의한 중금속의 식물유효도 감소와 물리적으로 중금속 총 함량을 떨어뜨림으로써 식물

유효도를 감소시키고자 한 복토 처리구를 비교했을 때, 1 M NH_4NO_3 침출에 의한 방법으로는 복토 처리구에 비해서도 백운석, 제강슬래그, 농용석회 처리가 카드뮴, 납, 아연에서 더 효과적인 것으로 나타났다. 반면에 구리는 복토 처리에서 식물유효도가 가장 낮게 나타났다. 실제로 복토 처리에 의해서 토양 중 중금속의 총 함량은 카드뮴, 구리, 납, 아연에 대하여 6, 178, 2877, 403 mg kg^{-1} 에서 각각 1.7, 9.1, 167, 64 mg kg^{-1} 로 감소하였다.

이와 같이 개량제 처리 및 복토 처리에 의한 중금속의 식물유효도 변화는 결국 각 토양에서 자란 고추의 중금속 흡수 정도에 영향을 미칠 것으로 판단되었다. 그러나 위에서 기술한 내용은 중금속의 식물유효도를 측정하기 위해서 화학적 침출법을 이용한 결과이므로 실제 식물에 의해서 흡수되는 정도를 살펴 볼 필요가 있었다.

고추의 중금속 흡수 고추로 흡수된 중금속 함량은 고추의 식물체 (Shoot)와 고추 과실부로 나누어 살펴볼 수 있다. 먼저 고추 식물체 중 중금속 축적 농도를 보면 전반적으로 각 처리에 의해서 변화한 토양 중 중금속의 식물유효도 변화와 연관이 있는 것으로 보였다 (Fig. 3). 특히 납과 아연에서는 토양 중 중금속의 식물유효도의 감소에 따라 백운석, 제강슬래그, 농용석회를 처리한 시험구의 고추 식물체 중 농도가 가장 적게 축적된 것을 볼 수 있었다 ($P < 0.01$). 카드뮴의 경우도 정도의 차이는 있었으나 평균 수치를 비교해 볼 때 대조구에 비해서 백운석, 제강슬래그, 농용석회 처리구에서 보다 적게 축적되었다. 그리고 토양 중 식물유효도 평가에서 보여진 바와는 달리 고추 식물체에 축적된 구리의 함량은 복토를 제외한 모든 시험구에서 비슷한 수준을 보였다.

제올라이트 처리구와 퇴비 처리구에서 고추의 중금속 흡수 정도는 pH를 증가시켜 중금속의 식물유효도를 떨어뜨린 시험구에 비해서 높게 나타났다 ($P < 0.05$). 이는 흡착 특성을 이용한 중금속 식물유효도 저감보다 pH 증가에 의한 식물유효도 감소가 더 효과적임을 시사한다. 복토 처리구에서 자란 고추의 식물체 중 중금속 흡수 정도를 효율이 높게 평가된 백운석, 제강슬래그, 농용석회 처리구와 비교해 볼 때 중금속의 총 함량이 유의하게 감소하였음에도 중금속 축적 정도는 오히려 더 높았다.

과실부에 축적된 중금속의 농도는 식물체에 축적된 농도에서만 뚜렷한 경향을 보이지는 않았으나 백운석, 제강슬래그, 복토 처리구에서 과실부 중금속 축적이 감소하는 경향을 보였다 (Fig. 4). 세부적으로 살펴보면, 카드뮴은 백운석, 퇴비, 복토 처리구에서, 구리는 백운

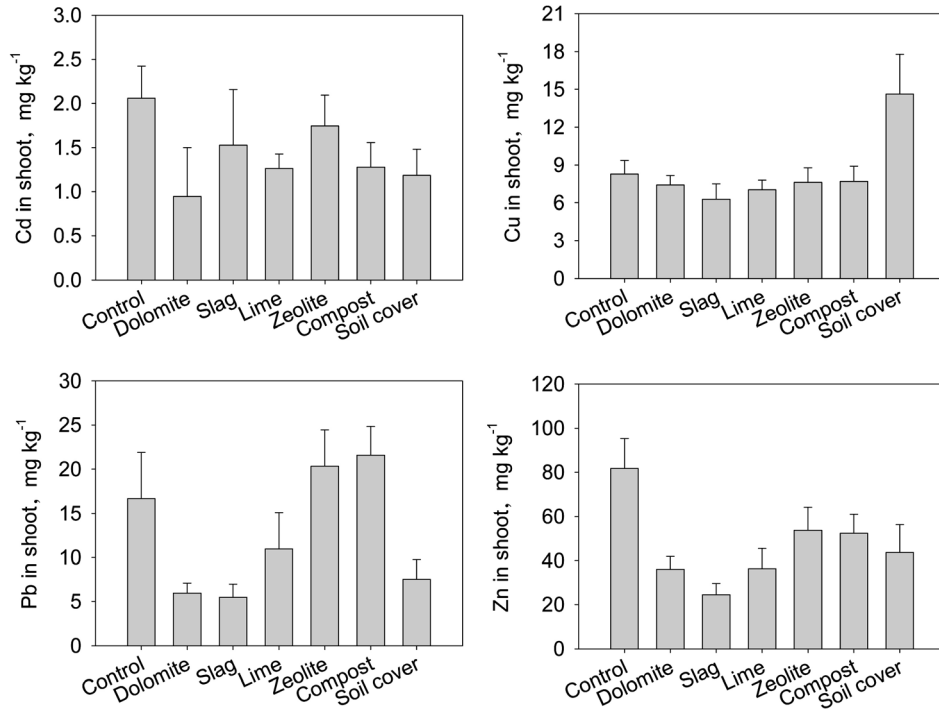


Fig. 3. Heavy metal concentrations accumulated in shoot (leaves and stems) of red pepper at harvesting stage (Error bar indicates standard deviation).

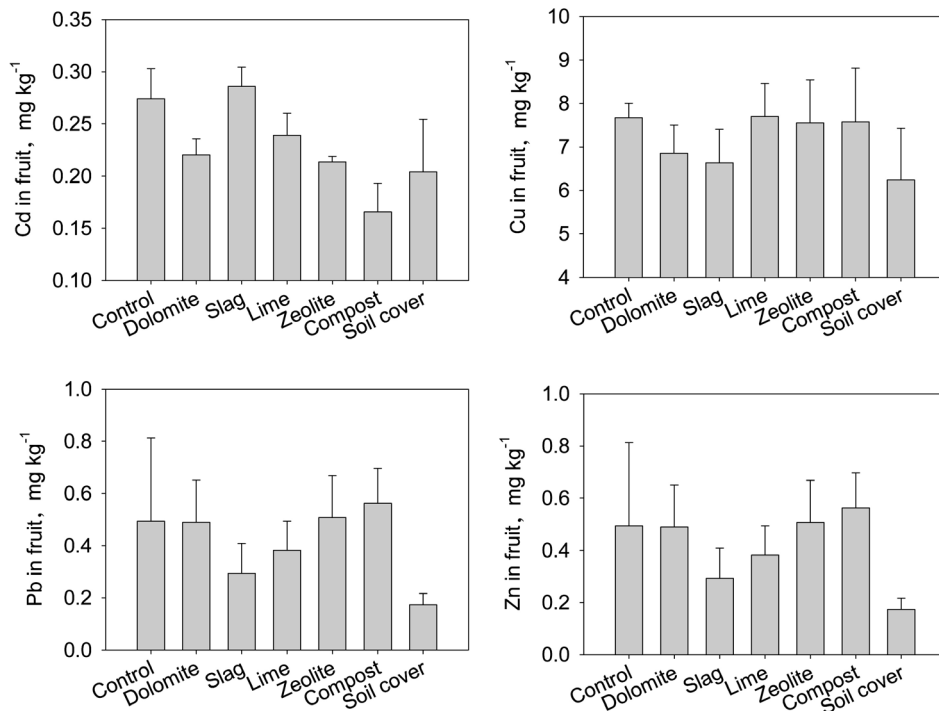


Fig. 4. Heavy metal concentrations accumulated in fruit (ones ripened in red) of red pepper at harvesting stage (Error bar indicates standard deviation).

석, 제강슬래그, 복토 처리구에서, 그리고 납과 아연은 제강슬래그와 복토 처리구에서 낮게 검출되었다. 처리구 별로는 중금속 총 함량을 낮추어준 복토 처리구에서 과실부 중금속 축적 농도가 가장 적게 나타나 고추 식물체에 축적된 중금속 농도와는 대조적인 결과를 보였다.

모든 시험구의 과실에서 검출된 카드뮴과 납의 농도는 우리나라 농산물의 허용한계 농도인 1.4 mg kg⁻¹ (생체중량 기준인 0.2 mg kg⁻¹을 고추 과실의 수분함량 86%를 감안하여 건물중 기준으로 환산한 수치)보다 훨씬 낮은 수치를 보였다 (Fig. 5). 고추 식물체의 축적

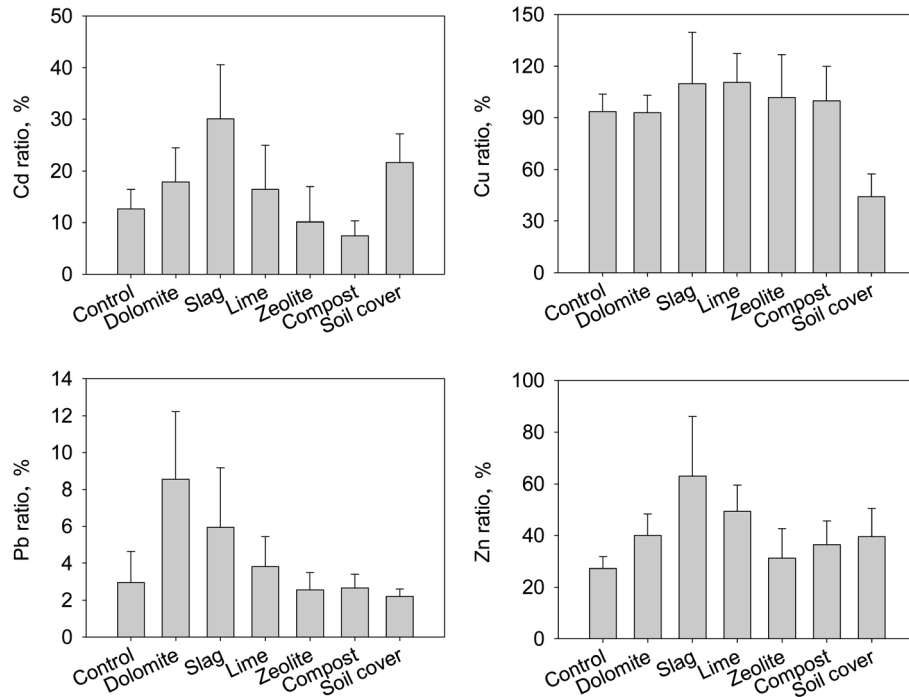


Fig. 5. The ratio of heavy metal concentrations in fruit (ones ripened in red) to shoot (leaves and stems) at harvesting stage (fruit-shoot ratio (%) = conc. in fruit/conc. in shoot x 100 which was modified from Norton et al. (2007); Error bar indicates standard deviation).

농도와 비교해서 이와 같이 과실부의 낮은 농도는 이들 중금속들이 과실로 이동되는 것이 매우 제한적임을 시사한다. 필수영양원소가 아닌 중금속의 경우는 일차적으로 뿌리를 통해서 식물체로 유입되었을 때 식물 잎의 가장자리와 각 세포의 액포 등에 침적되어 다른 부위로의 이동이 제한된다. 이러한 이유로 고추 식물체 중 중금속 농도에 대한 과실부 중금속 농도의 비율을 살펴보면 카드뮴이 7-30%, 구리가 44-110%, 납이 2-9%, 아연이 27-63%로 카드뮴과 납의 과실부 전이가 낮았다 (Fig. 5). 본 연구에 이용된 발토양은 카드뮴, 구리, 납, 아연의 총 농도가 각각 6, 178, 2877, 403 mg kg⁻¹로 매우 높은 수치를 보였음에도 고추 과실의 중금속 농도는 허용한계보다 낮았다. 이는 적절한 작물의 선택이 오염농경지에서 안전한 농산물을 지속적으로 생산하는데 필수적임을 시사하며, 이와 더불어 개량제 처리를 통한 중금속의 안정화를 피하여 보다 안전한 농산물을 생산할 수 있음을 보여준다. 다만, 본 연구결과에서 백운석, 제강슬래그 처리구에서 중금속의 과실 전이 (특히 카드뮴, 납, 아연)율이 높아지는 결과를 보였는데 (Fig. 5), 이 부분에 대한 식물의 생리적 고찰이 앞으로 이루어져야 할 것으로 보인다.

결 론

금속광산의 영향으로 중금속으로 오염된 농경지를 복

원하고 안전한 농산물을 생산하기 위해 적용 가능한 다양한 방안들이 모색되고 있다. 이들 방법은 중금속의 유효도를 떨어뜨리는 개량제를 이용하는 방안과 비오염토양으로 복토 처리를 해서 작토층 중금속의 총 함량을 떨어뜨리는 방안으로 나눌 수 있는데, 고추의 중금속 흡수 정도를 측정한 본 연구 결과는 복토 처리구가 개량제 처리구보다 낮은 농도의 중금속을 함유한 고추를 생산하는데 도움이 되는 것으로 나타났다. 그러나 카드뮴과 납의 농산물 허용기준치를 적용했을 때 백운석, 제강슬래그 등의 개량제를 처리한 시험구에서도 농산물 허용기준치에 부합하며 대조구보다 유의한 수준으로 낮은 중금속 축적 농도를 보여, 비용대비 우수한 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 개량제 처리에 의해서 과실부로의 중금속 전이율이 증가하였는데, 이 부분에 대한 식물 생리적 측면에서의 연구가 앞으로 더 진행되어야 할 것으로 보인다.

인 용 문 헌

- Baldantoni, D., A. Leone, P. Iovieno, L. Morra, M. Zaccardelli, and A. Alfani. 2010. Total and available soil trace element concentrations in two Mediterranean agricultural systems treated with municipal waste compost or conventional mineral fertilizers. *Chemosphere*. 80: 1006-1013.

- Cheng, S.F. and Z.Y. Hseu. 2002. In-situ immobilization of cadmium and lead by different amendments in two contaminated soils. *Water Air Soil Pollut.* 140:73-84.
- DIN (Deutsches Institut für Normung). 1995. Soil quality extraction of trace elements with ammonium nitrate solution. DIN 19730. Beuth Verlag, Berlin, Germany.
- Hong, C.O., J. Gutierrez, S.W. Yun, Y.B. Lee, C. Yu, and P.J. Kim. 2009. Heavy metal contamination of arable soil and corn plant in the vicinity of a zinc smelting factory and stabilization by liming. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 56:190-200.
- Hong, C.O., D.K. Lee, D.Y. Chung, and P.J. Kim. 2007. Liming effects on cadmium stabilization in upland soil affected by gold mining activity, *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 52:496-502.
- Kim, K.R., G. Owens, and R. Naidu. 2009. Heavy metal distribution, bioaccessibility and phytoavailability in long-term contaminated soils from Lake Macquarie, Australia. *Aust. J. Soil Research.* 47:166-176.
- Kim, K.R., G. Owens, R. Naidu, and K.H. Kim. 2007. Assessment Techniques of Heavy Metal Bioavailability in Soil - A critical review. *Korean J. Soil Sci. Fertil.* 40: 311-325.
- Kim, K.R., G. Owens, and S.I. Kwon. 2010. Influence of Indian Mustard (*Brassica juncea*) on rhizosphere soil solution chemistry in long-term contaminated soils: a rhizobox study. *J. Environ. Sci.* 22:98-105.
- Krishnamurti, G.S.R. and R. Naidu. 2000. Speciation and phytoavailability of cadmium in selected surface soils of South Australia. *Aust. J. Soil Research.* 38:991-1004.
- Lee, J.O., Y.S. Sho, K.S. Oh, K.M. Kang, J.H. Suh, E.J. Lee, Y.B. Lee, S.S. Park, H.Y. Kim, and G.Z. Woo. 2005. Heavy metal survey of agricultural products in Korea circulation market. *Annu. Rep. KFDA. Korea.* 9:953.
- Lee, T.J., K.C. Kim, I.C. Shin, K.S. Han, T.H. Shim, M.J. Ryu, and J.K. Lee. 1996. Survey on the contents of trace heavy metals in agricultural products of Gangwon-do. *Rep. Inst. Health Environ.* 7:75-87.
- Miller, W.P. and M. Miller. 1987. A micro pipette method for soil mechanical analysis. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 18:1-15.
- Nelson, D.W. and L.E. Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. p. 961-1110. In A.L. Page et al. (ed.) *Methods of soil analysis, part2. Chemical analysis.* (2nd ed.). Soil Science Society of America, Madison, WI, USA.
- Norton, G.J., M.R. Islam, G. Duan, M. Lei, Y. Zhu, C.M. Deacon, A.C. Moran, S. Islam, F.J. Zhao, J.L. Stroud, S.P. McGrath, J. Feldmann, A.H. Price, and A.A. Meharg. 2007. Arsenic shoot-grain relationships in field grown rice cultivars. *Environ. Sci. Technol.* 44:1471-1477.
- Ok, Y.S., J.E. Lim, and D.H. Moon. 2010. Stabilization of Pb and Cd contaminated soils and soil quality improvements using waste oyster shells. *Environ. Geochem. Health.* DOI 10.1007/s10653-010-9329-3.
- Panayotova, M. and B. Velikov. 2002. Kinetics of heavy metal ions removal by use of natural zeolite. *J. Environ. Sci. Health.* 37:139-147.
- Park, J.S. and M.K. Lee. 2002. A study on contents of heavy and trace metal of the agricultural products around miners located in Chollanamdo. *Korean J. Food Nutr.* 15:64-69.
- Sumner, M.E. and W.P. Miller. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients. In D.L. Sparks et al. (ed.) *Methods of soil analysis part3. chemical methods.* Soil Science Society of America, Madison, WI, USA.
- Uchimiya, M., I.M. Lima, K.T. Klasson, and L.H. Wartelle. 2010. Contaminant immobilization and nutrient release by biochar soil amendment: Roles of natural organic matter. *Chemosphere.* 80:935-940.
- Udeigwe, T.K., P.N. Eze, J.M. Teboh, and M.H. Stietiya. 2010. Application, chemistry, and environmental implications of contaminant-immobilization amendments on agricultural soil and water quality. *Environ. International.* DOI: 10.1016/j.envint.2010.08.008.
- Yang, J.E., J.G. Skousen, Y.S. Ok, K.Y. Yoo, and H.J. Kim. 2006. Reclamation of abandoned coal mine waste in Korea using lime cake by-products, *Mine Water Environ.* 25:227-232.
- 환경부. 2006. 농산물 중금속 기준설정을 위한 평야·폐금속광산 지역 농산물 오염 실태조사 결과 및 대책방안 마련 추진. 보도자료.