

## Efficiency of Chemical Amendments for Reducing Ecotoxicity in Heavy Metal Polluted Agricultural Fields

Won-Suk Choi, Dae-Bok Kim, Young-Kyu Hong, Soon-Oh Kim<sup>1</sup>, Sang-Woo Lee<sup>1</sup>, Byung-Tae Lee<sup>2</sup>, Sang-Hwan Lee<sup>3</sup>, Mi-Jung Park<sup>3</sup>, and Sung-Chul Kim\*

Department of Bio-Environmental Chemistry, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea

<sup>1</sup>Department of geology, Gyeongsang National University, Jinju, 52828, Korea

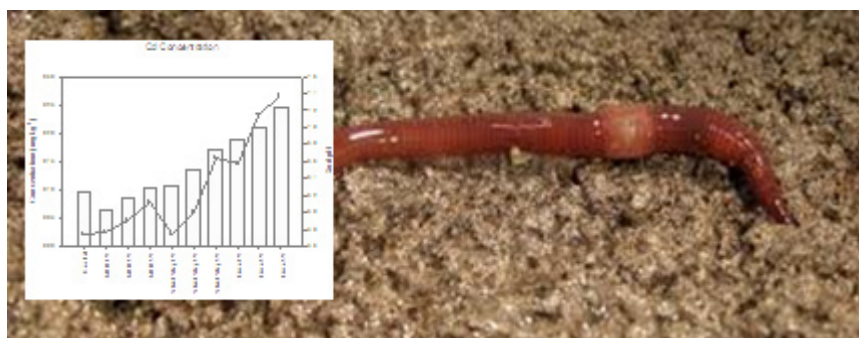
<sup>2</sup>School of Environmental Science and Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju, 61005, Korea

<sup>3</sup>Mine Reclamation Corporation, Wonju, 26464, Korea

(Received: December 17 2015, Revised: January 20 2016, Accepted: February 16 2016)

This study was conducted to evaluate effect of chemical amendments on reducing bioavailable fraction of heavy metals in soil along with ecotoxicological effect on earthworms, *Eisenia fetida*. Three different chemical amendments, lime (L), steel slag (SS), and acid mine drainage sludge (AMDS), were applied with varied application ratio (1, 3, 5%). Heavy metal contaminated soil was mixed with chemical amendments and earthworms, *Eisenia fetida*, were cultivated for 28 days. Bioavailable fraction of heavy metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) extracted with 0.1N HCl was monitored and also, mortality, growth, and metal concentration in earthworm were assessed. Result showed that all three amendments had high efficiency to reduce bioavailable fraction of heavy metals in soil. In particular, lime showed the highest reduction rate of Cu (63.9-87.7%), Pb (7.90-24.65%), and Zn (40.83-77.60%) among three amendments. No mortality of earthworm was observed during experimental period except 3% and 5% AMDS treatment indicating that application of chemical amendments is safe in terms of ecotoxicological aspect. However, no positive correlation was observed between reduction of bioavailable fraction of heavy metals in soil and earthworms. Overall, application of chemical amendments in agricultural field can be adapted for reducing bioavailable fraction of heavy metals and detoxification in soil.

**Key words:** Heavy metals, Soil, Earthworms, Mortality, Ecotoxicity



Indicator, *Eisenia fetida*, of ecotoxicity in heavy metal contaminated soil.

\*Corresponding author: Phone: +82428216737, Fax: +82428216731, E-mail: sckim@cnu.ac.kr

§Acknowledgement: This research was supported by “Establishing integrated management system for risk assessment in mining region” through the Mine Reclamation Corporation (MIRECO) funded by the Ministry of Trade, Industry, and Energy.

## Introduction

최근 국내의 산업발달에 따라 농경지의 중금속 오염문제가 대두되고 있다. 특히 휴·폐광산에서 유출되는 광산폐기물 및 갠내수에는 고농도의 중금속이 함유되어 있어 환경에 유입될 경우 주변 생태계뿐만 아니라 궁극적으로는 인간에게 악영향을 끼친다 (Seo et al., 2005; Oh et al., 2011a, 2012).

이러한 중금속 오염 토양을 복원하기 위한 방법으로 토양세척법, 토양세정법, 산추출법, 고형화법 등 다양한 ex-situ 방법이 적용되고 있으며 최근에는 화학적 안정화제를 활용한 복원방법이 널리 이용되고 있다 (Wong and Selvam, 2006; Zhao and Masaihiko, 2007). 안정화공법이란, 토양 내 안정화제를 처리하여 중금속의 형태를 용해도나 생물유효도 측면에서 생물에 영향을 미치는 독성이 낮은 형태로 변환시켜 중금속의 이동성을 감소시키고 최종적으로 위해성을 감소시키는 방법으로 오염분포가 광범위한 지역에 효과적인 것으로 알려져 있다 (Oh et al., 2011a, 2011b; Choi et al., 2012). 하지만 안정화제의 중금속 불용화에 대한 효율성은 많이 검증된 반면 효율성에 따른 생태독성 및 생태안전성에 대한 평가는 미비한 실정이다 (Yun et al., 2010; Oh et al., 2011b).

지렁이는 대표적인 토양 동물로 토양의 유기물을 섭취하고 분해하여 식물이 이용할 수 있게 해주고 토양오염을 정화시키는 것으로 알려져 있다. 이러한 이유로 지렁이는 화학물질의 토양서식생물에 대한 위해성을 평가하는 대표 지표종으로 알려져 있다 (Lee et al., 2011; Park et al., 2003).

지렁이를 활용하여 중금속 오염 지역의 오염도를 평가하거나 중금속의 생물유효도를 평가하는 연구는 널리 시행되어왔다 (Udovic and Lestan, 2007). 하지만 화학적 안정화제를 활용하여 중금속 오염 지역을 복원한 후 안정화제의 생태독성 및 안전성에 대한 검증은 아직 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 중금속으로 오염된 토양을 복원하기 위해 이용되고 있는 안정화공법에 대해 화학적 평가방법을 통한 효율성을 알아보고 지렁이를 이용해 생태 독성평가를 실시하여 최종적으로 안정화공법에 따른 효율성 및 안전성에 대해 알아보았다.

## Materials and Methods

**토양시료 채취 및 안정화제 선정** 중금속 오염 농경지의 복원에 따른 생태독성 저감을 평가하기 위한 시료 채취는 충북 단양에 위치한 유진광산 (N 37.01.52.32, E 128.14.36.32)의 인근 농경지 토양을 선택하여 시료 채취를 하였다. 토양 시료채취는 유기물층 (O층)을 제거한 후 표토 (0-30 cm)를 대상으로 실시하였으며 0.25 ha (50 m × 50 m) 내의 농경지에서 총 5군데의 시료를 채취한 후 하나의

**Table 1. Physicochemical properties and heavy metal concentration of soil used in the experiment.**

Soil texture (%)	Sand	36.9
	Silt	45.5
	Clay	17.6
Moisture contents (%)		32.6
Bulk density (g cm <sup>-3</sup> )		1.50
Chemical properties	Soil pH (1:5)	6.17
	EC (1:5)	0.86
	O.M. (g kg <sup>-1</sup> )	27.25
	CEC (cmol kg <sup>-1</sup> )	18.58
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	0.09
Heavy metals (mg kg <sup>-1</sup> )	Cd	13.36
	Pb	389.68
	Cu	63.76
	Zn	1,396.11
	As	1,227.68

시료로 조제하였다. 채취한 토양시료의 화학적 특성과 전함량 분석법을 이용한 중금속 농도는 Table 1에 제시하였다. 본 연구에 사용된 안정화제는 중금속 오염 농경지 복원에 적용 가능한 3가지 안정화제, 석회석 (lime stone), 제강 슬래그 (steel slag) 및 산성 광산 배수 슬러지 (acid mine drainage sludge)를 사용하였다.

**생태지표종 선정** 시험에 사용된 지렁이는 OECD에서 선정한 공식종인 붉은 줄지렁이 (*Eisenia fetia*)를 사용하였다. 분양된 지렁이는 배양토에서 사육조건 (사육온도 20±2°C와 광조건 400 - 800 Lux)하에 약 1개월 동안 사육한 후 시험에 사용하였다. 배양토의 수분 함량은 약 70%를 유지하기 위해 매일 수분을 보충하였으며 시험에 사용된 지렁이의 평균 무게는 약 400~600 mg 정도의 균일한 개체를 선별하여 시험을 실시하였다.

**안정화제 처리 및 급성독성시험** 생태독성 시험을 위한 안정화제 처리는 플라스틱 용기 (15 cm × 10 cm × 5 cm, LXWXD)에 2 mm로 체거름한 중금속 오염 토양 500g을 담은 후 안정화제별 처리량을 각각 1%, 3%, 5% (w/w)로 처리하였다. 안정화제의 균일한 혼합을 위해 외부에서 토양과 안정화제를 완전 혼합한 후 용기에 넣었으며 토양의 수분은 약 30%로 보정하였다. 지렁이의 급성독성시험은 OECD 시험지침에 준하여 실시하였다. 각각의 안정화제별 처리량에 따라 조제된 처리구에 선별된 지렁이 10마리를 투입하였으며 각 시험군은 3반복으로 처리하였다. 지렁이의 총 노출기간은 28일로 설정하였으며 지렁이 치사율은 시험 시작 후 14일과 28일 두 번에 걸쳐 조사하였고 지렁이의 생체량은

시험 시작 전과 후의 지렁이 무게차를 이용하여 조사하였다. 지렁이의 무게는 시험 시작 전과 후에 증류수로 3회 세척한 후 페이퍼타올을 활용하여 물기를 제거하여 측정하였다. 대조구는 안정화제를 처리하지 않은 토양에 노출시킨 지렁이로 선정하였다. 생태독성 평가를 위한 배양 조건은 지렁이 사육 조건과 같은 배양온도  $20\pm 2^\circ\text{C}$ 와 광조건 400 - 800 Lux으로 설정하였으며 명조건과 암조건은 각각 16 hr, 8 hr으로 설정하여 시험을 진행하였다. 통기를 위해 용기에 구멍을 내었으며 생태독성 시험기간에는 지렁이의 먹이는 공급하지 않았다.

**토양 시료 분석** 토양의 화학적 특성 분석은 국립농업과학원의 지침에 따라 실시하였다. 토양의 pH (1:5)와 EC (1:5)는 풍건 토양 10 g에 증류수 50 ml을 가하여 30분간 진탕하고 Whatman No.2로 여과시킨 후 pH meter (Mettler Toledo, MP200)와 EC meter (Mettler Toledo, S230)를 이용하여 각각 측정하였다. 유기물 함량과 유효인산 함량은 각각 walkely-black법과 bray No.1 방법을 이용하였으며 치환성 양이온은 1M  $\text{NH}_4\text{OAc}$ - (pH7.0)용액으로 침출 후 AAS (Atomic Absorption Spectrophotometer, AA-6800, Shimadzu, Japan)를 이용하여 측정 하였다. 생태독성을 실시한 토양 내 중금속 함량분석 (Cd, Cu, Pb, Zn)은 시험이 완료된 4주 후 처리구의 토양을 풍건하여 2 mm로 체거름한 후 생물유효태 중금속 함량 분석 방법에 사용하는 추출법 중 0.1N-HCl 추출법을 이용하여 추출한 후 AAS를 이용하여 분석 하였다.

**지렁이 생체 내 중금속 농도 분석** 지렁이 생체 내 중금속 함량을 분석하기 위해 시험이 끝난 지렁이를 각각 증류수로 세척한 후 거름종이 (filter paper)를 깔 petric dish에 1-2일 정도 관장을 실시하였다. 관장 후에 지렁이 1 마리씩 액체 질소로 처리한 후 15 mL 원심분리기 튜브에 넣고  $-80^\circ\text{C}$ 에서 동결건조를 실시하였다. 동결건조된 지렁이는 실험전에 막자사발로 갈아 중금속 분석에 사용하였다. 지렁이 생체 내 중금속 추출을 위해 황산과 질산을 각각 10 mL 씩 1:1로 첨가한 후 1일 동안 정치하였다. 하루가 지난 시료는  $130^\circ\text{C}$ 에서 1시간 가열한 후 온도를  $150^\circ\text{C}$ 로 상승하여 2시간 가열하였으며 그 후 온도를  $180^\circ\text{C}$ 로 상승하여 시료가 완전 투명해질 때 까지 1시간 동안 가열하였다. 만약 시료가 투명해지지 않았을 경우 질산을 1-2 방울 첨가하여 시료가 투명해질때까지 분해를 실시하였다. 분해가 끝난 후에는 증류수 30 mL를 첨가한 후 완전 방냉하였으며 최종 추출액은 50 mL로 정량하였다.

## Results and Discussion

### 토양 내 생물유효태 중금속 함량 변화 토양 내 안정

화제를 처리하고 4주 후의 중금속 함량 변화를 0.1N-HCl 추출법을 이용하여 분석한 결과는 Fig. 1에 나타내었다. 시험에 사용된 3종류의 안정화제는 토양의 pH를 상승시키는 물질로 중금속 오염 토양의 안정화 물질로 많이 사용되고 있다. 따라서 안정화제 처리에 따른 토양의 pH와 생물유효태 중금속 함량 변화를 살펴본 결과 Cd를 제외한 Cu, Pb, Zn의 경우 안정화 물질의 처리에 따라 생물유효태 중금속의 농도가 감소되는 결과를 나타내었다. 토양 pH의 경우 대조구 (5.74)에 비해 AMD 슬러지 (5.77-6.13), 제강슬래그 (5.74-6.65), 농용석회 (6.57-7.38)를 처리한 처리구의 토양 pH는 처리량에 따라 약 0.03-1.64 unit 정도 높았다. 생물유효태 중금속 함량 역시 토양 pH가 증가함에 따라 대조구 (Cu: 3.18, Pb: 0.65, Zn: 14.49  $\text{mg kg}^{-1}$ )에 비해 AMD 슬러지 (Cu: 2.50, Pb: 0.49, Zn: 11.89  $\text{mg kg}^{-1}$ ), 제강슬래그 (Cu: 2.39, Pb: 0.46, Zn: 13.48  $\text{mg kg}^{-1}$ ), 농용석회 (Cu: 0.78, Pb: 0.58, Zn: 6.06  $\text{mg kg}^{-1}$ ) 처리구의 농도가 낮은 것으로 조사되었다. 총 3종류의 안정화 물질 중 각 중금속 원소별 생물유효태 저감 효율이 가장 좋은 안정화 물질은 농용석회였으며 특히 Cu와 Zn의 경우 처리량에 따라 63.9-87.7%, 40.8-77.6%의 생물유효태 저감 효과를 나타내었다.

하지만 Cd의 경우 토양 pH와 생물유효태 중금속의 저감 효율은 부의 상관관계를 나타내었다. 이는 선행연구들과는 상반되는 결과로서 토양 pH가 증가함에 따라 오히려 생물유효태 Cd의 농도는 증가하였다. 지렁이를 처리한 후 토양의 생물유효태 중금속 농도 변화를 연구한 논문 결과에 의하면 지렁이를 처리한 처리구의 생물유효태 중금속의 농도가 대조구에 비해 증가하는 경향을 나타내었다 (Leveque et al., 2013; Lee et al., 2011). 이는 지렁이가 토양을 섭취한 후 지렁이의 내장 활동에 의해 섭취된 토양이 보다 미세하게 분쇄되고 소화가 끝난 분비물이 다시 지렁이의 배설물과 함께 배출됨으로써 생물유효태의 중금속이 증가할 수 있는 것이다. 본 연구에서의 생물유효태 Cd의 농도 증가 역시 이와 유사한 메커니즘에 의해 발생한 것으로 사료된다 (Leveque et al., 2013).

**지렁이 생체량 및 치사율 비교** 안정화제 처리에 따른 지렁이 생체량 비교와 치사율은 Table 2에 나타내었다. 시험 시작 전 각 처리구별 지렁이 10마리의 무게는 평균 약 3.80-4.63 g이었으며 4주후 모든 처리구에서 지렁이의 생체량은 증가하였다 (4.30-5.33 g). 처리구별 지렁이 생체량을 대조구와 비교하였을 경우 각 처리구별 지렁이의 총무게는 오히려 감소하였다. 시험 시작 전과 후의 지렁이 생체량 변화를 안정화제와 처리량에 따라 비교하였을 경우 대조구의 지렁이 생체량은 시험 후에 약 15.12% (시험 전: 4.63, 시험 후: 5.33) 증가하였으며 AMD: 2.38-12.96%, 제강슬래

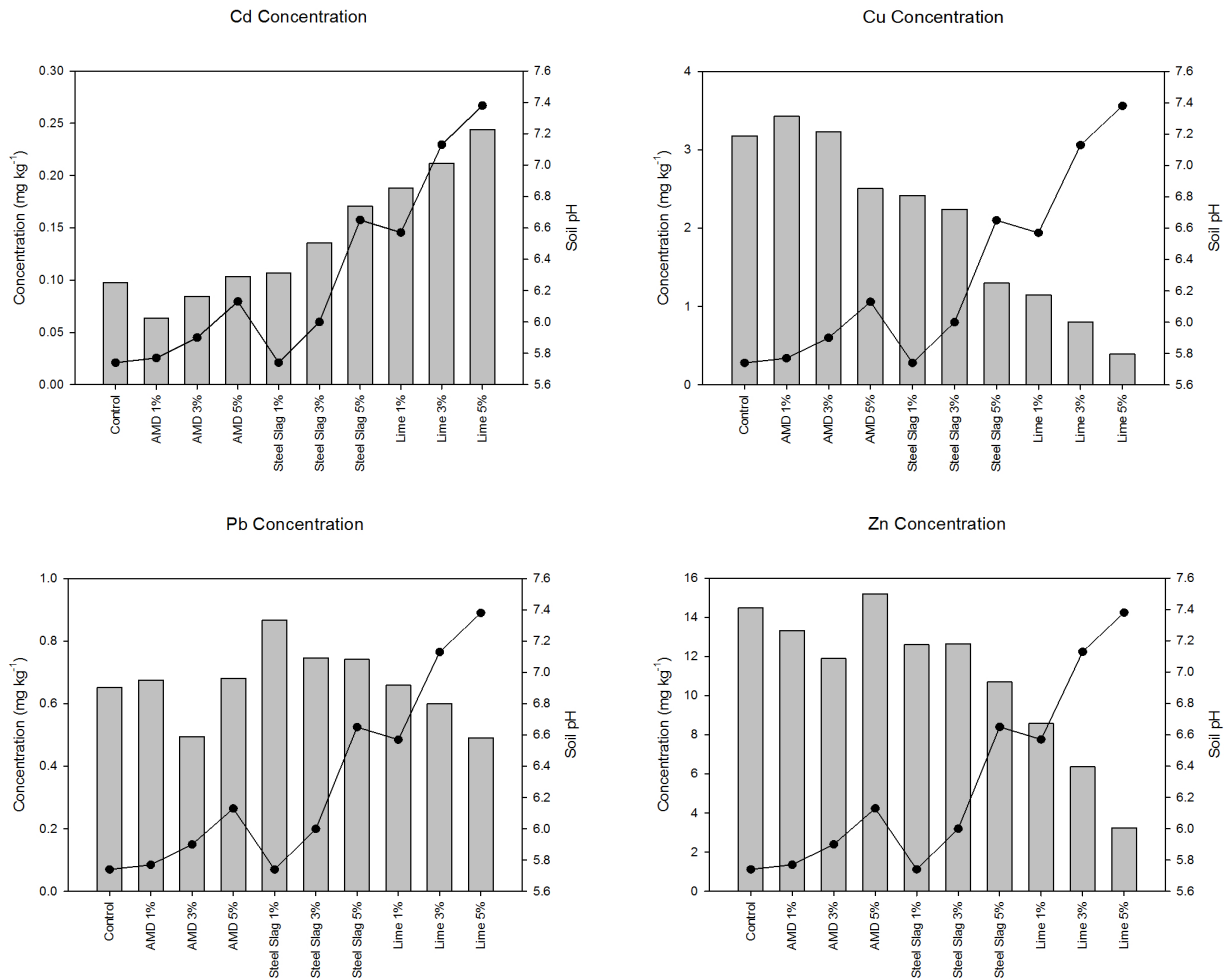


Fig. 1. Heavy metal concentration in soil extracted with 0.1N HCl and soil pH after 28 days of earthworm cultivation (Bar graph shows concentration of each heavy metals depending on amendments and line graph shows pH variance).

Table 2. Change of earthworm weight 4 weeks after experiment.

Treatments	No. of earthworm	No. of dead earthworm		Mean weight (g)		Weight increase (%)
		14 days	28 days	Initial	28 days	
Control	30	0	0	4.63	5.33	15.12
AMD 1%	30	0	0	4.63	5.23	12.96
AMD 3%	30	0	1	4.20	4.30	2.38
AMD 5%	30	2	1	4.26	4.50	5.63
Steel slag 1%	30	0	1	4.20	5.03	19.76
Steel slag 3%	30	0	0	3.80	4.80	26.32
Steel slag 5%	30	2	0	4.10	4.96	20.98
Lime 1%	30	0	0	3.83	5.06	32.11
Lime 3%	30	0	0	4.10	5.03	22.68
Lime 5%	30	0	0	3.90	4.76	22.05

그: 19.76–20.98%, 농용석회: 22.05–32.11%의 생체량 증가를 나타내었다. 각 안정화제를 비교하였을 경우 농용석회를 처리한 처리구에서의 지렁이 생체량이 가장 많이 증가하였으며 AMD 슬러지의 경우 대조구에 비해 낮은 생체량 증가를 나타내었다.

지렁이의 치사율 경우 AMD 5% 처리구의 지렁이가 14일 후 2마리, 28일 후 1마리가 치사되어 가장 높은 치사율(10%)을 나타냈으며 제강슬래그 5% 처리구에서 14일 후 2마리가 치사되었다. 농용석회의 경우 안정화제 처리량에 상관없이 지렁이의 치사는 관찰되지 않았다. AMD 처리구에서 가장

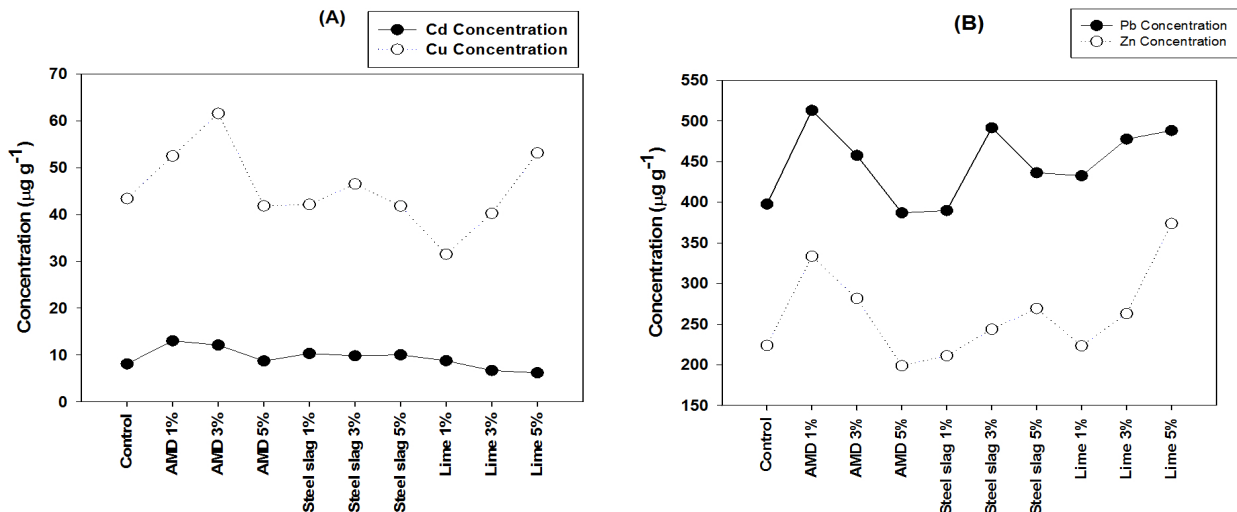


Fig. 2. Concentration of heavy metals in earthworm (A) Cd and Cu, (B) Pb and Zn.

높은 치사율과 낮은 생체량을 보인 것은 AMD슬러지의 중금속 함량이 다른 안정화제에 비해 높은 농도에 의한 것으로 사료된다 (Kim et al., 2012).

**지렁이 생체 내 중금속 함량 변화** 지렁이 생체 내의 중금속 함량은 Fig. 2에 나타내었다. 안정화제 처리에 따른 중금속의 지렁이 생체 내 결과값을 살펴보면 Cd의 경우 농용석회를 각각 3%, 5% 처리한 처리구에서는 지렁이 생체 내 Cd의 농도가 대조구 (8.11 µg g<sup>-1</sup>)에 비해 17.3%와 23.2%가 저감된 6.71, 6.22 µg g<sup>-1</sup>의 농도가 검출되었다. Copper (Cu)의 경우도 Cd와 마찬가지로 농용석회를 각각 1%, 3% 처리한 처리구 내 지렁이의 중금속 함량이 대조구 (43.40 µg g<sup>-1</sup>)에 비해 27.4%, 7.3% 저감된 31.53, 40.24 µg g<sup>-1</sup>의 농도가 검출되었으며 제강슬래그 1%와 5% 처리구의 경우 대조구에 비해 약 2.9%와 3.7% 저감된 수준으로 검출되었다. 하지만 그 외 안정화제 처리구의 경우 대조구에 비해 증가하는 경향을 나타내었으며 특히 Pb와 Zn의 경우에는 모든 안정화제에 대해 대조구보다 높은 지렁이 생체 내 중금속 함량을 나타내었다. 선행연구에 의하면 토양 내 중금속의 함량에 따른 지렁이 생체 내 중금속의 함량 변화는 안정화제의 중금속 불용화 효율성과 상관관계가 낮은 것으로 보고되고 있다 (Vandecasteele et al., 2010). 지렁이 생체 내 중금속 함량의 경우 안정화제에 의한 토양 내 불용화의 메커니즘과 다르게 지렁이 소화작용에 의해 중금속의 생물유효태 함량이 오히려 증가하는 경향을 나타내었다 (Vandecasteele et al., 2010; Lee et al., 2011). 특히 지렁이 생체 내 중금속 흡수는 피부의 접촉에 의한 노출 보다는 토양의 섭취에 의한 함량이 주요 메커니즘임을 감안한다면 지렁이 생체 내 중금속의 농도는 안정화제의 토양 내 효율성과는 상관관계가 낮은 것으로 사료 된다 (Vandecasteele et al., 2010).

## Conclusion

중금속으로 오염된 토양 복원에 적용되는 화학적 안정화 공법에 대한 효율성 및 안전성을 평가하기 위해 안정화제 처리에 따른 토양의 중금속 농도 변화와 생태 지표종인 지렁이를 이용하여 생태 독성평가를 실시하였다. 토양의 생물 유효태 중금속 변화를 모니터링 하기 위해 0.1N-HCl 추출법을 이용한 결과 3종류의 안정화제, 농용석회, 제강슬래그, AMD 슬러지, 가운데 농용석회의 중금속 안정화 효율이 각각 Cu: 63.9-87.7%, Zn: 40.8-77.6%로 가장 높았다. 지렁이를 이용한 생태독성 평가에서는 4주의 시간이 경과한 후 생체량의 변화는 대조구와 비교하였을 경우 AMD 슬러지: 2.38-12.96%, 제강슬래그: 19.76-20.98%, 농용석회: 22.05-32.11%의 생체량 증가를 나타내어 농용석회의 지렁이 생체량 증가율이 가장 높았다. 토양에 화학적 안정화제를 처리한 후 지렁이의 치사율을 검증한 결과 AMD 슬러지와 제강슬래그 각각 5%를 처리한 처리구 이외에는 치사율이 나타나지 않아 안정화제의 안전성을 검증할 수 있었다. 지렁이 생체 내 중금속 함량 변화는 농용석회를 처리하였을 경우를 제외하고는 대조구에 비해 증가하는 경향을 나타내 토양 내 중금속 저감 효율성과는 부의 상관관계를 나타내었다. 본 연구 결과, 중금속으로 오염된 농경지 복원을 위한 화학적 안정화 공법은 토양 내 중금속의 생물학적 유효태 감소에 매우 효율적이며 독성학적 측면에서는 안전한 반면 지렁이 생체 내 중금속과 같은 반치동물에 대한 생물 유효도 저감과는 상관관계가 미미하였다.

## References

Choi, J.W., K.J. Yoo, M.S. Koo, and J.H. Park. 2012. Comparison of heavy metal pollutant exposure an risk

- assessments in an abandoned mine site. *J. Korean Soc. Civil Eng. B*, 32(48):261-266.
- Kim, M.S., N.I. Koo, J.K. Kim, J.Y. Yang, J.S. Lee, and K.I. Park. 2012. Effects of soil amendments on the early growth and heavy metal accumulation of *brassica campestris* spp. *chinensis* just. in heavy metal-contaminated soil. *Korean J. Soil. Sci. Fert.* 45(6):961-967.
- Lee, S.H., H. Park, N.M. Koo, S.H. Hyun, and A. Hwang. 2011. Evaluation of the effectiveness of various amendments on trace metals stabilization by chemical and biological methods. *J. Hazard. Mater.* 188:44-51.
- Leveque, T., Y. Capowiez, E. Schreck, C. Mazzia, M. Auffan, Y. Foucault, A. Austruy, and C. Dumat. 2013. Assessing ecotoxicity and uptake of metals and metalloids in relation to two different earthworm species (*Eisenia hortensis* and *Lumbricus terrestris*). *Environ. Pollut.* 179:232-241.
- Oh, S.J., S.C. Kim, H.S. Yoon, H.N. Kim, T.H. Kim, K.H. Yeon, J.S. Lee, S.J. Hong, and J.E. Yang. 2011a. Evaluating heavy metal stabilization efficiency of chemical amendment in agricultural field: Field experiment, *Korean J. Soil. Sci. Fert.* 44:1052-1062.
- Oh, S.J., S.C. Kim, T.H. Kim, K.H. Yeon, J.S. Lee, and J.Y. Yang. 2011b. Determining kinetic parameters and stabilization efficiency of heavy metals with various chemical amendment. *Korean J. Soil. Sci. Fert.* 44:1063-1070.
- Oh, S.J., S.C. Kim, L.Y. kim Y.S. Ok, H.S. Yoon, S.M. Oh, J.S. Lee, and J.Y. Yang. 2012. Change of bioavailability in heavy metal contaminated soil by chemical amendment. *Korean J. Soil. Sci. Fert.* 45(6):973-982.
- Park, K.H., Y.K. Park, J.B. Joo, K.S. Kyeong, J.S. Sin, C.S. Kim, B.J. Park, and J.Y. Um. 2003. Risk assessment of pesticides to earthworm. *Korean J. Pestic. Sci.* 4:280-287.
- Seo, S.W., S.K. Moo, C.M. Choi, and Y.K. Park. 2005. Concentration of Zn, Cu, and Pb in soils and accumulation of its in plants around abandoned mine vicinity. *J. Life Sci.* 15(5):826-833.
- Udovic, M. and D. Lestan,. 2007. The effect of earthworms on the fractionation and bioavailability of heavy metals before and after soil remediation. *Environ. Pollut.* 148:663-668.
- Vandecasteele, B., G.D. Laing, S. Lettens, K. Jordaens, and F.M.G. Tack. 2010. Influence of flooding and metal immobilising soil amendments on availability of metals for willow and earthworms in calcareous dredged sediment-derived soils. *Environ. Pollut.* 158:2181-2188.
- Wong, J.W.C., and A. Selvam, 2006. Speciation of heavy metals during co-composting of sewage sludge with lime, *Chemosphere.* 63:980-986.
- Zhao, X.L. and S. Masaihiko, 2007. Amelioration of cadmium polluted paddy soils by porous hydrated calcium silicate. *Water Air Soil Pollut.* 183:309-315.