

## 연구논문

## 폐금속광산지역 중금속 오염 토양 모사체의 물리적 선별

정도현<sup>1,2</sup> · 차중문<sup>3\*</sup><sup>1</sup>과학기술연합대학원대학교 자원순환공학과 박사과정, <sup>2</sup>한국지질자원연구원 광물자원연구본부,<sup>3</sup>동아대학교 환경 에너지공학부 미래에너지공학전공 교수

## Physical Separation of Heavy Metals in Contaminated Soil Simulant near Abandoned Metal Mines

Do Hyun Jeong<sup>1,2</sup> and Jongmun Cha<sup>3\*</sup><sup>1</sup>Doctoral course, Resource Recycling Department, University of Science and Technology, Daejeon, Korea<sup>2</sup>Mineral Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, Korea<sup>3</sup>Professor, Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Donga-A University, Busan, Korea

\*Corresponding Author. Jongmun Cha, [jmcha@dau.ac.kr](mailto:jmcha@dau.ac.kr), Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Donga-A University, Busan, Korea

## Received

6 December 2021

## Final version Received

10 January 2022

## Accepted

22 February 2022

## Abstract

The purpose of this study was to treat heavy metals from contaminated soil simulant around abandoned mines by using physical separation techniques. As a result of magnetic separation, the average removal efficiency was shown as lead 53%, zinc 67%, arsenic 66%, and cadmium 71% and volume of highly contaminated soil was reduced by approximately 16% in the condition of more than 5,000 gauss. When the corona discharging electrostatic separation applied, the highest removal efficiency according to supplied voltages was observed as 38% for lead at -35 kV, 45% and 48% for zinc and cadmium at -30 kV, respectively and 38% for arsenic at -25 kV conditions. However, considering the cost and the volume of contaminated soil to be treated later, it was considered that the -10 kV condition was optimal.

**Key words :** Soil, Heavy Metal, Physical Separation, Magnetic Separation, Electrostatic Separation

## 요약

본 연구에서는 물리적 선별기술을 이용하여 폐금속광산 주변의 중금속으로 오염된 토양 모사체를 처리하고자 하였다. 자력선별을 적용한 경우 5,000 gauss 이상의 조건에서 평균적으로 납 53%, 아연 67%, 비소 66%, 카드뮴 71%의 제거율을 보이며 부피를 약 16% 감소시켰다. 코로나 방전형 정전선별 적용 시 공급전압에 따른 제거율을 살펴본 결과, 납은 -35 kV일 때 38%, 아연과 카드뮴의 경우 -30 kV일 때 각각 45%와 48%, 비소는 -25 kV 조건에서 38%로 가장 높았다. 하지만 비용적인 부분과 추후 처리해야 할 오염 토양의 부피를 고려할 때 -10 kV 조건이 최적이라 사료된다.

**주요어 :** 토양, 중금속, 물리적선별, 자력선별, 정전선별

## 서 론

2018년 기준 국내에는 금속광산(2,184 개소), 비금속광산(2,960 개소)과 석탄광산(400 개소)을 포함하여 총 5,544 개의 크고 작은 광산이 산재되어 있다. 그러나 전체의 약 87.4%인 4,843 개에 달하는 광산이 현재 휴광 또는 폐광된 상태이다(MIRECO, 2019). 특히 2,000여개에 달하는 폐금속광산 주변에는 광산개발활동으로 인해 발생된 광산폐기물(광물찌꺼기, 폐석 등)이 산 사면이나 계곡에 그대로 적치되어 있다. 이들이 강우나 바람에 의해 유실됨으로써 광산 주변의 수계 및 지질환경에 유입되어 지속적으로 오염시키고 있어 인간의 건강과 생태계에 직·간접적으로 악영향을 끼치고 있다(Jung *et al.*, 2004; Fernandez-Caliani *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2010).

실제로 1992년부터 2018년까지 환경부의 주도하에 실시된 폐금속광산 대상 토양오염실태조사에 따르면 광산 주변의 토양에서 주로 비소, 카드뮴 등의 함량이 토양오염우려기준과 대책기준을 초과하는 것으로 보고되었다. 이는 현재 폐금속광산 주변 지역의 중금속 오염이 굉장히 심각한 수준이며, 중금속 처리 문제가 시급한 문제임을 알려준다.

현재 폐금속광산 주변의 중금속 오염 토양을 복원하기 위해서 다양한 처리공법이 활용되고 있다. 적용되고 있는 처리 기술로는 토양 세척법(soil washing), 고형화 및 안정화법(solidification / stabilization), 토양 세정법(soil flushing), 식물정화기법(phytoremediation), 부유선별(froth flotation) 등이 있으며, 실제 현장에서는 토양 세척법과 고형화 및 안정화 공법을 주로 적용한다(Park *et al.*, 2013a; Kim *et al.*, 2014). 토양 세척법은 단기간에 오염 토양을 복원 처리할 수 있으나 비용 측면에서의 효율성 문제로 인해 광범위하게 오염되어 있는 경우에는 적용성이 낮다는 단점이 있다. 고형화 및 안정화 공법의 경우에는 오염물질이 재용출되어 2차 오염이 발생할 가능성이 있으며(Lee and Seol., 2010; Park *et al.*, 2013b), 2009년부터 중금속 함량 분석방법이 왕수추출에 의한 전함량 분석법으로 개정되어 고형화 및 안정화 공법의 적용이 어려운 실정이다(Park *et al.*, 2017). 따라서 중금속과 같은 오염원을 안전하고 근원적으로 분리 및 처리할 수 있는 기술이 요구되고 있어 이에 대한 연구가 필요한 실정이다. 기존의 중금속 처리방법을 보완하기 위해 물리적 선별 기술도 하나의 처리 방법으로 떠오르고 있다. 물리적 선별 기술은 광석으로부터 유용광물의 분리를 통해 경제성을 가진 정광을 얻는 공정으로 밀도, 입자 표면 특성, 자기적 성질과 전기 전도성 차이 등을 이용한다. 토양 세척법, 토양 세정법, 고형화 및 안정화법과 같이 화학약품을 사용하지 않고 오염원의 물리적 특성을 이용하여 오염원을 분리하고 토양을 재사용하도록 할 수 있다는 점에서

중요하다. 이를 위한 기술로는 자력선별(magnetic separation), 정전선별(electrostatic separation), 비중선별(gravity concentration) 등이 있으며 입자의 물리적 특성을 이용하여 중금속을 선별한다(Dermont *et al.*, 2008; Park *et al.*, 2013b).

본 연구에서는 폐금속광산 주변의 중금속 오염 토양 모사체를 처리하기 위한 기술을 연구하였다. 광물찌꺼기의 유실로 인해 광산 주변 지역의 중금속으로 오염된 토양을 모사하고 이로부터 자력선별, 중액선별, 정전선별 등 물리적 선별기술을 적용하여 중금속을 제거하였다. 이를 통해 납, 카드뮴과 아연 등 유해 중금속과 비소의 제거 효율을 살펴봄으로써 해당 기술의 적용 가능성을 확인하고자 하였다.

## 연구대상 지역

J광산은 경상남도 합천군 가회면에 소재하고 있는 광산으로서 생산된 광종은 금, 은, 납, 아연이며 2개 구역에서 은을 주 광종으로 생산하였다. 또한 갠구 주변에 위치한 선광장에서 선광작업도 병행하였다. J광산의 총 생산량을 보았을 때, 가행기간 동안 대규모의 채광 및 선광이 진행되었던 것으로 추정된다. 또한 환경부(ME, 2005)의 조사 결과에 따르면 광산 주변 환경에 악영향을 미칠 수 있는 오염원은 광산의 갠구 주변 광물찌꺼기장과 선광장에 광물찌꺼기 3,700 m<sup>3</sup>와 폐석 6,000 m<sup>3</sup>로 조사되었다(Table 1). 폐광 이후, 오염원이 적절한 광해방지시설을 갖추지 못하고 그대로 방치되어 있어 오랜 기간에 걸쳐 광산 주변의 수계와 토양을 오염시켰을 것으로 판단된다. 환경부에서 실시한 조사에 따르면 선광장, 광물찌꺼기장과 갠구 주변 발토양에서 비소, 카드뮴, 구리, 납, 아연의 농도가 토양오염우려기

**Table 1.** Outline of the J mine

Location	Gahoe-myeon, Hapcheon-gun, Gyeongsangnam-do		
Target metals	Gold, Silver, Lead, Zinc		
Operating period	1955~1956, 1963~1965, 1967~1971		
Accompanying minerals	Chalcopyrite, Malachite, Galena, Sphalerite, Pyrite		
Amount of production	Gold 230 g, Silver 262,660 g, Concentrated gold 75 g, Concentrated silver 146 g, Gold ore 205 t, Silver ore 372 t, Lead 60 t, Zinc 39 t		
Tailing	3,700 m <sup>3</sup> (2 EA)	Waste rock	6,400 m <sup>3</sup> (2 EA)

\*From MIRECO and Korea Ministry of Environment.

준과 대책기준을 초과하는 것으로 보고되었다. 또한 광산 주변 지질에 수반되는 광물로는 황철석, 황동석, 공작석 등이 보고되었다(ME, 2005).

## 실험재료 및 방법

### 실험재료

본 연구에서는 경남 합천군 가회면에 위치한 J광산의 광물찌꺼기와 토양을 혼합하여 광산 주변 중금속과 비소로 오염된 토양을 모사하였다. 현장 재현을 위해 환경부의 폐금속광산을 대상으로 한 실태조사 자료를 참고하여 V-type mixer를 이용해 광물찌꺼기와 토양을 1대 19의 무게비로 혼합하였으며, 이를 본 연구의 시료로 하였다.

### 실험방법

#### XRF분석

본 연구에서 사용된 시료인 중금속 오염 토양 모사체의 기본적인 화학 조성을 확인하기 위해 X선 형광분석(X-ray Fluorescence, XRF)을 실시하였다. 시료를 분말의 형태로 제조한 후 Spectro의 xSort 모델을 이용하여 시료를 분석하였다.

#### 중금속 농도 분석

연구 시료의 중금속 오염 정도를 확인하기 위하여 중금속 함량 분석을 실시하였다. 중금속 오염 토양 모사체를 토양오염공정시험기준에 따라 왕수분해 후 구리, 납, 아연, 비소와 카드뮴을 유도결합플라즈마 분광분석계(Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry, ICP-OES)를 사용하여 분석하였다. 분석기기는 ThermoFisher Scientific의 ICP-7000 series 모델을 사용하였다.

#### 중액선별

중액선별은 선별 시 고유한 비중을 가지고 있는 액체를 사용하여 밀도 차이에 따라 선별하는 방법이다. 선별하려는 두 물질의 중간 비중을 가지고 있는 액체 속에 투입할 경우 정확하게 분리될 것이다. 일반적으로 중금속은 비중이 4보다 큰 금속을 칭하고, 일반적인 토양은 2.5~3.0 정도의 비중을 가지고 있다. 시료가 중금속으로 오염되어 있다면 일반적인 토양에 비해 더 큰 비중을 보일 것이다. 만약 오염 토양과 일반 토양의 중간 비중을 가지는 시약 속에 시료를 투입할 경우 정확하게 분리가 될 것이다. 따라서 중금속 오염 토양의 경우 비오염토양과 비중의 차이가 있을 것이라 판단되어 중액선별을 통해 납, 아연, 비소와 카드뮴으로 오염된 시료를 일반토양과 중금속으로 오염된 토양으로 분리하고자 하였다. 선별에는 일반토양과 중금속의 비중을 고려

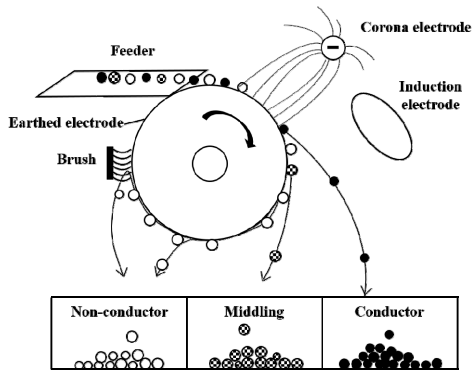
하여 비중이 2.967인 1,1,2,2-Tetrabromoethane을 중액으로 사용하여 정량한 시료를 중액시약에 유리막대로 저어준 후 1시간 동안 정제시켜 분리되도록 하였다. 분리된 산물은 ICP-OES를 사용하여 분석하였다.

#### 자력선별

자력선별은 외부에서 주어지는 자력에 대해 각 물질 간 고유한 자화율의 차이를 이용하는 선별법이다. 자화율의 차이에 따라 크게 강자성, 약자성과 비자성으로 나뉜다. 문헌 자료를 통해 광물찌꺼기 내에 비소가 많이 함유되어 있는 것을 확인하였다(ME, 2005). Park *et al.*(2013b)의 연구에 따르면 비소의 경우 적철석, 자철석 등의 철산화물과 함께 거동하며, 철 물질이 자력선별 시 비소의 제거에 영향을 줄 수 있어 비소 오염물질의 제거에 효과적이라고 하였다. 철은 대표적인 자성물질로 자력선별을 적용하여 쉽게 제거할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 비소를 제거하기 위해 자력선별법을 적용하여 철 성분을 자성물질로 분리하고자 하였다. 비소의 제거를 주목적으로 하며, 납, 아연, 카드뮴의 제거 효과도 함께 살펴보고자 하였다. 자력선별은 봉자석을 이용하여 건식으로 수행하였으며, 자석의 세기를 500, 1,000, 2,000, 3,000, 5,000, 7,000, 10,000 gauss로 달리하며 비소와 중금속의 제거에 미치는 영향을 확인하고자 하였다.

#### 정전선별

정전선별은 높은 전기장의 영향 아래 하전된 입자들을 반발력과 인력에 기초하여 분리하는 선별법으로, 전도성 물질과 비전도성 물질이 혼합된 산물을 분리할 수 있다. 문헌 조사를 통해 대상 지역이 구리, 납, 아연, 카드뮴과 비소로 오염되어 있는 것으로 확인되었다(ME, 2005). 또한 광산 주변 지질에 수반되는 광물로 황동석, 공작석, 방연석, 황철석, 섬아연석 등이 있는 것으로 조사되었다. 따라서 중금속이 방연석, 섬아연석, 황비철석, 그리놉카이트 등의 전도성이 있는 황화광물 형태로 존재할 가능성이 있다고 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 중금속 오염 토양 모사체를 가장 일반적이며 이온 충돌 방법으로써 타 하전 방식에 비해 입자 하전율이 가장 높은 코로나 방전형 정전선별법을 이용하여 conductor로 제거하고자 하였다. 코로나 방전형 정전선별은 공급전압의 세기, 접지전극의 회전 속도, 날개의 각도 등 많은 변수에 영향을 받는다(Luga *et al.*, 1998). 본 연구에서는 오염 토양으로부터 중금속의 제거를 위한 코로나 방전형 정전선별의 기초 연구로써 공급전압에 따른 중금속 제거 효과를 알아보고자 하였다. Nippon Magnetic Inc.의 ECSI-1-250 모델(Fig. 1)을 사용하여 접지전극의 속도, 급광속도, 전극 간 거리와 날개의 각도를 고정하고, 공



**Fig. 1.** Equipment and principle for Corona discharging electrostatic separation.

**Table 2.** Conditions for corona discharging electrostatic separation

Experimental conditions	
Voltage	-5 kV ~ -35 kV
Rotational speed of earthed electrode	20 Hz
Feeder speed (supply volume)	20
Distance between corona electrode and earthed electrode	5 cm
Angle of hopper wing	0°

급전압을 -5 kV에서 -35 kV로 조절하며 본 연구 시료를 conductor, middling과 non-conductor로 분리하였다(Table 2).

## 실험 결과

### XRF 분석

연구 시료를 대상으로 XRF 분석을 실시한 결과 대부분  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 와  $\text{SO}_3$ 로 구성되어 있음을 알 수 있었다(Table 3). 일반적인 토양과는 달리  $\text{SO}_3$ 가 11% 정도 나타

**Table 3.** Chemical composition of studied sample (unit: %)

Chemical composition							
$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SO}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{ZnO}$	$\text{As}_2\text{O}_3$
40.98	25.65	17.31	11.07	1.65	1.06	0.88	0.47

**Table 4.** Initial concentration of the studied sample

(unit : mg/kg)					
	Mine tailing	Soil	Studied Sample	Acting criteria	Warning criteria
Cu	1,093	25	74	450	150
Pb	21,107	24	1,022	600	200
Zn	58,267	72	3,044	900	300
As	30,200	9	1,574	75	25
Cd	1120	N.D.	50	12	4
Fe	294,293	67,305	74,397	-	-

**Table 5.** Result of dense medium separation (unit: weight %)

Float	Middling	Sink	Loss
88.6	5.3	4.6	1.5

나는 것으로 보아 시료 내에 다량의 황화광물이 존재하는 것으로 판단되며, 또한  $\text{ZnO}$ 가 0.88%,  $\text{As}_2\text{O}_3$ 가 0.47% 존재하는 것으로 보아 아연과 비소의 농도가 특히 높은 것으로 확인되었다.

### 중금속 농도 분석

중금속 오염 토양 모사체의 중금속 함량 분석 결과를 살펴보면(Table 4), 구리 74 mg/kg, 납 1,022 mg/kg, 아연 3,044 mg/kg, 비소 1,574 mg/kg, 카드뮴 50 mg/kg으로 구리를 제외한 납, 아연, 비소, 카드뮴 농도가 토양오염대책기준을 약 1.7~20배 초과하는 것으로 나타나 중금속으로 심각하게 오염되어 있음을 확인하였다. 중금속의 농도가 높은 원인은 광산에서 생산된 광종과 연관된 것으로 판단된다.

### 중액선별

중금속으로 오염된 토양을 중액선별의 원리를 이용하여 float, middling과 sink로 분리하였고, 각각의 무게비는 Table 5와 같다. 실험 결과를 살펴보면, 투입된 시료의 88.6%가 부상된 것으로 보아 대부분 비중이 2.968 이하인 일반토양으로 존재하는 것으로 확인되었다. 비중이 2.968 정도인 middling은 전체의 5.3%를 차지하며, 이는 토양 입자 내에 중금속이 일부 함유되어있는 것으로 사료된다. 중금속은 전체의 4.6%를 차지하는 sink로 선별된 것으로 판

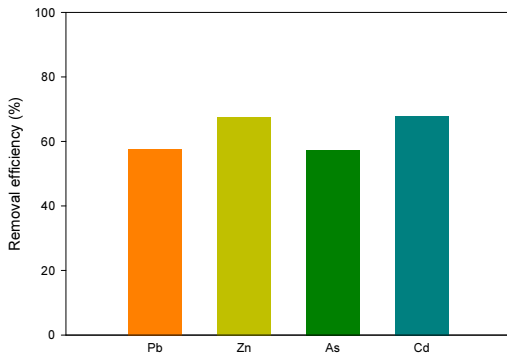
단된다.

중역선별로 분리된 산물의 중금속 함량 분석 결과(Table 6), 침강 산물에 납, 아연, 비소와 카드뮴이 농축되었음을 확인하였다. Float의 경우, 원 시료 대비 부유 산물의 제거율을 계산해보면 납, 아연, 비소, 카드뮴이 각각 57.7%, 67.6%, 57.6%, 68.0%의 제거율을 보였다(Fig. 2). 또한, sink의 경우 원 시료에 대비 납, 아연, 비소, 카드뮴이 각각 525%, 1,099%, 729%, 890%까지 농축됨을 확인할 수 있었다(Fig. 3). Float에서 아연, 비소와카드뮴의 농도가 여전

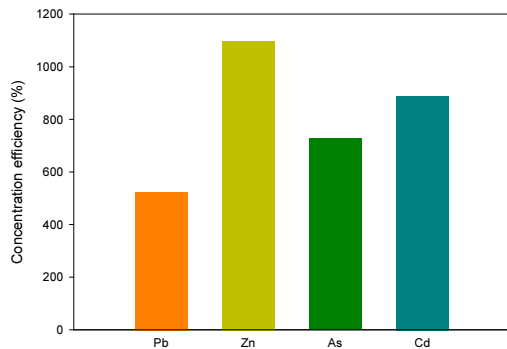
히 토양오염대책기준을 초과하는 것을 관찰할 수 있는데 이는 아연, 비소와 카드뮴의 일부가 저비중 산물로 존재하는 것으로 판단된다. 결론적으로 비중의 차이를 이용하여 오염된 토양의 중금속 함량을 낮출 수 있는 것을 확인하였고, 고오염 토양의 부피를 약 11% 감소시킬 수 있었다.

**Table 6.** Heavy metal concentration of float, middling and sink (unit: mg/kg)

	Pb	Zn	As	Cd
Float	432	987	668	16
Middling	3,975	9,147	5,964	135
Sink	6,390	36,500	13,060	495



**Fig. 2.** Removal efficiency of heavy metals from studied sample by the dense medium separation.



**Fig. 3.** Concentration efficiency of heavy metals from studied sample by dense medium separation.

**자력선별**

자석의 세기를 변화하였을 때 자성 시료와 비자성 시료로 분리된 결과를 Table 7에 나타내었다. 자성 시료는 500 gauss 조건일 때 0.18% 선별되었고 자석의 세기가 증가할수록 비율이 증가하였다. 5,000 gauss 조건부터 비자성 시료보다 자성 시료로 더 많이 선별되었으며 7,000 gauss 조건부터는 약 84%의 비율을 보였다. 3,000~5,000 gauss 사이 구간에서 선별된 자성 시료의 양이 급격하게 증가하고 반대로 비자성 시료의 양이 급격하게 감소하는 결과로부터 해당 구간에 약자성 물질이 많이 존재하는 것으로 판단되었다.

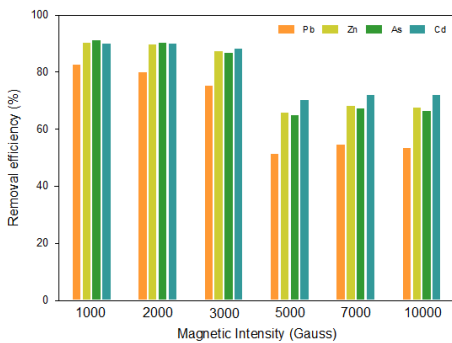
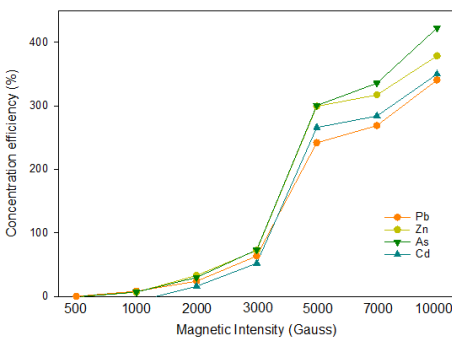
자력선별의 결과로 분리된 자성 시료와 비자성 시료의 화학 분석 결과를 Table 8에 나타내었다. 분석 결과를 살펴보면, 예상과는 달리 비소가 자성 산물이 아닌 비자성 산물에 농축되는 것으로 나타났다. 납, 아연과 카드뮴도 비자성 산물에 농축되며 자석의 세기가 증가할수록 그 함량이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 비자성 광물인 황화광물때문이라 사료된다. 자성 산물의 경우 모든 조건에서 원 시료보다 중금속의 함량이 낮지만, 자석의 세기가 증가할수록 농도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 자성 산물 내 납, 아연, 비소와 카드뮴의 제거율을 보면(Fig. 4), 1,000 gauss 조건에서 원 시료 대비 납 82.5%, 아연 90.3%, 비소는 91.0%, 카드뮴 90.0%의 제거율을 보였으나 자석의 세기가 증가할수록 제거율이 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 자석의 세기가 증가함에 따라 중금속이 소량 함유된 약자성 시료가 자성 산물로 선별되어 나타나는 현상으로 사료된다. 비자성 산물 내 중금속의 농축률을 살펴보면, 자석의 세기가 증가할수록 농축률이 증가하는 양상을 보이

**Table 7.** Result of magnetic separation (unit: weight %)

Gauss	Magnetic	Non-magnetic	Loss
500	0.18	99.76	0.05
1,000	6.65	93.17	0.18
2,000	22.13	77.85	0.02
3,000	41.40	58.52	0.10
5,000	80.75	19.19	0.06
7,000	84.32	15.63	0.05
10,000	84.56	15.40	0.04

**Table 8.** Heavy metal concentration of magnetic and non-magnetic products (unit: mg/kg)

	Gauss	Pb	Zn	As	Cd
Magnetic	500	-	-	-	-
	1,000	179	294	141	5
	2,000	204	321	156	5
	3,000	255	389	209	6
	5,000	498	1,044	556	15
	7,000	465	968	515	14
	10,000	478	990	531	14
Non-magnetic	500	1,022	3,022	1,564	43
	1,000	1,106	3,241	1,681	46
	2,000	1,265	4,048	2,043	58
	3,000	1,672	5,247	2,730	76
	5,000	3,495	12,155	6,306	183
	7,000	3,771	12,706	6,860	192
	10,000	4,504	14,571	8,225	225

**Fig. 4.** Removal efficiency of heavy metals from studied sample by the magnetic separation.**Fig. 5.** Concentration efficiency of heavy metals from studied sample by the magnetic separation.

는데 5,000 gauss 조건부터는 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 5). 이는 납, 아연, 비소와 카드뮴의 함량이 낮은 토양이 해당 조건부터 자성 산물로 다량 선별되어 비자성 산물 내 중금속의 함량이 높아지고, 자성 산물 내 제거율이 감소된 것으로 판단된다. 하지만 고도로 오염된 토양의 부피는 20% 이하로 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 상대적으로 저자력 조건보다는 제거율이 다소 낮아졌지만 오염 부하량을 줄일 수 있는 5,000 gauss 이상의 조건이 적용되어야 할 것으로 판단된다.

500 gauss와 1000 gauss 조건에서 일부 원소가 양의 제거율을 보임과 동시에 음의 농축률을 보이는 현상이 나타났다. 자성과 비자성 산물 모두 중금속과 비소의 함량이 원 시료보다 낮은 것으로 분석되었다. 이는 시료를 균질하게 하고자 노력하였으나 일부 오류가 있는 것으로 사료된다.

### 정전선별

코로나 전극에 공급되는 전압의 세기에 따른 conductor, middling과 non-conductor의 선별 결과를 Table 9에 나타내었다. 시료에 고전압을 인가할수록 middling의 양은 감소하는 양상을 보인 반면, non-conductor는 증가하는 양상을 보인다. 이는 전압이 높을수록 시료가 강하게 하전되어 거울상 힘의 영향을 많이 받아 회전하는 접지전극에 더 오래 붙어있다 회수되기 때문이다. Conductor의 경우 -20 kV 이상의 전압 공급 시 소량 선별됨을 확인하였다.

정전선별을 통한 중금속의 제거 효율을 알아보기 위해 각 산물에 대해 화학 분석을 진행하였다(Table 10). 분석 결과, 납, 아연, 비소와 카드뮴을 conductor에 농축시켜 분리 대상으로 하였으나 non-conductor에 농축된 것을 확인할 수 있었다. 먼저 conductor의 경우 -30 kV 조건에서 납이 36.9%, 비소가 23.1% 제거되고, 아연이 23.0%, 카드뮴이 10.0% 농축되는 결과를 보였다. 전압을 -35 kV 공급하였을 때 제거율이 납 53.0%, 아연 12.9%, 비소 45.0%, 카드뮴 30.0%로 확인되었다. 정전선별을 통한 분리대상으로 하였

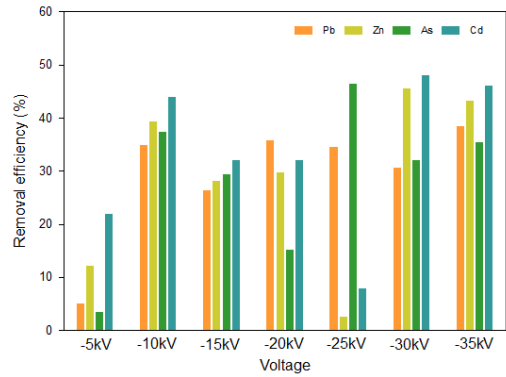
**Table 9.** Result of corona discharging electrostatic separation (unit: %)

	Conductor	Middling	Non-conductor	Loss
-5 kV	0	91.93	5.97	2.10
-10 kV	0	71.44	27.19	1.37
-15 kV	0	53.23	44.80	1.97
-20 kV	0.03	56.10	41.69	2.18
-25 kV	0.08	52.12	45.40	2.40
-30 kV	0.14	50.34	47.30	2.22
-35 kV	0.30	46.14	50.94	2.62

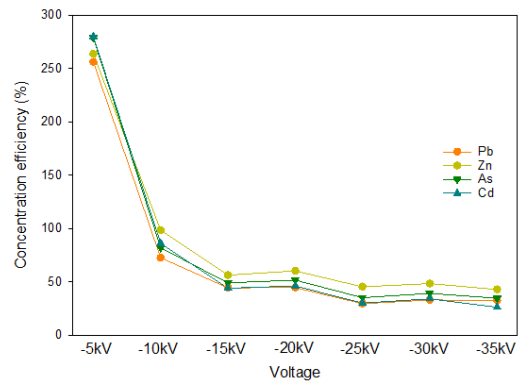
**Table 10.** Heavy metal concentration of conductor, middling and non-conductor by the corona discharging electrostatic separation (unit: mg/kg)

	Voltage	Pb	Zn	As	Cd
Conductor	-30 kV	645	3745	1210	55
	-35 kV	480	2650	865	35
	-5 kV	971	2674	1519	39
	-10 kV	665	1849	986	28
	-15 kV	752	2190	1111	34
Middling	-20 kV	657	2139	1335	34
	-25 kV	669	2964	842	46
	-30 kV	709	1656	1068	26
	-35 kV	630	1728	1016	27
Non-conductor	-5 kV	3639	11067	5960	190
	-10 kV	1762	6036	2861	93
	-15 kV	1475	4754	2346	72
	-20 kV	1477	4876	2384	73
	-25 kV	1322	4422	2127	65
	-30 kV	1358	4513	2190	67
	-35 kV	1355	4343	2117	63

으나, 예상과는 반대되는 결과가 도출되었다. 원인을 파악하기 위해 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다. 원시료 대비 middling 내 납, 아연, 비소와 카드뮴의 제거율을 Fig. 6에 표시하였다. 공급전압이 -35 kV 조건에서 납이 38.4%, -30 kV의 조건에서 아연과 카드뮴이 각각 45.6%와 48%, -25 kV 조건에서 비소가 46.5%로 제거율이 높게 나타났다. 해당 결과로부터 목적하는 중금속 원소에 따라 공급전압을 달리해야 할 것으로 판단된다. 하지만 고전압을 인가한 조건에서 non-conductor로 분리되는 고오염 토양의 양이 많아지고 전력을 공급하기 위한 비용이 증가하는 것을 고려하였을 때, 비소와 중금속의 제거율은 유사하나 고오염 토양의 부피를 전체의 약 27%로 감소시킬 수 있는 -10 kV 조건이 최적의 조건이라 사료된다. Fig. 7은 non-conductor 내 농축률을 보여주는 그래프로, 초기 조건인 -5 kV에서 약 270%로 가장 높았고 공급되는 전압이 높아질수록 농축률이 떨어지는 양상을 볼 수 있다. 이는 고전압 조건에서 거울상 힘의 영향이 커져 일반토양의 비율이 높은 중금속 함유 시료가 non-conductor로 많이 선별되기 때문이라 사료된다.



**Fig. 6.** Removal efficiency of heavy metals from studied sample by the corona discharging electrostatic separation.



**Fig. 7.** Concentration efficiency of heavy metals from studied sample by the corona discharging electrostatic separation.

## 결론

본 연구에서는 폐금속광산 주변의 중금속으로 오염된 토양을 모사하여 이를 처리하기 위해 물리적 선별기술인 중액선별, 자력선별과 코로나 방전형 정전선별을 적용하였다. 이를 통해 오염 토양 내 존재하는 비소, 카드뮴 등 중금속의 제거율을 살펴봄으로써 해당 기술의 적용 가능성에 대해 연구하였다. 환경부의 실태조사 결과를 참고하여 시료를 제조하였고 사용된 시료의 중금속 함량을 분석한 결과, 납, 아연, 비소와 카드뮴이 토양오염대체기준을 초과하는 것으로 나타나, 고농도로 오염되어 있음을 확인하였으며 실태조사에서와는 달리 구리의 함량이 토양오염 우려기준 이하로 분석되었다.

중금속을 함유한 입자와 일반 토양을 분리하기 위해 비중의 차이를 이용하는 중액선별을 적용하였으며, 납, 아연,

비소, 카드뮴을 효과적으로 제거할 수 있음을 확인하였다. 일부 중금속이 저비중의 형태로 존재하여 제거가 되지 않았으나, 고농도로 오염된 토양에서 납 57%, 아연 67%, 비소 57%, 카드뮴 68%를 제거하며, 부피도 12% 가량 줄일 수 있었다. 자력선별을 이용한 납, 아연, 비소와 카드뮴의 제거 가능성을 확인하였다. 자석의 세기가 증가할수록 중금속이 비자성 물질에 농축되었다. 전체적인 결과를 살펴 보았을 때, 중금속 오염 토양에 자력선별을 적용할 시 원시료로부터 납 53%, 아연 67%, 비소 66%, 카드뮴 71%를 제거해 오염 부하량을 절반 이하로 낮추며, 원시료의 80% 이상 회수할 수 있는 5,000 gauss 이상의 조건을 적용하는 것이 효과적이라고 사료된다. 정전선별을 오염 토양에 적용하였을 때, 중금속이 전압이 증가할수록 거울상 힘의 영향을 크게 받아 non-conductor에 농축되는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구 조건에서의 전체적인 결과를 살펴보았을 때 납, 아연, 비소와 카드뮴이 주로 고전압을 공급한 경우 제거율이 높았다. 하지만 처리해야 하는 토양의 부피가 증가하며 고전압을 가하기 위한 비용도 증가함을 고려할 때, 평균 약 39%의 제거율을 보이며 고오염 토양의 부피를 27%로 줄일 수 있는 -10 kV 조건이 최적의 조건이라 사료되며, 변수에 따른 영향을 많이 받으므로 추후 타 변수에 대한 연구도 수행되어야 할 것으로 사료된다.

물리적 선별기술을 적용하였지만 여전히 토양오염우려 기준을 초과하는 것으로 확인되었다. 하지만 중금속과 비소를 특정 산물에 농축시켜 오염 부하량을 낮추며 고오염 토양의 부피를 줄였다는 점에서 전처리로서 활용 가능성은 있는 것으로 판단된다. 물리적 선별을 이용하여 전처리 후 부유선별 공정을 연계하여 적용할 경우 중금속과 비소의 추가적인 제거가 가능할 것으로 사료된다.

## 사 사

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. 2020R1F1A1071486) and in part by the Sabbatical Program of Dong-A University.

## References

Dermont, G., Bergeron, M., Mercier, G., and Richer-Lafleche, M., 2008. Soil washing for metal removal: a review of

- physical/chemical technologies and field applications, *Journal of Hazardous Materials*, 152, p.1-31.
- Fernandez-Caliani, J.C., Barba-Brioso, C., Gonzalez, I., and Galan, E., 2009. Heavy metal pollution in soils around the abandoned mine sites of the iberian pyrite belt (southwest spain), *Water, Air, & Soil Pollution*, 200, p.211-226.
- Igua, A., Neamtu, V., Suarasan, I., Morar, R., and Dascalescu, L., 1998. Optimal high-voltage energization of corona-electrostatic separators, *IEEE transactions on Industry Applications*, 34(2), p.286-293.
- Jung M.C., Jung, M.Y., and Choi, Y.W., 2004. Environmental assessment of heavy metal around abandoned metalliferous mine in korea, *The Korean Society of Economic and Environmental Geology*, 37(1), p.21-33.
- Kim, J.H., Kim, M.G., Kim, W.R., and Han, O.H., 2014. Study on as removal from mine tailing using MGS gravity separator, *Journal of the Korean Institute of Resources Recycling*, 23(5), p.36-43.
- Korea Ministry of Environment(ME), 2005. *Survey on Soil Pollution in Abandoned Metal Mines*.
- Lee, I.H. and Seol, M.S., 2010. A study of the remediation of lead contaminated soil in a clay shooting range with soil washing, *Journal of the Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, 15(5), p.23-31.
- Lee, P.K., Youm, S.J., Jung, M.C., Lee, J.S., and Kwon, H.H., 2010. Physicochemical characteristics of tailings from the various types of mineral deposits, *The Korean Society of Economic and Environmental Geology*, 43(3), p.235-248.
- Mine Reclamation Corporation(MIRECO), 2019. *Yearbook of MIRECO Statistics*.
- Park, C.O., Kim, J.S., Seo, S.W., Lee, Y.J., Lee, J.Y., Park, M.J., and Kong, S.H., 2013. Enhanced separation technique of heavy metal (Pb, Zn) in contaminated agricultural soils near abandoned metal mine, *Journal of the Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, 18(7), p.41-53.
- Park, C.O., Kim, J.W., Park, J.H., Lee, Y.J., Yang, I.J., and Lee, J.Y., 2013. Application of a soil separation system for the remediation of arsenic contaminated soil in a metal mining area, *Journal of the Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, 18(5), p.56-64.
- Park, J.H., Park, J.H., Yang, S.C., Kim, J.N., Yu, S.H., and Jung, M.Y., 2017. The properties and remediation technologies of contaminated soil in the vicinity of daebong mine, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 54(6), p.637-645.



---

**정 도 현**

현재 과학기술연합대학원대학교 자원순환공학과 박사과정  
(本學會誌 第58卷 第1号 参照)

---

---

**차 종 문**



1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1996년 서울대학교 대학원 자원공학과 공  
학석사  
2007년 미국 콜로라도주립대학교 대학원  
토목환경공학과 공학박사

현재 동아대학교 환경·에너지공학부 미래에너지공학전공 교수  
(E-mail; jmcha@dau.ac.kr)

---