

《原著》

## 폐금속 광산지역 농경지 납, 아연 오염 토양의 중금속 고도선별

박찬오<sup>1,4</sup> · 김진수<sup>2</sup> · 서승원<sup>2</sup> · 이영재<sup>3</sup> · 이재영<sup>4</sup> · 박미정<sup>5</sup> · 공성호<sup>6\*</sup>

<sup>1</sup>한국광물자원공사 기술연구원

<sup>2</sup>아이나환경코리아 부설연구소

<sup>3</sup>고려대학교 지구환경과학과

<sup>4</sup>서울시립대학교 환경공학과

<sup>5</sup>한국광해관리공단 광해기술연구소

<sup>6</sup>한양대학교 화학공학과

## Enhanced Separation Technique of Heavy Metal (Pb, Zn) in Contaminated Agricultural Soils near Abandoned Metal Mine

Chan Oh Park<sup>1,4</sup> · Jin Soo Kim<sup>2</sup> · Seung Won Seo<sup>2</sup> · Young Jae Lee<sup>3</sup> · Jai Young Lee<sup>4</sup>

Mi Jeong Park<sup>5</sup> · Sung Ho Kong<sup>6\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Technology Research, Korea Resources Corporation

<sup>2</sup>Research Institute, Aina Environmental Group Korea Co. Ltd.

<sup>3</sup>Department of Earth & Environmental Sciences, Korea University

<sup>4</sup>Department of Environmental Engineering, The University of Seoul

<sup>5</sup>Institute of Mine Reclamation Technology, Mine Reclamation Corporation

<sup>6</sup>Department of Chemical Engineering, Hanyang University

### ABSTRACT

The study is to propose the optimal separation technique of heavy metals (Pb and Zn) contaminated in soil for improving the removal efficiency by various applicable techniques. The heavy metal contaminated soil samples near abandoned mine X-1 and X-2 were used for the study. Firstly, the wet classification process was shown more than 80% of removal efficiency for lead and zinc. Meanwhile, the magnetic separation process was shown low removal efficiency for lead and zincs because those heavy metals were non-magnetic materials. For the next step, the flotation separation process was shown approximately 24.4% of removal efficiency for zinc, while the gravity concentration process was shown approximately 57% of removal efficiency for lead, and 19.9% of removal efficiency for zinc, respectively. Therefore, zinc contaminated in soil would be effectively treated by the combination technique of the wet classification and the flotation technique. Meanwhile, lead contaminated in soil would be effectively treated by the combination technique of the wet classification process and the flotation process. Furthermore, the extraction of organic matter was shown more effective with aeration, 3% of hydrogen peroxide and 3% of lime such as calcium hydroxide.

**Key words :** Heavy metal (Lead, Zinc) contamination in soil, Abandoned metal mine, Separation technique of heavy metal, Soil restoration

### 1. 서 론

국내 광업의 급속한 쇠퇴로 인해 국내의 총 2006개 광산 중 약 730개소(36.4%)만이 가행 광산이고 나머지 약

1,276개소(63.6%)는 폐광산인 실정이다. 폐광산 중 338개소의 석탄광산을 제외한 약 936개소(94.7%)가 일반광산으로 알려져 있다(Lee et al., 2010; Park et al., 2010b). 이러한 폐금속 광산 지역 및 인근 지역에 과거 광업 활

\*Corresponding author : shkong@hanyang.ac.kr

원고접수일 : 2013. 9. 30 심사일 : 2013. 11. 14 게재승인일 : 2013. 11. 14

질의 및 토의 : 2014. 2. 28 까지

동 과정에서 폐석, 광미, 광산 폐수 등의 광산 폐기물이 방치되어 기후에 의해 광산 하부 지역의 농경지나 인근으로 이동되어 중금속 오염을 야기하고 있다. 그러한 중금속 오염은 산림훼손, 산성광산배수 유출, 폐광석 및 광미 유실, 지반침하, 소음·진동 및 먼지날림 등의 다양한 환경 문제를 발생하였으며, 인간 건강과 주변 생태계를 위협하는 심각한 문제로 두각되고 있다(Jung et al., 2004; Lee et al., 2010).

이러한 실정에서 중금속 오염에 대해 지구화학적 기술, 화학 공학, 환경 공학 및 관련된 다양한 기술 분야의 전문가들은 환경 위해성 평가 및 조사, 오염 물질의 이동 모델, 오염원의 물리 화학적 특성 규명 등과 같은 다양한 노력을 기울이고 있다. 그리고 중금속 오염 토양 복원 및 안정화를 위한 일반적인 방법으로는 in-situ 및 ex-situ의 다양한 공법이 활용되고 있다. 그러한 방법으로 고형화(solidification), 안정화(stabilization), 부유선별(flotation), 토양 세척법(soil washing), 토양 세정법(soil flushing) 및 최근 연구가 진행되고 있는 동전기법(electrokinetics), 생물침출(bioleaching), 식물정화법(phyto-remediation) 등이 알려져 있다(Mulligan et al., 2001; Park et al., 2010a). 이렇게 알려진 공법들 중 고형화 및 안정화 공법과 토양 세척법을 주로 적용하고 있다. 그러나 고형화 및 안정화 공법은 중금속의 토양 내 이동성을 제한하여 중금속 재용출되는 문제점을 가지고 있으며, 토양 세척법 또한 중금속의 특성에 따라 효율성 및 적용성에 차이가 있다(Dermont et al., 2008; Lee et al., 2009; Lee and Seol, 2010). 따라서 중금속 오염 토양의 효율적인 복원 및 안정화 기술을 접목하기 위해서 다양한 공법 적용을 통해 최적의 방안이 필요한 실정이며, 각 중금속의 특성에 따른 최적의 공법 적용 연구가 필요한 시점이다.

현재까지 국내의 휴폐광 금속광산 주변의 중금속 오염 종류 및 빈도는 국내의 휴폐광 금속광산 주변 중금속 환경 오염 평가 연구(Jung et al., 2004)에 따르면 중금속 오염 중 비소가 가장 높은 빈도를 보이고, 카드뮴, 구리, 납, 아연 등의 오염 빈도를 보이고 있다. 가장 오염 빈도가 높고 그 피해의 위해성이 높은 비소의 오염 처리에 대한 연구는 거동 특성, 용해도 특성, 흡착 특성 연구 등 활발히 진행되어왔다(Lee et al., 2010; Chon et al., 2009; Jeong et al., 2008; Kim et al., 2009; Kim et al., 2012). 그러나 납/아연의 경우 오염에 따른 피해의 정도나 국내 오염 빈도에 비해 구체적인 기술 개발 연구나 대책이 부족한 실정이다. 이에 본 연구는 납/아연의 오염토 처리 연구에 초점을 맞추어 폐광산 인근의 농경지

내 중금속 오염 토양에 다양한 선별 처리 기술을 적용하여 효율적이고 최적의 납/아연 오염 토양 선별 처리 복합 기술 적용 및 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 대상 폐광산 선정 및 오염토 시료 채취·분석

본 연구를 위해 연구 대상 광산을 한국 광해 관리 공단에서 수행한 폐광산 조사보고서(Mireco, 2011, 2012)에 근거하고, 그 중 폐광산 근처 중금속 오염 농경지 토양을 대상으로 납, 아연 등 중금속으로 오염된 토양이 보고된 정밀 조사서 등 문헌들을 검토하여 강원도의 X-1 광산 주변의 농경지 토양과 경상북도의 X-2 광산 주변의 농경지 토양을 선정하였다. 선정 지역에서 X-1 광산 인근의 A 전(田) 지역, X-2 광산 인근의 C 답(畓) 지역에 각 2개 지점에서 표토(0~30 cm, top soil(TS))와 심토(30~60 cm, sub soil(SS))로 구분하여 시료를 채취하여 분석하였고, 분석항목은 토양환경보전법에 의해 납, 아연을 비롯하여 카드뮴, 비소 등의 중금속과 토성, pH, EC, TOC, CEC 등의 이화학적 특성을 분석하였다.

### 2.2. 5단계 연속추출법에 의한 중금속 존재 형태 규명 및 선별 공법 선정

토양의 중금속 오염에 있어서 중금속화합물의 형태와 분포를 파악하는 것은 매우 중요하다. 왜냐하면 중금속은 각각의 원소의 특성 및 주변 토양의 구성 광물에 따라 존재할 수 있는 양상이 다르며 이의 존재형태를 파악하여 그 존재형태에 따라 최적의 토양정화기법을 선정할 수 있기 때문이다(Chon et al., 2010; Dermont et al., 2008; Wuana and Okieimen, 2011). 그에 따라 우선 대상 지역의 토양시료내의 철산화물의 함량분석을 위한 X선 형광분석(XRF)과 토양 결정을 규정하기위한 X선 회절분석(XRD)을 고려대학교 지구환경과학과에 의뢰하였다. 또한 토양 내 정확한 중금속 존재 형태를 파악하기 위해 Tessier의 연속추출법(Tessier et al., 1979)에 따라 5가지 다른 형태(① 이온교환성 형태, ② 탄산염 형태, ③ 철·망간 등의 금속 산화물 형태, ④ 유기물 형태, ⑤ 잔류성 형태)에 대해 분석하였다.

### 2.3. 중금속 오염 토양 선별 처리를 위한 Lab-Scale Test

본 연구에서는 중금속 오염 토양의 선별 처리 및 토양 조건에 맞는 선별 기술 적용 및 평가를 위해 다음과 같이 단일 혹은 복합공정을 수행하였다(Fig. 1).

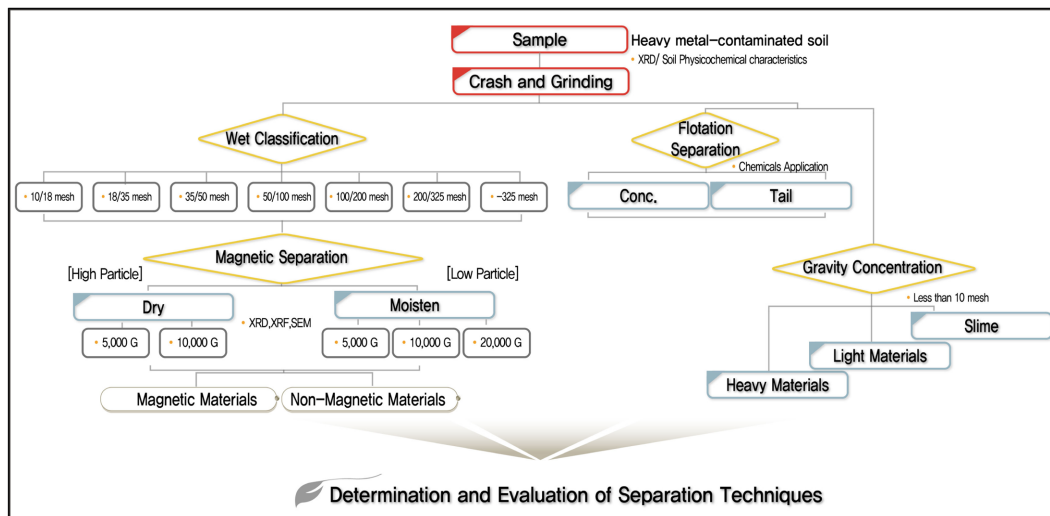


Fig. 1. Schematic flow chart of the separation techniques of heavy metal contaminated soil.

### 2.3.1. 습식정밀분급 및 자력선별

X-1, X-2의 중금속 오염 토양 시료에 대해서 FRITSCH analysette 3 모델인 습식 분급기를 활용하여 우선 정밀분급을 수행하였다. 습식분급기에 공급되는 공정수의 유량은 2.5 ml/sec, 진동폭(Amplitude)은 1.5 mm, 진동 지속 시간(Interval Time)은 5 sec, 체가름 시간(Sieving Time)은 20분이며, 체가름 입경은 10 mesh, 18 mesh, 35 mesh, 50 mesh, 100 mesh, 200 mesh, 325 mesh이었다.

습식 정밀분급 후 광물간의 자화율 차이를 이용한 자력선별(Magnetic Separation)을 수행하였다. +10 mesh 입경 토양 시료는 습식분급기를 활용하여 선별하였고 -200 mesh의 입경 토양 시료는 Boxmag사의 LHW-TYPE의 고자력 습식분급기를 사용하여 1 : 10의 고액비와 200 rpm의 교반속도, 펄프세기를 3의 조건에서 5,000, 10,000, 20,000 Gauss로 습식자력선별을 실시하였다. 또한 -10/+200 mesh 입경구간의 토양은 Eriez사의 HI-VI Vibratory-TYPE을 활용하여 Belt Motor Speed는 1.3 m<sup>3</sup>/hr, Vibratory Feed Speed는 1.5 m<sup>3</sup>/hr의 조건에서 5,000, 10,000 Gauss로 건식 자력선별을 수행하여 비자성 물질에 대한 중금속오염 제거효율 평가를 수행하였다.

### 2.3.2. 비중선별 및 부유선별

대상 오염 토양 시료를 선별 및 부유 선별을 수행하였다. 비중선별에서는 요동테이블(Wilfley Table)을 활용하여 실험을 수행하였다. 비중선별 시 요동 테이블 조건은 세척수 유량을 100~120 ml/sec, Feeder를 61 g/min, 5°의 테이블 경사도에서 요동속도 120회/min, 진폭 1인치로 하

였다. 표토와 심토를 1 : 1 비율로 혼합한 토양을 대상으로 비중선별기를 활용하여 실험을 수행 후 생산된 중광물 및 경광물에 대해 중금속오염 제거효율 평가를 수행하였다. 부유선별은 오염 토양을 부유선광기를 활용하여 Conc(정광) 및 Tail(광미)에 대해 중금속오염 제거 효율을 평가하였다. 부유선광기는 Metso minerals사의 Suspended Type으로 사용하여 수행하였다.

### 2.4. 유기물 제거를 위한 부유선별 Lab-Scale Test

유기물에 흡착된 중금속의 농도 감소를 위한 유기물 선별 기술평가를 위해 Fig. 2와 같이 수행하였다.

#### 2.4.1. 재료 및 실험조건

오염토양 중 유기물에 흡착된 중금속의 농도 감소를 위해 aeration, 과산화수소 및 소석회 등 다양한 조건을 주어 토양 내 중금속 농도 변화, 유기물 제거율을 통해 최적의 조건을 도출하였다. 본 실험은 상온(22 ± 1°C)과 대기압 하에서 Lab-scale test로 반응기(0.8 L)를 제작하였으며 주입압력 조절가능 aeration system을 적용하였다. 반응기에 토양 시료 100 g을 투입 후 증류수 400 mL를 첨가함으로써 무게 대 부피비 1 : 4로 설정하였다. Aeration의 시작과 동시에 반응을 개시하였으며, 모든 조건에서의 반응시간은 30분으로 설정하였다. Aeration 종료 전, 수용액 상부에 부유하는 부유 물질들은 filter paper(45 µm)로 걸러내었으며, 분석시료는 토양과 수용액 각각 두 가지 상으로 나누어 채취 분석하였다. 본 실험에 사용된 과산화수소(hydrogen peroxide, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 35%는 Junsei사의 제품

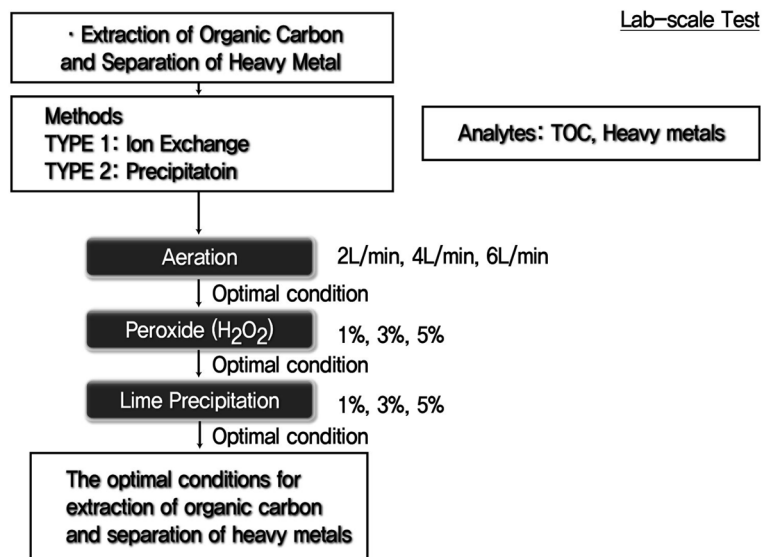


Fig. 2. Schematic flow chart of the removing of organic carbon.

을 구매하여 사용하였으며, 소석회로 사용된 calcium hydroxide( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )(95%)는 Shinyo Pure Chemical사의 제품을 구매하여 사용하였다. 또한, 실험에 사용된 모든 용액의 제조는 Deionized Water(D.I. Water)를 사용하였다. 실험에 사용된 토양 시료는 X-1광산 A토양에서 채취한 것을 사용하였으며, 깊이 0~30 cm 사이의 표토를 사용하였다. 오염 토양 시료는 자연건조 후, 2 mm 이하(+10 mesh)의 입자만을 체가름 후 사용하였다. Aeration 주입은 주입속도 2, 4, 6 L/min로 실험을 수행하였으며, 반응시간은 30 min으로 설정하였다. 과산화수소 주입 조건 실험에서는 최적의 Aeration 주입 조건에서 과산화수소 1, 3, 5%로 농도변화를 주었다. 또한 소석회 주입 조건 실험에서도 동일하게 최적의 Aeration 주입조건에서 소석회 1, 3, 5%로 농도 변화에 따른 효율을 평가하였다.

#### 2.4.2. 중금속 및 유기물 분석

조건별 액상 및 토양 시료는 서울대학교 농업생명과학대학 농생명과학공동기기원 토양오염분석센터(NICEM)에 분석을 의뢰하여 실시하였다. 실험 분석 방법은 다음과 같이 진행하였다. 토양오염분석시험기준에 의해 중금속을 분석하였으며, 시료 전처리에는 질산-염산에 의한 분해법에 의해 실시하였다. 우선 풍건시료를 분쇄하여 0.15 mm의 표준체로 체질한 토양 3 g을 환류냉각기를 부착한 250 mL 환저플라스크에 넣고 염산 21 mL와 질산 7 mL를 넣고 잘 저어준 후 다시 0.5 M 질산 15 mL를 넣고 흡수용기와 환류 냉각관을 반응용기에 연결시킨 후 상온에서 2시간

정치시켜 토양 내 유기물을 천천히 산화시켰다. 정치 후 반응혼합물의 온도를 서서히 올려 환류조건에 도달하도록 하고 2시간 동안 그 상태를 유지시키면서 분해하였다. 상층액을 Whatman No.40으로 여과하여 100 ml 용량플라스크에 표선을 맞춘 후 유도결합플라즈마발광광도계(ICP)를 이용하여 측정하였다. 기기는 ICP-730-ES(VARIAN co., USA), ICP-7510(SHIMADZU Co., Japan), ICP-1000(SHIMADZU Co., Japan)을 사용하였다.

TOC, 유기물 함량은 SSSA(Soil Science Society of America)의 Methods of Soil Analysis(Alban and Kellogg, 1959)에 따라 수행하였다. 우선 토양 시료의 유기물 함량은 Walkley-Black법으로 정량하였다. 0.5 mm 체에 통과시킨 풍건 시료 0.5 g을 500 mL 삼각 flask에 취하고 1N- $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 용액 10 mL와 진한 황산 20 mL를 차례로 가한 후 서서히 흔들어 주고 30분간 방치하였다. 증류수 200 mL를 가하고 지시약(0.025 M o-Phenanthroline-ferrous Complex)을 넣은 후 0.5 N- $\text{FeSO}_4$ 로 적정하여 다음 식 (1)에 따라 유기물 함량을 구하였다.

$$\text{TOC} (\%) = \frac{(B-T) \times (\text{FeSO}_4 \text{ 농도}) \times 12 \times 100}{S \times 1000 \times 4 \times 77} \times 100 \quad (1)$$

B: blank 적정시 소모된  $\text{FeSO}_4$ 의 양(mL)

T: 시료 적정시 소모된  $\text{FeSO}_4$ 의 양(mL)

S: 토양시료 무게(g)

유기물함량(%) = 유기탄소(%)  $\times$  1.724(Van Beelem factor)

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 대상 폐광산의 특성

연구 대상인 X-1 광산과 X-2 광산에 대한 문헌을 검토한 결과, X-1 광산은 열수교대 및 열극충진 광상 형태로 광석광물은 방연광, 섬아연광, 황동광이며, 탐문조사 결과, 금, 은을 주로 개발한 광산으로 최근 갱구부가 붕락 매몰되어 자연적으로 폐쇄되었다. 주변 주거지 및 농경지는 경지정리가 되지 않아 과거와 유사한 형태를 유지하고 있었다. 주변에 하천수가 흐르고, 그 하천수를 농업용수로 주로 이용하며, 농업용 관정도 일부 활용하고 있다. 생활용수는 공동 지하수 관정이 있으나 활용하지 않으며, 계곡수를 집수해서 사용하는 것으로 파악되었다. 중금속 오염 가능성 경로는 유출 및 이동에 의해서 주로 이루어졌을 것으로 사료된다.

X-2 광산은 열수충전광상으로 주로 연과 아연을 채광 하였던 광산으로 주 광석광물은 방연석(PbS), 섬아연석(ZnS), 유비철석(FeAsS), 황철석(FeS<sub>2</sub>), 황동석(CuFeS<sub>2</sub>), Stannite(Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>), Tetrahedrite(Cu<sub>12</sub>Sb<sub>4</sub>S<sub>13</sub>) 등으로 알려져 있다. 탐문조사 결과, 과거 수갱 주변에 있던 광·폐석장은 논으로 변경되었으나 현재는 휴경지(농식품부 통보 농작물경작 부적합 필지)로 남아있었다. 휴경지 논두렁에는 옛날 광산 건물의 기초를 확인 할 수 있었다. 광산 하부 수계 주변의 농경지는 1987년 이후 외부에서 흙을 유입하지 않고 자체 토양으로만 평탄화 및 구획정리하는 방식의 경지정리를 수행하여 수계 주변이외에 광범위한 범위로 오염이 확산되었을 개연성이 크 것으로 사료된다. 또한 경지 정리 시, 하천공사도 동시에 실시해 하천변에 쌓여 있던 돌과 흙도 농경지에 혼합된 것으로 추정된다.

XRD 분석결과 X-1 광산의 시료는 주로 석영(Quartz), 백운모(muscovite), K-장석(K-feldspar), 녹니석(Chlorite)의 피크가 확인되었으며(Fig. 3a), X-2 광산의 시료는 주로 석영(Quartz), 각섬석(Amphibole), 백운모(muscovite), K-장석(K-feldspar), 석고(Gypsum), 녹니석(Chlorite)의 피크가 확인되었다(Fig. 3b).

##### 3.1.1. 토양 이화학적 특성 분석 및 5단계 연속추출법에 의한 중금속 존재 형태 규명

미국 농무부(USDA) 기준의 토양삼각도표로 입각한 토성 분석 결과, X-1 광산 농경지 A 토양 표토(X-1-A 0~30) 및 심토(X-1-A 30~60) 시료는 각각 모래질(sand)이 71%, 62%, 점토질(clay)이 20%, 25%, 실트질(silt)이

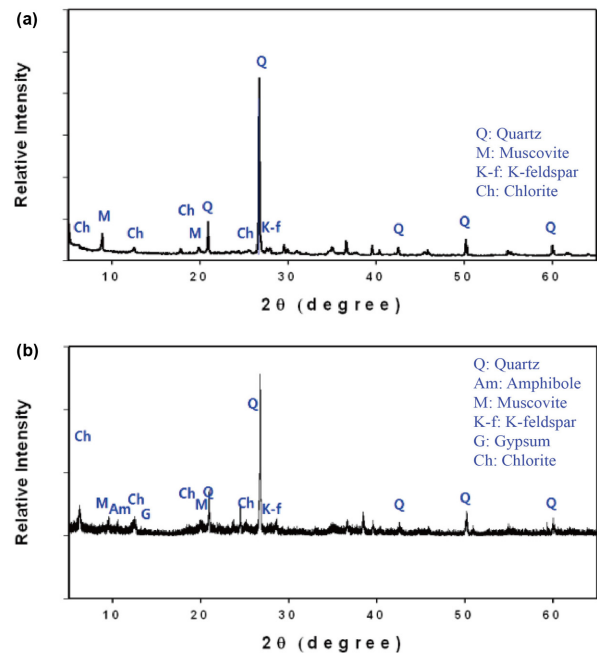


Fig. 3. Results of XRD-Analysis for sample X-1(a) and sample X-2(b).

7%, 13%로 구성된 시료로 사질식 양토(sandy clay loam)로 분석되었다. X-2 광산 농경지 C 토양 표토(X-2-C 0~30)와 심토(X-2-C 30~60) 시료는 각각 모래질이 85%, 90%, 점토질(clay)이 7%, 5%, 실트질(silt)이 8%, 5%로 구성된 시료로 사토(sand)와 양질 사토(loamy sand)로 구분되었다(Fig. 4). 그 외 이화학적 특성 및 중금속오염농도, 유기물 농도는 Table 1과 같으며, X-1 표토는 평균적으로 pH 6.91, EC 1.57 ds/m, CEC 22.69 cmol/kg, 심토는 평균적으로 pH 7.59, EC 1.96 ds/m, CEC 25.94 cmol/kg으로 심토에서 약알칼리성을 나타내었다.

반면 X-2 표토는 평균적으로 pH 5.85, EC 2.11 ds/m, CEC 27.99 cmol/kg이었으며, 심토는 평균적으로 pH 6.18, EC 1.67 ds/m, CEC 29.28 cmol/kg으로 X-1 지역에 비해 산성을 나타내었다. 중금속은 본 연구에서 초점을 맞춘 납은 평균적으로 X-1 표토는 15.91 mg/kg, 심토는 28.86 mg/kg이었으며, X-2 표토와 심토는 각각 1,009.30 mg/kg과 39.82 mg/kg으로 나타났고, 아연은 평균적으로 X-1 표토는 42.27 mg/kg, 심토는 59.62 mg/kg이었으며, X-2 표토와 심토는 각각 427.51 mg/kg과 121.01 mg/kg으로 나타났다. 반면에 유기물(TOC)은 X-1 표토와 심토는 0.91%와 1.12%, X-2의 경우 표토 2.32%, 2.17%로 나타났다. X-2 시료가 유기물농도도 높으며, 토양환경보전법 「1지역」 대책기준(납: 200 mg/kg, 아연: 300 mg/kg)을 초과하여 심각한 오염이 되어있음을 확인하

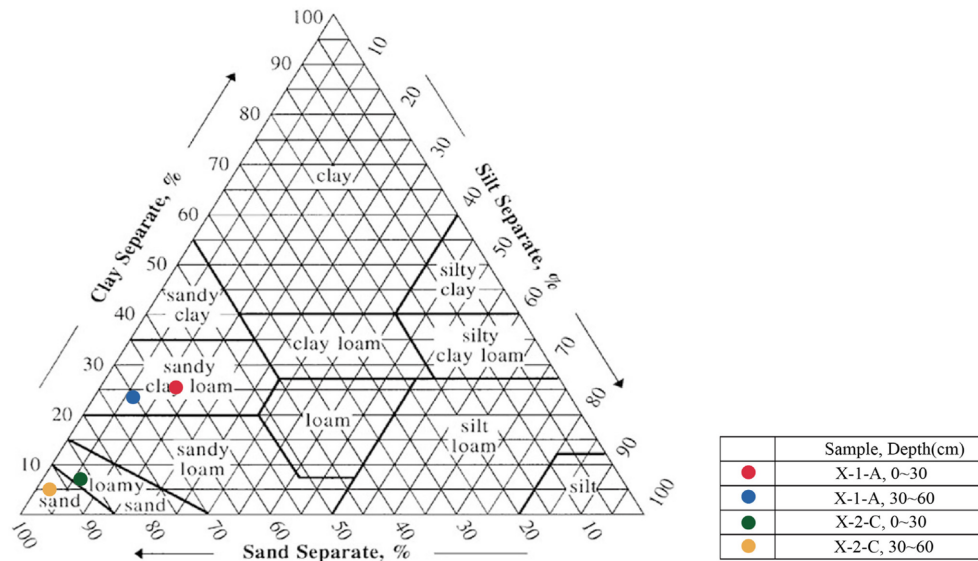


Fig. 4. Physicochemical characteristics of soil texture based on soil triangle (USDA).

Table 1. Physicochemical characteristics, organic carbon and heavy metals of sample soil on each soil particle size (n = 2)

Sample (Depth)	Mesh	pH	EC (ds/m)	CEC (cmol/kg)	TOC (%)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)	
X-1-A	Topsoil (0~30 cm)	#10	6.88	1.14	18.50	0.54	15.72	44.70	146.40	1.51	58.58
		#100	6.92	1.74	24.26	0.94	19.90	52.32	368.00	1.76	69.77
		#200	6.94	1.85	25.33	1.27	12.13	29.79	163.88	0.92	41.95
		Ave.	6.91	1.57	22.69	0.91	15.91	42.27	226.09	1.40	56.77
	Subsoil (30~60 cm)	#10	7.58	1.64	21.10	0.88	19.34	40.96	120.05	0.98	17.95
		#100	7.57	2.08	27.91	1.12	33.11	66.53	362.99	1.55	30.55
		#200	7.63	2.15	28.80	1.35	34.12	71.38	197.10	1.85	35.72
		Ave.	7.59	1.96	25.94	1.12	28.86	59.62	226.71	1.46	28.07
X-2-C	Topsoil (0~30 cm)	#10	5.72	1.54	26.04	1.81	801.12	367.90	32.40	2.33	27.19
		#100	6.07	2.32	29.76	2.50	1160.36	448.34	47.66	2.56	34.91
		#200	5.76	2.46	28.16	2.66	1066.43	466.30	40.69	2.58	35.08
		Ave.	5.85	2.11	27.99	2.32	1009.30	427.51	40.25	2.49	32.39
	Subsoil (30~60 cm)	#10	6.16	1.34	28.28	1.67	22.04	80.73	33.03	0.38	22.04
		#100	6.21	1.78	28.98	2.34	52.90	146.99	98.54	0.73	5.59
		#200	6.18	1.89	30.60	2.49	44.51	135.30	60.52	0.65	5.13
		Ave.	6.18	1.67	29.28	2.17	39.82	121.01	64.03	0.58	10.92

였다.

X-1 광산 농경지 표토 시료의 중금속 존재형태 결과는 납은 Tessier의 5단계 연속추출 중 5단계에 해당하는 잔류성 형태가 약 80% 존재하고 있으며 그 외 Mn/Fe-oxide 형태와 이온교환성 형태가 각각 8%와 10% 차지하며 2%의 유기물 결합 형태(Organic/Sulfide Bond)로 구성되는 것으로 분석되었으며, 아연은 잔류성 형태가 약 85% 존재하며 유기물 결합 형태(Organic/Sulfide Bond)와

Mn/Fe-oxide 형태가 각각 5%와 10% 존재하는 것으로 나타났다. X-1 광산 농경지 심토 시료는 납과 아연의 경우 잔류성형태가 다소 줄어들어 70% 가량 존재하면서 Mn/Fe-oxide 형태가 20~30% 가량 존재하는 것으로 나타났다. Mn/Fe-oxide 형태는 환원상태에서 노출될 수 있으며, 전 단계인 탄산염 결합형태 추출에서 탄산염이 완전히 용출되지 않았을 경우 높게 검출된다. 심도가 깊은 곳에서 환원상태를 유지하게 될 경우, 환경오염에 영향을 미

칠 수 있으나, 노출 시에는 환원상태가 아니기 때문에 자연적으로 큰 영향을 미치는 것은 어렵다고 판단된다.

X-2 광산 농경지 표토 시료에서 납은 2단계인 탄산염 결합상태가 약 50%로 가장 많이 분포하였다. 아연의 경우, 5단계인 잔류성 형태가 60% 이상 차지하였다. X-2 광산 농경지 심토 시료는 표토 시료와 비슷한 결과 양상을 나타내었으나, 납의 경우 2단계인 탄산염 결합형태가 다소 줄어든 반면 4단계인 유기물 결합 형태와 5단계 잔류성 형태가 증가하였다. 아연의 경우에도 5단계 잔류성 형태가 감소한 반면, 2단계인 탄산염 결합형태가 증가하였다.

5단계 잔류성 형태는 광물 성분과 관련된 금속 또는 광물의 결정구조 속에 존재하는 금속으로 퇴적물 근원지의 지질이나 침식의 정도를 반영하며, 자연적인 환경에서는 유출가능성이 거의 없다. 따라서 오염물질의 화학적 분포 형태 측면에서 중금속의 1, 2단계 존재형태가 적고, 5단계 존재형태가 높은 토양은 처리하기가 가장 힘든 형태임으로 비중, 부유, 자력 선별 등의 물리 화학적 처리 과정을 고려할 것으로 사료된다.

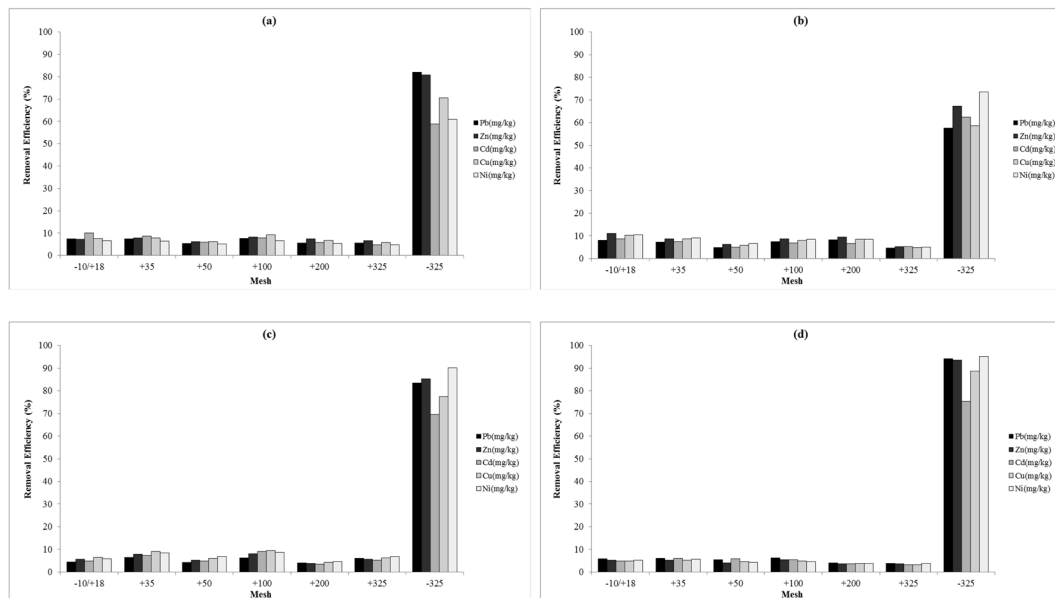
### 3.2. 중금속 오염 토양 선별기술 적용의 효율성 평가

본 연구에서는 납(Pb)과 아연(Zn)을 타깃으로 하여 다양한 중금속 선별 처리 공정을 적용하여 처리 효율을 도출, 검토, 평가하여 각 물질 별 최적의 중금속 선별 처리

공정을 제시하려 하였다.

#### 3.2.1. 습식 정밀 분급

중금속 오염토에 대한 습식분급 및 토양오염도 분석결과를 X-1 광산인근 농경지 표토의 경우 최초 분급 처리하기 전, 중금속 오염 토양 시료는 납(Pb) 92.53 mg/kg, 아연(Zn) 79.88 mg/kg, 비소(As) 386.1 mg/kg, 카드뮴(Cd) 3.1 mg/kg, 구리(Cu) 88.42 mg/kg, 니켈(Ni) 37.15 mg/kg이었으며, 습식 분급 후, 가장 높은 중량비 54.71%를 가진 -325 mesh 입경의 토양은 납(Pb) 138.7 mg/kg, 아연(Zn) 118.1 mg/kg, 비소(As) 445.7 mg/kg, 카드뮴(Cd) 3.33 mg/kg, 구리(Cu) 114.1 mg/kg, 니켈(Ni) 41.37 mg/kg으로 나타났으며, 중량비를 계산하여 제거율을 산정하면 납 82.0%, 아연 80.9%, 카드뮴 58.8%, 구리 70.6%, 니켈 60.9%로 보였다(Fig. 5a). X-1 광산인근 농경지 심토의 경우 최초 분급 처리하기 전, 중금속 오염농도는 납(Pb) 101.8 mg/kg, 아연(Zn) 96.95 mg/kg, 비소(As) 517.1 mg/kg, 카드뮴(Cd) 3.27 mg/kg, 구리(Cu) 85.98 mg/kg, 니켈(Ni) 38.23 mg/kg이었으며, 습식 분급 후, 가장 높은 중량비 47.83%를 가진 -325 mesh 입경의 토양은 납(Pb) 123.1 mg/kg, 아연(Zn) 137.0 mg/kg, 비소(As) 678.3 mg/kg, 카드뮴(Cd) 4.03 mg/kg, 구리(Cu) 133.0 mg/kg, 니켈(Ni) 50.5 mg/kg으로 나타났으며, 중량



**Fig. 5.** Removal of Heavy Metal Contaminated in Soil by the Wet Classification/ Separation. (a) Removal Efficiency of Top-soil from Heavy Metal Contaminated in Soil near X-1 mine area on each Mesh Size. (b) Removal Efficiency of Sub-soil from Heavy Metal Contaminated in Soil near X-1 mine area on each Mesh Size. (c) Removal Efficiency of Sub-soil from Heavy Metal Contaminated in Soil near X-2 mine area on each Mesh Size. (d) Removal Efficiency of Top-soil from Heavy Metal Contaminated in Soil near X-2 mine area on each Mesh Size.

비를 계산하여 제거율을 산정하면 납 57.6%, 아연 67.3%, 카드뮴 62.5%, 구리 58.7%, 니켈 73.7%로 보였다(Fig. 5b).

X-2 광산인근 심토의 경우 최초 분급 처리하기 전, 중금속 오염 토양은 납(Pb) 2,006 mg/kg, 아연(Zn) 1,160 mg/kg, 비소(As) 137.25 mg/kg, 카드뮴(Cd) 11.70 mg/kg, 구리(Cu) 97.65 mg/kg, 니켈(Ni) 26.67 mg/kg이었으며, 습식 분급 후, 가장 높은 중량비 67.85%를 가진 -325 mesh 입경의 토양은 납(Pb) 2,787 mg/kg, 아연(Zn) 1,601 mg/kg, 비소(As) 152.4 mg/kg, 카드뮴(Cd) 15.29 mg/kg, 구리(Cu) 137.0 mg/kg, 니켈(Ni) 29.03 mg/kg으로 나타났으며, 중량비를 계산하여 제거율을 산정하면 납 83.2%, 아연 85.3%, 카드뮴 69.5%, 구리 77.4%, 니켈 90.1%로 보였다(Fig. 5c). X-2 광산인근 농경지 토양 표토의 경우 최초 분급 처리하기 전, 중금속 오염농도는 납(Pb) 1,667 mg/kg, 아연(Zn) 956.3 mg/kg, 비소(As) 102.62 mg/kg, 카드뮴(Cd) 9.16 mg/kg, 구리(Cu) 73.25 mg/kg, 니켈(Ni) 25.80 mg/kg이었으며, 습식 분급 후, 가장 높은 중량비 60.62%를 가진 -325 mesh 입경의 토양은 납(Pb) 2,295 mg/kg, 아연(Zn) 1,346 mg/kg, 비소(As) 117.7 mg/kg, 카드뮴(Cd) 11.7 mg/kg, 구리(Cu) 108.9 mg/kg, 니켈(Ni) 29.34 mg/kg으로 나타났으며, 중량비를 계산하여 제거율을 산정하면 납 94.3%, 아연 93.6%, 카드뮴 75.3%, 구리 88.7%, 니켈 95.2%로 보였다(Fig. 5d).

X-1 광산과 X-2 광산의 표토 및 심토 모두 습식 정밀 분급 공정에서 높은 처리효율을 보였으며, 중금속 선별 처리에서 우선적으로 필요한 공정으로 나타났다.

### 3.2.2. 자력선별

습식 선별된 중금속 오염토양 중 납과 아연 오염농도가 높은 X-2 광산 시료를 자력 선별을 수행하였으며, -10/+50 mesh의 입자가 큰 시료의 경우 3,000 Gauss의 건조 자력선별을 실시한 결과는 자성물질의 경우 17.3%, 비자성 물질은 82.7%의 질량비를 보였으며 납 농도는 자성물질에서 803.1 mg/kg, 비자성물질에서 554.7 mg/kg으로 나타났고 아연 농도는 자성물질에서 467.3 mg/kg, 비자성물질에서 390.8 mg/kg으로 나타났다. 반면 질량비를 계산한 분포비를 계산하면 납의 경우 자성물질 23.3%, 비자성물질 76.7%로 나타났으며, 아연의 경우 자성물질 20.0%, 비자성물질 80.0%로 나타났다.

입도가 -50/+200 mesh, -200/+325 mesh, -325 mesh의 경우 5,000 Gauss, 10,000 Gauss, 20,000 Gauss로 자력선별을 실행한 결과 전반적으로 입자가 작을수록 납, 아연

의 자성물질과 비자성물질내의 농도가 크게 다르지 않게 나타났으며 자력이 셀수록 자성물질내 납, 아연 농도가 비자성물질내 농도보다 높게 나타났다(Table 2). 자력선별공정의 경우 중금속 오염 토양내 납과 아연의 선별 처리에서 큰 효과를 보이지 않은 것으로 나타났다.

### 3.2.3. 부유선별 및 비중선별

X-2 광산의 C 시료의 부유선별 결과, Conc.와 Middling 0.67 wt.%와 5.59 wt.%의 중량비를 보였으며, Tail은 93.74 wt.%의 중량비를 보였다. Conc.에서는 납과 아연 모두 시료의 양이 적어 검출되지 않았으며, Middling에서 납은 9.27% 농축된 것으로 나타났고, 아연은 24.4%의 제거율을 보였다. 또한 광미에서 납은 8.17% 농축되었으며, 아연은 15.7%의 제거율을 보였다. 부유 선별은 납에서는 효과가 나타나지 않았으며, 아연에서 효율을 보여 아연 선별에 적합한 것으로 나타났다. 반면에 비중선별에서는 Treated Soil(#1, #2)과 Conc.(#3~#6)로 선별이 되었으며, Treated Soil는 55.0 wt.%의 중량비, Conc.는 44.9 wt.%의 중량비를 보였다. Conc.의 중금속이 농축이 되었으며, Conc.를 제거 시, 납의 경우 Treated Soil 중 #1에서 70.2%, #2에서는 57.0%의 제거효율을 보였으며, 아연의 경우 Treated Soil 중 #1에서 19.9%, #2에서는 7.5%의 제거효율을 보였다. 비중 선별의 경우 납 선별공정에 더 적합한 것으로 나타났다(Table 3).

### 3.3. 유기물 제거를 위한 최적 조건 도출 및 평가

중금속 오염 토양 내의 유기물 제거를 위한 Lab-scale의 부유 선별 장치에서 공기주입(Aeration), 과산화수소 및 소석회 주입 등 처리를 이용하여 최적조건을 도출하였다. 사용한 X-1 광산 A 오염 토양 시료 초기오염농도는 비소(As)가 261.27 mg/kg으로 토양오염우려기준 3지역(200 mg/kg) 기준치 이상의 농도를 나타내었으며, 그 외 카드뮴(Cd), 구리(Cu), 납(Pb), 아연(Zn), 니켈(Ni)은 각각 0.55, 73.97, 22.52, 59.40 그리고 25.10 mg/kg의 농도를 나타냄으로서 모두 토양오염우려기준 1지역 기준치 이하를 만족하였다. 총 유기탄소(Total Organic Carbon, TOC)는 1.85%임을 확인하였다.

#### 3.3.1. 공기주입유량

다양한 공기 주입(Aeration)과 유량변화에 따른 오염토양 내에서의 유기물 분리율 및 중금속 제거율의 결과를 살펴보면, 비소를 제외한 나머지 중금속들은 Aeration 유량이 2, 4, 6 L/min으로 증가하여 실험을 수행하였을 때,

**Table 2.** Results of magnetic separation of heavy metal (Pb, Zn) contaminated soil in X-2 mine area

Mesh	Magnetic Force (Gauss)	Material	Weight ratio (wt, %)	Pb		Zn		
				Conc. (mg/kg)	D.R. (%)	Conc. (mg/kg)	D.R. (%)	
10/50	3,000	Origin		1120.0	—	804.1	—	Dry
		Magnetic	17.3	803.1	23.3	467.3	20.0	
		Non-Mag.	82.7	554.7	76.7	390.8	80.0	
50/200	5,000	Origin		1402.0	—	946.7	—	Wet
		Magnetic	16.5	891.8	21.6	550.7	19.0	
		Non-Mag.	83.5	640.9	78.4	463.5	81.0	
	10,000	Magnetic	16.5	790.2	22.0	545.2	20.0	
		Non-Mag.	83.5	555.1	78.0	432.1	80.0	
	20,000	Magnetic	14.6	819.2	22.6	498.3	18.5	
		Non-Mag.	85.4	480.3	77.4	376.4	81.5	
200/325	5,000	Origin		2069.0	—	1108.0	—	Wet
		Magnetic	7.4	1428.3	8.0	821.9	8.5	
		Non-Mag.	92.6	1316.1	92.0	710.8	91.5	
	10,000	Magnetic	5.9	1776.7	8.6	808.1	8.7	
		Non-Mag.	94.1	1190.1	91.4	531.7	91.3	
	20,000	Magnetic	10.4	1553.3	18.0	777.3	17.5	
		Non-Mag.	87.0	848.8	82.0	439.2	82.5	
-325	5,000	Origin		2295.0	—	1346.4	—	Wet
		Magnetic	5.0	1992.3	5.1	1049.7	5.0	
		Non-Mag.	95.0	1969.7	94.9	1054.9	95.0	
	10,000	Magnetic	5.8	1987.4	5.8	1059.6	5.9	
		Non-Mag.	94.2	1976.6	94.2	1039.9	94.1	
	20,000	Magnetic	7.0	1974.6	6.9	1070.6	7.2	
		Non-Mag.	93.0	2024.8	93.1	1043.4	92.8	

\*Non-Mag.: Non-Magnetic Materials, Rem.: Removal Efficiency, Conc.: Concentration, D.R.: Distribution Ratio.

**Table 3.** Results of gravity separation and flotation separation of heavy metal (Pb, Zn) contaminated soil in X-2 mine area

Separation Technique		Weight (g)	Weight Ratio (wt,%)	Residual Value	Pb		Zn		Remark	
					Conc. (mg/kg)	Rem. (%)	Conc. (mg/kg)	Rem. (%)		
Flotation	Origin	—	—	—	1,667.3		956.3		Theoretical Value	
	Conc.	2.8	0.67	—	n.d.	—	n.d.			
	Middling	23.4	5.59	—	1,821.9	−9.27	723.2	24.4		
	Tail	393.0	93.74	—	1,803.5	−8.17	805.6	15.7		
	Total	419.3	100.0	—	—	—	—	—		
Gravity	Origin	—	—	—	2,218.5		781.9		Concentrated heavy-metal Theoretical Value	
	Treated Soil	#1	44.5	8.0	28.1	661.2	70.2	626.1		19.9
		#2	260.6	47.0	220.8	954.3	57.0	723.2		7.5
	Conc.	#3, #4	34.4	6.2	15.6	1,340.6		805.6		
		#5, #6	214.5	38.7	180	2,456.8		968.2		
	Total		554.0	100.0	—	1,536.5		815.4		

\*Conc.: Concentrated, n.d.: not detected.

토양에서 중금속 제거효율의 변화는 거의 없는 것으로 확인되었다. 다만, 구리의 경우, 2 L/min으로 적용하였을 경

우, 7.49 mg/kg이 제거된 것을 확인하였다. 비소의 경우, 2 L/min, 4 L/min을 적용하였을 때, 초기 오염농도 261.27

**Table 4.** Results of Extraction of Organic Carbon by Various Aeration

(Reaction Time: 30 min)

		TOC	Cd	Cu	Pb	As	Zn	Ni
	Unit	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Soil	Initial	1.85	0.55	73.97	22.52	261.27	59.40	25.10
	2 L/min	1.51	0.55	66.48	25.36	242.12	61.54	25.76
	4 L/min	1.46	0.57	72.48	25.79	240.32	61.53	26.03
	6 L/min	1.40	0.59	73.55	25.12	252.57	61.29	26.35
	Unit	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Aqueous	Initial	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	2 L/min	24.22	n.d.	0.23	n.d.	0.14	0.07	0.02
	4 L/min	10.12	n.d.	0.32	n.d.	0.14	0.05	0.01
	6 L/min	7.58	n.d.	0.14	n.d.	0.13	0.05	0.01
	Unit	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg

\*n.d.: not detected.

mg/kg에서 각각 19.15 mg/kg과 20.95 mg/kg이 제거되는 괄목할만한 결과를 나타내었다. 반면, 6 L/min으로 적용하였을 때는 초기값과 유사한 값을 나타내었다.

총 유기탄소(TOC)의 경우, aeration 유량을 2, 4, 6 L/min으로 증가시킬 때, 오염도양으로 부터 유기물 분리효율이 각각 18%, 21%, 24%로 3%씩 증가하는 경향을 확인하였다. 따라서 aeration의 주입유량은 비소의 처리결과를 기초로 평가하였을 때, 제거 양을 기준으로 4 L/min보다 2 L/min이 적합한 유량이라고 판단된다(Table 4).

수용액상의 결과를 살펴보면, 카드뮴과 납의 경우, aeration 유량이 2, 4, 6 L/min으로 증가시켜 실험을 수행하였을 때, 수용액 상에 잔존농도가 검출되지 않았으며, 비소, 아연 및 니켈의 경우는 세 가지 유량에서 모두 낮은 농도로 검출되는 것을 확인하였다. 다만, 구리의 경우, 2 L/min, 4 L/min을 적용하였을 때, 각각 0.23 mg/L와 0.32 mg/L의 잔존농도가 있음을 확인하였으며, 유량 증가 시, 0.9 mg/L 정도가 더 검출되었다. 6 L/min으로 적용하였을 때는 0.14 mg/L로 앞선 두 개의 유량조건에 비해 상대적으로 낮은 농도 값을 나타내었다.

수용액에 용출된 총 유기탄소(TOC)의 경우, aeration 유량이 2, 4, 6 L/min으로 증가시켜 실험을 수행하였을 때, 각각 24.22 mg/L, 10.12 mg/L 및 7.58 mg/L로 검출되었으며, aeration 유량이 증가할수록 용존하는 농도가 점차 감소하는 경향을 확인하였다.

이는 앞선 결과에 도시되었던 토양 상에 존재하는 유기물의 분리율이 증가하는 경향과 상반되는 경향을 나타내고 있다.

### 3.3.2. 과산화수소 주입

Aeration 주입(2 L/min) 주입과 동시에 다양한 과산화수소

소 농도 적용에 따른 유기물 분리율 및 중금속 제거율 평가 결과는 카드뮴의 경우, 과산화수소의 농도를 1, 3, 5%로 증가시켜 적용 시, 각각 0.02, 0.06, 0.13 mg/kg이 초기 오염농도 0.63 mg/kg으로부터 제거된 것을 확인할 수 있었으며, 과산화수소의 농도가 증가할수록 카드뮴의 제거율이 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

구리의 경우, 과산화수소의 농도를 1, 3, 5%로 증가시켜 적용 시, 1%와 3%의 농도에서는 각각 0.67 mg/kg과 7.3 mg/kg이 초기 오염 농도로 부터 제거된 것을 확인할 수 있었으며, 5%의 농도에서는 최대 11.43 mg/kg이 제거되는 것을 확인하였다. 납의 경우, 과산화수소 1% 적용 시, 낮은 처리효율을 보인 후, 3%와 5%로 적용하였을 때, 각각 3.37 mg/kg과 4.93 mg/kg이 초기 오염농도로 부터 제거되는 것을 확인하였다.

1%의 과산화수소 농도를 적용하였을 경우, 비소는 0.03%의 미비한 처리효율을 보였으나, 과산화수소의 농도가 3%와 5%로 증가하였을 경우, 5% 적용 시, 최대 21.10 mg/kg가 초기 오염농도(268.00 mg/kg)로부터 제거되는 높은 제거효율을 나타내었다. 아연 또한 비소와 유사한 경향으로 1%의 농도에서는 미비한 처리효율을 보인 반면, 5%에서 10.34 mg/kg의 상대적으로 많은 양이 제거됨을 확인할 수 있었다.

니켈의 경우, 1%와 3%의 농도에서 각각 2.13%와 2.7%의 비슷한 처리효율을 나타내었고, 5%의 농도에서는 처리효율이 6.03%로 증가하는 경향을 확인하였다. 총 유기탄소(TOC)의 농도변화는 과산화수소의 농도가 증가할수록 그 분리율이 증가하는 경향을 확인할 수 있었으며, 1, 3, 5%에서 분리율이 각각 14.05, 45.95, 50.81%이었다.

Aeration 주입과 동시에 과산화수소의 농도를 증가시켜 적용하였을 경우, 중금속은 대체적으로 과산화수소 농도

**Table 5.** Results of Extraction of Organic Carbon by Various Peroxide Concentration

(Reaction Time: 30 min)

		TOC	Cd	Cu	Pb	As	Zn	Ni
	Unit	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Soil	Initial	1.85	0.63	75.00	26.50	268.00	63.91	30.01
	1 %	1.59	0.61	74.33	26.38	267.92	63.87	29.37
	3 %	1.00	0.57	67.70	23.13	261.62	56.37	29.20
	5 %	0.91	0.50	63.57	21.57	246.90	53.57	28.20
	Unit	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Aqueous	Initial	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	1 %	24.22	n.d.	0.23	n.d.	0.14	0.07	0.02
	3 %	10.12	n.d.	0.32	n.d.	0.14	0.05	0.01
	5 %	7.58	n.d.	0.14	n.d.	0.13	0.05	0.01
	Unit	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg

\*n.d.: not detected.

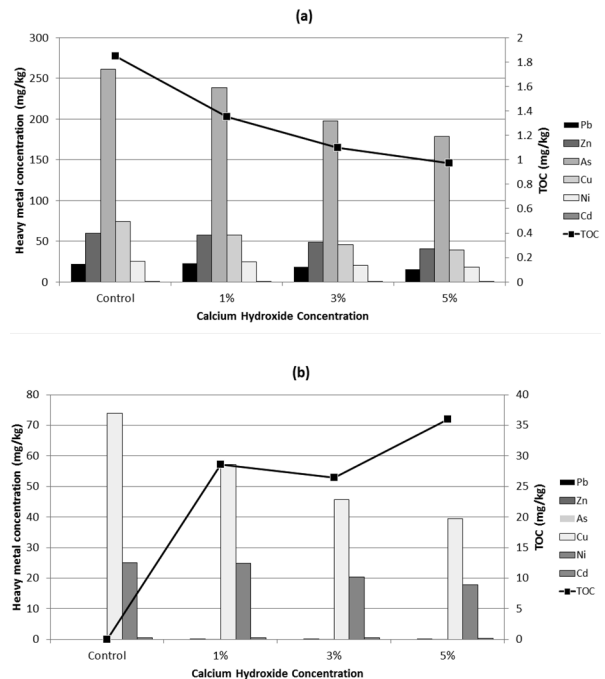
에 증가에 비례하는 경향을 나타내었으며, 동시에 유기물의 분리를 또한 증가하는 것을 확인하였다. 이는 중금속의 처리효율은 과산화수소 농도에 증가에 따른 유기물의 분리율의 증가에 기인하는 것으로 사료된다(Table 4). Aeration 주입과 동시에 과산화수소에 농도 변화에 따른 수용액상의 잔존농도 분석결과는 카드뮴과 납의 경우, aeration + 과산화수소 system 반응 후, 수용액상의 농도는 검출되지 않았으며, 아연과 니켈은 모든 과산화수소 농도에서 평균적으로 각각 0.01 mg/L, 0.06 mg/L의 매우 낮은 농도로 존재하는 것을 확인하였다. 구리의 경우, 1%, 3%, 5%의 농도로 적용하였을 때, 각각 0.23, 0.32, 0.14 mg/L로 수용액에서 검출되었으며, 비소의 경우, 모든 적용 과산화수소 농도에서 평균 0.14 mg/L이 검출되었다.

총 유기탄소의 경우, 과산화수소의 농도가 1, 3, 5%로 증가할수록, 각각 24.22, 10.12, 7.58 mg/L로 점차 검출농도가 감소하는 경향을 확인할 수 있었다(Table 5).

### 3.3.3. 소석회 주입

소석회 농도 적용에 따른 유기물 분리율 및 중금속 제거율 평가 결과는 TOC의 경우, 소석회 농도를 1, 3, 5%로 증가시켜 적용 시, 각각 0.5, 0.75, 0.88 mg/kg이 초기 오염농도 1.85 mg/kg으로부터 제거된 것을 확인할 수 있었으며, 소석회의 농도가 증가할수록 유기물의 제거량이 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

카드뮴의 경우, 소석회 농도를 1, 3, 5%로 증가시켜 적용 시, 각각 0.02, 0.09, 0.12 mg/kg이 초기 오염농도 0.55 mg/kg으로부터 제거된 것을 확인할 수 있었으며, 소석회의 농도가 증가할수록 유기물의 제거량이 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 구리의 경우, 소석회 농도를 1, 3, 5%로 증가시키에 따라 가장 많은 양이 감소됨을 보였



**Fig. 6.** Extraction of Organic Carbon and Removal of Heavy Metal by Lime Precipitation (reaction time: 30 min). (a) Results of Extraction of Organic Carbon and Removal of Heavy Metal by Lime Precipitation (Analysis of Soil). (b) Results of Extraction of Organic Carbon and Removal of Heavy Metal by Lime Precipitation (Analysis of Aqueous material).

으며 각각 16.79, 28.24, 34.42 mg/kg이 초기 73.97 mg/kg에서 제거된 것을 확인할 수 있었다. 납의 경우, 소석회 농도를 1, 3, 5%로 증가시키에 따라 초기농도 22.52 mg/kg에서 1%에서는 0.43 mg/kg의 증가량이 나머지 3, 5% 적용 시에는 4.08, 7.00 mg/kg의 감소량을 보였다. 비소의 경우, 소석회 농도를 1, 3, 5%로 증가시키에 따라 최초 261.27 mg/kg에서 각각 23.14, 63.42, 82.82 mg/kg의 감

소량을 보였으며 소석회 증가량에 따라 효율이 크게 증가됨을 확인할 수 있었다. 아연의 경우, 최초 59.40 mg/kg의 농도에서 소석회 농도를 1, 3, 5%로 증가시킴에 따라 각각 2.14, 10.87, 18.38 mg/kg의 감소량을 보였으며, 니켈의 경우, 소석회 농도를 1, 3, 5%로 증가시킴에 따라 최초 25.10 mg/kg에서 각각 0.19, 4.67, 7.27 mg/kg의 감소량을 보였으며 소석회 증가량에 따라 효율이 크게 증가됨을 확인할 수 있었다(Fig. 6a, b).

소석회의 농도를 증가시켜 적용하였을 경우, 중금속은 대체적으로 소석회 농도에 증가에 비례하는 경향을 나타내었으며, 동시에 유기물의 분리를 또한 증가하는 것을 확인하였다. 이는 중금속의 처리효율은 과산화수소 농도에 증가에 따른 유기물의 분리율의 증가에 기인하는 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 폐광산 주변의 농경지 내 납·아연 오염 토에 대하여 다양한 선별 공정을 적용하여 그에 따른 효율성을 평가하였다. 또한 중금속 오염토 내 유기물에 흡착된 중금속의 농도 감소를 위한 부유선별 기술을 적용하여 유기물 및 중금속 농도 변화를 분석하여 방안을 모색하였다.

1. 본 연구에 사용된 납, 아연 등의 중금속으로 오염 토양 시료는 석영이 주성분으로 Mn/Fe-oxide 형태가 존재하는 입자상 오염원이었으며, 사토질이 많이 함유된 토양이며, 5단계에 해당되는 잔류성 형태로 나타났다.

2. 납과 아연이 오염기준을 초과한 연구 대상 광산 근처 농경지 토양으로 다양한 중금속 오염 토양 선별 공정 적용을 평가한 결과 습식 정밀 분급의 선별 처리 효율성이 높아 선별 처리에서 우선적인 공정으로 적합한 것으로 나타났다. 그러나 자력선별은 비자성물질인 납과 아연의 경우 선별의 효과가 크지 않았으나 고입경일수록, 자력의 세기가 클수록 선별효과가 높게 나타났다.

3. 자력선별이외의 부유 선별 및 비중 선별은 납의 경우 비중 선별에서 57%의 제거효율을 보였으며, 아연의 경우 비중과 부유선별에서 19.9%와 24.4%의 효율을 보여 납의 경우 비중선별의 단계가 필요하고, 아연의 경우 부유 및 비중 선별 모두의 단계가 필요할 것으로 사료된다.

4. 그러므로 납의 경우 습식선별과 비중 선별을 복합한 중금속 선별 처리 공정이 필요할 것으로 사료되며, 아연의 경우 습식선별과 비중 또는 부유 선별을 복합한 중금속 선별 처리 공정이 필요할 것으로 사료된다.

5. 중금속 오염 토양의 유기물 분리를 위한 최적 조건 도출에서 경제적이면서 효율성을 고려하였을 때 2 L/min의 유량의 공기 공급(Aeration)하고 3% 이상의 과산화수소와 3% 이상의 소석회를 투여한 조건에서 오염토 내에서 약 40%의 유기물 제거효율을 보여 중금속 오염토양내의 유기물 분리를 위한 최적의 조건으로 사료된다.

#### 사 사

본 연구는 “2013년도 한국광해관리공단 광해방지기술개발” 과제의 지원으로 수행 되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- Alban, L.A. and Kellogg, M., 1959, Method of Soil Analysis as Used in the OSC Soil Testing Laboratory, Oregon State College, p. 4-5.
- Chon, C.-M., Kim, K.-Y., Koh, D.-C., and Choi, M.-J., 2009, Arsenic Distribution and Solubility in Groundwater of Okcheon Area, *J. Miner. Soc. Korea*, **22**, 331-342.
- Chon, C.-M., Park, J.S., Kim, J.G., and Lee, Y.-S., 2010, Relationship between Physicochemical Properties, Heavy Metal Contents and Magnetic Susceptibility of Soils, *J. Miner. Soc. Kor.*, **23**, 281-295.
- Dermont, D., Bergeron, M., Mercier, G., and Richer-Lafleche, M., 2008, Soil Washing for metal removal: A review of physical/chemical technologies and field applications, *J. Hazard. Mat.*, **152**, 1-31.
- Jeong, H.-S., Lee, W.C., Cho, H.G., and Kim, S.-O., 2008, Study on Adsorption Characteristics of Arsenic on Magnetite, *J. Miner. Soc. Korea*, **21**, 425-434.
- Jung, M.C., Jung, M.Y., and Choi, Y.M., 2004, Environmental assessment of Heavy Metals Around Abandoned Metalliferous Mine in Korea, *Econ. Environ. Geol.*, **37**, 21-33.
- Kim, S.H., Lee, W.C., Cho, H.G., and Kim S.-O., 2012, Characterization of Arsenic Adsorption onto Hematite, *J. Miner. Soc. Korea*, **25**, 197-210.
- Kim, S.-O., Lee, W.C., Jeong, H.-S., and Cho, H.G., 2009, Adsorption of Arsenic on Goethite, *J. Miner. Soc. Korea*, **22**, 177-189.
- Lee, H.-K., Kim, D.-H., Jo, Y.-H., Do, S.-H., Lee, J.-Y., and Kong, S.-H., 2009, Improving Soil Washing/flushing Process using a Mixture of Organic/inorganic Extractant for Remediation of Cadmium (Cd) and Copper (Cu) Contaminated Soil, *J. Soil & Groundwater Env.*, **14**(2), 17-25.
- Lee, I.-H. and Seol, M.-S., 2010, A Study on the Remediation of

- Lead Contaminated Soil in a Clay Shooting Range with Soil Washing, *J. Soil & Groundwater Env.*, **15**(5), 23-31.
- Lee, W.C., Kim, Y.-H., Cho, H.G., and Kim, S.-O., 2010, Characterization on the Behavior of Heavy Metals and Arsenic in the Weathered Tailings of Songcheon Mine, *J. Miner. Soc. Korea.*, **23**, 125-139.
- Mireco., 2011, The investigation report of abandoned mines.
- Mireco., 2012, The investigation report of abandoned mines.
- Mulligan, C.N., Young, R.N., and Gibbs, B.F., 2001, Remediation technologies for metal-contaminated soil and groundwater: An evaluation, *Eng. Geol.*, **60**, 193-207.
- Park, C.H., Jeon, H.S., Han, O.H., Kim, B.G., Baek, S.H., and Kim, H.S., 2010a, Flotation for Recycling of a Waste Water Filtered from Molybdenite Tailings, *J. Miner. Soc. Korea.*, **23**(3), 235-242.
- Park, D.-H., Cho, Y., and Choi, S.-I., 2010b, The Laboratory Column Examination of Stabilization for Agricultural Land Contaminated by Heavy Metals using Sequential Stabilization, *J. Soil & Groundwater Env.*, **15**, 39-45.
- Tessier, A., Campbell, G.C., and Bisson, M., 1979, Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals, *Anal. Chem.*, **51**, 844-851.
- Wuana, R.A., and Okieimen, F.E., 2011, Heavy Metals in Contaminated Soils: A Reviews of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation, International Scholarly Research Network (ISRN) Ecology, p. 1-20.