

## 기술보고

## 폐금속광산 광물찌꺼기의 지구화학적 원소 함량 평가

권요섭<sup>1,3</sup> · 황인호<sup>2</sup> · 김정욱<sup>3</sup> · 정명채<sup>3\*</sup> · 최익규<sup>4</sup><sup>1</sup>(재)환경기술정책연구원(NeLab), <sup>2</sup>(주)소암컨설팅턴트, <sup>3</sup>세종대학교 지구자원시스템공학과, <sup>4</sup>한국광해광업공단

## Geochemical Elements in Tailings from Abandoned Metal Mines

Yo Seb Kwon<sup>1,3</sup>, Inho Hwang<sup>2</sup>, Jeong Wook Kim<sup>3</sup>, Myung Chae Jung<sup>3\*</sup> and Uikyoo Choi<sup>4</sup><sup>1</sup>NeLab, Seoul, Korea<sup>2</sup>Soam Consultant Co., Ltd., Daejeon, Korea<sup>3</sup>Energy Resources & Geosystems Engineering, Sejong University, Seoul, Korea<sup>4</sup>KOMIR, Wonju, Korea

\*Corresponding Author. Myung Chae Jung, [jmc65@sejong.ac.kr](mailto:jmc65@sejong.ac.kr), Energy Resources & Geosystems Engineering, Sejong University, Seoul, Korea

## Received

8 November 2023

## Final version Received

11 December 2023

## Accepted

27 December 2023

## Abstract

A total of 30 tailings were sampled at abandoned metal mines, and 70 geochemical elements were analyzed. Among the alkali metals, lithium, rubidium, and cesium were detected in high concentrations, compared to the average content in the earth's crust (CRC values), in the tailings from iron-tungsten mines. Among the boron group elements, all mines presented high concentrations of indium. Regarding high-melting-point metals, the vanadium in iron mines registered about a 12-times higher concentration than its CRC value, and relatively higher concentrations of molybdenum, tungsten, and manganese were found in the tailings from base metal mines. As for rare earth elements, while terbium, thulium, and ruthenium were detected in higher concentrations than the CRC values in some tailings, others had a generally low presence. Regarding metalloids, bismuth and antimony were contained in high concentrations in gold-silver as well as tungsten mines, compared to CRC values.

**Key words :** abandoned metal mine, tailings, geochemical elements, rare metals, abundance of elements in Earth's crust

## 요약

본 연구에서는 국내 30개소의 폐금속광산에서 광물찌꺼기를 채취하여 70개 지구화학적 원소의 함량을 화학 분석하였다. 알칼리 금속 중 리튬(Li), 루비듐(Rb) 및 세슘(Cs)이 중석과 철을 생산한 광산의 광물찌꺼기에서 지각 내 평균 함유량 대비 높은 농도로 검출되었으며, 보론족 원소 중 인듐(In)은 모든 광종의 광물찌꺼기에서 높은 농도로 검출되었다. 고용점 금속 중 바나듐(V)은 철을 생산한 광물찌꺼기에서 지각 내 평균 함유량 보다 약 12배 높은 농도로 검출되었으며, 몰리브덴(Mo), 텅스텐(W), 망가니즈(Mn)은 중석광산, Base metal 광산에 많은 함유량으로 부존하였다. 희토류는 일부 시료에서 터븀(Tb), 툴륨(Tm) 및 루테튬(Lu)이 지각 내 평균 함유량 대비 높은 농도로 검출되었으나, 이외 항목의 함유량은 대체로 낮은 것으로 평가되었다. 준금속 중 비스무트(Bi)와 안티모니(Sb)가 일부 금, 은 및 중석을 생산한 광산의 광물찌꺼기에서 지각 내 평균 함유량 대비 높은 농도가 검출되었다.

**주요어 :** 폐금속광산, 광물찌꺼기, 지구화학적 원소, 희유금속, 지각 내 원소 함유량

## 서론

희유금속(rare metal)은 철, 구리 등과 같이 지각에 부존량이 풍부하거나 추출이 비교적 용이한 일반금속(common metal)과는 대비되는 개념으로 산업적 수요가 큰 금속원소를 의미한다. 전 세계적으로 자국의 산업특성에 따라 원소를 구분하고 있으며, 국내의 경우 총 35종의 금속 종류와 56개의 원소를 선정하여 관리하고 있다(KIGAM, 2021). 이러한 희유금속은 이차전지, 태양광 발전 등 신산업 및 에너지 분야에 핵심소재로 사용되고 있어 국제적인 수요가 급증하고 있지만, 미국과 중국 등 일부 국가에 매장량이 편중되어 이에 따른 생산 불균형으로 각국 공급망의 수급 불안 및 안정적 확보 문제가 대두되고 있다.

이에, 국제적으로 희유금속의 공급처 확보를 위한 경쟁심화 및 지속적인 가격 상승 등을 해결하기 위하여 국가적 차원의 핵심원료광물(critical minerals)을 선정하고 광물 매장량에 대한 탐사 및 평가를 통해 관련 DB를 구축하고 있다. 미국은 캐나다 및 호주와 공동으로 CMMI(critical minerals mapping initiative)를 발족시키고 핵심원료광물이 주요 광물에 동반(companion)되도록 작용하는 지질학적 현상을 밝혀 핵심원료광물의 공급원을 찾기 위해 노력하고 있으며(DOE, 2020), 유럽은 핵심원자재(critical raw materials, CRM) 목록을 발표하고 폐광 자원, 전자폐기물 등에 대한 재활용 기술을 개발하여 핵심원자재를 확보하고자 하는 노력을 기울이고 있다(Santiago et al., 2016). 남미의 대표적인 광업 국가인 칠레 또한 국립지질광업연구소(sernageomin)에서 광산정보 및 광산폐기물에 대한 DB를 구축하여 제공하고 있다(Sernageomin, 2023). 특히, 칠레의 DB에는 광산명, 광산의 위치(좌표정보), 광산소유자, 가행 여부, 광산폐기물 규모 등의 정보가 구축되어 있으며, 57개 금속 물질의 농도 정보도 포함되어 있다.

국내에서는 해외자원개발 및 비축량 확대 등의 정책적 해결 방안과 더불어 인쇄회로기판(PCB)의 유가금속 회수(Park et al., 2013), 태양광 패널 재활용(Lee et al., 2022) 등 폐기물 자원 회수 기술 연구를 수행하고 있다. 한편, 광물찌꺼기를 이용한 순환자원화 기술개발의 경우, 비소성 에코벽돌 개발(Park et al., 2009), 다공성 담체(Jung et al., 2004) 등을 제작하는 연구가 수행된 바 있다. 특히 광산폐기물의 재처리를 통하여 자원회수의 가능성을 평가한 연구(Lee and Kim, 2021)에 따르면 1차적으로 선광이 이루어진 광물찌꺼기는 목표 광물의 품위가 낮아 선광기술이 발달하여 경제성이 확보되는 시점에서는 개발이 가능할 것으로 평가하고 있으며, 무엇보다 모든 광산폐기물에 대한 이화학 및 광물학적 분석을 수행하고 이를 통하여 기초적인DB를 구축하는 것이 선행되어야 한다고 평가하고 있다. 이처럼 국

내에서는 폐금속광산의 광물찌꺼기에 대한 재활용 측면의 연구가 주를 이루고 있으며, 광종별 또는 광상별 특성에 따라 구분된 폐광산의 자원 회수 측면에서의 사전조사 및 광물학적 분석결과에 대한 기초현황자료가 미미한 현실이다.

본 연구는 국내 대표적인 폐금속광산의 개발·생산 광종에 따라 광물찌꺼기를 채취하고 각각의 광물찌꺼기 시료를 대상으로 희유금속을 포함한 총 70가지 원소의 함유량을 분석하여 지각의 원소 평균 함량 참고치와의 비교를 통한 상대적인 부하도를 평가하였다. 이러한 연구결과는 광산폐기물 재활용을 위한 DB 구축 사업과 자원회수 및 개발사업의 타당성을 평가하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 연구방법

### 시료 채취 및 전처리

국내에서 광물찌꺼기가 확인된 금속광산은 약 345개소로 보고되었으며(KOMIR, 2014), 이 중 생산 광종에 따라 금, 은(10개), 금, 은+ base metal(8개), base metal(6개), 중석(3개) 및 철(3개)로 분류하여 총 30개의 광물찌꺼기 시료를 채취하였다(Table 1). Fig. 1에 광물찌꺼기의 시료채취 위치를 도시하였다.

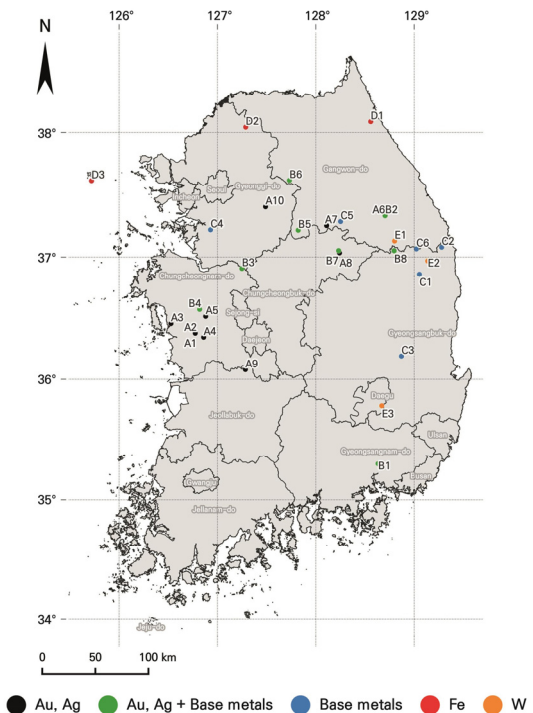


Fig. 1. Sampling location of tailings from abandoned metal mines in Korea.

국내 광물찌꺼기 적치장은 광해방지사업의 일환으로 HDPE를 이용한 차수 처리 및 복토재가 매립 시공되어있다. 기시공된 적치장 중심부에서 시추장치를 이용하여 시료를 채취할 경우, 우수의 유입으로 인한 침출수 발생 등 유해 물질이 확산되어 주변 환경에 악영향을 미칠 수 있다. 이에, 본 연구에서 채취된 광물찌꺼기는 기 확보된 시료를 활용하거나 적치장 경계부 또는 하류부에서 일부 노출된 광물찌꺼기를 채취하였다. 또한 일부 시료는 가행광산에서 현재 처리 중인 광물찌꺼기를 채취하였다. 시료 채취 순서는 1) 광물찌꺼기 적치장 진입, 2) 광물찌꺼기 노출부 탐색,

3) 시료 채취, 4) 채취 위치정보 저장 순으로 수행되었다. 채취가 완료된 광물찌꺼기 시료는 실험실 이송 후, 상온에서 풍건하였다. 풍건이 완료된 시료는 ASTM(American Society of Testing Materials) 표준체 규격 100 mesh(75  $\mu$ m) 체망을 이용한 체거름 후, 화학적 농도를 정량하기 위한 시료로 활용하였다.

#### 화학분석 및 평가 방법

광물찌꺼기에 함유된 원소를 정량하기 위해 적용된 방법은 왕수 추출법이다. 왕수 추출법은 시료 3 g에 질산 7 ml와

**Table 1.** General information on studied mines in Korea

No.	ID <sup>1)</sup>	Target metal	Mineralization type	Tailing amount (m <sup>3</sup> )
1	A1	Au	hydrothermal	13,200
2	A2	Au	hydrothermal	17,550
3	A3	Au	hydrothermal	28,800
4	A4	Au	hydrothermal	-
5	A5	Au	hydrothermal	302,600
6	A6	Au, Ag	replacement	4,550
7	A7	Au, Ag	hydrothermal	11,900
8	A8	Au, Ag	replacement	225
9	A9	Au, Ag	hydrothermal	389,900
10	A10	Au, Ag	hydrothermal	49,600
11	B1	Au, Ag, Cu	hydrothermal	158,400
12	B2	Au, Ag, Cu	hydrothermal	7,350
13	B3	Au, Ag, Cu	hydrothermal	-
14	B4	Au, Ag, Cu, Pb	hydrothermal	35,200
15	B5	Au, Ag, Cu, Pb	hydrothermal	-
16	B6	Au, Ag, Zn, Si	hydrothermal	2,400
17	B7	Au, Ag, Pb, Zn	replacement	25,000
18	B8	Au, Ag, Fe	alaskite vein	34,000
19	C1	Cu, Pb, Zn	replacement	20,000
20	C2	Cu, Pb, Zn	skarn	300,000
21	C3	Zn	hydrothermal	6,900
22	C4	Pb, Zn	hydrothermal	208,800
23	C5	Pb, Zn	hydrothermal	42,000
24	C6	Cu, Pb, Zn, Mn	skarn	100,000
25	D1	W	skarn	6,086,900
26	D2	W	hydrothermal	90,400
27	D3	Cu, W	hydrothermal	22,000
28	E1	Fe	skarn	82,500
29	E2	Fe	skarn	200,000
30	E3	Fe, Ti	orthomagmatic	80,000

1) ID : A(Au, Ag), B(Au, Ag + Base metals), C(Base metals) D(W), E(Fe).

염산 21 ml를 넣고 70°C로 1시간 가열한 후 증류수 72 ml를 넣고 유리섬유여과지(0.45 μm)로 여과하였다. 왕수는 일반 산에는 용해되지 않는 귀금속(백금, 금 등)을 강력한 산화제인 염화 일산화질소(nitrosyl chloride, NOCl) 작용으로 용해할 수 있다. 조제된 왕수 용액의 화학분석은 ICP-OES(model Optima 8300, Perkin-Elmer Inc.)를 이용하였다. 분석 원소는 총 70개 항목으로 국내에서 핵심광물로 분류한 35종의 원소를 포함하였다(Table 2).

광물찌꺼기 내 원소함량은 알칼리족(alkali), 보론족(boron), 준금속(metalloid), 희토류(ree), 철족(iron), 고용점(high melting point) 및 백금족(platinum) 등으로 구분하여 도시하였고, 지각 내에 평균적으로 존재하는 원소 함량(Haynes, 2017)을 이용하여 상대적 부하량을 평가하였다.

**Table 2.** Grouping of analyzed elements from tailing samples

Group	Analyzed elements
Alkali metals	Li, Na, K, Rb, Cs
Alkaline earth metals	Be, Mg, Ca, Sr, Ba
Metalloids	Ge, P, As, Sb, Bi, Se, Te, Sn, Si, S
Iron group	Fe, Co, Ni
Boron group	B, Al, Ga, In, Tl, Cd
High melting point metals	Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, Re
REEs	LREEs La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd
	HREEs Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y, Sc
Platinum group	Pt, Ru, Rh, Os, Pd, Ir
Others	Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Th, U, Hg

## 광물찌꺼기에 함유된 원소 분포

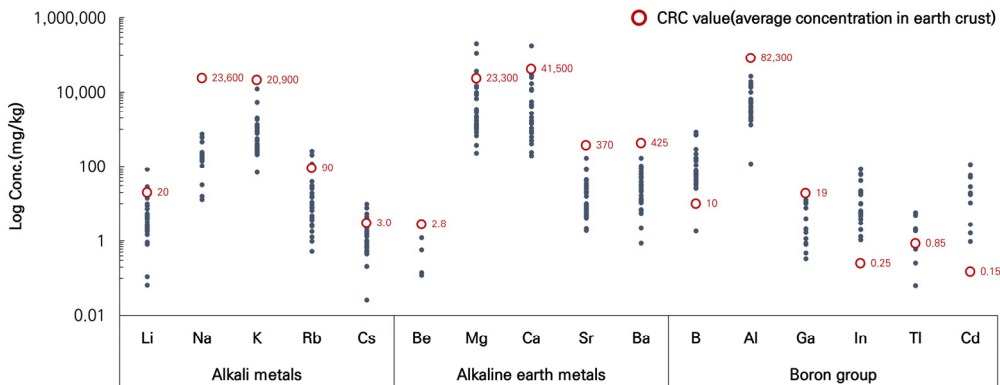
### 알칼리족 및 보론족 원소

알칼리족 원소는 알칼리 금속(alkali metals)과 알칼리 토 금속(alkaline earth metals)으로 분류할 수 있다. 알칼리 금속(alkali metals)은 수소(hydrogen, H)를 제외한 주기율표 중 1A쪽에 속하는 반응성이 큰 금속으로써 리튬(lithium, Li), 소듐(sodium, Na), 포타슘(potassium, K), 루비듐(rubidium, Rb), 세슘(cesium, Cs) 및 프랑슘(francium, Fr)의 총 6개 원소로 구성된다. 알칼리 토금속(alkaline earth metals)은 주기율표 2A쪽에 속하는 원소로서 베릴륨(beryllium, Be), 마그네슘(magnesium, Mg), 칼슘(calcium, Ca), 스트론튬(strontium, Sr), 바륨(barium, Ba), 라듐(radium, Ra)의 총 6개 원소로 구성된다. 국내에서는 알칼리족 원소 중 리튬(Li), 마그네슘(Mg), 세슘(Cs), 베릴륨(Be), 스트론튬(Sr) 및 바륨(Ba) 등 총 6종 원소를 희유금속으로 지정하고 있다. 본 연구에서는 알칼리족 원소 중 프랑슘(Fr)과 라듐(Ra)을 제외한 총 10개 원소를 화학 분석하였다.

보론족(boron groups) 원소는 주기율표 중 3A쪽에 속하는 원소로 붕소(boron, B), 알루미늄(aluminium, Al), 갈륨(gallium, Ga), 인듐(indium, In), 탈륨(thallium, Tl), 니호늄(nihonium, Nh)의 총 6개 원소로 구성된다. 국내 희유금속 분류에서는 카드뮴(cadmium, Cd)을 포함하여 총 7개 원소를 보론족 원소로 구분하고 있다. 본 연구에서는 보론족 원소 중 니호늄을 제외한 5개 항목과 희유금속에 속하는 카드뮴을 포함하여 총 6개 원소를 화학 분석하였다. Fig. 2에 알칼리족 및 보론족 원소의 분석 결과를 도시하였다.

### 리튬(lithium, Li)

리튬은 알칼리 금속 중 운행기 연료 전환 및 각종 전자 장비 개발 등 2차전지 소재에 핵심적인 원소로서 최근 수요



**Fig. 2.** Elemental concentrations of alkali and boron group in tailings.

가 급증하고 있는 광물이다. 리튬의 지각 내 평균 함유량은 20 mg/kg으로 보고되었다. 본 연구에서는 0.06 ~ 83.37 mg/kg 범위로 검출되어 최대 농도를 기준으로 지각 내 평균 함량 대비 약 4.2배 높은 농도로 확인되었다. 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, D1(24.98 mg/kg), E1(28.59 mg/kg) 및 E2(83.37 mg/kg)으로 중석 및 철 광산의 광물찌꺼기에서 상대적 많은 리튬(lithium, Li)을 함유하는 것으로 확인되었다.

#### 루비듐(Rubidium, Rb)

루비듐의 지각 내 평균 함유량은 90 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 0.53 ~ 259.05 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 3배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, D1(118.69 mg/kg), E1(259.05 mg/kg), E2(206.14 mg/kg)으로 확인되었으며, 철을 생산한 광산의 광물찌꺼기가 상대적 많은 루비듐을 함유하는 것으로 확인되었다.

#### 세슘(Cesium, Cs)

세슘의 지각 내 평균 함유량은 3 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 0.03 ~ 9.79 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 3배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, C2(4.53 mg/kg), D1(9.79 mg/kg), E1(5.41 mg/kg), E2(7.72 mg/kg)으로 확인되었으며, 중석 광산에서 상대적 많은 세슘을 함유하는 것으로 확인되었다.

#### 마그네슘(Magnesium, Mg)

마그네슘의 지각 내 평균 함유량은 23,300 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 75 ~ 112,600 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 9배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, A8(112,600 mg/kg), E1(36,170 mg/kg), E2(36,620 mg/kg)로 확인되었으며, 금, 은 또는 철을 생산한 광산의 광물찌꺼기가 상대적 많은 마그네슘을 함유하는 것으로 확인되었다.

#### 칼슘(Calcium, Ca)

칼슘의 지각 내 평균 함유량은 41,500 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 197 ~ 178,500 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 4배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, A8(178,500 mg/kg)으로 확인되어 금, 은을 생산한 광물찌꺼기의 시료에서 상대적 많은 칼슘을

함유하는 것으로 확인되었다.

이 외 알칼리족 원소 2가지 그룹 중 알칼리 금속(alkali metals) 항목에 해당하는 소듐(sodium, Na), 포타슘(potassium, K) 항목과 알칼리 토금속(alkaline earth metals) 항목에 해당하는 베릴륨(beryllium, Be), 스트론튬(strontium, Sr), 바륨(barium, Ba) 항목은 지각 내 평균 함유량 대비 모두 낮은 농도로 검출되었다.

#### 붕소(Boron, B)

붕소의 지각 내 평균 함유량은 10 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 불검출 ~ 840 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 84배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, A7(171 mg/kg), B6(172 mg/kg), C1(830 mg/kg), C2(293 mg/kg), C3(155 mg/kg), C6(839 mg/kg), D1(111 mg/kg), D3(143 mg/kg), E1(222 mg/kg), E2(164 mg/kg), E3(698 mg/kg)으로 확인되었으며, Base metal을 생산한 광산의 광물찌꺼기가 많은 붕소를 함유하는 것이 특징적이다.

#### 인듐(Indium, In)

인듐의 지각 내 평균 함유량은 0.25 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 불검출 ~ 87.20 mg/kg 범위로 나타나 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 349배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, A6(63.58 mg/kg), A7(22.35 mg/kg), B1(60.92 mg/kg), B2(85.56 mg/kg), B6(20.48 mg/kg), B7(87.20 mg/kg), C2(41.99 mg/kg), C3(17.59 mg/kg), C6(86.17 mg/kg), D1(10.23 mg/kg), E1(17.54 mg/kg), E2(20.30 mg/kg), E3(84.98 mg/kg)으로 확인되었으며, 금, 은 및 Base metal을 생산한 광산의 광물찌꺼기에서 비교적 많은 인듐을 함유하는 것이 특징적이다.

인듐은 전자 재료의 접합 특성 향상에 적합한 성질을 가지고 있으므로, 유리, 크리스탈, 세라믹의 표면을 접합하는데 사용되며, 산화물은 산화주석이 함께 첨가됨에 따라(ITO, Indium Tin Oxide) 비교적 낮은 전기저항을 갖는 안정한 산화물이다. 이 ITO는 액정이나 플라즈마 등 평판 디스플레이(FPD, Flat Panel Display)의 투명 전도막에 주로 이용되고 있다. 또한, 반도체 소자(InP), 전지 재료 및 베어링 등에도 이용되고 있다. 국내 페디스플레이에서의 인듐 회수기술을 검토한 결과, LCD 패널에서 분리된 ITO함량은 250 mg/kg 미만으로 보고되었다(Uhm *et al.*, 2015). 본 연구에서 분석된 인듐의 최대 농도(87.20 mg/kg)는 페디스플레이 함유량 대비 약 1/3수준이다.

**탈륨(Thallium, Tl)**

탈륨의 지각 내 평균 함유량은 0.85 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 불검출 ~ 5.79 mg/kg 범위로 나타나 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 7배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, A8(4.92 mg/kg), E1(5.79 mg/kg)으로 확인되었으며, 농도의 차이는 크지 않으나, 철광산의 광물찌꺼기가 상대적 많은 탈륨을 함유하는 것으로 확인되었다.

**카드뮴(Cadmium, Cd)**

카드뮴의 지각 내 평균 함유량은 0.15 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 불검출 ~ 113.15 mg/kg 범위로 나타나 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 754배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, A1(51.37 mg/kg), A2(113.15 mg/kg), A3(10.59 mg/kg), A5(17.58 mg/kg), A6(57.81 mg/kg), C1(28.75 mg/kg), C4(19.52 mg/kg)으로 확인되었으며, 금, 은 광산의 광물찌꺼기가 상대적 많은 카드뮴을 함유하는 것으로 확인되었다.

이 외 보론족 원소에 해당하는 알루미늄(aluminium, Al), 갈륨(gallium, Ga) 항목은 지각 내 평균 함유량 대비 모두 낮은 농도로 검출되었다.

**준금속 및 기타 원소**

준금속 원소는 저마늄(germanium, Ge), 인(phosphorus, P), 비소(arsenic, As), 안티몬(antimony, Sb), 비스무트(bismuth, Bi), 셀레늄(selenium, Se), 텔레륨(tellurium, Te), 주석(stannum, Sn) 및 황(sulfur, S) 등 총 10개 원소를 대상으로 분석하였으며, 기타 원소로는 과거 국내 주요 생산 광종인 금(gold, Au), 은(silver, Ag), 구리(Copper, Cu), 납(plumbum, Pb) 및 아연(zinc, Zn)과 토륨(thorium, Th), 우라늄

(uranium, U) 및 수은(hydrargyrum, Hg) 등을 포함하여 총 8개 원소를 화학 분석하였다. Fig. 3에 준금속 및 기타 원소의 분석 결과를 도시하였다.

**비소(Arsenic, As)**

비소의 지각 내 평균 함유량은 1.8 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 2.9 ~ 216,300 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 120,159배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, A6(37,760 mg/kg), A7(18,960 mg/kg), B2(216,290 mg/kg), C1(10,440 mg/kg)으로 확인되었으며, 생산 광종에 금, 은을 포함하는 광산의 광물찌꺼기가 많은 비소를 함유하는 것으로 확인되었다. 이는 비소가 금과 은의 지구화학적 수반관계를 가지며, 금, 은 광산의 광물찌꺼기에는 유비철석이 함유되어 많은 비소가 검출되는 것으로 판단된다(Smedley and Kinniburgh, 2002).

**안티몬(Antimony, Sb)**

안티몬의 지각 내 평균 함유량은 0.2 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 불검출 ~ 1,357 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 6,785배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, B2(1,357 mg/kg), C3(197 mg/kg)으로 확인되었으며, 금, 은과 Base metal을 생산한 광산의 광물찌꺼기가 상대적 많은 안티몬을 함유하는 것으로 확인되었다.

**비스무트(Bismuth, Bi)**

비스무트의 지각 내 평균 함유량은 0.01 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 불검출 ~ 5,315 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 625,343배 높은

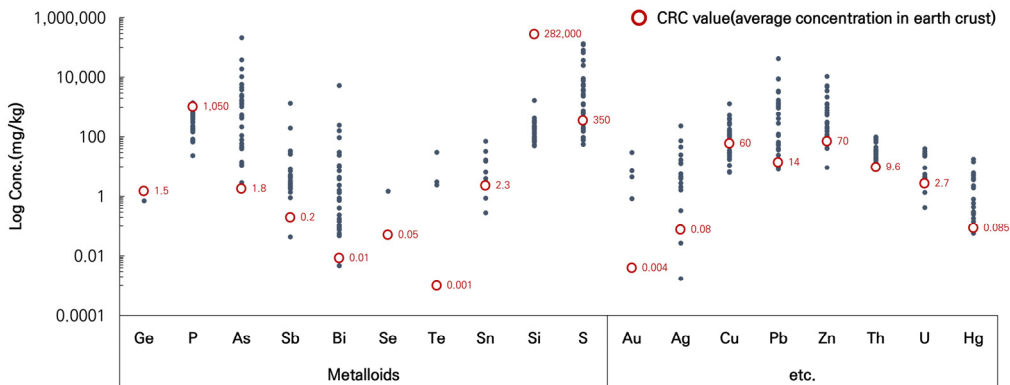


Fig. 3. Elemental concentrations of metalloids and etc. in tailings.



농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, A6(5,315 mg/kg), C6(93 mg/kg), D1(158 mg/kg), D2(245 mg/kg)으로 확인되었으며, 금, 은 광산의 광물찌꺼기가 상대적 많은 비스무트를 함유하는 것으로 확인되었다.

#### 셀레늄(Selenium, Se)

셀레늄의 지각 내 평균 함유량은 0.05 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 불검출~1.5 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 1.5배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, D2(1.5 mg/kg)으로 확인되었으며, 중석 광산의 광물찌꺼기가 상대적 많은 셀레늄을 함유하는 것으로 확인되었다.

#### 텔루륨(Tellurium, Te)

텔루륨의 지각 내 평균 함유량은 0.001 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 불검출~30.86 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 30,859배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, A6(30.86 mg/kg), B2(2.41 mg/kg), B7(3.03 mg/kg)으로 확인되었으며, 금, 은을 생산한 광산의 광물찌꺼기가 상대적 많은 텔루륨을 함유하는 것으로 확인되었다.

#### 주석(Tin, Sn)

주석의 지각 내 평균 함유량은 2.3 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 불검출~70.7 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 31배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, B7(70.7 mg/kg), C2(17.1 mg/kg), C6(33.0 mg/kg), D1(15.6 mg/kg)으로 확인되었으며, 금, 은과 Base metal을 생산한 광산의 광물찌꺼기가 상대적 많은 주석을 함유하는 것으로 확인되었다.

#### 황(Sulfur, S)

황의 지각 내 평균 함유량은 350 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 56~135,712 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 388배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, A6(69,420 mg/kg), B1(135,712 mg/kg), B2(36,134 mg/kg), B7(83,436 mg/kg), C1(125,925 mg/kg), C6(24,637 mg/kg)으로 확인되었으며, 금, 은 및 Base metal을 생산한 광산의 광물찌꺼기가 상대적 많은 황을 함유하는 것으로 확인되었다.

이 외 준금속 원소에 해당하는 저마늄(germanium, Ge)과 규소(Silicon, Si)는 지각 내 평균 함유량 대비 모두 낮은 농도로 검출되었다. 인(phosphorus, P) 항목의 경우, 지각 내 평균 함유량(1,050 mg/kg) 대비 대체적 낮은 농도로 분포하며, 최대 농도(1,410 mg/kg)는 지각 내 평균 함유량과 유사한 수준으로 확인되었다.

#### 금(Gold, Au)

금의 지각 내 평균 함유량은 0.004 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 불검출~29.9 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 7,464배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, A6(4.4 mg/kg), B2(29.9 mg/kg), B7(7.2 mg/kg), D2(0.9 mg/kg)으로 확인되었으며, 금, 은을 생산 광종으로 포함하는 광산의 광물찌꺼기가 상대적 많은 금을 함유하는 것으로 확인되었다. 특히, B2 시료의 상당히 높은 농도는 목적 광물에 대한 잔류도 및 회수 가능성 측면에서 유의한 수준의 함유량으로 판단된다.

#### 은(Silver, Ag)

은의 지각 내 평균 함유량은 0.08 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 불검출~229 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 3,054배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, A6(74 mg/kg), B2(229 mg/kg), B7(46 mg/kg)으로 확인되었으며, 금, 은 및 Base metal 생산한 광산의 광물찌꺼기가 상대적 많은 은을 함유하는 것으로 확인되었다.

#### 구리(Copper, Cu)

구리의 지각 내 평균 함유량은 60 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 불검출~1,314 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 22배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, A6(1,314 mg/kg)으로 확인되었으며, 금, 은을 생산한 광산의 광물찌꺼기가 상대적 많은 구리를 함유하는 것으로 확인되었다.

#### 납(Lead, Pb)

납의 지각 내 평균 함유량은 14 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 8~41,660 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 2,976배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, A2(8,759 mg/kg), A6(8,907 mg/kg), B2(41,660 mg/kg), B7(8,812 mg/kg)으로 확인되었으며, 금, 은 및

Base metal을 생산한 광산의 광물찌꺼기가 상대적 많은 납을 함유하는 것으로 확인되었다.

**아연(Zinc, Zn)**

아연의 지각 내 평균 함유량은 70 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 9~10,673 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 152배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, A2(3,522 mg/kg), A6(4,850 mg/kg), C4(10,673 mg/kg)으로 확인되었으며, Base metal을 생산한 광산의 광물찌꺼기가 상대적 많은 아연을 함유하는 것으로 확인되었다.

**토륨(Thorium, Th)**

토륨의 지각 내 평균 함유량은 9.6 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 8.4~99.5 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 10배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, A6(77.7 mg/kg), B1(83.2 mg/kg), B7(93.6 mg/kg), C1(96.4 mg/kg), C6(99.5 mg/kg), E3(93.9 mg/kg)으로 확인되었으며, 광종별 농도의 차이는 크지 않으나, Base metal을 생산한 광산의 광물찌꺼기가 상대적 많은 토륨을 함유하는 것으로 확인되었다.

**우라늄(Uranium, U)**

우라늄의 지각 내 평균 함유량은 2.7 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 불검출~40.5 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 15배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, A6(28.1 mg/kg), B1(26.3 mg/kg), B2(40.5 mg/kg), B7(33.3 mg/kg), C6(22.7 mg/kg), D2(24.1 mg/kg),

E3(26.1 mg/kg)으로 확인되었으며, 금, 은과 Base metal 함께 생산한 광산의 광물찌꺼기에서 상대적 많은 우라늄을 함유하는 것으로 확인되었다.

**수은(Mercury, Hg)**

수은의 지각 내 평균 함유량은 0.085 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 불검출~18.0 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 212배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, A1(6.1 mg/kg), A3(5.9 mg/kg), A6(18.0 mg/kg), A7(4.0 mg/kg), A10(3.6 mg/kg), B3(4.9 mg/kg), B4(3.6 mg/kg), B5(5.0 mg/kg), B6(14.7 mg/kg)으로 확인되었으며, 금, 은을 생산한 광산의 광물찌꺼기가 상대적 많은 수은을 함유하는 것으로 확인되었다. 이는 국내 수은 광상이 거의 존재하지 않는 것을 고려할 때, 과거 금, 은에 대한 선광과정(아말감법)에 의해 잔류된 수은으로 추정된다.

**희토류**

희토류 원소(rare earth elements, REEs)는 스칸듐(scandium, Sc), 이트륨(yttrium, Y)과 원소 주기율표에서 57번 란타넘(lanthanum, La)에서 71번 루테튬(lutetium, Lu)까지 란타넘계열 원소 15개를 합친 17개 원소 총칭이다. 희토류는 화학적으로 안정되고 열을 잘 전도하는 양도체이며 우수한 물리적 광학적 특성을 보유하여 광학유리, 전자제품, 금속 첨가제, 촉매제 등 현대 첨단산업의 필수 원자재이다. 더불어 편중된 자원매장량 때문에 범국가적 핵심위기 광물 확보전략 중심에 있는 원소족이라 할 수 있다.

본 연구에서는 란타넘(lanthanum, La), 세륨(cerium, Ce), 프라세오디뮴(praseodymium, Pr), 네오디뮴(neodymium, Nd), 사마륨(samarium, Sm), 유로퓸(europium, Eu), 가돌리늄(gadolinium, Gd)의 경희토류(LREEs) 7종과 터븀(ter-

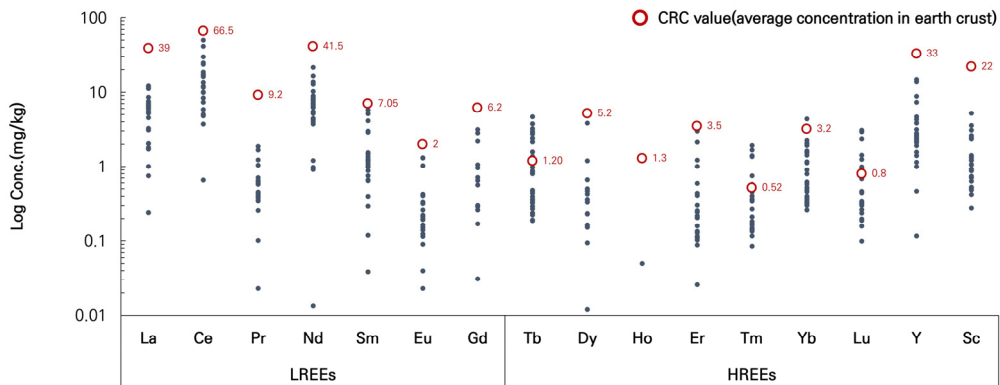


Fig. 4. Elemental concentrations of REEs in tailings.



bium, Tb), 디스프로슘(dysprosium, Dy), 홀뮴(holmium, Ho), 어븀(erbium, Er), 툴륨(thulium, Tm), 이터븀(ytterbium, Yb), 루테튬(lutetium, Lu), 이트륨(yttrium, Y) 및 스칸듐(scandium, Sc)의 중희토류(HREEs) 9종에 대하여 총 16개 희토류 항목을 화학 분석하였다. Fig. 4에 희토류의 분석 결과를 도시하였다.

**터븀(Terbium, Tb)**

터븀의 지각 내 평균 함유량은 1.2 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 0.2 ~ 4.7 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 4배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, B2(2.9 mg/kg), B7(2.8 mg/kg), C1(3.7 mg/kg), C6(3.2 mg/kg), E3(4.7 mg/kg)으로 확인되었으며, 철광산의 광물찌꺼기가 상대적 많은 터븀을 함유하는 것으로 확인되었다.

**툴륨(Thulium, Tm)**

툴륨의 지각 내 평균 함유량은 0.52 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 불검출 ~ 1.93 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 4배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, C1(1.93 mg/kg), C6(1.69 mg/kg), E3(1.37 mg/kg)으로 확인되었으며, Base metal 광산의 광물찌꺼기가 비교적 많은 툴륨을 함유하는 것으로 확인되었다.

**루테튬(Lutetium, Lu)**

루테튬의 지각 내 평균 함유량은 0.8 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 불검출 ~ 3.1 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 4배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료

를 검토한 결과, B1(2.4 mg/kg), C1(3.0 mg/kg), C6(3.1 mg/kg), E3(2.9 mg/kg)으로 확인되었으며, Base metal 광산의 광물찌꺼기가 상대적 많은 루테튬을 함유하는 것으로 확인되었다.

이 외 희토류에 해당하는 원소는 지각 내 평균 함유량 대비 모두 낮은 농도로 검출되었다.

**철족, 고융점 및 백금족 원소**

철족 원소는 철(iron, Fe), 코발트(cobalt, Co), 니켈(nickel, Ni)의 총 3개 원소를 화학 분석하였으며, 고융점 및 백금족 원소는 타이타늄(titanium, Ti), 지르코늄(zirconium, Zr), 하프늄(hafnium, Hf), 바나듐(vanadium, V), 나이오븀(niobium, Nb), 탄탈럼(tantalum, Ta), 크롬(chromium, Cr), 몰리브덴(molybdenum, Mo), 텅스텐(wolframium, W), 망가니즈(manganum, Mn), 레늄(rhenium, Re), 백금(platinum, Pt), 루테늄(ruthenium, Ru), 로듐(rhodium, Rh), 오스뮴(osmium, Os), 팔라듐(palladium, Pd) 및 이리듐(iridium, Ir)의 총 17개 원소를 화학 분석하였으며 그 결과는 아래 Fig. 5와 같다.

**철(iron, Fe)**

철의 지각 내 평균 함유량은 56,300 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 7,400 ~ 248,300 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 4배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, A6(159,400 mg/kg), B1(178,400 mg/kg), B2(204,600 mg/kg), B7(196,900 mg/kg), C1(248,300 mg/kg), C2(100,900 mg/kg), C6(228,100 mg/kg), E3(194,800 mg/kg)으로 확인되었으며, Base metal 광산의 광물찌꺼기가 상대적 많은 철을 함유하는 것으로 확인되었다.

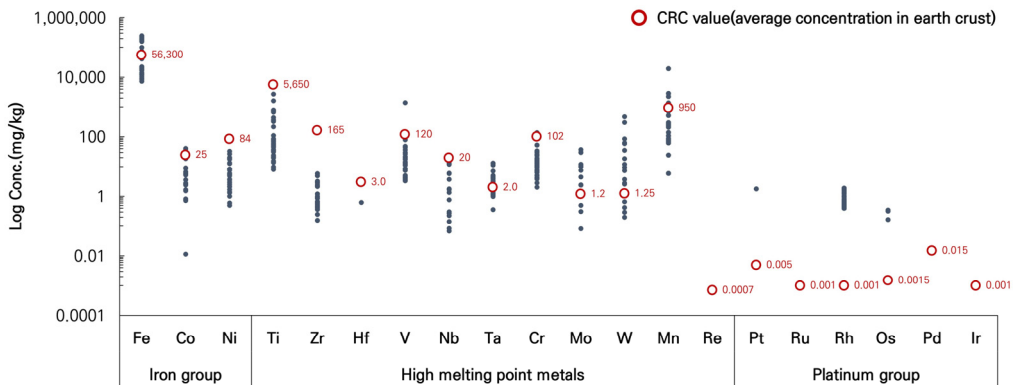


Fig. 5. Elemental concentrations of iron group / high melting point metals / platinum group in tailings.

### 바나듐(Vanadium, V)

바나듐의 지각 내 평균 함유량은 120 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 3.3~1,408 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 12배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, E3(1,408 mg/kg)으로 확인되었으며, 철광산의 광물찌꺼기가 상대적 많은 바나듐을 함유하는 것으로 확인되었다. 바나듐은 최근 화재나 폭발 위험이 없는 에너지 저장장치로서 리튬이온 배터리를 대체할 차세대 바나듐 흐름전지(vanadium redox-flow batteries)로 주목받는 원소이며, 안정적 확보를 위한 기술 개발에 관심이 모아지고 있다(Kim, 2019; Kim and Jeon, 2019). 국내에도 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>가 0.3~0.6% 정도의 양의 부존되어 있는 것으로 확인되고 있으며, Kim(2013), Lee *et al.*(1997)에 의하면 국내 경기 북부 지역에 함바나듐 티탄자철석 광상이, 충남 금산 지역에 우라늄 함유 바나듐광상이 부존된 것으로 보고되었다. 본 연구에서 분석된 최대 바나듐 함유량은 국내 부존량 대비 다소 낮은 수치이지만 선광 공정을 거쳐 파분쇄가 불필요하여 광물찌꺼기의 재처리가 유리한점을 고려하면 회수 가능성 측면에서 유의한 결과이다.

### 탄탈럼(Tantalum, Ta)

탄탈럼의 지각 내 평균 함유량은 2.0 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 불검출~13.3 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 7배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, B1(11.3 mg/kg), C1(13.3 mg/kg), C6(13.1 mg/kg), E3(13.1 mg/kg)으로 확인되었으며, Base metal 광산의 광물찌꺼기가 상대적 많은 탄탈럼을 함유하는 것으로 확인되었다.

### 몰리브덴(Molybdenum, Mo)

몰리브덴의 지각 내 평균 함유량은 1.2 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 불검출~37.4 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 314배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, A6(30.6 mg/kg), A9(30.2 mg/kg), B1(12.0 mg/kg), C4(10.0 mg/kg), D1(37.4 mg/kg), D2(10.8 mg/kg)으로 확인되었으며, 중석 광산의 광물찌꺼기가 상대적 많은 몰리브덴을 함유하는 것으로 확인되었다.

### 텅스텐(Tungsten, W)

텅스텐의 지각 내 평균 함유량은 1.25 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 불검출~474 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 379배 높은 농도로 확

인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, A2(59 mg/kg), A3(63 mg/kg), A6(86 mg/kg), D1(301 mg/kg), D2(474 mg/kg)으로 확인되었으며, 중석 광산의 광물찌꺼기가 상대적 많은 텅스텐을 함유하는 것으로 확인되었다.

### 망가니즈(Manganese, Mn)

망가니즈의 지각 내 평균 함유량은 950 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 5.9~19,400 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 20배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, A9(2,900 mg/kg), C1(19,400 mg/kg), C4(2,300 mg/kg)으로 확인되었으며, Base metal 광산의 광물찌꺼기가 상대적 많은 망가니즈를 함유하는 것으로 확인되었다.

### 백금(Platinum, Pt)

백금의 지각 내 평균 함유량은 0.005 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 불검출~1.8 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 359배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, C6(1.8 mg/kg)으로 확인되었으며, Base metal 광산의 광물찌꺼기가 상대적 많은 백금을 함유하는 것으로 확인되었다.

### 로듐(Rhodium, Rh)

로듐의 지각 내 평균 함유량은 0.001 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 불검출~1.9 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 1,883배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, A5(1.0 mg/kg), A10(1.3 mg/kg), B1(1.8 mg/kg), B6(1.0 mg/kg), C2(1.6 mg/kg), C6(1.9 mg/kg), D1(1.6 mg/kg), E1(1.2 mg/kg), E2(1.0 mg/kg), E3(1.3 mg/kg)으로 확인되었으며, Base metal 광산의 광물찌꺼기가 상대적 많은 로듐을 함유하는 것으로 확인되었다.

### 오스뮴(Osmium, Os)

오스뮴의 지각 내 평균 함유량은 0.0015 mg/kg으로 보고되었으며, 본 연구에서는 불검출~0.35 mg/kg 범위로 검출되어 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 232배 높은 농도로 확인되었다. 광종별 지각 내 평균 함유량 보다 높게 검출된 시료를 검토한 결과, A8(0.17 mg/kg), A9(0.35 mg/kg), D2(0.32 mg/kg)으로 확인되었으며, 금, 은 광산의 광물찌꺼기가 상대적 많은 오스뮴을 함유하는 것으로 확인되었다.

### 그룹별 원소함량 비교

본 연구에서는 국내 30개소의 폐금속광산에서 광물찌꺼기를 채취하여 70개 원소의 함량을 화학 분석하였으며, 분석결과를 기초로 다음과 같은 결과를 얻었다.

알칼리 금속 중 리튬(Li), 루비듐(Rb) 및 세슘(Cs)이 지각 내 평균 함유량 대비 약 2~4배 정도 높은 농도로 검출되었으며, 중석과 철을 생산한 광산의 광물찌꺼기에 비교적 많이 함유된 것으로 확인되었다.

알칼리 토금속 중 마그네슘(Mg) 및 칼슘(Ca)이 지각 내 평균 함유량 대비 약 4~9배 높은 농도로 검출되었으며, 금, 은을 생산한 광산의 광물찌꺼기에 비교적 많이 함유된 것으로 확인되었다.

보론족 원소 중 인듐(In)은 모든 광종의 광물찌꺼기에서 대체로 높은 농도로 검출되었으며 최대 농도 기준으로 지각 내 평균 함유량 대비 약 350배 부존된 것으로 확인되었다. 카드뮴(Cd)의 경우 금, 은 또는 Base metal을 생산한 광산의 광물찌꺼기에서 지각 내 평균 함유량보다 높은 경향이 확인되었으며, 최대 농도 기준으로 약 750배 부존된 것으로 확인되었다.

철족 원소 중 철(Fe)은 금, 은과 Base metal을 생산한 광산의 광물찌꺼기에서 지각 내 평균 함유량보다 높은 경향이 확인되었으며, 최대 농도 기준으로 약 4배 부존된 것으로 확인되었다.

고용점 금속 중 바나듐(V)은 최대 농도를 기준으로 철을 생산한 1개 광산의 광물찌꺼기에서 지각 내 평균 함유량보다 약 12배 높은 농도로 검출되었으며, 몰리브덴(Mo), 텅스텐(W), 망가니즈(Mn)은 각각 약 30배, 380배, 20배 정도 높은 농도로 검출되어 광물찌꺼기 중 자원의 회수 측면에서 유의한 결과를 확인하였다.

백금족 원소는 최대 농도를 기준으로 백금(Pt)과 로듐(Rh)이 각각 약 359배, 1,883배 높은 농도로 검출되었다.

희토류의 경우, 터븀(Tb), 툴륨(Tm) 및 루테튬(Lu)이 지각 내 평균 함유량 대비 약 4배 이상 높은 농도로 검출되었으나, 이외 희토류 원소는 모두 지각 내 평균 함유량보다 낮은 농도로 검출되었다.

준금속 중 비소(As)는 금, 은과 Base metal을 함께 생산한 광산의 광물찌꺼기에서 최대 216.300 mg/kg으로 지각 내 평균 함량 대비 약 120,000배 높은 농도가 검출되었으며, 이외 금, 은 광산과 Base metal 광산에서도 높은 함유량이 확인되었다. 비스무트(Bi)는 금, 은을 생산한 광산의 광물찌꺼기에서 최대 5,300 mg/kg으로 지각 내 평균 함량 대비 약 625,000배 높은 농도가 검출되었으며, 일부 중석 광산에서도 높은 함유량이 확인되었다. 이외 안티모니(Sb)도 지각 내 평균 함유량 대비 최대 약 6,800배 부존된 것을 확인하였다.

기타 귀금속 및 중금속 등의 경우, 생산된 광종에 따라 높은 부존 함량이 확인되었다. 최대 농도를 기준으로 지각 내 평균 함량 대비 금(Au) 약 7,500배, 은(Ag) 약 3,000배, 납(Pb) 약 3,000배 및 아연(Zn) 약 150배 등으로 확인되어 목적 광물의 선광 후에도 잔류되는 금속류가 존재함을 확인하였다.

### 분석 결과의 활용

본 연구에서 수행된 광물찌꺼기의 화학 분석 결과는 다음과 같이 활용될 수 있을 것이다.

- 1) 국내에서 지정된 희유금속 중 지각 내 평균 함량을 크게 초과하는 원소에 대해서는 분급 및 선별시험을 통한 회수 특성 평가를 통해 광물찌꺼기 재자원화 가능성을 타진 할 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 광물찌꺼기 재자원화에 대해서는 회수공정에 따른 처리비용 등 경제성 평가가 우선되어야 할 것이다.
- 2) 주요 광종으로 생산된 원소가 많은 함량으로 잔류하는 광물찌꺼기에 대해서는 과거보다 발전(고도화)된 선광 기술을 적용하여 2차 회수가 가능할 것으로 판단된다.
- 3) 광물찌꺼기에 함유된 일부 유해 원소의 농도는 폐금속광산 주변 토양오염 조사에서 오염원과의 상관관계 및 원인 규명 등 유용한 정보를 제공할 수 있다.
- 4) 광물찌꺼기는 광산환경의 유해 물질이라는 인식에서 유용 금속의 2차 공급원으로 탈바꿈하는 패러다임 변화가 필요하며, 광물찌꺼기에 함유된 원소 화학적 정보를 바탕으로 안전하고 합리적인 보관방안이 마련되어야 할 것이다.

## 사 사

본 연구는 2023년 한국광해광업공단으로부터 연구비를 지원받아 수행된 사업임.

## References

- DOE, 2020. *Critical materials rare earths supply chain: A situational white paper*, DOE/EE-2056, USA.
- Haynes, W. M., 2017. *CRC Handbook of Chemistry and Physics(97th Ed.)*, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, p.14-17.
- Jung, M.Y., Jung, M.C., and Choi, Y.W., 2004. Development of porous support with mine waste materials, *Economic and Environmental Geology*, 37(1), p.143-151.
- Kim, H.T., 2019. Digital transformation trends of the energy and mineral resources development industries in the era of

- the fourth industrial revolution, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 56, p.514-528.
- Kim, J.S., 2013. Research and development for the recovery of uranium and vanadium from Korean black shale ore, *Journal of Korean Institute of Resources Recycling*, 22(1), p.3-10.
- Kim, S.M. and Jeon, H.S., 2019. Separation processes for self-sufficient recovery of vanadium resources in Korea, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 56, p.292-302.
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 2021. *Rare metal raw material trade analysis*, Daejeon-si, p.1.
- Korea mine rehabilitation and mineral resources (KOMIR), 2014. Development of the characteristic evaluation technique of tailings, technical series 2014-093, Wonju-si, p.1.
- Lee, C.H., Lee, H.K., and Shin, M.A., 1997. Barium-vanadium muscovite of coaly metapelite in the Hoenam area of the Ogcheon Supergroup, Korea, *Journal of the Geological Society of Korea*, 33(2), p.55-64.
- Lee, S.J. and Kim, R.N., 2021. Strategies to secure critical minerals by reprocessing mine wastes, *Journal of The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 58(4), p. 330-340.
- Lee, Y.J., Kwon, O.K., Sun, J.H., Jang, G.Y., Choi, J.C., and Kwon, W.T., 2022. Synthesis of silicon carbide powder using recovered silicon from solar waste silicon wafer, *Resources Recycling*, 31(5), p.52-58.
- Park, C.I., Kim, H.S., Jeong, J.k., Cho, B.G., and Hur, T., 2013. A study on eco-efficiency analysis for recovering valuable metals from waste printed circuit board (PCB), *Journal of the Korean Society of Waste Management*, 30(5), p.469-477.
- Park, H.K., Yoo, S.W., and Jung, M.Y., 2009. Development of non-sintered eco-brick using the tailings from Korea molybdenum corporation (KMC), *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering*, 46(2), p.135-142.
- Santiago, C.L., Rocio, B., Mroueh, U.M., Stefan, W., and Yang, X.S., 2016. *Mapping the secondary resources in the EU(mine tailings, industrial waste)*, p. 2-31.
- Sernageomin, 2023.10.10., <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>
- Smedley, P.L. and Kinniburgh, D.G., 2002. A review of the Source, Behaviour and Distribution of Arsenic in Natural Waters, *In Applied Geochemistry*, 17, p 517-568.
- Uhm, S.H., Cho, S.S., and Lee, S.Y., 2015. Recovery of indium for the recycling of end-of-life flat Panel display devices, *Applied Chemistry for Engineering*, 26(4), p.389-393.

**권 요 셉**

2014년 세종대학교 에너지자원공학과 공  
학석사

현재 (재)환경기술정책연구원 기술정책개발팀 팀장  
(E-mail; kwonys1986@gmail.com)

**황 인 호**

1994년 서울대학교 공학박사(응용지구  
화학)

현재 (주)소암컨설팅 사업본부 전무이사  
(E-mail; inho620703@daum.net)

**김 정 욱**

2012년 세종대학교 지구환경과학과 이학  
박사

현재 세종대학교 공과대학 지구자원시스템공학과 수석연구원  
(E-mail; woogypower@sejong.ac.kr)

**정 명 채**

1995년 런던대학교 임페리얼대학 ICET  
PhD

현재 세종대학교 공과대학 지구자원시스템공과 교수  
(E-mail; jmc65@sejong.ac.kr)

**최 의 규**

2010년 한양대학교 자원환경공학과 공학  
석사

현재 한국광해광업공단 기술개발1팀 차장  
(E-mail; ukchoi@komir.or.kr)