

기술보고

광물찌꺼기에 함유된 핵심광물 회수 특성 평가

권요셉^{1,4} · 황인호² · 차중문³ · 정명채^{4*} · 최익규⁵¹(재)환경기술정책연구원(NeLab), ²(주)소암컨설팅트, ³동아대학교 에너지·자원공학과, ⁴세종대학교 지구자원시스템공학과, ⁵한국광해광업공단

Recovery Characteristics of Critical Elements in Tailings from Abandoned Metal Mines

Yo Seb Kwon^{1,4}, Inho Hwang², Jongmun Cha³, Myung Chae Jung^{4*} and Uikyoo Choi⁵¹NeLab, Seoul, Korea²Soam Consultant, Daejeon, Korea³Energy and Mineral Resources Engineering, Dong-A University, Busan, Korea⁴Energy Resources & Geosystems Engineering, Sejong University, Seoul, Korea⁵Korea Mine Rehabilitation and Mineral Resources Corporation, Wonju, Korea

*Corresponding Author. Myung Chae Jung, jmc65@sejong.ac.kr, Energy Resources & Geosystems Engineering, Sejong University, Seoul, Korea

Received

1 December 2023

Final version Received

28 December 2023

Accepted

27 February 2024

Abstract

Four tailings representative of mineralization types were taken at abandoned metal mines, and 32 elements classified as from critical minerals were analyzed. Among the elements, vanadium (V), bismuth (Bi), manganese (Mn), and antimony (Sb), contained at concentrations exceeding the average abundance of the earth's crust, were examined in terms of their recovery characteristics by heavy liquid and magnetic separations. Although tailings from the Fe-Ti mine contained 1,354 mg/kg of V, improvement of V grade was limited by the separations. Tailings from the W mine with 153 mg/kg of Bi were increased by 3.5 and 6.3 times by concentration by heavy liquid and magnetic separations, respectively. In addition, tailings from the Cu-Pb-Zn mine with 13,756 mg/kg of Mn were concentrated about 1.8 times by heavy liquid separation. Tailings from the Zn mine with 87 mg/kg of Sb were concentration by 1.7 times by magnetic separation. This study promotes recycling through the mineral processing of abandoned tailings.

Key words : tailings, critical minerals, abundance of elements in earth's crust, recovery characteristics, resource recycling

요약

폐금속광산에서 광화작용 유형으로 대표되는 4종의 광물찌꺼기를 채취하여 핵심광물로 분류되는 32종의 원소를 분석하였다. 이들 원소 중에서 지각 평균 함유량 이상으로 검출된 바나듐(V), 비스무트(Bi), 망간(Mn), 안티모니(Sb)를 중액 및 자력 선별에 의한 회수 특성을 조사하였다. Fe-Ti 광산의 광물찌꺼기에는 1,354 mg/kg의 V가 포함되어 있지만 중액 선별과 자력 선별을 통해 V의 농도를 증가시키는 데에는 한계가 있었다. 153 mg/kg의 Bi를 함유한 W 광산의 광물찌꺼기는 중액 선별과 자력 선별에 의해 각각 3.5배와 6.3배로 농축되었다. 또한, 13,756 mg/kg의 Mn을 함유한 Cu-Pb-Zn 광산의 광물찌꺼기는 중액 선별에 의해 약 1.8배 농축되었다. 87 mg/kg의 Sb를 함유한 Zn 광산의 광물찌꺼기는 자력 선별을 통해 1.7배 농축되었다. 이 연구는 광물찌꺼기의 선광처리를 통한 재자원화 촉진에 활용될 수 있다.

주요어 : 광물찌꺼기, 핵심광물, 지각 평균 함량, 회수 특성, 재자원화

서 론

국내에는 약 2,000여 개소의 휴·폐금속광산을 개발한 이력이 있으며, 이들 광산 주변에는 강도채굴, 선광 과정 등의 행위를 통해 목적 광물을 회수한 후 발생한 폐(광)석 및 광물찌꺼기 등 광산폐기물들이 존재하고 있다(KOMIR, 2010). 이러한 광산폐기물은 관련 법령에 따라 과거부터 현재까지 광산 인근 지역에 매립장을 조성하고 차수시설을 설치한 후 매립하는 단순한 방법으로 처리하여 왔다(Park *et al.*, 2020). KOMIR(2014)에 따르면 폐금속광산 중 광물찌꺼기가 확인된 광산은 약 345개소로 보고되었으며, 일반적으로 금속광산의 광물찌꺼기는 다량의 중금속과 인체위해 원소들을 함유하고 있어 적절한 관리가 지속적으로 필요한 실정이다. 그러나 광산폐기물 적치장의 노후 및 지반 침하에 따른 적치장 시설물의 안정성 문제를 발생시키고 있다. 즉, 광해방지사업을 수행한 광산지역에서 적치장의 침출수 발생, 광물찌꺼기 유실 등으로 주변 지역은 물론 하부 수계, 토양, 식물 등을 오염시키며 사람에게까지 악영향을 미치고 있는 것으로 알려져 있다(Kim *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2005; Kang *et al.*, 2007; Jung *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2016; Park *et al.*, 2018; Yoon *et al.*, 2020). 이렇듯 매립을 통한 광해복원은 오염물질의 근원적인 처리방식이 아니기 때문에 오염물질의 모니터링 및 확산 방지를 위한 지속적인 유지·보수 관리가 필요하여 정부 및 지자체 등 관련 기관의 불필요한 예산이 투입되고 있는 현실이다.

이러한 환경문제와 더불어 희유금속(rare metal)의 중요성이 대두되면서 국·내외적으로 광물찌꺼기 재활용 및 지질특성 규명을 통한 폐기물 자원 회수 기술 개발 관련 연구가 이루어지고 있다(Lee and Kim, 2021). 미국, 캐나다 및 호주는 공동으로 핵심광물이 주요 광물에 수반(companion)되는 지질 특성을 규명하고 그 중 희유금속을 추출 및 개발하기 위한 연구를 수행하고 있으며(DOE, 2020), 유럽의 경우 광산 및 산업폐기물의 재활용 기술을 개발하여 핵심광물을 확보하고자 노력하고 있다(Cuesta-Lopez *et al.*, 2016). 남미의 대표적인 광업 국가인 칠레는 광산의 일반현황과 광산폐기물의 매장량, 금속물질의 농도(57개 항목) 등 주요 특성 정보를 DB화하여 제공하고 있다(Sernageomin, 2023).

국내의 경우 희유금속의 매장량 및 저품위 등 자원개발의 낮은 경제성과 한계점으로 인하여 휴·폐광산의 유가금속 회수 및 개발 가능성을 제안하고 있으며(Choi, 2004), 실제적으로 다양한 물리적 선별기술을 적용하여 환경적으로 유해한 금속 및 황화광물을 분리·선별하여 광물찌꺼기의 재활용 가능성을 검토한 연구들도 존재한다(Chae *et al.*, 1999; Jeong *et al.*, 2006; Oh *et al.*, 2010). 단, 이러한 연구는 광산지역에서 대표적으로 발생하는 As, Cd, Cu, Pb, Zn

등을 추출하여 광물찌꺼기를 무해화시키는데 목적이 있어 희유금속을 추출 후 폐자원을 재활용하는 측면에서는 한계점이 있다.

이에 본 연구에서는 국내 폐금속광산 4개소의 광물찌꺼기를 대상으로 핵심광물에 해당하는 원소 32종을 화학분석하고, 지각의 평균 함량 대비 고농도로 검출된 원소를 대상으로 중액 및 자력선별 등의 자원처리 기술을 이용하여 유용 광물 회수 특성을 평가하였다.

연구방법

시료의 채취 및 건조

국내 폐금속광산 중 생산 광종에 따라 철·티타늄(Fe-Ti) 광산 1개소, 중석(W) 광산 1개소, 구리·납·아연(Cu-Pb-Zn) 광산 1개소 및 아연(Zn) 광산 1개소에서 총 4개의 광물찌꺼기 시료를 채취하였다. 채취된 시료는 실험실로 이송하여 상온에서 풍건 후 실험용 시료로 사용하였다. 자세한 시료 채취 위치를 Fig. 1에 도시하였고, Table 1에 대상 광산의 세부 정보를 나타내었다.

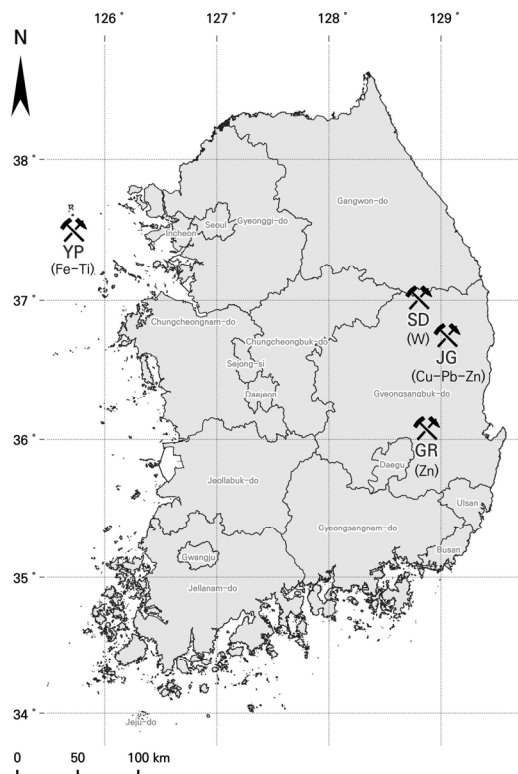


Fig. 1. Sampling locations of four representative tailings from abandoned metal mines.

Table 1. General information on the four mines studied in Korea

No.	ID	Target metal	Mineralization type	Tailings amount (m ³)
1	YP	Fe, Ti	Orthomagmatic	80,000
2	SD	W	Skarn	6,087,000
3	JG	Cu, Pb, Zn	Hydrothermal replacement	20,000
4	GR	Zn	Hydrothermal filtration	6,900

Table 2. Groupings of elements analyzed from tailings samples

Group	Analyzed elements
Alkali metals	Li
Alkaline earth metals	Mg, Sr
Metalloids	Sb, Bi, Se, Sn, Si
Iron group	Co, Ni
Boron group	Al, Ga, In
High melting point metals	Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn
REEs	LREEs La, Ce, Nd
	HREEs Tb, Dy
Platinum group	Pt, Pd
Others	Cu, Pb, Zn

화학분석 방법

풍건이 완료된 시료를 ASTM(American society of testing materials) 표준체 규격 100 mesh(75 μ m) 체망을 이용한 체거름 후 화학적 농도를 정량하기 위한 시료로 활용하였다. 체거름이 완료된 시료는 왕수(aqua regia)로 용해하였으며, ICP-OES(model Optima 8300, Perkin-Elmer Inc., USA)를 이용하여 화학분석을 수행하였다. 화학분석 대상 원소는 국내에서 지정된 핵심 광물 33종 중 희유를 제외한 32종 원소를 대상으로 수행하였다.

광물찌꺼기 내 원소함량은 알칼리족(alkali), 준금속(metalloid), 철족(iron), 보론족(boron), 고용점(high melting point), 희토류(REEs, Rare Earth Elements) 및 백금족(platinum) 등으로 구분하여 정리하였고, 지각 내에 평균적으로 존재하는 원소 함량(Haynes, 2017)을 이용하여 상대적 부하량을 평가하였다(Table 2).

회수 특성 평가 방법

광물찌꺼기에 함유된 유용광물의 회수 특성 확인을 위해 입도분석, 중액선별 및 자력선별을 수행하였다.

입도분석은 체분석 방법으로 수행하였다. 시료 200 g에 대해 진동 분체기(AS 200 DIGIT CA)를 이용하여 ASTM 표준체 규격 30 mesh(600 μ m), 50 mesh(300 μ m), 100 mesh

(150 μ m), 200 mesh(75 μ m) 및 400 mesh(38 μ m) 체망으로 체거름 후 각 체망에 걸러진 시료의 중량을 측정하여 상대적 무게비를 평가하였다. 더불어 각 입도구간별 체거름된 시료는 광산별로 선정된 유용광물의 함량을 분석하였다.

중액선별(heavy liquid separation)은 중액 또는 의중액을 매개체로 밀도가 큰 물질이 침강(sink)하고 작은 물질은 부유(float)하는 원리를 이용하는 선별법이다. 예시로 금속광산에서 비중이 2.65 정도인 석영이 맥석으로 존재한다면, 약 3.0 정도의 유기시약 용액으로 부유시킬 수 있다. 본 연구에서는 2.967의 비중을 가지는 중액시약 1,1,2,2-테트라브로모에탄(1,1,2,2-Tetrabromoethane)를 사용하여 중액선별을 실시하였다. 중액시약에 정량한 시료를 투입하여 유리막대로 저어준 후 1시간 동안 방치하여 부상물과 침강물로 분리되도록 하였다. 분리 후 시료에 잔류하는 중액시약을 에틸알코올(Ethyl alcohol)로 세척하였으며, 건조기(Dry oven)에서 (110 $\pm$ 5) $^{\circ}$ C로 24시간 동안 건조하여 선별된 시료를 회수하였다. 회수된 시료는 광산별로 선정된 유용광물의 함량을 분석하였다.

자력선별(magnetic separation)은 광물의 자기적 성질의 차이를 이용하는 선별법이다. 자기장 내에 물질을 투입하게 되면 자성을 띤 물질은 자석에 끌려 회수되고, 비자성 물질은 중력, 원심력과 유체의 힘만 작용하므로 자성 물질과

비자성 물질의 분리가 일어난다. 광물은 자석에 끌리는 자성(magnetic) 광물과 자석에 끌리지 않는 비자성(non-magnetism)광물로 대분류할 수 있다. 본 실험에서는 자석의 세기를 1,000, 2,000, 3,000, 5,000, 8,000 및 10,000 Gauss로 달리하며 자력에 따른 시료의 회수율과 유용광물의 함량을 검토하였다.

연구결과

광물찌꺼기 유용광물 함유량

국내 폐금속광산 중 철-티타늄(Fe-Ti), 중석(W), 구리-납-아연(Cu-Pb-Zn) 및 아연(Zn) 광산에서 광물찌꺼기 채취 및 분석을 수행하였으며, 그 결과를 원소 특성에 따른 그룹별로 정리하였다.

알칼리 금속인 리튬(Li)은 중석광산인 SD(25 mg/kg) 시료에서 지각 평균 함량(20 mg/kg)보다 약소하게 높은 농도로 검출되었고 그 외 광산에서는 모두 낮은 농도로 검출되었다.

알칼리 토금속에 속하는 마그네슘(Mg), 스트론튬(Sr)은 모든 시료에서 지각 평균 함량 대비 낮은 농도로 검출되었다.

준금속의 경우, 안티모니(Sb)는 JG(36.2 mg/kg), GR(87.2 mg/kg) 시료에서 지각 평균 함량(0.2 mg/kg) 대비 높은 농도로 검출되었으며, 특히, GR 시료는 약 440배 부화된 농도로서 회수 평가 대상으로 포함하였다. 비스무트(Bi)는 SD(153.4 mg/kg), JG(17.5 mg/kg) 및 GR(10.9 mg/kg) 시료에서 지각 평균 함량(0.01 mg/kg) 대비 높은 농도로 검출되었으며, 특히, SD 시료는 약 15,300배 부화된 농도로서 회수 평가 대상으로 포함하였다. 이외 셀레늄(Se), 주석(Sn) 및 규소(Si)는 지각 내 평균 함량보다 약소하게 높은 농도로 검출되거나 낮은 농도로 검출되었다.

철족 원소인 코발트(Co) 및 니켈(Ni)은 모두 지각 평균 함량 대비 낮은 농도로 검출되어 회수 가치는 낮은 것으로 평가되었다.

보론족 원소 중 인듐(In)은 YP(85 mg/kg) 시료에서 지각 평균 함량(0.25 mg/kg) 대비 340배 정도의 높은 농도로 검출되었으며, 알루미늄(Al), 갈륨(Ga)은 지각 평균 함량보다 낮은 것으로 평가되었다.

고융점 금속 원소 중 바나듐(V)은 YP(1,354 mg/kg) 시료에서 지각 평균 함량(120 mg/kg) 대비 약 11배 부화된 농도로 검출되어 회수 평가 대상으로 포함하였다. 탄탈럼(Ta)은 모든 시료에서 지각 평균 함량(2.0 mg/kg) 보다 높은 농도로 확인되었으며, JG(14.5 mg/kg) 7.2배, YP(13.1 mg/kg) 6.5배, SD(5 mg/kg) 2.5배, GR(2.1 mg/kg) 1.1배 순으로 평가되었다. 몰리브덴(Mo)은 SD(37.4 mg/kg), GR(4.5 mg/kg) 시료에서 지각 평균 함량(1.2 mg/kg) 대비 각각 31배, 3.7배

높은 농도로 검출되었다. 중석(W)은 SD(301 mg/kg), JG(9.3 mg/kg) 시료에서 지각 평균 함량(1.25 mg/kg)보다 각각 241배, 7.4배 높은 농도로 검출되었다. 망간(Mn)은 JG(13,757 mg/kg) 시료에서 지각 평균 함량(950 mg/kg)보다 약 14배 높은 농도로 검출되어 회수 평가 대상으로 포함하였다.

희토류 원소의 경우, 터븀(Tb)이 YP(4.7 mg/kg), JG(2.9 mg/kg) 시료에서 지각 평균 함량(1.2 mg/kg) 대비 각각 3.9배, 2.9배 높은 농도로 검출되었으며, 이 외 원소는 모두 지각 평균 함량보다 낮은 농도로 검출되었다.

이외 원소 중 구리(Cu)는 JG(217.4 mg/kg), GR(78.9 mg/kg) 시료에서 지각 평균 함량(60 mg/kg) 대비 각각 3.6배, 1.3배 높은 농도로 검출되었고, 납(Pb)은 JG(1,448.1 mg/kg), GR(3,262.9 mg/kg) 시료에서 지각 평균 함량(14 mg/kg) 대비 각각 103배, 233배 높은 농도로 검출되었으며, 아연(Zn)은 SD(96.1 mg/kg), JG(6917.5 mg/kg), GR(275.8 mg/kg) 시료에서 지각 평균 함량(70 mg/kg) 대비 각각 1.4배, 3.6배, 1.3배 높은 농도로 검출되었다.

지각 평균 함량에 대한 상대적 부화율을 고려하여 각 광산의 광종별로 철-티타늄(Fe-Ti) 광산의 광물찌꺼기 YP는 바나듐(V)을, 중석(W) 광산 SD는 비스무트(Bi)를, 구리-납-아연(Cu-Pb-Zn) 광산 JG는 망간(Mn)을, 아연(Zn) 광산 GR은 안티모니(Sb)에 대해서 회수 특성을 평가하였다.

Table 3는 광물찌꺼기 4개 시료에 대한 핵심광물 32종의 분석결과이다.

입도분포 및 입도구간별 유용광물 함량

체분석 방법으로 각 광물찌꺼기 시료의 입도분포를 확인하였다.

YP 시료의 체분석 결과, 300 μ m에서 150 μ m 구간이 전체 무게비의 약 61%를 차지하여 해당 구간에 입자가 가장 많이 분포하고 있는 것으로 확인되었고, 150 μ m 이하 입자들의 함유량은 1% 미만으로 극히 일부분을 차지하고 있다.

SD 시료의 체분석 결과, 300 μ m에서 75 μ m 구간이 전체 무게비의 약 62%를 차지하여 해당 구간에 입자가 가장 많이 분포하고 있는 것으로 확인되었고, 75 μ m 이하의 입자들도 약 27% 이상 차지하고 있는 것으로 보아 시료의 입자 크기가 상대적으로 미립자로 존재하는 것으로 확인되었다.

JG 시료의 체분석 결과, 300 μ m에서 150 μ m 구간이 전체 무게비의 약 41%를 차지하고 있어 이 구간에 입자가 많이 분포하고 있는 것으로 확인되었고, 150 μ m 이하 입자들의 무게비가 약 45%를 차지하고 있어 미립자 시료가 많이 존재함을 알 수 있었다.

GR광산 시료 체분석 결과 살펴보면, 300 μ m에서 75 μ m 구간이 전체 무게비의 약 59%를 차지하고 있어 이 구간에

입자가 많이 분포하고 있음을 알 수 있었다. 또한 다른 시료들에 비해 입자 분포가 고르게 형성되어 있는 것을 확인하였다.

광물찌꺼기의 입도분포는 과거 선광 과정 중 단체분리를 위한 파분쇄 정도에 따라 결정될 수 있을 것이다. 본 연구 대상 광산의 생산 광종을 고려하였을 때, 광물찌꺼기의 입자 크기는 철 광산 > 구리, 연, 아연 광산 > 중석 광산 순으로 평

가할 수 있다.

각 4개 시료의 광물찌꺼기의 입도분포를 Fig. 2에 도시하였다.

입도가 분리된 시료에 대하여 왕수로 추출하여 화학분석을 수행한 결과, YP 시료는 150 ~ 75 μm 구간에서 바나듐이 3,906 mg/kg으로 가장 많은 함량을 확인하였다. SD 광산 광물찌꺼기는 600 ~ 300 μm 구간에서 비스무트의 함량

Table 3. Concentrations of critical elements in tailings

Group	Elements	CRC value ¹⁾	Concentration (mg/kg)			
			YP	SD	JG	GR
Alkali metal	Li	20	0.1	25.0	4.9	3.9
Alkaline earth metals	Mg	23,300	990.5	6,727.5	12,845.0	1,139.9
	Sr	370	2.1	42.9	20.2	10.1
Metalloids	Sb	0.2	< 0.2	N.D. ²⁾	36.2	87.2
	Bi	0.01	< 0.01	153.4	17.5	10.9
	Se	0.05	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Sn	2.3	N.D.	15.6	4.3	0.3
	Si	282,000	67.6	289.7	195.2	80.7
Iron group	Co	25	29.8	8.6	2.0	N.D.
	Ni	84	12.8	13.3	2.1	N.D.
Boron group	Al	82,300	1,311.4	13,756.9	5,605.6	3,179.6
	Ga	19	10.2	N.D.	N.D.	N.D.
	In	0.25	85.0	10.2	N.D.	17.6
High melting point metals	Ti	5,650	1,652.3	805.4	7.6	13.8
	Zr	165	0.2	3.0	0.1	0.9
	V	120	1,354.2	30.2	15.7	7.4
	Nb	20	12.7	0.1	13.1	0.8
	Ta	2.0	13.1	5.0	14.5	2.1
	Cr	102	52.7	23.8	29.6	2.8
	Mo	1.2	N.D.	37.4	N.D.	4.5
	W	1.25	N.D.	301.0	9.3	1.0
	Mn	950	109.2	911.4	13,756.8	245.6
REEs	LREEs	La	39	0.2	11.2	0.7
		Ce	66.5	N.D.	29.9	0.5
		Nd	41.5	6.3	12.8	8.2
	HREEs	Tb	1.20	4.7	0.8	3.4
		Dy	5.2	N.D.	0.7	N.D.
Platinum group metals	Pt	0.005	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Pd	0.015	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Others	Cu	60	N.D.	46.7	217.4	78.9
	Pb	14	9.4	13.1	1,448.1	32,62.9
	Zn	70	42.0	96.1	6,917.5	275.8

¹⁾ Average concentration of the element in the Earth's crust (Haynes, 2017).

²⁾ Not determined.

이 181 mg/kg으로 가장 많았으나 구간별 차이는 크지 않은 것으로 확인되었다. JG 광산 광물찌꺼기는 150 ~ 75 μm 구간에서 망간이 25,689 mg/kg으로 가장 높은 농도가 검출되었다. GR 광산 광물찌꺼기는 38 μm 이하의 구간에서 안티모니의 함량이 266 mg/kg으로 가장 많이 함유하는 것을 확인하였으며, 입자가 작을 수록 농도가 높은 경향을 나타내었다. 각 4개 시료의 입도 구간별 농도를 Fig. 3에 도시하였다.

자력선별결과

YP는 전체 시료의 약 90% 이상이 자성 물질로 존재하였다. 자성을 띠는 시료에서 바나듐의 함량이 월등히 많은 것으로 확인되었다. 자력선별의 결과로 분리된 자성 시료와 비자성 시료의 화학분석 결과, 1,000 Gauss에서 가장 많은 함량인 1,692.4 mg/kg이 검출되었으며, 원시료 화학분석 결과인 1,354 mg/kg에 비해 자성 시료에서 약 1.2배 함량이

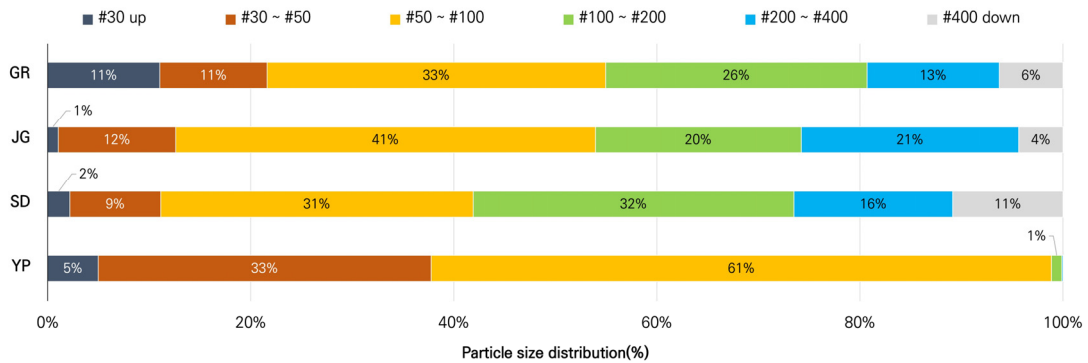


Fig. 2. Particle size distributions of the four representative tailing samples.

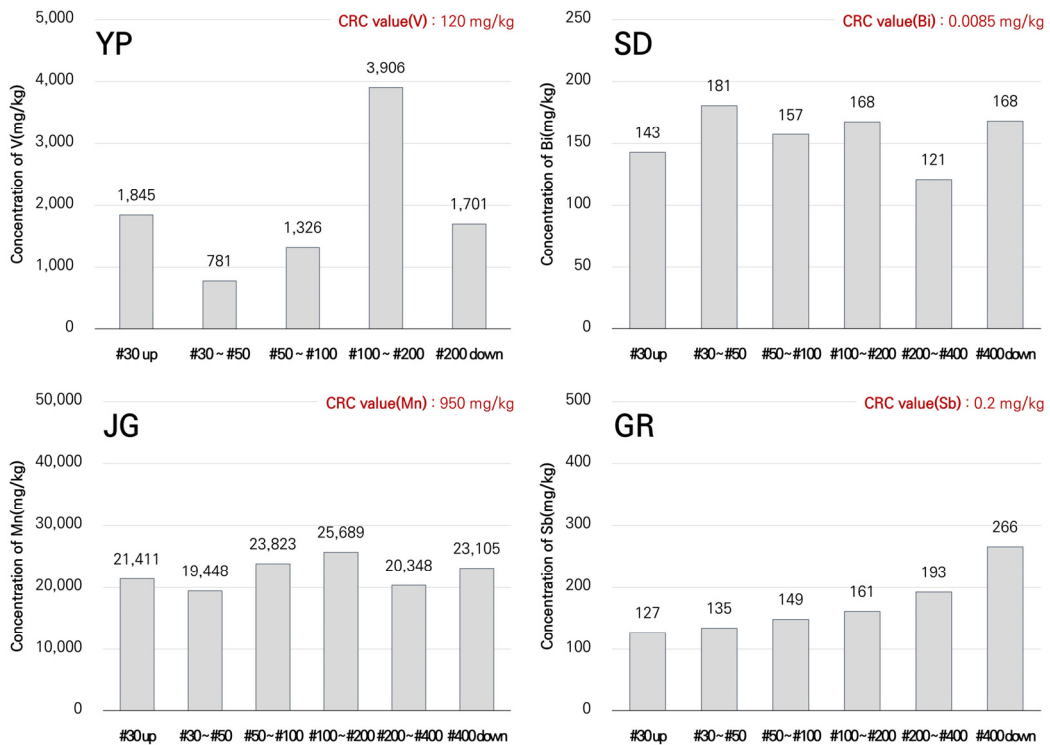


Fig. 3. Concentrations of V, Bi, Mn, and Sb in the four representative tailing samples by particle size distribution.

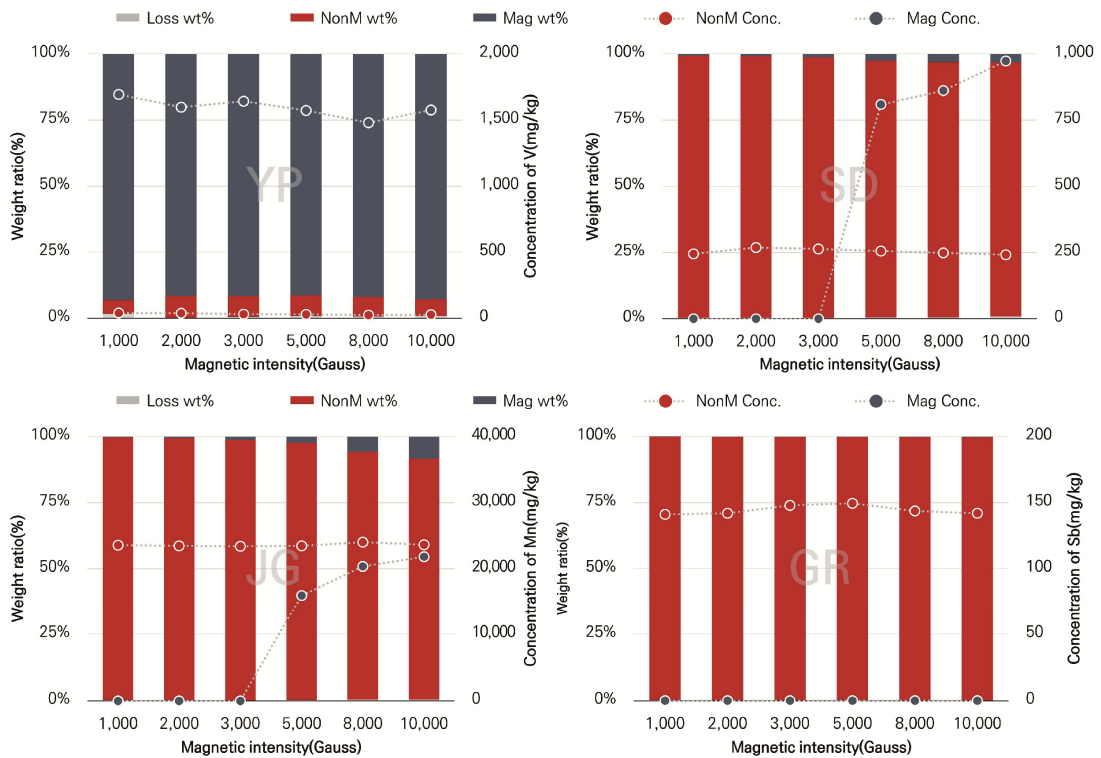


Fig. 4. Weight ratio and concentrations of V, Mn, Bi, and Sb in tailings by magnetic separation.

증가한 것을 확인하였다. 자력의 세기에 따른 바나듐의 농도 변화는 확인되지 않았다.

SD광산과 JG광산 시료의 경우, 전체 시료의 약 90% 이상이 비자성 물질로 존재하였다. 두 광산 모두 광물찌꺼기 시료는 자력이 강해질수록 자성 물질의 양이 증가하는 경향이 확인되었으며, 그에 따른 망간과 비스무트의 회수율도 높아지는 것을 확인할 수 있다. SD광산은 자성 시료 중 비스무트가 10,000 Gauss에서 가장 많은 함량인 973.3 mg/kg이 검출되었으며, 원시료 화학분석 결과인 153.4 mg/kg에 비해 자성 시료에서 약 6.4배 함량이 증가한 것을 확인하였다. JG광산 비자성 시료 중 망간이 8,000 Gauss에서 가장 많은 함량인 24,034.5 mg/kg이 검출되었으며, 원시료 화학분석 결과인 13,756.8 mg/kg에 비해 약 1.7배 함량이 증가한 것을 확인하였다. 자성 세기에 따른 비자성 시료의 농도 변화는 확인되지 않았으나, 자성의 세기가 강해질수록 비자성 시료와 자성 시료의 농도 차가 점차 줄어드는 경향이 확인된다.

GR광산 시료는 비자성 물질이 99% 이상을 차지하였으며, 비자성을 띠는 시료에서 안티모니의 함량이 월등히 많은 것으로 확인되었다. GR광산 시료는 5,000 Gauss에서

가장 많은 함량인 149.6 mg/kg이 검출되었다. 원시료 화학분석 결과인 87.2 mg/kg에 비해 비자성 시료에서 약 1.7배 함량이 증가한 것을 확인하였다.

자력선별에 의한 자성, 비자성 물질의 무게비와 자력 세기별 원소의 함량을 Fig. 4에 도시하였다.

중액선별결과

중액선별의 원리를 이용하여 분리된 부상물과 침강물을 관측하고 각각을 분석하여 광물찌꺼기의 특성을 평가하였다. 입도별 광물찌꺼기 10 g을 비중 2.9의 1,1,2,2-Tetrabromoethane 중액시약에 투입하여 중액선별을 실시하였고, 회수된 부상물과 침강물의 무게비와 각 원소의 함량은 Fig. 5와 같다.

YP의 중액선별 결과, 99% 이상 침강한 것을 알 수 있다. YP광산 광물찌꺼기 침강물에서 바나듐 함량은 1,394 mg/kg으로 검출되었다. 원 시료 화학분석 결과인 1,354 mg/kg과 유사한 함량으로 중액선별에 의한 품위 향상은 어려울 것으로 판단된다.

SD는 60% 이상이 부상하였으며, 부상물의 비스무트 함량은 148.8 mg/kg이고, 침강물에서 비스무트 함량은 532.6

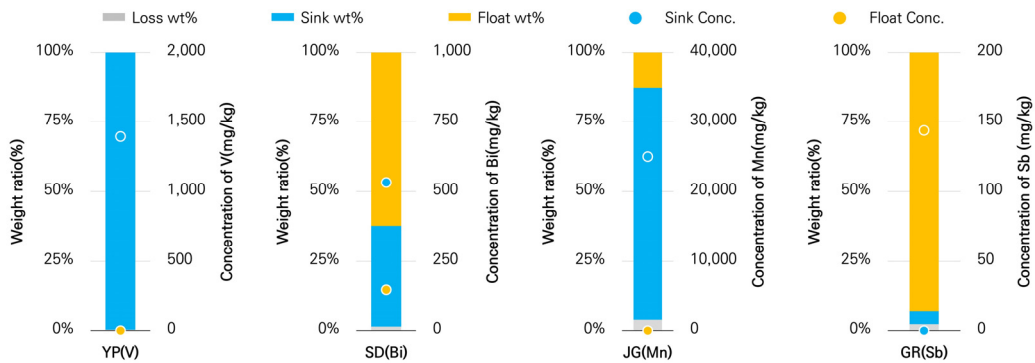


Fig. 5. Weight ratio and concentrations of V, Mn, Bi, and Sb in tailings by heavy liquid separation.

mg/kg이다. 원 시료 화학분석 결과인 153.4 mg/kg보다 침강물에서 약 3.5배 함량이 증가하였다.

JG는 80% 이상 침강하였다. 침강물에서 망간 함량은 25,018.4 mg/kg이다. 원 시료 화학분석 결과인 13,757 mg/kg보다 침강물에서 1.8배 함량이 증가하였다.

GR는 90% 이상 부상하였다. 광물찌꺼기 부상물에서 안티모니 함량은 143.9 mg/kg으로 확인되었으며, 원시료 화학분석 결과인 87.2 mg/kg보다 부상물에서 안티모니(Sb) 함량이 1.6배 증가하였다.

결론

함티타늄자철광상으로 대부분 자철석과 티타늄을 함유하는 YP광산의 광물찌꺼기에는 바나듐이 1,354 mg/kg 함유되어 지각 평균 함량 대비 약 11배 부화된 것을 확인하였다. 바나듐 회수를 위하여 자력선별을 적용하는 것이 일반적이나 본 연구에서 광물찌꺼기를 대상으로 자력선별 시험을 수행한 결과, 바나듐의 품위 향상에는 한계가 있음이 확인되었다. 자력선별 과정에서 자력세기가 커질 경우 적철석도 같이 나오는 경우가 있어서 오히려 바나듐의 농도는 감소할 수 있으며, 순수한 자철석만을 회수하여도 자철석 내에 존재하는 바나듐만을 회수하는 것이므로 높은 품위로 농축은 어려울 것으로 판단된다. 다만 자철석을 탄소 또는 수소와 같은 환원제로 환원시켜 자철석에서 바나듐을 분리하는 전처리 과정을 거친 후, 자력선별을 통한 품위 향상 가능성 여부 확인이 필요할 것으로 사료된다.

중석광산인 SD광산의 광물찌꺼기에는 비스무트가 153 mg/kg 함유되어 지각 평균 함량 대비 약 15,300배 부화된 것을 확인하였다. 본 연구에서 광물찌꺼기를 대상으로 자력선별 시험을 수행한 결과, 비스무트의 함량이 약 6.4배 증가하였고, 중액선별 시험에서는 3.5배 증가하였다. 따라서,

자력선별 전처리 후, 부유선별을 통해 비스무트의 품위 향상이 가능할 것으로 판단된다.

구리-납-아연 광상이 분포하는 JG광산의 광물찌꺼기에는 망간이 13,756 mg/kg 함유되어 지각 내 평균 함량 대비 약 11배 부화된 것을 확인하였다. 광물찌꺼기를 대상으로 자력선별 시험을 수행한 결과, 망간의 함량이 약 1.7배 증가하였고, 중액선별 시험에서는 1.8배 증가하였다. 따라서, 자력선별 전처리 후, 부유선별을 통해 일정량의 망간의 품위 향상이 가능할 것으로 판단된다.

아연이 주요 광종인 GR광산의 광물찌꺼기에는 안티모니가 87 mg/kg 함유되어 지각 내 평균 함량 대비 약 87배 부화된 것을 확인하였다. 본 연구에서 광물찌꺼기를 대상으로 자력선별 시험을 수행한 결과, 안티모니의 함량이 약 1.7배 증가하였고, 중액선별 시험에서는 1.6배 증가하였다. 따라서, 자력선별 전처리 후, 부유선별을 통해 일정량의 안티모니의 품위 향상이 가능할 것으로 판단된다.

사사

본 연구는 2023년 한국광해광업공단으로부터 연구비를 지원받아 수행된 사업임.

References

- Chae, Y.B., Jeong, S.B., and Yoon, P.R., 1999. A study on the recovery of valuable resources from abandoned fold mine tailings, *Journal of the Korean Institute of Resources Recycling*, 8(3), p.37-42.
- Choi, W.Z., 2004. Review on reprocessing techniques for mineral wastes, *Economic and Environmental Geology*, 37(1), p.113-119.
- Cuesta-Lopez, S., Barros, R., Mroueh, U.M., Stefan, W., and

- Yang, X.S., 2016. *Mapping the secondary resources in the EU(mine tailings, industrial waste)*, MSP-REFRAM 688993, EU, p.2-31.
- 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.
- Jeong, S.B., Hyun, J.Y., Kim, H.S., Chae, Y.B., and Lee, U.J., 2006. Reduction and detoxification of the metallic mine tailing by mineral processing technique, *Journal of The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 43(5), p.478-485.
- Jung, G.B., Kwon, S.I., Hong, S.C., Kim, M.K., Chae, M.J., Kim, W.I., Lee, J.S., and Kang, K.K., 2012. Contamination assessment of water quality and stream sediments affected by mine drainage in the sambo mine creek, *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 31(2), p.122-128.
- Kang, M.H., Lee, P.K., and Choi, S.H., 2007. Seasonal variation and natural attenuation of trace elements in the stream water affected by mine drainage from the abandoned Indae mine areas, *Economic and Environmental Geology*, 40(3), p.277-293.
- Kim, H.J., Yang, J.E., Ok, Y.S., Lee, J.Y., Park, B.K., Kong, S.H., and Jun, S.H., 2005. Assessment of water pollution by discharge of abandoned mines, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 10(5), p.25-36.
- Kim, J.S., Han, S.H., Choi, S.H., Lee, K.J., Lee, I.K., and Lee, P.K., 2002. Correlation interpretation on the leachate flow by AMD of the geophysical and geochemical data from Jangpoong abandoned mine, *Journal of the Korean Geophysical Society*, 5(1), p.19-27.
- Kim, J.Y., Choi, U.K., Baek, S.H., Choi, H.B., and Lee, J.H., 2016. A study on chemical compositions of sediment and surface water in nakdong river for tracing contaminants from mining activities, *Journal of the Korean Earth Science Society*, 37(4), p.211-217.
- Kim, J.Y., Jang, Y.D., Kim, Y.H., and Kim, J.J., 2014. Characteristics of precipitates and geochemistry of mine and leachate water in janggun mine, *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 27(3), p.125-134.
- Korea mine rehabilitation and mineral resources (KOMIR), 2010. *Investigation for Evaluation of Mines Effect in Korea*, p.1-266.
- Korea mine rehabilitation and mineral resources (KOMIR), 2014. *Development of the Characteristic Evaluation Technique of tailings*, Technical Series 2014-093, Korea, p.1.
- 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.
- Oh, W., Cho, H.C., and Lee, J.S., 2010. Recovery of valuable materials from gold mine tailings, *The Korean Institute of Resources Recycling*, 19(6), p.77-85.
- Park, C.K., Kim, J.W., Jung, M.C., Park, H.S., Kim, D.K., and Oh, Y.S., 2018. Current occurrence and heavy metal contamination assessment of seepage from mine waste dumping sites in Korea, *Journal of The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 55(6), p.588-595.
- Park, C.K., Yoon, K.W., Kim, J.W., Jung, M.C., Lee, J.S., Ji, W.H., and Lee, J.H., 2020. Priority assessment of leachate management of reclaimed mine waste dump sites, *Economic and Environmental Geology*, 53(6), p.771-779.
- Sernageomin, 2023.10.10., <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>
- Yoon, K.W., Jung, M.C., Kim, J.W., Jeon, S.W., Han, S.H., Lee, J.S., Ji, W.H., and Kwon, O.H., 2020. Environmental assessment of water quality affected by mine drainage from tailings dam in the Sambo Pb-Zn mine, *Journal of The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 57(1), p.12-23.

**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)

**차 종 문**

2007년 콜로라도주립대학교 Dept. of Civil
and Environmental Eng PhD

현재 동아대학교 미래에너지공학과 교수
(E-mail; ijmcha@dau.ac.kr)

**정 명 채**

1995년 런던대학교 임페리얼대학 ICCET
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)