

## 몰리브덴광 부유선별 공정 최적화를 위한 기초 선광 특성 평가

한성수 · §서주범

한국지질자원연구원 자원활용연구본부 자원회수연구센터

### Evaluation of Basic Beneficiation Characteristics for Optimizing Molybdenum Ore Flotation Process

Seongsoo Han and §Joobeom Seo

*Mineral processing and metallurgy research center, Resource Utilization Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 124 Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34132, Republic of Korea*

#### 요 약

몰리브덴은 높은 내열성, 내부식성에 의해 다양한 산업에 적용되어, 우리나라의 핵심광물로 선정된 중요한 금속이다. 그러나 최근 몰리브덴 광맥의 저품위화로 인해 생산에 어려움을 겪고 있어, 몰리브덴 선광 공정에 대한 효율 향상이 필요하다. 본 연구에서는 국내 몰리브덴광 선광 공정의 효율 향상을 위한 기초 선광 특성 평가 연구를 수행하였다. 기초 선광 특성은 광물학적 분석, 분쇄일지수, 부유선별 속도 분석으로 평가되었다. 분석 결과, 단체분리가 가능한 몰리브덴광의 입자 크기는 ~100  $\mu\text{m}$ 였으며, 분쇄 일지수는 14.57 kWh/t로 산출되었다. 또한 부유선별 속도 분석을 통해, 부유선별 단위 공정 각각의 최적 부유선별 시간을 제공함으로써 최적화를 위한 운영 조건을 확립하였다. 마지막으로 본 연구에서 제공한 몰리브덴광 기초 선광 특성 정보는 향후 산업 규모의 몰리브덴 선광 플랜트의 분쇄 및 부유선별 공정을 진단하는 데 활용될 예정이다.

**주제어 :** 몰리브덴광, 선광공정, 최적화, 분쇄일지수, 부유선별

#### Abstract

Molybdenum is used in various industries because of its high heat and corrosion resistance. It was selected as a critical mineral in Korea. However, there have been recent challenges in production because of the increased depth and decreased grade of molybdenum veins. Consequently, it is necessary to enhance the effectiveness of the molybdenum beneficiation process. In this study, a basic evaluation of beneficiation characteristics was conducted to enhance the effectiveness of the domestic molybdenum ore beneficiation process. The properties of the beneficiation process were assessed using mineralogical analysis, work index, and flotation kinetics. The results revealed that the allowable particle size of the molybdenum ore for liberation was ~100  $\mu\text{m}$ . In addition, the work index was calculated to be 14.57 kWh/t. The operating conditions in the flotation units were achieved by determining the optimal flotation time for each process based on flotation kinetics. Finally, the characteristics of molybdenum ore beneficiation provided in this study can be utilized to diagnose the grinding and flotation processes of large-scale molybdenum beneficiation plants.

**Key words :** Molybdenum ore, Beneficiation, Optimization, Work index, Flotation

· Received : February 5, 2024 · Revised : March 13, 2024 · Accepted : March 13, 2024

§ Corresponding Author : Joobeom Seo (E-mail : [joobeomi@kigam.re.kr](mailto:joobeomi@kigam.re.kr))

Mineral Processing & Metallurgy Research Center, Resources Utilization Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 124 Gwahank-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34132, Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서 론

몰리브덴은 녹는점(2,620 °C)과 열전도도(142 W/mK, 20°C 기준)가 매우 높고, 매우 낮은 열팽창성( $5.2 \times 10^{-6}$  m/mK), 내부식성에 의해 합금강, 스테인리스강, 공구강, 주철, 초합금 등의 다양한 산업에 적용되고 있다<sup>1,2)</sup>. 그리고 몰리브덴의 황화물인 휘수연석(Molybdenite,  $\text{MoS}_2$ )은 특유의 층상구조를 가지고 있어, 물질 내부에 전자이동이 가능하여 반도체, 광전 소자로 활용된다. 또한 전단응력에 쉽게 밀리는 성질로 인하여 윤활제로도 활용된다<sup>3,4)</sup>. 이러한 다양한 산업적 중요성으로 인해, 몰리브덴은 2022년 산업통상자원부에서 선정된 핵심광물 33종에 포함되었다.

휘수연석은 국내 강원 영월, 충북 제천, 경북 울진 지역에 매장되어 있다고 보고되었다<sup>5)</sup>. 그러나 채산성으로 인해, 2023년 1월 기준 충북 제천지역의 몰리브덴 광산만 운영되고 있다. 유일하게 운영되고 있는 제천 몰리브덴 광산 또한 광맥이 저품질화되고 있으며, 최근 평균 원광 품위가  $\text{MoS}_2$  기준 0.4 wt.%에서 0.2 wt.% 이하의 감소 및 정광에 불순물 함유가 증가하여 경제적인 생산에 어려움을 겪고 있다.

이렇듯, 몰리브덴의 수요 증가와 몰리브덴 원광의 저품질화로 인해 몰리브덴광 선광 공정의 고효율 운영이 요구되고 있다. 결과적으로 몰리브덴 생산의 효율성을 증대하기 위해서는 휘수연석 부유선별 공정 최적화가 필요하다<sup>6)</sup>. 몰리브덴의 주요 광물로는 휘수연석, 울페나이트(Wulfenite,  $\text{PbMoO}_4$ ), 파워라이트(Powellite,  $\text{CaMoO}_4$ )가 있으며, 이 중에서 휘수연석이 몰리브덴 회수에서 가장 경제적인 광물로 알려져 있다. 휘수연석은 앞서 언급했던 독특한 층상구조 때문에, 분쇄에 의해 광물의 결정구조가 파괴되었을 때 생성되는 표면이 무극성을 나타낸다. 새로 생성되는 무극성 표면때문에 휘수연석의 표면은 극성인 물과 친하지 않아 자연 소수성을 나타내어, 자연부유도가 높다. 결과적으로 휘수연석은 표면의 소수성을 활용한 부유선광으로 회수된다<sup>7,8)</sup>.

따라서, 본 연구에서는 국내 제천 몰리브덴광 선광 공정의 효율 향상을 위해, 기초 선광 특성 평가를 활용한 부유선별 공정 최적화 연구를 수행하고자 하였다. SEM-EDS, XRD 등의 분석을 통해 광물학적 분석 및 입도 구간별 단체분리 평가가 수행되었으며, 분쇄일지수, 부유선별 속도상수 등의 기초 선광 특성 분석이 수행되었다. 기초

선광 특성 분석을 통해 분쇄산물 입자 크기, 분쇄 일지수 및 최적 부유선별 시간을 결정하여 부유선별 공정 최적화에 적용하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 시료 및 시약

몰리브덴 광석은 충북 제천 몰리브덴 광산으로 삼양마이닝(주)로부터 제공받았다. 광산에 있는 조크리셔, 콘크리셔를 통해 파쇄되었으며, 최종적으로 3,360  $\mu\text{m}$  체를 통과시켜 얻은 시료이다. SEM-EDS 분석을 위한 몰리브덴광 시편 제조를 위해 에폭시 수지(평균 분자량  $\leq 700$  g/mol)과 경화제(Triethylenetetramine), 연마를 위한 다이아몬드 현탁액(6, 3, 1  $\mu\text{m}$ )은 Struers에서 구매하였다. 본 연구에 부유선별 실험에 활용된 등유(Kerosene), 규산나트륨( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , Sodium silicate)은 삼전화학에서 구매하였다. 기포제인 AF65(Aero frother 65)는 Solvay에서 구매하였다.

### 2.2. 광물학적 특성 분석

몰리브덴광의 결정크기 평가를 위해 SEM-EDS(Scanning electron microscopy-energy dispersive X-ray spectroscopy, Hitachi, TM3000-SwiftED 3000) 분석을 수행하였다. SEM-EDS 분석을 위해 상온경화(Cold mounting)하여 시편을 제조하였다. 시편은 조크리셔를 통해 파쇄하여 얻은 10-20 mm의 몰리브덴 원광을 에폭시 수지와 경화제를 질량비 10:1 비율로 섞은 용액과 함께 30 mm 크기의 원통형 몰드에 담아, 상온 24시간 경화시켜 제조되었다. 제조된 시편은 연마기(SAPHIR 520, ATM GmbH)와 다이아몬드 현탁액, 연마천을 활용하여 연마되었다.

몰리브덴 원광의 구성광물의 성분을 확인하기 위해 XRD(X-ray diffraction, Philips X'Pert MPD) 분석이 수행되었다. 또한 원광 내 구성 광물의 비율을 확인하기 위해 정량 XRD 분석, (PANalytical X'Pert<sup>3</sup> Powder)이 수행되었다.

SEM-EDS 분석을 통해 결정된 유용광물 결정크기는 단체분리 가능 입자크기 및 분쇄 공정을 진단하는데 활용되었으며, XRD 분석 결과는 부유선별 공정을 진단 및 최적화하는데 활용되었다.

### 2.3. 분쇄 특성

#### 2.3.1. 분쇄일지수 평가

분쇄 일지수(Work index)는 분체의 분쇄 저항을 나타내는 지수로 광물의 분쇄능(Grindability)을 정량적으로 표현한 값이다<sup>9)</sup>. 분쇄일지수 값으로부터 원광을 선별가능한 크기로 줄이는데 소요되는 에너지를 산출할 수 있어, 볼밀 설계나 입도분포 예측에 활용된다<sup>9,10)</sup>. 분쇄일지수 시험 방법은 F.C. Bond에 의해 확립되었으며, 한국 표준협회(KS E 3600)에 등록이 되어 있다. KS E 3600에 근거하여 아래 식에 의해 대상 몰리브덴 원광의 분쇄 일지수를 측정하였다<sup>11)</sup>.

$$W_i = \frac{48.95}{P_1^{0.23} \times G_{bp}^{0.28} \times \left( \frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \left( \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right) \right)} (kWh/t) \quad (1)$$

식 (1)에서  $W_i$ 는 분쇄일지수(kWh/t),  $P_1$ 은 분쇄를 목표로 하는 입자 크기( $\mu m$ ),  $G_{bp}$ 는 Grindability을 의미하며, 시험용 볼 밀 1 회전 당 당 아래 생성량(g)이다.  $F_{80}$ 은 분쇄 전 시료의 80% 입도( $\mu m$ ), 분쇄 후  $P_{80}$ 은  $P_1$  아래의 80% 입도( $\mu m$ )를 의미한다.  $G_{bp}$ 는 식 (2)에 의해 결정된다.

$$G_{bp} = \frac{Q_p - Q_d(1 - R_f)}{N(n)} \quad (2)$$

식 (2)에서  $Q_p$ 는  $P_1$  통과량,  $Q_d$ 는 시료 투입량,  $N$ 은 볼 밀 회전수,  $R_f$ 는 분쇄 전 시료의  $P_1$  크기 위의 질량 비율이다.

#### 2.3.2. 분쇄시간 특성

원광을 부유선별 및 단체분리가 가능한 입자 크기로 줄이기 위해, 분쇄가 수행되었다. 사용된 분쇄기는 4 L 포트형 로드밀이며, 분쇄 실험은 로드무게 9.3 kg(충진율: 30%), 광액농도 60 w/w% 조건에서 분쇄 시간을 변수로 하여 5, 10, 15, 20분 조건에서 수행되었다. 분쇄 산물의 입도 분포는 체분석을 통해 수행되었다.

### 2.4. 부유선별 속도 평가

부유선별 공정에서 목적-맥석광물에 대한 거동 분석을 위해 부유선별 속도 분석을 수행하였다. 부유선별 속도는

속도상수로 표현되며, 어떠한 광물의 부유가 얼마나 빠르게 일어났는지를 나타내는 지표 및 공정의 회수율 예측에 활용된다<sup>12,13)</sup>.

휘수연석에 소수화 강화를 위해 비이온성 포수제인 등유를 포수제로 활용하였다<sup>4,6,14)</sup>. 광액의 분산성 향상 및 맥석인 규산염광물의 부유 억제제를 위해 규산나트륨을 억제제로 선택하였다<sup>15)</sup>. 기포제는 폴리프로필렌 계통의 AF65를 사용하였다<sup>6)</sup>. 부유선별 실험 조건은 선행연구를 참고하여, 등유 150 g/t, AF65 75 g/t, 규산나트륨 1000 g/t로 설정하였으며, 몰리브덴 원광 500g, 광액농도 30 v/v%로 수행하였다<sup>4,6,14,16)</sup>. 속도상수 산출을 위해 부유선별 정광은 0.5, 1, 2, 4, 8 분 간격으로 얻었다. 시간에 따라 얻은 정광들은 여과 후에 건조기에서 90°C로 12시간동안 건조되었다. 건조된 샘플들의 농도 분석은 정량 XRD 및 ICP-AES(Inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry, 5300 DV, Perkin Elmer)을 통해 수행되었다.

부유선별 속도 모델은 1차 화학반응이라고 가정하여 유도되었다<sup>8,17)</sup>. 셀 안에 광액 중 유용광물의 질량을  $W$ 로 놓았을 때, 유용광물이 기포에 붙어 표면으로 이동하여 걷어내면 점점  $W$ 가 감소할 것이며, 이 반응을 나타내면 식 (3)과 같다.

$$-\frac{dW}{dt} = kW \quad (3)$$

식 (4)를 초기 유용광물 질량인  $W_0$ 와 회수율은  $(W_0 - W)/W_0$ 로 치환하여 나타내면 최종적으로 식 (4)의 형태로 나타낼 수 있다.

$$-\int_{W_0}^W \frac{dW}{W} = k \int_0^t dt, \ln \frac{W}{W_0} = -kt, \quad W = W_0 \exp(-kt) - \frac{dW}{dt} = kW \quad (4)$$

$$\therefore R = 1 - \exp(-kt) \quad (5)$$

식 (5)에서  $R$ 은 회수율,  $k$ 는 부유선별 속도상수(1/minute),  $t$ 는 부유선별 시간(minute),  $W_0$ 은 초기 원광 내 유용광물 질량(g),  $W$ 는 부유된 유용광물 질량(g)을 의미한다.  $W$ 는 XRD 정량분석결과와 산출물의 질량을 토대로 산출하였다.

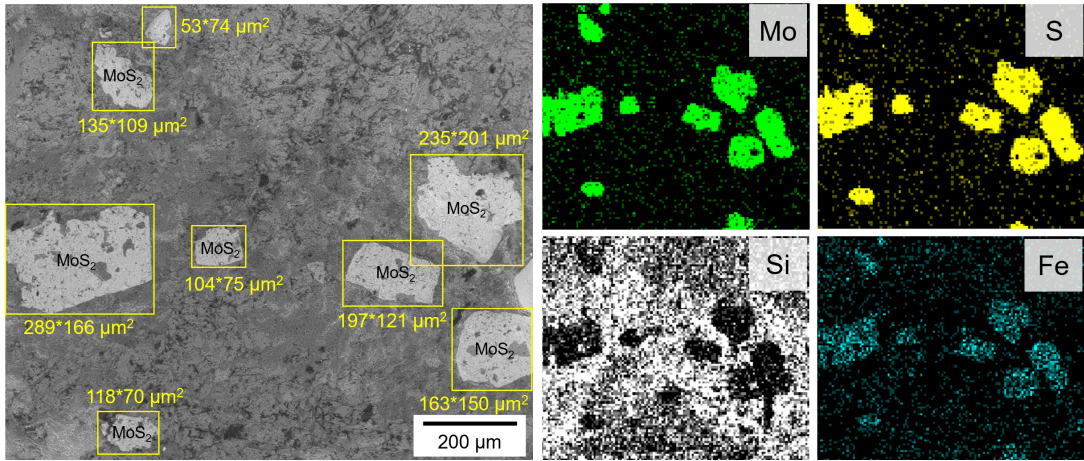


Fig. 1. SEM-EDS images of the molybdenum ore.

부유선별 속도상수인  $k$ 값을 구하기 위해서는 회귀분석이 필요하다. 본 연구에서는 시간별로 부유선별 결과를 비선형 회귀분석하여 부유선별 속도상수를 산출하였다. 회귀분석 프로그램은 MATLAB 2023b의 비선형회귀분석 모델을 활용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 광물학적 특성

Fig. 1은 몰리브덴광 시편을 SEM-EDS 분석한 결과이다. EDS로 Mo, S, Si, Fe 분석으로부터 SEM 이미지에서 밝은 영역을 가진 광물이 목적인 휘수연석이며, 어두운 영역임이 맥석광물임이 확인되었다. 또한 맥석 대부분은 Si 이온을 가지고 있음이 확인되었다. ImageJ software (V1.48, NIH, USA)를 통해 휘수연석의 결정크기를 분석한 결과, 평균  $120 \pm 20 \mu\text{m}$ 로 산출되었다. 이 분석 결과를 기반으로 단체분리에 적절한 몰리브덴광의 분쇄 산물의 입도는  $100 \mu\text{m}$  이하가 적절할 것으로 추정하였다. 이 결과를 토대로 몰리브덴광의 과분쇄를 방지할 수 있는 조건을 제시할 수 있었다.

Fig. 2는 몰리브덴 원광의 XRD 분석 결과이며, Table 1은 몰리브덴 원광의 정량 XRD 분석 결과이다. 분석 결과, 목적 광물인 휘수연석을 제외하고 대부분 Si, Al, Ca계 산화광물이 검출되었다. 주요 맥석광물로는 녹수정(Hedenbergite), 석영(Quartz), 녹렴석(Epidote), 방해석(Calcite), 회반석류석(Grossular), 몬모릴로나이트(Montmorillonite)

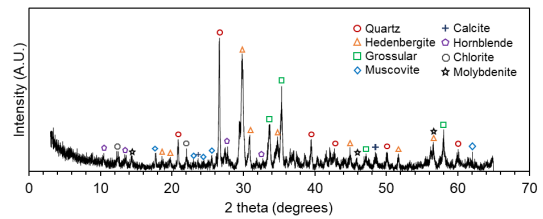


Fig. 2. XRD pattern of the molybdenum ore.

Table 1. Quantitative XRD analysis of the molybdenum ore

Minerals	wt.%
Hedenbergite (CaFeSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub> )	22.81
Epidote (Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> (Fe <sup>3+</sup> ,Al)(SiO <sub>4</sub> )(Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> )O(OH))	17.19
Calcite (CaCO <sub>3</sub> )	10.96
Quartz (SiO <sub>2</sub> )	12.68
Grossular (Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )	16.06
Muscovite (KAl <sub>2</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(F,OH) <sub>2</sub> )	6.36
Chlorite ((Mg,Fe) <sub>3</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·(Mg,Fe) <sub>3</sub> (OH) <sub>6</sub> )	3.58
Montmorillonite ((Na,Ca) <sub>0.33</sub> (Al,Mg) <sub>2</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub> ·nH <sub>2</sub> O)	0.97
Hornblende (Ca <sub>2</sub> (Mg,Fe,Al) <sub>5</sub> (Al,Si) <sub>8</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub> )	3.11
Magnetite (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	3.05
Rutile (TiO <sub>2</sub> )	3.06
Molybenite (MoS <sub>2</sub> )	0.18

등이 존재함이 확인되었다. 따라서 이러한 맥석들로부터 휘수연석을 고효율로 회수할 수 있는 부유선별 공정 최적화 운영이 필요하다는 것을 확인할 수 있었다.

**Table 2.** Calculated grindability of the molybdenum ore for estimating work index ( $W_i$ ) ( $F_{80}=2,980 \mu\text{m}$ ,  $P_1=106 \mu\text{m}$ )

Cycle of grinding	Revolution N(n)	Undersize of $P_1$ (g) ( $Q_{\text{under}}$ )	Oversize of $P_1$ (g) ( $Q_{\text{over}}$ )	Circulating load ratio ( $Q_{\text{over}}/Q_{\text{under}}$ )	Bond grindability ( $G_{\text{bp}}$ )
1	250	387.2	1103.18	2.85	1.1742
2	342	439.08	1051.3	2.39	1.2130
3	328	427.18	1063.2	2.49	1.2171
4	328	455.18	1035.2	2.27	1.3067
5	304	434.78	1055.6	2.43	1.3361
6	298	441.78	1048.6	2.37	1.3896
7	286	428.28	1062.1	2.48	1.3982

**3.2. 분쇄 일지수**

광물학적 분석을 통해 결정된 몰리브덴광 단체분리에 적절한 입자 크기인  $100 \mu\text{m}$ 입이 확인되었다. 따라서 대상 몰리브덴광을  $D_{80}$  기준  $100 \mu\text{m}$ 로 분쇄하는 데 필요한 에너지를 산정하기 위해 분쇄일지수 측정을 수행하였으며, 이에 따라 분쇄일지수 결정 계산식인 식 (1)에서  $P_1$ 은  $100 \mu\text{m}$ (150 mesh)로 설정하였다. 분쇄 일지수는 순환율이 250%에 안정 상태에 도달했을 때의 산출할 수 있다. 여기서 순환율은 분쇄된 광석의  $P_1$ 망 크기 이상의 무게 ( $Q_{\text{over}}$ )를  $P_1$ 망 크기 이하의 무게( $Q_{\text{under}}$ )로 나눈 값을 의미한다<sup>18)</sup>.

Table 2는 볼밀의 회전수에 따른  $P_1$  크기 이상의 무게,  $P_1$  크기 이하의 무게 및 몰리브덴광의 분쇄능을 측정된 결과이다. 회전수 328 조건에서 순환율 249%에 도달하였으며,  $P_{80}$ 이 87.54  $\mu\text{m}$ ,  $G_{\text{bp}}$ 는 1.2694였다. 이를 근거로 몰리브덴 원광의 분쇄일지수는 14.57 kWh/t로 산출되었다.

$$\begin{aligned}
 W_i &= \frac{48.95}{P_1^{0.23} \times G_{\text{bp}}^{0.82} \times \left( \frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \left( \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right) \right)} \\
 &= \frac{48.95}{106^{0.23} \times 1.2694^{0.82} \times \left( \frac{10}{\sqrt{87.54}} - \frac{10}{\sqrt{2980}} \right)} \\
 &= 14.57 \text{ (kWh/t)} \quad (6)
 \end{aligned}$$

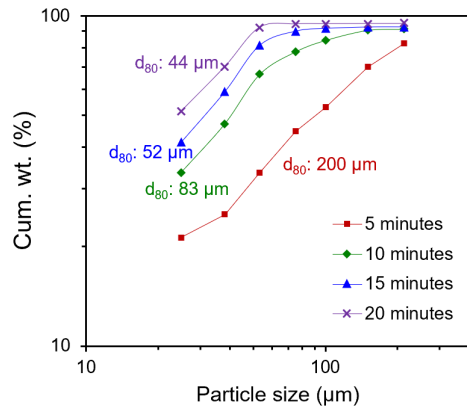
A. Y. Vicent에 의해 측정된 몰리브덴광의 분쇄일지수는 11.6-14.1 kWh/t이었다. 이 결과와 비교했을 때, 제천 몰리브덴광의 분쇄일지수는 선행연구와 비교 다소 높게 산정되었다<sup>19)</sup>. 이 이유는 대상 몰리브덴 광석의 맥석이 녹니석, 석영 등 비교적 모스경도가 높은 단단한 암석으로 구성되어 있어서 다른 몰리브덴광보다는 다소 높게 산정

되었을 것으로 추측된다.

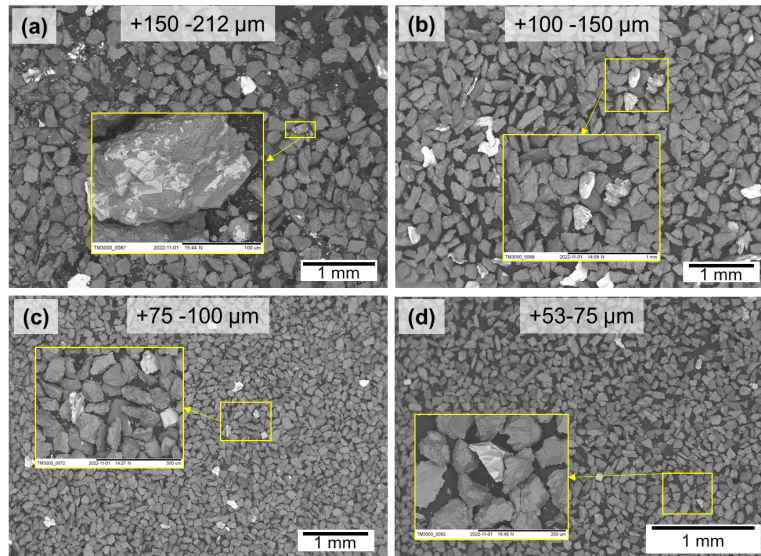
본 연구를 통해 측정된 분쇄일지수는 Bond model, Allis Chalmer model과 같은 에너지 기반 모델을 활용하여, 분쇄 시 소모에너지와 분쇄 산물 입도 분포를 대략적으로 예측할 수 있다. 결과적으로, 몰리브덴 광산 선광장의 볼밀에 대한 진단 및 최적화하는 데 활용할 수 있다<sup>9)</sup>.

**3.3. 분쇄 특성**

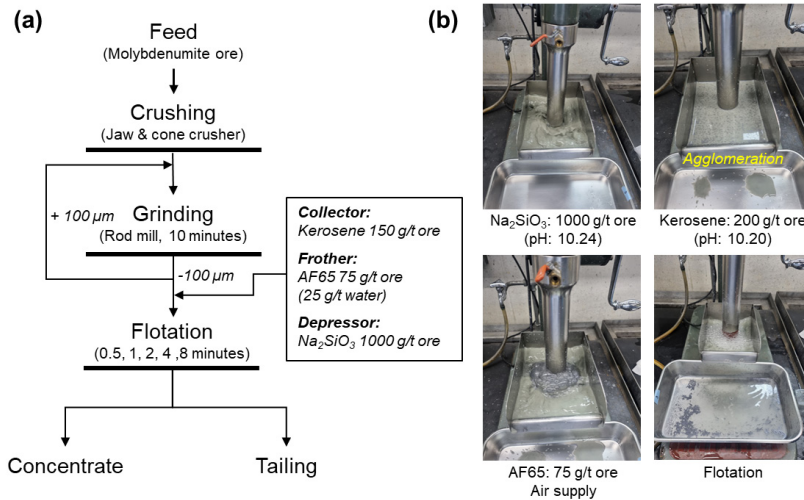
부유선별 특성 실험을 위한 실험실 규모의 분쇄 실험을 수행하였다. Fig. 3은 로드밀에서 5, 10, 15, 20분 분쇄한 산물들의 입도 분포를 나타낸 그래프이다. 분쇄 시간 5, 10, 15, 20분에 따라  $D_{80}$ 은 각각 200  $\mu\text{m}$ , 83  $\mu\text{m}$ , 52  $\mu\text{m}$ , 44  $\mu\text{m}$ 로 산출되었다. 앞서 SEM-EDS 결정구조 크기 분석으로 단체분리에 적합한 몰리브덴광 입자 크기가  $\sim 100 \mu\text{m}$ 로 산정되었기 때문에, 분쇄 시간 10분 조건이 적합하다고 판단하였다.



**Fig. 3.** Cumulative particle size distribution of the molybdenum ore with the grinding time.



**Fig. 4.** SEM images of the ground molybdenum particles for each size range: (a) +150-212  $\mu\text{m}$ , (b) +100-150  $\mu\text{m}$ , (c) +75-100  $\mu\text{m}$ , (d) +53-75  $\mu\text{m}$ .



**Fig. 5.** (a) Flowsheet of the molybdenum ore flotation for estimating flotation kinetics (b) Photographs during each flotation stages.

로드밀로 10분 분쇄한 산물의 단체분리 정도를 평가하기 위해, 입도 구간마다의 분쇄 산물에 대한 SEM-EDS 분석을 수행하였다. Fig. 4는 습식 체질, 건조하여 얻은 입도 구간별 분쇄 산물의 SEM-EDS 이미지이다. Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)로부터 +150-212  $\mu\text{m}$ , +100-150  $\mu\text{m}$  구간에서는 단체분리되지 않은 입자들이 관측되었다. -100  $\mu\text{m}$  구간인 Fig. 4(c)와 Fig. 4(d)에서는 비교적 단체분리가 잘 되

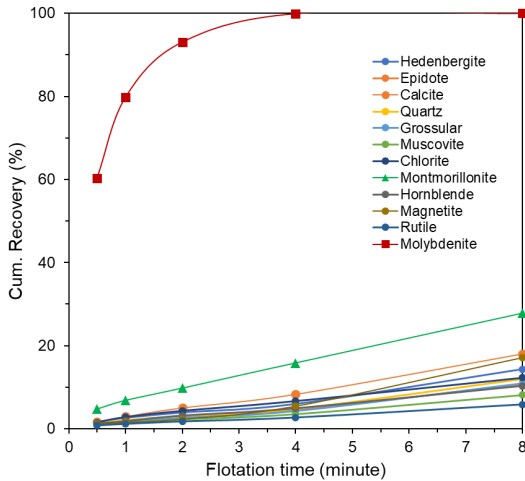
어 있음이 확인되어, 분쇄 산물의 크기가 100  $\mu\text{m}$ 가 적절하다는 것이 검증되었다.

### 3.4. 부유선별 속도 특성

부유선별 속도 특성 평가를 위한 기초 부유선별 실험을 수행하였다. 그림 Fig. 5는 몰리브덴광의 기초 부유선별 흐름도 및 부유선별 실험 중 촬영한 이미지이다. Fig. 5 조건

**Table 3.** Cumulative recovery of the composition minerals in the molybdenum ore as a function of the flotation time

Time (min.)	Cumulative recovery (%)											
	Hedenbergite	Epidote	Calcite	Quartz	Grossular	Muscovite	Chlorite	Montmorillonite	Hornblende	Magnetite	Rutile	Molybdenite
0.5	1.72	1.25	1.65	1.31	1.01	0.89	1.49	4.76	1.29	1.26	0.87	60.31
1	2.66	1.66	2.93	2.10	1.65	1.47	2.77	6.83	1.88	1.61	1.24	79.76
2	3.94	2.67	5.02	3.17	2.68	2.32	4.29	9.78	3.20	2.38	1.81	93.06
4	6.01	4.45	8.30	4.84	4.32	3.56	6.66	15.85	4.95	5.49	2.74	99.91
8	14.35	10.72	18.01	11.97	10.94	8.11	12.32	27.82	10.30	17.11	5.81	99.95



**Fig. 6.** Cumulative flotation recovery of each mineral in molybdenum ore.

에서 수행한 부유선별의 각 구성광물에 대한 누적 회수율을 XRD 정량분석을 통해 얻었으며, 그 결과를 Fig. 6과 Table 3에 나타내었다. Fig. 6으로부터 부유선별 4분 만에 소수성광물인 휘수연석은 부유선별이 완료되었다. 부유선별 8분 동안 녹니석, 석영들을 포함한 Si, Al계 광물들의 부유선별 거동이 비슷하였고, 최대 누적 회수율이 10% 이하로 낮게 산출되었다. 이 결과로부터 규산나트륨이 몰리브덴광에 존재하는 규산염광물 부유 억제에 효과적임을 확인하였다. 규산염광물은 Si, Al계 광물에 흡착되어 표면을 강하게 친수화시키고, 분산력을 올려 억제효과가 있다고 알려져 있다<sup>17)</sup>. 이를 통해 규산나트륨은 점토광물 억제 효과가 낮음을 알 수 있으며, 부유선별 시간이 길어질수록 정광의 MoS<sub>2</sub> 품위 감소를 유발할 수 있음이 확인되었다.

Table 3 결과를 식 (5)에 회귀 분석하여 부유선별 속도 상수를 얻었으며, 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 목적

**Table 4.** Flotation kinetic constants for each mineral in the molybdenum ore

Minerals	Flotation kinetic constant (1/minute)
Hedenbergite	0.019
Epidote	0.014
Calcite	0.024
Quartz	0.015
Grossular	0.014
Muscovite	0.010
Chlorite	0.017
Montmorillonite	0.043
Hornblende	0.014
Magnetite	0.021
Rutile	0.008
Molybdenite	1.707

광물인 휘수연석의 속도상수는 1.707 1/min으로 0.010-0.024 1/min 정도에 다른 규산염광물들에 비해 부유 속도가 월등히 빠른 것이 확인되었다. 그러나 점토광물인 몬모릴로나이트는 0.043 1/min으로 다른 광물들에 비해 약 2배 높게 산정되었다. 이는 점토광물이 최종 정광 품위 감소에 영향을 줄수 있음을 확인하였다.

이 결과들을 바탕으로 규산염 나트륨이 효과적으로 규산염광물의 부유 억제에 작용하는 것을 확인하였으나, 부유선별 효율 향상을 위해서는 점토광물 부유 제어가 필요함을 확인하였다. 본 연구에서 제공한 부유선별 속도상수는 몰리브덴 광산 선광장의 부유선별 회로에 대한 진단 및 최적화 운영하는 데 활용할 수 있어, 추후 관련 연구를 시도할 예정이다.

### 3.5. 공정 최적화

Fig. 7은 분쇄일지수 및 부유선별 속도 결과들을 기반

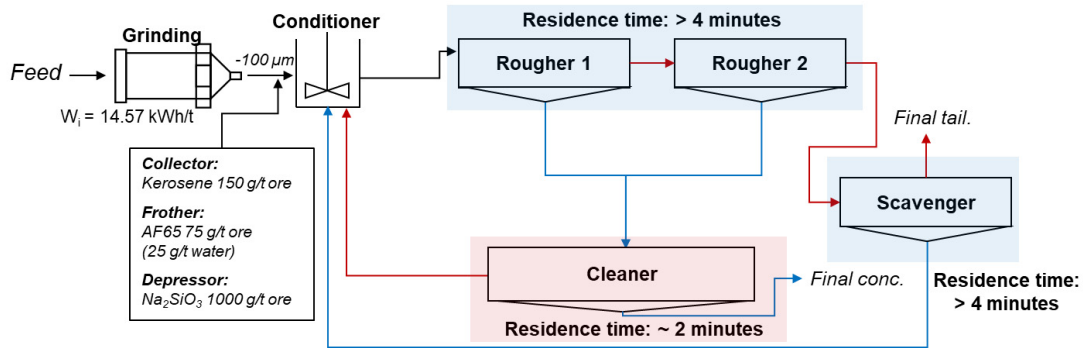


Fig. 7. Flotation circuit with the optimal variables proposed for each stage.

으로 현재의 부유선별 최적화 조건을 제안한 그림이다. 회수율이 중요시되는 조선(Rougher)과 청소부선(Scavenger)는 휘수연석이 최대한 부유될 수 있도록 부유선별 시간을 4분 이상 설정하는 것이 필요하다. 정광의 품위가 중요한 정선(Cleaner)에서는 점토광물이 거의 부유되지 않도록 2분내외에 짧은 부유선별 시간으로 운영되어야 한다. 부유선별 시간(T)는 식 (7)에 의해 산출할 수 있다<sup>7)</sup>.

$$T = \frac{60NV_{eff}}{QEPP} \quad (7)$$

식 (7)에서 T는 부유선별 시간(minutes), N은 셀 개수,  $V_{en}$ 은 유효 부유선별 셀 부피( $\text{m}^3$ ), Q는 건조된 원광 처리량( $\text{t/h}$ )이다. E는 기포로 인한 광액 팽창 지수이며  $[100/(100 - \text{광액 내 공기 부피}(\%))]$ 로 결정되지만, 기본값은 1/0.85이다. P는 건조 원광의 부피로  $[1/(\text{광액비중}) + 100/(\text{광액농도}(\%)) - 1]$ 에 의해 결정된다. 식 (7)에 의해 각 단위 부유선별 공정의 셀 부피와 광액 농도에 적합하도록 원광 처리량이 조절된다면 공정 최적화에 도달할 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

몰리브덴 금속의 수요 증가와 몰리브덴 광맥의 심부화, 저품위화에 대한 해결 방안으로 국내 가행광산 몰리브덴 광석을 이용한 기초 선광 특성 평가를 통한 부유선별 공정 효율 향상 연구를 수행하였다. 광물학적 분석을 통해 단체분리에 필요한 몰리브덴광 입자 크기는  $100 \mu\text{m}$ 라는 것을 밝혔으며, 몰리브덴 원광을  $100 \mu\text{m}$ 로 분쇄하는데 소모되는 에너지인 분쇄 일지수 값이  $14.57 \text{ kWh/t}$ 임을 확인

하였다. 그리고 부유선별 속도 실험을 통해 몰리브덴 원광의 주요 구성 광물들의 부유선별 속도상수 및 시간별 회수율을 확인할 수 있었다. 이 결과들을 토대로 조선, 청소부선, 정선의 최적 부유선별 시간 조건을 제공하였다.

본 연구를 통해 얻은 기초 선광 결과들은 향후 몰리브덴 선광 공정의 진단 및 최적 운영연구를 수행하는 데 활용 예정이다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 ‘국내 부존 바나듐(V) 광물자원 선광/제련/활용기술 개발(GP2020-013, 24-3212)과 ‘K-배터리 원료광물(Ni, Co) 잠재성 평가 및 활용기술 개발(GP2023-004, 24-3215)’ 과제, 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 일환으로 수행되었습니다(No. 20227A10100030).

#### References

1. Braithwaite, E. R., Haber, J., 2013 : Molybdenum: an outline of its chemistry and uses, pp.1-87, Elsevier, Amsterdam.
2. Shields, J. A., 2013 : Applications of molybdenum metal and its alloys; International Molybdenum Association, pp.3-14, IMO, London.
3. Yi, G., Macha, E., Van Dyke, J., et al., 2021 : Recent progress on research of molybdenite flotation: A review, *Advances in Colloid and Interface Science*, 295, 102466.
4. Jeon, H. S., Baek, S. H., Kim, S. M., et al., 2018 : Status of reserves and development technology of rare earth metals in Korea, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 55(1), pp.67-82.



5. Zanin, M., Ametov, I., Grano, S., et al., 2009 : A study of mechanisms affecting molybdenite recovery in a bulk copper/molybdenum flotation circuit, *International Journal of Mineral Processing*, 93(3-4), pp.256-266.
6. Han, S., Jung, M., Lee, W., et al., 2021 : Diagnosis and optimization of gold ore flotation circuit via linear circuit analysis and mass balance simulation, *Minerals*, 11(10), 1065.
7. Jeon, H.-S., Lee, E.-S., Baek, S.-H., et al., 2016 : Recovery of high-grade molybdenite concentrate for lubricant use by froth flotation, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 53, pp.219-230.
8. Lin, Q. Q., Gu, G. H., Wang, H., et al., 2018 : Flotation mechanisms of molybdenite fines by neutral oils, *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 25, pp.1-10.
9. Han, S., Jeong, M., Lee, W., et al., 2018 : Simulation of grinding/classification circuit in domestic gold ore processing plant using energy-based grinding model and mathematical classification model, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 55(1), pp.8-19.
10. Jankovic, A., Valery, W., 2013 : Closed circuit ball mill-Basics revisited, *Minerals Engineering*, 43, pp.148-153.
11. Rodríguez-Torres, I., Tuzcu, E. T., Andrade-Martínez, J., et al., 2023 : Estimation methodology for Bond ball mill work index experiment output via mathematical modeling, *Minerals Engineering*, 201, 108186.
12. Park, C.-H., 2021 : Estimation of rate constants and mixing characteristics in flotation columns, *Applied Sciences*, 11, 10084.
13. Han, S., You, K., Kim, K., et al., 2019 : Measurement of the attachment force between an air bubble and a mineral surface: relationship between the attachment force and flotation kinetics, *Langmuir*, 35(29), pp. 9364-9373.
14. Purev, O., Kim, H. S., Park, C.-H., 2023 : Mineralogical characteristics and fundamental study of flotation for molybdenum ore, *Resources Recycling*, 31(6), pp.34-44.
15. Kim, H. S., Purev, O., Park, C.-H., 2023 : Experimental design of column flotation for recovery of high grade molybdenite, *Resources Recycling*, 32(6), pp.34-44.
16. Park, C.-H., Jeon, H.-S., Kim, B.-G., et al., 2009 : Froth Flotation of Molybdenite Ore from Dong-won NMC Mine, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 46, pp.754-760.
17. Wills, B. A., Finch, J., 2016 : Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery, pp.265-380, Elsevier, Amsterdam.
18. Magdalinović, N., 1989 : A procedure for rapid determination of the Bond work index, *International Journal of Mineral Processing*, 27(1-2), pp.125-132.
19. Vincent, A. Y., Blessing, O., Oyelola, A. O., et al., 2019 : Determination of work index for iperindo lode gold deposit at Ilesha Goldfield Osun State, Nigeria using modified bond index, *American Journal of Materials Synthesis and Processing*, 4(1), pp.37-42.

---

### 한 성 수

- 한양대학교 자원환경공학과 공학박사
- 한국과학기술원(KAIST) 생명화학공학과 박사후연수자
- 퀸즐랜드 대학교 화학공학과 박사후연수자
- 현재 한국지질자원연구원 선임연구원

---

### 서 주 범

- 경상대학교 화학과 이학박사
  - JSPS 교토대학교 박사후연수자
  - 한국지질자원연구원 박사후연수자
  - 한국지질자원연구원 책임연구원
  - 현재 한국지질자원연구원 자원회수연구센터장
-