

몰리브덴광의 광물학적 특성 및 부선 기초연구

푸레브 오윤빌렉* · 김현수* · §박철현**

*조선대학교 첨단에너지자원공학과, **조선대학교 첨단에너지공학과

Mineralogical Characteristics and Fundamental Study of Flotation for Molybdenum Ore

Oyunbileg Purev*, Hyun Soo Kim* and §Chul-Hyun Park**

*Department of Advanced Energy and Resources Engineering, Chosun University

**Department of Advanced Energy Engineering, Chosun University

요 약

본 연구에서는 국내 부존 몰리브덴광을 대상으로 광물학적 특성 및 부유선별 기초특성을 파악하였다. 몰리브덴의 근원광물은 휘수연석으로 확인되었으며 원광 내 주요 맥석광물은 규산염광물이었다. 구리, 납 및 아연 등은 극미량으로 나타났다. 부유선별 기초특성 결과, 휘수연석의 제타전위는 pH 전영역에서 음전하를 나타내었다. 휘수연석의 접촉각은 pH의 증가에 따라 증가하였고 최대값은 pH 9에서 74°을 나타내었다. 단위부선의 최적조건에서 정광의 품위와 회수율은 각각 MoS₂ 82.4%와 92.04%를 나타내었다. 정광내 불순물 조사결과, 정광의 품위를 저하시킬 수 있는 휘수연석과 유사한 특성을 보이는 황화광물, 그리고 휘수연석과 결합된 규산염광물이 관찰되었다. 따라서, 정광의 품위향상을 위해 재분쇄/단체분리 향상을 통한 규산염광물의 제어와 미립자광물 선별 효율을 높일 수 있는 컬럼부선등이 요구된다.

주제어 : 몰리브덴, 광물학적 특성, 광학분석, 부유선별, 접촉각

Abstract

This study investigated the mineralogical characteristics and basic flotation properties of domestic molybdenum ores. The source mineral of molybdenum was identified as molybdenite, and the main gangue minerals in the raw ore were silicate minerals. Copper, lead, and zinc were also found in trace amounts. Based on the results of basic flotation properties, molybdenite's zeta potential showed negative charges in all pH ranges. The contact angle of molybdenite increased with pH, reaching a maximum of 74° at pH 9. In optimal conditions, the grade and recovery of the concentrate by unit flotation were MoS₂ 82.4% and 92.04%, respectively. Further investigation of the impurities in the concentrate revealed a sulfide mineral with surface characteristics similar to molybdenite and silicate minerals combined with molybdenite, which may degrade the quality of the concentrate. To improve the concentrate quality, we intend to control silicate minerals through regrinding and liberation and use column flotation to improve fine particle separation efficiency.

Key words : Molybdenum, Mineralogical characteristic, Optical analysis, Flotation, Contact angle

· Received : November 30, 2022 · Revised : December 9, 2022 · Accepted : December 12, 2022

§ Corresponding Author : Chul-Hyun Park (E-mail : chpark@chosun.ac.kr)

Department of Advanced Energy Engineering, Chosun University, 309, Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju 61452, 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 강도와 고온 안정성으로 인해 고온 합금, 전기/전자 장치 및 항공우주 등 다양한 산업에서 사용되고 있다¹⁻³⁾. 국제 몰리브덴 협회(IMOA, international molybdenum association)의 데이터에 따르면 몰리브덴 제품의 80% 이상이 금속산업에 사용되고, 약 14%의 몰리브덴 제품이 화학산업에 사용된다고 보고하고 있다⁴⁾. 몰리브덴을 함유하는 주요 광물은 휘수연석(Molybdenite, MoS_2), 울페나이트(Wulfenite, PbMoO) 철망간중석(Powellite, $\text{Ca}(\text{Mo}, \text{W})\text{O}_4$)가 있으며, 이중 휘수연석이 경제적으로 가장 중요한 광물로 알려져 있다.

몰리브덴광은 일반적으로 선광 공정을 통해 정광으로 생산 후 제련공정을 거쳐 1차 가공제품 제조를 위한 기초소재인 이황화몰리브덴, 삼산화몰리브덴 및 페로몰리브덴으로 제조된다. 고품위 몰리브덴의 회수와 관련된 연구는 주로 산 처리 공정을 이용하고 있으나^{5,6)}, 공정 폐수 발생 등과 같은 환경적 문제, 몰리브덴의 물성저하와 같은 단점을 가지고 있다⁷⁾. 국내의 경우 Jeon et al.(2016)과 Park et al.(2009)⁸⁾ 등에 의해 물리적 선별인 부유선별을 이용한 연구가 수행되었다.

공정 광물학 연구에 대한 중요성과 광물처리 회로가 야금 성능에 미치는 영향은 여러 연구자들에 의해 입증되었다^{9,10)}. 일련의 광석광물로 구성된 광물학 연구는 공정에서 원광, 정광 및 광미 등의 산출물에 대해 수행된다. 이러한 연구는 일반적으로 편광현미경 및 QXRD(quantitative X-ray diffraction), QEMSCAN(quantitative evaluation of minerals by scanning electron microscopy), EMAP(epitope-preserving magnified analysis of proteome) 및 SEM-EDS(scanning electron microscopy-energy dispersive x-ray spectrometer)와 같은 기타 기술을 사용하여 수행된다. 이러한 이미지 분석 기술은 유용광물의 분리 정도에 대한 유용한 정보를 제공한다¹¹⁾. 특히, 황화물 광상에 대한 이미지 분석 기술은 각 단계별 시료의 입도분포, 입자크기분포(particle size distribution), 광물연동(minerals interlocking), 광물학적 분포(mineralogical distribution), 원소분석, 화학적 특성 및 조직특성 등에 대한 유용한 정보를 제공한다¹²⁾. 광물학적 특성만으로 공정 회로를 최적화하기에 충분하지 않지만, 이를 적절히 활용하여 공정 회로의 최적화를 위한 해결방안을 제시할 수 있다¹²⁾.

이러한 광물학적 특성 연구는 재료가공, 폐기물 처리 및 부유선별 등을 포함한 다양한 산업공정에 영향을 주며 특히, 부유선별공정에서 목적광물과 맥석광물을 분리할 수 있는 영향인자를 선정할 수 있는 자료로 활용될 수 있다^{18,19)}. 몰리브덴의 부유성은 광물학적 특성, 슬라임 코팅, 분쇄 및 단체분리 및 부선시약 등과 같은 요소들에 영향을 받으며, 이러한 요소들은 부유선별의 최종산물인 정광의 품위 및 회수율에 영향을 미치게 된다²⁰⁻²²⁾.

본 연구에서는 국내 부존 몰리브덴을 대상으로 몰리브덴의 광물학적 특성 및 부유선별 기초특성을 파악하고자 하였다. 또한, 부유선별을 통해 회수된 정광의 불순물 특성 파악을 통해 고품위 몰리브덴 정광의 회수방안을 제시하고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 몰리브덴 원광

몰리브덴의 광물학적 특성 및 부유선별을 위한 기초특성을 파악하기 위해 본 연구에서 사용된 시료는 충북 제천시 금성면 대장리에 위치한 (주)삼양 마이닝에서 몰리브덴 원광 및 파·분쇄된 시료를 제공 받았다. 1차 및 2차 불밀 후 파·분쇄된 시료의 입도분석 결과(Mastersizer 2000, Malvern Panalytical Ltd., Malvern, UK), D_{90} 은 $122\mu\text{m}$, 평균 입도 D_{50} 은 $39.8\mu\text{m}$ 로 확인되었다(Fig. 1). 원광은 몰리브덴의 광물학적 특성을 파악하기 위해 그리고 파·분쇄 시료는 부유선별 실험에 사용되었다.

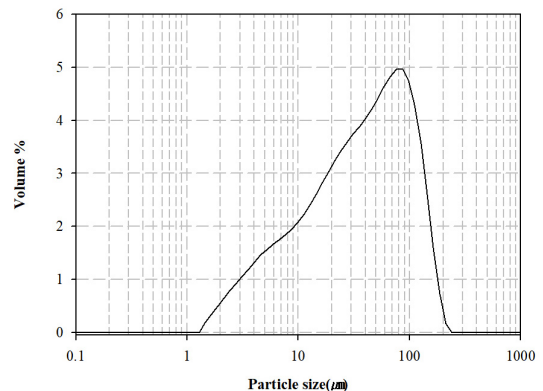


Fig. 1. Particle size analysis for raw molybdenite ore in this study.

2.2. 몰리브덴의 광물학적 특성분석

몰리브덴 원광의 목적광물 및 맥석광물의 특성을 확인하기 위해 광물학적 특성분석을 수행하였다. X-선 회절분석(PANalytical, X'pert PRO MRD, United Kingdom)은 Cu-K α 선을 이용하여 가속 전압 40kV, 전류 30mA, 주사속도 2°/min으로 5°~70°의 2 θ 조건에 분석하였으며. 광학분석은 실체현미경, 반사현미경(ECLIPSE LV100DOL, Nikon, Japan) 및 주사전자현미경(SEM; S-4800, Hitachi, Japan, EDS; ISIS310, Oxford, United Kingdom) 분석을 수행하였다. 또한, 파·분쇄된 시료를 대상으로 입도별 MoS₂ 함량 및 불순물 함량을 확인하기 위해 체를 9개 구간으로 나누어 습식 체분석을 수행하였으며, 입도별 시료는 왕수(Aqua regia)로 전처리 후 ICP-OES(Optima 5300DV, Perkin Elmer, USA)를 이용하여 분석하였다.

2.3. 몰리브덴 부유선별 기초 특성분석

부유선별 전 몰리브덴 시료의 부유선별 기초특성을 확인하기 위해 제타전위, 접촉각 및 표면장력을 측정하였다. 제타전위는 Zetasizer NanoZS(Malvern Panalytical, United Kingdom)를 이용하였다. 측정조건은 KCl 용액 (2x10⁻³ mol/L)과 시료의 비율을 1%(S/L)로 하여 현탁액을 제조하였으며, HCl과 KOH를 이용하여 pH 조절 후 pH에 따른 제타전위 값을 확인하였다. 접촉각(Phoenix Pico300, SEO Phoenic)은 광물 표면의 습윤성을 특성화하기 위해 측정하였다. 원광을 일정한 크기로 절단 후 연마편을 제작하고 매끄러운 평면을 가진 목적광물과 맥석광물을 대상으로 pH에 따른 접촉각 변화를 확인하였다.

2.4. 몰리브덴 부유선별 및 정광의 불순물 특성

부유선별은 평균 입도 크기가 39.8 μ m인 파·분쇄된 시료를 대상으로 일반 부유선별기(Denver sub-A)의 5L 셀(mechanical cell)에서 수행하였다. 부선조건은 기존 문헌⁷⁾에서 최적 실험조건으로 확인된 조건에서 수행하였으며, 광액농도 20%, 교반속도 1,200rpm의 조건에서 수행하였다. 억제제는 규산나트륨(sodium silicate, Na₂SiO₃)를 이용하였으며, Na₂SiO₃는 부유선별시 규산염 광물들의 부상을 억제하고, 슬라임 코팅을 방지하기 위해 사용되었다^{13,14)}. Qin et al.(2017)¹⁵⁾의 연구 결과에 따르면 비온성 포수제인 등유의 선택도가 황동석과 몰리브덴을 분리하는 세 가지 포수제(butyl xanthate, Z-200 and kerosene) 중 가장 우수하고 다른 포집 특성도 우수한 것으로 확인하였다. 부선시약은 억제제(Na₂SiO₃, 1kg/ton, 5min), 포수제(kerosene, 100ppm, 2min) 및 기포제(AF65, 50ppm, 5min) 순으로 첨가하였으며, 각 시약별 일정 시간 동안 반응 후 10분간 조건 부선을 하여 조건 정광을 회수하였다. 회수된 조건 정광은 3회 정선 후 최종 정광으로 회수하였다.

부유선별을 통해 회수된 정광을 대상으로 정광 내 존재하는 불순물의 특성을 파악하기 위해, 습식 체분석을 수행하여 입도별 몰리브덴과 불순물의 함량을 조사하였으며, 주사전자현미경을 이용하여 정광의 몰리브덴 형상 및 불순물 분포특성을 파악하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 몰리브덴의 광물학적 특성

몰리브덴 원광의 XRD 분석 결과는 Fig. 2에 나타내었

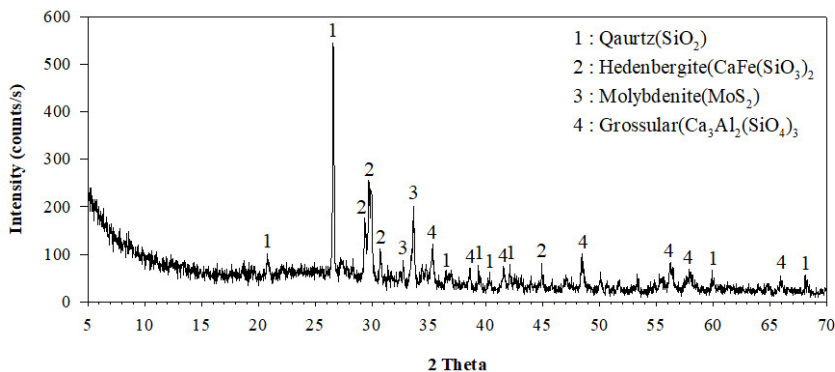
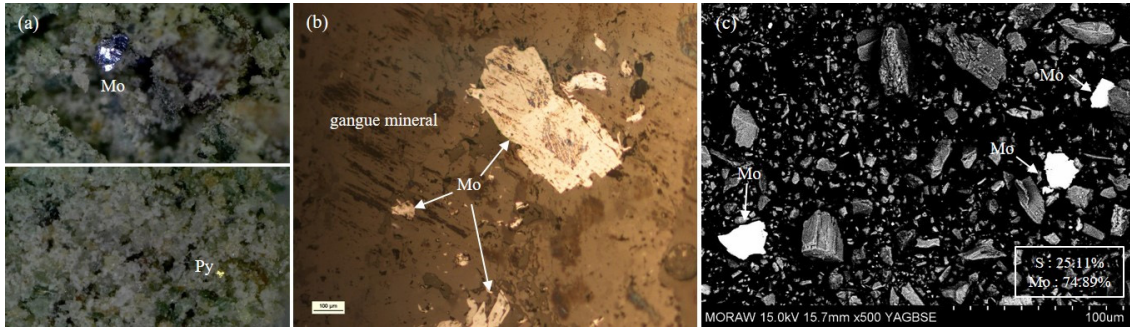


Fig. 2. XRD pattern of raw molybdenite ore in this study.

Table 1. Chemical analysis of raw molybdenite ore in this study

Chemical composition (%)						
MoS ₂	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	Etc.
1.80	42.93	25.17	16.23	8.90	2.66	3.25

**Fig. 3.** Image of raw molybdenite ore in this study (a; stereoscopic microscope, b; reflecting microscope, c; SEM/EDS).

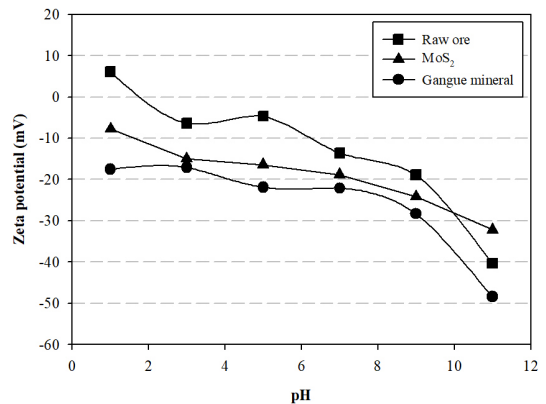
다. 몰리브덴의 근원광물은 휘수연석으로 확인되었으며, 주요 맥석광물은 석영(Quartz, SiO₂), 회철회석(Hedenbergite, CaFe(SiO₃)₂) 및 녹석류석(Grossular, Ca₃Al₂(SiO₄)₃) 이 검출되었다. 휘수연석과 함께 부존한다고 보고된 황철석, 황동석 등의 황화광물 피크는 불검출되었으며, 이는 휘수연석을 제외한 황화광물이 5% 이내로 존재하는 것을 의미한다.

Table 1은 화학분석 결과로 목적 광물인 MoS₂ 품위는 1.8%이었으며 맥석광물로 존재하는 SiO₂, CaO 및 Fe₂O₃은 각각 42.93%, 25.17% 및 16.23%이었다. 한편 몰리브덴과 유사한 표면특성을 가지는 Pb 및 Cu와 같은 황화광물의 함량은 극미량으로 확인되었다.

몰리브덴의 구조와 형태는 몰리브덴의 불규칙성으로 인해 다양하게 존재할 수 있다¹⁰⁾. 실제현미경 관찰 결과(Fig. 3(a)), 휘수연석의 표면은 은회색의 광택을 띠고 있으며, 불규칙한 모양을 나타내고 있다. 그리고 황철석(Pyrite, FeS₂)으로 확인되는 불순물도 관찰되었다. 반사현미경에서 몰리브덴은 비등방성 표면의 특성을 나타내고 있다(Fig. 3(b)). SEM/BSE를 이용하여 파·분쇄된 원광의 광물 분포를 확인한 결과(Fig. 3(c)), BSE에서 어두운 부분의 광물들은 대부분 silicate 계열의 맥석광물로 확인되었다. 밝은 부분의 광물들을 대상으로 EDS 분석을 한 결과, 평균 S 25.11%, Mo 74.89%로 MoS₂인 휘수연석으로 확인되었다.

3.2. 몰리브덴의 부유선별 기초 특성

다양한 pH 범위에서 몰리브덴 원광, 휘수연석 및 맥석광물에 대한 제타전위의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 휘수연석의 제타전위 값은 전체 pH 범위에서 음전하를 띠고 있는데, 이는 기존 연구된 제타전위의 결과와 유사한 경향을 보였다¹⁶⁾. 원광은 pH 1에서는 양전하를 띠었지만 pH 2이하부터 모두 음전하를 나타내었다. 또한 석영을 포함하는 맥석광물의 제타전위 값도 모든 pH에서 음전하를 나타내었다. 제타전위 값은 광물 현탁액의 안정성을 나타내는 간접적인 지표로 활용될 수 있으며, 몰리브덴 부유선별시 적정 pH 선정에 중요한 자료로 활용될 수 있다.

**Fig. 4.** Zeta potential of raw ore, MoS₂ and Gangue mineral as a function of the pH.

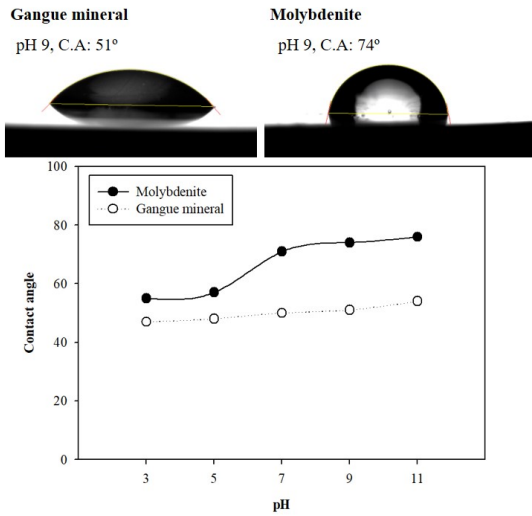


Fig. 5. Contact angle of molybdenite ore from Samyang Mining.

Wan et al.(2017)¹⁷과 Zhang et al.(2019) 에 의하면, pH 11이상에서는 몰리브덴광에 함께 존재하는 Ca²⁺와 Pb²⁺ 등의 양이온들이 몰리브덴 표면의 소수성을 감소시켜 부유도를 낮추는 원인이 된다고 보고하였다. 이러한 영향 인자들을 고려하여 몰리브덴 부유선별시 적정 pH는 8~10 범위로 수행하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

휘수연석 및 맥석광물의 pH에 따른 접촉각 변화는 Fig. 5에 나타내었다. 산성조건에서 휘수연석과 맥석광물의 접촉각은 큰 차이를 나타내지 않았다. 그러나 pH 7 이상부터 휘수연석의 접촉각은 크게 증가하였으며 pH 9에

서 74°로써 최대값을 나타내었다. 반면, 맥석광물의 접촉각은 pH가 증가함에 따라 47°에서 54°까지 큰 변화없이 다소 완만히 증가하였다. 접촉각은 연구 결과에 따라 다소 차이가 날 수 있지만 기존의 전반적인 연구결과는 휘수연석의 결정면은 소수성이고 가장자리는 친수성으로 보고되고 있다²⁰). Arbiter et al.(1975)에 의하면 조개진 절단면의 접촉각은 90°를 그리고 매끄러운 부분의 접촉각은 70°를 나타내는데, 이는 휘수연석의 표면 거칠기와 면의 이방성 특성이 접촉각과 소수성에 영향을 주는 요인이라 판단된다.

3.3. 몰리브덴 부유선별 및 정광의 불순물 특성

실험방법에 기술된 최적조건에서 수행한 부유선별 결과, 몰리브덴 정광의 품위와 회수율은 각각 MoS₂ 82.4%와 92.04%로 확인되었다. 회수된 정광의 입도분포에 따른 몰리브덴의 함량과 몰리브덴 회수에 영향을 미치는 불순물 함량(Cu, Zn, Pb and Si)을 확인한 결과는 Table 2에 나타내었다. 입도별 정광의 MoS₂ 함량은 80.36~86.75%의 범위로 나타났으며 불순물인 SiO₂는 평균 2.73%이었다. 정광에 황화광물로 혼입될 수 있는 Cu는 평균 0.31% 이하로 확인되었으며 Zn과 Pb는 0.1% 이하로 극미량 존재하였다.

몰리브덴 정광에 잔존되어 있는 불순물의 특성을 확인하기 위한 SEM/EDS 분석 결과는 Table 3과 Fig. 6에 나타내었다. SEM/BSE에서 보는 바와 같이, 밝은 부분의 광물은 휘수연석으로써 대부분 다른 맥석광물과 거의 맞물

Table 2. Particle size analysis and Chemical analysis of Mo concentrate

Size (mesh)	Weight (%)	MoS ₂ Assay. (%)	Cu Assay. (%)	Zn Assay. (%)	Pb Assay. (%)	Si Assay. (%)
35x60	2.02	85.01	0.035	N.D	N.D	2.41
60x100	10.55	80.36	0.03	N.D	0.01	3.61
100x140	11.53	84.99	0.07	N.D	0.02	2.24
140x200	12.00	84.18	0.09	N.D	0.01	2.19
200x270	12.48	85.94	0.11	0.03	0.02	1.94
270x325	8.24	86.75	0.14	0.05	0.02	1.91
325x400	2.60	85.22	0.19	0.06	0.02	2.03
400x500	11.69	84.50	0.21	0.07	0.02	1.97
-500	28.90	83.12	0.66	0.18	0.05	2.98
Total	100.00					

Table 3. EDS point result for SEM/BSE image of molybdenite concentrate

	1		2		3		4		5	
	Wt.%	At.%	Wt.%	At.%	Wt.%	At.%	Wt.%	At.%	Wt.%	At.%
O			56.21	74.85					56.42	74.80
Si			14.83	11.25					16.05	12.12
S	32.70	59.25	1.28	0.85	43.01	56.79	32.28	58.78		
Mo	67.30	40.75					67.72	41.22		
Ca			16.60	8.82					17.59	9.31
Fe			11.08	4.23	56.99	43.21			9.94	3.78
Totals	100.00		100.00		100.00		100.00		100.00	
	6		7		8		9			
	Wt.%	At.%	Wt.%	At.%	Wt.%	At.%	Wt.%	At.%		
O			42.50	59.94	48.62	64.30				
Mg			10.56	9.80	8.67	7.55				
Al			11.99	10.03	7.57	5.94				
Si			15.09	12.12	22.86	17.22				
S	31.19	57.56					32.35	47.30		
Mo	68.81	42.44					27.32	22.94		
K			0.29	0.20	2.17	1.18				
Fe			19.57	7.91	10.10	3.83				
Totals	100.00		100.00		100.00		100.00			

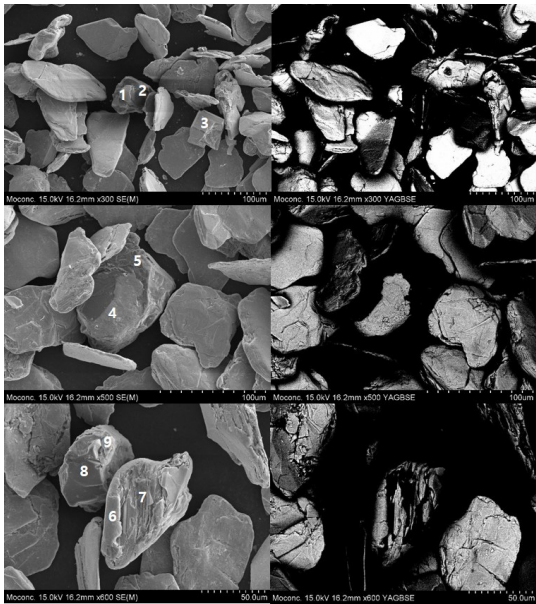


Fig. 6. SEM/BSE image of molybdenite concentrate.

리지 않고 다양한 형태와 크기로 존재하고 있었다. 한편 맥석광물로 혼입된 광물과 형태를 관찰한 결과, 먼저 휘수연석과 표면특성이 유사한 황철석이 관찰되었고 일부 미단체분리된 휘수연석이 규산염광물과 결합된 형태로 존재하고 있었다.

정광내 혼입된 불순물의 특성을 확인한 결과, 정광의 품위를 저하하는 원인은 주로 휘수연석과 결합 되어 있는 규산염광물과 표면특성이 유사한 황화광물임을 확인하였다. 따라서 정광의 품위 향상을 위해 재분쇄를 통한 단체 분리 및 주요 불순물인 규산염광물을 억제하는 방안이 요구된다. 또한 재분쇄 공정에 의해 미립화된 정광의 품위와 회수율을 높일 수 있는 컬럼부유선별법의 적용이 고려된다.

4. 결 론

본 연구는 고품위 몰리브덴 정광을 회수하기 위해 몰리브덴의 광물학적 특성 및 부유선별 기초특성을 조사하고 일반 부유선별을 통해 회수된 정광의 불순물 특성을 파악하고자 하였다.

- (1) 몰리브덴 원광의 근원광물은 휘수연석으로 확인되었으며, 주요 맥석광물은 석영, 회철취석 및 녹색류석 등의 규산염광물이며, 몰리브덴과 유사한 표면특성을 가진 Pb와 Cu 같은 황화광물의 함량은 극미량으로 나타났다.
- (2) 몰리브덴 원광, 휘수연석 및 맥석광물에 대한 제타전위를 측정된 결과, 대부분의 구성광물 모두 전체 pH

범위에서 음전하를 나타내었다. 접촉각 측정결과, 산성조건에서 휘수연석과 맥석광물의 접촉각은 큰 차이를 나타내지 않았으나 pH 7 이상부터 휘수연석의 접촉각은 맥석광물에 비해 크게 증가하여 pH 9에서 74°로 최대값을 나타내었다.

- (3) 부유선별 결과, 몰리브덴 정광의 품위와 회수율은 각각 MoS₂ 82.4%와 92.04%로 확인되었다. 정광의 품위를 저하하는 원인은 주로 휘수연석과 결합 되어 있는 규산염광물과 표면특성이 유사한 황화광물임을 확인하였다. 정광의 품위향상을 위해 재분쇄/단체분리 향상을 통한 규산염광물의 제어와 미립자광물 선별 효율을 높일 수 있는 컬럼부선등이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20227A10100030).

References

1. Wadsworth, J., Wittenauer, J., 1993 : The history of development of molybdenum alloys for structural applications, pp.26, United States.
2. Shields, J.A., Applications of molybdenum metal and its alloys, International Molybdenum Association(IMOA), <https://www.imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/>, November 1, 2022.
3. Zhang, X., Lu, L., Cao, Y., et al., 2020 : The flotation separation of molybdenite from chalcopyrite using a polymer depressant and insights to its adsorption mechanism, Chemical Engineering Journal, 395, pp.125137.
4. 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(4), pp. 102466
5. Kim, B.S., Sohn, H.S., Lee, J.C., et al., 2008 : Status on Manufacturing Molybdenum and Molybdenum Compounds, Trends in Metals & Materials Engineering, 21(4), pp.13-20.
6. Smirnov, K., Raspopov, N., Shneerson, Y.M., et al., 2010 : Autoclave leaching of molybdenite concentrates with catalytic additives of nitric acid, Russian Metallurgy (Metally), 2010(7), pp.588-595.
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, The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, 53(3), pp.219-230.
8. Park, C.-H., Jeon, H.-S., Kim, B.-G., et al., 2009 : Recovery of Roasting-Molybdenite Concentrate by Froth Flotation, Korean Journal of Materials Research, 19(12), pp. 661-666.
9. Rincon, J., Gaydardzhiev, S., Stamenov, L., 2019 : Investigation on the flotation recovery of copper sulphosalts through an integrated mineralogical approach, Minerals Engineering, 130, pp.36-47.
10. Abdollahi, M., Bahrami, A., Mirmohammadi, M.S., et al., 2020 : A process mineralogy approach to optimize molybdenite flotation in copper-molybdenum processing plants, Minerals Engineering, 157, pp.106557.
11. Lotter, N., Kowal, D., Tuzun, M., et al., 2003 : Sampling and flotation testing of Sudbury Basin drill core for process mineralogy modelling, Minerals Engineering, 16(9), pp.857-864.
12. Can, N.M., Celik, I.B., Bicak, O., et al., 2013 : Mass balance and quantitative mineralogy studies for circuit modification, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 34(5), pp.348-365.
13. Huynh, L., Feiler, A., Michelmore, A., et al., 2000 : Control of slime coatings by the use of anionic phosphates: A fundamental study, Minerals Engineering, 13(10-11), pp. 1059-1069.
14. Park, C.-H., Jeon, H.-S., 2010 : The effect of sodium silicate as pH modifier and depressant in the froth flotation of molybdenite ores, Materials Transactions, 51(7), pp. 1367-1369.
15. Qin, W., Wu, J., Jiao, F., et al., 2017 : Mechanism study on flotation separation of molybdenite from chalcocite using thioglycolic acid as depressant, International Journal of Mining Science and Technology, 27(6), pp.1043-1049.
16. Wang, Z., He, T., Li, H., et al., 2022 : Influence of magnetized water on molybdenite flotation and its mechanism. Environmental Technology, 43(1), pp.107-115.
17. Wan, H., Yang, W., Cao, W., et al., 2017 : The interaction between Ca²⁺ and molybdenite edges and its effect on molybdenum flotation, Minerals, 7(8), pp.141.
18. Zhang, Q., Zhu, H., Yang, B., et al., 2019 : Effect of Pb²⁺ on the flotation of molybdenite in the presence of sulfide ion, Results in Physics, 14, pp.102361.
19. Tanaka, Y., Miki, H., Suyantara, G.P.W., et al., 2021 : Mineralogical Prediction on the Flotation Behavior of Copper and Molybdenum Minerals from Blended Cu-Mo Ores in Seawater, Minerals, 11(8), pp.869.
20. Lin, S., Wang, C., Liu, R., et al., 2022 : Surface characterization of molybdenite, bismuthinite, and pyrite to identify the influence of pH on the mineral floatability,

- Applied Surface Science, 577, pp.151756.
21. Nie, Q., Cheng, Y., Liu, C., et al., 2020 : Mineralogy Study on a Fine-Grained Cu-Mo Sulphide Ore in Jiudingshan China, In Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 782(4), pp.42017.
22. Arbiter, N., Fujii, Y., Hansen, B., et al., 1975 : Surface

properties of hydrophobic solids. Advances in Interfacial Phenomena of Particulate/Solution/Gas System, Applications to Flotation Research, P. Somasundaran and R.B. Grieves, eds., AICHE Symposium Series, AICHE Symp. 71, pp.176-182.



푸레브 오윤빌렉

- 현재 조선대학교 첨단에너지자원 공학과 박사과정

김현수

- 현재 조선대학교 첨단에너지자원공학과 박사과정



박철현

- 현재 조선대학교 첨단에너지공학과 부교수
- 당 학회지 제29권 6호 참조