

금·은 광석의 선광기술

김형석·정수복

한국지질자원연구원 광물자원연구본부

금(Au)은 지각에 평균 3ppb 정도 함유된 귀금속으로 일반적으로 저 품위 광상의 금의 평균 품위는 3ppm 이하이기 때문에 금광상의 탐사, 개발, 선광을 어렵게 만든다.

전 세계의 금 매장량은 100,000톤 정도로 추정되며, 이중 남아프리카 공화국에 50%이상이 매장되어 있고, 브라질과 미국에 각각 9%정도 매장되어 있는 것으로 알려져 있다.

우리나라의 경우, 과거 한반도 전지역에 3,000여개의 금광이 분포되어 있었고, 평안북도의 운산광산은 40년 동안 약 80톤의 금을 생산하여 세계 3대 금광으로 선정될 만큼 세계적으로 금 산출국이었다. 그러나 현재는 확정 및 추정광량 중 가채광량의 고갈, 광산개발에 따른 환경적인 제약 및 경제성 문제, 투자자들의 광산개발에 대한 관심과 기대의 상실, 그리고 정부차원에서의 금 광산에 대한 적극적인 개발 및 자금지원의 부족 등의 여러 가지 요인으로 대부분의 금 광산이 휴광 및 폐광된 상태에 있다. 따라서 현재 우리나라의 금과 은의 확정 및 추정광량을 기준으로 볼 때 금·은 광석에 금은 약 40톤, 은은 약 1,530톤 정도로 함유되어 있어 금의 경우는 1~2년, 은은 약 4~5년 정도의 내수량에 불과한 것으로 집계하고 있다. 내수에 필요한 대부분의 금은 수입하거나 주로 구리, 아연, 납의 제련과정

에서 부산물로 회수되는 것으로 충당하고 있는 실정이다.

한편, 세계적인 금 생산의 중요한 부분을 차지하는 천연수 금광상이 우리나라 전남 해남 지역에 분포되어 있는 것으로 조사되었다. 그 중 은산 및 모이산에 금 광석의 매장량이 140만톤(500억원 규모)이 발견되어 현재 가행 중에 있다. 또한, 칼린형 금광상이 강원도 태백산 분지일대의 석회암에 배태될 가능성이 큰 것으로 기대되어 금·은의 매장량이 높아질 수 있을 것으로 예상된다.

금은 일반적으로 자연금(native gold) 상태로 산출되지만, pyrite와 arsenopyrite 및 pyrrhotite 등과 같은 황화광물, 실리케이트 광물, 탄산염광물, 산화광물에 함유된 텔레늄(Te), 안티몬(Sb), 셀레늄(Se) 성분과 화합물 형태로 다양하게 존재한다.

일반적으로 금을 회수하는 공정은 함금·은 광물을 단체분리하기 위해 파·분쇄한 후 비중선별 → 부유선별 → 이말감 → 침출 공정 등의 일련의 공정을 통해 회수하고 있다. 이들 공정 중 대량으로 광석을 처리하여 제련공정의 원료를 제공하는 선광공정이 전체적인 경제성에 큰 영향을 미친다. 또한, 선광공정은 자연금과 금 화합물, 함금 광물, 입도크기, 화학조성, 표면 오염정도

등의 광물학적인 특성과 이들 합금 광물의 비중 차이를 이용하여 선별하는 비중선별법 그리고 이들 합금 광물 표면의 물리화학적인 특성의 차이를 이용해 합금 광물을 회수하는 부유선별법에 의해 금·은의 실수율이 좌우된다고 볼 수 있다.

따라서 본고에서는 금·은 광석으로부터 금·은의 회수율 및 품위를 높이기 위한 선광 공정의 최적화를 위한 금·은 광석의 광물학적 특성 분석의 중요성, 제련 공정의 원료로 사용하는 금정광의 회수율 및 품위를 높이기 위한 선광기술에 대해 소개하고자 한다.

금·은 광석의 광물학적 특성 분석

자연계에서 금과 은은 합금을 잘 만들기 때문에 표 1과 2와 같이 다양한 종류의 금·은화합물을 형성한다. 자연에서는 주로 자연금(native gold)과 엘렉트럼(electrum)의 형태로 존재한다. 자연금은 그림 1과 같이 80~100%의 Au, 1~15%의 Ag, 0~5%의 Cu로 구성된 성분비를 갖는다. 엘렉트럼은 원칙적으로 금과 은 성분이 50 atom%로 함유된 합금(Au : Ag = 64.6 : 35.4)으로서 정의하지만 일반적으로 엘렉트럼이라는 것은 은이 많이 함유된 금·은의 합금을 일컫는다.

표 1. 주요 금 광물의 종류

광물명	화학식	Au(%)	비중	경도	형상	결정계	색
Native gold	Au	40~99	15.6~19.3	2.5~3	판상, 수지	등축	황금
Calaverite	AuTe ₂	39.5	9.24	2.5~3	괴상	단사	황동
Sylvanite	(Au, Ag)Te ₂	24.5	7.9~8.3	1.5~2	판상, 괴상	단사	회, 은백, 담황
Krennerite	AuTe ₂	39.5	8.62	2~3	주상	사방	은백, 담황
Petzite	Ag ₃ AuTe ₂	25.4	8.7~9.0	2.5~3	괴상	등축	암회
Nagyagite	Pb ₅ Au(Te, Sb) ₄ S ₅	6~13	7.41	1~1.5	판상	단사	암회

표 2. 주요 은 광물의 종류

광물명	화학식	Au(%)	비중	경도	형상	결정계	색
Native silver	Ag	72~100	10~12	2.5~3	수지, 침상, 입상	등축	은백
Hessite	Ag ₂ Te	31.4	8.3	2~3	-	등축	백
Petzite	Ag ₃ AuTe ₂	41.8	±9	2.5~3	-	등축	흑
Argentite	Ag ₂ S	87.1	7~7.4	2~2.5	-	등축	암회
Dyscrasite	Ag ₃ Sb	72~75	9.74	3.5~4	괴상	사방	은백
Polybasite	(Ag, Cu) ₁₆ Sb ₂ S ₁₁	64~72	±6	2~3	-	단사	철흑
Stephanite	Ag ₅ SbS ₄	68.4	±6.25	2~2.5	괴상	사방	회, 암회
Pyrargyrite	Ag ₃ SbS ₃	60.0	5.85	2.5	소괴	육방	암회
Prousite	Ag ₃ AsS ₃	65.4	5.57	2~2.5	소괴	육방	암회
Stromeyerite	AgCuS	53.1	6.3	2.5~3	괴상	사방	강회색
Cerargyrite	AgCl	75.2	5.56	2.5	-	등축	진주회, 담록회
Bromyrite	AgBr	57.4	±6	2.5	-	등축	황, 녹
Iodyrite	AgI	45.9	5.69	1.5	-	육방	황, 황녹

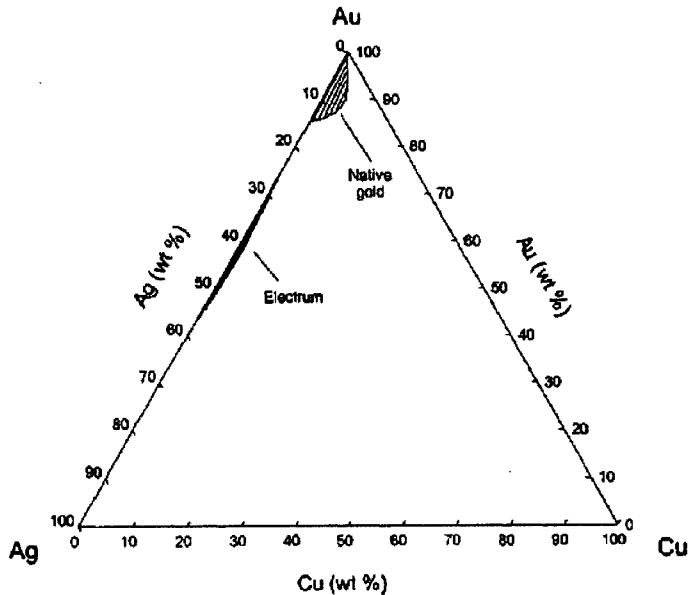


그림 1. Au-Ag-Cu 상태도.

금과 은 화합물은 자연금 및 엘렉트럼 이외에도 표 1과 2와 같이 다양한 종류의 화합물로 존재한다. 금·은 광석에 함유된 금의 함유량이 광석 톤당 5g 전후 밖에 되지 않아 금·은 광석은 거의 대부분이 맥석광물로 존재한다고 해도 무방하다. 따라서 이와 같이 미량으로 광석에 함유된 금을 회수하기 위해서는 사전에 금·은 광석에 존재하는 금·은 화합물의 종류 및 입도, 이들을 수반하고 광물의 종류 및 입도 등에 대해 정확히 규명하지 못하고서는 이들 합금 광물을 회수하기 위한 선광 방법 및 공정을 선택할 수 없다. 따라서 금·은 광석의 광물학적 특성을 규명하는 것이 금·은 광석의 선광의 방법과 공정을 결정하는 매우 중요한 과정이라고 볼 수 있다.

전술한 바와 같이 금·은을 효율적으로 회수하기 위해서는 사전에 금·은 광석에 대한 광물학적 특성을 규명하는 것이 매우 중요하다. 합금 광물의 종류 및 입도, 수반 광물이 파악되어야만 금의 회수율 및 품위를 높이기 위한 요소 선별 기술이 선택되며, 이들 요소 선별 기술의 조합으로

전체적인 금·은 회수 공정이 설계되기 때문이다.

그림 2와 3과 같이 금·은 광산의 지질학적 조사와 더불어 금·은 광석에 함유된 합금 광물의 조사, 수반 금속 및 비금속 광물의 조사, 각종 모암광물에 존재하는 금의 함유량, 금 및 합금 광물의 입도분포, 모암과 맥석 광물의 입도 분포, 광물 교대 여부, 금·은 광석의 조직 등이 금의 회수방법의 선택에 큰 영향을 미쳐 전체적인 금 회수 공정의 설계에도 영향을 미친다.

금·은 광석의 선광

다양한 형태의 광물들이 혼재한 광석에서 목적 광물(유용광물)들을 분리선별하는 기술은 각 광물의 고유의 물리적 성질의 차이를 이용하는 기술을 적용하는 것이 공정이 간단하고, 효과적이라 할 수 있다. 구성광물들은 각각 상이한 광물학적, 물리·화학적 특성을 갖고 있으므로 금·은 광석에서 합금 광물의 분리선별을 위해서는 이러한 구성 광

금·은 광석의 선광기술

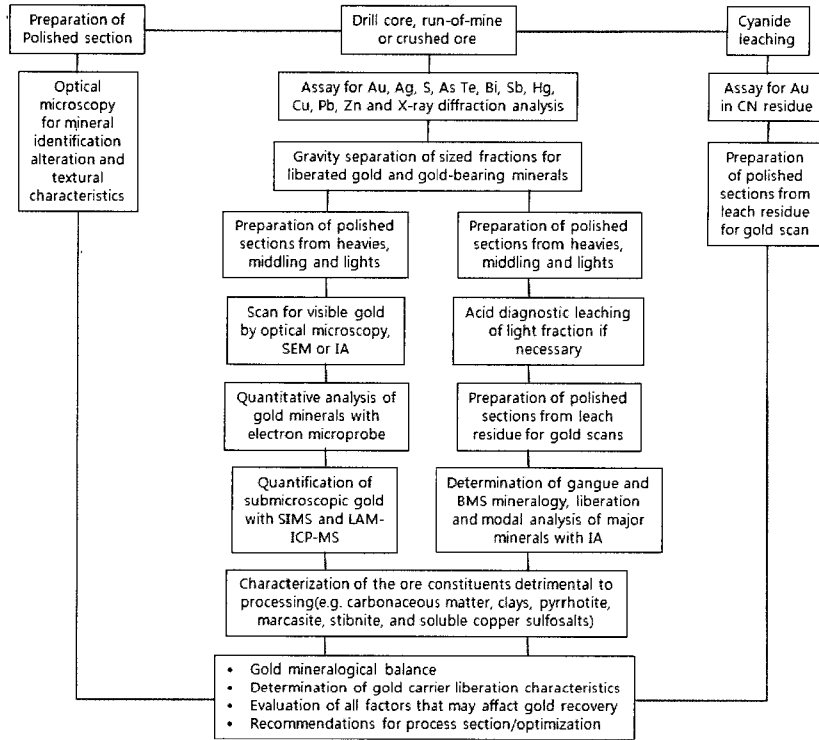


그림 2. 금·은 광석의 광물학적 특성 분석 방법.

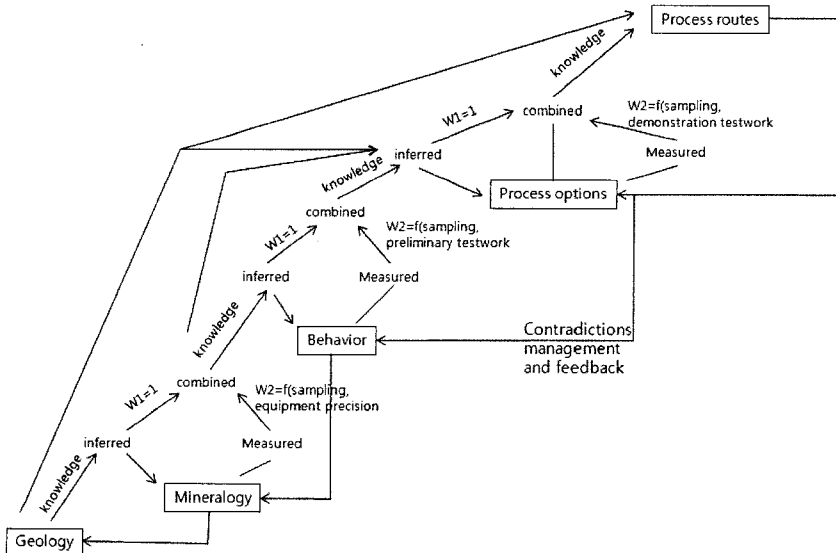


그림 3. 지질학적, 광물학적 특성 분석을 통한 금 회수 공정 설계 개념도.

광물들의 고유한 물성의 차이를 이용하는 기술이 바람직할 것으로 판단된다.

금·은 광석에 대한 선광 방법으로는 비중선별법과 부유선별법이 주로 사용되어 왔다. 그중 비중선별법은 사금이나 고품위 광석의 선별처리에 활용되고, 부유선별법은 광체를 구성하고 있는 광물들이 복잡하거나 중저 품위 광석의 선별 처리에 효과가 있다고 알려져 있다.

일반적으로 금을 포획하고 있는 합금 광물로는 유비철석(arsenopyrite), 섬아연석(sphalerite), 황철석(pyrite), 방연석(galena), 황동석(chalcopyrite) 등으로 보고되고 있는데, 이러한 광물들은 비중이 3.0이상으로 여타 비금속광물에 비하여 비중이 높은 특성을 나타낸다. 따라서 이러한 합금 광물을 농축시키기 위해서는 광물 고유의 비중차이를 이용하는 비중선별법을 적용하는 것이 가장 바람직할 것으로 판단된다.

비중선별법은 공정이 단순하여 여러 가지 선별법 중 가장 경제적이고 시약을 거의 사용하지 않고 물리적으로 선별하기 때문에 친환경적인 선별 방법이라고 할 수 있다. 그러나 비중선별은 선별 효율이 낮고 광물이 입자가 작아질 경우에는 비중의 차이를 이용하기 어려운 단점이 있다.

따라서 각 광물의 비중차이를 이용하지 않고 각 광물표면의 물리화학적 특성차이를 이용하는 부유선별법이 미립자의 분리/선별뿐만 아니라 유용광물의 실수율 및 품위를 높일 수 있는 현재까지의 최고의 선광기술이라고 볼 수 있다. 왜냐하면 부유선별법은 대부분의 합금 광물들의 광물표면이 소수성인데 반하여 맥석광물들은 친수성인 특성의 차이를 이용하여 분리효율을 높일 수 있기 때문이다.

파분쇄에 의한 단체분리

광물자원의 선별처리는 무용광물들로부터 유용

광물을 선별하는 광물 상호간의 분리작업이다. 선광 작업을 원활히 하기 위해서는 미리 광석 속에 함유된 유용광물과 무용광물을 쪼개서 별도의 입자로 나누어야 하는데 이러한 작업을 단체분리(liberation)라고 한다. 따라서 단체분리 조작은 주로 파분쇄를 통해서 제공되는데 선광을 하기 위한 선결조건이다. 그림 4와 같이 단체분리가 완전히 된 입자는 분리 입자(free particle)로 표현하고, 단체분리가 완전히 되지 못한 입자는 미분리 입자(locked particle)로 구분한다. 미분리된 입자가 많을수록 유용광물의 실수율 및 품위를 높이는데 한계성이 있으므로 가급적 미분쇄를 하여 분리 입자의 수를 증가시키는 것이 바람직하다. 그러나 미분쇄하게 되면 분쇄비가 상승되기 때문에 경제성을 고려한 적절한 입도범위 내에서 분쇄해야만 한다.

일반적으로 금속 광석의 파분쇄는 광석 속의 유용 광물의 입자들을 작게 분쇄하여 이들 유용 광물의 단체분리도를 향상시킴으로서 이들의 회수율을 높이는 것이 목적이다.

분쇄를 효과적이고 경제적으로 수행하기 위해서 큰 덩어리의 광석을 한꺼번에 목적하는 크기로 부수지 않고, 파쇄기로 대강의 크기까지 파쇄한 다음에 목적하는 크기 이상의 것만 골라 다시 잘게 분쇄하여 선별에 도움이 되는 적당한 크기로 만든다.

Gaudin의 실험 결과에 따르면 광석 속에서 적게 들어 있는 광물의 경우, 그 광물 결정립 자체를 상당한 정도로 단체 분리시키기 위해서는 상당히 잘게 분쇄해야한다. 그러나 많이 들어 있는 광물은 적게 들어 있는 광물 결정립의 크기보다 굵게 분쇄해도 단체분리가 상당히 될 수 있다. 즉, 많이 들어 있는 광물은 언제나 적게 들어 있는 광물보다 단체분리가 잘 된다고 한다.

표 3은 광석 속에 들어 있는 대로의 광물 결정의 크기와 파쇄되어 나온 광립의 크기비(K)와 많이 들어 있는 광물(A)과 적게 들어 있는 광물의 양(B)비(n)로서 많이 들어 있는 광물의 단체 분

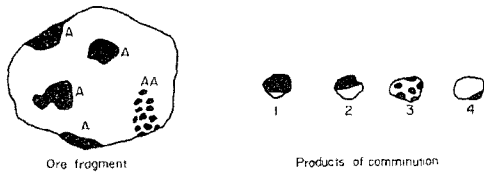


그림 4. 광석 입자의 단면.

리도(f_A)와 적게 들어 있는 광물의 단체 분리도(f_B)를 나타낸 것이다. 여기서 단체 분리도(degree of liberation)는 한 광석 속에 들어 있는 광물이 단체 분리되어 나온 백분율을 의미한다.

표 3에서 알 수 있는 바와 같이 n 값이 100일 경우, 즉 유용광물의 양이 약 99%이상 함유된 경우에는 원래 유용광물의 결정립 보다 1/16 작게 입자를 축소하여도 단체분리도가 99.9%에 도달하는 것을 알 수 있다. 그러나 n 값이 1일 경우 즉, 유용광물이 50%이하로 함유된 경우에는 유용광물의 결정립의 1/64로 입자를 축소하여도 단체분리도가 95.5%정도 밖에 이루어 지지 않는다. 이것은 유용광물의 실수율을 95.5%이상 높일 수 없다는 것으로 의미한다.

한편, 금·은 광석의 입장에서 보면, 금·은 광석에 금·은이 ppm 단위로 적게 함유되어 있기 때문에 금·은 광석은 거의 맥석광물로만 구성되어 있다고 볼 수 있다. 결과적으로 금·은 광석에

함유된 native gold, electrum, 합금 광물의 결정립의 크기에 의해서 이들 광물을 단체로 분리하기 위한 최소한의 입도가 결정되기 때문에 적정 수준의 단체분리가 이루어지는 입도까지 분쇄해야 할 것이다.

그림 5는 해남 지역의 모이산 광산의 금은 광석을 선광처리하여 얻어진 정광에 함유된 금·은 광물의 존재상태를 보인 것이다. 금·은 광물의 종류도 다양하고 결정립의 다양한 크기로 다른 수반광물과 물리적으로 맞물려 분포되어 있는 것을 볼 수 있다.

따라서 표 3과 같이 각종 합금 광물의 단체분리도가 금의 최대 실수율을 결정하는 의미를 갖는다고 볼 수 있기 때문에 금·은 광석의 경우도 합금 광물의 광물학적인 특성을 파악하여 적절한 파분쇄에 의해 단체분리도를 향상시키고 비중선별 및 부유선별에 의해 실수율을 향상시키는 방법을 강구하는 것이 전체적인 경제성을 좌우할 것으로 판단된다.

비중선별

금 광석에는 합금 광물과 비금속광물인 맥석광

표 3. 광물의 단체 분리도 비교

K	f_B %	f_A %						
		n=1	n=2	n=4	n=10	n=25	n=100	n=1,000
0.10	0	0	0	0	0	0	0	77.0
0.25	0	0	0	0	0	0	56.0	95.5
0.5	0	0	0	0	0	44.0	86.0	98.6
1.0	0	0	0	0	50.0	80.0	95.0	99.5
2.0	12.5	12.5	31.3	53.1	80.0	92.0	97.9	99.8
4.0	42.2	42.2	63.3	78.6	91.2	96.6	99.1	100.0
8.0	66.9	66.9	81.3	89.9	95.9	98.5	99.6	100.0
16.0	82.4	82.4	90.6	95.3	97.9	99.4	99.9	100.0
32.0	90.9	90.9	95.4	97.6	99.1	99.9	100.0	100.0
64.0	95.5	95.5	97.6	99.0	99.8	100.0	100.0	100.0

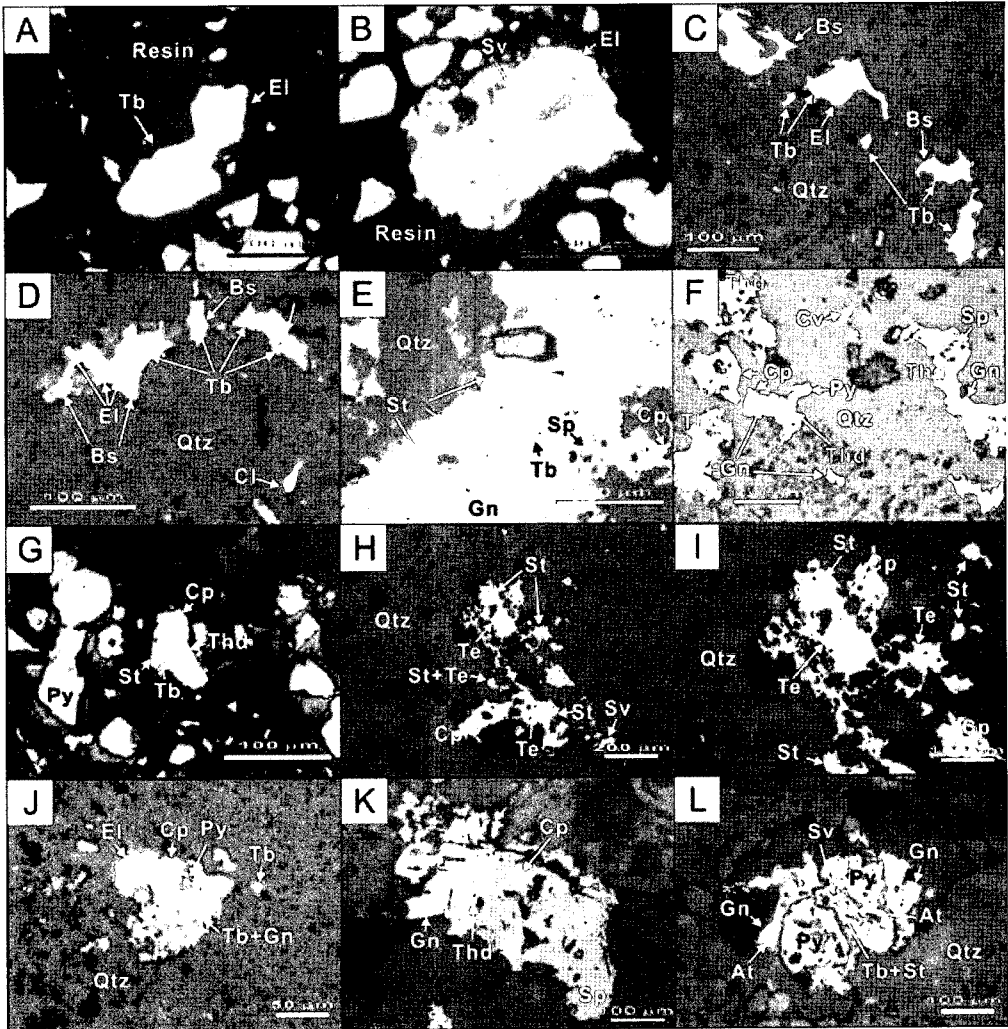


그림 5. 국내 모이산 금 광산의 선광공정에서 회수한 정광의 박편 사진 (고상모 외, 2009).

물이 혼재되어 있는데, 일반적으로 함금 광물들은 비중이 5.0이상, 비금속광물은 3.0이하로 두 광물들은 상당한 비중차이를 갖고 있으므로, 이러한 비중차이를 이용하는 선별기술은 함금 광물들을 분리선별하는데 있어서 유용한 방법이다.

비중선별 기술은 입자의 비중 차이를 이용하여 분리하는 기술로서, 비중이 다른 입자를 유체 중에서 중력, 수류 등의 외력을 작용시키면 비중 차이에 의하여 서로 다른 운동을 하게 되는데, 이 원리를 이용하여 각 입자들을 분리하는 방법

이다. 이 방법은 대량처리가 가능하고, 운전비용이 저렴한 장점이 있어 광물의 선별분야에서 널리 이용되어 왔다. 최근에는 비중선별의 효율 향상과 처리할 수 있는 입자크기의 범위 확대에 인하여, 각 분야로의 적용범위가 확대되고 있다. 비중선별로 처리가 가능한 비중의 차이는 다음 식에서와 같이 선별도 지수가 2.5이상 되어야 하지만, 최근에는 선광 장비의 발달로 1.25 정도만 되어도 분리가 가능한 것으로 알려져 있기 때문에 비중선별의 적용범위는 그만큼 확대되고 있다.

$$\text{선별도 지수} = \frac{D_h - D_f}{D_l - D_f}$$

여기서, D_h : 중광물의 비중
 D_l : 경광물의 비중
 D_f : 매질의 비중

비중선별에는 풍력선별과, 지그(jig)선별, 박류선별(flowing film separation), 중액선별 기술 등이 있다.

풍력선별은 물을 사용하지 않으므로 폐수처리 및 건조가 불필요하다는 장점이 있으나, 에너지 소비량이 많고 선별효율이 좋지 않은 단점이 있다.

지그선별은 공기 또는 수중에서 광물입자를 상하방향으로 맥동시켜 비중이 큰 광물입자를 하부로, 비중이 작은 광물입자를 상부로 이동시켜 층을 형성함으로써 광물입자의 비중차이를 이용하여 분리하는 방법이다.

박류선별은 그림 6과 같은 원리로서, 요동 테이블(shaking table)선별과 나선형(spiral)선별을 들 수 있는데, 테이블 선별은 지그선별처럼 대량 처리는 불가능하나, 선별 효율이 높은 특징을 가지고 있다. 테이블 선별법은 약간 경사진 테이블(평판)에 시료를 공급하고 테이블을 진동시키면서 물을 흘러내려 주면 비중이 높은 광물입자는 진동방향으로, 비중이 낮은 광물입자는 수류방향

으로 운동을 하게 됨으로써 광물을 분리하는 방법이다. 나선형 선별기에서의 광물입자의 분리는 나선형으로 감겨진 통 안을 광물입자들이 물과 함께 회전하면서 내려갈 때 광물입자들은 중력에 의한 수류의 영향과 원심력을 받게 되는데, 이중 비중이 크고 미세한 입자는 원심력보다 중력에 의한 수류의 영향을 더 많이 받아 홈통의 안쪽으로 흐르게 되고, 비중이 작고 큰 입자들은 수류보다 원심력의 영향이 더 크게 받으므로 홈통의 외부를 따라 내려옴으로서 비중차이에 의하여 광물을 분리하는 방법이다.

또한, 중액선별은 비중이 큰 광물입자와 비중이 작은 광물입자가 혼합되어 있는 경우, 두 광물입자의 중간정도 되는 비중액을 사용하여 이 액 중에 광물을 투입하면 비중이 큰 광물입자는 가라앉게 되고, 비중이 적은 입자는 부유하게 된다. 이 원리를 이용하여 광물을 분리하는 방법으로 비중액으로는 다올레액, 브롬포름, 요드화메틸렌, 클레리시액 등이 사용되고 있다.

부유선별의 원리

부유선별은 광물의 물리·화학적 성질의 차이를 이용하는 선별방법으로, 표 4에서와 같이 광물의 표면이 가지는 고유한 성질의 차이를 이용하여

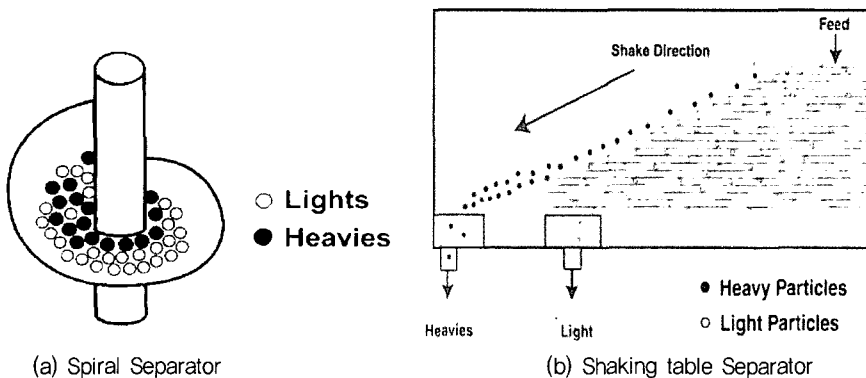


그림 6. 비중 선별 방법 모식도

표 4. 각종 광물의 표면 특성

유형	광물	표면특성	포수제
① 비극성, 비금속광물	흑연, 황, 활석 역청탄	강소수성	석유, 기포제등
② 중금속황화물, 자연금속	황동광, 방연광, 황철광, 섬아연광, 휘수연광 및 휘창연광등과 금, 은, 백금	약소수성	xanthate류
③ 산화중금속광물	구리, 납, 아연의 탄산염 혹은 황산염	비소수성	xanthate 염류 혹은 지방산
④ 알칼리 토금속류의 극성형광물	회중석, 인회석, 방해석, 형석 등	비소수성	지방산과 그 염
⑤ 산화광물, 규산염광물	석탄, 강옥, 주석, 장식등	비소수성	지방산과 양이온 포수제
⑥ 수용성광물	석고 등	비소수성	양이온 포수제

비중과 관계없이 특정 광물들은 물위에 부유시키고, 나머지 광물들은 물 속에 남겨둠으로써 분리하는 선별법으로 물에 대한 광물표면의 습윤도(wettability) 차이를 이용하는 것이다.

부유선별의 원리는 그림 7과 같이, 소수성 광물은 물에 젖기 어려우며 기체나 기름 등과는 친화성을 갖고 있기 때문에 부유성을 나타내지만, 친수성 광물은 물에 젖기 쉬워서 물속에 잔류함으로써 부유되기 어려운 특성을 이용하는 것이다. 실제의 부유선별에 있어서는 광물이 본래 가지고 있는 부유도만을 이용하지 않고 포수제, 기포제, 조건제, 조절제 등의 부선시약을 사용하거나, 가열, 배소 등의 예비처리를 통하여 광물

본래의 친수성 또는 소수성을 인위적으로 필요에 따라 변화시켜 선별하게 되는데 각 광물들의 자연부유도 차이는 그림 8과 같다.

금 광석 중의 함금 광물은 대부분 물을 흡착하기 어려운 소수성 광물로서 이 광물들은 공기(기포)와 친화성을 갖고 있으며, 맥석광물은 대부분 친수성 광물들이기 때문에 부유선별법의 적용도 가능할 것으로 판단된다. 즉 구성광물의 습윤도 차이를 이용하여 파·분쇄에 의하여 함금 광물과 맥석광물이 단체분리된 시료를 물과 함께 부선기 내에 투입하고 파인 오일(pine oil)과 같은 기포제를 첨가한 후 공기를 주입시키면서 교반해 주면 많은 기포가 발생된다. 이때 함금 광물 입자

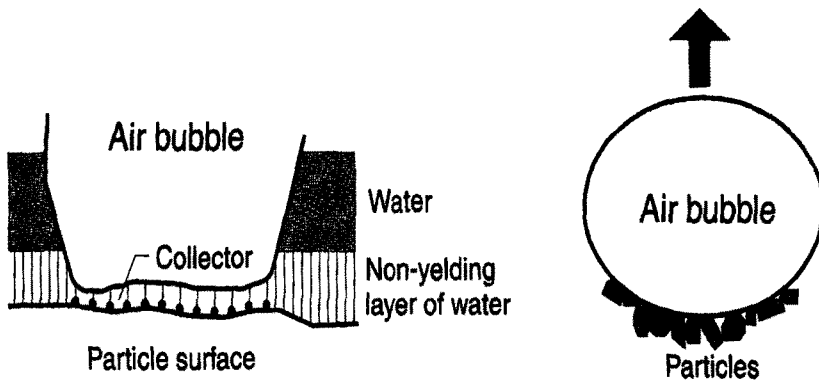


그림 7. 부유선별 원리 모식도

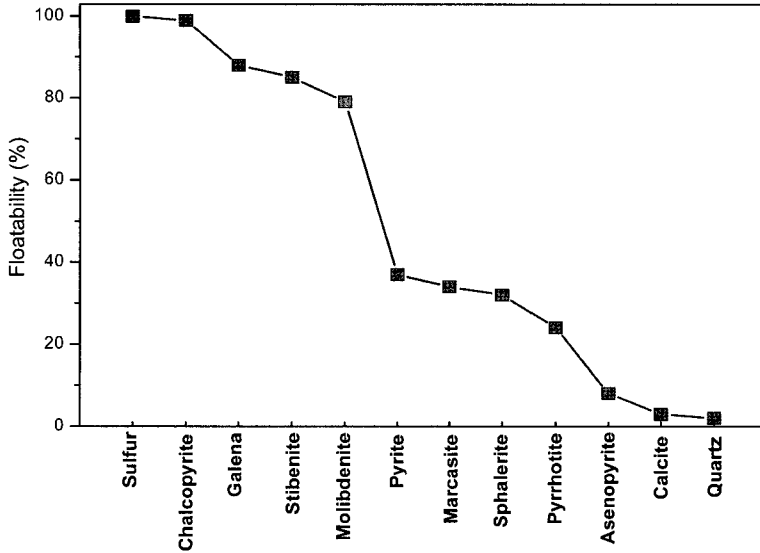


그림 8. 각종 광물들의 자연 부유도.

들은 기포와 친화성을 갖기 때문에 기포에 붙어서 부유하게 되며, 기타의 맥석광물 입자들은 친수성을 갖고 있기 때문에 물속에 남게 된다. 이때 잔세이트(xanthate)나 에어로플로트(aerofloat)와 같은 포수제를 첨가하면 부유 작용이 촉진되게 된다.

합금 광물들의 부유선별 특성을 살펴보면, 황화광물의 경우에는 사용되는 포수제(collector)는 대부분의 경우, 황을 교량원소(bridging element)로 하는 sulfhydryl 계통이다. 이것은 이들 포수제가 황화물 표면에 흡착할 때 물리적 흡착보다는 화학적인 흡착이 더 중요함을 말해 주는 것이다. 포수제중에서 디티오카본산염(dithiocarbonate)은 황화광물에 가장 많이 이용되며, 일반적으로 잔테이트(xanthate)로 알려져 있다.

금·은 광석의 부유선별

금·은 광석은 표 5와 같이 합금·은 광물의 종류 및 수반형태, 금·은을 함유한 황화광물의 종

류, 맥석 광물의 종류에 따라 부유선별의 효율성이 좌우될 수 있다.

일반적으로 금·은 광석으로부터 금·은의 회수 방법은 일련의 파·분쇄 → 비중선별 → 부유선별 → 아말감 → 침출 공정을 통하여 이루어진다. 이와 같이 금·은을 회수하는 공정은 선광공정과 제련공정으로 구분할 수 있다. 선광공정은 제련 공정에서 금을 회수하기에 적합한 품질의 정광을 공급하는데 목적이 있다. 선광기술중에서 가장 중요한 부유선별 기술은 물리적 요인과 화학적인 요인에 의해서 부선 효율이 달라질 수 있다.

물리적 요인

입도, 포말 크기(bubble size), 온도, 광액 농도(pulp density), 공기 주입, 교반속도, 부선조에서의 정체시간 등과 같은 수많은 물리적인 요인들이 금 광석의 부유선별에 영향을 미친다.

입자 크기

합금 광물과 맥석이 혼합된 광석의 부유선별에

표 5. 금·은 광물의 부선 형태

Ore type	Forms of gold possibly present	Major sulphide minerals possibly present and possibly host for gold	Problem minerals possibly present
Unconsolidated placers (alluvial and eluvial)	Native	Nil	Clays
Oxidized and weathered(usually near-surface)	Native coated	Nil	Pyrophyllite Other clays
Gold-pyrite	Native Invisible Other	Pyrite Arsenopyrite Pyrrhotite	Gold-free pyrite
Gold-telluride-pyrite	Native Invisible Other	Pyrite Arsenopyrite Pyrrhotite	Gold-free pyrite
Single base metal sulfide(Cu, Sb, Bi)	Native Invisible Other	Chalcopyrite Bornite Stibnite Bismuthinite Pyrite	Gold-free pyrite and/or gold-containing pyrite
Polymetallic sulfide (Cu-Pb-Zn-pyrite)	Native Invisible Other	Chalcopyrite Galena Sphalerite Pyrite	Gold-containing pyrite
Oxidized base metal (Cu, Pb)	Native coated	Nil	Chrysocolla Clays Jarosites
Uranium-gold	Native Uraniferous kerogen	Pyrite Arsenopyrite	Carbonaceous matter
Carbonaceous	Native Carbon-gold associations	Pyrite	Carbonaceous matter

서는 금의 입도가 큰 영향을 미친다. 금입자를 부선에 의해 효과적으로 회수할 수 있는 적절한 입도는 20~200 μ m의 영역이다. 20 μ m이하의 입자는 맥석 광물과 함께 부유되기 때문에 금 광물에 대한 선택성을 감소시키며, 200 μ m이상의 금 입자는 무게가 매우 높아 미세한 입자보다 늦게 부유되고 포수제가 많이 필요하기 때문에 부선효율이 감소된다.

온도

온도를 50 $^{\circ}$ C까지 상승시키면 광액의 점도가 감소되어 금의 회수율 및 품위가 향상된다. 그러나

온도가 60 $^{\circ}$ C이상으로 높아지면 함금 광물표면에 흡착된 포수제가 탈착되기 때문에 부유선별 효과가 감소된다. 온도의 조절이 필요한 시기는 겨울철로 보통 25 $^{\circ}$ C이상으로 유지시켜 부선해야 한다.

체류 시간

부유선별은 연속적으로 처리하는 공정이기 때문에 부선조의 광액의 잔류시간을 적절하게 조절하는 것이 매우 중요하다. 금과 황철석을 부선할 때에는 미세한 광석 및 광미를 처리하는 것보다 조립질로 분쇄된 광석을 처리하는 것이 부선효율이 좋다. 따라서 조립질로 분쇄된 광석을 부선할

경우에는 체류시간은 더 짧게 하고, 정선 단계는 더 줄여야만 한다. 이때 광액의 농도는 일반적으로 30~40%를 유지한다.

화학적인 요인

부유선별에 있어 중요한 화학적인 영향은 부선 시약의 종류(포수제, 기포제, 활성제, 억제제, 증진제)와 pH이다. 최근의 부선과 관련된 연구는 넓은 pH 범위에서 안정하고, 복합광 및 광미의 부선흐율을 증진시키고, 값이 저렴하며, 포수제를 혼합사용하여 금의 실수율을 향상시키는 부선시약의 개발에 주력하고 있다. pH 및 각종 시약이 각종 함유 광물의 부유선별에 미치는 영향을 조사한 결과는 다음과 같다.

포수제(Collector)

순수한 자연금의 표면은 친수성이지만, 보통 자연에서 유기물에 오염되어 소수성을 갖는다. 적당히 오염된 금은 기포제만으로도 부유시켜 선별할 수 있다. 그러나 금의 실수율을 더욱 높이기 위해서는 xanthate에 다른 포수제를 혼합하여 사용한다. 이때 금의 실수율은 sulphide ion에 의해 활성화 되어 높아지고 ferric ion에 억제되어 낮아진다. 또한 양이온 포수제인 아민류의 포수제를 금을 회수하는데 산업적으로 사용되고 있다. 금을 함유한 황철석은 alkoxy 또는 phenoxy carbonyl alkyl thionocarbamates 및 thioureas, dialkyl 또는 diaryl monothiophosphates 및 monothiophosphinates, glyoxalidine와 aminothiohenols 등의 포수제에 의해 부선이 잘되는 것으로 알려졌다.

Gold telluride는 기포제만으로도 선별이 가능하다. 혼합 포수제를 사용하게 되면 목적 광물 이외의 다른 황화광물도 수반되어 부유된다.

Aurostibite의 부유선별에 관한 연구결과는 거의 없지만 휘안석(stibnite)과 비슷한 부유선별 특성을 갖는다고 보고 있다. Stibnite는 쉽게 부유되지 않아 이들의 실수율을 높이기 위해서는 활성화제의 사용이 필요하다. 활성화제가 없이 부유할 수 있는 경우도 있으나, 그러한 경우에는 포수제의 사용량이 많아지고 산성과 중성의 pH에서만 부유되는 것으로 알려져 있다.

Kerogen은 함우라늄 탄산염암 광물로 금의 함유량이 300g/t이상이고 부유 선별에 의해 30%정도 회수할 수 있다. 금의 실수율을 높이기 위해서 분산제와 kerosene 포수제를 사용했다는 보고가 있다. Fuel oil이 기포제와 함께 사용되었을 때 금광석내의 탄소성분이, 활성화 되어 부유가 더 잘된다고 알려져 있다.

황철석은 표면이 산화되었을 때 소수성을 갖는 것으로 알려져 있다. 그럼에도 불구하고 황철석의 부선에서는 thiol계 포수제가 가장 많이 사용된다. 모든 thiol 계 포수제는 약 pH 4정도에서 부선흐효과가 좋지만, 이 pH에서는 xanthate가 불안정하기 때문에 주로 알칼리 영역의 pH에서 가장 넓게 사용된다. 또한, 황철석의 부선에서는 mercaptobenzothiazoles와 dithiophosph -ate 계 포수제가 많이 사용되고 있다.

유비철석은 황철석과 매우 비슷한 부유선별 특성을 갖고 있다.

자류철석는 산성 및 자연 pH 범위에서 부유선별이 잘 되는 특성을 보인다. 알칼리 영역에서는 실수율이 낮다. 보통 황철석의 부유선별에 사용되는 포수제를 주로 사용한다.

부유선별에서 회수율을 높이기 위한 방법으로는 초기에 약한 포수제를 첨가하여 광물 표면의 강한 site에 포수제를 흡착시켜 부선하고, 다음 단계에서 강한 포수제를 사용하여 약한 site에 흡착시켜 부선한다. 일반적으로 dithiophosphate 계 포수제가 금 부유선별에서 가장 널리 쓰이는 물질이다.

기포제(Frother)

Free gold를 부유선별할 경우에 가장 중요한 것은 기포의 강도와 안정성이다. 대부분의 금 부유선별에서는 다른 기포제와 결합할 수 있는 polyglycol-ether를 기초로 한 기포제들이 선호되어진다. 함금 구리 광석의 부선에서는 MIBC와 같은 약한 기포제가 사용된다.

활성제(Activators)

금 부유선별에서 사용되는 활성제는 가용성의 금속염으로서 이들은 용해되면 광물 표면에 금속 이온이 흡착되어 광물 표면의 화학적 성질을 변화시킨다. 이러한 방법으로 부선하게 되면 부선할 수 있는 pH의 범위가 넓어져 함금 광물의 실수율과 선택성을 증진시킬 수 있다. 금을 함유한 황철석의 활성제로는 황산구리($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)가 주로 사용된다. 또한, 황산구리는 금, telluride, 휘안석, 자류철석과 유비철석 등의 품위와 실수율을 향상시킨다.

황철석과 지류철석의 표면에서 구리의 흡착은 pH의 영향을 많이 받는데 알칼리 조건에서는 적은 양의 흡착이 일어난다. 황산구리의 침전물이 형성되지 않는 조건에서 xanthate를 첨가하면 자류철석에 흡착하는 구리이온의 양은 증가하지만 황철석에 흡착하는 구리의 양은 감소한다. 황화구리는 기포의 안정성에 영향을 미치기 때문에 적당히 사용해야 한다. 황산구리를 너무 적게 첨가하게 되면 슬라임의 부유량이 많아지고, 너무 많이 첨가하게 되면 포말을 불안정하게 만든다. 보통 stibnite를 활성화시킬 경우에는 황산구리보다는 황산납(PbSO_4) 및 질산납 [$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$]을 선호하여 사용한다.

억제제(Depressant)

Guar gums, starch 그리고 carboxymethylcellu-

lose와 같은 억제제들은 금 부유선별에서 활석, 카본 함유 물질, 철산화물, 망간 슬라임, 납석, 탄산염 광물의 부유성을 억제시키기 위해 사용된다. 적절한 억제제를 선택하고 사용량도 조절해야 한다. 왜냐하면 과도하게 사용하였을 때 free gold와 금을 함유한 황화광물까지도 억제시켜 금의 손실을 초래할 수 있기 때문이다. 그리고 황철석의 부유선별에서는 포수제와 억제제를 적절히 사용하는 것이 매우 중요하다. 예를 들면 guar gum와 mercaptobenzothiazole과 함께 사용하게 되면 xanthate와 사용했을 때 반대의 부선효과를 보인다. 소량의 기포제를 광액에 보조적으로 첨가하면 납석과 같은 활석질의 광물이 조선조에서 먼저 부유된 후에 황화광물이 더욱 농축되면서 부유된다. 타닉산(tannic acid)는 녹니석을 억제시키는데 상당한 효과를 보인다. 탄산염 광물이 정광에 함유되어 있으면 downstream bio-oxidation process에서 침출에 적절한 pH를 유지시키기 위해서 연속적으로 산을 공급해야하기 때문에 공정상의 문제가 발생된다. lignin sulphonate는 탄산염 광물에 억제 효과를 보인다.

pH

부유선별에서는 pH의 조절이 가장 중요하다. 황철석의 제타전위(zeta-potential)는 pH에 의해서도 변화되지만, 황철석 표면의 산화정도에 따라 황철석 표면에 황에서부터 산화철까지 생성될 수 있기 때문에 이러한 표면에서 생성물의 종류 및 양에 따라 제타전위가 변화될 수 있다. 따라서 pH를 정밀하게 조절하기가 어렵기 때문에 포수제는 pH 변화에 민감하지 않은 것을 사용하는 것이 바람직하다.

Eh 및 황화제

황화광물의 부선에 있어서 pH 변화에 따른 Eh 값의 역할 또한 매우 중요하다. Eh 값은 목적광

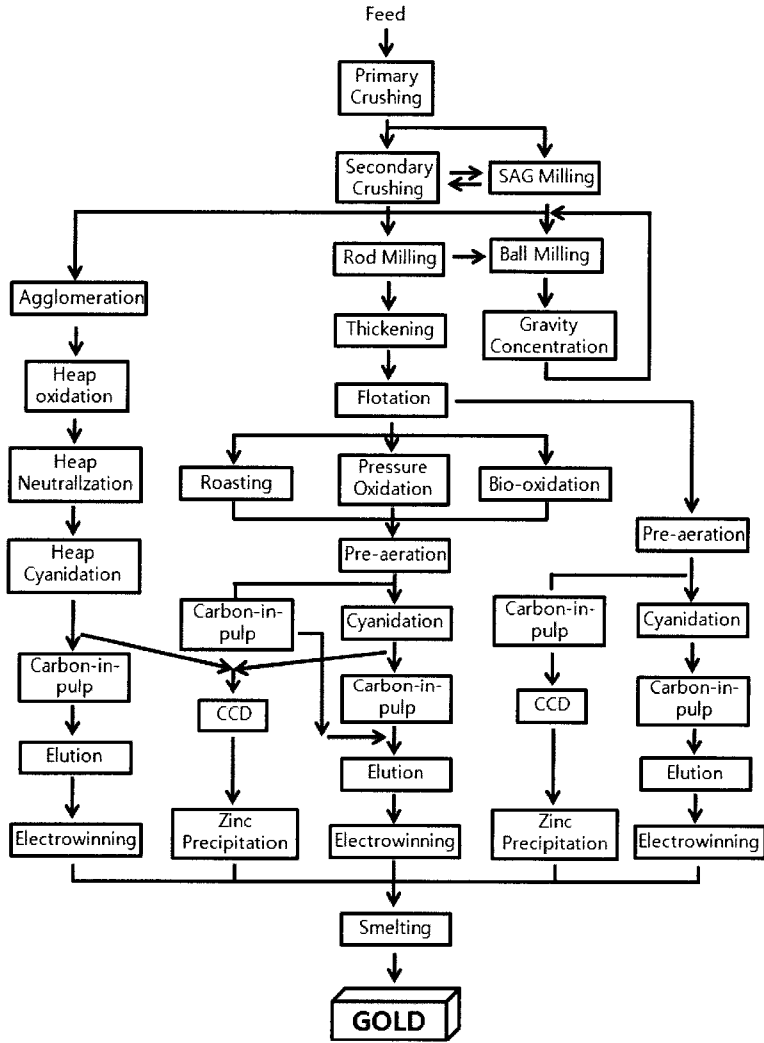


그림 9. 금 광석으로부터 금 회수를 위한 공정도.

물의 회수율 및 부유율, 용액의 상태 및 광물의 표면화학적 분석과 같은 정보와 연계시켜 매우 유용하게 사용할 수 있다. 그러한 정보를 활용하여 새로운 사실에 대해 규명하고, 목적광물의 실수율을 향상시킬 수 있도록 부선 방법을 계획하고 개선할 수 있게 한다. 황화제를 사용하여 목적광물의 표면을 개질하는 방법은 함금 구리 광석에서 황화광물의 전체적인 회수율을 개선하는데 성공적으로 이용되고 있다.

금·은 회수 선광공정 및 제련공정

그림 9는 금 광석에서 함금 광물의 종류 및 수반상태 및 입도 등에 따라서 다양한 방법의 선광공정 및 제련 공정을 제안할 수 있음을 보여주는 개략적인 공정도를 보인 것이다.

금광석에 금이 자연금 및 엘렉트럼 형태의 큰 입자로 존재하게 되면 파분쇄 공정에서 이들을 단체분리시킨 후 비중선별을 통해서 바로 제련소의

smelting 공정의 원료로 바로 사용할 수 있다.

그러나 금·은의 품위가 낮고, 함금 광물의 입자가 작으며, 금과 은을 함유하고 있는 물질이 복합광으로 존재할 경우에는 단계적으로 파분쇄한 후 부유선별하여 정광을 회수한 후 이들 정광을 다시 산침출이 용이하도록 roasting, pressure oxidation, bio-oxidation 처리한 후 일련의 carbon-in-pulp 공정 → cyanidation 공정 → electrowinning 공정을 거쳐 최종적으로 smelting 공정에서 금을 회수한다.

따라서 선광공정 및 제련 공정의 선택은 함금 광물의 종류와 입도 및 광물학적 특성, 그리고 선광공정에서 산출되는 정광 및 광미의 특성에 따라 제련방법 또한 차별화될 수 있음을 보여 주고 있다.

결 언

금·은은 일반적으로 자연금(native gold) 상태로 산출되지만, pyrite와 arsenopyrite 및 pyrrhotite 등과 같은 황화광물, 실리케이트 광물, 탄산염광물, 산화광물에 함유된 텔레늄(Te), 안티몬(Sb), 셀레늄(Se) 성분과 화합물 형태로 다양하게 존재한다. 따라서 금을 효율적으로 회수하기 위해서는 사전에 금·은 광석에 관한 광물학적 특성을 조사하여 함금 광물의 상태를 규명하는 것이 매우 중요하다. 왜냐하면 함금 광물의 종류 및 입도, 수반 광물이 파악되어야만 금의 회수율 및 품위를 높이기 위한 요소 선별 기술이 선택되며, 이들 요소 선별 기술의 조합으로 전체적인 금 회수 공정이 설계되기 때문이다.

선광은 무용광물들로부터 유용광물을 선별하는 광물 상호간의 분리작업이다. 선광 작업을 원활히 하기 위해서는 미리 광석 속에 함유된 유용광물과 무용광물을 쪼개서 별도의 입자로 나누어야 하는데 이러한 작업을 단체분리(liberation)라고 한다. 이러한 단체분리 조작은 주로 파·분쇄를

통해서 제공되는데 선광을 하기 위한 선결조건이다.

금·은 광석에 대한 선광 방법으로는 비중선별법과 부유선별법이 주로 사용되어 왔다. 그중 비중선별법은 사금이나 고품위 광석의 선별처리에 활용되고, 부유선별법은 광체를 구성하고 있는 광물들이 복잡하거나 중저 품위 광석의 선별 처리에 효과가 있다고 알려져 있다.

비중선별법은 공정이 단순하여 여러 가지 선별법 중 가장 경제적이고 시약을 거의 사용하지 않고 물리적으로 선별하기 때문에 친환경적인 선별 방법이라고 할 수 있지만, 선별효율이 낮고 광물이 입자가 작아질 경우에는 비중의 차이를 이용하기 어려운 단점이 있다. 그러나 부유선별법은 구성광물의 비중차이를 이용하지 않고 각 광물표면의 물리화학적 특성차이를 이용하기 때문에 미립자의 분리/선별뿐만 아니라 유용광물의 실수율 및 품위를 높일 수 있는 현재까지의 최고의 선광기술이다.

부유선별에서 부선흡율은 물리적 요인과 화학적인 요인에 의해서 달라질 수 있다. 화학적으로는 부선탄의 종류(포수제, 기포제, 활성제, 억제제, 증진제)와 pH에 영향을 받기 때문에 넓은 pH 범위에서 안정하고, 복합광 및 광미의 부선흡율을 증진시키며, 값이 저렴하고, 포수제들을 혼합사용할 때 금·은의 실수율을 높일 수 있는 부선탄의 개발이 필요하다. 물리적으로는 입도, 포말 크기(bubble size), 온도, 광액 농도(pulp density), 공기주입속도 및 양, 교반속도, 부선조 내에서 광액의 정체시간 등과 같은 수많은 요인들에 의해서 영향을 받는다. 따라서 부유선별에 영향을 미치는 제반 조건을 고려하여 선광공정을 설계하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

참고문헌

고상모 외 (2009) 해남 천열수 금 광화대 및 열

- 수변질 점토광화대 확보를 위한 전주기 기술개발. 한국지질자원연구원 연구보고서, GP2009-003-2009(1).
- 김준수, 황덕환 (2003) 한국의 금광산 및 광산 현황. 한국지질자원연구원 연구보고서.
- 이강문 (1979) 광물처리공학. 반도출판사.
- 富田堅二 (1966) 工業原料鑛物 選鑛便覽, 共立出版株式會社.
- O'connor, C.T., and DUNNE, R.C. (1994) The flotation of gold bearing ores - A review. *Minerals Engineering*, 7, 839-849.
- O'connor, C.T., and Dunne, R.C. (1994) The flotation of gold bearing ores - A review. *Minerals Engineering*, 7, 839-849.
- Sen, S., Seyrankaya, A., and Cilingir, Y. (2005) Coal-oil assisted flotation for the gold recovery. *Minerals Engineering*, 18, 1086-1092.
- Torres, V.M., Chaves A.P., and Meech, J.H. (1999) Process Design for golds: A diagnostic approach. *Minerals Engineering*, 12, 245-254.