



저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2011년 2월

석사학위논문

금광산 광미로부터 유가금속회수에
관한 연구

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

신 승 한

금광산 광미로부터 유가금속회수에 관한 연구

-A Study on Valuable Metal Recovery from Tailing of
Gold Mine-

2011년 2월 25일

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

신 승 한

금광산 광미로부터 유가금속회수에 관한 연구

지도교수 한 오 형

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2010년 10월

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

신 승 한

신승한의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 박 천 영 ㉠

위 원 조선대학교 교수 강 성 승 ㉠

위 원 조선대학교 교수 한 오 형 ㉠

2010년 11월

조선대학교 대학원

목 차-

List of tables	1
List of figures	2
Abstract	4
제1장 서론	6
제2장 이론적 배경	7
제1절 비중선별	8
제2절 부유선별	11
제3절 자력선별	18
제4절 생물학적 처리기술	22
제3장 시료 및 실험방법	25
제1절 시료	25
제2절 실험방법	27
제4장 원 시료	28
제1절 일반부선	28
1 광액농도에 따른 영향	28
2 기포제 종류에 따른 영향	29
3 기포제 첨가량에 따른 영향	30
4 포수제 종류에 따른 영향	31
5 포수제 첨가량에 따른 영향	32
제2절 Micro-bubble column 부선	33
제5장 입도조절	36
제1절 침강시간에 따른 영향	36

제2절 침강법을 통한 입도조절	38
제6장 입도조절 한 시료	43
제1절 일반부선	44
1 기포제 첨가량에 따른 영향	44
2 포수제 첨가량에 따른 영향	45
3 억제제 첨가량에 따른 영향	46
제2절 Micro-bubble column 부선	47
1 포수제 첨가량에 따른 영향	47
2 억제제 첨가량에 따른 영향	48
3 황화제 첨가량에 따른 영향	49
4 세척수량에 따른 영향	50
5 Air flow rate에 따른 영향	51
제7장 S.E.M & 원소별 mapping	52
제8장 자력선별 (magnetic separation)	55
제9장 결론	56
참고문헌	58

List of tables

Table 2-1 Results of Bartles-Mozley gravity separation for the mine wastes	9
Table 2-2 Result of flotation for the mine wastes	14
Table 2-3 Metal recovery by flotation	17
Table 2-4 Metal recovery by Magnetic separation	21
Table 2-5 Metal separation using Biological agents	24
Table 3-1 Result of chemical analysis for sample(%)	25
Table 3-2 Result of wet screen analysis for sample	26
Table 4-1 Micro-bubble column flotation experimental result of particle size distribution	34
Table 5-1 Effect of sedimentation time	36
Table 5-2 Result of Particle size analysis and component analysis on sedimentation time	39
Table 5-3 Result of micro-bubble column flotation of float product of timed sedimentation	40
Table 5-4 Results of batch flotation of sink materials of timed sedimentations	41
Table 5-5 Result of micro-bubble column flotation on 120 sec float product	41
Table 8-1 Effect of high gradient magnetic separation on magnetism	55

List of figures

Figure 2-1 Schematic view of Hand jig.	9
Figure 2-2 Basic jig construction	10
Figure 2-3 Batch froth flotation	12
Figure 2-4 Principles of froth flotation	12
Figure 2-5 Schematic view of column flotation	15
Figure 2-6 principles of Permroll magnetic separation	19
Figure 3-1 X-ray diffraction pattern of wet screen product	26
Figure 4-1 Effects of pulp density (%)	28
Figure 4-2 Effects of various kind of frother	29
Figure 4-3 Effects of frother dosage	30
Figure 4-4 Effects of various kind of collector	31
Figure 4-5 Effects of collector dosage	32
Figure 4-6 Overall view of micro-bubble Column flotation machine	33
Figure 4-7 Feeding tube on micro-bubble flotation column	35
Figure 4-8 Micro-bubble column flotation flow sheet	35
Figure 5-1 Experiment picture on sedimentation time	37
Figure 5-2 Product picture on sedimentation time	38
Figure 5-3 Flotation flow sheet of 120 sec sinkage material	40
Figure 5-4 Flotation flow sheet after applying the sedimentation	42
Figure 5-5 Concentrate and tailing on micro-bubble column flotation	42
Figure 6-1 Effects of frother dosage on +325 mesh material	44
Figure 6-2 Effects of collector dosage on +325 mesh material	45
Figure 6-3 Effects of depressant dosage on +325 mesh material	46
Figure 6-4 Effects of collector dosage on -325 mesh material	47
Figure 6-5 Effects of depressant dosage on -325 mesh material	48
Figure 6-6 Effects of activator dosage on -325 mesh material	49
Figure 6-7 Effects of wash water amount on -325 mesh material	50
Figure 6-8 Effects of air flow rate on -325 mesh material	51

Figure 7-1 Wet screen analysis by sieve, 100×140 mesh (×100)	53
Figure 7-2 Wet screen analysis by sieve, -500 mesh (×300)	54

Abstract

- A Study on Valuable Metal recovery from Tailing of Gold Mine -

By Shin, Seung Han

Adv. Prof. : Han, Oh Hyung

Dept. of Energy Resource Engineering

Graduate School, Chosun University

In Korea, the gold demand for industrial use is expected to increase. As of 2009 our country's total gold reserve is 5,691.8 thousand tons including both estimated and proven reserves. Domestic gold mining started in the middle of 1980 and was extracting its underground resources. Due to the worsened environment, rising labor costs and inexpensive foreign minerals imports, domestic gold mining has been slowing down and has gradually stopped. Small scale Moisan mine is running in Hae-nam area.

Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering(DSME) S.M.C is currently producing 300 kg of Gold and 2,500 kg of Silver annually. The factory is processing 160 tons of ores per day and extracting 150 ton of processing tailings. This company is planning to increase its operating capacity to 280 ton ores per day and the tailings quantity is expected to increase simultaneously. At present, part of tailings is dried using mine filter, but most of waste products are collected in tailings dam and a suitable, DSME S.M.C tailings analysis data shows that tailings contains 1.5~2.0 ppm gold and 10~15 ppm silver.

Therefore, this study was conducted using flotation method in order to develop technology for Au recovery in tailing. Batch flotation experiments were confirmed in this study, that by obtaining 21.31 ppm(Au grade) and 62.73% (Au

recovery) in the condition of K.A.X (97.2 g/ton), frother AF 65 (0.248 ℓ /ton) and depressant sodium silicate (4 kg/ton), it's possible to recover one of the most valuable metal Au, by re-feeding to rougher flotation. Also, Micro-bubble column flotation experiments were in this study, that by obtaining 14.17 ppm(Au grade) product with 87.75% recovery through optimal condition of K.A.X as collector (0.2 ℓ /ton), DF as Frother 250 (0.2 ml/ton), sodium silicate as depressant (2 kg/ton), wash water 630 ml/min and air flow rate of 960 ml/min.

제1장. 서론

금은 화학적 불활성으로 산 및 기타 약품에 침식되지 않으며 모든 금속 중에 전연성이 가장 뛰어나 전기, 통신기 부품, 특히 반도체 소자와 도금 등으로 수요가 크게 증가 하고 있다. 향후 우리나라의 금 수요는 공업용을 중심으로 더욱 증가 할 것으로 예상된다.

2009년 기준 확정광량과 추정광량을 합친 우리나라 금의 총 매장량은 5,691.8 천 톤으로 국내의 광산산업은 1980년대 중반에 들어서면서 부존 지하자원의 고갈과 점진적인 작업환경의 악화 및 노동 임금의 상승, 값싼 외국 지하자원의 수입 등으로 말미암아 점차 침체되기 시작 하여 국내 금광은 탐광단계에 있는 영세규모를 제외하고는 해남지역에서 가행하는 모이산 광산이 유일하다.¹⁾

대우조선해양(DSME) S.M.C는 현재 연간 300 kg의 금과 2,500 kg의 은을 생산하고 있는 가행 광산으로 160 ton/day을 처리하여 150 ton/day 이상의 광미가 발생되고 있으며, 향후 시설을 280 ton/day 이상 증설할 계획으로 광미 발생량도 증가할 것으로 예상된다. 현재는 광미의 일부를 건조 후 폐 갱도에 충전제로 사용하고 있으나, 대부분 광산폐기물 적치장에 방치하고 있어 이를 재활용 할 수 있는 소재개발이 시급한 실정이다.

대우조선해양 S.M.C의 광미를 한국 지질자원 연구원에서 성분 분석한 결과 금 1.5~2.0 ppm, 은 10~15 ppm 의 유가금속이 포함되어 있으며, 비료용으로 사용 가능한 정도로 중금속이 미량임을 확인하였다.

이와 같은 광미로부터 유가금속을 회수하는 기술로는 비중선별법, 부유선별법, 자력선별법, 생물학적 처리기술 등이 있으며 실제로 핀란드 Yhasalmi Mine은 구리, 아연 광산으로 광물찌꺼기를 부유선별법을 이용하여 유가금속 회수 및 유해 산성 침출수를 억제한 사례가 있다.

따라서, 본 연구에서는 재활용 소재로 사용되기 전 광미로부터 유가금속인 금,은의 회수를 목적으로 광미의 광물학적, 물리화학적 및 단체분리 특성을 확인하고, 여러 가지 부선조건의 변화(기포제, 포수제, 가황제 종류별, 첨가량 변화 등)를 통한 실험을 수행함으로써 광미로 폐기되는 유가금속의 회수율을 높일 수 있는 부유선별 기술을 개발하고자 한다

제2장. 이론적 배경

광산 개발로 인해 발생한 광물찌꺼기 및 오염토양을 처리하는 방법에는 일시적으로 격리시켜 저장하는 방법, 근원적인 오염원 제거를 위해 정화기술을 사용하는 방법, 기존의 광산 내부로 운반하여 충전 하는 방법, 재활용 기술을 이용하여 광물찌꺼기 중 잔류하는 미량의 중금속을 회수하여 오염원의 무해화/감량화하는 방법 및 별도 매립장으로 처분하는 방법 등이 있다.²⁾

대우조선해양 S.M.C 광산은 국내유일의 금 광산으로 부유선별법을 적용하여 광물을 처리하여 유가금속인 Au와 Ag를 회수하고 있다. 하지만 처리공정이 다 끝난 광미는 대부분 현장에 있는 광미덤에 적치하고 있으며 그 일부는 갱도 충전재로 사용하고 있다.

광미의 Au 품위는 평균 1.77 ppm으로 유가금속이 원광의 10% 정도로 확인되었다. 전체적으로 원광보다 품위가 낮은 광미를 재처리함으로써 유가금속을 회수하는 사례가 많이 있다. 그러나 대부분의 광산의 경우 처리해야 할 광미의 양이 많아 정화기술로 처리하기에는 경제적인 문제에 직면할 수 밖에 없다. 이에 따라 광미 중에 존재하는 유해한 미량의 중금속을 물리화학적 처리를 통해 유가금속을 회수함으로써 환경오염문제의 해결과 동시에 유가자원을 회수함을 목적으로 재활용 기술을 일부 적용하고 있다.²⁾

광미로부터 유가금속인 Au를 회수하는 기술로는 광물의 비중차이를 이용하여 Au와 맥석을 분리하는 기술인 비중선별법, 광물의 계면 화학적 성질의 차이를 이용한 부유선별법, 광물의 자성차이에 의한 선별법인 자력선별법, 미생물을 이용하여 유가금속을 회수하는 생물학적 처리기술 등이 있다. 실제로 핀란드 Pyhasalmi Mine은 구리, 아연 광산으로 광물찌꺼기를 부유선별법을 이용하여 유가금속 회수 및 유해 산성침출수를 억제한 사례가 있다.²⁾ 전 세계적으로 현재 자원고갈에 대한 우려와 새로운 광산개발 시 엄청난 비용부담으로 인하여 폐기된 광미의 재처리가 경제적으로 타당성이 크다는 점을 주목할 필요가 있다.²⁾

제1절. 비중선별 (Gravity separation)

비중선별(gravity separation)은 목적광물과 맥석광물의 비중차이를 이용하여 유가금속을 함유한 입자와 맥석을 분리하는 기술이다. 이 방법은 부유선광법이 출현하기 전까지는 가장 중요한 선광법이었으나 현재는 부유선광 전, 후에 조합시켜 보조적인 선별방법으로 많이 활용되고 있다.

비중선별기는 크게 Jig와 Table등이 있으나 전자는 조립, 후자는 세립의 선별에 주로 이용되고 있다. 하지만 비중선별의 문제점은 입자가 작아지면 분리효율이 급격히 떨어지는 단점이 있기 때문에 선별 효율을 높이기 위해서는 가능한 균일한 입도로 만들어 주어야 한다. 미립자의 효율적인 회수를 위해 새로운 형태의 선별기 개발이 이루어져 왔다.

한 예로 Bartles-Mozley 비중선별기는 기존 비중선별기에 비해 광미중의 미립자 회수에 매우 효과적인 것으로 보고되고 있으며, 비중선별 결과는 Table 2-1에 요약되어 있다. 아래 표에서 알 수 있듯이 기존 비중선별기에서 회수가 어려웠던 45 μm 이하 크기의 입자도 회수가 가능함을 알 수 있으며, 회수율도 70% 수준을 나타내고 있다.²⁾

비중선별기를 이용하여 광미를 재활용 한 사례를 검토하면 스웨덴 Laisvall광산의 경우 cyclone을 이용 광미를 처리하여 slime을 제거한 후 70%의 광미를 폐광산내 충전용(mine refilling)으로 활용하고 있다. 미국 New Jersey Zinc Company의 경우도 광미를 cyclone 처리 limestone을 회수하여 년 간 20 만 톤 이상을 asphalt filler 및 농업용으로 재활용하고 있다.^{2,3,4)}

Table 2-1. Results of Bartles-Mozley gravity separation for the mine wastes²⁾

Material	Feed		Concentrate	
	Size range	Grade %	Recovery %	Enrichment
Cassiterite Slimes	45%- 10 μ m	0.36% Sn	47	6.4
Scheelite Tails	60%- 45 μ m	0.25% WO ₃	70	2.8
Wolframite	90%- 100 μ m	3.4% WO ₃	92	3.1
Tantalite Tails	90%- 40 μ m	0.08% Ta ₂ O ₅	68	2.5
Cassiterite Tails	80%- 50 μ m	0.49% Sn	70 </td <td>3.1</td>	3.1

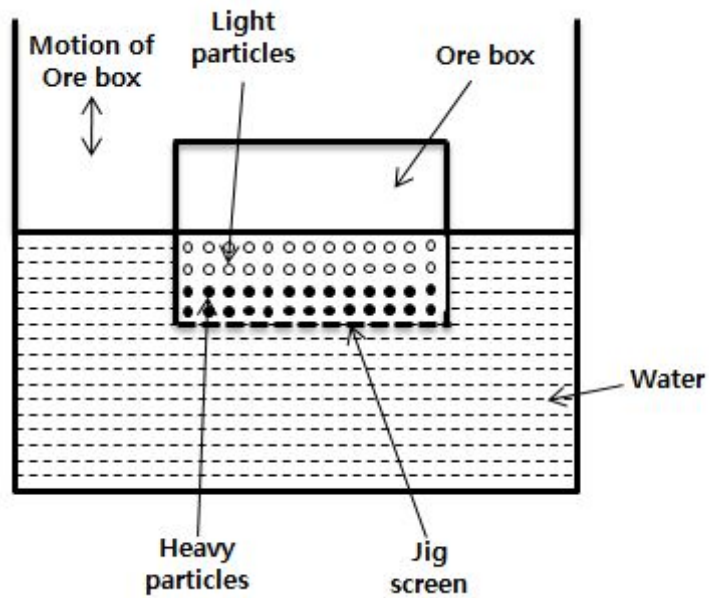


Fig. 2-1. Schematic view of Hand jig.

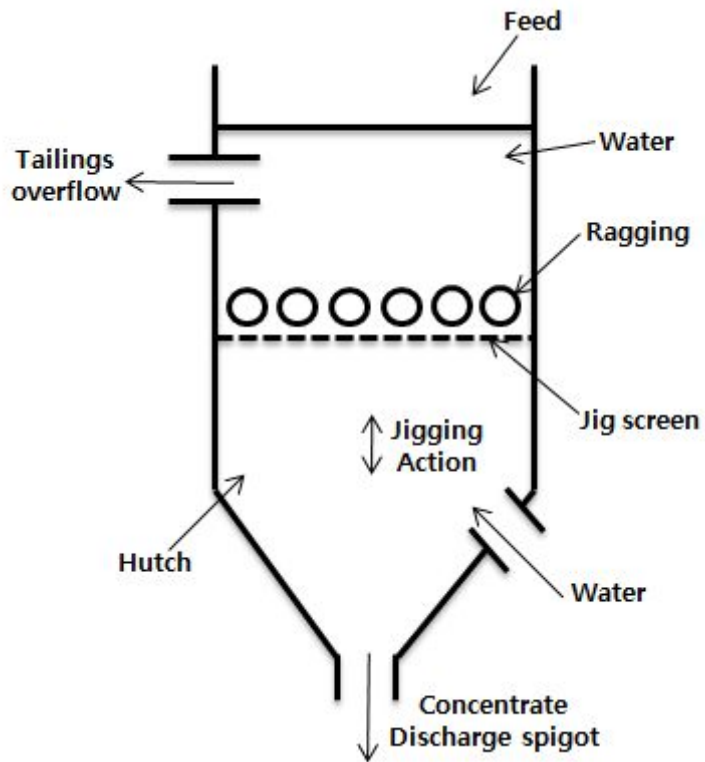


Fig. 2-2. Basic jig construction.

제2절. 부유선별 (Froth flotation)

부유선별(froth flotation)은 분리하고자 하는 고체 입자의 표면특성, 즉 습윤도(wettability)를 이용하는 물리화학적 선별법이다. 물에 잘 적셔지는 광물의 표면을 친수성(hydrophilic)이라하며, 반면에 잘 적셔지지 않는 광물의 표면을 소수성(hydrophobic)이라고 하는데 고체 혼합물이 현탁 되어 있는 광액(pulp)내에 기체를 주입하여 소수성 입자만 선택적으로 기포에 부착시켜 수면에 떠오르게 한다. 반면에 친수성 입자는 광액 내에 남게 되는 특성을 이용하여 분리가 가능하다. 비중, 자력, 정전기선별법들이 광물의 물리적 성질을 이용하는 반면에 부유선별법은 광물의 계면 화학적 성질의 차이를 이용하는 것이다. 따라서 광물의 부선 원리는 매우 복잡하지만 일반적으로 표면장력, 접촉각, 정전기, 흡착 현상 등 여러 각도에서 설명할 수 있다.

이 방법은 주로 광석광물(ore mineral)과 맥석광물(gangue mineral)을 분리하는 선별법으로 이용되었는데 최근에는 폐플라스틱 상호분리, 폐지로부터 잉크제거, 석탄회정제 등 폐기물 처리 분야뿐만 아니라 폐수(waste water)처리에도 많이 이용되고 있다.

부선은 광물처리 분야에서 가장 중요하게 알려져 있는 기술로 광액으로부터 유용성분을 회수하는 기구로는 기포에 선택적인 흡착(true flotation), 기포사이의 물속에서 entrainment, 기포에 흡착된 입자사이에 entrapment(aggregation)와 같은 3가지 방법이 있으며 그 현상을 Fig.

2-3과 Fig. 2-4에 나타내었다.

Fig. 2-3은 일반부선기의 cell에 공급된 공기가 교반기에 의해 기포를 발생시키고 기포에 광물입자가 흡착 된 모습을 보여주고 있으며, Fig. 2-4는 기포에 광화된 여러 가지 형태를 보여주고 있다. 이들의 형태를 보면 광물이 기포에 attachment된 것과 미립이 존재하는 부선 공정에서 기포에 흡착한 소수성 입자들 사이에 미립이 끼워져 동반 흡착(entrapment)된 것, 지나치게 미립으로 존재하는 부선에서 친수성인 맥석이 기포 상승 시에 생기는 흡인력 등에 의해 기포와 기포사이에 혼입하여 상승하는 되는 현상(entrainment)을 보여주고 있다. 이와 같이 entrapment와 entrainment 는 모두 부선 효율을 저하시키게 하는 원인이 된다.^{2,3,4)}

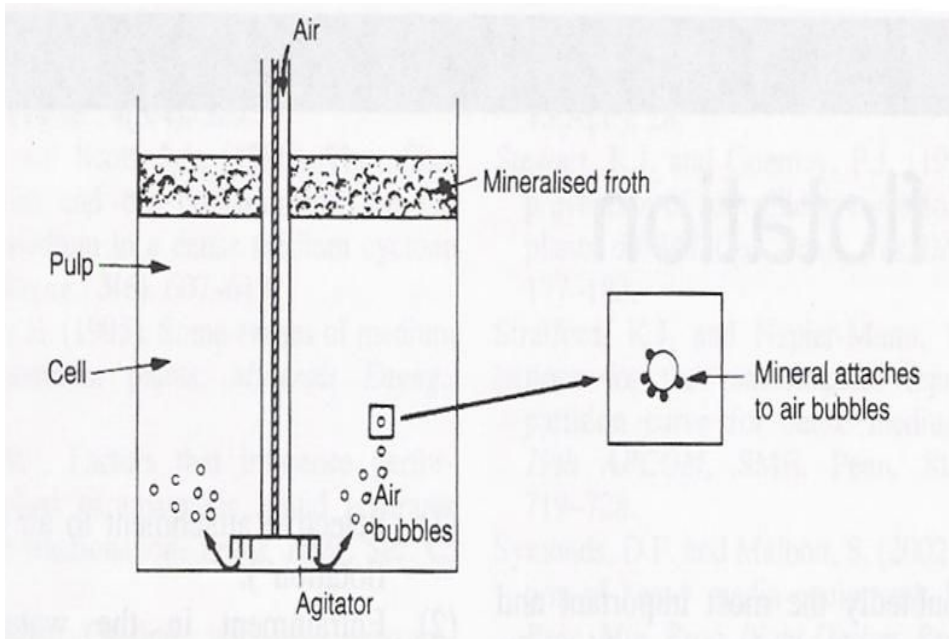


Fig. 2-3. Batch froth flotation.

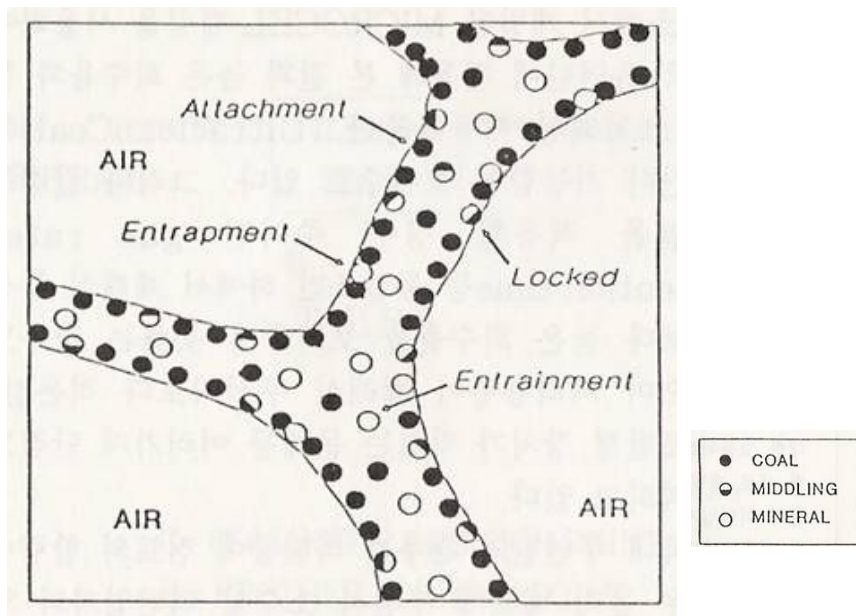


Fig. 2-4. Principles of froth flotation.

Micro-bubble column 부선기는 Denver sub-A형 부선기와는 달리 최대 1 μm 입도까지도 분리가 가능하도록 100 μm 정도의 기포를 발생시킬 수 있으며 부선기의 개략도를 Fig. 2-5에 나타내었다. cell자체가 긴 column으로 되어 있어 선별영역이 매우 길며 상승하는 기포와 반대방향에서 급광이 되므로 급광된 시료가 상승하는 기포와 충돌하여 선택적인 포수가 일어난다.

또한 상승한 기포에는 세척수에 의한 맥식의 세척이 추가되므로 보다 고품위 정광을 얻을 수 있으며 1차적으로 기포에 부착되지 못한 광물은 재순환공정을 통해 재처리되므로 높은 회수율을 기대할 수 있다. 한편, 연속적인 선별작업이 가능하므로 조건조에서 일정 조건(pH나 포수제 등)을 부여한 후 시료가 연속적으로 공급되고 기포제 역시 공기와 함께 계속 공급되며 급광량, 공기주입량, 기포제첨가량 등을 쉽게 조절할 수 있는 구조를 가지고 있다. 실험절차를 요약 해보면,

- ① 조건조에서 광액농도를 5~10%로 조정하고 pH 조절제나 포수제를 넣고 10분 이상을 교반하여 포수제와 접촉할 수 있는 충분한 조건을 부여하여 준다.
- ② ①의 과정이 진행되는 동안 column에 기포제와 공기량을 조절하여 최적 크기의 micro-bubble을 발생시켜 기포층이 안정화 된 후 상단 정광배출구로 광화된 기포가 넘치도록 한다.
- ③ 조건조에서 조정된 시료를 급광용 slurry pump로 급광을 시작하고 광미배출구의 높이를 조절하여 cleaning zone의 적정높이를 유지하게 한다.
- ④ 시료가 급광된 후 광화로 인해 기포층에 변화가 발생할 경우 flow meter에 연결된 공기량과 세척수의 량, 기포제의 량을 조절하여 기포의 안정화가 필요하다.
- ⑤ 실험과정에서 광미의 배출구 높이, 세척수의 량, 공기주입량, 기포제의 첨가량에 따라 기포층의 높이와 기포 크기가 변하면서 정광의 품위와 yield가 변함으로 이들의 최적조건을 찾을 수 있다.

일반 부선키와 micro-bubble column 부선키의 선별효율을 비교실험 한 결과 국내산 인상 흑연(22.05% F.C)을 대상으로, 일반부선키에서는 1회 처리하여 53.30%의 낮은 회수율과 함께 57.90% F.C 산물을 얻을 수 있었으나 micro-bubble column부선키에서는 1회 처리하여 95.87% F.C의 산물을 95%의 높은 회수율을 얻을 수 있는 결과가 보고된 적이 있다.⁵⁾

부유선광은 1회 실시로 끝나는 경우도 있으나 1차 정광을 여러 단계의 정선이나 청소과정을 거쳐 보다 높은 품위의 최종정광을 얻는 공정을 사용하고 있다. 부선키공정을 적용하여 광미를 재처리한 사례를 검토해보면 미국광무국(USBM)에서는 미조리주 남부에 위치한 폐 연광산 광미 약 2~3 억 톤에 대해 부유선별을 수행하여 광미로부터 연, 구리 및 아연을 대부분 제거하였다. 부선키 처리 후 약 95%의 Pb가 제거되어 광미 중 Pb함량이 400 ppm미만 이었다. Table 2-2에서 보여주듯이 구리의 함량도 부선키처리 후 40 ppm 수준으로 감소하였음을 알 수 있다.²⁾

Table 2-2. Result of flotation for the mine wastes²⁾

Metal	Pb(%)	Cu(%)	Zn(%)
before	0.87	0.035	0.11
after	0.04	0.004	0.03

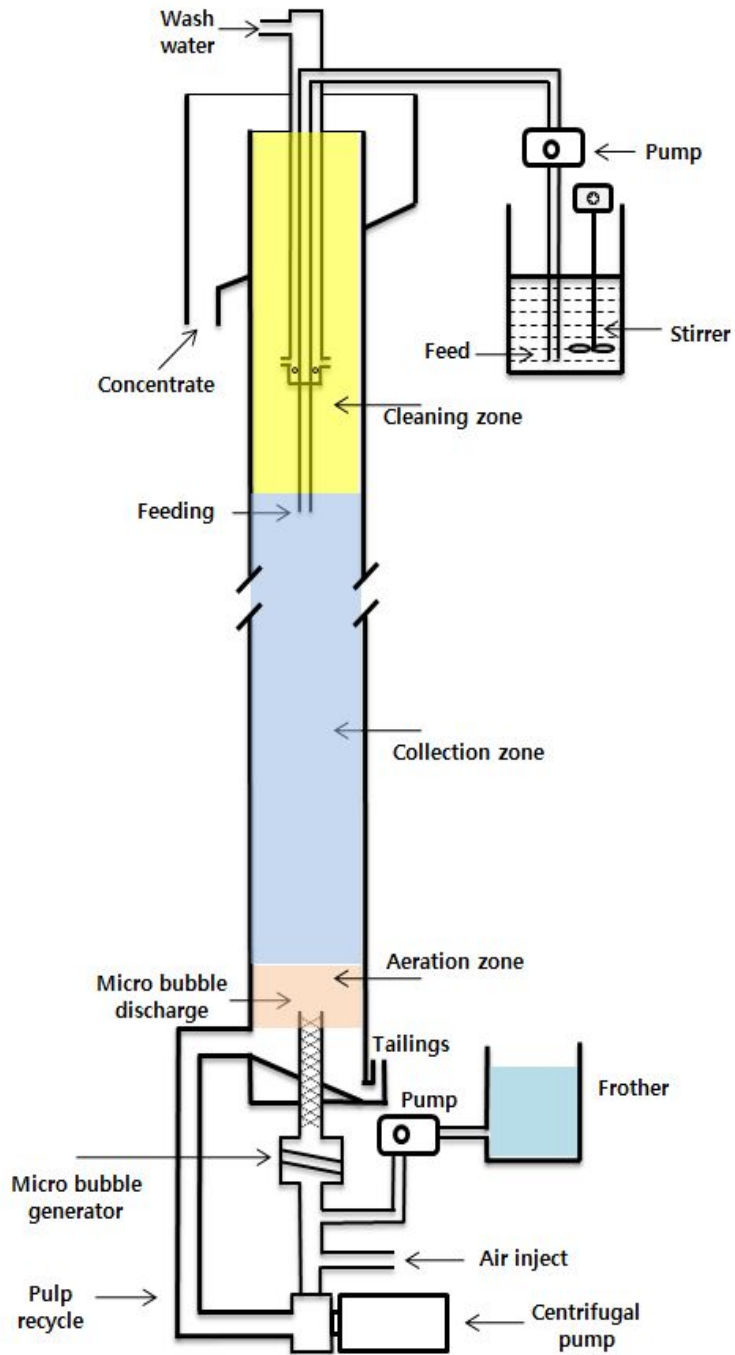


Fig. 2-5. Schematic view of column flotation.

그러나, 부유선별의 문제점은 황화광물, 특히 광미 중 황철석(pyrite) 함량이 높은 경우(>20%) 부선 시 Cu, Zn 등의 회수를 어렵게 하기 때문에 부선시약의 선택이 매우 중요하다.

핀란드 Pyhasalmi Cu-Zn 광산의 경우 광미를 부선법으로 재처리하여 광미로부터 산성폐수 발생을 근원적으로 차단하였을 뿐 아니라 회수된 금속의 경제성을 평가하였으며 부유선별에 의한 처리 전 광미중의 금속함량은 Cu 0.094%, Zn 0.13%, Au 0.7 ppm, Ag 8.4 ppm 이었으나 부선 후 회수된 정광의 금속함량은 유황 33%, An 1%, Cu 0.6%, Au 2.4 ppm, Ag 36 ppm 이었다. 회수된 정광을 이용하여 금속 회수 및 황산을 제조함으로써 년 간 약 8~10 million 달러의 수익을 평가 하였다.²⁾

호주의 Broken Hill 광산의 경우 1950년대부터 적치된 약 75만 톤의 광미를 70년대 초에 재처리한 실적이 있다. 광미 중에는 약 1.6% Pb(1% 산화연) 1.55 ozs Ag 및 2.9% Zn을 함유하고 있으며, 광미를 분쇄, 부선 및 sulphidizing 처리 후 oxide flotation을 수행하여 Pb 회수율 증가 및 시약 사용량 절감에 성공하였다.²⁾

그밖에 미립황화물 입자는 부선적용이 매우 어렵기 때문에 일반적으로 polymer 등을 이용하여 선택응집(selective flocculation)시킨 후 부유선별, elutriation, sedimentation공정을 적용하면 쉽게 회수가 가능한 것으로 알려져 있다. 다음 Table 2-3은 금속회수를 위한 부유선별공정의 적용범위를 요약한 표이다.²⁾

Table 2-3. Metal recovery by flotation²⁾

Waste system	Metals	Flotation	Flotation mode	Metal separation efficiency (%)
Cassiterite	Sn	Salicylaldehyde	foam flotation	
Scheelite	W		foam flotation	
FeO ₃	Fe	Octylhydroxamate	foam flotation	
Metal solution	Cu,Pb,Hg	Ethyl(hexadecyl dimethyl ammonium bromide, etc	ion flotation	
Coal/phosphate slime		As above	Micro gas flotation	
Metal solution	Cd,Cu,Ni	4-dodecyldiethylene triamine	foam flotation	
Metal solution	Cd,Hg	Hexadecyltrimethyl ammonium chloride	Absorption colloid +Fe/Al hydroxide	
Metal solution	Co,Cr,Cu, Ni,Zn	Na lauryl sulfate+Fe hydroxide floc	Absorption colloid +Fe/Al hydroxide	
Wastewater	Cu	Laurylamine acetate	foam flotation	>90 Cu
Wastewater	Cd,Cr,Cu, Fe,Ni,Zn	Dodecylbenzene sulfonate+metal hydroxid flocs	Adsorption colloid flotation	47-73 for other hydroxides
Wastewater	Cu	Dodecyltrimethyl ammonium+tetradecyltrimethyl ammonium chloride	foam flotation	Cu(OH) ₂ >95 Cu

제3절. 자력선별 (Magnetic separation)

광물은 물리학적 특성 중 자성 차이에 의해 자성광물과 비자성 광물로 나눌 수 있으며 이러한 성질을 이용하여 선별을 하는 것을 자력선별(magnetic separation)이라 한다. 일반적으로 광물은 대자율(magnetic susceptibility)의 크기에 따라 약한 자성에 쉽게 끌리는 강자성광물, 강한 자석에만 끌릴 수 있는 약자성 광물, 자계 안에 들어가면 반대방향의 자성을 얻어 자석으로부터 멀어지는 반상자성 광물이 있다.

자성물질과 비자성 물질은 자장(magnetic field)내에 투입된 물질들 중 자성물질은 자력에 의해 끌리고 비자성 물질은 중력, 원심력, 유체의 힘만이 작용하게 됨으로서 분리가 일어나게 된다. 자력선별은 외부에서 주어지는 자력에 대한 광물들 간의 고유한 자화율의 차를 이용하는 선별법으로 이러한 자화율의 차이에 따라 광물의 특성이 크게 세 가지로 나누어진다.^{2,4)}

① 반자성(diamagnetism) : 자력이 감소되는 방향으로 반발력이 작용한다.

반자성의 성질은 외부자장에 의하여 반대 방향으로 자기모멘트가 물질 내에 유도되는 것에 기인한다. 고강도 자석에 의하지 않고서는 자력에 의한 분리가 불가능하며 비자성(non magnetism)이라고도 한다. 반자성광물로는 황철광(FeS_2), 첨아연광(ZnS)그리고 조암광물인 석영, 장석, 운모 등이 있다.

② 상자성(para magnetism) : 자력이 증가하는 방향으로 끌리게 되어 자장의 흐름방향으로 입자들이 배열된다. 강한자석으로 분리가 가능하며 일명 약 자성이라고도 한다. 상자성 광물로는 적철광(Fe_2O_3), 능철광(FeCO_3), 철망간중석($(\text{Fe},\text{Mn})\text{WO}_4$), 금홍석(TiO_2)등이 있다.

③ 강자성 (ferro magnetism) : 상자성 물질과 유사한 특성을 지니지만 약한 외부자장에 의해서도 강하게 자화되어 영구자석의 성질을 가지는 경우이다. 강자성 광물로는 자철광(Fe_3O_4), 티탄철광(FeTiO_3), 자류철광(Fe_{1-x}S)등이 있다.

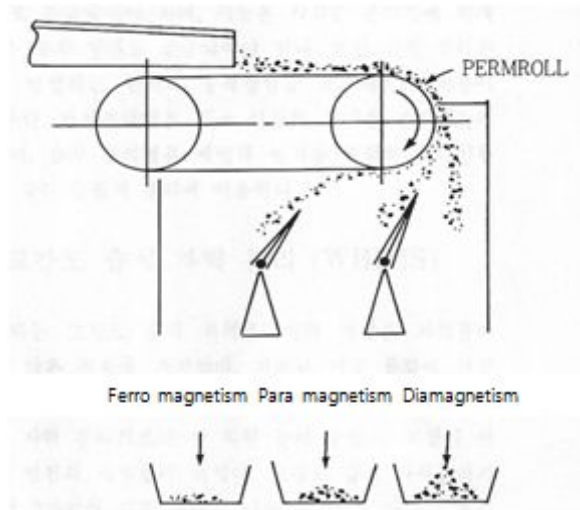


Fig. 2-6. Principles of permroll magnetic separation.

대표적인 자력선별기의 종류로는 드럼형 자력선별기, 유도롤형 자력선별기, 고구배 자력선별기, 초전도 자력선별기가 있으며 오늘날 자력선별기로 사용되고 있는 자석은 특수한 예외를 제외하고는 직류전자석이다. 전자석은 영구자석(permanent magnet)보다 강력하고 자력의 조절이 쉽다는 장점을 가지고 있다.

자철광, Fe 등은 강자성체이며 능철광, 적철광, 갈철광등은 약자성체이다. 일반적으로 광석 중 백석은 비자성체로 간주된다. 자력 선별기에는 저강도(low intensity) 및 고강도(high intensity) 자력선별기로 구분되며 저강도 자선기는 강자성물질을 회수할 때 고강도자선기는 약자성 물질을 회수할 때 사용된다.

자력선별기는 또한 입자를 수중에서 선별하는가에 따라 습식 및 건식형으로 나눌 수 있다. 건식선별의 경우는 입자가 작아지면 입자들끼리의 응집현상에 의해 선별효과가 떨어지나 습식선별의 경우 3 mm이하의 입도까지도 적용이 가능하다.

고구배 자력선별(high gradient magnetic separation)의 경우 약자성물질의 회수는 물론 다양한 폐수로부터 유해금속의 회수가 가능하며 지난 20여 년간 이 분야의 새로운 장비개발에 많은 진전을 이룩하였다. 고구배 자력선별기는 콜로이드 상으로 되어 있는 약 상자성 광물을 분리할 수 있는 방법으로 강한 전자력을 이용하기 때문에 에너지 소모가 비교적 큰 것이 단점이며 따라서 최근에는 초전도자력선

별기 개발에 많은 노력을 기울이고 있다.

초전도자선의 경우 고령토 미립자로부터 철분 및 TiO_2 제거 효율이 매우 우수한 것으로 보고되고 있으며 현재 광산현장에 폭넓게 적용되고 있다. Ferrite co-precipitation과 자력선별기술을 병합하여 용해된 중금속 이온의 제거가 가능하며 ferrichydroxide와 공침된 중금속 이온은 고구배 자력선별(high gradient magnetic separation) 기술을 이용하여 ferromagnetic 침전물로서 회수할 수 있다.

다음 Table 2-4는 금속회수를 위한 자력선별공정의 적용범위를 요약한 표이다. Table 2-4에서 알 수 있듯이 자력선별기술은 생활폐기물을 비롯한 폐자동차, 가전제품, 전선, 전지 등으로부터 유가금속회수에도 폭넓게 활용되고 있음을 보여주고 있으며, 향후 폐기물로부터 자원의 회수 및 선별에 크게 응용이 될 것으로 기대되고 있다.^{2,3,4)}

Table 2-4. Metal recovery by magnetic separation²⁾

Waste system	Metals	Special features	Metal separation efficiency (%)
Wastewater	Fe,Cu	Electrolysis with steel cathode and magnetic anode	80-90 Cu/Fe
Electrochemical reactor	Cu	Electrolysis with eddy promoters	
Electronic	Cu,Sn,Ni, Pb,W,Mo	Magnetic-hydrostatic separation	
Wastewater	Cu,Cr,Cd, Hg,Fe	Magnetic-separation metal sulfides	
Mine waste	Co,Cr,Ni	Applicable to kyanite and chromite combination gravity/magnetic separation	Co recovery
Municipal/auto scrap	Cu,Pb	Eddy current separation	98 Cu, 94 Pb
Electronic scrap	Al,Cu,Pb	Eddy current separation	<90 as Al alloy
Electronic	Al,Cu	Combination gravity segregation/magnetic separation	
Cable scrap	Cu,Pb	Eddy current separation for Cu/Pb	
Cu dust	Cu,Pb,Cd, As,Co,In, Bi	H ₂ SO ₄ leach follow by magnetic separation	50-60 Zn, 60 Cd, 80 Pb/As/Sn
Battery	Fe,Mn,Zn, Cu,Ag	Involves heating 500 to 1,100°C and magnetic separation of Fe/Cu/Ag/Mn/Zn	
Shredded scrap	Cu,bronze, Sn	Magnetic+float sink in heavy medium	50-80 Cu+Zn,78 Al

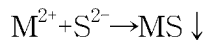
제4절. 생물학적 처리기술

미생물을 이용하여 광석 또는 광미로부터 유용자원의 회수가 가능하다. 금이나 우라늄과 같은 금속을 몸속으로 흡수하는 미생물들을 선풍 또는 채광에 응용하고 있다.^{2,4)}

실제로 세계에서 생산되는 구리의 1/4은 *Thiobacillus ferrooxidans*라는 미생물을 이용하여 채취되고 있다. 이러한 유가금속을 채취 하는데 사용되는 미생물은 화산이나 극지등 극한환경에서 서식하는 경우가 많다. 현재 채광 또는 선풍에 활용 가능한 미생물로는 *Thiobacillus thiooxidans*, *caldis*등 7~8종이 제시되고 있다. 미생물에 의한 금속 회수 메커니즘은 다음과 같이 크게 4가지로 분류 할 수 있다.

- ① Metal precipitation reactions
- ② Binding and complexing metals
- ③ Intracellular accumulation of metals
- ④ Metal transformations

토양 중에 존재하는 sulfate-reducing bacteria 등은 유기물로부터 에너지를 얻어서 hydrogen sulfide(H₂S)와 bicarbonate(HCO₃)를 형성한다. 이렇게 형성된 H₂S는 중금속이온(heavy metal cations)과 반응하여 불용성 금속유화물(insoluble metal sulfide)을 형성한다.²⁾



Bicarbonate ion도 금속을 침전 및 산성을 중화시키며, 광산산성폐수(acid mine drainage) 처리를 위해 자연정화 방식(wetland)을 사용하는 것이 생화학적 반응에 의한 금속 침전의 가장 대표적인 예이다.

Commercial-scale unit의 경우 concrete reactor의 크기가 1,800m³에 이르는 것도 있으며, 네델란드의 경우 하루 처리 용량도 7,000m³에 이르는 reactor가 1992년도부터 가동 중에 있다. 또한 고구배 자력선별법(high gradient magnetic separation)을 이용하여 약자성 또는 강자성인 metal sulfide, metal phosphate 입자 등을

microbial cells 및 기타 debris로 부터 분리시킬 수 있다.

따라서 high gradient magnetic separation나 microbially-mediated metal precipitation 방법을 이용하여 용액 중에 용해되어 있는 금속이온을 상당량 제거할 수 있는 것으로 알려져 있다.

일반적으로 microbial cell은 음전하를 띠고 있어서 양으로 하전 된 금속이온들이 정전기적으로 cell의 표면에 흡착하려는 경향이 있다. 이 경우 용액의 pH가 microbial metal attraction에 중요한 영향을 미치며, 만일 용액의 pH가 낮을 경우 수소이온이 cell의 표면에 흡착이 되어서 양전하의 금속이온보다 CrO_4^{2-} , SeO_4^{2-} 와 같은 oxy anions의 cell 표면에 결합하게 된다.

반면에 용액의 pH가 증가하면 metal hydrolysis가 일어나게 되어 일부 금속은 anionic complexes를 형성하여 cell 표면에 대한 반발력을 갖게 된다. 따라서 pH가 증가 하게 되면 금속이온은 수화물 형태로 침전하게 되어 회수가 가능하다.

한편, non-living microorganism을 이용하여 biosorbents를 제조해서 금속이온을 제거하는데 상업적으로 이용하고 있다. 즉, non-living micro-organisms를 silica gel, polysulfone등과 같은 무기 또는 유기 polymer에 고정화(immobilize) 시켜서 1-2 mm 직경의 bead를 제조하여 사용하고 있으며, 이 경우 immobilized microorganism을 “biosorbents”라 부르고 있으며 크기, 강도, rigidity, porosity의 특성에 따라 다양한 흡착제가 개발되고 있다. 상업용 제품 중 BIOCLAIM이라 불리는 흡착제는 polyethyleneimine polymer와 non-living bacteria를 사용한 것이다. USBM에서 개발한 BIO-FIX는 sphagnum peat 등을 polysulfone에 고정화시킨 것이며, 이와 같이 다양한 종류의 biosorbents가 개발 되었으나 기술적, 경제적인 이유 등으로 아직 상업적으로 크게 이용이 되지 못하고 있는 실정이다.

일반적으로 음으로 하전 된 microorganism 표면에 흡착된 금속이온은 living microorganism에 의해 cell wall 이나 membrane으로 옮겨져서 cell 안에 축적된다.

혐기성 wetlands 내에서 특정 미생물에 의해 폐수 중에 함유되어 있는 금속이온을 유기물 중에 축적시키는 것이 대표적인 예이다.

또한 광미 폐수 중에 함유된 cyanide를 분해하는데 미생물을 폭넓게 이용하고 있다. 그밖에 금속이온을 산화, 환원, methylation 그리고 demethylation 반응에 의해 안정된 형태로 전환시킬 수 있다.

그 한 예로 미생물을 이용하여 6가 크롬을 독성이 적은 3가 크롬으로 환원시키는 공정이 상업적으로 이용되고 있으며, 이 경우 앞서 언급하였듯이 sulfate

reducing bacteria에 의해 형성된 H₂S가 Cr⁶⁺를 Cr³⁺로 환원시킨다. South Dakota의 Homestake 광산에는 1984년부터 bacterial oxidation에 의한 free cyanide, metal-complexed cyanides, thiocyanate 분해에 이용하고 있다. 이 기술을 변형하여 현재는 spent, precious metal heap leaching operation에 응용되고 있다.

또한, uranium을 함유하는 광미의 경우 *Thiobacillus ferrooxidans* 미생물을 이용한 biore-mediation 기술이 개발되어 현장에 응용되고 있다. 다음 Table 2-5는 미생물을 이용하여 금속을 용해시키거나 미생물 내에 축적시켜 제거하는 공정의 적용범위를 요약한 것이다.

본 Table 2-5에서 알 수 있듯이 미생물을 이용하여 광석에서 뿐 만 아니라 중금속을 함유하는 폐수나 슬러지로부터 중금속의 용출 또는 축적이 가능함을 알 수 있다.²⁾

Table 2-5. Metal separation. using Biological Agents²⁾

Waste system	Metals	Biological agent	Mode of metal action
Ores	Fe	<i>Thiobacillus ferrooxidans</i>	Leach
Ores	Ag,Cd,Cu,Pb,Zn	<i>T.ferrooxidans, Chlamydomonas reingardtii</i>	Leach
Metal finishing waste	Cd,Cu,Pb	<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Accumulate
Sewage sludge	Cd,Cu,Ni,Zn	<i>T.ferrooxidans</i>	Leach
Wastewater or leachate	Cu	<i>Desulfavibrio vulgaris</i>	Accumulate
Metal wastewater or leachate	Cu,U	<i>T.ferrooxidans, T.thiooxidans, Leptospirillum ferrooxidans</i>	Leach
Metal wastewater	Cd,Cu,Ni,Pb,Zn	<i>Penicillum, Cladosporium</i>	Accumulate
Metal wastewater	Ag,Al,Cd,Cr,Co,Cu, Hg,Ni,Pb,Zn	<i>Chlorella pyrenodosa, Spirulina</i>	Accumulate

제3장. 시료 및 실험방법

제1절. 시료

본 연구에서 사용된 시료는 전라남도 해남에 위치한 대우조선해양 S.M.C (구 순신개발) 선광장에서 최종 청소기(scavenger)를 거쳐 최종처리 된 광액상태의 광미 시료(이하 원 시료로 표기)를 채취 하였다. 채취한 시료를 실험실에서 탈수 후 수분을 제거하기 위하여 dry oven을 이용하였으며 100°C 에서 48시간 완전 건조 시킨 후 시료로 사용하였다.

한편, Table 3-1은 원 시료를 한국지질자원연구원의 ICP-AES와 ICP-MS를 이용하여 성분분석 한 결과로 Au와 Ag가 각각 1.77 ppm, 22.73 ppm이며 불순물로는 SiO₂가 82.34%로 가장 많고 그 외에 Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O 등도 존재하였다.

Table 3-1. Result of chemical analysis for sample

Al ₂ O ₃ (wt.%)	CaO (wt.%)	Fe ₂ O ₃ (wt.%)	K ₂ O (wt.%)	MgO (wt.%)	MnO (wt.%)	Na ₂ O (wt.%)	P ₂ O ₅ (wt.%)	SiO ₂ (wt.%)	TiO ₂ (wt.%)	SO ₂ (wt.%)	L.O.I	Au (ppm)	Ag (ppm)
11.04	0.10	0.99	2.65	0.20	0.02	0.13	0.10	82.34	0.24	0.26	2.11	1.77	22.73

Fig. 3-1은 원 시료의 입도별 산물을 XRD(FANalytical 사의 X'pert PRO MPD)로 분석 한 결과 quartz, muscovite, feldspar의 맥석광물이 주를 이루고 있었으며 각 입도별 광물성분은 큰 차이가 없었다.

Table 3-2는 습식 입도 분석결과로 전체 무게비중 25 μm 이하인 -500 mesh(25 μm)가 43.26 wt%로 상당히 미립 이었으며, 30×200 mesh 구간에도 약 40 wt%로 나타나 30×500 mesh까지 다양한 입도로 분포하는 것으로 나타났다. 각 입도별 Au 함량을 봤을 때 +25 mesh의 조립질 입도에 평균 품위인 1.77 ppm이상이 분포하고 있음을 확인하여 선별효율을 높이기 위해서는 부선에 적합한 입도로 조절할 필요가 있을 것으로 사료된다.

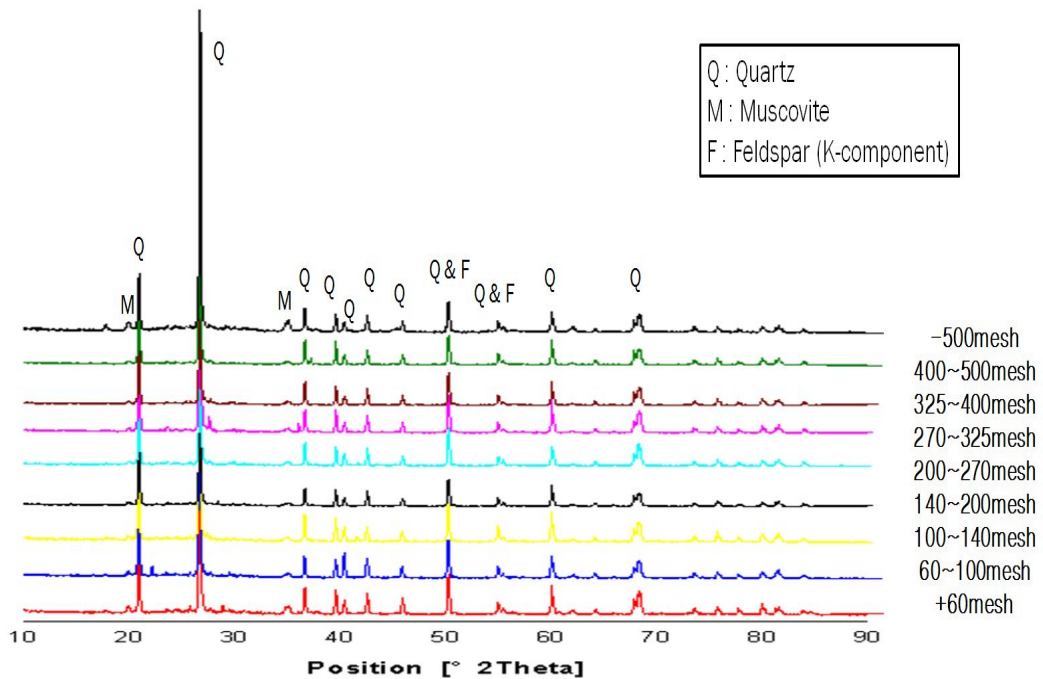


Fig. 3-1. X-ray diffraction pattern of wet screen product.

Table 3-2. Result of wet screen analysis for sample

Size	Weight	Weight	Au	Ag	Size	Cum.under	Mass Balance	
mesh	(g)	(%)	(ppm)	(ppm)	(micron)	(%)	Au	Ag
-500	99.37	43.26	0.70	20.00	500(25)	43.26	0.303	8.493
400*500	12.55	5.46	1.10	19.00	400(37)	48.72	0.060	1.032
325*400	7.66	3.33	1.20	16.00	325(43)	52.05	0.040	0.548
270*325	8.60	3.74	1.40	16.00	270(53)	55.80	0.052	0.608
200*270	10.43	4.54	1.60	19.00	200(74)	60.34	0.073	0.866
140*200	23.86	10.39	2.30	20.00	140(113)	70.73	0.239	2.081
100*140	19.52	8.50	2.43	22.00	100(147)	79.22	0.207	1.862
60*100	25.96	11.30	2.67	23.00	60(246)	90.52	0.301	2.599
30*60	20.79	9.05	3.33	34.00	210.00	99.57	0.302	3.107
+30	0.98	0.43	6.73	56.00		100.00	0.029	0.242
Total	229.72	100.00					1.606	21.438

제2절. 실험방법

원 시료에 함유된 유가금속을 회수하기 위해 광미로부터 유가금속을 회수하기 위한 방법 중 하나인 부유선별법을 적용하여 실험을 진행하였다. 일반 부선실험에서는 미국 Metso 社의 Denver Sub-A형 부선기를 이용하여 기포제 종류별 및 첨가량 변화실험, 포수제 종류별 및 첨가량 변화실험, 광액농도 변화실험을 실시하였으며 교반속도는 R.P.M. 1200으로 고정된 후 4 ℓ cell에 광석 800 g(Dp 20%)을 넣고 5분 교반 후 포수제를 첨가, 3분 교반 후 기포제 첨가, 2분 교반 후, 광액을 교반하면서 공기를 주입하여 20분간 부유 산물을 회수하였다.⁷⁾

부선에 적합한 입도조절 후 미립자는 micro-bubble column부선기를 이용하여 포수제, 억제제, 황화제, pH controller, 첨가량 및 세척수량과 air flow rate에 따른 영향 실험을 통하여 결론을 도출하였다. 회수된 정광과 광미는 S.M.C 분석실에서 fire assay법을 적용 유가금속의 함량을 측정하였으며, Au의 회수율과 선별도지수 (selective index)는 (1)과 (2)의 식을 이용하여 계산하였다.⁸⁾

$$R = \frac{C_w \times c_m}{F_w \times f_m} \times 100(\%) = \frac{c_m(f_m - t_m)}{f_m(c_m - t_m)} \times 100(\%) \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\frac{a}{a'} \times \frac{b'}{b}} \quad (2)$$

Fw = 금광의 질량(g)

Cw = 정광의 질량(g)

Fm = 금광의 품위(ppm)

cm = 정광의 품위(ppm)

tm = 광미의 품위(ppm)

a = 정광의 유용성분의 품위(ppm)

b = 정광의 무용성분의 품위(ppm)

a' = 광미의 유용성분의 품위(ppm)

b' = 광미의 무용성분의 품위(ppm)

제4장. 원 시료

제1절. 일반부선

1. 광액농도에 따른 영향

Fig. 4-1은 광액 농도에 따른 부선효율을 확인하기 위하여 광액농도를 10%~30%로 변화 시키면서 실험한 결과 광액농도가 10%일 때 Au 품위 11.60 ppm과 회수율 58.86%로 선별효율이 가장 좋았으나 30%에서는 광액농도의 증가에 의한 맥석의 동반 부유로 인하여 Au 품위가 2.27 ppm으로 급격히 감소하였다.

광액농도 20%의 조건에서 실험을 실시한 결과 Au 품위 11.57 ppm, 회수율 47.61%로 광액농도 10%에 비해 회수율은 약간 저하되지만 품위는 비슷하게 유지할 수 있고 현재 순신 광미의 광액농도가 약 15%~20%임을 고려하여 광액농도 20%의 조건으로 실험을 진행하였다.

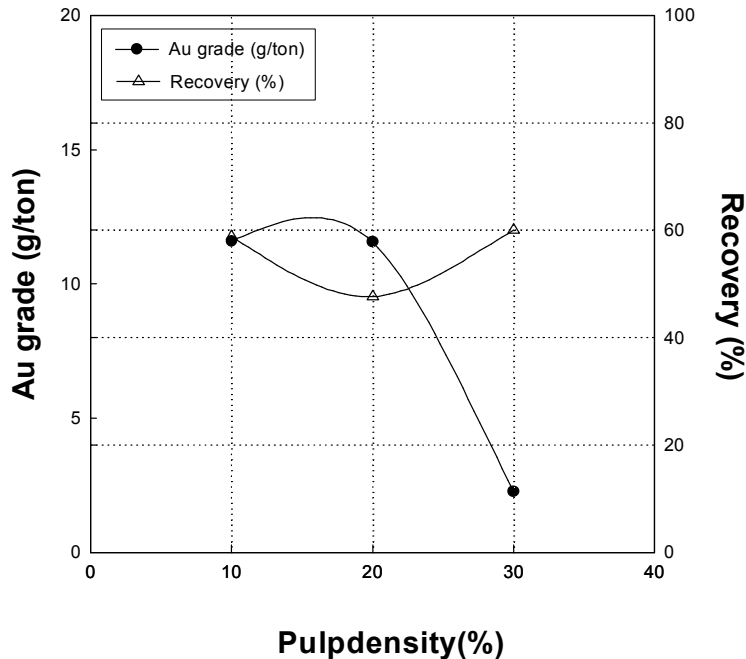


Fig. 4-1. Effects of pulp density. (%)

(collector : K.A.X(270 ml/ton), frother : AF 65(126 ml/ton), R.P.M : 1200)

2. 기포제 종류에 따른 영향

Fig. 4-2 는 Au 회수를 위한 적정 기포제의 선정을 위해 해외 금 부선에 많이 사용되고 있는 완전 수용성의 폴리 글리콜 제품인 AF 65, 금이나 각종 금속 황화물 및 비금속 광물의 부선에 효과적인 것으로 알려진 MIBC, 기포력이 우수한 alcohol류 제품인 DF 250, 현재 선광장에서 사용 중인 P.P.G, 유상기포제인 pine oil을 이용하여 실험을 실시한 결과이다.⁵⁾

Fig. 4-2에서 보는 바와 같이 회수율은 pine oil을 사용하였을 때 71.19%로 회수율이 가장 높았으나 Au 품위 7.46 ppm 으로 가장 낮았다. 한편, AF 65를 사용하였을 때에 Au 품위 11.57 ppm, 회수율 47.62%로 회수율은 저하되나 선별도 지수를 고려했을 때 선별효율이 가장 높아 본 연구에서는 AF 65를 이용 하여 일련의 실험을 실시하였다.

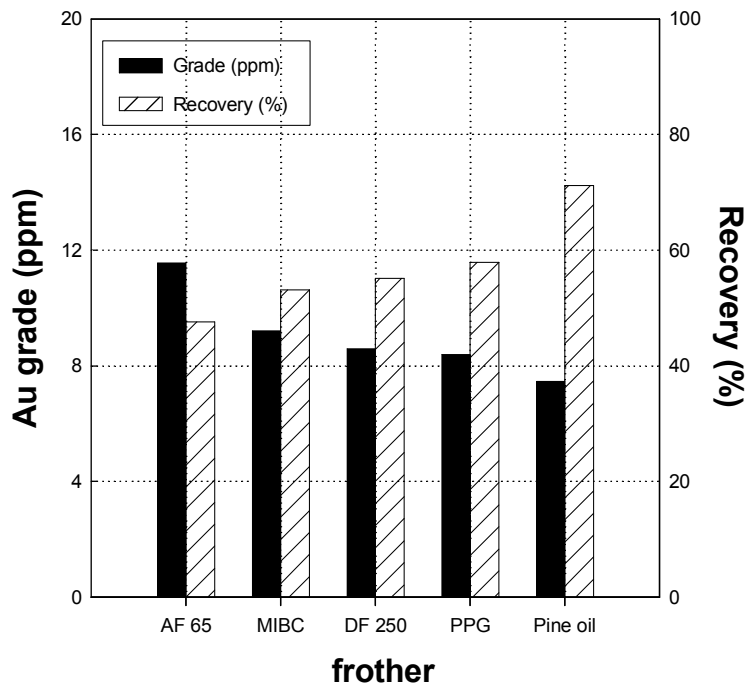


Fig. 4-2. Effects of various kind of frother.

(Dp 20%, collector : K.A.X (570 ml/ton), frother : 126 ml/ton, R.P.M : 1200)

3. 기포제 첨가량에 따른 영향

Fig. 4-3은 기포제 종류별 실험에서 가장 효율이 좋았던 AF 65를 사용하여 첨가량을 50~250 ml/ton까지 변화를 시켜 실험을 실시한 결과이다. 기포제 첨가량이 150 ml/ton까지는 많은 기포가 발생되어 Au 함량이 높은 조립질 입자의 흡착 가능성이 증가하므로 품위와 회수율이 모두 상승 하였지만 그 이상부터는 오히려 과도하게 생성된 기포에 미립의 불순물이 동반 부유(entrainment)되어 Au 함량은 낮아지고 회수율은 증가 하였다.⁶⁾

기포제를 100 ml/ton 첨가 하였을 때 Au 함량이 11.57 ppm으로 가장 높았으나, 회수율은 150 ml/ton 첨가하였을 때 63.24%로 가장 높아 선별도 지수를 고려하여 선별효율을 평가하였을 때 가장 좋은 것으로 나타났다.

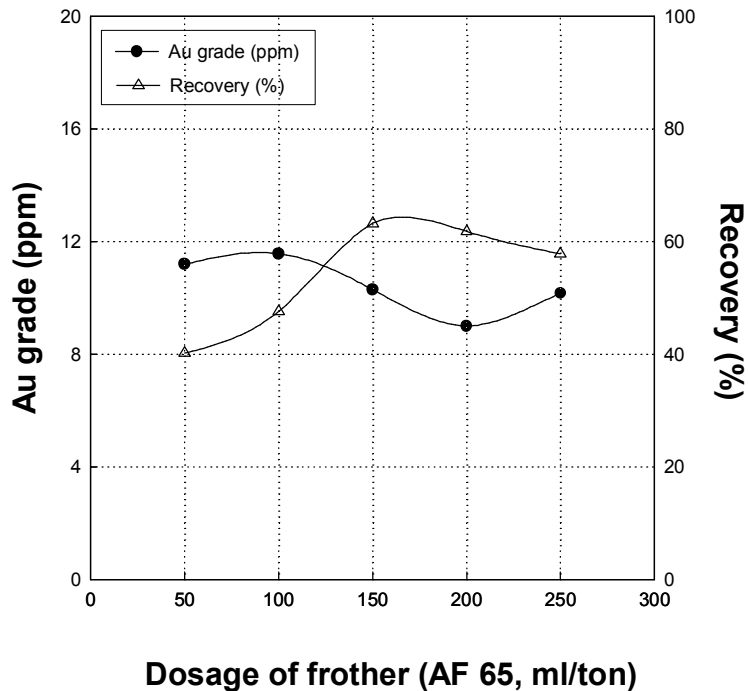


Fig. 4-3. Effects of frother dosage.

(Dp 20%, collector : K.A.X(270 ml/ton). frother : AF 65, R.P.M : 1200)

4. 포수제 종류에 따른 영향

부선 효율을 높이기 위해 포수제 종류에 따른 실험을 실시한 결과 Fig. 4-4 와 같다. Au는 황화광물과 같이 존재 하므로⁹⁾ 황화광물 부선에 쓰이는 잔세이트 계열의 포수제와¹⁰⁾ Cu와 Zn과 같은 황화광물 부선에 쓰이는 SPRI 96, 미국과 중국에서 사용하는 AERE 7310, BK 901을 사용하여 부선을 실시한 결과 Au 품위는 N.A.X 31이 Au 품위 11.73 ppm으로 가장 높았다.

하지만 K.A.X.를 사용하였을 때 Au 품위 10.30 ppm, 회수율 63.24%로 선별도 지수를⁸⁾ 고려했을 때 선별효율이 가장 좋음을 확인하였다.

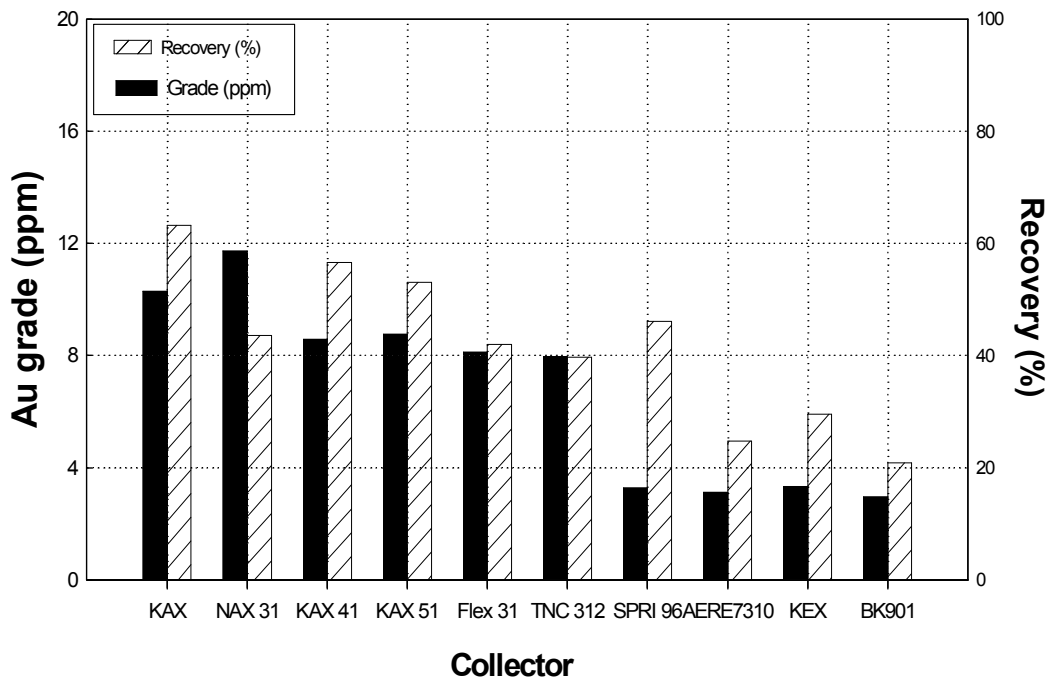


Fig. 4-4. Effects of various kind of collector.

(Dp 20%, collector : 270 ml/ton, frother : AF 65(150 ml/ton), R.P.M : 1200)

5. 포수제 첨가량에 따른 영향

Fig. 4-5는 포수제 종류에 따른 실험에서 선별효율이 가장 높은 포수제로 확인된 K.A.X의 적정 시약 첨가량을 확인하기 위해 67 ml/ton부터 550 ml/ton까지 변화를 주어 실험을 실시한 결과이다. 포수제의 첨가량 125 ml/ton 까지 Au 품위는 12.30 ppm으로 증가하지만 270 ml/ton 부터는 급격히 저하되었으며, 회수율은 405 ml/ton까지 증가하다가 그 이상에서는 급격히 감소하였다.

이는 포수제가 일정량 이상 첨가되면 불순물에도 영향을 끼쳐 맥석이 동반 부유되어⁷⁾ 품위와 회수율이 모두 저하되었기 때문이다. 한편, K.A.X 270 ml/ton이 Au 품위 10.30 ppm, 회수율 63.24%로 선별도지수가 31.22로 가장 높아 적정 포수제 첨가량임을 확인하였다.

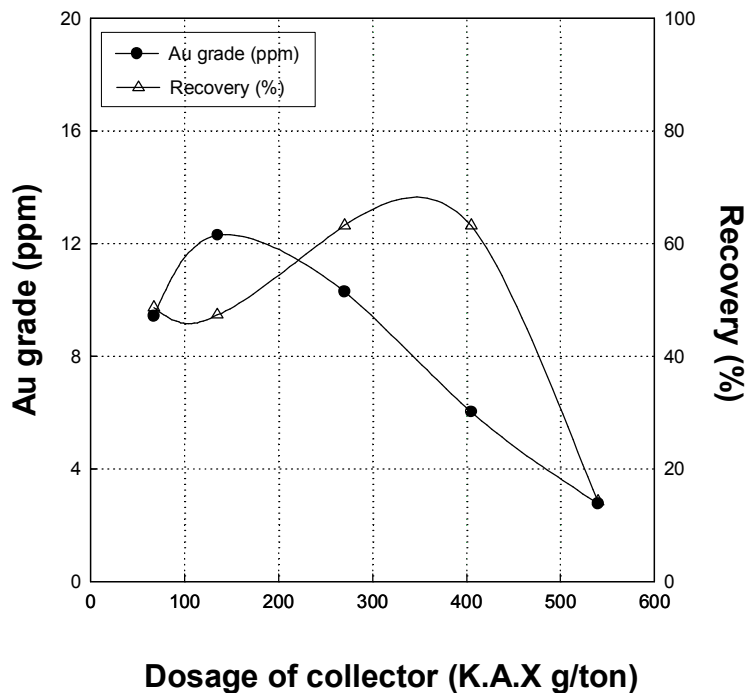


Fig. 4-5. Effects of collector dosage.

(Dp 20%, collector : K.A.X., frother : AF 65(150 ml/ton), R.P.M. : 1200)

제2절. Micro-bubble column 부선

순신광산 부선광미의 입도분석표에서 확인된 바와 같이 -500 mesh의 미립이 전체의 약 54%를 차지하기 때문에 일반 부선만으로는 효과적인 유가금속 회수에 한계가 있었다. 따라서, 본 연구에서는 미립자 처리용 micro-bubble column부선기를 이용하여 선별 효율을 높이는 실험을 실시하였으며 다음 Fig. 4-6에 micro-bubble column부선기 사진을 나타내었다.

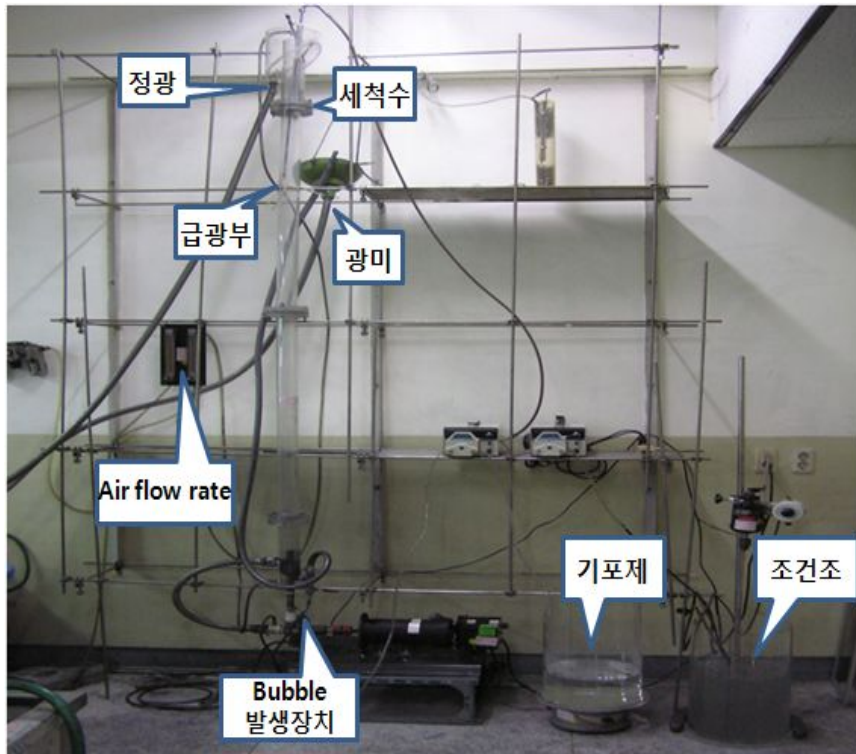


Fig. 4-6. Overall view of micro-bubble column flotation machine.

Table 4-1. Micro-bubble column flotation experimental result of particle size distribution

Sample	Weight (%)	Au (ppm)	Recovery (%)
sample	C	38.12	30.19
	T	61.88	
-100 mesh sample	C	Failed	
	T		
-200 mesh sample	C.	47.04	91.28
	T	52.96	

Table 4-1은 원시료와 100 mesh 와 200 mesh 체로 입도 조절된 시료를 대상으로 예비실험결과 선별효율이 가장 좋았던 시약인 K.A.X(포수제)와 AF 65(기포제)를 사용하여 column 부선을 실시한 결과이다. -100 mesh로 입도 조절하여 column 부선을 실시한 결과 Fig. 2-5에 표시된 flotation zone에서 기포층이 유지되지 못하여 부유선별이 이루어지지 않았다. 이는 Table 3-2의 입도 분석결과에서 본 바와 같이 +25 mesh와 +100 mesh 사이의 비교적 굵은 입도에 평균 품위 이상의 금이 분포하고 있으나, 이 입도의 일부는 높은 비중으로 인해 급광 시 호스에 침전되어 column 내로 투입되지 못하는 경우가 발생하는데 이는 Fig. 4-7에서 보는 바와 같다.

또한, 굵은 입도의 일부는 column내부에 투입되기는 하지만 기포층에 부착하여 정광으로 배출되지 못할 뿐 아니라 광미로도 배출되지 못하고 column내에 잔존하면서 선별에 악영향을 미치기도 하였다.

한편, -200 mesh로 입도조정 후 실험을 실시한 결과 정광의 품위가 1.83 ppm, 회수율 91.28%로 회수율이 가장 높게 나타났다. 원 시료를 micro-bubble column부선을 통한 정광의 Au 품위는 10.8 ppm이었으나, 광미에도 1.3 ppm이 잔존하고 있어 선별 효율이 높지 않았다.

따라서, column부선에 적합한 입도범위로 조절하기 위해 attrition mill로 5~20분 까지 분쇄시간을 변화시키며 실험을 실시하였으나, 분쇄 과정에서 발생하는 slime의 영향으로 인해 기포층이 형성되지 않아 Fig. 4-8 부선 공정도와 같이 slime 발생을 최소화

하도록 325 mesh 체를 이용하여 -325 mesh 산물은 micro bubble column 부선실험을 +325 mesh 산물은 disc mill로 re-grinding 한 후 실험을 수행하였다.

하지만 이 역시 disc mill에 의한 re-grinding에 의해 발생된 미립의 slime에 의해 기포층 형성에 어려움이 있었으며 slime에 의해 기포층 형성 문제를 해결하기 위해 부선에 적합한 입도로 입도조절 하는 실험을 실시하였다.

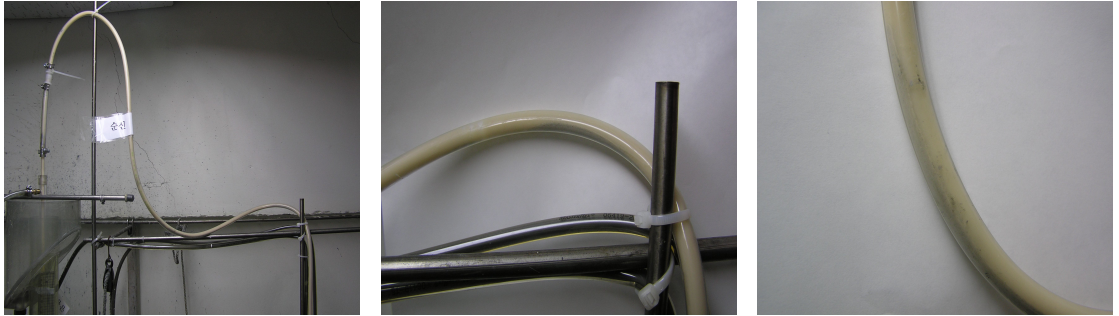


Fig. 4-7. Feeding tube on micro-bubble flotation column.

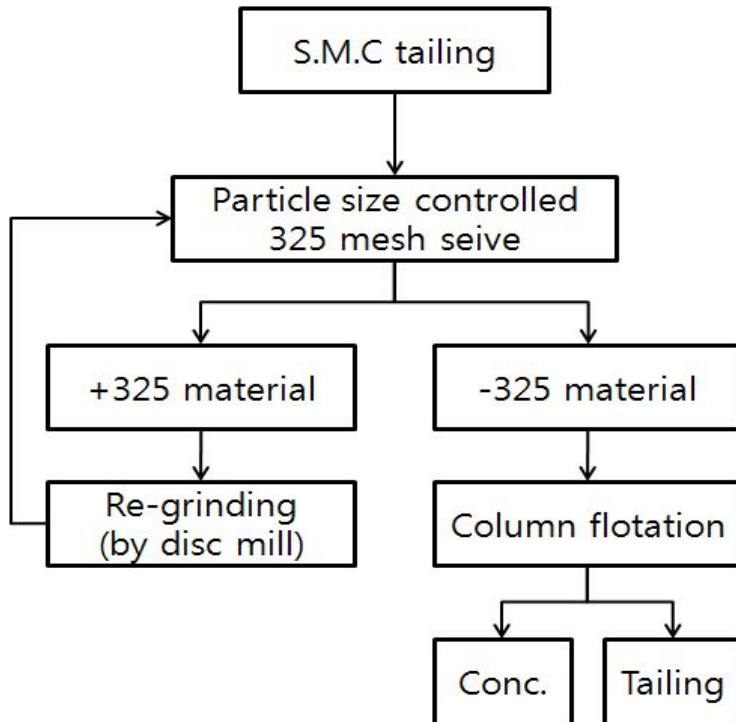


Fig. 4-8 Micro-bubble column flotation flow sheet.

제5장. 입도조절

제1절. 침강시간에 따른 영향

Slime을 제거하기 위한 적정 침강시간 및 침강높이를 확인하기 위해 분쇄하지 않은 순신평미를 사용하여 광액농도 10%, 교반시간 5분을 부여한 후 침강시간을 5~50분까지 변화시키며 실험을 실시한 결과 Table 5-1와 같다. 무게비(wt.%)는 침강시간이 늘어날수록 bottom에 산물의 무게비가 늘어났으며 비교적 비중이 무거운 Au와 Ag의 함량이 증가함을 확인할 수 있었다.

한편, 6~10ℓ 부분의 유가금속의 함량은 시간이 증가함에 따라 Au기준 0.77~0.60 ppm으로 큰 차이가 없었으며 bottom~3 ℓ 침강산물을 대상으로 예비실험을 실시한 결과 기포층의 형성이 어려웠고 부선흡율이 저하되었다. 이는 침강시간이 길어질수록 미립의 slime또한 침강하여 부선에 안 좋은 영향을 미친 것으로 사료된다.⁵⁾

Table 5-1. Effect of sedimentation time

Time	Location	Weight (%)	Au (ppm)	Ag (ppm)
5 min.	6~10 ℓ	11.43	0.77	13.23
	3~6 ℓ	40.74	2.56	28.21
	3 ℓ ~bottom	47.83	1.33	20.33
15 min.	6~10 ℓ	8.40	0.83	14.88
	3~6 ℓ	33.28	3.41	31.19
	3 ℓ ~bottom	58.32	0.97	19.03
25 min.	6~10 ℓ	8.29	0.60	12.06
	3~6 ℓ	30.51	0.73	13.60
	3 ℓ ~bottom	61.20	2.44	28.73
50 min.	6~10 ℓ	4.92	0.60	16.07
	3~6 ℓ	26.47	0.61	8.65
	3 ℓ ~bottom	68.61	2.30	28.64

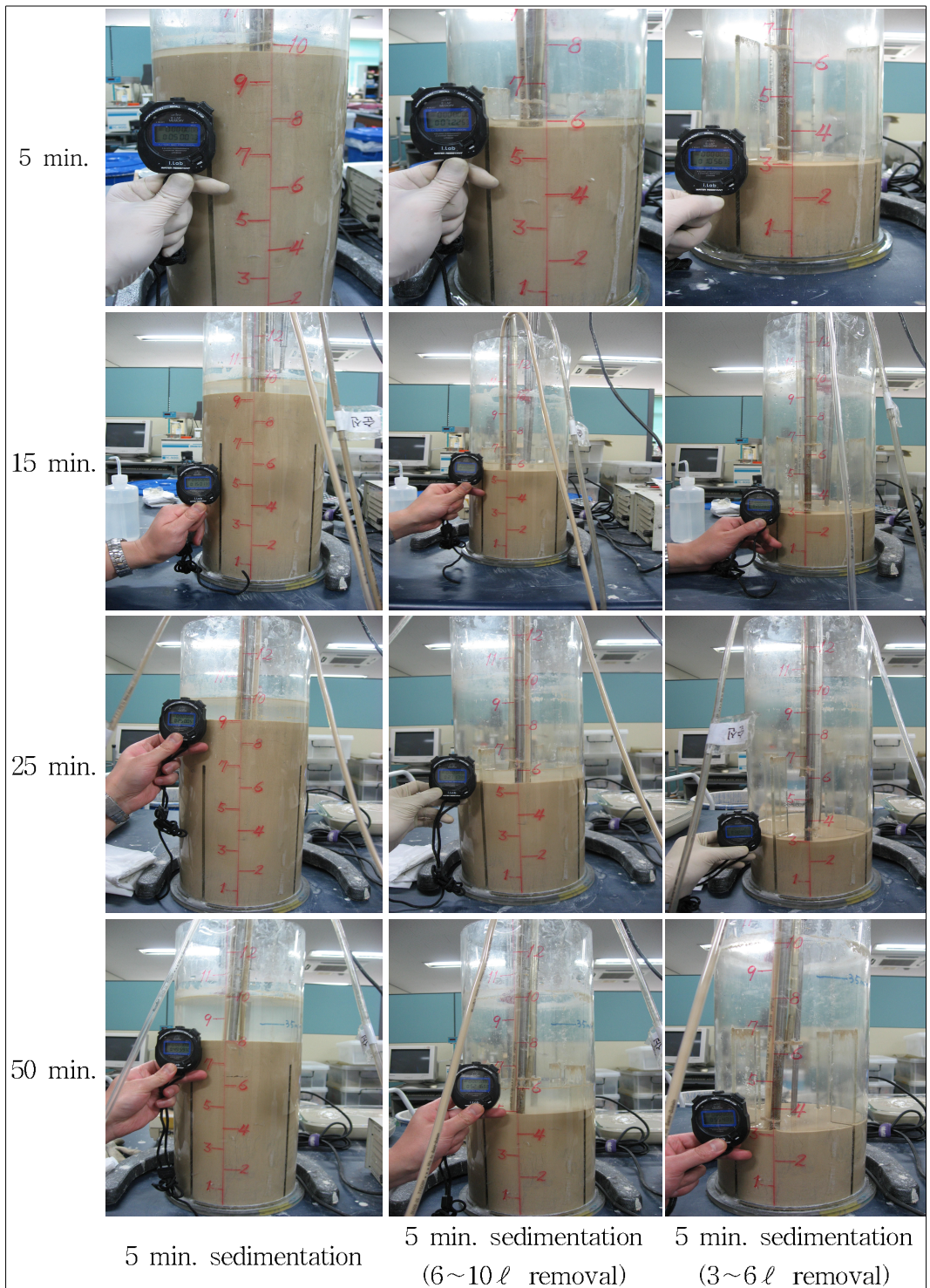


Fig. 5-1. Experiment picture on sedimentation time.

제2절. 침강법을 통한 입도조절

침강시간에 따른 영향 실험에서는 원 시료에 -500 mesh의 산물이 전체의 약 43%이상 존재하고 있으며 침강시간이 증가할수록 slime 또한 가라앉아 미립의 slime을 제거하는데 한계가 있음을 확인하였다.

따라서, 부선에 적합한 입도로 조절하기 위해서 침강시간을 30~120초 까지 침강시간을 변화시켰으며 얻은 산물들은 Fig. 5-2와 같다.



Fig. 5-2. Product of sedimentation according to time.

침강시간에 따른 산물들의 입도를 확인하기 위해 한국지질자원연구원에 의뢰해 입도 분석과 성분 분석 한 결과 Table 5-2에 나타내었다. 입도분석결과 침강시간이 증가함에 따라서 sink 산물은 평균입도 D(50)을 기준으로 142.71 μm ~124.90 μm 로 줄어들었으며 float 산물 역시 16.05 μm ~11.66 μm 로 입도가 작아지는 것으로 나타났다.

침강시간별 산물들을 성분분석 한 결과 sink 산물의 Au 품위는 2.83~2.40 ppm으로 감소하였으며 이는 시간이 증가함에 따라 비중이 비교적 가벼운 불순물들이 같이 침강하여 감소하는 것으로 사료된다. Float 산물 역시 Au 품위 1.15~0.84 ppm으로 감소하였는데 이 역시 비중이 비교적 무거운 Au가 침강하여 Au 품위가 감소함을 확인하였다.

따라서, 1 ppm 이하이며 d(50)을 기준으로 평균입도가 11.66 μm 인 120초 침강 후 float산물을 대상으로 Fig. 5-3의 공정도와 같이 float 산물은 micro-bubble column 부선을 실시하고 sink 산물은 disc mill에 의해 re-grinding하여 일반부선을 실시하였다.

Table 5-2. Result of particle size analysis and component analysis on sedimentation time

	Sample	Weight (%)	D(10)	D(50)	D(90)	Au (ppm)
Sink	30 sec	43.57	35.23	142.71	384.54	2.83
	60 sec	46.72	23.41	132.14	384.86	2.73
	90 sec	49.15	21.83	126.98	363.77	2.57
	120 sec	49.45	20.60	124.90	324.57	2.40
Float	30 sec	56.43	1.88	16.05	212.91	1.15
	60 sec	53.28	1.84	14.59	151.22	1.13
	90 sec	50.85	1.62	12.66	140.14	1.07
	120 sec	50.45	1.61	11.66	103.72	0.84

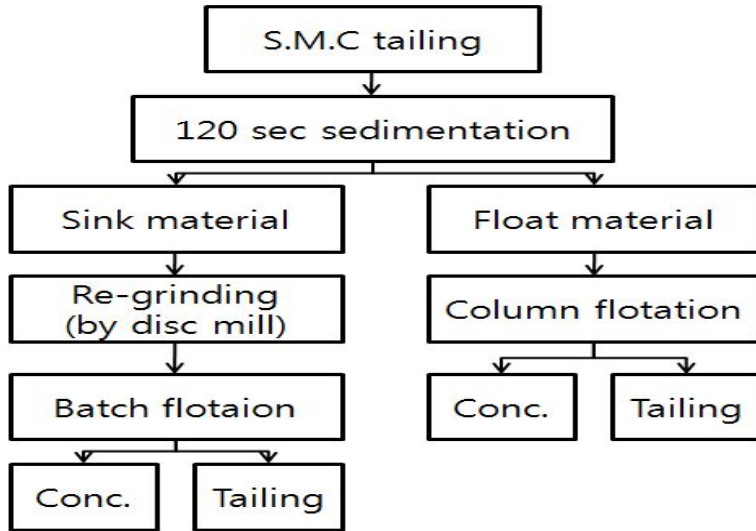


Fig. 5-3. Flotation flow sheet of 120 sec sinkage material.

Table 5-3. Result of micro-bubble column flotation of float product of timed sedimentation

Sample		Weight (%)	Au (ppm)	Recovery (%)
30 sec float sample (Feed Au: 1.15 ppm)	C	15.00	1.47	84.31
	T	85.00	0.53	
60 sec float sample (Feed Au: 1.13 ppm)	C	44.74	1.13	98.76
	T	55.26	0.37	
90 sec float sample (Feed Au: 1.07 ppm)	C	44.41	0.97	98.23
	T	55.59	0.47	
120 sec float sample (Feed Au: 0.87 ppm)	C	38.47	1.03	85.45
	T	61.53	0.53	

각 침강시간별 float 산물을 대상으로 micro-bubble column 부선을 실시한 결과 Table 5-4에 나타냈으며 광미의 유가금속 함량을 기준으로 60초 침강 float 산물의 선별효율이 가장 좋은 것으로 확인되었다.

Table 5-4. Results of batch flotation of sink materials of timed sedimentations
 (Dp 20%, collector : K.A.X.(270 ml/ton), frother : AF 65(150 ml/ton),
 R.P.M. : 1200)

Sample		Weight (%)	Au (ppm)	Recovery (%)
30 sec sink sample	C	20.93	6.72	49.70
(Feed Au: 2.83 ppm)	T	79.07	1.80	
60 sec sink sample	C	13.28	14.13	68.73
(Feed Au: 2.73 ppm)	T	86.72	1.10	
90 sec sink sample	C	21.89	7.22	70.01
(Feed Au: 2.57 ppm)	T	78.11	1.60	
120 sec sink sample	C	12.58	13.46	70.55
(Feed Au: 2.40 ppm)	T	87.42	1.30	

Table 5-5는 침강시간별 sink 산물을 대상으로 제반조건들을 모두 동일하게 한 후 일반부선을 실시한 결과로, Au 품위는 60초 침강산물이 Au 품위 13.28 ppm, 회수율 68.73%로 가장 높았으나 Table 5-3에서 120초 침강 후 float 산물의 Au 품위가 0.84 ppm으로 낮아 품위와 회수율을 고려했을 때 120초 침강 후 Au 품위 13.46 ppm, 회수율 70.55%로 가장 좋음을 확인하였다.

Table 5-5. Result of micro-bubble column flotation on 120 sec float product
 (Feed Au: 1.13 ppm)

Sample		Weight (%)	Au (ppm)	Recovery (%)
120 sec float	C	44.74	1.13	98.76
material	T	55.26	0.37	
120 sec float	C	38.80	1.53	99.11
material (add depressant)	T	61.20	0.36	

하지만 120초 침강 후 sink 산물의 입도가 너무 커서 정광으로 회수되지 못하고 광미에 남아 있는 Au 품위가 1.30 ppm이었다. 따라서 120초 Sink 산물의 금을 더 많이 회수하기 위한 적정입도로 조절하기 위해 Fig. 5-4 부선공정도와 같이 120초 침강 sink 산물을 disc mill로 분쇄 후 +325 mesh 산물은 일반부선을 실시하고, -325 mesh 산물은 column 부선을 실시하였다. 한편, float 산물은 짧은 시간동안 침강공정을 거쳐 사

전에 제거하면 무게비를 50%까지 줄일 수 있으므로 실제 생산 공정에 적용할 경우 처리 비용을 절감할 수 있으며⁵⁾ 새로운 용도로 용도 개발하여 재활용할 수 있을 것으로 사료된다.

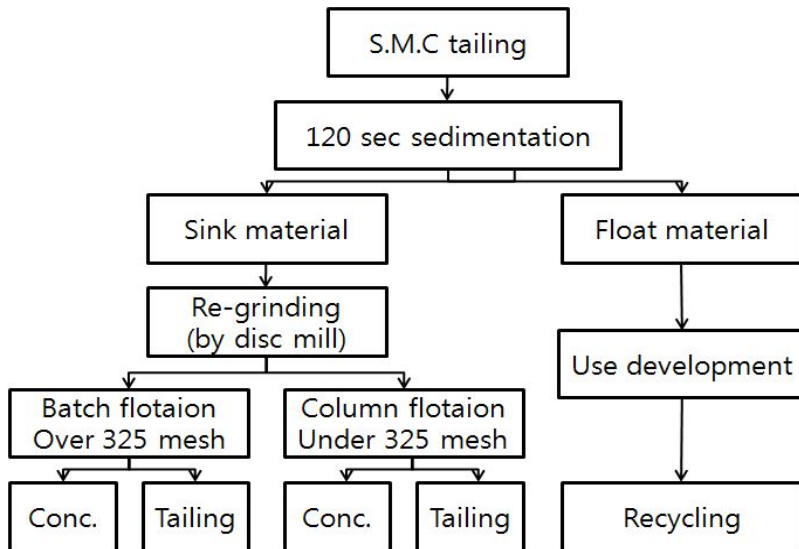


Fig. 5-4. Flotation flow sheet after applying the sedimentation.

침강산물의 예비실험결과 선별효율이 가장 높았던 60초 침강 float 산물을 대상으로 포수제(K.A.X) 300 ml/ton, 기포제(AF 65) 0.5 kg/ton, 급광량 50 g/min. 등의 조건을 동일하게 한 후 억제제인 sodium silicate의 첨가 유무에 따른 영향을 확인하기 위해 column 부선을 실시한 결과 정광과 광미의 Au 품위 모두 억제제를 첨가한 경우 부선효율이 더 좋음을 확인하였다. 60초 float 산물의 column 부선 정광과 광미를 Fig. 5-5에 나타내었다.



Concentrate



Tailing

Fig. 5-5. Concentrate and tailing on micro-bubble column flotation.

제6장. 입도조절 한 시료

침강법을 적용하여 120초 침강 후 sink산물을 disc mill로 re-grinding하여 일반부선에 적합한 +325 mesh 산물과 micro-bubble column 부선에 적합한 입도인 -325 mesh로 입도 조절하였다.

예비실험에서의 조건과 동일하게 하기 위하여 +325 mesh 산물과 -325 mesh 산물의 무게비를 50:50으로 조절한 후 +325 mesh 시료를 대상으로 기포제, 포수제, 억제제 첨가량 변화를 확인하는 일반부선 실험을 실시하였다.

-325 mesh로 조절된 시료는 적정 시약 첨가량을 확인하기 위해 예비실험에서 효과적인 포수제로 확인 된 K.A.X (potassium amyl xanthate), 억제제(sodium silicate)와 황화제(sulfidizing agent)의 한 종류인 sodium sulfide 첨가량에 따른 영향을 확인하는 micro-bubble column 부선을 실시하여 적정시약 첨가량을 확인하였다.

한편, 시약 첨가량을 일정하게 한 후 세척수량과 air flow rate 에 따른 선별효율을 확인하기 위해 추가적인 실험을 실시하였다.

제1절 일반부선

1. 기포제 첨가량에 따른 영향

Fig. 6-1은 침강법 실험에서 얻은 120초 침강산물을 re-grinding하여 60×325 mesh로 입도 조절된 시료를 대상으로 적정 기포제 첨가량을 확인하기 위해 기포제 종류에 따른 영향에서 선별효율이 높은 기포제(Fig. 4-2 참조)로 확인된 AF 65를 사용, 50~500 ml/ton까지 변화를 주어 첨가량에 따른 영향을 확인한 결과이다.

가장 효과적인 기포제로 확인된 AF 65를 248 ml/ton 첨가하였을 때 Au 품위 11.35 ppm, 회수율 45.38%로 입도 조절 전 기포제 첨가량 150 ml/ton (Fig. 4-3 참조)보다 시약 첨가량이 증가 하였음에도 불구하고 Au 품위는 약간 상승하였지만 회수율은 감소하는 경향을 보였다. 이는 grinding으로 인한 새로운 표면의 형성과 입도크기의 감소 그리고 분쇄 media에 의한 오염 등에 기인한 것으로 사료된다.¹¹⁾

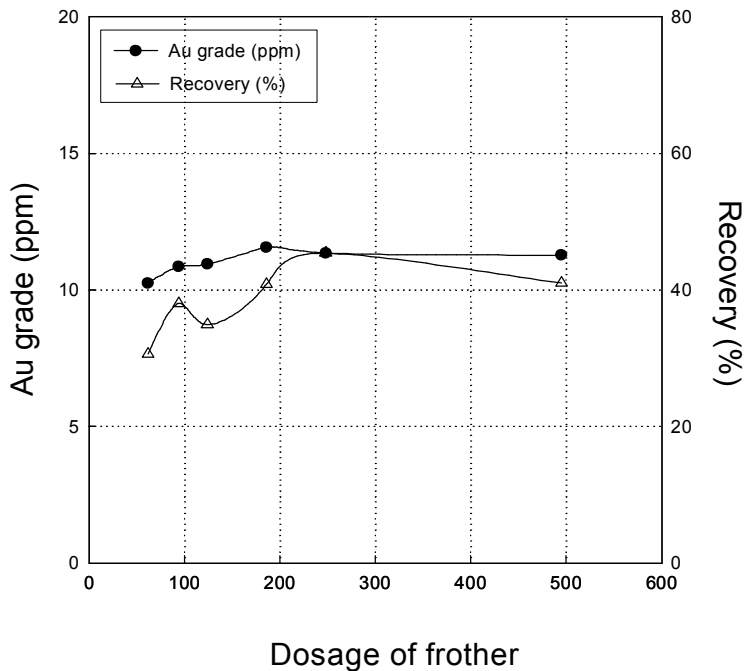


Fig. 6-1. Effects of frother dosage on +325 mesh material.

(Dp 20%, collector : K.A.X(65 ml/ton). frother : AF 65, R.P.M : 1200)

2. 포수제 첨가량에 따른 영향

Fig. 6-2는 적정 포수제로 확인된 K.A.X(Fig. 4-4 참조)를 이용하여 30~130 ml/ton의 범위에서 첨가량 변화실험을 실시한 결과, 첨가량이 증가하면 회수율은 점점 증가하다가 100 ml/ton 이상부터 점점 감소하였고 Au 품위는 80 ml/ton 까지 증가하나 그 이상 첨가하면서부터 감소하였다. 선별도 지수 계산 결과 K.A.X를 97.2 ml/ton 첨가하였을 때 Au 품위 14.78 ppm, 회수율 52.65%로 가장 좋음을 확인하였다. 한편 입도 조절 전 적정 시약 첨가량 270 ml/ton (Fig. 4-5 참조)보다 +325 mesh로 입도조절한 후 포수제 첨가량이 감소하였는데 이는 Bravo 등(2005)이 실험한 결과와 같이 금을 포함한 황화광물의 입자크기가 클수록 적은 포수제 첨가만으로 소수성 입자의 표면과 기포의 결합 안정성이 증가되기 때문으로 사료된다.¹³⁾

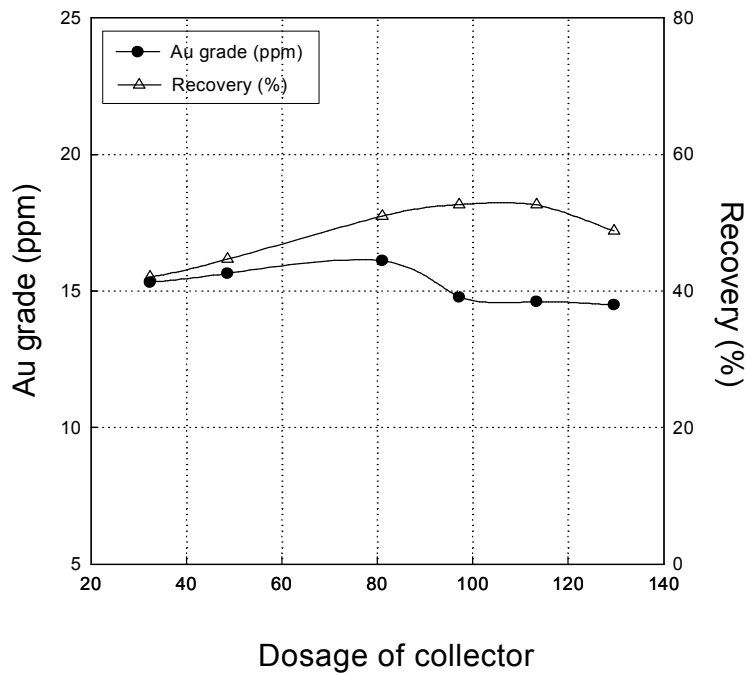


Fig. 6-2. Effects of collector dosage on +325 mesh material.
(Dp 20%, collector : K.A.X.. frother : AF 65, R.P.M : 1200)

3. 억제제 첨가량에 따른 영향

Fig. 6-3 는 Au 품위와 회수율을 높이기 위한 방법으로 규산염광물의 억제에 사용되는 sodium silicate 첨가량을 1~5 kg/ton 까지 변화시켜 실험한 결과이다. 억제제 첨가량이 증가할수록 맥석인 Si계 광물의 분산과 억제로 인해 Au 품위는 증가하는 반면에 회수율은 4 kg/ton 이상부터 감소하였다. 이는 Yin (2010) 등이 실험을 통해 제시한 sodium silicate 첨가량이 어느 한계량을 초과하게 되면 광액속의 Eh(SHE)/mV의 음의 값이 커져 회수율이 저하된다는 결과와 유사한 이유로 사료된다.¹³⁾ 한편, sodium silicate를 4 kg/ton 첨가하였을 때 Au 품위 21.31 ppm, 회수율 62.73%로 본 연구에서 Au 품위가 가장 높은 조건임을 확인하였다.

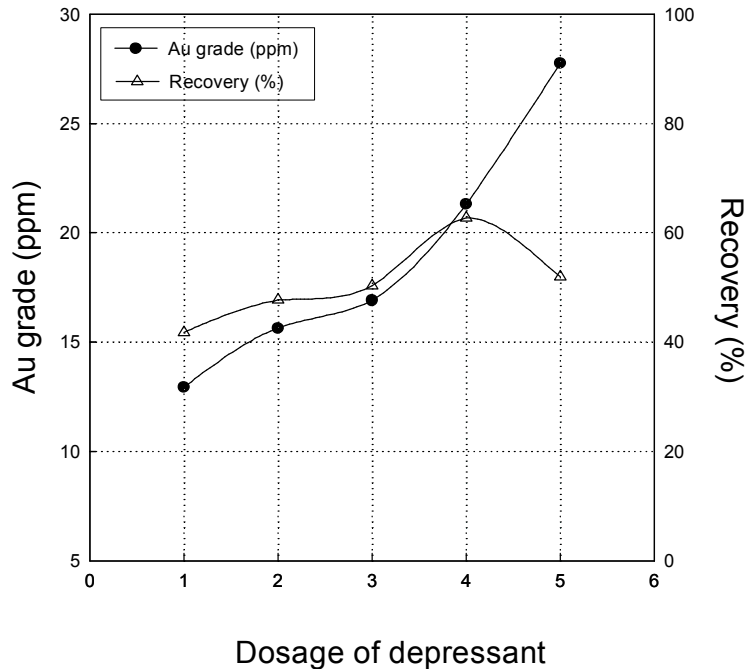


Fig. 6-3. Effects of depressant dosage on +325 mesh material.
 (Dp 20%, collector : K.A.X.(97.2 ml/ton), frother : AF 65(126 ml/ton), depressant : sodium silicate, R.P.M. : 1200)

제2절. Micro-bubble column 부선

1. 포수제 첨가량에 따른 영향

원 시료에 비해 -325 mesh로 입도 조절한 시료에 많은 양의 Au (3.5 ~ 4.5 ppm)가 함유되어 있어, 이를 효과적으로 회수하기 위한 적정 포수제량을 확인하기 위해 포수제 첨가량을 0.05~1 l/ton까지 변화하면서 실험을 실시한 결과 Fig. 6-4과 같다.

일반부선의 결과와 다르게 K.A.X 500 ml/ton이 적정 첨가량으로 Au 품위 6.84 ppm, 회수율 91.76%였다. micro-bubble column의 경우 포수제인 K.A.X의 첨가량이 증가할수록 품위와 회수율이 증가하여 선별효율이 향상되는 것을 확인하였다. 따라서, 포수제의 첨가량을 1.5 l/ton로 고정한 후 향후 실험을 진행하였다.

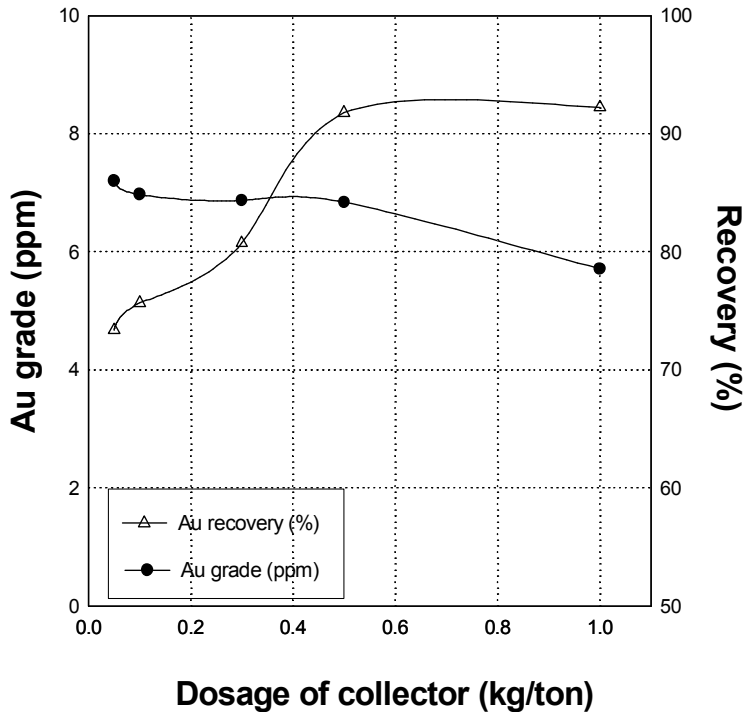


Fig. 6-4 Effects of collector dosage on -325 mesh material.

2. 억제제 첨가량에 따른 영향

Fig. 6-5는 적정 억제제 첨가량을 확인하기 위해 포수제인 K.A.X 65 ml/ton을 첨가, 기포제 DF 250 첨가량을 1 l/ton으로 한 후 억제제인 sodium silicate의 양을 0.5~3 kg/ton까지 변화시키면서 실험한 결과이다. 억제제 첨가량이 증가할수록 정광의 품위는 향상되나 회수율은 저하되었으며, 2 kg/ton 첨가하였을 때 Au 12.85 ppm, 회수율 84.59%의 산물을 얻을 수 있었다.

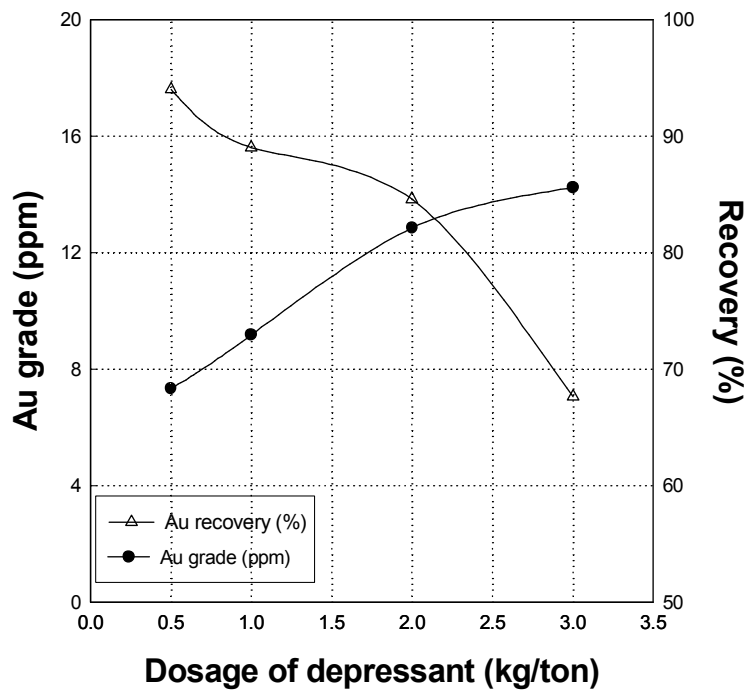


Fig. 6-5. Effects of depressant dosage on -325 mesh material.

3. 황화제 첨가량에 따른 영향

대상 시료인 순신광미는 실험에 사용되기 위해 탈수 및 건조, 분쇄 과정을 거치면서 광물 표면이 산화를 받아서 S와 관련된 결정격자가 깨어져, 포수제의 흡착이 불안정하므로 그 표면을 재 황화 함으로써 포수제에 쉽게 결합하여 부유선별 효율을 높일 수 있도록 황화제(sulfidizing agent)의 한 종류인 sodium sulfide를 첨가하여 선별효율을 확인하였다. 하지만, 황화제를 첨가하기 전 결과 보다 선별도지수가 낮게 나와 선별효율을 높이는 데는 어려움이 있음을 확인하였다.

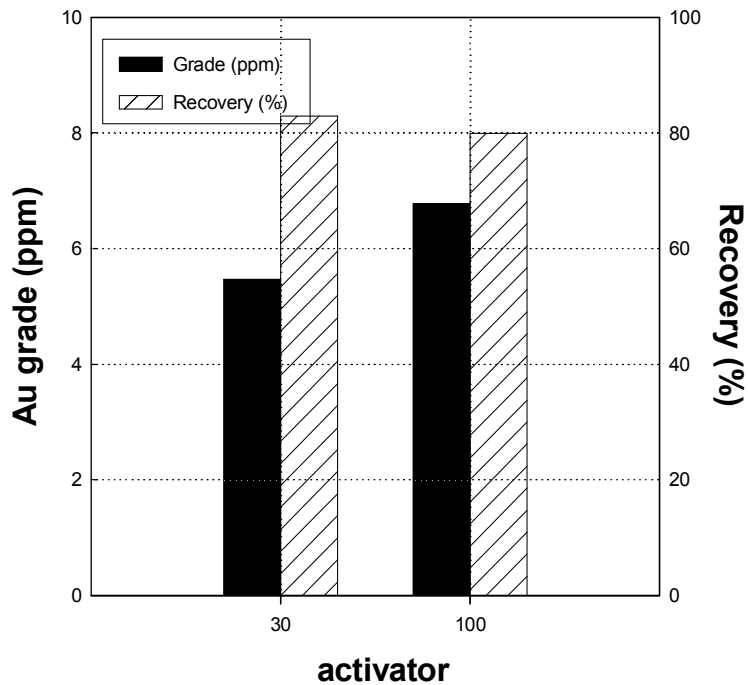


Fig. 6-6. Effects of activator dosage on -325 mesh material.

4. 세척수량에 따른 영향

일반부선과 비교해 세척수에 의한 품위와 회수율을 조절할 수 있는 column 부선에서 적정 세척수량을 확인하기 위해 세척수량을 280~1,000 ml/min.까지 변화시키면서 실험을 실시한 결과 Fig. 6-7과 같았다.

세척수량이 증가할수록 맥석에 대한 세척효과가 향상되어 Au의 품위는 5.43 ppm에서 19.31 ppm까지 증가하지만, 회수율은 97.42%에서 53.95%까지 급격히 감소하였다. 한편, 세척수량이 630 ml/min.일 때 Au 10.07 ppm의 산물을 89.69%의 회수율로 얻을 수 있어 적정 세척수량임을 확인하였다.

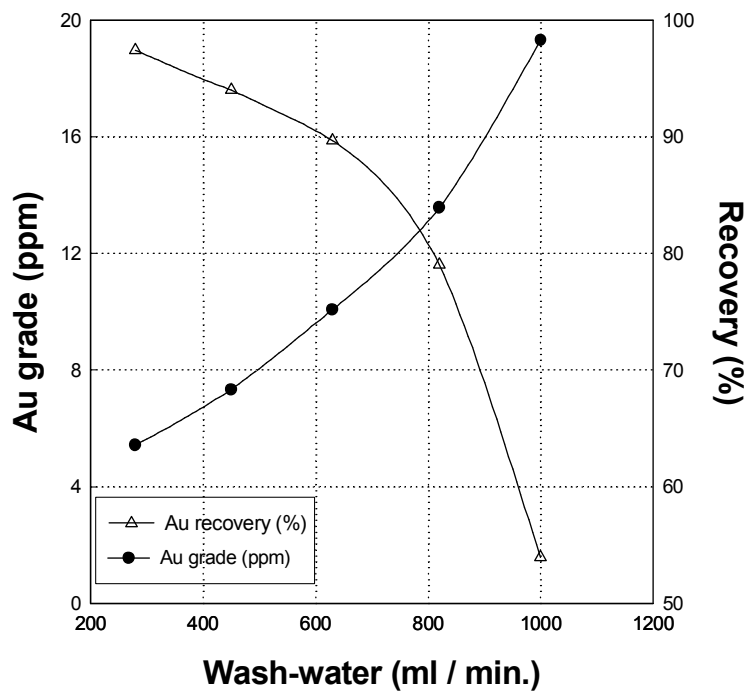


Fig. 6-7. Effects of wash water amount on -325 mesh material.

5. Air flow rate에 따른 영향

Micro-bubble column 부선에서 선별효과에 영향을 미치는 중요한 인자 중 하나인 air flow rate의 변화에 따른 영향을 확인한 결과 Fig. 6-8과 같이 air flow rate가 증가함에 따라 회수율은 점점 증가하나 Au의 품위는 낮아짐을 확인하였다.

본 실험에서는 air flow rate가 960 ml/min.일 때 최적조건으로 Au 품위는 14.17 ppm, 회수율은 87.75%이었다. 한편 air flow rate가 낮은 경우 bubble size는 작으나 기포층 형성 및 유지가 용이하지 않아 품위와 회수율에 영향을 주었으며, 반대의 경우 bubble size가 커져 맥석이 동반 부유되며 기포층의 위치가 높아져 분리효율이 낮았다. 따라서, 적당한 기포층의 위치와 500 μm 전 후의 적은 bubble size를 유지하여야 분리효율이 좋을 수 있었다.

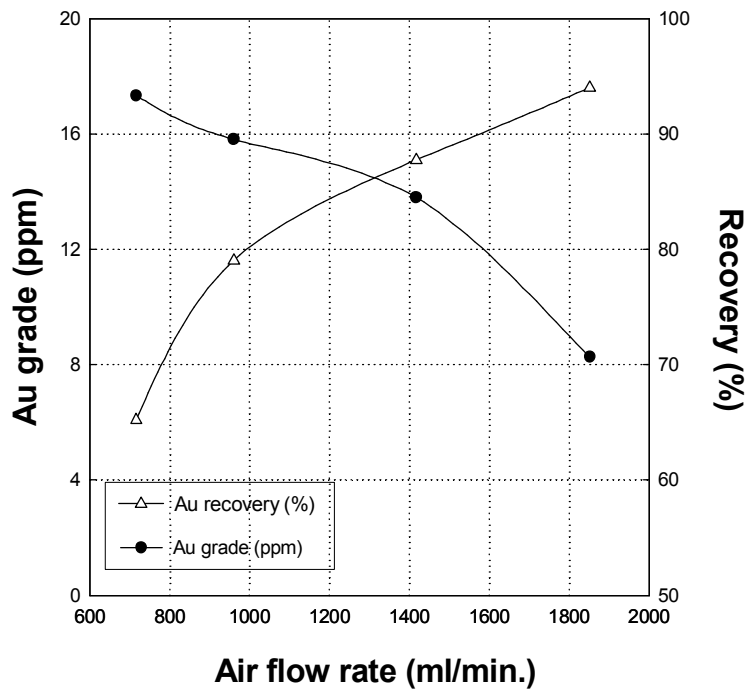
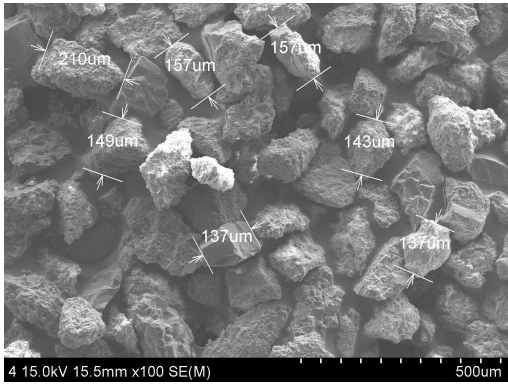


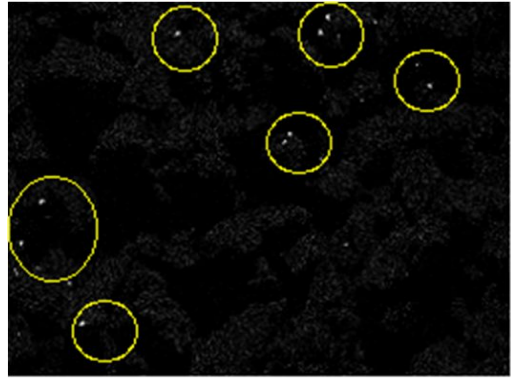
Fig. 6-8. Effects of air flow rate on -325 mesh material.

제7장. SEM 및 원소별 mapping

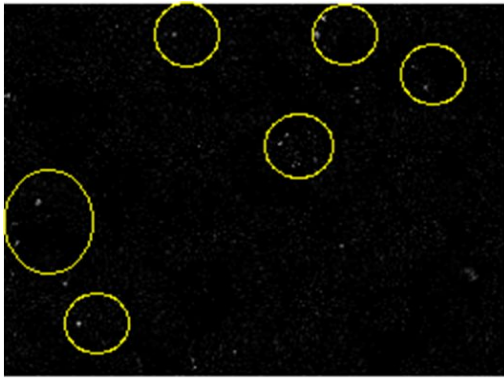
다음은 원 시료의 단체분리도를 확인하기 위해 습식 입도 분석한 산물을 SEM 및 원소별 mapping 한 결과이다. Fig. 7-1은 100×140 mesh 입도범위의 산물을 100배 배율로 SEM과 원소별 mapping 한 사진으로 유가금속인 Au와 황화광물로 추정되는 Fe가 같은 위치에 다른 맥석광물과 단체분리 되지 않은 상태로 존재 하고 있었다. Fig. 7-2는 -500 mesh의 산물을 300배 배율로 SEM과 원소별 mapping 한 사진으로 이 역시 맥석광물과 미 분리된 상태로 Au와 Fe가 함께 존재하고 있었다. 한편, 불순물로는 XRD 분석결과와 성분 분석결과와 마찬가지로 Si, Al, K가 존재하고 있음을 확인할 수 있었다.



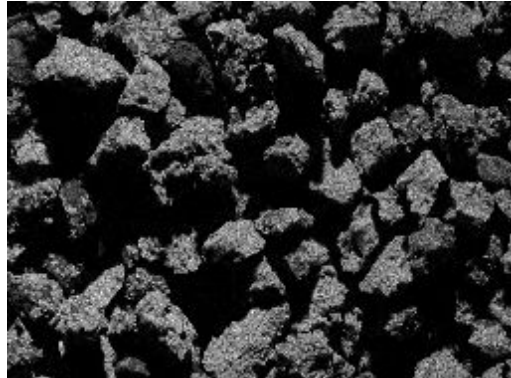
SEM



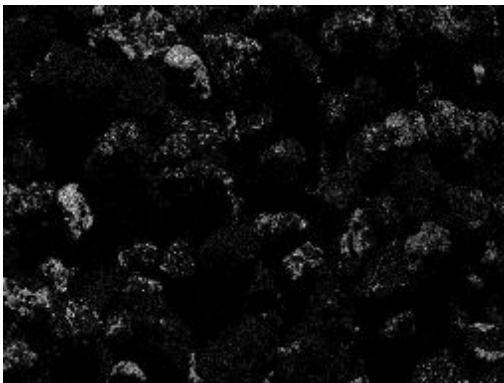
Au



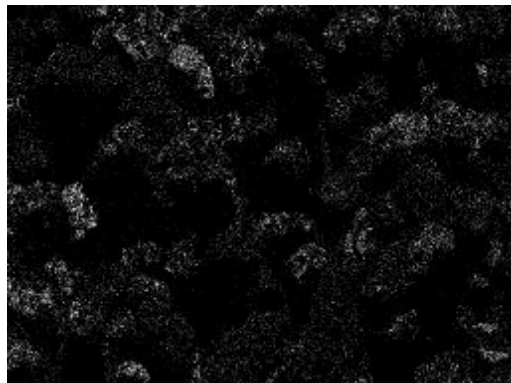
Fe



Si

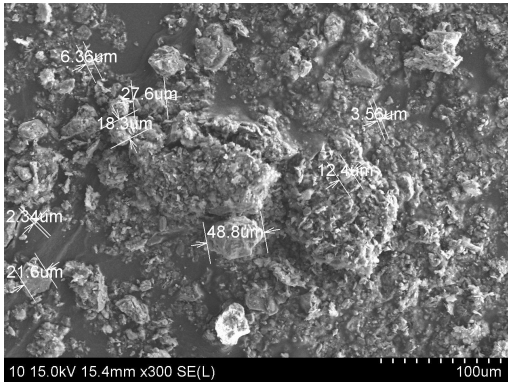


Al

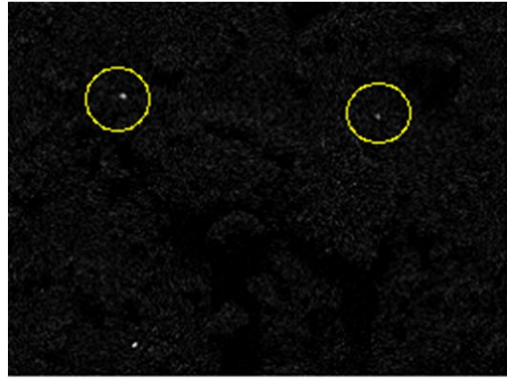


K

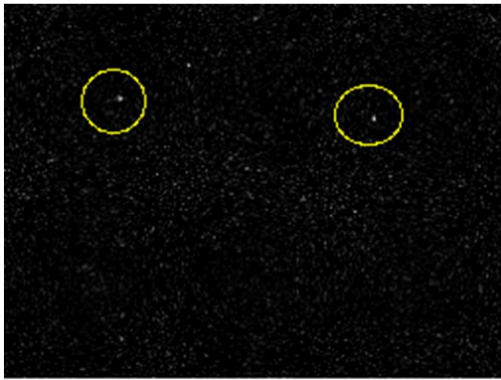
Fig. 7-1. Wet screen analysis by sieve, 100×140 mesh. (×100)



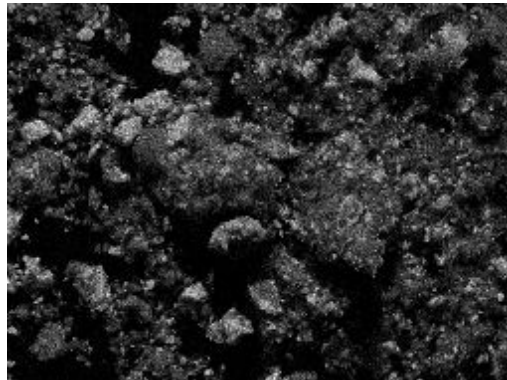
SEM



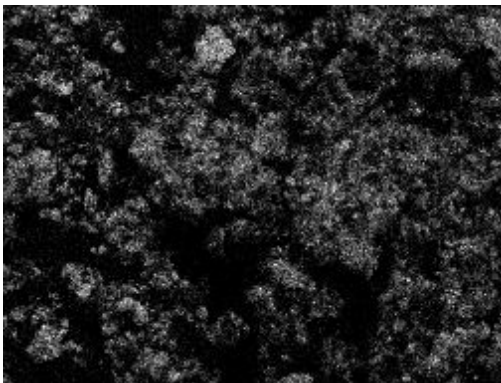
Au



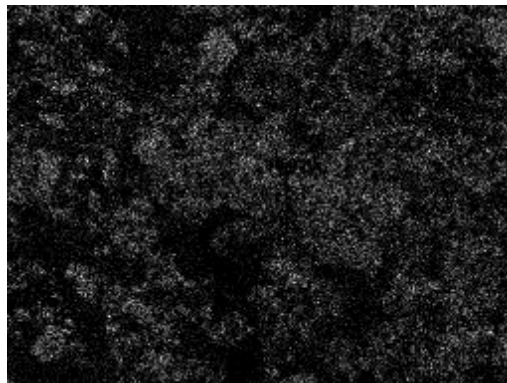
Fe



Si



Al



K

Fig. 7-2. Wet screen analysis by sieve, -500 mesh. ($\times 300$)

제8장. 자력선별 (Magnetic separation)

SEM 및 원소별 mapping 결과 유가금속인 Au가 황화광물로 추정되는 Fe와 함께 존재 하고 있음을 확인하여 고구배 자력 선별기에서 광액 농도 10% 조건에서 자력세기를 5,000 gauss 와 8,000 gauss에서 실험을 실시한 결과 Table 8-1과 같다. 두 자력세기 모두 non-magnetic 산물의 Au 품위가 1.77 ppm으로 확인되어 급광의 품위 1.77 ppm과 차이가 없었으며, 비자성물질인 non-magnetic 산물에도 Au가 1.80, 1.93 ppm 포함되어 있어 자력선별을 통한 Au의 회수는 한계가 있음을 확인하였다. 이는 Fe가 황화광물로 구성되어 있어 자성이 약할 뿐 아니라, 시료의 특성상 Fe 표면에 많은 산화가 이루어져 자력선별에 의한 효율이 낮은 것으로 사료된다.

Table 8-1. Effect of high gradient magnetic separation on magnetism

Magnetism	Sample	Weight (%)	Au(ppm)	Ag(ppm)
5,000 Gauss	magnetic material	0.26	1.77	22.79
	non-magnetic material	99.74	1.80	10.00
8,000 Gauss	magnetic material	0.48	1.77	22.77
	non-magnetic material	99.52	1.93	9.00

제9장. 결론

본 실험에서는 대우조선해양 S.M.C 선광장에서 최종 처리된 광미시료(평균 품위 1.77 ppm)를 이용하여 부선실험을 실시하였으며, 침강법을 적용 120초 침강산물을 re-grinding 하여 325 mesh를 기준 +325 mesh산물은 일반부선 -325 mesh 산물은 micro-bubble column 부선 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 습식 입도분석 결과 +30~-500 mesh까지 다양한 입도로 분포하고 있음을 확인하였다. 한편, Au 품위가 2.3 ppm 이상인 산물이 +200 mesh의 조립질에 많이 분포하고 있어 일반부선에 적합한 입도로 입도조절이 필요함을 확인하였다. XRD 분석 결과 역시 Quartz, Muscovite, Feldspar가 맥석광물로 주를 이루고 있었으며 각 입도별 광물성분은 큰 차이가 없음을 확인하였다.

2. 광액농도변화에 따른 실험결과 광액농도 10%일 때 Au 품위 11.60 ppm, 회수율 58.86%로 가장 좋았으며, 20%일 때 Au 품위 11.57 ppm, 회수율 47.61%로 처리량을 고려했을 때 적정 조건임을 확인하였다. 한편, 그 이상부터는 Au 품위가 급격히 감소하는 것으로 나타났다.

3. 기포제 종류에 따른 영향실험에서 AF 65를 첨가하였을 때 Au 품위가 11.57 ppm, 회수율 47%로 가장 좋음을 확인하였고 AF 65의 첨가량 변화실험을 실시한 결과 150 ml/ton 첨가하였을 때 Au 품위 10.3 ppm, 회수율 63.24%로 가장 좋음을 확인하였다.

4. 포수제 종류별 실험에서 K.A.X를 첨가하였을 때 Au 품위 10.30 ppm, 회수율 63.24%로 가장 효과적이었으며, 첨가량 변화실험에서는 270 ml/ton 일때 Au 품위 10.30 ppm, 회수율 63.24%로 선별효율이 가장 좋았다.

5. 원 시료를 미립자 처리용 micro-bubble column 부선을 실시한 결과 일반부선에 비해 선별효율에 큰 차이가 없었는데 이는 비교적 금 품위가 높은 +325 mesh 산물을 micro-bubble column 부선으로 선별하는데 한계가 있었기 때문이다.

6. 부선에 적합한 입도로 조절하고, 침강법을 적용한 결과 120초 sink 산물의 경우 Au 품위 2.40 ppm이며, float 산물은 Au 함량이 0.84 ppm로 가장 낮았다. 한편, 침강실험을 거치지 않은 원 시료에서 적정 조건으로 확인된 K.A.X 270 ml/ton, AF 65 150 ml/ton의 조건으로 120초 sink 산물을 일반부선 한 결과 Au 품위 13.46 ppm, 회수율 70.55%의 산물을 얻을 수 있었다.

7. 120초 침강 후 sink 산물을 re-grinding하여 +325 mesh로 입도 조절한 시료를 대상으로 일반부선 한 결과 K.A.X 97.2 ml/ton, AF 65 248 ml/ton, sodium silicate 4 kg/ton 첨가했을 때 Au 품위 21.31 ppm, 회수율 62.73%로 re-grinding을 통해 부선효율을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

8. -325 mesh로 입도 조절한 시료를 대상으로 micro-bubble column 부선실험결과 기포제 DF 250 0.2 ml/l, 포수제 K.A.X 500 ml/ton, 억제제 sodium silicate 2 kg/ton 일 때 Au 12.85 ppm, 회수율 84.59%의 산물을 얻을 수 있었다.

9. 세척수량에 따른 실험결과 세척수량이 증가할수록 맥석에 대한 세척효과가 향상되어 품위는 상승하지만 회수율은 저하되었으며, 세척수량 630 ml/min.에서 Au 10.07 ppm의 산물을 89.69%의 회수율로 얻었다. 한편, air flow rate에 따른 영향 실험 결과 960 ml/min 일 때 본 연구에서 최적조건인 Au 14.17 ppm, 회수율 87.75%로 선별효율을 향상시킬 수 있었음을 확인하였다.

11. Au와 맥석과의 단체분리를 확인하기 위해 100×140 mesh와 -500 mesh의 산물을 S.E.M 및 원소별 mapping 결과 Au와 황화광물로 추정되는 Fe가 다른 맥석광물과 미 분리된 상태로 같은 위치에 존재하고 있었으며, Si, Al, K가 불순물로 주를 이루고 있음을 확인하였다.

12. Au가 Fe와 미 분리된 상태로 존재하고 있는 시료를 대상으로 자력선별실험결과 Fe가 황철석을 주로 한 황화광물로 구성되어 있어 자성이 약할 뿐 아니라 시료특성상 Fe 표면에 많은 산화가 이루어져 자력선별에 의한 Au회수는 어려웠다.

참 고 문 헌

1. 한국광물자원공사 [KORES], 2009.10.18, <http://www.kores.net/>
2. 최우진, 2004, “광산폐기물의 재활용 기술 동향과 전망”, 자원환경지질, 제37권, 제1호, pp113-119
3. 이강문, 1985: “광물처리공학”, 반도출판사, 서울, 한국.
4. Wills, B.A., 2006, “*Mineral processing technology(7th)*”, Tim Napier-munn, Elsevier, Burlington, USA.
5. 한오형, 강현호, 2006, “*Microbubble column에 의한 인상흑연의 부선에 관한 연구*”, 한국자원리사이클링학회, Vol. 15, No. 2, pp37-44
6. Wang, J., Hu, Qiu and Zhong, 2000, “*Use of Silver-bearing Concentrates in Bacterial Leaching of Chalcopyrite containing Ore Material*”, Proceedings of 21st International Mineral Processing Congress, Rome, Italy.
7. 유승우, 박홍규, 정문영, 2009: 연탄재 부유선별에서 고정탄소의 산화가 유상포수제 첨가량에 미치는 영향, 한국지구시스템공학회지 Vol. 46, No.5 pp. 582-588.
8. 정문영, 신희영, 박재구, 2000, “역부선법에 의한 국내산 무연탄회의 정제”, 한국자원공학회지, 제 37권, 제 1호, pp72-79
9. Forrest K., Yan D., Dunne R., 2001: “*Optimisation of Gold Recovery by Selective Gold Flotation for Copper-Gold-Pyrite Ores*”, Minerals Engineering, Vol. 14, No. 2, pp. 227-241.

10. Flotation of Copper Sulfide ores - Flotation of copper-gold ores, "*Handbook of Flotation Reagents*", pp. 274-282, Elsevier, Ontario, Canada.
11. Ye X., et. al. ,2010: "*Regrinding sulphide minerals - Breakage mechanisms in milling and their influence on surface properties and flotation behaviour*", Powder Technology, Vol. 203, pp. 133-147.
12. Bravo S. V. C et. al, 2005, "The influence of particle size and collector on the flotation of a very low grade auriferous ore", Mineral Engineering, Vol. 18, pp. 459-461.
13. Yin W. Z., Zhang L. R. and Xie F., 2010, "*Flotation of Xinhua molybdenite using sodium sulfides as modifier*", Transaction of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 20, pp. 702-706.

감사의 글

어느덧 길고도 짧은 2년간의 대학원 생활을 마치면서 그동안 저에게 힘과 용기를 북돋워주신 모든 분들께 감사드립니다.

먼저 학부시절부터 지금까지 항상 저를 믿고 지금의 제가 있게 해 주신 저의 지도교수 한오형 교수님께 먼저 진심으로 감사드립니다. 앞으로도 교수님 제자는 역시 다르다는 말이 나오도록 열심히 하겠습니다.

그리고 부족한 저의 논문을 심사하시느라 고생 많으신 박천영 교수님과 강성승 교수님, 학부시절부터 지금까지 관심과 애정을 갖고 열정적으로 지도해 주신 박영석 교수님, 강추원 교수님, 고진석 교수님 그리고 지금은 자리에 계시지 않지만 저의 진로를 같이 고민해 주시고 상담해 주신 양해승 교수님, 서동우 교수님과 부족한 제가 논문을 쓰는데 물심양면으로 도움을 주신 강현호 선배님에게도 깊은 감사의 말씀을 전해드리고 싶습니다. 형님께 정말 많은 것을 배우고 갑니다. 정말 고맙습니다.

대학원생활을 하면서 2년이라는 시간동안 광물처리실험실 일원으로 많은 일을 배우면서 겪은 일들은 제게는 소중한 경험 이었습니다. 특히 실험실 생활을 하지 않았더라면 만나지 못했을 선배님이신 박철현 선배님, 강현호 선배님, 백상호 선배님과 전호석 박사님 그리고 이렇게 졸업논문이 나오는 데까지 많은 양의 샘플을 분석하는데 도움을 주신 대우조선해양 분석실에 김진형 과장님 정말 고생 많이 하셨습니다.

실험실 생활 2년 동안 가족과 같이 생활했던 선·후배님들께 감사의 말씀을 전해 드리고 싶습니다. 먼저 같은 실험실에서 함께 생활하지 않고 있지만 부족한 저에게 가르침을 주었던 최낙철 선배님 박대우 선배님 김우경 선배님, 이우람 선배님, 윤학중 선배님, 김대모 선배님, 정승희 선배님 동기인 김승은양과 송하림군과 박정일군 채동광군 조강희군에 감사의 말을 전합니다. 그리고 정말 고생 많이 한 우리 종원이와 몽골에서온 Jambal Davaasuren형, 1학년들의 우상 준희, 조사장 수민이, 1년동안 Capston Design을 하면서 실험을 도와준 신웅이, 현준이, 형석이, 미나, 대웅이에게도 감사의 말을 전합니다.

내 인생에서 버릴 수 없는 나의 보물인 내 친구들 기용이, 기철이, 정학이, 치용, 형운, 광서, 선홍이, 그리고 이름을 말하지 못한 친구들에게 미안하고 지금까지 함께 해 줘서 고맙고 또 앞으로 함께 하기에 감사하다고 전해주고 싶습니다.

마지막으로 내가 힘들 때나 기쁠 때나 언제나 내 곁에 있어주는 나의 가족. 아버지, 어머니, 큰누나, 작은누나. 비록 못난 아들, 못난 동생이지만 가족이기에 나를 믿어 주시는 가족이 있어서 지금의 제가 있는 것 같습니다. 아버지, 어머니, 사랑하고 감사합니다.

저작물 이용 허용서

학과	자원공학과	학번	20097078	과정	석사
성명	한글 : 신 승 한 한문 : 申 承 翰 영문 : shin seung han				
주소	광주광역시 북구 중흥2동 모아아파트 102동 504호				
연락처	E-MAIL : shunghancco@naver.com				
논문제목	한글 : 금광산 광미로부터 유가금속회수에 관한 연구 영어 : A Study on Valuable Metal Recovery from Tailing of Gold Mine.				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함.
다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의() 반대()

2010 년 1 월 일

저작자: 신 승 한 (인)

조선대학교 총장 귀하