

## 광산폐기물의 재활용 기술 동향과 전망

최우진

수원대학교 환경공학과

## Review on Reprocessing Technigues for Mineral Wastes

Woo-Zin Choi

Dept. of Environmental Engineering, The University of Suwon, Suwon 445-743, Korea

Mineral wastes are generated by the minerals, mining, and metal industries. These are generally inorganic waste streams of mainly waste rock or residues from refining during extraction of metals or minerals from the ore. There are many plants where minerals are recovered in secondany circuits, treating tailings, where the feed grades are much lower than would be economic on a mined ore. The world is now becoming aware of the finite nature of its resources at a price, and of the ever-increasing development costs of large new mines. Reprocessing of old tailings on a large scale must be worth examining very seriously by those with access to sufficient material of this type. In the present paper, mineral separation techniques to recover valuable metals and resources from the old tailings are reviewed, and new trends for future developments are also discussed.

**Key words :** mineral wastes, tailing, reprocessing, separation technique

광산폐기물은 크게 폐석과 선광공정에서 배출되는 광미 등으로 구분된다. 특히, 광석으로부터 유가자원회수 또는 금속 추출시 제련공정 등에서 얻어지는 광미나 잔류물은 자원 고갈에 따른 재이용 및 환경보전 측면에서 관심이 높아지고 있다. 광미의 경우 일반적으로 함유된 유가자원의 품위가 원광에 비해 낮으나 처리비용은 기존의 선광 처리 비용에 비해 훨씬 저렴하기 때문에 세계적으로 휴·폐광산 지역에서 광미 재처리를 시도하고 있다. 국내에서도 방치된 광산폐기물의 재활용을 촉진하기 위해서는 자원처리 및 회수기술의 개발은 물론 회수된 자원의 활용을 적극적으로 검토할 필요가 있다. 본고에서는 광산폐기물의 재활용기술개발 및 적용 현황, 향후 기술개발 전망 등을 검토하였다.

**주요어 :** 광산폐기물, 광미, 재처리, 선별기술

### 1. 서 론

광산폐기물은 일반적으로 자원처리, 광산 및 금속산업에서 배출되며, 특히 광석으로부터 유가자원회수 또는 금속추출시 제련공정에서 얻어지는 폐석과 광미 또는 잔류물등이 대부분이다. 결과적으로 광산폐기물의 성분은 채굴된 광석이나 정제공정시 첨가되는 약품에 따라 크게 좌우된다. 광산폐기물은 크게 폐석(Mine waste)과 선광공정에서 배출되는 광미(Tailing)등으로 구분된다. 미국의 경우 대부분의 광산폐기물은 구리, 인광석, 금광산에서 배출되고 있으며 광미의 경우 철,

연아연 광석 처리시 많은 양이 배출되는 것으로 알려져 있다. 국내의 경우 강원도 영월군 상동읍에 위치한 상동광산은 해방이후 채광이 실시되어 1992년까지 중석광산으로 개발되었다. 상동광산은 연간 60만여톤을 처리하는 선광시설을 보유하고 있었으며, 본 시설에서 배출된 광미는 현재 약 1200만톤이 적치되어 있는 실정이다. 현재 일부광미는 시멘트원료로 사용하기 위하여 작업이 진행 중이다.

강원도 양양군 서면 장승리에 위치한 양양철광산도 1994년까지 연간 약 30만톤의 철광산을 생산하였으며 그 결과 광미 적치량이 약 20만 m<sup>3</sup>, 폐석 적치량이

\*Corresponding author: wzchoi@suwon.ac.kr

60만 m<sup>3</sup> 이상에 달할 것으로 추정하고 있다(환경부, 2003). 국내 대부분의 광산폐기물은 활용실적이 미미한 수준이며 앞서 언급하였듯이 일부의 경우 시멘트원료 등으로 재활용이 추진되고 있다. 이와같이 국내에 방치된 광산폐기물의 재활용을 촉진하기 위해서는 자원 처리 및 회수기술의 개발은 물론 회수된 자원의 활용을 적극적으로 검토하여야 할 것이다. 이미 알려져 있듯이 광미의 경우 장시간(50년 이상)에 걸쳐 생태계의 영향을 미쳤기 때문에 휴·폐광산 주변의 오염문제 해결은 시급한 실정이다. 특히, 휴·폐광산으로부터 유가 금속회수의 가능성이 매우 높으며 광미 및 폐석등의 재활용등이 자원회수 및 이용측면에서 우선적으로 검토되어야 할 것이다.

본 고에서는 광산폐기물의 재활용기술개발 및 적용현황 등을 제시 하였으며, 또한 향후 기술개발전망 등을 검토하였다.

## 2. 광미 재처리(Retreatment)의 필요성

휴·폐광산에 방치된 광미의 재처리 필요성을 요약하면 다음과 같다.

- ① 광미는 장기간에 걸쳐 생태계에 영향을 미침
- ② 광미에 의한 오염문제해결 및 유실방지
- ③ 유용금속자원의 회수
- ④ 광미의 재활용
- ⑤ 광미재처리 비용은 기존 선광처리에 비해 저렴

전체적으로 원광보다 품위가 낮은 광미를 재처리함으로써 유용금속을 회수하는 사례가 많이있다. 예를 들면 텅스텐 광석의 원광품위는 일반적으로 0.5~1.5% WO<sub>3</sub> 이지만 미국 Climax Molybdenum사의 경우(4,500 톤/일 처리) 재처리되는 광미의 품위는 0.1% WO<sub>3</sub>내외이다. 또한, Sullivan Concentrator(British Columbia) 및 Kidd Creek Plant(Texasgulf at Timmius)의 경우 각각 연·아연 및 구리·연·아연 광미로부터 주석(Sn)을 회수하고 있다. 이 경우 광미의 주석 품위는 각각 0.06과

0.15% 수준이다.

앞서 언급하였듯이 광미 재처리비용은 기존의 선광 처리비용에 비해 훨씬 저렴하며, 그 이유는 광미의 경우 파분쇄 공정이 필요하지 않으며 일반적으로 파분쇄 비용이 전체 선광처리비용의 약 60%를 접하기 때문이다(Wills, 1988). 따라서 세계적으로 휴·폐광산 지역에서 광미 재처리를 시도하고 있다. 남아프리카의 East Rand Gold and Uranium Company(ERGO)의 경우 폐기된 광미로부터 금/우라늄의 회수 및 황산을 제조하고 있다. 상기 회사의 경우 월 150만톤의 slime을 처리하고 있으며 품위는 Au 0.53 ppm, U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> 40 ppm 및 S 1.04%이다.

전 세계적으로 현재 자원고갈에 대한 우려와 새로운 광산개발시 엄청난 비용부담으로 인하여 폐기된 광미의 재처리가 경제적으로 타당성이 크다는 점을 주목할 필요가 있다.

## 3. 광미로부터 유용금속 분리기술

### 3.1. 비중선별(Gravity separation)

비중선별은 광물의 비중차이를 이용하여 유용금속을 함유한 입자와 맥석을 분리하는 기술이다. 이 방법은 부유선광법이 출현하기 전까지는 가장 중요한 선광법이었으나 현재는 부유선광 전후에 조합시켜 보조적인 선별방법으로 많이 활용되고 있다. 비중선별기는 크게 Jig와 Table등이 있으나 전자는 조립(粗粒), 후자는 세립(細粒)의 선별에 이용되고 있다. 비중선별의 문제점은 입자가 작아지면 분리효율이 급격히 떨어지는 단점이 있기 때문에 지난 20년간 미립자의 효율적인 회수를 위해 새로운 형태의 선별기 개발이 이루어져 왔다.

한 예로 Bartles-Mozley 비중선별기는 기존 비중선별기에 비해 광미중의 미립자 회수에 매우 효과적인 것으로 보고 되고 있으며, 비중선별 결과는 Table 1에 요약되어 있다

위 표에서 알 수 있듯이 기존 비중선별기에서 회수가 어려웠던 45 μm이하 크기의 입자도 회수가 가능함

**Table 1.** Results of Bartles-Mozley gravity separation for the mine wastes.

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

을 알 수 있으며, 회수율도 70%수준을 나타내고 있다.

비중선별기를 이용하여 광미를 재활용 사례를 검토하면 스웨덴 Laisvall광산의 경우 Cyclone를 이용하여 Tailing을 처리하여 Slime을 제거한 후 70%의 광미를 폐광산내 장입(Mine refilling)에 활용하고 있다. 미국 New Jersey Zinc Company경우도 Tailing을 Cyclone 처리하여 limestone을 회수하여 연간 20만톤 이상을 Asphalt filler 및 농업용으로 재활용하고 있다.

### 3.2. 부유선별(Flotation)

부유선별은 광물의 표면이 물에 적셔지는 정도, 즉 습윤도(Wettability)의 차이를 원리로 하고 있다. 물에 잘 적셔지는 광물의 표면을 친수성(Hydrophillic)이라하며, 반면에 잘 적셔지지 않는 광물의 표면을 소수성(Hydrophobic)이라한다. 부유선별공정에서는 공기를 광액중에 주입하여 소수성 입자만 선택적으로 기포에 부착시켜 수면에 떠오르게하고, 친수성입자는 물속에 가라앉게되어 분리가 가능하다.

부유선별법은 비중, 자력, 정전기선별법들이 광물의 물리적 성질을 이용하는 반면에 광물의 계면화학적성질의 차이를 이용하는 것이다. 따라서 광물의 부선원리는 매우 복잡하지만 일반적으로 표면장력, 접촉각, 정전기, 흡착현상등 여러각도에서 설명할 수 있다. 예를들면 광물입자와 기포간의 접촉각이 클수록 선별가능성이 증가하는 경향이 있기 때문에 광물의 부유도(Flotability)와 접촉각사이에는 커다란 상관관계가 있는 것으로 알려져있다.

여러 종류의 유용광물이 함유된 복합광석의 경우 각 광물을 차례로 부선시켜 분리하는 방법을 우선부유선광법(Differential flotation)이라한다. 이에반해 우선부유선광의 예비처리단계로서 제1단계에서 혼합정광을 일시에 부유시키는 방법을 종합부유선별법(Bulk flotation)이라한다. 부유선광은 1회실시로끝나는 경우도 있으나 정광을 반복처리하는 것이 보통이다. 부선공정의 제1단계 처리를 粗選(Roughing)이라고 하며 粗選 Froth의 재처리 공정을 精選(Cleaning)이라한다. 그밖에 粗選의 광미를 재처리하는 공정을 Scavenging 이라한다.

부선공정을 적용하여 광미를 재처리한 사례를 검토해보면 미국광무국(USBM)에서는 미조리주 남부에 위치한 폐연광산 광미 약 2~3억톤에 대해 부유선별을 수행하여 광미로부터 연, 구리 및 아연을 대부분 제거하였다. 부선처리후 약95%의 Pb가 제거되어 광미중 Pb 함량이 400 ppm미만이였다. Table 2에서 보여주듯이 구리의 함량도 부선처리후 40 ppm 수준으로 감소하였

Table 2. Results of flotation for the mine wastes.

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

음을 알 수 있다. 회수된 Pb정광은 재처리 농축시켜 제련소에 공급가능한 정광으로 생산하였으며 부선공정서 회수된 Dolomitic limestone은 Mine backfill 및 농업용으로 사용하였다.

그러나, 부유선별의 문제점은 황화광물, 특히 광미중 황철석(Pyrite)함량이 높은 경우(>20%) 부선시 Cu, Zn등의 회수를 어렵게 하기 때문에 부선시약의 선택이 매우 중요하다. 핀란드 Pyhasalmi Cu-Zn 광산의 경우 광미를 부선법으로 재처리하여 광미로부터 산성폐수발생을 근원적으로 차단하였을 뿐 아니라 회수된 금속의 경제성을 평가하였다. 처리전 광미중의 금속함량은 Cu 0.094%, Zn 0.13%, Au 0.7 g/t 및 Ag 8.4 g/t 이었으나 부선후 회수된 정광의 금속함량은 유황 33%, Zn 1%, Cu 0.6%, Gold 2.4 ppm, Silver 36 ppm 이었다. 회수된 정광을 이용하여 금속회수 및 황산을 제조하므로써 연간 약 8~10 million 달러의 수익을 평가 하였다. 호주의 Broken Hill 광산의 경우 1950년대부터 적치된 약 75만톤의 광미를 70년대초에 재처리한 실적이 있다. 광미중에는 약 1.6%Pb(1%산화연), 1.55 ozs Ag 및 2.9% Zn을 함유하고 있으며, 광미를 분쇄, 부선 및 Sulphidizing 처리후 Oxide flotation을 수행하여 Pb회수율 증가 및 시약사용량 절감에 성공하였다. 그밖에 미립황화물 입자는 부선적용이 매우 어렵기 때문에 일반적으로 polymer등을 이용하여 선택응집(Selective flocculation)시킨후 부유선별, Elutriation, Sedimentation공정을 적용하면 쉽게 회수가 가능한 것으로 알려져있다.

다음 Table 3은 금속회수를 위한 부유선별공정의 적용범위를 요약한 표이다.

### 3.3. 자력선별(Magnetic seperation)

광물의 자성(磁性) 차이에 의해 선별을 하는 것을 자력선별이라 한다. 일반적으로 광물은 대자율(Magnetic susceptibility)의 크기에 따라 강자성, 상자성 및 반자성체 또는 비자성체로 분류할 수 있다. 자철광, Fe 등은 강자성체이며 능철광, 적철광, 갈철광등은 약자성체이다. 일반적으로 광석중 맥석은 비자성체로 간주된다. 자력선별기에는 저강도(Low intensity) 및 고강도(High intensity) 자력선별기로 구분되며 저강도자선기는 강자

성물질을 회수할 때 고강도자선기는 약자성물질을 회수할 때 사용된다. 자력선별기는 또한 입자를 수중(水中)에서 선별하는가에 따라 습식 및 건식형으로 나눌 수 있다.

건식선별의 경우는 입자가 작아지면 입자들끼리의 응집현상(凝集)에 의해 선별효과가 떨어지나 습식선별의 경우 3 mm이하의 입도까지도 적용이 가능하다. 고구배자력선별(HGMS)의 경우 약자성물질의 회수는 물론 다양한 폐수로부터 유해금속의 회수가 가능하며 지난 20여년간 이 분야의 새로운 장비개발에 많은 진전을 이룩하였다. 고구배자력선별기는 강한 전자력(電磁力)을 이

용하기 때문에 에너지 소모가 비교적 큰 것이 단점이며 따라서 최근에는 초전도자력선별기 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 초전도자선기의 경우 고령토 미립자로부터 철분 및 TiO<sub>2</sub> 제거 효율이 매우 우수한 것으로 보고 되고 있으며 현재 광산현장에 폭넓게 적용되고 있다. Ferrite coprecipitation과 자력선별기술을 병합하여 용해된 중금속이온의 제거가 가능하며 Ferric hydroxide와 공침된 중금속이온은 HGMS기술을 이용하여 Ferromagnetic 침전물로서 회수할 수 있다.

다음 Table 4은 금속회수를 위한 자력선별공정의 적용범위를 요약한 표이다.

**Table 3.** Metal Recovery by Flotation.

Waste system	Metals	Flotation agent	Flotation mode	Metal separation efficiency %
Cassiterite	Sn	Salicylaldehyde	Foam flotation	
Scheelite	W		Foam flotation	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe	Octylhydroxamate	Foam flotation	
Metal solution	Cu, Pb, Hg	Ethyl(hexadecyltrimethyl) ammonium bromide, etc.	Ion flotation	
Coal/phosphate slime	As	above	Micro gas flotation	
Metal solution	Cd, Cu, Ni	4-dodecyltriethylene triamine	Foam flotation	
Metal solution	Cd, Hg	Hexadecyltrimethyl ammonium chloride	Adsorption colloid + Fe/Al hydroxide	
Metal solution	Co, Cr, Cu, Ni, Zn	Na lauryl sulfate+Fe hydroxide floc	Adsorption colloid +Fe/Al hydroxide	
Wastewater	Cu	Laurylamine acetate	Foam flotation	>90 Cu
Wastewater	Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Zn	Dodecylbenzene sulfonate+metal hydroxide flocs	Adsorption colloid flotation	48-73 for other hydroxides
Wastewater	Cu	Dodecyltrimethyl ammonium+tetradecyltrimethyl ammonium chloride	Foam flotation	89 for Cu(OH) <sub>2</sub> >95 Cu

**Table 4.** Metal Recovery by Magnetic Separation.

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 separator	98 Cu, 94 Pb
Electrical scrap	Al, Cu, Pb	Eddy current separator	<90 as Al alloy
Electronic	Al, Cu	Combination gravity segregation/magnetic separation	
Cable scrap	Cu, Pb	Eddy current separator for Cu/Pb	
Cu dust	Cu, Pb, Cd, As, Co, In, Bi	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> leach followed 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

Table 4에서 알 수 있듯이 자력선별기술은 생활폐기물을 비롯한 폐자동차, 가전제품, 전선, 전지등으로부터 유기금속회수에도 폭넓게 활용되고 있음을 보여주고 있으며, 향후 폐기물로부터 자원의 회수 및 선별에 크게 응용이 될 것으로 기대되고 있다.

### 3.4. 생물학적 처리기술

미생물을 이용하여 광석 또는 광미로부터 유용자원의 회수가 가능하다. 금이나 우라늄과 같은 금속을 몸속으로 흡수하는 미생물들을 선풍 또는 채광에 응용하고 있다(Wang *et al.*, 2000). 실제로 세계에서 생산되는 구리의 1/4은 Thiobacillus ferrooxidans라는 미생물을 이용하여 채취되고 있다. 이러한 유용금속을 채취 하는데 사용되는 미생물은 화산이나 극지등 극한환경에서 서식하는 경우가 많다. 현재 채광 또는 선풍에 활용 가능한 미생물로는 티오옥시단스, 칼두스, 애시디 필리움등 7~8종이 제시되고 있다.

미생물에 의한 금속회수 메카니즘은 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

토양중에 존재하는 sulfate-reducing bacteria 등은 유기물로부터 에너지를 얻어서 hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S)와 bicarbonate(HCO<sub>3</sub>)를 형성한다. 이렇게 형성된 H<sub>2</sub>S는 중금속이온(heavy metal cations)과 반응하여 불용성 금속유화물(insoluble metal sulfide)를 형성한다.



Bicarbonate ion도 금속을 침전시키며 또한 산성을 중화시키며, 광산산성폐수(Acid mine drainage)처리를 위해 자연정화 방식(wetland)을 사용하는 것이 생화학적반응에 의한 금속 침전의 가장 대표적인 예이다. commercial-scale unit의 경우 concrete reactor의 크기가 1800 m<sup>3</sup>에 이르는 것도 있으며, 네델란드의 경우 하루 처리 용량도 7,000 m<sup>3</sup>에 이르는 reactor가 1992 년도부터 가동중에 있다. 또한 고구배자력선별법(HGMS)을 이용하여 약자성 또는 강자성인 metal sulfide, metal phosphate입자 등을 microbial cells 및 기타 debris로부터 분리시킬 수 있다. 따라서 HGMS나 microbially-mediated metal precipitation 방법을 이용하여 용액 중에 용해되어 있는 금속이온을 상당량 제

거 할 수 있는 것으로 알려져 있다.

일반적으로 microbial cell은 음전하를 띠고 있어서 양으로 하전된 금속이온들이 정전기적으로 cell의 표면에 흡착하려는 경향 있다. 이 경우 용액의 pH가 microbial-metal attraction의 중요한 영향을 미치며, 만일 용액의 pH가 낮을 경우 수소이온이 cell의 표면에 흡착이 되어서 양전하의 금속이온보다 CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, SeO<sub>4</sub><sup>2-</sup>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 갖게된다. 따라서 pH가 증가 하게되면 금속이온은 수화물 형태로 침전하게 되어 회수가 가능하다. 한편, Non-living microorganisms을 이용하여 biosorbents를 제조해서 금속이온을 제거하는데 상업적으로 이용하고 있다. 즉, non-living micro-organisms을 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 제품중 BIOCLAIM이라 불리는 흡착제는 polyethyleneimine polymer와 non-living bacteria를 사용한 것이다. USBM에서 개발한 BIO-FIX는 sphagnum peat 등을 polysulfone에 고정화시킨 것이며, 이와같이 다양한 종류의 biosorbents가 개발되었으나 기술적, 경제적인 이유 등으로 아직 상업적으로 크게 이용이 되지 못하고 있는 실정이다.

일반적으로 음으로 하전된 microorganism 표면에 흡착된 금속이온은 living microorganisms에 의해 cell wall 이나 membrane으로 옮겨져서 cell안에 축적된다. 혐기성 wetlands내에서 특정 미생물에 의해 폐수 중에 함유되어 있는 금속이온을 유기물 중에 축적시키는 것이 대표적인 예이다. 또한 광미폐수 중에 함유된 cyanide를 분해하는데 미생물을 폭넓게 이용하고 있다.

그 밖에 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 H<sub>2</sub>S가 Cr<sup>6+</sup>를 Cr<sup>3+</sup>로 환원시킨다. South Dakota의 Homestake 광산에는 1984년부터 bacterial oxidation에 의한 free cyanide, metal-complexed cyanides, thiocyanate분해에 이용하고 있다. 이 기술을 변형하여 현재에는 spent, precious

**Table 5.** Metal Separations using Biological Agents.

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</i> , <i>Chlamydomonas reingardtii</i>	Leach
Metal finishing waste	Cd, Cu, Pb	<i>Cholrella 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</i> , <i>T. thiooxidans</i> , <i>Leptospirillum ferrooxidans</i>	Leach
Metal wastewater	Cd, Cu, Ni, Pb, Zn	<i>Penicillum</i> , <i>Cladosporium</i>	Accumulate
Metal wastewater	Ag, Al, Cd, Cr, Co, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn	<i>Chlorella pyrenodosa</i> , <i>Spirulina</i>	Accumulate

metal heap leaching operation에 응용되고 있다. 또한, uranium을 함유하는 광미의 경우 *Thiobacillus ferrooxidans* 미생물을 이용한 Biore-mediation 기술이 개발되어 현장에 응용되고 있다. 다음 Table 5는 미생물을 이용하여 금속을 용해시키거나 미생물내에 축적시켜 제거하는 공정의 적용범위를 요약한 것이다. 본 Table에서 알 수 있듯이 미생물을 이용하여 광석에서 뿐만 아니라 중금속을 함유하는 폐수나 슬러지로부터 중금속의 용출 또는 축적이 가능함을 알 수 있다.

**4. 결 론**

국내에는 대형금속 광산을 비롯하여 군소광산에 이르기까지 약 1000여개의 휴·폐광산이 전국적으로 산재하여 있으며, 그에 따른 광산폐기물, 특히 광미, 폐석 등이 상당규모 쌓여 있는 것으로 보고되고 있다. 특히, 휴·폐광산의 광미적치장의 경우 장시간에 걸쳐 관리가 제대로 이루어지지 않아 토사붕괴의 위험은 물론 지역에 따라 토양 및 지하수에 대한 중금속 위험 문제가 끊임없이 제기되고 있는 실정이다. 세계적으로도 광미의 재처리문제는 광산개발로 인한 환경오염 문제의 해결 차원에서 뿐만 아니라 유용자원의 회수 및 재활용 측면에서 활발히 검토하고 있다. 국내 폐광산의 경우 대부분의 광산이 유화광물을 개발하였기 때문에 광미에는 유황 함량이 매우 높으며 구성광물도 점토, 석영, 석회석, 장석등을 다량함유하고 있어서 일부 선별 공정을 적용하면 용도에 따라 활용이 가능할 것으로 사료된다. 따라서 폐광산에 적체되어 있는 대량의 광미를 자원으로 활용하기 위해서는 선별기술의 개발, 용도, 경제성분석등 종합적인 검토가 이루어져야 할 것이다. 본 논문에서 광미로부터 유용자원회수를 위한 선별기술, 즉 비중선별, 부유선별, 자력선별, 미생물학적

처리기술등에 대하여 검토하였으며, 적용현황 및 향후 전망등에 대하여 검토하였다.

비중선별기술의 경우 미립자에 적용할 경우 분리효율이 크게 저하되기 때문에 지난 20년간 미립자의 효율적인 회수를 위해 새로운 선별장치의 개발이 이루어져 왔다. 특히 텅스텐, 주석등을 함유한 미립광미의 경우 새로 개발된 Bartles-Mozley 비중선별기를 적용하여 광미로부터 유용금속회수에 매우 효과적인 것으로 보고 되고 있다. 부유선별의 경우 광미가 일반적으로 장기간 방치됨으로 인하여 산화가 이루어진 경우가 많으며, 따라서 우선 마광공정을 적용하여 표면을 처리한 후 부유선별을 실시하는 것이 유용금속의 회수율을 높일 수 있는 방법이다. 또한, 복합황화공으로 이루어진 광미의 경우 부선시 시약의 선택이 매우 중요하며 최근에는 미립자 회수를 위한 새로운 시약 개발 및 컬럼부선기(Column flotator)의 개발이 큰 진전을 이루었다. 최근에는 미생물 유전체 활용기술을 자원회수 및 채광등에 활용하는 Biomining 또는 Bioleaching기술이 개발되어 광미로부터 금, 구리, 우라늄등의 회수에 이용되고 있으며 향후 이 분야의 국내적용도 가능 할 것으로 기대된다.

**참고문헌**

오종기 (1997) 폐광산 오염평가 및 광미활용방안. 휴·폐광산의 환경오염복구 및 활용방안에 관한 심포지움, 2월 27일, p. 15-51.  
 전용원 (1993) 지구자원과 환경, 서울대학교 출판부.  
 최우진 (1996) 금속광산주변토양오염과 폐수처리기술동향. 금속광산주변 지질환경오염 Workshop, 6월 21일 광업진흥공사.  
 최우진 (1993) 자원처리기술의 현황 및 향후전망. 제18회 자원활용심포지움, 8월 27일, 한국자원연구소, p. 69-79.  
 Waste processing and recycling (1992) proceedings, Canadian Inst. of Mining, Metallurgy and Petroleum,

- Edmonton, Alberta.
- Chander, S. (1992) Emerging Process Technologies for a Cleaner Environment, Proceedings, SME, Feb. 24-27, Phoenix, Arizona.
- AIME World Symposium on Mining and Metallurgy of Lead & Zinc. Port City Press Inc., Baltimore, Maryland, 1970.
- Somasundaran, P. (1979) Beneficiation of Mineral Fines, Final Report, NSF, October.
- Sengupta (1993) Environmental Impact of Mining. Lewis Publishers.
- Will, B.A. (1988) Mineral Processing Technology, 4th Edition. Pergamon Press.
- 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.
- 
- 2003년 11월 16일 원고접수, 2004년 1월 14일 게재승인.