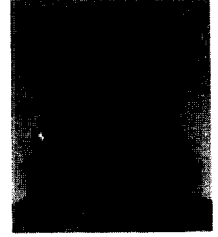


Microbial Leaching

서울대학교 미생물학과 이 흥 금



1. 서 론

미생물을 이용하여 광석더미에서 광물을 침출하고 금속을 선광하는 방법(microbial leaching)은 자원 고갈현상에 대한 대비책으로 1950년 이후 각광을 받고 있다. Microbial leaching은 hydrometallurgy의 한 분야로 저렴한 비용 및 간단한 기술로도 순도가 낮은 광석에서 금속을 여과해낼 수 있고 또 recycling system이라 환경을 오염시키지 않는다는 등의 많은 장점을 지니고 있다. 현재에는 생물공학의 발달과 함께 금속선광에 중요한 미생물의 유전자를 전이시켜 다양한 광석 및 금속에 대한 선광능력을 증가시킬 수도 있다.

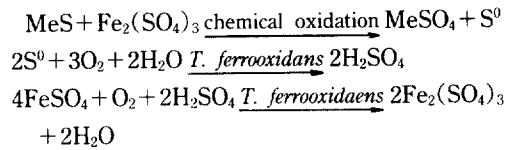
본 고에서는 선광에 적합한 미생물의 생태, 생리학적 특이성과 leaching에 있어서의 생물공학의 상업적 중요성에 대해 간단히 논의하고자 한다.

2. 광석의 침출

미생물은 대부분 구리와 우라늄을 침출하는데 이용되어 왔는데 이중 가장 중요한 미생물은 *Thiobacillus ferrooxidans*이다. *T. ferrooxidans*는 코발트, 니켈, 아연, 납 등도 용출해 낼 수 있다(3). 광석더미에서 발견되는 대부분의 다른 미생물도 자가영양체로 탄소원으로 공기 중의 CO₂를 이용하며 무기물을 산화시켜 에너지를 얻기 때문에 침출시 광석더미에 다른 탄소원이나 에너지를 첨가시킬 필요가 없다.

이 세균은 광석에서 금속을 간접적 및 직접적 방법으로 용출할 수 있다. 간접적 방법에서는 *T. ferrooxidans*에 의해 Fe²⁺가 Fe³⁺로 산화되는데 이 Fe³⁺이온이 강력한 산화제로 작용하여 물에 용해되기 어려운 금속결합을 수용성의 metal sulfate로 전환

시킨다. 이 과정을 요약하면 아래와 같다(1).



직접적 방법은 효소에 의해 metal sulfide가 metal sulfate로 용해되어지는 과정으로 Fe²⁺가 Fe³⁺로 산화되어지기도 한다. 두 방법에 의한 결과는 마찬가지로 강산성의 용액에서 금속이 수용성 상태로 존재하며 그림 1에서와 같이 집적된 후 금속은 화학적 및 물리적 방법에 의해 모아진다.

에너지원으로 사용되는 석탄의 소모량이 상당히 높은 현시점에서 *T. ferrooxidans* 이용하여 석탄에서 황을 제거할 수 있으므로 오염문제를 어느정도 해결할 수 있다(9).

rDNA technology에 의해 생성된 leaching 능력이 우수한 세균은 다음과 같은 특성을 지니도록 한다(5).

- 1) Fe³⁺이온 생산능의 증가
- 2) 호산성 또는 내산성의 증가
- 3) 내염성의 증가
- 4) 금속-예로 은, 수은, 카드미움, 토리움 등에 대한 내성증가
- 5) *in-situ* leaching을 위한 내열성 및 내압성 증가(2)

Leaching 과정은 자연환경에 많은 영향을 받게 되므로 실험실내에서 처럼 완전하게 생물학적 작용을 조절할 수는 없다. 미생물은 다른 미생물과 상호작용을 갖고 있으므로 광석더미 내에서의 미생물의 분포에 대한 연구는 중요하다(6, 7). 또한 중요한 미생물의 성장을 최적화 하기 위해서는 광석의 크기,

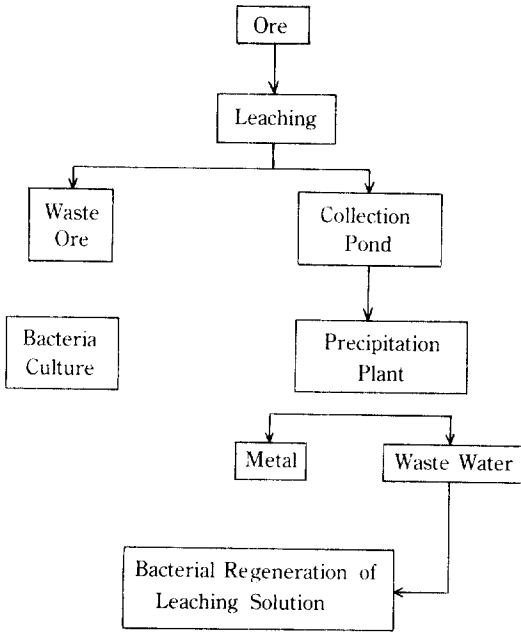


그림 1. Bacterial Leaching Process

표 1. Factors Affecting Bioleaching

Mineral composition : concentration of sulfides, presence or absence of carbonates
Particle size : increase in rate with decreasing particles size
pH : Cu, 2-2.5 ; Zn, 2-3 ; As, 2.2-2.5 ; Ni, 2.5
Temperature : <i>Thiobacillus ferrooxidans</i> , 25-35C ; <i>Sulfolobus</i> , 50-80C
Microbial biomass concentration : 3-5 percent of volume of leaching solution
Nutrients : carbon source(CO ₂) ; nitrogen and phosphorus sources
Aeration-mixing : aerobic conditions require ; solid/liquid ratio 1 : 5 to 1 : 75 depending upon mineral sulfide
Surfactants : may increase rate of oxidation of sulfides

광석과 용액의 비율, pH, 온도, 산소, CO₂ 농도 등에 대한 연구가 필요하다(표 1)(10).

최근에는 화산지역, 심해의 화도, 온천 등에서

새로운 미생물들을 찾고 있으며 이러한 미생물들은 *in-situ* leaching에 이용될 뿐만 아니라 rDNA technology에 의해 leaching 세균을 향상시킬 수 있는 많은 유전인자를 함유하고 있다(2,8).

3. 금속의 선광

미생물을 이용한 세련분야에서 또 중요한 분야는 침출용액에서 금속을 선광농축하는 과정이다. 이 과정에서 실험실내에서의 조절이 좀 더 용이하기 때문에 침출방법에 대한 R & D보다 다소 R & D가 수월한 편이다. 금속을 생물학적으로 농축하는 데는 두 가지 방법이 있는데 하나는 미생물 표면에 금속을 비특이적으로 부착시키는 방법이다. 다른 방법으로는 미생물에 의해 금속이 특이적으로 결합되어 흡수되어진다. 후자의 경우는 금속이 10,000배 까지도 농축이 되어질 수 있다. 여러 세균, 곰팡이, 조류에 의해 금속이 농축되어지는데 구리, 우라늄, 은 등은 이 방법으로 쉽게 농축된다(표 2). 유전공학에 의해 다른 여러 금속을 농축할 수 있는 미생물을 개발할

표 2. Bioaccumulation of Metals in simple Organisms

Bacteria	Metal
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Uranium
<i>Pseudomonas</i> species	
<i>Cytophaga</i> species	Silver
<i>Zoogloca</i> species	
<i>Spherotilus-Leptothrix</i> group	Manganese
<i>Hyphomicrobium</i> species	
<i>Aeromonas</i> species	Gold
Yeasts	
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Uranium
<i>Rhodotorula</i> species	Silver
Fungi	
<i>Aspergillus oryzae</i>	Gold
Algae	
<i>Spirogyra, Oscillatoria</i>	Molybdenum
<i>Rhizoclonium, Chara</i> species	Selenium
	Uranium
	Radium

수도 있다.

또 다른 방법으로는 고등생물에 의해 생성되는 특이한 금속결합단백질을 사용하는 것으로 대표적으로 metallothionein 들 수 있는데 카드미움, 아연, 수은, 구리와 잘 결합할 수 있다. 이 단백질로 독성 있는 폐수를 처리하기도 한다.

4. Leaching의 생물공학의 상업적 측면

외국의 경우 정부산하연구소에서는 microbial mining에 중요한 미생물에 대한 기초연구가 행하여지고 있으며 대부분의 R & D는 채광회사의 지원하에 이루어지고 있다. 미국의 Atlantic Richfield co., General Electric 등 대회사 뿐만 아니라 Advanced Mineral Technologies, Inc.(Socorro, New Mexico), Biogen S.A. 등의 소회사에 의해서도 제련 및 금속미생물학에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 영국, 오스트레일리아, 남아프리카, 캐나다 등에서도 개인회사에 의해 leaching 기술의 응용성에 대해서도 연구되어 지고 있다. 미생물에 의한 leaching의 생물공학의 발달로 금속의 제련뿐 아니라 사진현상액에서 고가의 금속인 은을 회수하거나 catalyst에 사용된 금속을 회수하여 metal catalyst를 재활성화시킬 수 있다.

1985년 중반까지만 해도 유전학적으로 조작된 미생물이 시판되지 않았다. 금속을 침출하거나 선광하는 능력이 좋은 미생물이 Scale-up이나 현장시험에 잘 사용될 수 있다면 앞으로 10년 이내에 이러한 균주도 시판될 수 있으리라 본다. 현재 금속가격이 비교적 낮고 광물이 아직 고갈된 상태가 아니기 때문인지 이에 대한 연구가 빨리 진전되고 있지는 않다. 아시아의 일본, 중국, 인도, 파키스탄에서도 연구가 되고 있으나 우리나라는 아직 활발히 microbial leaching에 대해 연구하고 있지 않은 것 같다.

5. 결 론

새로운 생물공학방법을 환경에 적용하는 것은 아직 초보적 단계이다. 그 원인으로는 유용한 미생물의 유전학적, 생화학적 지식 및 그 미생물의 분포하는 환경에 대한 연구가 불충분하기 때문이다. 대부분

기초연구가 순수배향하에 이루어지고 있기 때문에 자연상태에서 미생물이 실험실내에서와 같은 기작을 한다 단정지를 수 없다. 또한 Scale-up에서도 공정 규모가 크기 때문에 문제가 있으므로 생물학자와 기술자의 밀접한 공동연구가 필요하다.

microbial leaching에 있어서의 앞으로 풀어나가야 할 문제로는

- 1) 토리움, 은, 수은, 금, 백금, 카드미움 등 고가의 금속을 leaching할 수 있는 미생물의 개발
- 2) 미생물과 광석과의 상호작용에 대한 연구
- 3) 미생물에 의한 산성 광산폐수의 생성방지
- 4) 낮은 pH에서의 DNA transfer 등을 꿈꿀 수 있다.

참고문헌

1. Brierley, C.L. *Bacterial leaching* CRC Crit. Rev. Microbiol. **6** : 207-262(1978).
2. Brierley, J.A. *Facultative-thermophilic Thiobacillus-like bacteria in metal leaching* in : Biochemistry of ancient and modern environments, Ed. : Trudinger, P.A., Walter, M.R., Ralph, B.J., Springer Verlag, Berlin, 445-450(1980).
3. Clum, J.A., Haas, L.A. *Microbiological effects on metallurgical processes* : Proceedings of the Metallurgical Society, New York(1985).
4. Dugan, P.R. *Prevention of formation of acid drainage from high-sulfur coal refuse by inhibition of iron-and sulfur-oxidizing microorganisms 1. preliminary experiments in controlled shaken flasks* Biotech, Bioeng. **29** : 41-48(1987).
5. Frence, R.W., Branion, R.M.R., Ebner, H.G. *Fundamentals and applied biohydrometallurgy* : Proceedings of the Sixth International Symposium on Biohydrometallurgy Vancouver(1989).
6. Groudev, S.N., Genchev, F.N., Gaidarjiev, S.S. *Observations on the microflora in an industrial dump leaching copper operation* in : Metallurgical applications of bacterial leaching and related microbiological phenomena, Ed. : Murr L. E., Torma, A.E., Brierley, J.A., Academic Press, New York, 253-274(1978).
7. Lee, H.K. *Wechselwirkungen zwischen Thiobacillen und ihren heterotrophen Begleitern* Ph.D.

- Thesis, TU Braunschweig, Germany(1989).
8. Marsh, R.M., Norris, P.R., Le Roux, N.W. *Growth and mineral oxidation studies with Sulfolobus* Congress in biohydrometallurgy, Cagliari Ed. : Rossi, G., Torma, A.E. Associazione Mineraria Sarda, Iglesias, Italy 1983, 71-81(1983).
 9. Myerson, A.S., Kline, P.C. *Continuous bacterial coal desulfurization employing Thiobacillus ferrooxidans* Biotechnol. Bioeng. **26** : 92-99(1984).
 10. Wichlacz, P.L., Thompson, D.L. *The effect of acidophilic heterotrophic bacteria on the leaching of cobalt by Thiobacillus ferrooxidans* in : Biohydrometallurgy Proceedings of the International Symposium, Warwick 1987, Ed. : Norris, Kely, D.P., Science and Technology Letters. Kew Surrey, 77-86(1988).