

생태학적 기능을 이용한 광미 활용 전기 생산: 철산화박테리아를 이용한 황철석 산화 속도 증진을 통한 전류 밀도 향상 가능성 평가

From Mine Tailings to Electricity using Ecological Function: Evaluation of Increase in Current Density by Increasing the Oxidation Rate of Pyrite using Iron Oxidizing Bacteria

주원정¹ · 조은혜^{2*} · 남경필³

¹학생회원, 서울대학교 건설환경공학부 석사과정

²정회원, 서울대학교 건설환경종합연구소 전임대우 연구조교수

³정회원, 서울대학교 건설환경공학부 교수

Ju, Won Jung¹, Jho, Eun Hea^{2*} and Nam, Kyoungphile³

¹Student Member, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Master Course

²Member, Integrated Research Institute of Construction and Environment, Seoul National University, Research Assistant Professor

³Member, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Professor

ABSTRACT: The research evaluates the possibility of generating electricity using pyrite containing mine tailings, which are the major cause of acid mine drainage (AMD), by applying iron oxidizing bacteria (in this case, *Acidithiobacillus ferrooxidans*) and chemical fuel cell technology. The changes in the aqueous Fe^{2+} concentration, which can represent an ionized form of pyrite, with an initial concentration of 9,000 mg/L were investigated during the 20 d growth period. Both the Fe^{2+} and total iron (i.e., total Fe^{2+}) concentrations with or without *A. ferrooxidans* were observed. The Fe^{2+} concentration decreased to about 6,000 mg/L, in the abiotic condition, while it decreased to about 400 mg/L in the biotic condition. The results showed that the increased Fe^{2+} oxidation in the presence of *A. ferrooxidans* (i.e., catalytic ability of *A. ferrooxidans*) can be applied to electricity generation using pyrite containing mine tailings. In the co-presence of *A. ferrooxidans* and pyrite containing mine tailings, Fe^{2+} oxidation and hence electron production increases, which, in turn, improves current density. This study can be applied to utilize ecological functions of indigenous bacteria in mine areas to enhance electricity generation efficiency.

KEYWORDS: Pyrite, Mine tailings, Iron oxidizing bacteria, Microbial fuel cell

요 약: 본 연구는 광산 지역 토착미생물인 철산화박테리아 (*Acidithiobacillus ferrooxidans*)를 이용하여 산성광산배수의 원인물질인 황철석을 함유한 광미로부터 전기를 생산하고자 하는 목적으로 수행되고 있다. 예비실험으로서 철산화박테리아의 존재 여부가 배양액 내 Fe^{2+} 과 총 철의 농도 변화에 미치는 영향을 관찰하였다. 철산화박테리아가 존재하지 않는 조건에서는 초기 9,000 mg/L의 Fe^{2+} 이 약 6,000 mg/L까지 감소하였으나, 철산화박테리아가 존재하는 조건에서는 약 400 mg/L까지 감소하였다. 이는 철산화박테리아가 Fe^{2+} 의 산화를 촉진하기 때문으로, 황철석을 활용한 연료전지에 철산화박테리아를 적용하면 Fe^{2+} 의 산화 과정에서 생기는 전자의 이동이 증가하여 전지의 전류 밀도를 높일 수 있는 가능성을 보여준다. 본 연구는 광산 지역 토착미생물의 생태학적 기능을 활용해 광미로부터 전기를 생산해내는 기술을 개발하는 연구의 바탕을 마련한다는 점에서 의미 있다.

키워드: 황철석, 광미, 철산화박테리아, 미생물 연료전지

*Corresponding author: ejho001@snu.ac.kr

© 2014 Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering

서 론

우리나라에 산재하고 있는 4,681개의 광산에 방치되어 있는 많은 양의 광산찌꺼기, 혹은 광미는 광산 지역에서 흔히 발생하는 광해문제의 원인이다 (Ji et al., 2010; Korean Mine Reclamation Corp. 2013). 광미에 포함된 황화광물, 특히 황철석이 강수 및 공기와 접촉을 통해 고농도의 중금속을 포함하고 산성 pH를 가진 산성광산배수 (Acid Mine Drainage)를 발생하여 광산 주변 수계 및 토양 오염의 주요 원인이 되고 있다. 국내외에서 산성광산배수로 인한 환경오염 발생과 지역주민 민원 사례가 급증하고 있어, 광해문제의 사전예방 혹은 사후처리에 대한 적정기술 연구가 시급한 실정이다.

현재 국내의 광해문제 해결을 위한 연구는 광미에 의해 발생하는 산성광산배수의 사후처리에 초점을 맞춘 적극적 처리방법과 소극적 처리방법이 있고, 이러한 기술들은 광미를 오염물질로 간주하고 있다 (Johnson and Hallberg, 2005). 적극적 처리방법은 산성광산배수의 산도를 중성화하고, 금속을 침전하기 위해 염기성 물질을 공급하는 방법으로 처리효율이 뛰어나지만 유지비용이 높고 다량의 슬러지를 발생시킨다는 단점이 있다 (Johnson and Hallberg, 2005). 한편, 소극적 처리방법은 선택지 생태계를 이용하는 방법으로 적극적 처리방법에 비해 상대적으로 유지비용이 적게 들지만 최초 시공단계에서 비용이 많이 든다는 단점이 있다 (Ji et al., 2010). 최근 미국에서는 광산 지역에 사후관리 기술을 적용할 때 environmental footprint (환경발자국)을 최소화하기 위해 Green remediation (녹색정화)개념을 제시하였다 (USEPA, 2012). 이는 자연적으로 발생하는 화학적 혹은 생물학적 반응을 최대한 이용하여 오염물질을 정화하고, 정화 시 필요한 에너지 공급을 오염 지역 내에서 자체 생산할 수 있는 대체에너지 (예: 태양열, 풍력, 수력 등)를 활용하는 시스템으로, 산간지역에 위치하고 있는 광산 지역들에 적용을 하면 정화 비용 감소뿐 아니라 대체에너지를 사용한다는 점에서 경제성과 친환경적 성격을 가진 시스템이다.

최근 자원고갈, 지구온난화 등의 환경문제 저감을 위한 노력이 증가하는 추세로 국내외에 산재해있는 광미를 오염물질이나 폐기물이 아닌 자원으로 활용하여 유용한 자원을 생산하려는 연구가 증가하고 있

는 추세이다. 광미를 활용하여 희귀금속 또는 중금속을 회수하는 연구는 기존에 수행되어 온 바 있으나 (Rawlings, 2002), 광미로부터 에너지를 생산하는 연구는 미비한 실정이다. 광미와 같은 무기 오염물질보다는 다양한 유기오염물질을 활용해 전기를 생산하는 미생물연료전지 연구 또한 활발히 수행되고 있다 (Rabaey et al., 2003). 미생물연료전지는 화학전지에 미생물의 생태학적 기능을 활용하는 것으로 일반적으로 수소이온교환막을 사이에 두고 음극부와 양극부로 나뉜다. 음극부에서 일어나는 산화반응을 통해 생산되는 전자는 음극부와 양극부 사이에 전위차를 발생하여 전자의 흐름을 형성하고, 같은 반응에서 발생한 수소이온은 수소이온교환막을 통해 양극부로 이동한다. 양극부로 공급된 산소는 양극으로 이동한 전자에 의해 환원되어 전체 회로를 완성하게 된다 (Logan, 2008). 이러한 화학전지의 개념을 바탕으로 연구에서는 산성광산배수의 원인인 광미를 이용한 전류 발생 기작을 소개하고, 전류 발생 효율을 높이기 위해 광산 지역에서 흔히 발견되는 철산화박테리아를 이용하여 광미로부터 유용한 에너지원인 전기 생산 가능성을 확인하고자 한다.

재료 및 방법

본 연구에서는 철산화박테리아가 철의 산화에 미치는 영향을 알아보기 위해 광미에서 발견되는 대표적인 철산화박테리아인 *Acidithiobacillus ferrooxidans* (Baker and Banfield, 2003)를 사용하였다. Table 1은 *A. ferrooxidans*를 포함해 흔히 발견되는 대표적인 철산화박테리아와 박테리아의 특성을 나타낸다. *A. ferrooxidans* (KCTC4516)를 9K 배지 (Silverman and Lundgren, 1958)에 접종하여 진탕배양기에서 (30°C, 180 rpm) 호기 조건으로 20일 간 배양하였다. 비교군으로 *A. ferrooxidans*를 접종하지 않은 9K 배지를 같은 조건에서 배양하였다. 9K 배지의 조성은 다음과 같다. (NH₄)₂SO₄ 3.0 g/L, KCl 0.10 g/L, K₂HPO₄ 0.50 g/L, MgSO₄·7H₂O 0.50 g/L, Ca(NO₃) 20.01 g/L, FeSO₄·7H₂O 44.22 g/L, 10 N H₂SO₄ 1 mL (Silverman and Lundgren, 1958). 주기적으로 10 mL의 시료를 채취하여 Fe²⁺와 total Fe²⁺의 농도와 pH를 측정하였다. 시료의 Fe²⁺와 total

Table 1. Iron oxidizing bacteria and their characteristics

Iron oxidizing bacteria	Characteristics	Reference
<i>Thiobacillus ferrooxidans</i> (<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Can live under aerobic and anaerobic condition • Optimum temperature of 25-35°C 	(Leduc and Ferroni, 1994)
<i>Thiobacillus thiooxidans</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Is in the same morphological classification with <i>T. ferrooxidans</i> • Has slower iron oxidizing rate than <i>T. ferrooxidans</i> • Optimum temperature of 25-35°C 	(Waksman and Joffe, 1922)
<i>Leptospirillum ferrooxidans</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Oxidizes ferrous iron when it coexists with other iron oxidizing bacteria such as <i>T. ferrooxidans</i> and <i>T. thiooxidans</i> • Optimum temperature of 25-35°C 	(Sand et al., 1992)
<i>Acidianus brierleyi</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Uses ferrous iron as an electron acceptor under aerobic condition and reduced sulfur as an electron acceptor under anaerobic condition 	(Brierley, 1990)

Fe²⁺ 농도 측정은 Ferrozine 방법을 사용하였고 (Viollier et al., 2000), pH는 pH 미터 (Thermo Scientific Orion 5-Star)를 이용하여 측정하였다. *A. ferrooxidans*를 접종한 시료의 경우 현미경을 이용하여 Petroff-Hauser chamber 방법으로 박테리아의 밀도를 측정하였다.

결과 및 고찰

*Acidithiobacillus ferrooxidans*에 의한 철산화 촉진

Fig. 1 (a)는 *A. ferrooxidans*를 접종한 배지에서 *A. ferrooxidans*의 성장과 배양액 내 Fe²⁺ 농도 변화를

를 보여준다. *A. ferrooxidans*의 밀도가 증가함에 따라 Fe²⁺의 농도가 초기 9,000 mg/L에서 12일 이후에 약 414 mg/L까지 감소하여 비슷한 수준을 유지하였다. 이는 *A. ferrooxidans*가 Fe²⁺을 전자수용체로 사용하여 성장했음을 나타낸다. 한정된 Fe²⁺을 함유한 9K 배지를 이용하였기 때문에, Fe²⁺의 농도가 최저에 도달함과 동시에 *A. ferrooxidans*의 성장이 정상기 (stationary phase)에 도달하는 것을 볼 수 있다 (Fig. 1 (a)). Total Fe²⁺ 농도는 Fe²⁺과 Fe³⁺의 합으로, Fe²⁺이 Fe³⁺으로 산화된 후 OH와 결합하여 Fe(OH)₃ 침전물을 형성하며 시간에 따라 감소하는 것으로 보인다. 배양 기간 중 pH는 2.31±0.24였다. Fig. 1 (b)는 *A. ferrooxidans*가 접종되지 않은 배지에서의 Fe²⁺와 total Fe²⁺ 농도 변화를 보여준다. *A. ferrooxidans*가 접종된 배지와 달리 초기 Fe²⁺가 비슷한 수준으로

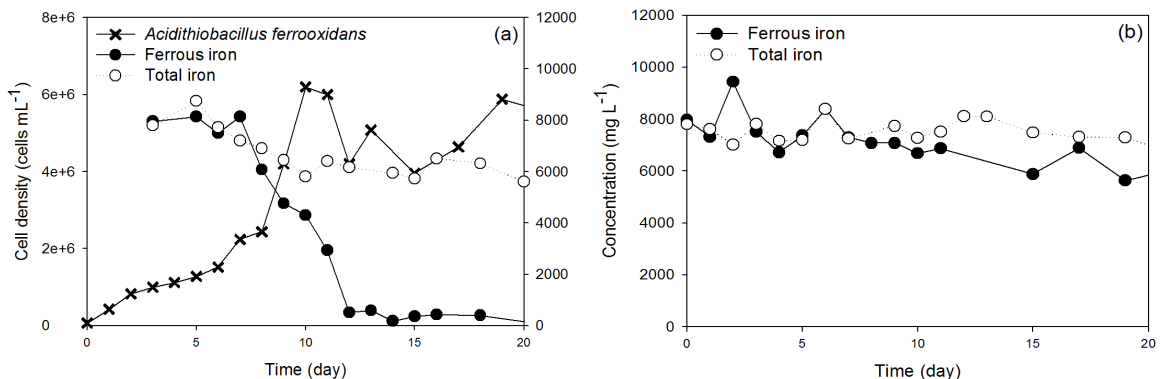
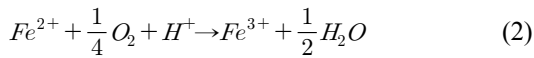
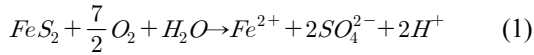


Fig. 1. (a) Growth of *Acidithiobacillus ferrooxidans* and changes in ferrous and total iron in the 9K medium inoculated with *Acidithiobacillus ferrooxidans* (b) Changes in ferrous and total iron in the 9K medium without *Acidithiobacillus ferrooxidans*

유지되고 있음을 볼 수 있다. 배양 기간 중 pH는 2.31 ±0.37로 *A. ferrooxidans*를 접종한 배지와 비슷한 수준이었다.

광미 내 황철석 산화를 통한 전기 생산 가능성 평가

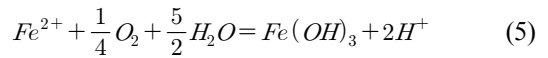
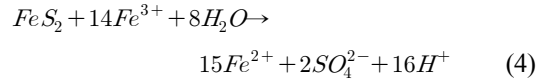
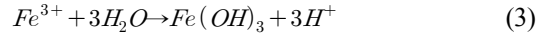
황철석의 산화는 크게 화학적 산화와 생물학적 산화로 나눌 수 있고, pH, pO₂, 황철석의 입자 크기, 박테리아의 유무, 점토광물의 유무, 그리고 수문학적 요인 등에 영향을 받는다. 황철석은 환원환경에서 매우 안정한 광물이나 대기와 접촉하면 화학적 산화가 일어나 H⁺, SO₄²⁻, Fe²⁺를 생산한다 (식 (1)) (Berner, 1984). 황철석의 생물학적 산화는 철산화박테리아가 황철석의 표면에 붙어 용존산소를 전자수용체로 사용하면서 황이나 철을 산화 (식 (1)) 시키는 직접적 기작과 철산화박테리아가 이미 물에 녹아 있는 Fe²⁺를 Fe³⁺으로 산화시키는 간접적 기작으로 설명할 수 있다.



*A. ferrooxidans*와 같은 철산화박테리아는 화학무기자가영양체로 황과 철의 산화에너지와 대기 중의 이산화탄소를 활용한다 (Bosecker, 1997). *A. ferrooxidans*와 같은 철산화박테리아의 Fe²⁺ 산화 촉매 작용은 *A. ferrooxidans*와 황철석이 함께 존재할 때 식 (2)의 반응을 촉진하여 황철석의 산화 속도를 증가시킨다. 식 (2)의 반응이 촉진되어 Fe³⁺의 생산이 증가되고 차례로 수화되면서 더 많은 양의 산을 발생시킨다 (식 (3)) (Nordstrom, 1982). 지속적으로 발생하는 산에 의해 황철석 표면부근의 pH가 3.5 이하로 감소되면 수용액 내 Fe³⁺의 활동도가 증가하여 Fe³⁺가 황철석을 산화시킨다 (식 (4)). 이와 같이 pH와 황철석의 산화에는 밀접한 관계가 있다. pH가 낮을 때에는 (pH<4.5) O₂에 의한 산화보다 Fe³⁺에 의한 산화가 더 빠른 속도로 일어난다 (Evangelou, 1995).

철산화박테리아의 성장에서 황철석의 두 산화 기작은 중요하다. 철산화박테리아의 adaptation period (lag phase)에서는 직접적 기작이 우세하나 exponential growth phase에서는 직접적과 간접적 두 기작이 모

두 중요하다 (Gleisner et al., 2006). 하지만 황철석 산화에는 간접적 산화 기작이 더 큰 기여를 한다 (Gleisner et al., 2006). *A. ferrooxidans*가 배지 내 Fe²⁺의 산화에 미치는 영향을 알아본 본 연구는 황철석을 사용할 경우 *A. ferrooxidans*의 간접적인 산화 기작을 설명할 수 있다.



황철석의 산화과정은 황철석이 물에 용해되었을 때 Fe²⁺의 산화라고 할 수 있고, 식 (5)으로 요약할 수 있다. 기존 연구에서도 *A. ferrooxidans*와 같은 철산화박테리아는 Fe²⁺의 산화를 100배 이상 증가시키는 촉매역할을 한다고 보고하고 있다 (Singer and Stumm, 1970). Fig. 1은 철산화박테리아가 존재할 때 Fe²⁺의 산화가 촉진되었음을 보여준다. 이는 Fe²⁺의 Fe³⁺로의 산화 과정인 식 (2)가 *A. ferrooxidans*에 의해 촉진되었음을 의미한다.

연료전지 내 음극부와 양극부의 전위 (electric potential) 차이와 가역적인 전기화학적 전지 전압의 변화를 나타내는 Nernst 식을 사용하여 전지의 Nernst 전압 (E)을 계산할 수 있다 (식 (6)). Gibbs 자유에너지를 전기화학반응에서 가역적 전압 (reversible voltage)의 정도를 알려주는 지표로, 표준상태 (standard state condition)에서는 가역적 전압을 식 (7)로 계산할 수 있다. 음극부에서 양극부로 전달되는 전자의 이동 속도를 나타내는 전류는 전기화학적 반응 속도가 증가할수록 증가한다 (식 (8)). 일반적으로 화학전지의 전기 발생 효율은 전류의 이동을 음극의 단위면적당 이동으로 표현한 전류밀도로 나타낸다 (식 (9)).

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \Pi \frac{\alpha_{products}^{vi}}{\Pi \alpha_{reactants}^{vi}} \quad (6)$$

$$E^0 = - \frac{\Delta G^{0,rxn}}{nF} \quad (7)$$

$$i = nF \frac{dN}{dt} \quad (8)$$

$$j = \frac{i}{A} \quad (9)$$

여기서 E^0 은 표준전위, R 은 기체상수 (8.314472 J·K/mol), T (K)는 온도, n 은 반응에 관여하는 전자 수, F 는 패러데이 상수 (96,485.3383 C/mol),는 전자가 생성되는 속도, A 는 음극의 면적이다.

이와 같이 음극부에 *Escherichia coli*의 주입을 통해 유기물의 산화를 촉진하여 전류생산 효율을 증가시킨 선행연구가 있다 (Zhang et al., 2007). 본 연구에서는 무기물인 Fe^{2+} 를 연료로 쓰는 연료전지에서 *A. ferrooxidans*와 같은 철산화박테리아가 Fe^{2+} 의 산화속도를 촉진하여 연료전지의 효율을 높일 수 있다는 가능성을 보여준다. *A. ferrooxidans*에 의해 율속 인자 (식 (2))가 촉진되면서 전자 발생이 증가하게 되고 이는 Fe^{2+} 를 사용하는 연료전지에서 *A. ferrooxidans*가 Fe^{2+} 의 산화속도를 높여 전류밀도를 높일 수 있는 가능성을 보여준다.

Fe^{2+} 의 산화반응은 자발적으로 일어나는 반응으로 자유에너지 (ΔG^0)는 -27.15 kJ/mol이고, 식 (7)을 이용하면 표준전위 (E^0)가 0.28 V인 것을 알 수 있다 (O'Hayre et al., 2006). 식 (6)에 따르면 Fe^{2+} 의 농도가 감소함에 따라 전압이 감소하게 되는데, 황철석 또는 광미 내 황철석을 사용할 경우 황철석 표면의 Fe^{2+} 이 모두 소진될 때까지 Fe^{2+} 을 계속 공급할 수 있기 때문에 전압 감소의 문제는 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

결 론

본 연구에서는 산성광산배수의 주요 원인이 되는 광미 내 황철석에 화학전지 개념을 적용하여 전기 생산이 가능한지를 알아보았다. 문헌 정리와 실험을 통해 산성광산배수로 문제가 되는 광산 지역의 토착박테리아 중 흔히 발견되는 *Acidithiobacillus ferrooxidans*와 같은 철산화박테리아를 이용하여 자연적으로 일어나는 황철석의 산화를 촉진하면 발생하는 전류 밀도를 향상할 수 있는 가능성을 보여주었다. 현재 산

성광산배수 처리 기술은 사전처리 기술보다 사후처리 기술에 초점이 맞추어져 있기 때문에, 산성광산배수의 원인이 되는 황철석을 이용하여 유용한 에너지를 생산하고자 하는 본 연구는 사전처리 기술 개발을 통한 적용 기술 확장뿐 아니라 유용 에너지 생산이라는 의미를 가진다. 또한, $Fe(OH)_3$ 침전물 형성을 통해 황철석의 Fe^{2+} 성분을 제거하는데 도움을 줄 수 있는 가능성도 보여준다. 본 연구는 광산 지역 토착미생물의 생태학적 기능을 활용해 광미로부터 전기를 생산해내는 기술을 개발하는 연구의 바탕을 마련한다는 점에서 의미 있다.

References

- Baker, B. J. and Banfield, J. F. (2003). "Microbial communities in acid mine drainage." *Fems Microbiol. Ecol.*, Vol. 44, No. 2, pp. 139-152.
- Berner, R. A. (1984). "Sedimentary pyrite formation: an update." *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, Vol. 48, No. 4, pp. 605-615.
- Bosecker, K. (1997). "Bioleaching: metal solubilization by microorganisms." *FEMS Microbiol. Rev.*, Vol. 20, No. 3-4, pp. 591-604.
- Brierley, J. A. (1990). "Acidophilic thermophilic archaeobacteria: Potential application for metals recovery." *FEMS Microbiol. Lett.*, Vol. 75, No. 2, pp. 287-291.
- USEPA, (2012). "Green Remediation Best Management Practices: Mining Sites." EPA 542-F-12-028. Office of Solid Waste and Emergency Response 5102G, pp. 1-6. http://clu.in.org/greenremediation/docs/GR_factsheet_mining/sites.pdf
- Evangelou, V. P. (1995). *Pyrite Oxidation and its Control*. CRC press., North West, F.L..
- Gleisner, M., Herbert Jr, R. B. and Frogner Kockum, P. C. (2006). "Pyrite oxidation by *Acidithiobacillus ferrooxidans* at various concentrations of dissolved oxygen." *Chem. Geol.*, Vol. 225, No. 1, pp. 16-29.
- Ji, M., Yoon, H., Ji, E. Lee, W., Park, Y., Yang, J., Jeon, B., Shim, Y. S., Kang, M. H. and Choi, J. (2010). "Development of control technology for acid mine drainage by coating on the surface of pyrite using chemicals." *J. Korean Soc. Soil Groundwater Env.*, Vol. 15, No. 4, pp. 46-52. (in Korean)
- Johnson, D. B. and Hallberg, K. B. (2005). "Acid mine drainage remediation options: a review." *Sci. Tot. Env.*, Vol. 338, No. 1-2, pp. 3-14.
- Kim, B. H., Chang, I. S. and Gadd, G. M. (2007). "Challenges in microbial fuel cell development and

- operation." *Appl. Microbiol. Biotech.*, Vol. 76, No. 3, pp. 485-494.
- Leduc, L. and Ferroni, G. (1994). "The chemolithotrophic bacterium *Thiobacillus ferrooxidans*." *FEMS Microbiol. Rev.*, Vol. 14, No. 2, pp. 103-119.
- Logan, B. E. (2008). *Microbial fuel cells*, John Wiley and Sons. Hoboken, N.J..
- Mine Reclamation Corp. (2013). *Yearbook of MIRECO Statistics*, Mine Reclamation Corp., Jongno-gu, Seoul, Korea. (in Korean)
- Nordstrom, D. K. (1982). "Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals." *Acid sulfate weathering*, pp. 37-56.
- O'Hayre, R. P., Cha, S.-W., Colella, W. and Prinz, F. B. (2006). *Fuel cell fundamentals*, John Wiley and Sons. New York, N.Y..
- Rabaey, K., Lissens, G., Siciliano, S. D. and Verstraete, W. (2003). "A microbial fuel cell capable of converting glucose to electricity at high rate and efficiency." *Biotechnol. lett.*, Vol. 25, No. 18, pp. 1531-1535.
- Rawlings, D. E. (2002). "Heavy metal mining using microbes." *Ann. Rev. Microbiol.*, Vol. 56, pp. 65-91.
- Sand, W., Rohde, K., Sobotke, B. and Zenneck, C. (1992). "Evaluation of for leaching." *Appl. Env. Microbiol.*, Vol. 58, No. 1, pp. 85-92.
- Silverman, M. P. and Lundgren, D. G. (1958). "Studies on the chemoautotrophic iron bacterium *Ferrobacillus ferrooxidans*: I. an improved medium and a harvesting procedure for securing high cell yields." *J. Bacteriol.*, Vol. 77, No. 5, pp. 642-647.
- Singer, P. C. and Stumm, W. (1970). "Acidic mine drainage: the rate-determining step." *Sci.*, Vol. 167, No. 3921, pp. 1121-1123.
- Viollier, E., Inglett, P., Hunter, K., Roychoudhury, A. and Van Cappellen, P. (2000). "The ferrozine method revisited: Fe (II)/Fe (III) determination in natural waters." *Appl. Geochem.*, Vol. 15, No. 6, pp. 785-790.
- Waksman, S. A. and Joffe, J. (1922). "Microorganisms concerned in the oxidation of sulfur in the soil: II. *Thiobacillus Thiooxidans*, a new sulfur-oxidizing organism isolated from the soil 1." *J. Bacteriol.*, Vol. 7, No. 2, pp. 239.
- Zhang, T., Zeng, Y., Chen, S., Ai, X. and Yang, H. (2007). "Improved performances of E. coli-catalyzed microbial fuel cells with composite graphite/PTFE anodes." *Electrochem. Comm.*, Vol. 9, No. 3, pp. 349-353.