

갱내 황산염환원시설(IASRS)을 이용한 산성광산배수 처리에 관한 연구

지상우, 이상훈, 유상희*, 김재욱*, 김선준

한양대학교 지구환경시스템공학과, (재)자원산업연구원* (geochemistry@hanmail.net)

<요약문>

To solve the problems of operating passive mine drainage treatment systems, the In Adit Sulfate Reducing System(IASRS) was suggested. By placing the SAPS inside the adit, the condition of constant temperature of 10~15°C can be maintained. The experiments using the models made up by four sections showd good efficiencies in pH control and metal removal rate, but showed still low sulfate removal rate of about 30% with high COD in the begining of the operation.

key word : passive treatment system, SRB, IASRS

1. 서론

1989년부터 시작된 석탄합리화 사업으로 전국 379개 석탄광산 중 대부분이 폐광되고, 현재 10개탄광 75개 갱에서만 석탄이 채굴되고 있다⁽¹⁾. 폐탄광에서 발생하는 산성광산배수(Acid Mine Drainage)에 의한 주변 지표수와 지하수의 오염방지를 위하여 처리사업이 1996년부터 41개 탄광 55개 갱을 정화대상으로 하여 적용되기 시작하여⁽²⁾ 현재 27개 광산 33개 갱에 자연정화처리시설이 설치되어 운영 중에 있는데, 이들 자연정화처리시설은 일반적으로 갱도를 석회석으로 충전(ALD)한 후 SAPS(Successive Alkalinity Producing Systems)와 산화조, 소택지 순으로 광산배수를 처리하는데 각 광산별 광산배수의 특성(산도, 용존산소량, Fe 함량 등)에 따라 각 공정의 순서를 바꾸거나 추가 또는 생략한다.

현재 가동중인 처리시설에 관한 연구결과 처리시설의 효율과 가동상태에 대한 문제점들이 지적되고 있다⁽³⁾. 자연정화처리시설에 대한 지속적인 사후관리나 문제점들을 해결하기 위한 기술적, 제도적인 조치의 필요성을 검토하고, 필요하다면 처리시설의 전반적인 개선 또는 대안을 위한 연구가 절실하다. 본 연구에서는 기존 연구 결과 지적된 자연정화 처리시설의 문제점에 대한 해결 방안으로 갱내에 혐기성 상태의 환원환경을 만들어 광산배수를 처리하는 방식인 갱내 황산염환원시설의 적용 가능성을 검토하고자 하였다.

2. 본론

2.1. 가동 자연정화처리시설의 문제점

2001년 11월부터 2003년 6월까지 27개의 탄광과 2개의 금속광에 설치 가동중인 자연정화처리시설에 대

해 현장조사를 수행하였다. 29개의 처리시설에 대한 조사결과 17개의 자연정화처리시설에서 overflow, 금속 제거율 불량, 처리시설의 무용화 등 문제점이 발견되었고, 정상적으로 가동되는 처리시설에서도 금속의 제거와 pH를 높여주는 것에는 어느 정도 양호한 결과를 보이지만, 유입되는 광산배수와 처리된 유출수의 SO_4^{2-} 농도가 같게 나타나거나 오히려 증가되는 것으로 나타났다. 이는 장기간 처리시설이 운영될 때 처리 효율이 떨어지고 유량이나 유속과 같은 환경의 변화시 금속이온이 재용출 될 가능성을 제시한다.

우리나라에서처럼 계절별 온도차가 심한 경우 겨울철에는 황산염환원균(Sulfate Reducing Bacteria ; SRB)의 황환원을 기대하기가 어렵다. 영국 Cornwall의 Wheal Jane에 설치된 Pilot System에서는 겨울철 저온환경에서 미생물활동이 저하된 상태에서 고농도의 광물산도에 의해 처리효율이 나빠지는 것을 발견하여, 완충용으로 석회석을 첨가하고 미생물을 재접종하는 등의 조치를 취하여 처리효율을 높였다. 또한 미국 Colorado주 Burleigh Tunnel에서는 평소에는 중성의 pH와 50~60 mg/l의 Zn 농도를 갖던 광산배수가 봄철 녹은 눈이 흐르면서 pH 4.1, Zn 109 mg/l로 되어 유기질의 자체 완충능력을 벗어나게 되었는데 다른 조치가 없었기에 Pilot 실험을 멈출 때까지 처리가 불량한 상태로 남았다⁽⁴⁾. 또한 우리나라의 강우환경은 여름철과 겨울철의 차이가 심하여 여름철에는 많은 강우로 광산에서 발생하는 폐수의 양이 증가하지만, 겨울철에는 유량이 줄어들게 된다. SAPS를 이용한 처리시설에서 혐기성환경의 유지는 매우 중요한 요소인데, 겨울철에는 유량의 감소로 SAPS내 유기물층이 대기중으로 노출되어 혐기성상태가 제공되지 않는다. 따라서 차가운 대기와의 접촉으로 유기물층내 SRB의 활동이 급격히 줄거나 멈추게될 우려가 있다.

AMD에 Fe, Al의 부하량(Q: Fe, Al 농도와 유량을 곱한 값, [kg/day])이 높을 경우 처리시설 가동 후 수년 내에 SAPS 유기물층과 수층 사이에 형성되는 Fe, Al 수산화물의 sludge가 유기물층의 투수율을 현저하게 떨어뜨려 하부로의 흐름을 막게된다. 이에 따라 SAPS조는 산화조의 기능만을 하게되며 overflow가 발생되는데, 이 overflow는 금속의 침전에 의해 낮은 pH를 갖는다.

2.2. 갱내 황산염환원시설(IASRS ; In Adit Sulfate Reducing System)

적용중인 자연정화 처리시설에서 발생하는 문제점들을 해결할 수 있는 방안으로 갱내 황산염환원시설(IASRS)의 적용이 제안되었다. 이 방식은 현장에 설치되고있는 SAPS를 갱도 내에 옮기는 것으로 볼 수 있다(Fig.1.(a)). 따라서 갱내에 유기물을 먼저 충전하고, 석회석을 충전해 주는 방식을 택한다. 바깥쪽에 산화조와 소택지를 연결한다면 제거가 어려운 Mn과 초기에 높게 발생하는 유기물을 제거하는 효과가 있을 것이다. 갱내에서 황산염환원 반응을 유도한다면 갱내 배수의 온도가 계절에 관계없이 10~15 °C를 유지하게 되므로 현장에서 우려되는 겨울철 황산염환원 박테리아의 활동 저하가 다소 해결될 수 있다. 또한, 유량감소에 따른 대기와의 접촉이 감소되므로 혐기성 환경이 유지될 수 있다. SRB의 활동이 지속적으로 유지되어 황산염환원반응이 원활하게 일어날 수 있다면 금속황화물의 형성에 의한 금속제거와 중탄산이온의 발생으로 인한 pH의 조절이 지속적으로 가능할 것이다.

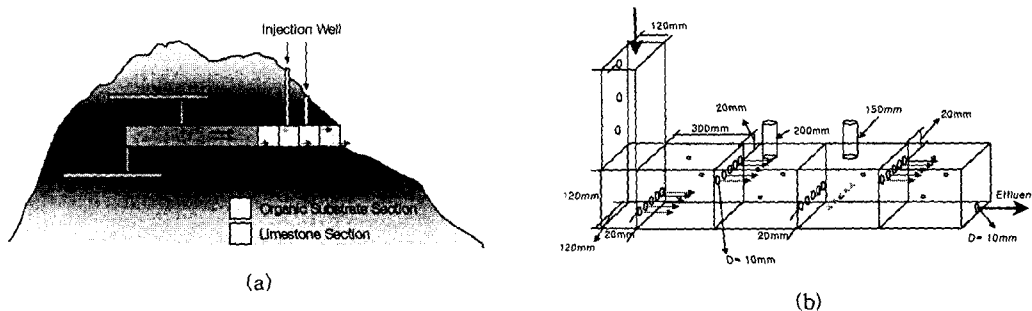


Fig. 1. Schematic Diagram of the In-Adit Sulfate Reducing System

IASRS의 적용을 위해 모형 처리시스템을 제작하여 실험실 규모의 처리실험을 수행하였다(Fig.1.(b)). 모형은 광산배수의 유입부를 12cm(H)×12cm(W)×12cm(L)로 하고, 각 section을 12cm(H)×12cm(W)×30cm(L)로 하였다. 따라서 처리시스템의 총 용적은 17.28 L이 된다. Drury (2000)는 17℃에서 50%의 황환원이 일어나기 위해서는 수리학적체류시간(Hydraulic Retention Time ; HRT)이 8일 필요한 것으로 보고하였는데⁽⁵⁾, 갱내환경은 좀 더 낮은 온도인 12~15℃이므로 HRT를 10일로 하였다. HRT를 10일로 하면 유량은 1.728 L/day, 즉 72 ml/hr이 된다. 처음 3개 section은 하부에 자갈층을 두어 투수성을 높여줌과 동시에 침전물에 대한 완충공간을 확보해 주고 상부에 버섯퇴비층을 두었다. 버섯퇴비는 충남 부여의 버섯재배지에서 사용된 것을 이용하여 각 section당 1,200g씩 사용되었다. 마지막 section에는 3,000g의 석회석(단양석회석광업소)을 충전하였다. 산성배수의 흐름은 유입부에서 하부로 다시 각 section 마다 상하로 흐름을 바꾸어 channeling을 방지해주었다. 또한 2,3 section에 관측공을 두어 pH와 ORP의 변화를 관찰하였다. 현장에서는 이러한 관측공을 이용하여 처리시설의 가동상태 점검, 유기물 교체, 침전물제거 등을 할 수 있다. 광산배수는 삼척탄좌 정암광업소의 폐석을 물과 반응시켜 TDS 1,203 ppm, pH 2.8, Fe 363mg/l, Al 262.5 mg/l, SO₄²⁻ 2666.9 mg/l의 인공 AMD를 만들어 사용하였다(8일 단위 AMD 공급시 분석된 평균 값). 모형 시스템은 2기를 가동하였는데, 1기는 갱내환경을 만들어 주기 위해 10℃의 물을 순환시켜주는 저온순환조에서 가동하였고 다른 1기는 상온에서 가동하였다.

가동 후 상온에서는 약 5일, 저온환경에서는 약 10일 후 부터 시스템 내에 검은색 침전물이 발생하여 황환원이 일어나고 있을 볼 수 있었다. 64일간의 실험에서 pH는 6.5부근에서 안정되는 상태를 보였고, 금속은 거의 100%가 제거되었다. TDS, COD 및 SO₄²⁻의 경우 처음 20여일 간 매우 높은 값을 보여 초기에 버섯퇴비로부터 많은 양의 유기물과 황산염이 녹아 나오는 문제점이 나타났다. 또한 SO₄²⁻의 제거율이 저온에서 약 20%, 상온에서 약 30%로 나타났다. 이는 현장에서의 SO₄²⁻의 제거율 보다는 높다고 할 수 있겠으나 여전히 황산염 환원율이 낮은 것이며, 그 원인은 실험에 사용된 인공 AMD의 pH가 2.8로 매우 낮은 상태인 점과 HRT의 부족으로 판단된다.

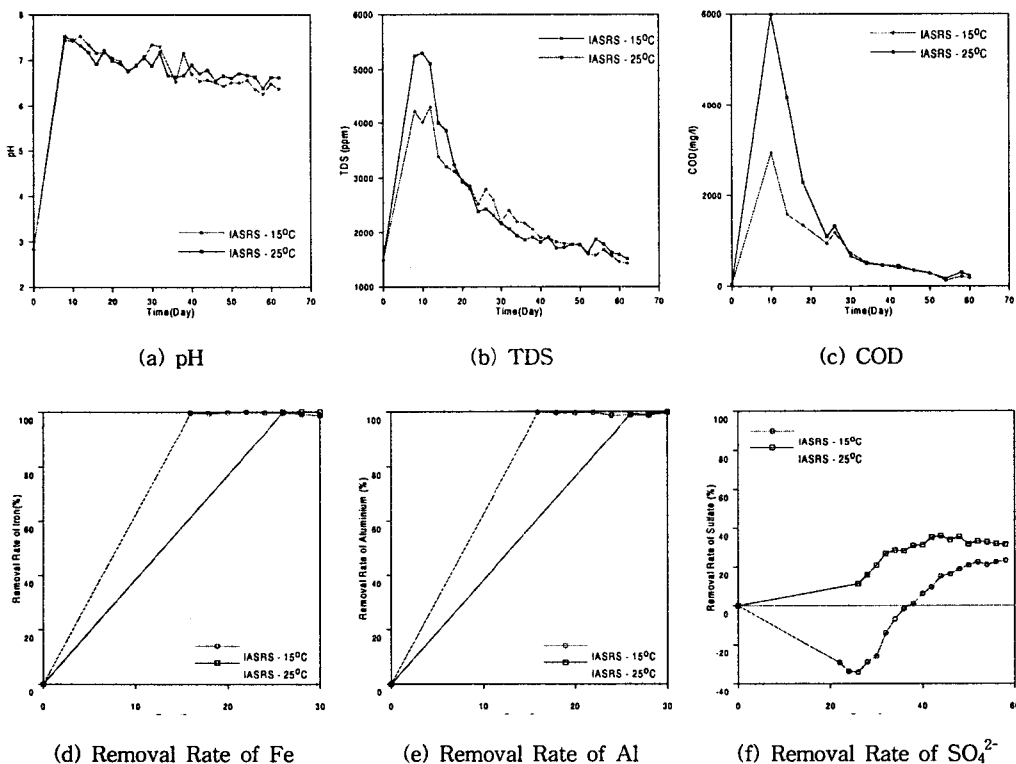


Fig. 2. Changes of physico-chemical properties in the effluent of IASRS.

Postgate(1984)는 SRB의 활동을 위해서는 황산염의 존재, 저분자량의 탄소 화합물의 적절한 함량, pH 4 이상, O_2 , Fe^{3+} , Mn^{4+} 등과 같은 산화제의 부재 등의 조건이 필요한 것으로 보고하였다⁽⁶⁾. 그러나 본 시스템에서 인공AMD의 낮은 pH로 인해 첫 번째 section의 유기물내에 있던 SRB가 사멸했을 가능성이 있다. 이는 검은색 침전물의 형성이 첫 번째 section에서는 일어나지 않았던 점과 관측공을 통한 pH 측정에서 첫 번째 section을 통과한 후에도 pH가 3.5 가량으로 낮았던 점을 통해 알 수 있다. 또한 실험실에서의 모형 SAPS를 가동한 결과 황산염환원을 위해서는 충분한 HRT가 필요한 것으로 나타났는데⁽⁷⁾, 첫 번째 section 부분이 기능을 못하게되어 10일로 가동한 HRT가 실제로는 7.2일로 줄어들면서 황산염환원율이 낮아진 것으로 판단된다. 초기 고농도의 유기물 배출과 낮은 황산염 환원율을 해결하기 위해서는 충분한 HRT를 제공해 주고 마지막 section을 상향식 흐름으로 바꾸어 유기물의 방출을 줄여 줄 필요가 있다. 따라서 다섯 개와 여섯 개의 section으로 이루어진 모형에 대한 실험을 통해 이러한 문제의 해결을 시도하고 있다.

3. 결론

갱내황산염환원시설은 계절의 변화에 관계없이 거의 일정한 온도로 유지되는 환경에서 광산배수를 처리하게 되므로 계절별 온도차이가 심한 국내 환경에 적합한 자연정화처리시설로 적용 될 수 있다. 현장 적용을 위한 모형실험에서 갱내환경에서 황산염환원반응이 일어남을 확인하였고 pH와 금속제거율에 있어서는 만족할 만한 결과를 얻었으나, 여전히 낮은 SO_4^{2-} 의 제거율과 초기의 높은 유기물 용출이 해결되어야 한다.

4. 참고문헌

- (1) 석탄산업합리화사업단, 2003, 석탄이야기 - 탄광별현황, 석탄산업합리화사업단 홈페이지(http://www.cipb.or.kr/story/story_8.html)
- (2) 배봉구, 1996, 석탄합리화사업단의 광해복구 및 환경개선 사업활동, 대한자원환경지질학회 추계학술여행 - 폐탄광일대의 지질환경 오염과 광해복구, pp.2-15
- (3) 정영욱 외, 2001, 폐금속광산 환경오염평가 및 정화기술 연구, 한국지질자원연구원 KR- 01(연차)-07, 198p.
- (4) Gusek, 2001, Why Do Some Passive Treatment Systems Fail?, <http://www.dartmouth.edu/~cehs/CAGsite/cleanup/treatment.html>
- (5) Drury, W.J., 2000, "Modeling of Sulfate Reduction in Anaerobic Solid Substrate Bioreactors for Mine Drainage Treatment.", Mine Water and the Environment, V.19, No. 1, pp.18-28
- (6) Postgate J. R., 1984, The sulphate-reducing bacteria, 2nd edition, Cambridge Univ. Press, NY, 208p.
- (7) 이상훈, 지상우, 전용원, 김재욱, 김선준, 2003, 환경변화에 따른 SAPS내 SRB의 활동성 연구, 한국지구시스템공학회춘계학술발표회 논문집, pp.19-21

5. 사사

이 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호:3-5-1)에 의해 수행되었다.