

# 요 약 문

## I. 제목

부산시 일광광산의 산성광산배수 처리를 위한 산업부산물 소재 다공성 세라믹을 활용한 산성광산배수 처리 시스템의 개발

## II. 연구의 목적 및 필요성

부산시에 소재하고 있는 일광광산의 경우 산성광산배수에 대한 복원사업이 일부 진행되었지만 적절한 운영과 관리의 부재로 인하여 현재 산성광산배수가 정상적으로 처리되지 않은 상태에서 유출되고 있는 상황이다. 이로 인하여 일광광산의 주변 하천수의 pH가 낮게 관측되고 있고 하천바닥에 yellow boy 현상이 뚜렷하게 발생되고 있으며 수중의 중금속으로 인해 주변지역의 환경 위해성이 높은 상태이다. 따라서 일광광산에서 발생하는 산성광산배수 처리를 위한 대책 마련이 시급한 현실이다. 한편, 산업부산물로서 비용이 저렴하고 알칼리 공급능력이 우수한 제강전로슬래그와 흡착 및 이온교환 기능이 뛰어나고 성형성이 우수한 천연제올라이트를 목분과 함께 혼합·소성한 ZS 다공성 세라믹을 높은 산도와 고농도의 중금속을 함유하고 있는 산성광산배수의 처리에 적용한 결과 매우 우수한 것으로 평가되고 있다. 이러한 ZS 다공성 세라믹을 실제 산성광산배수의 처리에 보다 효율적으로 적용하기 위해서는 고효율의 중금속 제거가 가능하고 중금속 침전 슬러지의 배출이 원활하며 처리 공정의 운전과 유지관리가 용이한 특성을 갖추고 있는 반응조 형태의 처리 공정 시스템의 확립이 필요한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 고효율의 기능성과 저비용의 경제성을 가진 ZS 다공성 세라믹을 이용하여 산성광산배수 내 중금속의 효율적인 처리와 침전 슬러지의 원활한 배출이 가능한 처리 시스템을 개발하고, 이를 부산시 일광광산에서 발생하는 산성광산배수의 처리에 적용하여 산성광산배수에 대한 본 처리 시스템의 처리 가능성과 적용성을 평가하고자 하였다.

## III. 연구의 내용 및 범위

○ 일광광산 산성광산배수의 수질현황 파악 및 ZS 다공성 세라믹의 처리특성 파악

- 일광광산 산성광산배수의 수질분석
  - 시기별 일광광산 산성광산배수의 중금속 발생 특성 파악
  - 산성광산배수의 수질 분석 : 중금속 Al, As, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn 의 농도 측정
- 장기간 컬럼연속실험을 통한 ZS 다공성 세라믹의 처리특성 파악
  - 산성광산배수 처리 시스템의 개발에 기초자료로 활용하기 위하여 ZS 다공성 세라믹의 장기간 산성광산배수 처리 특성 파악
- 산성광산배수의 효율적인 제거 및 슬러지의 용이한 배제가 가능한 처리 시스템의 개발
  - ZS 다공성 세라믹을 이용한 최적의 처리 시스템의 개발
    - 인공 산성광산배수를 대상으로 다양한 조건에서 최적의 처리효율을 얻을 수 있는 ZS 다공성 세라믹을 활용한 처리 시스템의 개발
  - 중금속 침전 슬러지의 관리가 안정적인 산성광산배수 처리 시스템의 개발
    - 중금속 침전 슬러지의 안정적이고 원활한 배제가 가능한 처리 시스템의 개발
- 최적의 운전을 위한 산성광산배수 처리 시스템의 설계인자 및 운전인자 도출
  - 고효율의 중금속 제거를 위한 처리 시스템의 설계인자 도출을 위한 연속주입 실험
    - 반응조 형태 및 크기, 세라믹 소재 충전량, 수리학적 체류시간 등의 파악
  - 안정적인 처리를 위한 처리 시스템의 운전인자 도출을 위한 연속주입 실험
    - 슬러지 역세 및 배출 주기, 역세 공기 주입량, 세라믹의 교체주기 등의 파악
- 부산시 일광광산 산성광산배수에 대한 처리 시스템의 적용성 평가
  - 실제 일광광산 산성광산배수에 대한 본 처리 시스템의 적용성 평가
    - 일광광산 산성광산배수를 대상으로 본 처리 시스템에 의한 산성광산배수 처리특성 파악
  - 일광광산의 효율적인 수질정화 방안 제시
    - 일광광산 산성광산배수의 수질특성을 고려한 산성광산배수 처리방안 제시

#### IV. 연구결과

일광광산 산성광산배수 내 평균 중금속 농도는 각각 Al 47.2mg/L, As 1.47mg/L, Cd 0.21mg/L, Cu 35.1mg/L, Fe 293.9mg/L, Mn 12.1mg/L, Pb

0.45mg/L, Zn 26.6mg/L로 조사되었으며, Fe, Al, Cu, Zn, Mn 중금속의 농도가 다른 중금속보다 높게 함유되어 있는 것으로 나타났다. 전국 금속광산 산성광산 배수의 중금속 평균농도 값과 비교해 볼 때 일광광산 산성광산배수의 중금속 농도가 전국 산성광산배수의 중금속 평균 농도보다 Cu와 Fe은 각각 7.5배, 4.5배나 높은 값을 나타내었고 Zn는 4.0배, Mn은 2.7배, Al은 1.6배나 높을 정도로 오염도가 심한 것으로 조사되었다. 또한 가을철, 겨울철 보다는 봄철 혹은 여름 기간(4~7월)에 중금속의 농도가 높게 측정되는 계절별 특성을 가지고 있었다.

실제 일광광산 산성광산배수를 대상으로 ZS 다공성 세라믹을 이용한 장기간 컬럼연속실험 결과, 215일(약 7.2개월)의 운전기간 동안 중금속별 평균 제거효율은 Al 96.1%, As 91.5%, Cd 84.5%, Cu 95.0%, Fe 98.1%, Mn 77.7%, Pb 82.2%, Zn 81.5%로 조사되었으며 유출수의 중금속 평균농도는 각각 Al 4.82mg/L, As 0.12mg/L, Cd 0.04mg/L, Cu 1.33mg/L, Fe 4.05mg/L, Mn 3.26mg/L, Pb 0.07g/L, Zn 5.74mg/L로서, Pb 중금속의 유출수 농도는 '청정' 지역 수질오염물질 배출허용기준을 충족하고, As, Cd, Cu, Fe, Mn 중금속은 '가'지역 허용기준을 만족하는 것으로 파악되었다.

ZS 다공성 세라믹이 충전된 황류식 접촉반응 연속처리 시스템에서 반응 13일 동안 중금속 평균 제거효율은 각각 Al 88.8%, As 97.4%, Cd 98.7%, Cu 87.9%, Fe 99.6%, Mn 86.3%, Pb 74.9%, Zn 80.1%의 높은 값을 보였지만 평균 유출수의 pH는 5.73으로서 낮은 알칼리 제공능력을 보였으며 이로 인해 평균 역세주기가 3.3일 밖에 되지 않았다. 반면 반응 40일 동안의 상향류식 접촉반응조의 중금속 평균 제거효율은 각각 Al 95.2%, As 97.5%, Cd 95.9%, Cu 89.4%, Fe 99.8%, Mn 83.6%, Pb 80.1%, Zn 80.9%로 우수한 제거효율을 보였을 뿐만 아니라 평균 유출수 pH가 7.56으로서 황류식 접촉반응조 보다 높은 알칼리 공급능력을 나타내었고 평균 역세주기도 6.7일 정도로 긴 역세주기를 보였다. 따라서 ZS 다공성 세라믹을 이용한 산성광산배수의 처리를 위해서는 상향류식 접촉반응조가 황류식 접촉반응조 보다 알칼리 제공능력과 중금속 제거능력의 측면에서 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

황류식 및 상향류식 접촉반응조 내 슬러지의 역세실험에서 ZS 다공성 세라믹에 생성되는 중화침전 슬러지는 표면에 강하게 피복되기 보다는 느슨한 형태로 쌓여있는 형태이기 때문에 반응조 하부 산기관의 공기만으로도 세라믹 표면의

중화침전 슬러지를 충분히 탈리할 수 있었다. 황류식과 상황류식 접촉반응조 모두 구형(Spherical type) ZS 세라믹의 외부 공극의 확보로 인해 역세척시 부상하는 공기를 통해 슬러지 탈리가 효과적으로 일어났으며, 정지 후 반응조 내 부유하던 중화침전 슬러지들은 하부 다공판을 통해 원활하게 슬러지 저류부로 침강하여 처리 시스템 외부로 원활하게 배제되는 것을 확인할 수 있었다.

접촉체류시간 0.5day의 조건하에서 수행된 상황류식 접촉반응조 내 ZS 다공성 세라믹에 의한 산성광산배수 처리실험 결과, 접촉체류시간을 1.0day에서 0.5day로 단축시켜 운전할 경우 알칼리 지속기간을 의미하는 역세주기가 6.7일에서 3.1일로 감소되었고 중금속의 제거효율도 상당부분 저감되는 것으로 나타났다. 또한 세라믹 소재의 입경 17.5mm 조건하에서 수행된 상황류식 접촉반응조 내 ZS 다공성 세라믹에 의한 산성광산배수 처리실험에서 세라믹 소재의 입경을 17.5mm로 증가시켜 운전할 경우 12.5mm의 세라믹 소재보다 비표면적의 감소 등으로 인해 역세주기가 6.7일에서 5.8일로 다소 감소하는 것으로 나타났다.

실제 일광광산 산성광산배수를 대상으로 반응 112일(약 3.7개월) 동안 수행된 상황류식 접촉반응조 연속실험에서 중금속 평균 제거효율은 Al 92.7%, As 89.5%, Cd 91.1%, Cu 83.5%, Fe 99.8%, Mn 70.4%, Pb 52.4%, Zn 73.9%의 우수한 제거효율을 보였으며 상황류식 접촉반응조 유출수의 평균농도는 Al 3.10mg/L, As 0.11mg/L, Cd 0.02mg/L, Cu 0.02mg/L, Fe 0.59mg/L, Mn 3.07mg/L, Pb 0.29mg/L, Zn 5.75mg/L로서 수질오염물질 배출허용기준과 비교해 볼 때 Cd, Fe는 '청정'지역 기준을 만족하며 As, Cu, Mn, Pb, Zn은 '청정'지역의 기준을 약간 상회하여 '가'지역의 기준을 만족시키는 것으로 나타났다. 또한 황산염( $\text{SO}_4^{2-}$ )에 대한 평균제거효율은 58.1%를 보이고 있었다. 반응 112일 동안 상황류식 접촉반응조 처리 시스템의 평균 역세주기는 11.2일이고 유출수의 평균 pH는 7.60로서 매우 높은 알칼리 상태가 장기간 지속되었다.

인공 산성광산배수 대상의 상황류식 접촉반응조 연속반응 전과 후의 ZS 다공성 세라믹에 대한 XRD 분석결과, 공통적으로 Clinoptilolite, Magnetite 및 Hematite가 주요 peak 로 관측되었고 반응전의 Magnetite 혹은 Hematite의 peak값이 반응 후에 증가하여 관측되었다. 중화 침전물에 대한 XRD 분석에서 Goethite와 Schwertmannite가 주요 성분으로 관측되었다. ZS 다공성 세라믹에

대한 EDS 분석결과, 접촉반응전 세라믹에서 관측되지 않았던 Cu와 Zn 중금속이 산성광산배수와 접촉반응후의 ZS 다공성 세라믹에서는 관측되었고 Fe와 Al 중금속의 peak가 상당량 증가되어 관측되었었다. 중화 침전물에 대한 EDS 분석에서는 Fe, S, Al이 주요 구성물질로 관측되었다. 상기 ZS 다공성 세라믹과 중화 침전물에 대한 XRD 및 EDS분석결과를 기초로 판단할 때 ZS 다공성 세라믹은 흡착 및 이온교환과 침전 및 공침 기작이 동시에 작용하는 다기능성 세라믹 소재로서 산성광산배수 내 중금속을 효율적으로 제거할 수 있는 처리제임을 확인할 수 있었다.

본 연구 결과를 종합적으로 분석해 볼 때, ZS 다공성 세라믹을 충전시킨 상향류식 접촉반응조 처리 시스템은 장기간 지속적인 알칼리 공급이 가능하고 흡착, 이온교환, 중화침전 등 복합적 처리기능으로 인하여 높은 제거효율을 얻을 수 있으며, 또한 구형(Spherical type) 세라믹 소재를 이용함으로써 투수성을 증가시켜서 슬러지 배출을 원활하게 하고, 반응조 내 산기관과 다공판을 통해 중금속 슬러지를 최대한 빠른 시간 안에 시스템 외부로 배출시킬 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 고농도의 중금속을 함유하고 있는 일광광산 산성광산배수의 처리에 ZS 다공성 세라믹을 충전한 상향류식 반응조 처리시스템이 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

## V. 연구결과의 활용계획

### ○ 부산시 휴·폐광산지역의 산성광산배수 대책방안으로 활용

- 본 연구에서 개발된 처리제를 활용하여 부산시 일광광산에서 발생하는 산성광산배수의 처리에 현장적용이 가능하다.
- 기존 광해방지사업이 적용된 부산지역 휴·폐광산 지역의 산성광산배수 처리 현황과 문제점을 파악하고 이를 해결하고 방지할 수 있는 대책방안의 일환으로 활용이 가능하다.
- 부산지역 휴·폐광산 주변의 산성광산배수 처리를 위한 부산시 차원의 대응정책수립에 기초자료로 활용이 가능하다.

#### ○ 세라믹 소재의 활용방안

- 본 연구에서 개발되는 세라믹 소재는 유지관리가 쉬우며 기능 저하에 따른 세라믹 소재의 교체가 편리하기 때문에 폐광산 현장특성에 따른 다양한 형태의 산성광산배수 처리에 광범위하게 활용이 가능할 것으로 기대된다.
- 다양한 입자구경과 중금속별 특성에 따른 최적의 세라믹 소재를 개발함으로써 pH, 중금속 배출농도, 유량 등의 산성광산배수 특성에 따른 최적의 세라믹 소재를 선택하여 현장 조건에 따라 탄력적으로 적용시킬 수 있을 것으로 생각된다.

#### ○ 수처리 기술 활용방안

- 세라믹 소재는 산성광산배수 처리뿐만 아니라 중금속을 다량함유하고 있는 도금폐수와 같은 산업폐수처리 시스템의 처리제로도 사용이 가능하고 특히 하·폐수의 수처리용 세라믹 소재의 담체개발에도 응용할 수 있을 것으로 기대된다.
- 또한 알칼리 공급능력과 높은 흡착능력을 활용한 세라믹 소재를 이용하여 지하수 처리기술에도 적용이 가능하며 자연형 하천을 위한 친환경 소재 블록으로도 활용이 가능할 것으로 예상된다.