

# 금은광산 일대의 비소 및 중금속 유출의 저감을 위한 콜로이드 반응 벽체 적용 가능성

고일원 · 김주용 · 이상우 · 김경웅

## 1. 서론

투수 반응 벽체 (Permeable reactive barrier)는 오염된 지하수의 흐름을 유지하며 측면 (vertically lateral barrier) 혹은 하향 (horizontally downgradient barrier) 방향으로 반응 물질을 촉진하여 무기 및 유기 오염물을 저감시키는 기술로서 비용과 높은 제거 효율과 경제성을 가진 다양한 투수 반응 벽체 설치 (emplacement) 방법들이 최근 들어 제시되고 있다. 일반적인 방법으로 trench-and-fill의 방법은 지하수 흐름을 반응 벽체로 유도한 후 처리하는 기술로써 적용된다 (안주성 외, 2001). 또한, jet grouting과 deep soil mixing은 시추장비를 사용하여 토양과의 혼합을 유도하는 기술들이다. 그러나, 최근에는 지하수 처리의 반응 효율을 높이고 비용절감을 위해서 굴착 없이 콜로이드 용액을 주입하는 기술이 연구단계 수준에서 보고되고 있다. Durmusoglu et al. (2000)은 NAPLs (non-aqueous-phase liquids) 에 의한 지하수 오염을 막기 위해서 하향방향으로 실리카 콜로이드를 주입하여 오염물을 고정했다. 그리고, Cantrell and Kaplan. (1997)은 영가철 콜로이드의 반응 벽체 형성의 가능성을 보고했다. 본 연구에서는 금은광산일대의 비소 및 중금속의 오염 확산을 제어하기 위해서 흡착 침전 반응 효율이 높은  $\alpha$ -hematite 콜로이드를 제조하였다. 그리고, sand column과  $\alpha$ -hematite로 코팅된 sand column을 사용하여 콜로이드 반응 벽체 형성을 위한 콜로이드 거동의 조절 인자를 도출하고자 했다.

## 2. 연구 방법

실험에 사용한  $\alpha$ -hematite 콜로이드와  $\alpha$ -hematite-coated sand는 다음의 방법으로 제조되었다.  $\alpha$ -hematite 콜로이드를 제조하기 위해서 6 M의 NaOH와 2 M의  $FeCl_3$ 를 혼합하여  $100 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$  에서 8일간 숙성시켜서 72시간동안 서서히 냉각시키는 gel-sol method를 사용했다 (Sugimoto, 1993). 그리고,  $\alpha$ -hematite-coated sand 제조는 0.68  $\alpha$ - $Fe_2O_3$  g/L의 과량을 주문진 표준모래와 하루동안 교반시킨 후  $100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 에서 24시간 숙성시킨 후 증류수로 세척하여 사용했다 (Scheidegger et al., 1993).

컬럼 실험은  $\alpha$ -hematite 콜로이드 0.5 mL (0.1 mg/ml)의 pulse flow를 흘려 보낸 뒤  $NaNO_3$  100 mM을 흘려주었다. 콜로이드의 침전특성을 살펴보기 위해서 수용액의 pH, 유속, sand 입자 크기를 달리하여 실험했다. 이때, 컬럼의 tracer test를 위해서  $NO_3^-$ 의 농도를 측정하였고, 용액의 pH는 2에서 10까지 조절하였으며, 유속은 pH 5.9에서 154, 254, 354, 354, 434, 537 cm/day로 변화시켰다. 또한, 컬럼에 채워넣은 sand의 평균 입자 크기를 0.1, 0.4, 2 mm로 변화시켰다.  $\alpha$ -hematite 콜로이드와  $NO_3^-$  농도의 측정은 UV/VIS spectrophotometer (Youngwooo Instrument Co., SP1900/2700)로 430 nm와 220 nm에서 각각 측정하였다.

---

주요어: 금은광산, 비소, 투수 반응 벽체,  $\alpha$ -hematite 콜로이드

광주과학기술원 환경공학과(iwko@kjist.ac.kr)

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. $\alpha$ -hematite 콜로이드와 $\alpha$ -hematite-coated sand 흡착특성

철 콜로이드 반응 벽체에서 가능한 비소 및 중금속의 제거를 위한 흡착 침전 반응은 지하수 내  $\alpha$ -hematite 콜로이드와의 반응과 토양에 흡착된  $\alpha$ -hematite 콜로이드와의 반응 두가지이다.  $\alpha$ -hematite 콜로이드에 의한 비소의 흡착은 높은 농도에서 분배계수가 선형의 관계를 보였다 (Figure 1a). 그리고, 토양에 흡착된  $\alpha$ -hematite 콜로이드를 상정한  $\alpha$ -hematite 콜로이드를 코팅한 sand의 흡착 실험은 95% 이상의 비소와 납의 제거 효율을 보여준다 (Figure 1b). 비소와 납의 흡착은 2시간 내에 평형에 도달했고, 흡착 후  $\alpha$ -hematite 콜로이드에서 교환된 수소이온 때문에 pH는 초기 7.7에서 7.4로 약간 감소했다.

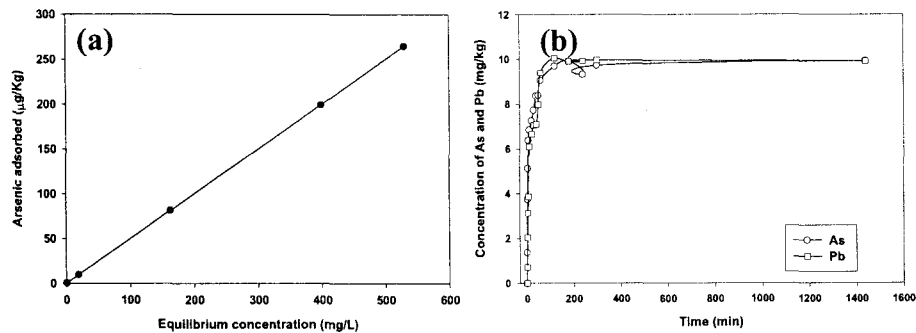


Figure 1. Characteristics of adsorption of  $\alpha$ -hematite colloid and  $\alpha$ -hematite-coated sand (a) equilibrium adsorption isotherm of As adsorbed by  $\alpha$ -hematite colloid, (b) adsorption amount of As and Pb onto  $\alpha$ -hematite-coated sand

#### 3.2. $\alpha$ -hematite 콜로이드 거동 특성 (pH, 유속, sand 입자 크기 영향)

콜로이드 반응 벽체에서  $\alpha$ -hematite 콜로이드를 오염된 지역에 한정하여 지중에 이동시켜야 한다. 이때,  $\alpha$ -hematite 콜로이드의 균질한 지중 설치를 위해서 콜로이드의 이동을 제어하는 pH, 유속, 매질입자 크기의 영향이 중요하다. 콜로이드의 침전을 나타내는 침전계수 (deposition rate)를 계산하여 이동하는 정도를 측정하였다 (Table 1).

낮은 pH 조건에서 콜로이드는 sand매질이  $\alpha$ -hematite 콜로이드와 같은 양의 전하를 띠기 때문에 반발력에 의해 침전이 감소했다. 반면에, 높은 pH 조건에서 콜로이드와 sand가 각각 양전하와 음전하의 반대전하를 띠기 때문에 정전기적 인력 (electrostatic attraction)이 커져서 콜로이드 침전이 증가했다. 그리고,  $\alpha$ -hematite 콜로이드는 컬럼 내 유속이 클수록 빠른 이동도를 보이고, 434 cm/day 이상의 유속에서는 과과점에서 거의 같은 콜로이드의 농도에 도달한다. 이는 콜로이드의 중력침강과 표면흡착에 의한 평형에 도달했기 때문이다. 또한, sand 입자 크기가 0.1, 0.4, 2 mm로 증가하면 공극 크기의 증가로 콜로이드의 중력침강이 감소하기 때문에 콜로이드 침전은 감소하게 된다. 그러므로,  $\alpha$ -hematite 콜로이드 반응 벽체의 적절한 깊이와 폭의 설치를 위해서 위의 인자들을 고려하여 콜로이드의 이동을 증가시키거나 제한해야 한다.

Table 1. Deposition rate of  $\alpha$ -hematite colloid in a sand column.

Control factor		Deposition rate ( $s^{-1}$ )	Note
pH	2	7.00E-04	0.1 mm sand 320 cm/day
	4	1.80E-03	
	6	2.40E-03	
	8	3.00E-03	
	10	1.00E-02	
Average media size (mm)	0.1	2.60E-03	320 cm/day
	0.4	2.00E-03	
	2.0	1.40E-03	
Flow rate (cm/day)	224	4.00E-04	pH=5.9
	272	1.00E-03	
	321	1.20E-03	
	466	2.60E-03	
	611	2.80E-03	

#### 4. 콜로이드 반응 벽체의 적용가능성과 의미

콜로이드 반응 벽체는 굴착없이 지중에 반응지대를 설치하기 때문에 경제적이며, 무기 오염물 제거에 탁월하다. 또한,  $\alpha$ -hematite는 비소 및 중금속과의 높은 흡착비율을 갖으며, 지하수중의 pH 변화등의 상태를 변화시키지 않는 장점을 갖는다. 따라서, 광산일대 비소 및 중금속 유출을 자연저감시킬 수 있어서 현장적용이 기대된다. 특히, 지중에서  $\alpha$ -hematite 콜로이드를 오염된 지역에 고정시키는 것이 가장 중요한 기술 요소이며, 실제적용을 위해 반응 산물의 안정성과 투수성의 변화에 대한 고려가 필요하다.

#### 참고문헌

- 안주성, 전효택, 김경웅, 2001, 광산 폐기물에 의한 비소 및 중금속의 지표하부 유출과 격리 저장 처리 기법 : 한국자원공학회지 38권, 4호, p. 246-256
- Cantrell K.J. and Kaplan D.I., 1997, Zerovalent iron colloid emplacement in sand columns, J. of Environ. Engineering 123 (5), p.499-505
- Durmusoglu E and Corapcioglu M.Y., 2000, Experimental study of horizontal barrier formation by colloidal silica, J. of Environ. Engineering 126 (9), p.833-841
- Scheidegger A., Borkovec M., Sticher, H. 1993. Coating of silica sand with goethite: preparation and analytical identification. Geoderma 58, p. 43-65
- Sugimoto, T., Sakata, K., Muramatsu, A., 1992, Formation Mechanism of Monodisperse Pseudocubic  $\alpha$ -hematite particles from Condensed Ferric Hydroxide Gel. J. Colloid & Interface Sci. 159, p. 372-382

#### 사사

본 연구는 21 세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호#GG04480)에 의해 수행되었습니다.