

토양세척기법에 의한 광미내 비소처리 및 처리공정 모니터링

이상우 · 고일원 · 이종운 · 김경웅¹⁾

1. 서론

자연계에서 비소의 존재형태는 대략 200종이 있는 것으로 알려져 있으며 대부분 광물형태로 존재한다. 산업혁명 이전 비소의 주된 오염원은 주로 풍화나 화산활동 등의 자연적 현상이었으나, 산업혁명 이후 산업의 급격한 발전에 따라 슬러지 매립, 광산활동, 농업활동 중의 제초제 사용 등의 인류활동에 의하여 생태계로의 비소 유입이 급격하게 증가하고 있다 (Diaz-Barriga et al., 1993). 특히 광산활동으로 생성되어지는 폐석과 광미의 경우 많은 양의 비소와 유해 중금속을 함유하고 있으나 현재 우리나라의 경우 이에 대한 처리가 미비한 실정이며, 최근 들어 광산주변에 존재하는 폐석과 광미의 방치로 인하여 주변 토양 및 지하수의 오염으로 인한 광산 주변의 농작물과 가축 그리고 지역주민에 대한 피해 사례가 보고되어지고 있다. 현재 오염토양의 처리방법은 화학적 방법, 물리학적 방법 및 생물학적 방법으로 크게 나뉘질 수 있으며 또한 처리 기법의 적용 장소에 따라 in-situ와 ex-situ로 대별되어질 수 있다. 이중 현장에 직접 토양 복원을 위하여 적용되는 in-situ 방식의 경우 설치비용이 낮고 처리를 위한 운영비용이 저렴하여 현재 오염토양 처리에 적용하기 위한 연구가 많이 이루어지고 있다. 따라서 본 연구에서는 in-situ 방식의 토양세척기법을 이용한 오염토양 처리기술의 가능성을 평가하기 위하여 본 기술의 적용시 고려되어야 할 주요 영향 인자들에 의한 영향과 효율성을 연구하고 이를 현장에 직접 적용하기 위한 가능성을 평가하여 보았다.

2. 연구방법

본 실험에서는 전남 보성의 명봉 폐금광산 광미와 주변토양을 채취하여 시료로 사용하였으며 토양의 오염정도를 조사하기 위하여 왕수법 ($\text{HNO}_3 : \text{HCl}$ (1:3 v/v))을 사용하여 토양내 존재하는 중금속과 비소의 총 함량을 조사하였다. 또한 광미 중 존재하는 비소의 존재형태를 확인하여 주변 환경으로의 유출 가능성을 평가하기 위하여 음이온연속추출 분석법을 수행하였다. 모든 시료는 ICP-AES (Thermo Jarrell Ash)를 사용하여 분석하였다.

다량의 중금속과 비소를 함유한 광미의 처리를 위하여 다양한 세척용액을 이용한 토양세척법을 시험하였으며 batch test를 통하여 공정의 운전조건을 산출하고 이를 column test에 적용하여 현장토양에 대한 적용 가능성을 평가하여 보았다. 또한 토양세척법을 적용하여 처리한 광미

주요어: 명봉광산, 광미, 비소, 토양세척법, 위해성평가

1) 광주과학기술원 환경공학과(kwkim@kjist.ac.kr)

에 대한 위해성 평가를 하기 위하여 TCLP (toxicity characteristics leaching procedure; US EPA, 1986)법과 식물발아법 (seed germination)을 적용하였다.

3. 결과 및 토론

3.1 광미 및 주변토양의 오염도 조사

왕수법을 이용하여 광미와 광산주변 토양의 오염도를 조사한 결과, 광미의 경우 높은 비소 함량 (4000-4500 ppm)을 보였으나 다른 중금속 (Cd, Cu, Pb)의 경우 상대적으로 낮은 농도를 나타내었다. 한편 광산주변 토양 역시 광미의 분석결과와 유사하게 높은 비소 함량 (118 ppm)과 낮은 중금속 함량을 나타냄으로써, 다량의 비소를 함유한 광미가 주변 토양에 대한 오염원으로 작용하고 있는 것으로 파악되었다.

음이연속추출 분석법을 이용하여 명봉광산 광미의 비소 존재형태를 규명함으로써 주변 환경으로의 비소 유출 가능성을 조사하려 하였다. 이 때 명봉광산 광미에 존재하는 비소 존재형태 특성을 다른 광산의 광미 (IC: 임천광산, GB: 구봉광산, DB: 덕음광산)의 연속추출법 분석 결과와도 비교하였다 (Fig. 1).

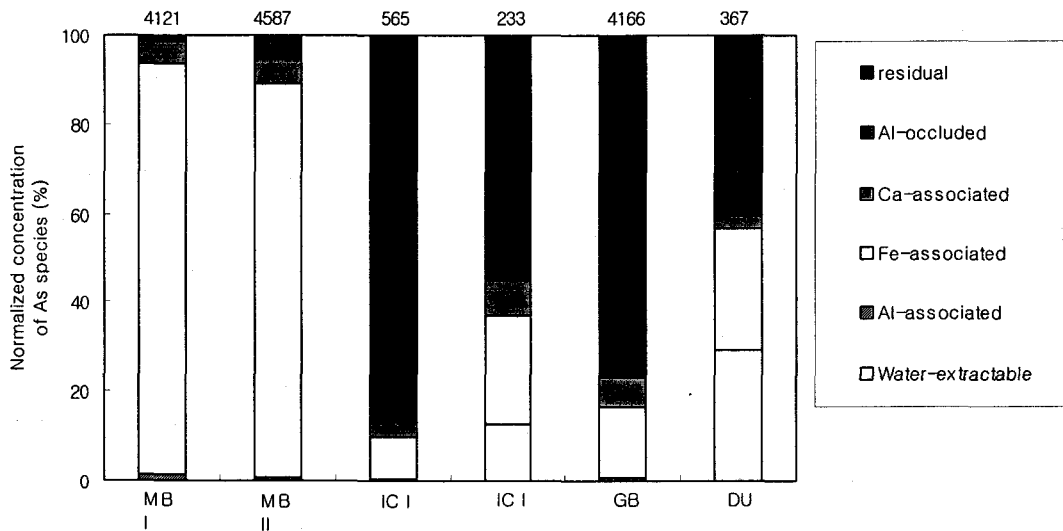


Fig. 1 Sequential extraction of tailings in the Myungbong (MB), Imchun (IC), Goobong (GB) and Dukum (DU) mines (MB I - bulk, MB II - gray, IC I -bulk, IC II -green). The number above each bar represents As concentration.

명봉광산 광미의 경우 비소의 존재형태별 함량에 있어서 비교적 이동성이 낮은 잔류물 형태의 비소는 소량 존재하는 반면, 주변환경 변화에 의하여 이동도 향상의 가능성이 있는 철화합물과 결합된 형태의 비소가 다량 존재함을 알 수 있었다. 따라서 주변 환경으로 비소의 유출을 막기 위하여 오염토양에 대한 적절한 처리가 필요한 것으로 판단되어졌다.

3.2 토양세척기법 적용을 위한 운전조건의 산출과 현장 적용성 검토

명봉광산 광미에 함유된 비소의 처리를 위하여 in-situ 방식의 토양정화방법을 통한 처리 가능성을 평가하여 보았다. 먼저 중금속과 비소 제거를 위한 최적 세척용액과 최적 농도를 파악하기 위하여 EDTA, oxalate, phosphate를 이용하여 광미시료 (2g)에 각 세척용액 (40 mL)의 농도를 0-1 M로 변화시켜가며 batch test를 실시하였다. 광미 중 존재하는 비소의 제거효율을 비교한 결과 세척용액으로 사용한 EDTA (0.03 M) 경우 oxalate와 phosphate에 비하여 높은 제거효율을 나타내었다. 또한 토양 세척용액의 pH에 따른 제거효율을 평가하기 위하여 pH를 3-11로 변화시켜 실험을 실시한 결과, pH 11의 경우에 광미 내에 존재하는 비소 중 81.4%가 제거되는 효율을 나타내었다.

In-situ 토양세척법의 현장 적용 가능성을 검토하기 위하여 현장 환경과 유사하게 모사된 column에 batch test를 통하여 산출된 최적조건 (EDTA 0.03 M, pH 11)에 따라 제조한 세척용액을 투입하였다. 이 때 세척용액의 유량을 각각 0.1과 0.5 mL/min으로 변화시켰으며 0-25 pore volume의 세척용액을 column에 통과시켜 중금속 (Cd, Cu, Pb) 및 As의 제거효율을 살펴보았다. 실험 결과, 광미 내에 존재하는 비소에 대하여 높은 제거효율 (71%)을 나타내었으며 또한 Cd, Cu, Pb에 대하여도 각각 96%, 75%, 58%의 높은 제거효율을 보임으로써 in-situ 토양세척법을 이용한 현장 오염토양의 복원은 가능한 것으로 판단되어졌다.

3.3 복원토양의 위해성 평가

토양세척법의 column 실험을 통하여 각각 5, 10, 15, 20, 25 pore volume의 세척용액으로 처리한 광미에 대하여 TCLP법과 식물발아법을 적용, 위해성을 평가하였다. TCLP법 적용시 10 pore volume 이상의 세척액으로 처리하였을 경우 광미 내의 비소 및 중금속은 허용기준치 이하의 값을 나타냄을 알 수 있었다. 또한 식물의 발아율을 이용하여 처리 후 광미에 대한 위해성을 평가해본 결과, 초기에는 처리과정 중 식물 성장에 영향을 줄 수 있는 형태의 비소 함량 (water-soluble)이 증가함에 따라 식물의 발아율이 감소하지만 처리가 진행됨에 따라서 다시 발아율이 증가하는 경향을 나타내었다.

따라서 TCLP법 및 식물발아법 등의 위해성 평가방법을 통하여 토양세척법을 이용한 현장 오염토양의 복원가능성을 평가한 결과, 적절한 세척용액을 이용한 토양세척법은 오염토양 내 존재하는 비소를 효과적으로 처리할 뿐만 아니라 처리 후 토양에 대한 위해성 또한 매우 낮은 것으로 나타났다.

참고문헌

- Diaz-Barriga, F., Santos, M.A., Mejia, J., Batres, L., and Yanez, L., 1993, "Arsenic and cadmium exposure in children living near a smelter complex in San Luis Potosi, Mexico", *Environ. Res.*, Vol. 62, pp. 242-250.
- U.S. Environment Protection Agency (USEPA), 1986, "Toxicity characteristic leaching procedure (TCLP)", *Fed. Reg.*, Vol. 54, No. 216, pp. 40643-406532.