

혐기성퇴적물에서 비소거동에 미치는 미생물의 영향

이중윤^{1),*} · 이상우²⁾ · 김경웅²⁾ · 윤정환¹⁾

1. 서 론

산업화가 가속화되며 독성 중금속에 의한 토양, 지하수 및 하상퇴적물의 오염사태가 증가하고 있다. 지표 산화환경에서의 이들 중금속의 이동 및 거동에 관한 연구는 그간 수차례 수행된 바 있고 이에 관하여 적절한 오염처리기술 개발에 관한 연구도 다수 이루어지고 있다. 그러나 중금속이 심부 환원환경으로 이동한 경우에 대하여는 이들 오염물질의 거동 및 그에 따른 적절한 처리에 관한 연구가 거의 수행된 바 없는 실정이다. 특히 유기오염물질로 오염된 심부에 대한 생물학적 처리기술의 경우, 오염 유기물 자체가 미생물의 생물량 증가를 위한 탄소원으로 이용되므로 생물학적 분해(biodegradation)에 관련한 연구는 활발히 수행되었지만, 생물학적으로 분해되지 않는 중금속으로 오염된 경우에 대하여 미생물을 이용한 처리방안은 거의 보고된 바 없다. 오염심도가 깊어지며 접근이 불가능해지거나 기존의 물리·화학적 방법으로 처리를 시도할 경우 막대한 투자비가 소요된다면, 가장 좋은 대안은 독성 중금속을 지하수 또는 토양 간극수로부터 분리, 주변 고체 매질(예를 들면 토양입자나 철산화물, 광물)의 표면에 고착화시킴으로써 생물권으로부터 격리시키는 방안일 것이다.

미생물은 금속이나 준금속의 산화수를 변화시켜 용해도를 조절함으로써 이들을 이동도가 없는 상태, 또는 이동하더라도 독성이 많이 감소된 상태로 변화시킬 수 있다. 이러한 특징을 이용하여 중금속을 처리할 경우, 이는 기존의 방법 - 예를 들면 굴착, pump and treat 또는 유기오염물의 생물학적 처리 - 같이 지하 매질로부터 독성원소를 완전히 제거하는 것이 아니라 단지 심부에 이들을 안정적으로 고착화시키는 것이다. 호상철광상처럼 자연상태에서 미생물에 의한 대규모 금속집적의 예는 많이 찾을 수 있으며 이러한 방안이 중금속의 자연저감(natural attenuation) 방안으로서 최근 선진 각국에서 많은 연구의 초점이 되고 있다. 이러한 경우 자연상태에서 토착미생물에 의한 중금속의 화학종 변화는 매우 느린 속도로 발생하기 쉬우므로 그 속도를 촉진하기 위하여 인위적으로 미생물의 영양분을 투입하는 생물학적 촉진(biostimulation)의 경우도 고려할 수 있다.

보통 산화환원전위에 민감한 독성원소들, 예를 들면 U, Cr, Se 등은 환원상태에 있을 때 그 독성 및 이동도가 감소하므로, 자연저감의 기본은 미생물을 이용하여 이들 원소들을 환원시키는 것이다. 반면, 비소의 경우는 환원상태로 존재할 경우 그 독성 및 이동도가 증가하므로 환원상태에서 자칫 지하수를 통한 생물권으로의 확산을 증가시킬 우려가 있다. 특히 광미적처장의 상부를 복토할 경우 그 하부는 환원환경이 되기 쉬우므로 비소에 대한 이러한 우려는 더욱 설득력을 갖는다(안주성 등, 2003).

주요어: 비소, 미생물, 혐기성, 퇴적물, 자연저감

1) 전남대학교 건설지구환경공학부 (jongun@chonnam.ac.kr)

2) 광주과학기술원 환경공학과 (kwkim@kjist.ac.kr)

이 연구의 목적은 퇴적물을 대상으로 하여 (1) 환원조건 하에서 장기간의 비소 거동에 미치는 기본적인 미생물지구화학적 반응을 이해하고, (2) 새로운 방법으로서의 미생물에 의한 비소 자연저감법의 가능성을 확인하며, (3) 탄소원을 투입하여 생물학적 작용을 촉진할 경우 그 결과에 대한 파악을 목적으로 한다.

2. 연구방법

비소 함량이 약 340 ppm으로 조사된 전남 보성 명봉 폐금광산 주변의 하상퇴적물을 채취하여 미생물에 의한 용출실험을 실시하였다. 젖은 상태의 퇴적물과 0.1 M $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ pH 5 완충용액을 1:2의 비율로 혼합한 후 30분간 교반하여 이 중 상등액 5 mL을 접종물로 택하였다. 퇴적물은 건조한 후 균질화하여 9 g을 취해 각 실험용액 300 mL에 넣고, 미생물로 접종한 후 150 rpm으로 교반하며 최대 14일간 반응시켰다. 이 때 실험용액은 각각 증류수 및 초산염(acetate), 유산염(lactate), 포도당(glucose) 5 mM을 사용하였고 초기 pH는 모두 7.0으로 조정하였다. 비교시료로서 퇴적물-용액 혼합액을 autoclave를 이용하여 멸균한 후 동일 조건에서 실험하여 결과를 비교하였다. 접종은 N_2 혐기성 조건에서, 시료채취는 $\text{CO}_2\text{-H}_2$ 혐기성 조건에서 수행하였다.

일정 기간별로 pH, 총 비소농도, 아비산염(arsenite: As(III)) 농도, Fe^{2+} 농도, 음이온(Cl^- , NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-})농도를 각각 정량하였다. 미생물의 성장을 알아보기 위하여 각 추출 시료 20 μL 을 5 mL TSB(trypticase soy broth)에 접종, 하루 동안 배양한 후, 광도(OD; optical density)를 조사하였다. 아비산염은 시료 채취 후 즉시 음이온교환 카트리지를(LC-SAX SPE, Supelco)를 통과시켜 분리하였다. 비소 농도는 hydride generating-AAS(HG-AAS; Perkin Elmer 5100), 음이온은 IC로 각각 분석하였다. 광도는 UV-vis spectrometer로 600 nm 파장에서, Fe^{2+} 는 ferrozine 용액을 사용하여 562 nm 파장에서 각각 측정하였다.

3. 결과 및 토론

용출된 총 비소 함량을 시간에 따라 측정한 결과, 모든 멸균한 시료와 멸균하지 않은 증류수, 초산염, 유산염 투입 시료의 경우 큰 차이를 보이지 않은 반면, 포도당을 첨가한 멸균하지 않은 시료의 경우, 약 6일 경과 시점부터 급격하게 용존 총 비소의 함량이 감소하는 것이 관찰되었다(Fig. 1). 그러나 용존 As(V)/As(III) 비는 다른 시료와 차이를 보이지 않고 있어 관찰된 용존 비소 감소는 비소의 화학종(speciation) 변화에 의한 고체 매질로의 흡착(예를 들면, 아비산염이 비산염으로 산화되는 등)에 의한 것은 아닌 것으로 판단된다. 한편, 동일 시료에서 실험 시작 2일 경과 후부터 Fe^{2+} 함량이 점진적으로 증가하였는데 이는 토착 미생물이 Fe(III)을 환원시킨 결과인 것으로 판단된다. 환원된 Fe^{2+} 는 산화상태의 비소를 환원시킴으로써 그 이동도를 증가시킬 수 있으나, 앞에서 언급했듯이 총 비소 함량은 오히려 감소하였으므로 이 실험에서는 그러한 현상은 나타나지 않은 것으로 판단된다. 음이온 분석 결과, 시간이 경과함에 따라 SO_4^{2-} 의 함량이 감소하는 것으로 미루어 용액 중에서 비소를 제거한 주된 원인은 박테리아에 의한 SO_4^{2-} 의 환원인 것으로 짐작된다. 용액 중 SO_4^{2-} 는 미생물에 의한 환원 후 반응성이 강한 S^{2-} 를 형성함으로써 비소와 결합, 침전물을 형성하는 것으로 보고된 바 있다 (Newman *et al.*, 1997a; 1997b).

비소가 퇴적물 내에서 하부 환원환경으로 이동하게 되면 이동도가 향상되는 As(III)으

로 전환할 것이다. 이러한 예측은 자연저감에 의한 비소 처리에 있어 매우 부정적인 전망을 제시하는 것이다. 그러나 이 실험 결과에서 보듯이 무생물적인 비소환원 반응의 속도는 매우 낮고 오히려 미생물에 의하여 다른 주성분 이온들 - 예를 들면 SO_4^{2-} - 이 환원됨으로써 비소를 고착화한다면, 다른 오염 중금속(U, Cr, Se 등)의 처리에 영향을 미치지 않고도 심부에서의 비소 자연저감기법 적용이 가능할 것이라 여겨진다. 이 경우, 적당한 탄소원을 주입함으로써 미생물의 활동도를 향상시키는 것이 효과적인 것으로 나타났으며 어떠한 탄소원이 효율적인지는 각 오염부지별로 사전에 지구화학적·미생물학적 조사가 선행되어야 할 것이다.

참고문헌

안주성, 김주용, 전철민, 문희수 (2003) 풍화광미내 고상 비소의 광물학적·화학적 특성 및 용출 가능성 평가. 자원환경지질, v. 36, p. 27-38.

Newman, D.K., Kennedy, E.K., Coates, J.D., Ahmann, D., Ellis, D.J., Lovley, D.R., and Morel, F.M.M. (1997a) Dissimilatory arsenate and sulfate reduction in *Desulfotomaculum auripigmentum* sp. nov. Arch. Microbiol., v. 168, p. 380-388.

Newman, D.K., Beveridge, T.J., and Morel, F.M.M. (1997b) Precipitation of arsenic trisulfide by *Desulfotomaculum auripigmentum*. Appl. Environ. Microbiol., v. 63, p. 2022-2028.

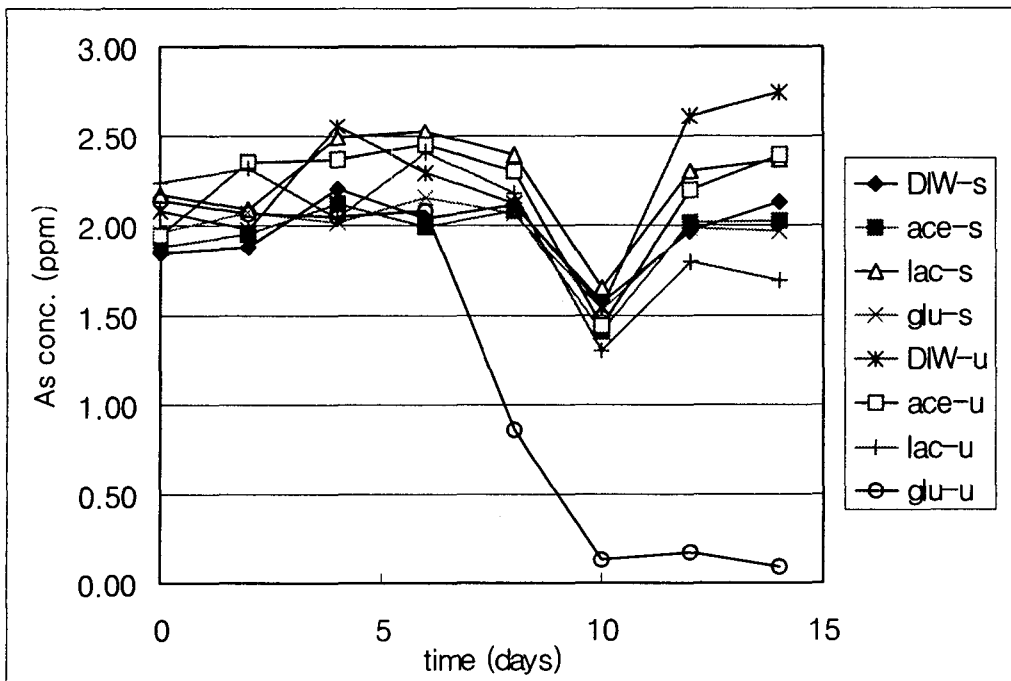


Fig. 1. The variation in total arsenic concentrations versus time.

DIW: deionized water, ace: acetate, lac: lactate, glu: glucose,
 -s: sterilized, -u: nonsterilized