

셀레늄-미생물간의 반응 및 셀레늄 광물화 특성

Interaction between Selenium and Bacterium and Mineralogical Characteristics of Biotreated Selenium

이 승 엽(Seung Yeop Lee)* · 오 종 민(Jong Min Oh) · 백 민 훈(Min Hoon Baik)

한국원자력연구원 방사성폐기물기술개발부
(Korea Atomic Energy Research Institute, 989 Daedeok-daero, Yuseong-gu, Daejeon 305-353, Korea)

요약 : 철환원 박테리아인 미시가넨시스를 이용하여 용존 셀레늄을 제거할 때, 물 속의 다른 금속성분 들인 철, 황산염, 그리고 구리가 미칠 수 있는 영향을 살펴보았다. 미시가넨시스 박테리아는 산화수가 4가인 산화 셀레나이트(2 mM)를 셀레나이드로 환원시키고 물속의 셀레늄 농도를 점차 감소시켰다. 환원된 셀레나이드는 용존 2가 철과 결합하여 나노입자 크기의 철-셀레나이드로 침전되었다. 용존 황산염과 구리는 미생물의 셀레나이트 환원작용에 부정적인 영향을 끼쳤는데, 특히 구리 성분은 미생물 에 대해 독성으로 작용하여 셀레나이트 제거가 원활히 이뤄지지 못하게 하였다. 이러한 결과로부터 알 수 있는 것은 셀레늄으로 오염된 현장을 미생물로 정화할 때, 황산염 혹은 구리의 농도 분포와 양 을 충분히 고려해야 한다는 사실이다. 궁극적으로, 미생물에 의한 철-셀레나이드 광물형성작용은 지하 수를 따라 원거리로 이동할 수 있는 셀레늄의 확산을 억제하는 중요한 수단이라고 볼 수 있다.

주요어 : 철환원 박테리아, 미시가넨시스, 셀레늄, 환원, 철-셀레나이드

ABSTRACT : Removal of dissolved selenium by *D. michiganensis*, a iron-reducing bacterium, and effects of dissolved metal elements such as iron, sulfate, and copper were investigated. Selenide that was reduced from selenite (2 mM) by *D. michiganensis* was gradually removed from the aqueous medium. As the reduced selenide was combined with aqueous iron, it was precipitated as a nanoparticulate iron-selenide. Sulfate and copper negatively affected the microbial selenite reduction, and the copper was especially toxic to the bacterium, inhibiting a microbial removal of dissolved selenite. These results show that it should be carefully biotreated for a selenium-contaminated site considering *in situ* sulfate or copper distribution and concentration. Consequently, the formation of iron-selenide by bacteria will be an important measure for preventing a long-distance migration of selenium in the subsurface environments.

Key words : Iron-reducing bacterium, *D. michiganensis*, selenium, reduction, iron selenide

서 론

고준위폐기물에 포함되어 있는 셀레늄(⁷⁹Se)은

10만년 이상의 반감기를 갖는 위험한 방사성 핵종 중의 하나이다. 따라서, 셀레늄의 토양 및 지하 환경에서의 이동은 큰 관심의 대상이 된다(Scheinost and Charlet, 2008; 박빛나 외, 2008). 셀레늄의 용해도는 셀레늄의 산화상태에 따라 달라지며, 토양,

*교신저자: seungylee@kaeri.re.kr

퇴적물, 그리고 지하수 등 자연환경의 산화/환원 조건에 의해 영향을 받을 수 있다(Masscheleyn *et al.*, 1990). 높은 산화상태의 셀레늄은 Se^{6+} 와 Se^{4+} 가 있고 물 속에서의 용해도가 높은 반면, 낮은 산화상태의 Se^0 , Se^{1-} , 그리고 Se^{2-} 는 주로 고체 형태로 존재하며 용해도가 낮다(Elrashidi *et al.*, 1987). 따라서, 높은 산화상태의 셀레늄인 selenate (Se(VI) , SeO_4^{2-})나 selenite (Se(IV) , SeO_3^{2-})가 환원되어 낮은 산화상태의 셀레늄으로 바뀌면 용존 셀레늄의 농도가 저감될 수 있다.

많은 과학자들은 지하수 용존 셀레늄의 농도를 저감하기 위해 2가 철을 가진 광물을 이용한 셀레늄 환원(Scheinost and Charlet, 2008) 혹은 미생물을 이용한 환원(Oremland *et al.*, 1989; Stolz and Oremland, 1999; Lee *et al.*, 2007; 박빛나 외, 2008; 김유미 외, 2011)의 방법을 강구하였다. 특히, 미생물을 이용한 셀레늄 환원의 방법은 토양 혹은 지하심부에 생존하는 금속환원세균을 이용하여 산화된 셀레늄을 원소 셀레늄(Se^0)으로 바꾸는 방법이다. 최근에 금속환원세균을 이용하여 방사성 핵종의 하나인 용존 산화우라늄을 환원하여 용해도를 저감시키고 광물화하는 기작이 연구되었다(Suzuki *et al.*, 2002; 이승엽 외, 2009; Lee *et al.*, 2010). 금속환원세균은 철과 망간과 같은 금속원소 뿐만 아니라, 셀레늄 및 우라늄과 같은 방사성 핵종들도 환원시킬 수 있다.

그 동안 미생물을 이용한 셀레늄의 환원은 selenate 혹은 selenite를 원소 셀레늄(Se^0)으로 바꾸는 기작에만 초점이 맞춰져 있었다(Lee *et al.*, 2007). 원소 셀레늄은 나노크기의 구형체로 입자가 작고 순수 셀레늄으로 구성되어 있으나, 결정성장의 제약이 있으며 재용해의 위험성이 있다. 이러한 화학적 특성 외에 우리가 더 중요하게 다뤄야 하는 부분이 실제 셀레늄의 누출로 인해 오염될 수 있는 야외 토양, 지질 및 지하수 조건은 셀레늄 뿐만 아니라 다른 금속이온들(예: 철(Fe))도 같이 공존하고 있다는 사실이다. 따라서, 순수 셀레늄만을 대상으로 한 미생물적 환원 및 광물화 연구는 그 깊이에 있어서 한계가 있을 수 있다.

본 연구는 금속환원세균을 이용한 셀레늄의 환원 실험에서 철이 공존할 때의 광물형성 작용과 음이온인 황산염(SO_4^{2-})의 셀레늄과의 경쟁관계를 살펴보고, 철과 황산염은 토양, 퇴적물, 그리고 지하수 등에 항상 존재하는 원소로써 고려되었다. 본 실험에 사용된 미생물은 한국원자력연구원 지

하심부에 생존하는 철환원세균을 채취 및 배양하여 사용하였다.

실험방법

미생물의 농화배양

한국원자력연구원 지하처분연구시설(KURT)의 지하심부(약 80 m 깊이)를 시추하고 더블패커를 설치하여 깊이별로 지하수를 채수한 후 필요한 시기에 적정량의 지하수를 채수하였다. 혐기성 미생물을 배양하기 위해, 현장에서 산소와의 접촉을 최소화시키면서 미리 준비해간 성장배지 병에 주사기를 이용하여 지하수를 주입한 후 실험실 내 인큐베이터에서 30°C로 배양하였다.

철환원박테리아의 농화배양을 위해 전자공여체로 젖산(lactic acid)을 공급하였고, 전자수용체로 Fe(III)-citrate를 주입하였다. 박테리아의 농화배양은 배양액의 색깔 변화 혹은 침전광물의 형성에 의해 확인할 수 있었다. 이러한 실험과정 및 배양액 조성 등은 오종민 외(2010)의 실험방법에 자세히 설명되어 있다. 외부미생물에 의한 오염을 막기 위해 세럼병(serum bottle)은 JISICO사의 압열멸균기(98 kPa, 121°C, 15 min)로 멸균하였고, 각종 시약 및 성분의 주입시 0.2 μm 필터를 사용하였다.

지하수로부터 농화 배양시킨 미생물을 실험에 바로 사용하지 않고, 약 1년여 동안 10여 차례의 농화배양을 반복적으로 실시한 후 사용하였다. 이러한 이유는, 초기 지하수에는 미생물들의 개체수 및 종류가 매우 많고 복잡하기 때문에 되도록 미생물의 개체 종류를 최대한 줄이고자 하였다.

최종적으로 농화배양 된 미생물의 유전자 염기서열을 분석하여 미생물 종을 파악하고자 하였으며, 16S rRNA 분석을 실시하였다. 구체적인 시료 준비 및 분석 방법 등은 이승엽 외(2011)의 논문에 설명되어 있다.

실험조건

미생물과 셀레늄과의 반응실험에서 용액상의 철(Fe(II)), 구리(Cu(II)) 및 황산염(SO_4^{2-}) 성분이 생지화학적 반응에 미치는 영향을 알아보기 위해, 농화배양에 사용했던 배양용액(100 mL)에 FeCl_2 (2 mM), CuCl_2 (1 mM), 그리고 Na_2SO_4 (2 mM)을 각각 넣어주었다. 셀레늄은 selenite 형태로 Na_2SeO_3

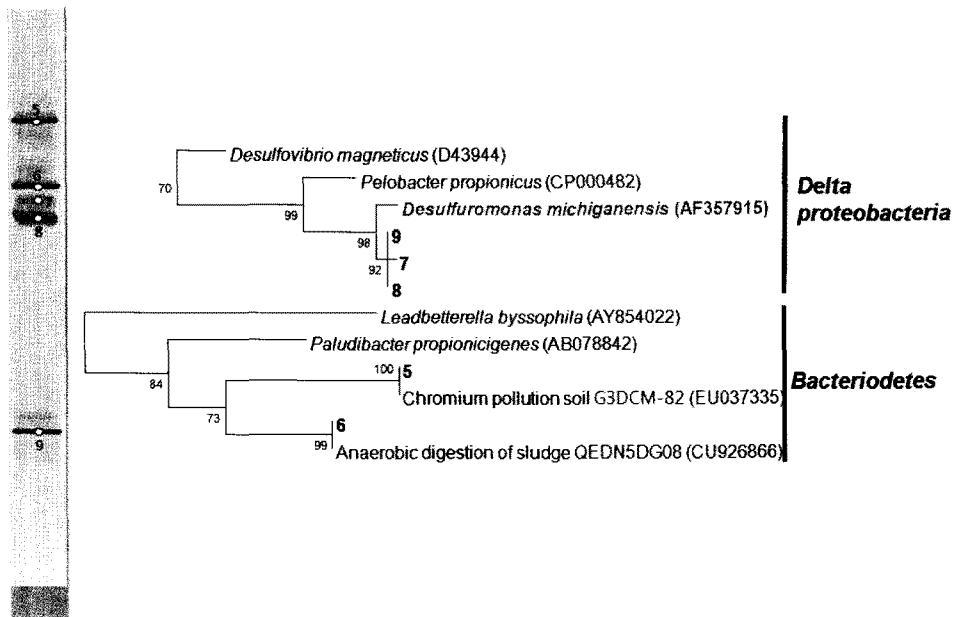


Fig. 1. Phylogenetic tree and DGGE bands based on 16S rRNA gene analysis of the isolated bacteria from the KURT groundwater.

(2 mM) 주입하였다. 모든 화학성분들은 살균을 목적으로 0.2 µm 필터링 주사기를 통해 배지에 주입되었다. 미생물은 약 1.5 mg/L 단백질량으로 넣어 주었다. 그리고, 미생물을 넣지 않은 시료(No cell)도 준비하여 비교 실험하였다. 미생물과 셀레늄과의 반응실험을 위해 반응용액을 교반기에서 120 rpm으로 교반하였고 약 3주 동안 진행되었다.

분석방법

시간별로 미생물의 증식 경향을 알아보기 위해 단백질 분석법을 사용하였다. Micro BCA Protein Assay Kit (Thermo Scientific Co.)을 사용하였으며, 시료와 시약을 1:1로 섞고 60°C로 60 min 가열한 후 15분 정도 실온에서 냉각하여 UV/Vis 분광분석기로 562 nm 파장대를 측정하여 미생물 단백질량의 정량값을 얻었다.

미생물 반응실험 동안 생성된 침전물들은 X-선 회절분석기(XRD)와 주사전자현미경(SEM)으로 분석하였다. 침전물을 원심분리(10,000 rpm, 10 min)하고 무산소 증류수로 여러 번 세척한 후, Glove box의 환원환경(N₂ gas) 하에서 충분히 건조하였다. 광물 감정을 위해서는 XRD를 사용하였는데, 시료 분석 전까지 대기 중의 산소에 의한 산화 방

지를 목적으로 진공 데시케이터에 질소가스를 충전하여 시료를 운반하였다. XRD 분석은 Rigaku D/MAX-2500 (Japan) 모델을 사용하였으며, 2 theta 5~55°까지 1°/min의 스캔속도와 0.01 step size로 CuKα (40 kV/300 mA) 조건에서 분석하였다. 광물의 형태 및 표면을 관찰하기 위해서 FE-SEM (Hitachi, S-4700)을 이용하였다. FE-SEM 관찰을 위해서 시료를 질소 충전 진공 데시케이터로 운반하였으며, 운반된 시료를 홀더에 부착된 carbon tape 위에 고루 문지르고 진공 하에서 OsO₄를 고루 분사하여 얇게 코팅(~10 nm)한 후 관찰하였다. 화학분석을 위해서는 부속장비인 EDS (Horiba, EMAX)를 사용하였다. 용액상에 존재하는 셀레늄의 농도 변화를 알기위해 실험 중에 필요시마다 약 2 ml씩의 용액을 채취하여 0.2 µm 필터로 여과한 후 유도결합플라즈마분광분석기(ICP-MS)를 이용하여 농도를 분석하였다.

연구결과 및 토의

철환원미생물 유전자 분석

한국원자력연구원 지하 심부 지하수로부터 배양 분리한 세균의 동정을 위해 세균의 DNA와 RNA

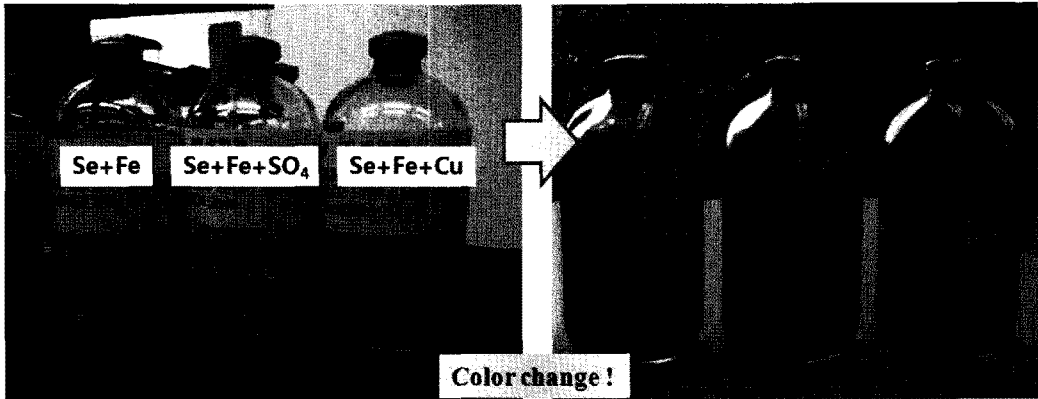


Fig. 2. Color changes of serum bottles due to a microbial activity. Little color change was observed for a serum bottle with Cu.

를 추출한 후 PCR을 이용하여 16S rRNA 분석을 실시하였다. PCR 결과 증폭된 16S rRNA gene을 주형으로 direct sequencing을 실시하여 결정된 염기 서열을 가지고 GenBank의 database와 비교하였다. PCR-DGGE로부터 염기서열을 이용하여 미생물 계통수를 분석한 결과 5, 6, 7, 8, 9번이 우세한 것으로 나타났다(그림 1). 그 중에서 5번과 6번의 clone들이 주요 미생물들로 확인되지만, 분리(isolation)되지 않은 세균들이며 철환원능의 여부는 알려진 바가 없다. 하지만, 9번과 같은 미시가넨시스(*Desulfuromonas michiganensis*)는 Fe(III)을 전자수용체로 활용하는 철환원능이 있는 세균으로 확인되었다. 따라서, KURT 지하수로부터 배양된 미생물 중에서 미시가넨시스가 산화철을 환원시키는 주요 세균 중의 하나임을 알 수 있다. 본 실험에서는 이와 같이 확인된 미생물을 농화 배양하여 용존 셀레늄을 환원하고 광물화하는 연구를 수행하였다.

셀레늄의 환원 및 용존농도 감소

셀레늄과 철이 2 mM 농도로 함께 용존되어 있는 조건에서 구리 혹은 황산염의 영향을 살펴 보았다. 약 20일간의 미생물의 셀레늄 환원기작에 의해 초기의 맑은 세럼(serum)병 용액이 짙은 갈색으로 변화하였다(그림 2). 하지만, 구리(1 mM)가 포함된 용액은 초기의 연한 주황색의 색이 거의 변하지 않았다.

Selenite의 형태로 넣어준 Se(IV)이 미생물에 의해 환원되면서 용액으로부터의 농도 감소가 관찰

되었다(그림 3). 초기에 빠른 셀레늄 농도의 감소가 나타나고 시간이 지나면서 감소량은 점차 줄어들었다. 하지만, 구리가 포함된 경우에는 용존 셀레늄의 감소가 거의 나타나지 않았다. 이는 구리 성분이 미생물에 대해 독성으로 작용하여(이승엽 외, 2011), 미생물의 이화적 셀레늄환원(dissimilatory selenite reduction)을 방해하는 것으로 보인다. 음이온 성분으로 황산염이 포함된 경우에는 용존 셀레늄의 농도 감소가 관찰되었으나, 황산염이 포함되지 않은 경우에 비해 감소량이 많지 않았다. 이러한 사실은 음이온으로 존재하는 황산염이 같은 음이온인 셀레늄의 미생물적 환원을 방해하는 것으로 판단된다. 자세한 기작은 알 수 없으나 동일 농도(2 mM)의 두 음이온들이 유사 거동을 통해서 경쟁하는 관계로 용액상에 존재하는 것으로 보인다.

셀레늄의 환원반응이 진행되는 동안 미생물의 양적 변화를 살펴보았다(그림 4). 초기 미생물의 주입량이 조금 달랐지만 미생물의 성장 변화를 경과 시간에 따라 관찰하는 데는 어려움이 없었다. 구리가 포함된 경우에는 미생물의 성장이 관찰되지 않고 오히려 약간 감소하는 경향을 보여 주었다. 이는 그림 2에서 관찰한 바와 같이 육안상의 용액 색깔변화가 거의 없는 것과 일치한다. 이러한 결과는 구리 독성에 의해 미생물의 활동이 많은 제약을 받아 맥키나와이트 광물 형성이 잘 이뤄지지 않았던 이전의 경우와 비슷한 경향을 보인다(이승엽 외, 2011). 황산염이 존재하는 경우는 시간별로 미생물의 성장이 관찰되었지만, 황산염이 없는 경우에 비해 성장 속도가 제한적인 것으로 관찰되었다.

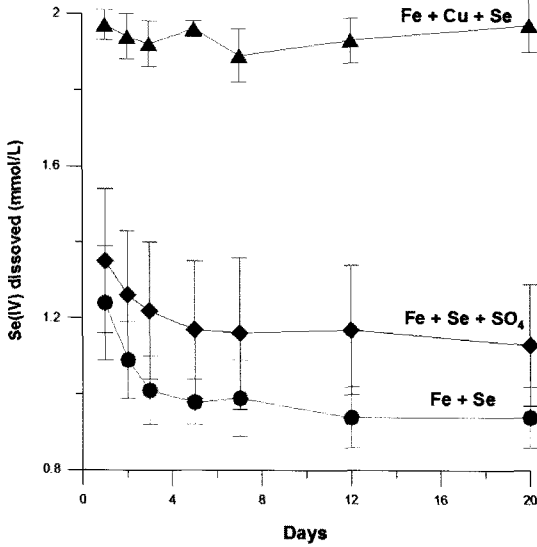


Fig. 3. Selenite removal by *D. michiganensis* respiration and effect of dissolved metal ions.

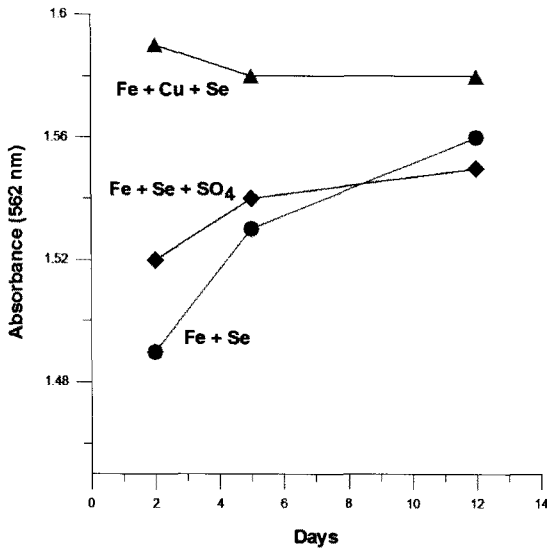


Fig. 4. UV/Vis spectrophotometric analysis for absorption (562 nm) intensities of dissolved proteins that were derived from microbial mass.

미시가넨시스 세균의 경우에 용존 황산염은 전자수용체로 작용하지 못하고, 오히려 용존 셀레늄의 전자수용성을 방해하여 미생물의 성장을 더디게 하는 것으로 판단된다.

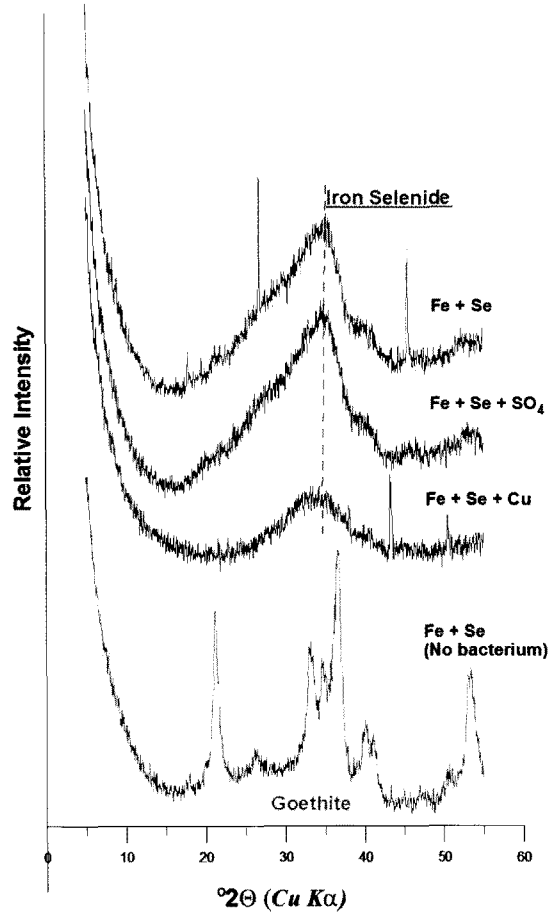


Fig. 5. X-ray diffraction patterns for iron selenide and goethite precipitates that were derived from the media with different combinations of metal ions and bacterium.

셀레늄 광물 형성

미생물의 환원기작에 의해 셀레늄 광물이 형성되었다(그림 5). 광물 형성 기작은 용존된 셀레늄이 환원되면서 물 속의 Fe(II)와 결합하고 안정한 철-셀레나이드(iron selenide (Fe_3Se_2))라는 고체상으로 변형된 것으로 보인다. 결정성이 좋지 않아 XRD 회절선이 뚜렷하게 발달하고 있지 않지만, $35^\circ 2\theta$ 부근의 주요 피크가 잘 관찰되고 있다. 용액상에 존재하는 다른 불순물들(예: SO_4^{2-} , Cu^{2+})의 존재 여하에 의해 XRD 회절선의 강도에 차이가 났다. 특히, 구리가 포함된 경우에는 셀레늄 침전물의 X-선 회절 강도가 보다 낮게 나왔다. 이는 앞서 관찰한 배양액 색깔 변화, 미생물의 활동도, 그

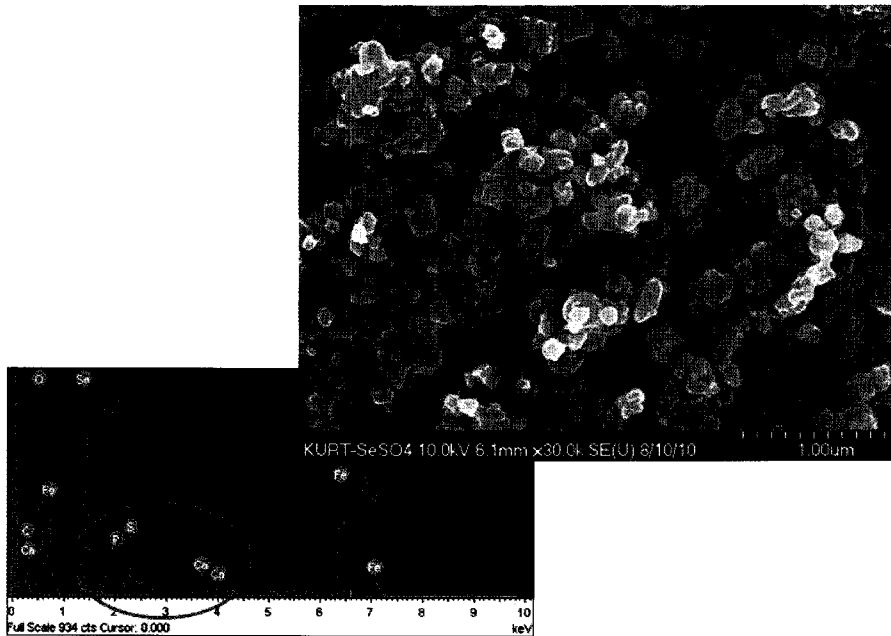


Fig. 6. A SEM image of iron selenide that was precipitated from the microbial medium (Fe + Se + *D. michiganensis*). Arrows indicate EDS spectra peaks of Se and Fe, which are the components of iron selenide. A circle show the apatite-like components.

리고 셀레늄의 감소와 밀접한 연관성이 있는 것으로 보인다. 미생물의 약한 활동성 때문에 셀레늄의 환원이 미약하였고 결과적으로 철과 결합된 환원 침전물의 양도 많지 않았던 것으로 보인다. 그리고, X-선 회절강도가 좋은 일부 작은 피크들은 용액상의 유기물로부터 유래된 흑연(graphite) 물질로 확인되었으며, 미생물에 의한 생성 기작은 현재로서는 알기 힘들다. 미생물이 없는 시료의 경우, 용액상의 Se(IV)가 미생물이 아닌 Fe(II)로부터 일부 전자를 얻어 환원되는 것으로 보인다. 초기에 넣어 준 2 mM의 Fe(II)가 Se(IV)에 의해 대부분 산화되면서 침착철(goethite, FeOOH)이 다량 형성되었다. 일반적으로 철이 산화되면 초기에 페리하이드라이트(ferrihydrite)라는 철산화 광물이 주로 생성(Schwertmann and Cornell, 2000)되는데 반해, 본 실험에서는 셀레늄의 촉매 작용에 의해 침착철이 쉽게 생성되었고, 이러한 현상에 대한 자세한 기작 설명은 추후 연구를 통해 밝혀져야 할 것이다. XRD 회절선을 관찰해 보면, 생성된 침착철은 어느 정도의 결정성을 가지고 있는 것으로 보인다. 결국, 본 실험을 통해 미생물의 존재 여하에 의해서 용존 방사성 이온들의 거동 및 광물화 경향이 크게 달라질

수 있다는 사실을 알 수 있다.

그림 6은 XRD에서 관찰된 철-셀레나이드(Fe_3Se_2)의 침전물을 주사전자현미경으로 관찰한 사진이다. 입자의 가장자리가 둥근 형태를 띠고 있으며 직경이 수 백 nm로 성장해 있지만 결정성이 잘 발달해 있지는 않다. EDS 화학분석을 통해 입자의 대부분이 Se와 Fe로 구성되어 있음을 알 수 있고, 부분적으로 인회석(apatite, $Ca_5(PO_4)_3OH$) 성분이 소량 관찰되었다. 이는 초기 조성된 배양액 성분의 일부가 미생물 작용에 의해 침전된 것으로 보인다. 철-셀레나이드 외에 원소 셀레늄(Se^0)의 일부 입자들도 관찰되었다(그림 7). KURT 미생물인 미시가넨시스 주위에 구형의 Se^0 가 관찰되고 있으며, 입자 크기는 약 100~300 nm 범위를 보여 주었다. 물속의 철과 반응하지 못한 일부 셀레늄 원소들이 환원 과정에서 순수한 원소셀레늄을 형성한 것으로 보인다. 이러한 결과를 통해, 용존 철의 농도에 따라 셀레늄의 광물화 과정에서 철-셀레나이드와 원소 셀레늄의 상대적 함량비가 달라질 수 있을 것으로 예상된다. 추후 연구를 통해 철과 환원 셀레늄간의 화학적 결합, 생성 광물 및 변이, 그리고 그들의 입자 형태 및 구조 등이 자세히 연구될 필요가 있다.

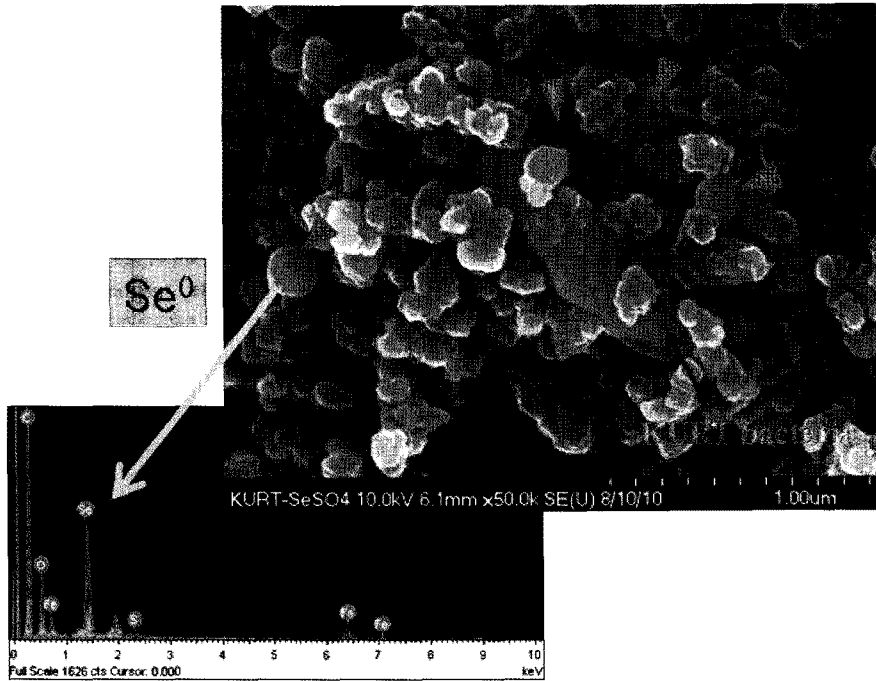


Fig. 7. A SEM image of a *D. michiganensis* cell coprecipitated with iron selenide and elemental Se particles. Spearheads indicate the elemental Se particles.

결 론

셀레늄과 같은 방사성 원소들이 토양 혹은 지하수 등을 오염시키고 점차 확산되는 경우에 마땅히 대처할 만한 기술적 방법들이 많이 부족하다. 특히, 방사성을 띠고 있는 성분들은 사람들이 직접 다루거나 처리하는데 많은 어려움이 있다. 따라서, 지하에 서식하는 현지미생물을 이용한 간접적인 방법을 통해 산화/환원에 민감한 셀레늄과 같은 원소들의 지하학적 거동을 조절하는 방안이 적합한 대안이 될 수 있다.

본 실험에서 국내 지하수에 서식하는 미시가넨 시스라는 철환원 미생물을 활용하여 용존 셀레늄의 생지화학적 반응 및 광물화 반응에 대한 기초 연구를 수행하였다. 미생물의 환원작용에 의해 용존 산화 셀레늄이 불용성인 원소 셀레늄으로 바뀐다는 사실 외에, 본 연구에서는 용존 철의 존재 여하에 따라 미생물에 의한 산화/환원 반응과정을 통해 환원된 셀레늄이 용존 철과 결합하여 철-셀레나이드 고체상이 새롭게 형성된다는 사실을 관찰하였다. 그리고, 철환원 미생물이 셀레늄과 같은 음

이온성 방사성 핵종을 환원하는 과정에서, 음이온성 황산염과 경쟁관계를 갖거나 구리 성분에 의해 셀레늄의 환원기작이 방해받을 받는다는 사실도 새롭게 관찰하였다. 하지만, 환원된 원소 셀레늄 혹은 철-셀레나이드 광물이 지하 환경 조건에서 얼마나 장기적으로 안정성을 보여주는지 추후 실험을 통해 밝혀져야 할 것이다. 결국, 미생물을 이용한 용존 셀레늄의 환원 및 광물화 기술에 대한 노하우는 향후 방사성 셀레늄이 포함된 오염 토양 및 지하수를 복원하는데 매우 유용하게 적용 및 이용될 수 있을 것이다.

사 사

이 연구는 교육과학기술부의 원자력연구개발사업의 연구비 지원을 통해 수행되었습니다.

참고문헌

김유미, 박정은, 이주영, 홍민선, 노열 (2011) 순천만 갯벌 미생물을 이용한 금속 환원 및 생광물화작용. 지질학회지, 47, 19-30.

- 박빛나, 문원진, 이승엽, 백민훈, 박병규, 김향옥, 오종민, 노열 (2008) 분석전자현미경법을 통한 혐기성 미생물의 셀레늄 환원에 관한 연구. 2008추계지질과학연합 학술발표회 초록집, 138p.
- 오종민, 이승엽, 백민훈, 노열 (2010) 한국원자력연구원 지하심부 미생물에 의한 용존우라늄 제거 및 광물화 특성. 한국광물학회지, 23, 107-115.
- 이승엽, 백민훈, 송준규 (2009) 스와넬라균(*Shewanella p.*)에 의한 용존우라늄 제거 특성 및 방사성폐기물 처분에의 응용. 자원환경지질, 42, 471-477.
- 이승엽, 오종민, 백민훈 (2011) 국내 지하수에 서식하는 바쿨라티에 의한 용존우라늄 제거 및 미량 중금속 원소들의 영향. 한국광물학회지, 24, 83-90.
- Elraschidi, M.A., Adriano, D.C., Workman, S.M., and Lindsay, W.L. (1987) Chemical equilibria of selenium in soils: a theoretical development. Soil Sci., 144, 141-152.
- Lee, J.H., Han, J., Choi, H., and Hur, H.G. (2007) Effects of temperature and dissolved oxygen on Se(IV) removal and Se(0) precipitation by *Shewanella* sp. HN-41. Chemosphere, 68, 1898-1905.
- Lee, S.Y., Baik, M.H., and Choi, J.W. (2010) Biogenic formation and growth of uraninite (UO₂). Environ. Sci. Technol., 44, 8409-8414.
- Masscheleyn, P.H., Delaune, R.D., and William, H.P. (1990) Transformations of selenium as affected by sediment oxidation-reduction potential and pH. Environ. Sci. Technol., 24, 91-96.
- Oremland, R.S., Hollibaugh, J.T., Maest, A.S., Presser, T.S., Miller, L.G., and Culbertson, C.W. (1989) Selenate reduction to elemental selenium by anaerobic bacteria in sediments and culture-Biogeochemical significance of a novel, sulfate-independent respiration. Appl. Environ. Microbiol., 55, 2333-2343.
- Scheinost, A.C. and Charlet, L. (2008) Selenite reduction by mackinawite, magnetite and siderite: XAS characterization of nanosized redox products. Environ. Sci. Technol., 42, 1984-1989.
- Schwertmann, U. and Cornell, R.M. (2000) Iron Oxides in the Laboratory. (2nd Ed.), Wiley-VCH, Weinheim.
- Stolz, J.F. and Oremland, R.S. (1999) Bacterial respiration of arsenic and selenium. FEMS Microbiol. Rev., 23, 615-627.
- Suzuki, Y., Kelly, S.D., Kemner, K.M., and Banfield, J.F. (2002) Nanometre-size products of uranium bioreduction. Nature, 419, 134.
-
- 접수일(2011년 9월 9일), 수정일(1차 : 2011년 9월 22일), 게재확정일(2011년 9월 22일)