

국내 지하수에 서식하는 바큇라툼(*baculatum*)에 의한 용존우라늄 제거 및 미량 중금속 원소들의 영향

Uranium Removal by *D. baculatum* and Effects of Trace Metals

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 : 국내 지하수에 생존하는 황산염환원미생물인 바큇라툼을 이용하여 용존된 우라늄을 제거하는 실험을 실시하였다. 용존 우라늄의 초기 농도는 50 μM 로 고정하여 실험을 실시하였고, 총 15일 실험 기간 내 용존된 우라늄은 본 연구에서 이용한 바큇라툼과의 반응을 통하여 대부분 제거되었다. 미생물학적 반응을 통한 우라늄 제거과정에 미량 중금속이 미치는 영향을 조사하기 위해 망간, 구리, 니켈, 그리고 코발트 성분을 각각 200 μM 씩 반응용액에 첨가하여 우라늄 제거 회분식 실험을 실시하였다. 대부분의 중금속 성분들은 미생물의 우라늄 제거 속도와 양에는 큰 영향을 주지 않았지만, 구리는 상당기간 미생물의 활동을 제약하였다. 그럼에도 불구하고 15일 이상의 반응기간을 거치면서 구리에 대한 미생물적 내성이 발현되어 남아 있던 우라늄이 나중에 제거되는 현상이 관찰되었다. 그리고, 미량의 니켈과 코발트는 생물기원의 맥키나와이트 생성 및 성장과 함께 공침하여 저감되는 것으로 관찰되었다.

주요어 : 황산염환원미생물, 바큇라툼, 우라늄, 중금속, 맥키나와이트

ABSTRACT : Removal of dissolved uranium by *D. baculatum*, a sulfate-reducing bacterium, and effects of trace metals such as manganese, copper, nickel, and cobalt were investigated. Total concentrations of dissolved uranium and trace metals were used by 50 μM and 200 μM , respectively. Most dissolved uranium decreased up to a non-detectable level (< 10 ppb) MS during the experiments. Most of the heavy metals did nearly not affect the bioremoval rates and amounts of uranium, but copper restrained microbial activity. However, it is found that dissolved uranium rapidly decreased after 2 weeks, showing that the bacteria can overcome the copper toxicity and remove the uranium. It is observed that nickel and cobalt were readily coprecipitated with biogenic mackinawite.

Key words : Sulfate-reducing bacterium, *D. baculatum*, uranium, heavy metals, mackinawite

서 론

오랜 세월동안 핵 시설을 포함하는 많은 지역에서 우라늄과 같은 방사성 핵종들이 누출되거나 지

하수를 따라 이동하여 자연 생태계로의 확산이 이뤄지고 있으며, 많은 과학자들과 환경론자들은 이러한 사태를 염려하고 있다(Lloyd and Renshaw, 2005). 체르노빌과 후쿠시마 사태와 같이 원자력발전소 등의 갑작스런 붕괴에 따른 방사성 핵종들의 누출과 토양 및 지하수의 오염은 주변 생태계에 심

*교신저자: seungylee@kaeri.re.kr

각한 영향을 줄 것이다. 또한, 지하심부에 처분하게 될 고준위폐기물 역시 환경적 측면에서 많은 관심의 대상이 되고 있다(Fredrickson *et al.*, 2000; 이승엽 외, 2009, 2010).

토양 및 지하 심부에는 다양한 종류의 미생물들이 서식하고 있으며(이중운과 전효택, 2000), 그 중에서 금속원소를 환원하는 금속환원미생물들이 주요 관심의 대상이 되고 있다(Roh *et al.*, 2000; 김유미 외, 2011). 왜냐하면, 철환원 박테리아 중의 하나인 *Shewanella*는 산화철 광물의 환원뿐만 아니라, 우라늄과 같은 방사성 핵종들을 환원시킬 수 있기 때문이다(Lee *et al.*, 2010). 이러한 미생물적 환원은 산화된 핵종들의 용해도(solubility)를 낮춤으로써, 지하수를 통한 방사성 핵종들의 환경적 이동을 최소화시킬 수 있다. 최근에는 미생물의 생지화학적 환원작용을 이용한 방사성 오염토양 혹은 지하수의 정화에 대한 관심이 높아지고 있으며, 실내 실험 및 파일럿 규모의 다양한 실험 등이 실시되고 있다(Lovley, 1991; Suzuki *et al.*, 2002; Anderson *et al.*, 2003; Lloyd and Renshaw, 2005).

금속환원미생물 중에는 철환원박테리아 외에 황산염환원박테리아(SRB; sulfate-reducing bacteria)라는 황산염을 환원시킬 수 있는 박테리아가 토양 및 지하수에 다양한 종(species)으로 생존하고 있다. 이 박테리아들은 철환원박테리아들처럼 우라늄과 같은 핵종들을 환원시킬 수 있으며, 산화/환원에 민감한 원소들의 환경적 거동에 깊게 관여하고 있다(Abdelouas *et al.*, 2000; Sani *et al.*, 2004). 황산염 환원박테리아는 철환원박테리아에 비해 핵종들과의 상호반응에 대한 연구 자료가 매우 부족하며, 많은 환원기작들이 자세히 밝혀져 있지 않다. 또한, 이러한 미생물에 의한 핵종들의 환원 과정에서 물속에 용존된 다른 금속이온들이 어떻게 영향을 미치는지 구체적으로 연구되어 있지 않다.

따라서, 본 연구에서는 황산염환원미생물이 산화우라늄과 반응할 때 용존우라늄의 감소 현상과 더불어 공존하는 중금속원소들의 영향을 동시에 살펴 보았다. 이 연구를 위해서 한국원자력연구원의 지하심부 지하수에 생존하는 SRB를 채취 및 실험실에서의 배양을 통해 우라늄의 환원 및 제거 기작에 관련된 연구를 수행하였다. 본 실험은 물 속에 녹아 이동하는 우라늄을 국내 지하수에 생존하는 SRB 미생물을 이용하여 혐기 환경에서의 생지화학적 반응을 관찰한 실험이며, 향후 방사성 핵종으로 오염된 토양 및 지하수 현장에 미생물적 방법을 적

용함에 있어서 귀중한 기초 자료가 될 수 있을 것으로 생각한다.

실험방법

미생물의 농화배양

한국원자력연구원 지하처분연구시설(KURT)의 지하심부(약 80 m 깊이)를 시추하고 더블패커를 이용하여 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.

황산염환원박테리아의 농화배양을 위해 전자공여체로 젖산(lactic acid)을 공급하였고, 전자수용체로 SO_4^{2-} (sulfate)를 주입하였다. 철(Fe)은 5% Fe(II) ammonium sulfate 형태로 용액상에 2 mL 주입하였다. 박테리아의 농화배양은 배양액의 색깔 변화 혹은 침전광물의 형성에 의해 확인할 수 있었다.

실내에서의 성장배지는 각각의 주요 성분들을 3개의 그룹으로 나누고 최종적으로 혼합하여 사용하였는데, 구체적인 성분 및 제조 방법은 오종민 외(2010)의 논문에 자세히 설명되어 있다. 외부미생물에 의한 오염을 막기 위해 세럼병(serum bottle)은 JISICO사의 압열멸균기(98 kPa, 121°C, 15분)로 멸균하였고, 각종 시약 및 성분의 주입시 0.2 µm 필터를 사용하였다.

지하수로부터 농화배양시킨 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 각기 다른 반응 특성들을 가지고 있기 때문에 되도록 미생물의 개체 종류를 최대한 줄이고자 하였다.

최종적으로 농화배양된 미생물의 유전자 염기서열을 분석하여 미생물 종을 파악하고자 하였으며, 16S rRNA분석을 실시하였다. 분리한 균의 1 µl template DNA와 1 µl 10 pmol eubacterial universal primer 27F (5'-AGA GTT TGA TCM TGG CTC AG-3'), 1492R (5'-TAC GGY TAC CTT GTT ACG ACT T-3'), 0.1 µl Taq polymerase (5 unit/µl, TAKARA), 2 µl 10X PCR buffer, 1.6 µl dNTP 등의 20 µl 반응 혼합물을 만들어 세균의 16S rRNA의 일부를 PCR로 증폭했다. PCR은 94°C에서 5분

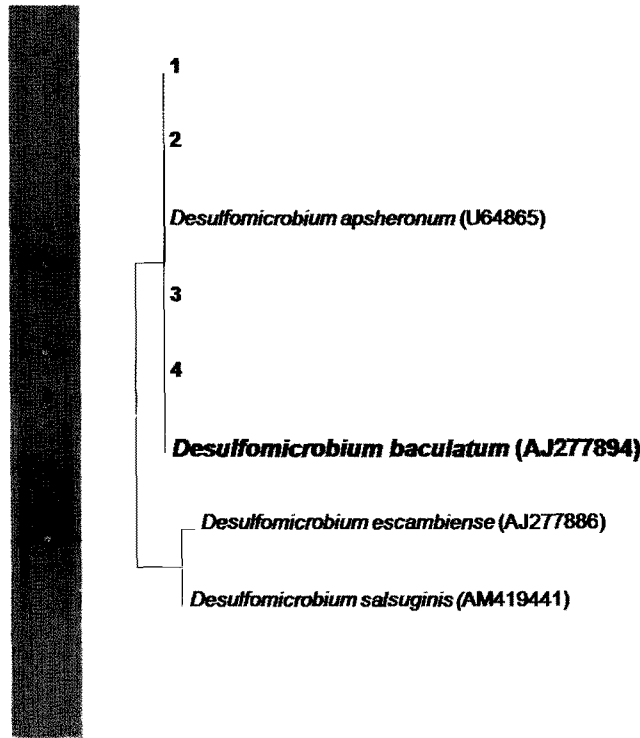


Fig. 1. Phylogenetic tree and DGGE bands based on 16S rRNA gene analysis of the isolated bacteria from the KURT groundwater.

간 초기 변성화시킨 후 95°C에서 1분간 denaturation, 50°C에서 1분간 annealing, 72°C에서 extension 과정을 35회 반복하였고 최종 extension은 5분간 실시하였다. PCR 증폭 산물은 1% Agarose gel electrophoresis 과정을 수행한 뒤 ethidium bromide에 stain하여 PCR 산물의 생성여부를 확인하였다. 이 PCR 산물은 다시 GC clamp가 붙은 primer를 이용하여 증폭한 후에 DGGE를 실시하였다. DGGE상의 band를 추출하여 sequence 분석을 수행하였다. 위의 분석은 충북대학교 미생물학과 환경미생물학 연구실에서 수행되었다.

위의 과정을 통해 확인한 최종 미생물은 *Desulfomicrobium baculatum*이라는 황산염을 환원시킬 수 있는 황산염환원세균으로 판명되었다. 본 연구에서는 이처럼 농화배양하여 얻은 순수 단일종인 *D. baculatum*을 이용하여 용존우라늄인 핵종과의 반응 실험을 수행하였다.

실험조건

미생물과 우라늄과의 반응실험에서 용액상의 중금속원소들이 생지화학적 반응에 미치는 영향을 알아보기 위해, 농화배양에 사용했던 배양용액(100 mL)에 $MnCl_2$, $CuCl_2 \cdot 2H_2O$, $NiCl_2$, 그리고 $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ 을 각각 0.2 mM씩 넣어주었다. 우라늄은 $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ 형태로 5×10^{-5} M 주입하였다. 미생물은 1.5 mg/L 단백질량으로 넣어주었다. 그리고, 미생물을 넣지 않은 시료(No cell)도 준비하여 비교 실험하였다.

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 60분 가열한 후 15분 정도 실온에서 냉각하여 UV/Vis 분광분석기로 562 nm 파장대를 측정하여 미생물 단백질량의

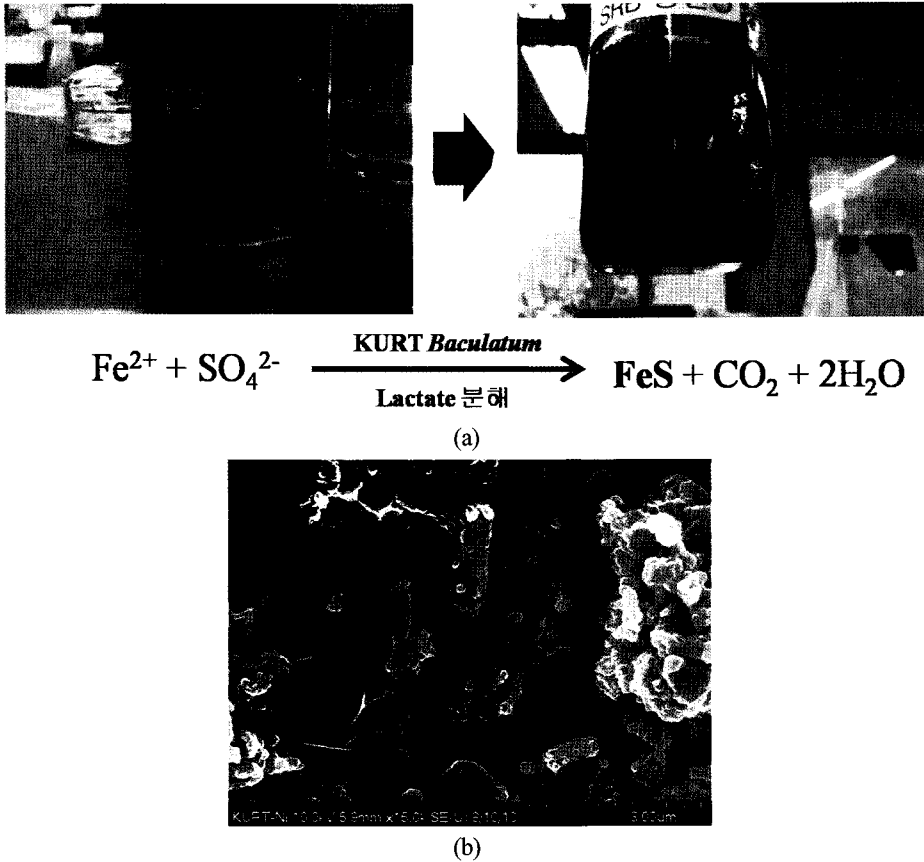


Fig. 2. (a) Sulfate reduction and mackinawite (FeS) generation by *D. baculatum*. (b) A SEM image of a *D. baculatum* cell coprecipitated with mackinawite particles.

정량값을 얻었다.

미생물 반응실험 이후 발생된 고형물들(맥키나와이트 포함)은 X-선 회절분석기(XRD)와 주사전자현미경(SEM)으로 분석되었다. 고형물을 원심분리(10,000 rpm, 10분)하고 무산소 증류수로 여러 번 세척한 후, Glove box의 환원환경하에서 충분히 건조하여 분석하였다. 광물 감정을 위해서는 XRD를 이용하였고, 광물의 형태 및 표면 화학분포를 알기 위해 SEM (Hitach, S-4700)과 부착장비인 EDS를 사용하였다. 용액상에 존재하는 다양한 이온들의 농도 변화를 알기 위해 실험과정 중 필요시마다 약 2 ml씩의 용액을 채취하였고, 0.2 µm로 필터링한 후 유도결합플라즈마분광분석기(ICP-MS)를 이용하여 농도를 분석하였다.

연구결과 및 토의

황산염환원미생물 유전자 분석

한국원자력연구원 지하 심부 지하수로부터 배양 분리한 세균의 동정을 위해 세균의 DNA와 RNA를 추출한 후 PCR을 이용하여 16S rRNA 분석을 실시하였다. PCR 결과 증폭된 16S rRNA gene을 주형으로 direct sequencing을 실시하여 결정된 염기서열을 가지고 GenBank의 database와 비교하였다. PCR-DGGE로부터 염기서열을 이용하여 미생물 계통수를 분석한 결과 1, 2, 3, 4번이 우세한 것으로 나타났다(그림 1). 황산염환원세균의 Band 분석 결과 identity값이 거의 100% 가깝게 *Desulfomicrobium baculatum*으로 확인되었다. 이 세균은 혐기성 환경에서 생존하는 세균으로, terminal electron acceptor로 sulfate 혹은 sulfite를 이용할 수 있는 것으로

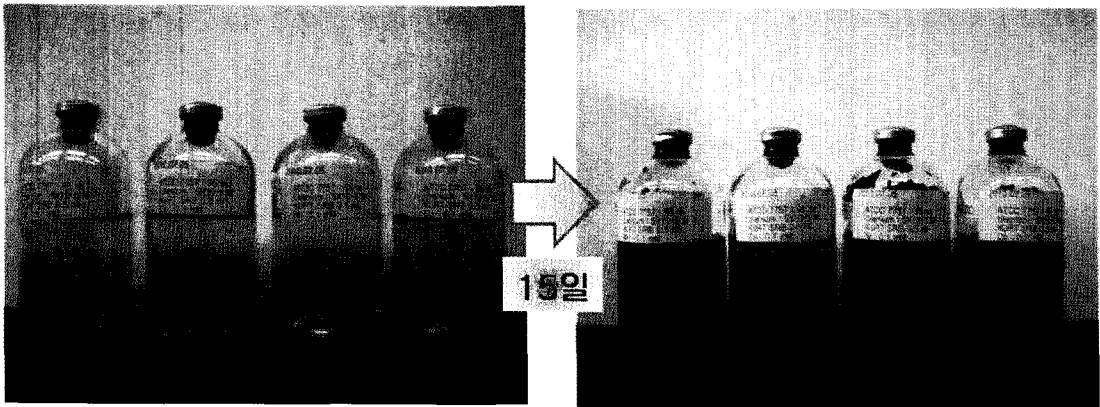
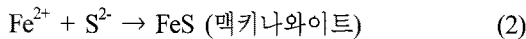
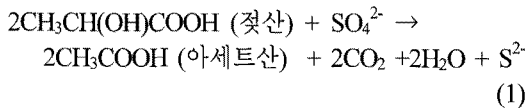


Fig. 3. A color change to deep dark by the generation of biogenic mackinawite. No color change was observed in a serum bottle with Cu.

알려져 있다.

맥키나와이트 광물 형성

용액상에서 철(Fe)이 Fe(II)의 형태로 1.0 mM 녹아 있는 조건에서 바쿨라툼 세균의 유기물 분해에 따른 전자의 공급에 의해 황산염(SO₄²⁻)이 황화물(S²⁻)로 환원되면서 녹아있던 철과 결합하여 맥키나와이트(mackinawite, FeS) 광물이 형성되었다(그림 2a). 이러한 기작을 다음과 같이 설명할 수 있다.



전자공여체로 넣어준 젖산이 바쿨라툼에 의해 아세트산으로 분해되면서 전자의 이동에 의해 황산염이 환원되고(1), 환원된 황이 최종적으로 철과 결합하여 FeS가 만들어진다(2). 이러한 과정에서 투명한 배양용액이 검은색의 물로 색깔이 변하고 생성된 FeS 입자들의 크기는 수 nm에서 수 μm까지의 분포를 보여주었다. 그리고, 맥키나와이트 입자 주변에 이 광물의 형성 작용을 돕는 바쿨라툼을 전자현미경을 통해 확인할 수 있었다(그림 2b).

용존우라늄의 미생물적 제거 및 미량 중금속들의 영향

그림 3은 미량 중금속원소가 공존할 때, 미생물에 의한 맥키나와이트의 생성 여부를 보여주는 사진이다. 약 15일이 경과되었을 때, 구리가 포함된 경우를 제외한 다른 반응용액에서는 검은색의 맥키나와이트가 다량 형성되었다.

그림 4a는 미생물에 의해 용존우라늄이 시간에 따라 점차 감소되는 과정을 보여주고 있다. 미생물이 없는 경우에는 우라늄의 농도 변화가 거의 없었다. 그리고, 구리가 미량 성분으로 용액상에 존재할 때에도 용존우라늄의 변화는 거의 나타나지 않았다. 하지만, 미생물과 다른 미량 중금속들(Mn, Ni, Co)이 공존하는 경우에는 용존우라늄이 점차 감소되는 경향을 보여주었다. 마간 혹은 코발트가 미량 성분으로 존재하는 경우, 그렇지 않은 경우에 비해 우라늄의 초기 농도는 빠르게 감소되었다. 대부분의 우라늄은 초기에 빠르게 감소하다가 시간이 지나면서 서서히 감소되는 경향을 보여 주었다. 그리고, 우라늄-미생물과의 반응이 14일이 경과하면서 용존우라늄의 대부분이 용액으로부터 제거되었다. 이러한 우라늄의 제거 과정은 미생물 활동에 의해 만들어지는 맥키나와이트의 영향이 큰 것으로 보인다(오종민 외, 2010). 대부분의 우라늄은 맥키나와이트 광물과의 결합 혹은 표면 침전에 의해 제거되는 것으로 보인다. 미생물 표면 및 내부 침전에 의한 우라늄의 제거(이승엽 외, 2009)가 있을 수 있으나, 이 양은 20% 미만으로 추정된다. 맥키나와이트 형성 과정에서 일부 용존이온들, 예를 들면, 인, 칼

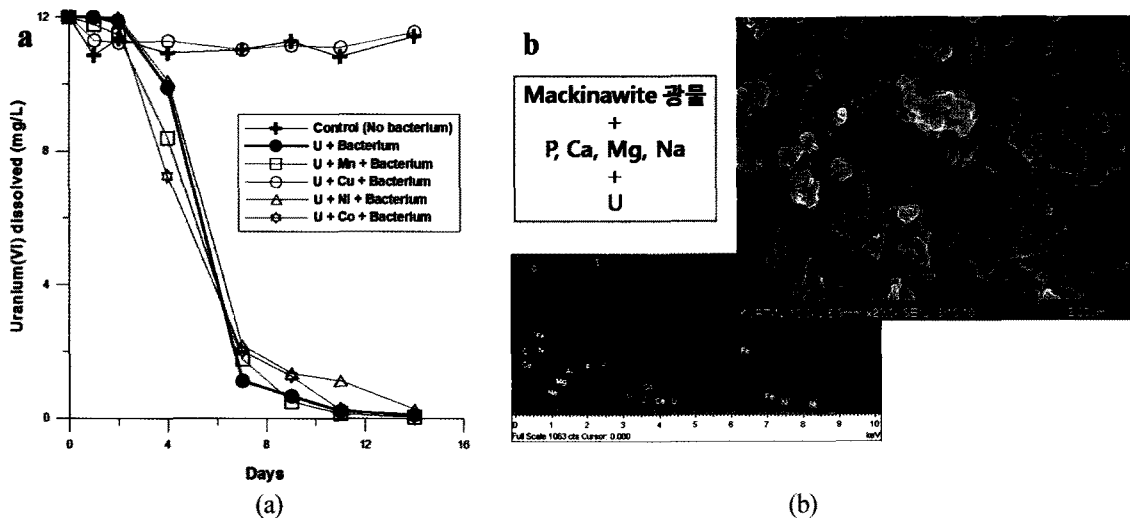


Fig. 4. (a) Uranium removal by *baculatum* and effect of trace metals. (b) An areal ($5 \times 4 \mu\text{m}$) analysis of precipitated mackinawite by SEM and EDS.

슘, 마그네슘, 그리고 나트륨 등과 함께 우라늄이 결합하여 침전하는 것으로 보인다. 그림 4b는 생물 기원의 맥키나와이트 전자현미경 사진을 보여주고 있으며, 광물 표면분석(areal analysis, $5 \times 4 \mu\text{m}$) 결과는 일부 우라늄이 다른 이온들과 같이 공침 혹은 광물화되어 존재하는 것을 보여준다. 물론, 맥키나와이트 광물상에는 미량으로 존재하던 중금속원소들(예: 니켈)이 일부 철을 치환하여 존재하는 것으로 보인다.

미량 중금속원소들에 의한 미생물 개체량의 농도 변화를 살펴보았다(그림 5). 미생물 주입 후 시간이 지나면서 미생물의 농도가 점차 증가하였고 4일 이후에는 더 이상의 큰 증가는 없었다. 미생물의 성장기에 미치는 중금속들의 영향은 그리 크지 않았다. 하지만, 구리가 포함된 경우에는 미생물의 성장이 거의 없었고 8일 이후에는 세균들의 농도 감소가 관찰되었다. 이는 구리 성분이 미생물의 대사작용을 방해하거나 독성으로 작용하여 미생물의 금속환원작용을 억제하는 것으로 보인다.

용액상에 존재하는 중금속들의 거동을 살펴보면, 망간의 경우 실험시작 후 용존농도의 감소가 두드러지지 않았다(그림 6). 하지만, 니켈과 코발트의 경우 4일이 지나면서 대부분의 원소들이 용액으로부터 제거되었다. 이는 미생물에 의한 황산염환원 과정에서 철과 황이 결합하여 맥키나와이트가 형성되고 결정이 성장되는 과정에서 니켈과 코발트와

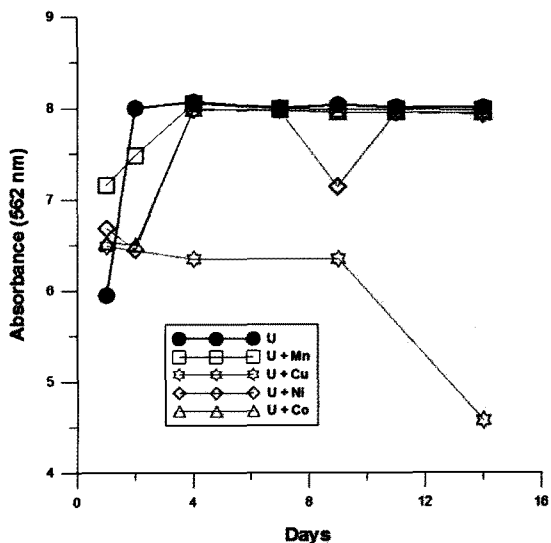


Fig. 5. UV/Vis spectrophotometric analysis for dissolved proteins that were derived from microbial mass.

같은 중금속 원소들이 간접적으로 철을 치환하거나 광물표면에 공침되는 것으로 보인다. 특히, 니켈의 경우 철과 공존하여 고용체 형태로 맥키나와이트를 형성하는 것으로 보고되고 있다(Bates and Jackson, 1980).

구리가 포함된 미생물 배양액에서는 용존우라늄의 농도 감소 및 맥키나와이트 생성이 상당기간 관찰되지 않았다(그림 7). 하지만, 계속된 반응(약 한

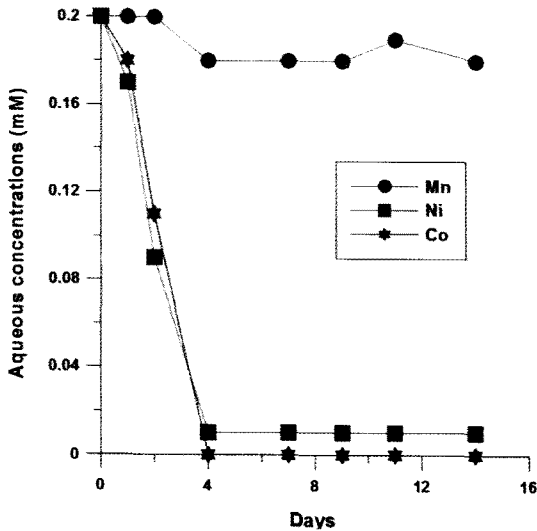


Fig. 6. Decline of concentrations of trace metals during microbial respiration.

달)에서는 우라늄의 감소 및 황화광물 형성이 서서히 나타나기 시작하였다. 맥키나와이트 형성에 의해 반응용액이 검은색으로 변하였으며, 용존우라늄의 대부분이 최종적으로 제거되었다. 이러한 결과는 구리가 포함된 용액이 바쿨라툼 세균의 활성화에 독성으로 작용하여 다른 중금속들과는 달리 미생물적 금속환원 반응을 억제하는 것으로 보인다. 하지만, 시간이 지나면서 놀랍게도 구리 독성에 대한 미생물적 내성이 생기고 점차 미생물의 활동이 왕성해지면서, 2주 후 맥키나와이트가 형성될 뿐만 아니라 용존우라늄의 감소도 같이 일어났다. 이는 특정 원소가 미생물에 대해 독성으로 작용하는 경우에도 미생물적 내성이 발현될 때에는 독성물질에 상관없이 금속환원 기작이 가동될 수 있음을 보여준다. 이러한 사실은 고준위폐기물 처분용기의 일부분이 구리코팅으로 제작되어 지하미생물 증식 억제 및 생물학적 부식을 어느 정도 방지할 수 있도록 설계되지만, 시간이 경과함에 따라 구리 내성을 갖는 미생물들의 활동 및 발현을 완벽히 억제하지는 못할 것으로 예측된다.

결론

체르노빌과 후쿠시마 사태와 같은 핵관련 시설의 붕괴 혹은 심지층 처분 고준위폐기물의 용기 부식에 의한 핵종들의 누출 등은 주변의 토양과 지질 뿐만 아니라 지하수를 통한 핵종 이동으로 원거리

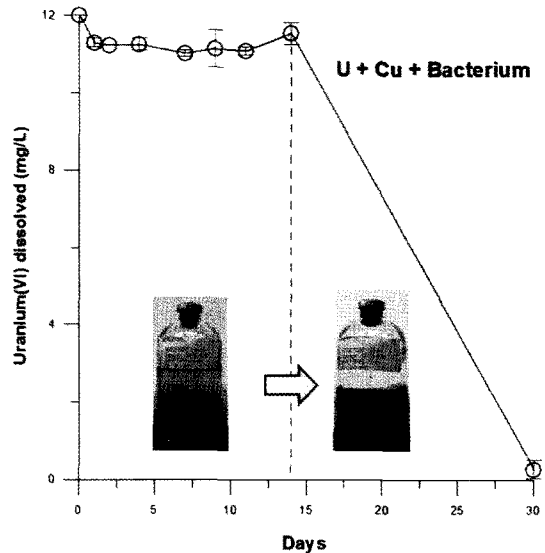


Fig. 7. A characteristic uranium removal by *baculatum* in the Cu-containing solution.

의 생태계까지 위협할 수 있다. 우라늄이 지하수에 녹아 이동될 때 지하미생물과 용존우라늄과의 상호 반응 및 특성을 이해할 필요가 있으며, 이를 위해 한국원자력연구원 지하심부에 생존하는 바쿨라툼 SRB를 추출·배양하여 혐기성 조건에서 미생물과 용존우라늄과의 반응을 관찰하였다. 대부분의 용존우라늄은 실험 시작 후 2주 만에 미생물에 의해 침전·제거될 뿐만 아니라, 미생물의 금속환원 대사 작용의 산물로 황화광물인 맥키나와이트가 다량 생성될 수 있다. 용존 금속성분 중 구리의 존재 여하에 따라 미생물적 활동이 제약 받았으나, 구리 독성에 대한 내성이 발현된 이후에는 미생물-우라늄 반응이 다시 활발하게 이뤄지고 최종적으로 대부분의 우라늄이 용액으로부터 제거되었다. 따라서, 특정 지화학적 조건(예: 금속 함유 물질 혹은 지하수)에서 지하미생물의 생존 및 용존핵종과의 상호반응 등은 단기 실험 결과로 예단하기 어려우며, 장기적인 실험 및 현장 조사를 통해 구체적인 생지화학적 반응이 이해되어야 할 것이다.

사사

미생물 유전자의 분석을 도와주신 충북대학교 이성근 교수님께 감사드립니다. 그리고, 본 논문에 대한 리뷰 및 코멘트를 해주신 이영재 교수님(고려대학교)과 윤혜은 박사님(한국기초과학지원연구원)께 심심한 감사를 드립니다.

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.
- 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, 백민훈, 노열, 오종민 (2010) 지하심부 금속환원 미생물과 용존우라늄과의 반응 및 철함유 광물의 영향. 지질학회지, 46, 357-366.
- 이종운, 전효택 (2000) 원소의 지구화학적 거동에 미치는 박테리아의 영향: 지구 미생물학의 최근 연구 동향. 자원환경지질, 33, 353-365.
- Abdelouas, A., Lutze, W., Gong, W., Nuttall, E.H., Strietelmeier, B.A., and Travia, B.J. (2000) Biological reduction of uranium in groundwater and subsurface soil. *Sci. Total Environ.*, 250, 21-35.
- Anderson, R.T., Vrionis, H.A., Ortiz-Bernad, I., Resch, C.T., Long, P.E., Dayvault, R., Karp, K., Marutzky, S., Metzler, D.R., Peacock, A., White, D.C., Lowe, M., and Lovley, D.R. (2003) Stimulating the in situ activity of *Geobacter* species to remove uranium from the groundwater of a uranium-contaminated aquifer. *Appl. Environ. Microbiol.*, 69, 5884-5891.
- Bates, R.L. and Jackson, J.A. (1980) *Glossary of Geology* (2nd Ed.), American Geological Institute, Falls Church, Virginia, 751p.
- Fredrickson, J.K., Zachara, J.M., Kennedy, D.W., Duff, M.C., Gorby, Y.A., Li, S.M.W., and Krupka, K.M. (2000) Reduction of U(VI) in goethite (alpha-FeOOH) suspensions by a dissimilatory metal-reducing bacterium. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64, 3085-3098.
- Lee, S.Y., Baik, M.H., and Choi, J.W. (2010) Biogenic formation and growth of uraninite (UO₂). *Environ. Sci. Technol.*, 44, 8409-8414.
- Lloyd, J.R. and Renshaw, J.C. (2005) Bioremediation of radioactive waste: radionuclide-microbe interactions in laboratory and field-scale studies. *Current Opinion Biotech.*, 16, 254-260.
- Lovley, D.R. (1991) Dissimilatory Fe(III) and Mn(IV) Reduction. *Microbiol. Reviews*, 55, 259-287.
- Roh, Y., Moon, H.S., and Song, Y. (2002) Metal reduction and mineral formation by Fe(III)-reducing bacteria isolated from extreme environment. *J. Miner. Soc. Korea*, 15, 231-240.
- Sani, R.K., Peyton, B.M., Amonette, J.E., and Geesey, G.G. (2004) Reduction of uranium(VI) under sulfate-reducing conditions in the presence of Fe(III)-(hydr)oxides. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 68, 2639-2648.
- Suzuki, Y., Kelly, S.D., Kemner, K.M., and Banfield, J.F. (2002) Nanometre-size products of uranium bioreduction. *Nature*, 419, 134.

접수일(2011년 6월 2일), 수정일(1차 : 2011년 6월 22일), 게재확정일(2011년 6월 27일)