

자연계에서 우라늄 이동에 결정적 영향을 주는 생축매체 발견 및 규명

이승엽, 오종민, 백민훈, 조혜륜, 정의창, 최종원
 한국원자력연구원, 방사성폐기물기술개발부
 seungvlee@kaeri.re.kr

1. 서론

자연계에서 우라늄의 이동은 많은 핵종들 중의 주 관심 대상이며, 지금까지 많은 학자들이 실내 실험 및 야외 관찰 등을 통해 우라늄의 이동 메커니즘 규명에 힘을 써 왔다. 결과적으로 수용액상의 우라늄 종(species) 및 용해도 등의 많은 화학적 상수값과 데이터가 축적되었으며, 모델링을 통해 실제 현장 상황을 예측하기도 하였다. 하지만, 현장에서의 우라늄 거동을 정확히 예측하기는 매우 어려운 부분이 많았으며, 이러한 원인중의 하나가 자연계에 생존하고 있는 미생물의 역할을 전혀 고려하지 않았다는 점을 들 수 있다. 또한, 지하수 중에 녹아 있거나 존재하고 있는 우라늄의 산화상태가 대부분 U(VI)로 인식되어 왔으나, 본 연구에서는 U(IV)의 존재 가능성을 제시하고 그들의 특성을 살펴보았다.

지하환경은 다양한 종류의 혐기성미생물들이 서식하고 있으며, 이들 중의 일부는 산소가 희박한 조건에서 용존 금속원소들을 환원시키거나 콜로이드와 같은 광물 형성 작용을 일으킬 수 있다. 본 연구에서 황산염환원미생물(SRB)에 의해 용존 U(VI)가 환원되면서 U(IV)-콜로이드로 변하는 과정을 관찰하였다. 또한, 이러한 U(IV)-콜로이드가 U(VI)보다 지하환경에서의 이동이 매우 빠를 가능성이 있음을 실험을 통해 처음으로 증명하였다.

2. 본론

2.1 실험방법

실험에 사용된 미생물은 *Desulfovibrio desulfuricans* 와 *Desulfovibrio vulgaris* 두 종류의 황산염환원 박테리아(SRB)가 사용되었다. 100 mL의 성장배지에는 lactate(10 mM), Fe-sulfate(2 mM)가 있고, 50 μM 농도의 우라늄이 주입되었다. 실험은 약 45일간 이뤄졌으며 우라늄을 포함한 미량원소들의 농도 변화를 살펴 보았다.

2.2 SRB-우라늄 반응

SRB는 물 속의 황산염을 환원하여 황화물로

만들며, 이 때 다른 양이온인 철과 결합되어 황화철광물이 만들어진다. 이 과정에서 만들어지는 황화철은 대부분 맥키나와이트(mackinawite, FeS)라는 광물이며, 초기에는 매우 작은 나노입자의 형태를 띤다. SRB의 환원작용이 활발해짐에 따라 점점 더 많은 맥키나와이트와 그들의 결정성이 좋아지고 입자들의 크기도 점점 커진다. 초기 우라늄의 농도 변화는 이러한 황화광물의 형성과 밀접과 관련이 있고, 용존우라늄들이 대부분 나노입자인 맥키나와이트에 흡착되어 수 일내에 급격한 우라늄 농도 감소를 보인다(그림 1).

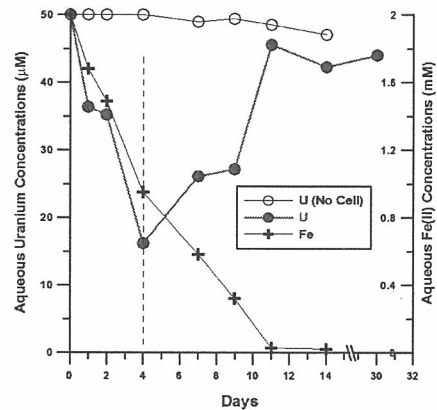


Fig. 1. Changes of aqueous U and Fe concentrations via activity of *D. desulfuricans*.

하지만, 시간이 흐르면서 우라늄의 농도가 다시 서서히 증가하는데, 이러한 변화는 미생물들의 직접적인 환원작용보다는 황화광물의 환원작용에 의해 나타나는 현상으로 보인다. 대부분의 우라늄은 6가에서 4가로 환원되고 콜로이드 크기(< 20 nm)의 입자를 갖는 용존 형태를 보인다(그림 2).

2.3 지하환경에서의 우라늄핵종 이동

방사능으로 오염된 토양이나 지하수에서 방사성핵종들은 빠른 확산을 보인다. 일반적으로 우라늄과 같은 액티나이드(actinides) 핵종성분들은 물속에 용해되면 이온상태로 존재하여 주변의 광물

및 암석표면에 흡착된다. 따라서, 거리에 따라 대부분의 용존 핵종들은 멀리 이동하지 못하고 점차 토양 혹은 광물/암석 표면에 흡착되거나 침전되면서 물 속의 핵종 농도는 점차 감소되어야 한다. 하지만, 최근의 발표된 논문에서 플루토늄과 같은 핵종들이 먼 원거리까지 확산된다는 사실이 보고되었다[1]. 이러한 현상에 대해서 일부 학자들은 핵종들의 콜로이드 이동설을 주장하게 되었고 다양한 실험들이 진행되었다. 하지만, 무기 혹은 유기 콜로이드에 흡착되어 이동하는 핵종만이 관찰되었을 뿐, 핵종 자체의 콜로이드는 확인하지 못하였다. 본 연구에서는 우라늄 핵종 자체의 콜로이드화 현상을 관찰하였으며, 미생물로부터 형성된 황화광물이 우라늄의 콜로이드화 작용을 촉진한다는 사실을 처음으로 보고 한다.

5. 참고문헌

[1] Novikov, A. P. *et al.*, 2006, Colloid transport of plutonium in the far-field of the Mayak Production Association, Russia. *Science*, 314, 638-641.

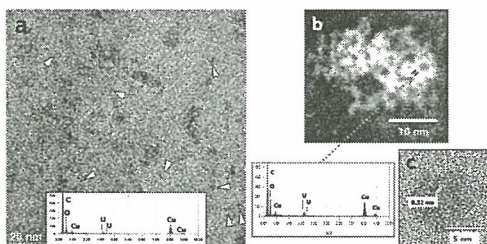


Fig. 2. A high-resolution electron microscopic image of U(IV) nanoparticles.

3. 결론

지하환경에서 핵종들의 거동은 자체 콜로이드화 형성작용에 의해 크게 달라지며, 여기에는 박테리아의 역할과 황화광물의 생성이 연관되어 있다. 특히, 미생물에 의해 변환된 우라늄 U(IV)-콜로이드는 입자가 작아 침전하지 않을 뿐만 아니라, 주변의 광물 및 암석에 잘 흡착되지 않고 매우 먼 거리까지 이동할 수 있다. 따라서, 지하환경에서의 우라늄 종(species)은 산화/환원상태의 화학적인 특성 외에 지하미생물들에 의해 영향받아 변환 우라늄 phase에 의해 지하수에서의 이동성이 크게 달라질 수 있음을 간과해서는 안된다.

4. 감사의 글

본 논문은 교육과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 연구비를 지원받아 수행되었습니다.