

환원환경에서 암반 균열을 통한 우라늄 이동 및 지연 특성

백민훈, 조원진, 최종원

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

mhbaik@kaeri.re.kr

현재 국내의 고준위방사성폐기물(High-Level Radioactive Waste, HLRW) 처분개념은 지하 500미터 정도의 심지층 결정질 암반에 다중방벽 개념에 기초한 처분시스템을 건설하고 사용후핵연료를 처분하는 것이다[1]. 처분장 주변의 포화된 암반 균열을 통해 침투한 지하수가 폐기물을 용해하여 방사성핵종을 유출시키면 유출된 핵종들은 처분장으로부터 지하수를 따라 암반 균열을 통해 자연 생태환경으로 이동하게 된다. 아울러 처분장의 안전성 평가를 위해서는 이러한 암반 균열을 통한 핵종이동과 관련된 수착(sorption), 암반확산(rock matrix diffusion), 이류-분산(advection-dispersion), 콜로이드 및 복합체 형성 등 다양한 물리화학적 과정들에 대한 이해 및 해석, 그리고 수학적 모델링 등이 필요하다[2].

특히 환경 및 인간에 대한 위해도 및 독성 등이 매우 커서 HLRW 관리에서 관심의 주 대상인 악탄축 핵종들의 경우 지하매질 및 지하수와 매우 복잡하고 다양한 상호작용을 하기 때문에 처분장의 안전성 평가에서는 이러한 이동과정 및 상호작용들에 대한 지화학적 변수들의 영향을 꼭 고려해야 한다. 그러나 실제 이러한 지화학적 변수들의 영향을 고찰하기 위한 핵종이동 연구는 많은 제약을 가지고 있기 때문에 쉽게 수행되지 못하고 있는 것이 현실이다[3]. URL 등의 현장 실험을 이용한 실증실험도 중요하지만 이러한 현장 실험의 경우 실제 처분장의 처분환경에서의 핵종이동 현상을 이해하는데 또 모델의 현장 적용성을 검증하는데는 많은 도움이 되지만, 핵종이동의 중요한 이동과정이나 지하 매질과의 상호작용 대한 정확한 정보를 얻기는 힘들다는 단점과 실제 자연계의 복잡성으로 인해 획득한 자료를 해석하는 것이 어렵다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 천연지하수 및 자연균열을 가진 화강암 코어를 이용하여 타당한 지하조건을 모사하기 위한 실험장치를 글로버박스(Glove-Box) 내에 설치하고 핵종이동 실험을 수행하였다.

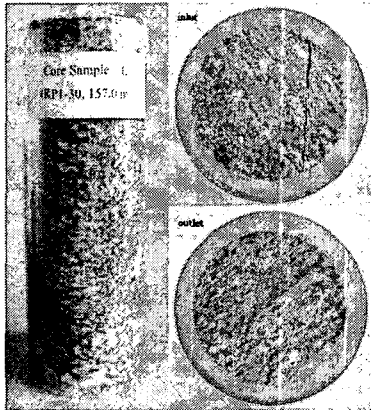


그림 1. 실험에 사용된 균열 암반 코어 사진.

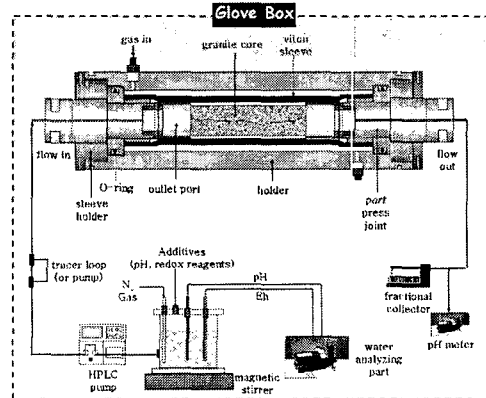


그림 2. 환원환경에서 암반균열을 통한 우라늄 이동 실험 장치.

실험에 사용된 자연균열을 가진 암석코어는 원자력연구소 부지 내 KURF(Korea Underground Research Facility) 시설의 시추공으로부터 얻은 것으로 먼저 다양한 광물학적 분석을 수행하였다. 암석의 주요 구성광물은 석영, 녹니석, 알바이트(albite), K-장석(K-feldspar), 흑운모(Biotite), 질석(Vermiculite) 등으로 구성되어 있으며, 균열충진광물은 자연 불석(zeolite)의 일종인 laumontite인 것으로 확인되었다. 사용된 천연지하수는 원자력연구소 부지내 multipacker가 설치된 시추공

(YS-01)에서부터 채취한 지하수를 사용하였다. 사용된 지하수의 지화학적 조건들은 pH = 9.9, Eh = -195 mV, $P_{CO_2} = 10^{-5.61}$ atm, alkalinity = 7.5×10^{-4} 등으로 $NaHCO_3$ 형 지하수인 것으로 추정되었다.

먼저 암반코어의 균열을 통한 지하수 유동을 해석하기 위하여 비수착성 음이온 핵종인 Br^- (0.01M NaBr)로 지하수 유동실험을 수행하였고, 실험결과를 이용하여 지체시간(t_0), 이동속도(V_0), 분산계수(D), 균열폭(d) 등 다양한 수력학적 변수값들을 구하였다[4].

암반 균열을 통한 우라늄($\sim 10^{-6}$ M $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) 이동 실험결과에서는 우라늄의 유출곡선이 비수착성 핵종인 Br^- 와 유사한 거동을 보여주었는데, 이는 주어진 지하수 조건에서 우라늄이 주로 탄산염과 결합된 음이온 복합체로 이동하기 때문인 것으로 추정된다. 비록 확인된 것은 아니지만 우라늄의 이동 실험 결과로부터 +6가로 주입된 우라늄이 지하수 환원 조건에서 +4가로 환원되지 않고 여전히 +6가로 균열을 통해 이동하는 것으로 추측된다.

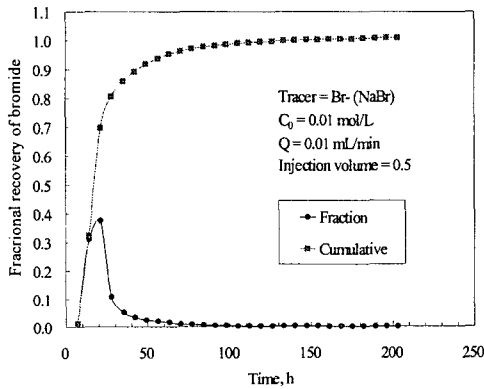


그림 3. 균열 암반을 통한 비수착성 핵종인 Br^- 의 유출 곡선.

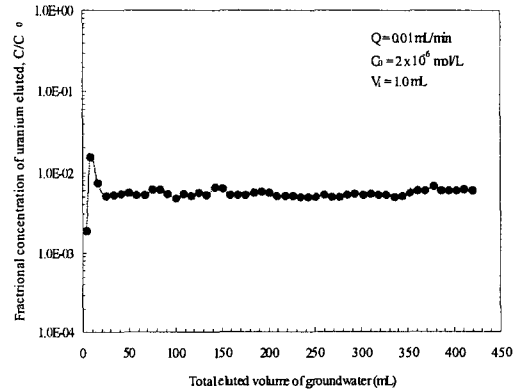


그림 4. 균열 암반 코어를 통한 Br^- 및 우라늄 이동 실험 결과.

아울러 균열 충전광물에 대한 우라늄의 회분식 수착실험을 수행한 결과, 균열 충전광물에 대한 우라늄의 분배계수 K_d 는 약 2.7 mL/g로 낮게 나타나서 이동실험에서 얻은 결과와 매우 유사하였다. 균열 암반을 통한 우라늄 이동의 지연 특성을 보다 자세히 분석하기 위하여 회분식 수착실험에 의해 구한 K_d 값을 이용하여 지연계수 R_d 값(~ 16.2)을 구하여 이동실험의 유출결과를 이용하여 구한 R_d 값(~ 14.3)과 비교한 결과, 매우 유사한 지연계수 값을 얻을 수 있었다.

향후 우라늄의 지화학 반응 특성을 고려한 실험 결과에 대한 해석 및 지연 특성에 대한 메커니즘에 대한 연구를 추가로 수행함으로써 암반 균열을 통한 우라늄 이동 및 지연 특성을 규명하고자 한다.

참고문헌

- [1] Korea Atomic Energy Research Institute(KAERI), Progress Report on the R&D Program for the Disposal of HLW in Korea, Korea Atomic Energy Research Institute, August 20, 2002, Daejeon.
- [2] I. Neretnieks et al., Tracer movement in a single fissure in granitic rock: Some experimental results and their interpretation. Water Resour. Res. 18, 849, 1982.
- [3] B. Kienzler et al., Swedish-German actinide migration experiment at ÄSPÖ hard rock laboratory. J. Contam. Hydrol. 61, 219-233, 2003.
- [4] C.A.J. Appelo, D. Postma, Geochemistry, groundwater and pollution. A.A. Balkema, Rotterdam, Chap. 9, pp. 327, 1994.