

Time Domain 해석 방법을 이용한 KURT 부지 환경에서의 방사성 핵종의 이동 모의

황영택, 고낙열*, 최종원*

충남대학교 녹색에너지기술전문대학원, 대전시 유성구 대학로 99

*한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111

hvt84@kaeri.re.kr

1. 서론

현재 우리나라에서는 결정질 암반의 지하 심부에 처분 시설을 건설하여 처분하는 심지층 처분 방식이 연구되고 있다. 처분장 안전성평가 과정에서 핵종의 이동 현상을 규명하기 위해서는 지하수내 핵종의 다양한 수리지질학적 인자들에 대한 자료가 요구된다. 따라서, 핵종의 이류, 분산과 더불어 흡착과 같이 이동을 지연시키는 기작에 관한 특성들이 처분 시설이 들어설 부지의 수리지질학적 특성화를 통해 추정되어 처분 시설에서 생태계로 유출되는 핵종의 양과 이동 거리 및 시간에 관한 자료를 계산하는데 이용된다.

본 연구에서는 KURT 부근의 가상의 방사성폐기물 처분장으로부터 누출된 핵종의 이동 현상을 시간 영역(Time Domain)에서 TDRW(Time Domain Random Walk) 방법을 이용하여 계산해보고 그 결과를 도시하였다. 계산에 필요한 지하수 유동과 관련된 자료는 KURT에서 이전에 수행된 지하수 유동 관련 추정값 및 모의 결과를 이용하였다.

2. 본론

2.1 연구지역

용질 이동 모의에 이용된 지하수 유동 자료는 KURT 지하의 지하수 유동 자료를 이용하였다. 본 연구에서는 심도 -500 m에 처분 위치를 선정하고, 처분 시설에서 누출되었다고 가정된 핵종이 단일 암반과 투수성이 큰 단열을 통과하여 지표로 유출되는 상황에 대한 안전성 평가를 수행하기 위해 대표 지점을 설정하였다. 설정된 위치에서 입자 추적 모의를 수행하여 지하수가 지표까지 흐르는 유동 경로를 계산하고, 그 결과를 방사성 핵종의 이동을 계산하는데 이용되었다.

2.2 TDRW를 이용한 용질 이동 모의 방법

TDRW 방법에서는 입자의 임의적인 운동(Brown motion)을 확률밀도함수를 통해 나타내는 Fokker-Planck식을 이용하여 시간 영역에서 1차원의 이류-분산 방정식을 풀어낸다. 1차원적인 유동 경로를 따라 흐르는 지하수에 의한 이류현상과 흐름 방향으로의 분산 현상에 의해 계산되는 지하수내 용질의 이동 시간을 τ 라고 하면, 용질이 순간적으로 이동 경로의 입구에서 주입될 때 출구로 나오는 용질의 양을 표준화한 이력곡선은 τ 에 대한 확률밀도함수가 된다. 그 때, 이 확률밀도함수의 누적 분포 $F(\tau)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$F(\tau) = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{\eta} (1 - \tau')}{2 \sqrt{\tau'}} \right) + \exp(\eta) \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{\eta} (1 + \tau')}{2 \sqrt{\tau'}} \right) \right] \quad (1)$$

단, τ' 은 $\tau/\bar{\tau}$, $\bar{\tau}$ 는 이동 경로를 이류만으로 움직일 때의 경과 시간으로 지하수의 유동 시간과 동일하고, η 는 L/a , L 은 이동 경로의 길이, a 는 이동 방향으로의 분산도(dispersivity)를 나타낸다.

이류와 분산 이외에 지하수내 용질이 이동할 때 발생하는 용질의 이동 지연 현상도 시간 영역에서 계산하였다. 용질의 이동 경로와 암반간의 경계면에서 발생하는 평형 흡착(equilibrium sorption)만을 고려하는 경우, 흡착에 의한 이동 지연 시간 t_{ret} 는 다음과 같이 계산된다.

$$t_{ret} = K_d \rho_b \tau \dots\dots\dots (2)$$

이 때, K_d 는 분배계수(distribution coefficient), ρ_b 는 주어진 기질의 단위 부피당 고체 입자의 질량(bulk density)이다.

지하수 유동 및 용질의 이동 방향에 수직 방향으로 발생하는 암반 기질로의 확산(matrix diffusion)과 흡착을 고려하는 경우에는, 용질의 지연된 이동 시간의 누적 분포는 용질의 지연 기작에 따라 식 (1)과 유사한 방식으로 다음과 같이 표현된다.

$$F(t_{ret}; \kappa, \beta) = \text{erfc}\left(\frac{\kappa\beta}{2\sqrt{t_{ret}}}\right) \dots\dots\dots (3)$$

이 때, $\beta = \int_0^\tau \frac{1}{b(\vartheta)} d\vartheta$, $\kappa = n_m \sqrt{D^* R_{im}}$ 이며,

b 는 용질 이동 경로의 간극(aperture) 크기의 절반, n_m 은 기질(matrix)의 공극률, D^* 는 기질로의 확산 계수(matrix diffusion coefficient), R_{im} 은 기질에서의 지연 계수(retardation factor)이다.

2.3 모의 결과

평형 흡착 모델에서의 모의결과를 보면, KURT 기반 안전성 평가와 SKB의 안전성 평가에서 쓰인 각 핵종의 분배 계수값에 의한 영향이 더 크게 나타난다(Fig. 1). ²⁴¹Am은 상대적으로 매우 짧은 반감기 때문에 두 개의 모의에서 모두 나타나지 않았다. KURT 자료에서 ²³³U의 분배 계수값이 ²³⁷Np보다 작아 그로 인한 지연효과가 적어 방사성 붕괴에 의해 ²³⁷Np로부터 생성된 ²³³U가 ²³⁷Np보다 앞서 지표에 유출되는 것으로 나타났다(Fig. 1a). ²³³U의 시간당 유출량이 어느 정도 일정하게 유지되는 것은 ²³⁷Np의 방사성 붕괴로 인한 영향으로 보인다. 이에 반해 SKB의 자료에서는 ²³⁷Np, ²³³U, ²²⁹Th의 분배 계수가 동일하게 설정되었기 때문에 서로 비슷한 시각에서 시간당 유출량의 최대값을 보이며, 각각의 분배 계수가 KURT 자료보다 작기 때문에 지표로의 유출 시점도 더 빠른 것으로 나타났다(Fig. 1b).

기질 확산 모델의 결과에서, KURT의 분배 계수 자료를 이용할 경우 지표로 유출되는 방사성 핵종은 ²³⁷Np와 ²³³U뿐이었으며, 시간당 질량 유출량은 10⁻¹⁰ mole/yr 이하였다(Fig. 2a). SKB의 자료를 이용한 모의에서는 암반 기질의 영향에 의해 평형 흡착 모형에 비해 ²³⁷Np가 유출되는 시각이 약 10배 정도 지연되고, 그 양도 10⁴배 이상의 비율로 감소하였다(Fig. 2b).

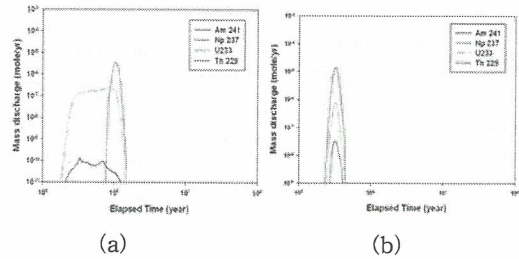


Fig. 1. Results of the transport of the radionuclides included in a four-member decay chain with ²⁴¹Am, ²³⁷Np, ²³³U and ²²⁹Th using the data from (a) KURT and (b) SKB under the equilibrium sorption model.

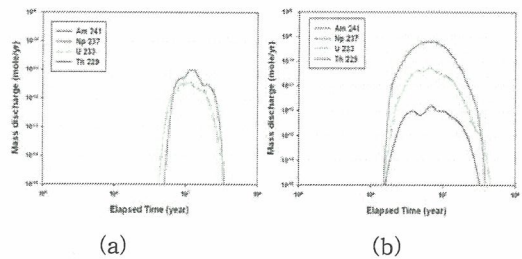


Fig. 2. Results of the transport of the radionuclides included in a four-member decay chain with ²⁴¹Am, ²³⁷Np, ²³³U and ²²⁹Th using the data from (a) KURT and (b) SKB under the matrix diffusion model.

3. 결론

TDRW 방법을 이용한 방사성 핵종의 이동 모의 결과를 분석해보면, 흡착의 정도를 표현하는 분배 계수의 차이로 인해 발생하는 핵종 도달 시각의 지연 효과가 잘 나타났고, 연쇄 반응에서 분배 계수의 차이로 인해 더 늦게 생성되는 핵종이 더 먼저 생성되는 핵종보다 빨리 유출되는 양상도 보여주었다. 이런 결과로 볼 때, 이 연구에서 이용된 방사성 핵종의 모의 방법이 지하 환경을 통과하는 방사성 핵종의 이동 양상을 잘 보여줄 수 있을 것으로 생각된다.

4. 감사의 글

이 논문은 교육과학기술부 원자력연구개발사업의 지원을 받았음을 밝히며 이에 감사드립니다.