

단열다공 암반에서의 유사 콜로이드 이동이 고준위 폐기물 처분장에 미치는 영향

정미선, 강철형, 정중태

한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111

ieongms@kaeri.re.kr

1. 서론

고준위폐기물의 처분을 위하여 많은 나라에서는 심지층 처분 방법을 채택하고 있다. 심지층 처분에 대한 연구는 대부분 폐기물로부터 유출된 핵종에 관한 것이었다. 그러나 핵종뿐만 아니라 단열 내 존재하는 콜로이드에 대한 중요성이 확산되면서 이에 대한 연구도 최근 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 기존의 연구를 확장시켜, 다른 프로그램에서 계산된 핵종의 이동 결과값을 유사 콜로이드 이동의 입력 데이터로 사용하여 좀 더 실질적인 처분 안전성 평가에 기여하고자 하였다.

2. 수학적 모델링

Fig. 1은 단열 단공 암반에서의 콜로이드 및 핵종들의 이동을 나타낸 것이다. 단열에서는 자연 콜로이드(natural colloids)가 존재하며, 이러한 콜로이드에 핵종들이 흡착하게 됨으로 인해서 유사 콜로이드(pseudo-colloids)를 생성하게 된다.

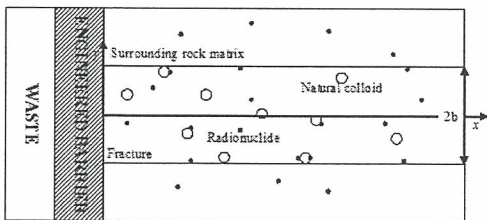


Fig. 1. The pseudo-colloid and the radionuclide migration in a fractured porous media.

이때 단열 내의 지하수에 존재하는 유사 콜로이드 이동에 관한 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \epsilon_1 \xi_1 \frac{\partial C_{1i}(x,t)}{\partial t} + \epsilon_1 \xi_1 v_1 \frac{\partial C_{1i}(x,t)}{\partial x} - \epsilon_1 \xi_1 D_1 \frac{\partial^2 C_{1i}(x,t)}{\partial x^2} \\ + \epsilon_1 \xi_1 \lambda_i C_{1i}(x,t) - \epsilon_1 \xi_1 \lambda_{i-1} C_{1(i-1)}(x,t) + \epsilon_1 \xi_1 A_i C_{1i}(x,t) \\ + \epsilon_1 S_{1i}(x,t) - \epsilon_1 S_{2i}(x,t) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$x > 0, t > 0$

여기서,  $\epsilon_1$ 은 단열에서의 전체 체적에 대한 지하수

의 체적율을 나타내며,  $C_{1i}(x,t)$ 은 콜로이드의 단위 체적당 흡착된 핵종의 농도 [ $\text{kg/m}^3$ ]를 나타내고 있다.  $v_1$ 은 단열내에서의 콜로이드의 속도 [ $\text{m/yr}$ ]이며,  $D_1$ 은 콜로이드 이산 계수 [ $\text{m}^2/\text{yr}$ ],  $\lambda_i$ 은 핵종의 붕괴 상수 [ $1/\text{yr}$ ],  $A_i$ 은 여과계수 [ $1/\text{m}$ ],  $\xi_1$ 은 단열내에서의 자연 콜로이드의 체적 분율 상수를 나타낸다.  $\epsilon_1 S_{1i}(x,t)$ 은 단열 벽면에 흡착된 유사 콜로이드 비율을 나타내며,  $\epsilon_1 S_{2i}(x,t)$ 은 유사콜로이드로부터 떨어져 나온 핵종들의 비율을 나타낸다.

단열내 지하수에서의 핵종들의 농도는 다음 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \epsilon_1 \frac{\partial C_{2i}(x,t)}{\partial t} + \epsilon_1 v_2 \frac{\partial C_{2i}(x,t)}{\partial x} - \epsilon_1 D_{2i} \frac{\partial^2 C_{2i}(x,t)}{\partial x^2} + \frac{q_i(x,t)}{b} \\ + \epsilon_1 \lambda_i C_{2i}(x,t) - \epsilon_1 \lambda_{i-1} C_{2(i-1)}(x,t) - \epsilon_1 S_{3i}(x,t) + \epsilon_1 S_{2i}(x,t) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$x > 0, t > 0$

윗 식에서  $v_2$ 는 핵종의 속도 [ $\text{m/yr}$ ],  $D_{2i}$ 는 각 핵종들의 이산 계수 [ $\text{m}^2/\text{yr}$ ],  $2b$ 는 단열의 두께 [ $\text{m}$ ],  $\epsilon_1 S_{3i}(x,t)$ 는 단열 벽면에 핵종들의 흡착율을 나타내며,  $q_i(x,t)$ 는 핵종의 주변 암반으로의 확산유속 [ $\text{kg/m}^2/\text{yr}$ ]이다.

$$q_i(x,t) = -\epsilon_p D_{pi} \left. \frac{\partial N_i(x,y,t)}{\partial y} \right|_{y=b} \quad (3)$$

여기서  $y$ 는 단열의 중심으로부터의 거리 [ $\text{m}$ ],  $\epsilon_p$ 는 암반의 공극률,  $D_{pi}$ 는 암반에서의 핵종의 확산 계수 [ $\text{m}^2/\text{yr}$ ], 그리고  $N_i(x,y,t)$ 는 암반내에 존재하는 지하수에서의 핵종의 농도 [ $\text{kg/m}^3$ ]를 나타낸다.

$$\begin{aligned} R_{pi} \frac{\partial N_i(x,y,t)}{\partial t} - D_{pi} \frac{\partial^2 N_i(x,y,t)}{\partial y^2} \\ + R_{pi} \lambda_i N_i(x,y,t) - R_{p(i-1)} \lambda_{i-1} N_{i-1}(x,y,t) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$x > 0, t > 0, y > 0$

여기서  $R_{pi}$ 는 암반에서의 핵종의 지연 계수이다.

단열 벽면에 흡착된 핵종들의 농도,  $C_{3i}(x,t)$  [ $\text{kg/m}^3$ ]은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (1 - \epsilon_1) \frac{\partial C_{3i}(x,t)}{\partial t} + (1 - \epsilon_1) \lambda_i C_{3i}(x,t) \quad , \quad x > 0, t > 0 \quad (5) \\ - (1 - \epsilon_1) \lambda_{i-1} C_{3(i-1)}(x,t) + \epsilon_1 S_{3i}(x,t) = 0 \end{aligned}$$

단열 벽면에 흡착된 유사콜로이드 농도는

$$(1-\epsilon_1)\xi_2 \frac{\partial C_{1i}(x,t)}{\partial t} + (1-\epsilon_1)\xi_2 \lambda_i C_{1i}(x,t), \quad x>0, t>0 \quad (6)$$

$$-(1-\epsilon_1)\xi_2 \lambda_{i-1} C_{1(i-1)}(x,t) - \epsilon_1 S_{1i}(x,t) = 0$$

이며,  $\xi_2$ 는 단열벽면에 흡착된 콜로이드의 체적분율 상수를 나타낸다.

단열에서의 핵종과 벽면에 흡착된 핵종, 그리고 단열내에서의 핵종과 유사 콜로이드 사이에 일정한 흡착 평형 관계를 가지고 있다고 가정하였다.

$$K_{d1} = \frac{\xi_2}{\xi_1}, K_{d2i} = \frac{C_{3i}(x,t)}{C_{2i}(x,t)}, \quad K_{d3i} = \frac{C_{1i}(x,t)}{C_{2i}(x,t)} \quad (7)$$

초기 조건과 경계 조건은 다음과 같이 정의하였다.

$$N_i(x, \infty, t) = 0, \quad x>0, t>0 \quad (8)$$

$$N_i(x, b, t) = \frac{C_{1i}(x,t)}{K_{d3i}}, \quad x>0, t>0 \quad (9)$$

$$N_i(x, y, t) = 0, \quad x>0, t>0 \quad (10)$$

$$v_2 C_{2i}(0, t) - D_{2i} \left. \frac{\partial C_{2i}(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{f_i(t)}{A}, \quad t>0 \quad (11)$$

$$C_{1i}(\infty, t) = 0, \quad t>0 \quad (12)$$

$$C_{1i}(x, 0) = 0, \quad x>0 \quad (13)$$

여기서  $f_i(t)$ 는 임의의 함수를 나타내며, A는 단열의 단면적 [ $m^2$ ]을 나타낸다.

따라서 라플라스 변환을 이용하여 반해석해를 구할 수 있었다.

$$\tilde{N}_i = \sum_{m=1}^i \frac{\tilde{C}_{1m}}{K_{d3m}} \left( \prod_{r=m}^{i-1} \frac{R_{pr}}{D_{p(r+1)}} \lambda_r \right) \sum_{n=m}^i \frac{\exp[-\Phi_n(y-b)]}{\prod_{l=m}^n (\Phi_n^2 - \Phi_l^2)} \quad (14)$$

$$\tilde{C}_{1i} = \sum_{j=1}^i u_{ij}(s) a_j(s) \exp[\alpha_j(1-\gamma_j)x] \quad (15)$$

### 3. 해석 결과

본 연구에서는 단일 핵종의 유사 콜로이드 이동에 대해 해석을 하였으며, 외부로부터 받은 과일들을 이 모델링에 적용하기 위하여, 입력된 데이터값들로부터 임의의 함수를, 라플라스 변환의 정의를 이용하여, 다음 식(16)과 같이 가정하였다.

$$g(s) = \int_0^{t_1} e^{-st}(a_1 t + b_1) dt + \int_{t_1}^{t_2} e^{-st}(a_2 t + b_2) dt + \dots + \int_{t_{i-1}}^{t_i} e^{-st}(a_i t + b_i) dt = \sum_{n=1}^i e^{-st} f(s) \quad (16)$$

여기서  $g(s)$ 는 식(11)에서 사용된  $f_i(t)$ 의 라플라스 변환된 식을 나타내며,  $a_i$ 과  $b_i$ 은 두 입력값 사이의 관계를 나타내는 상수이며,  $f(s)$ 는 이러한 관계를 통해서 만들어진 임의의 함수이다.

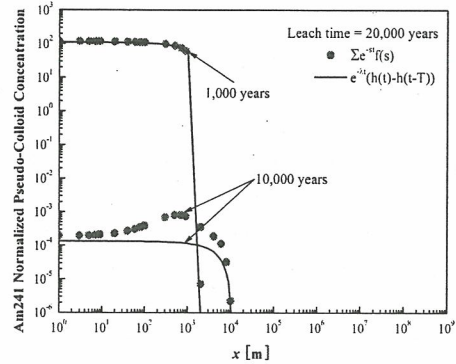


Fig. 2. Am241 pseudo-colloid concentration with  $e^{-\lambda t}(h(t)-h(t-T))$ .

Fig. 2는 Am241의 유사 콜로이드 이동을 나타낸 그래프로서, 계산 결과를 비교하기 위하여  $e^{-\lambda t}(h(t)-h(t-T))$ 에 대한 함수를 경계조건의 입력값으로 사용하였다. 이때의 침출 시간은 20,000년이며, 1,000년과 10,000년일 경우에 대한 거리에 따른 유사 콜로이드 이동을 나타내었다. 1,000년의 경우, 두 함수 모두 약  $10^3 m$ 까지는 일정한 값을 가지다가 이후 급격히 감소하는 비슷한 경향을 나타내고 있다. 그러나 10,000년의 경우 다소 다른 경향을 나타내고 있지만, 두 함수 모두  $10^4$ 의 값을 가지고 있으므로 처분장 안전성 평가에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

### 4. 결론

본 연구에서는 단일 핵종에 대한 유사 콜로이드 이동이 고준위폐기물 처분장 안전성에 미치는 영향을 연구하였다. 외부 프로그램으로부터 획득한 결과값들을 임의의 함수로 가정하여 본 연구에서 획득한 유사 콜로이드 이동 모델링에 적용 가능하며, 이로써 좀 더 실질적인 처분 안전성 평가를 모사할 수 있을 것이라 사료된다.

### 5. 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부 원자력연구개발사업에 의해 지원되었음.