

# KURT 현장의 용질/콜로이드 이동현상 규명을 위한 균열망 이동모델 개발

김정우, 이재광, 백민훈

한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111

[jw.kim@kaeri.re.kr](mailto:jw.kim@kaeri.re.kr)

## 1. 서론

방사성폐기물 처분장의 심부 암반에서 핵종이동 및 지연현상을 규명하기 위한 실험실규모의 연구가 그동안 다양하게 수행되어 왔으나, 심부 암반의 불균질성과 핵종 및 콜로이드의 물리적, 생화학적 복합반응 등으로 인해 실험실규모의 연구결과를 현장규모의 실제 지하환경에 직접 적용하기에는 여러 가지 한계가 있었다. 이를 보완하기 위하여 한국원자력연구원에서는 2006년에 지하연구시설인 KURT를 건설하여 다양한 현장연구를 수행하고 있다. 그 중, 핵종이동과 관련해서는 암반균열에서 비수착성 용질과 콜로이드의 이동실험을 수행하였다. 본 연구에서는 KURT 현장의 암반균열을 통한 용질/콜로이드 이동현상을 규명하고자 자체적으로 균열망 이동모델을 개발하고, 그 결과를 실험결과와의 비교를 통해 검증하였다.

## 2. 본론

### 2.1 균열망 예측

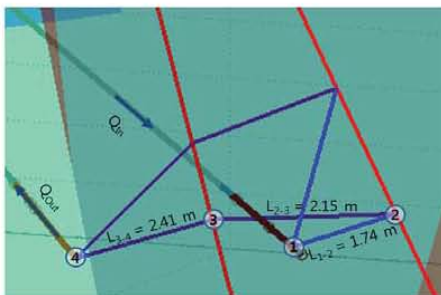


Fig. 1. Expected path in the fracture network

KURT 현장 용질이동 실험에 사용된 두 시추공인 YH3-1과 YH3-2의 시추공 영상촬영 분석결과와 시추자료를 이용하여 두 시추공을 연결하는 균열망을 예측하였다. 우선 각 위치의 균열에 대한 경사각과 방위각 자료를 이용하여 균열면을

예측하였다. 여기서, 균열면은 일정한 간극을 가지는 평면으로 가정하였다. 여러 균열면들의 조합을 통해 Fig. 1과 같이 최단 이동경로와 수평 이동경로가 각각 계산되었는데, 중력 등의 외부조건들을 고려하여 수평 이동경로를 용질과 콜로이드의 주된 예상 이동경로로 가정하였다. 수평 이동경로를 통한 총 이동거리는 6.29 m이었다.

### 2.2 균열망 이동모델

균열망을 통한 용질/콜로이드 이동을 수치적으로 계산하기 위하여 자체적으로 균열망 이동모델을 개발하였다. 이는 각각의 균열면을 통한 이동경로가 순차적으로 이어져서 연결되어 있음을 감안하여, 각 균열 이동경로에서 다음의 1차원 용질이류-분산 방정식을 각각 계산하였다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v \frac{\partial C}{\partial x} + D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

여기서,  $C$ 는 용질의 농도,  $v$ 는 평균 간극유속,  $D$ 는 용질의 수리분산 계수,  $t$ 는 시간,  $x$ 는 거리이다. 각 균열에서의 평균 간극유속은 현장실험조건을 감안하여 회수공에서의 회수유량과 주입공에서의 주입유량을 이용하여 계산되었다. 각 균열을 통한 유량은 다음과 같이 회수유량으로부터 역으로 계산 하였다.

$$\begin{aligned} Q_{3 \rightarrow 4} &= f_4 \cdot Q_{out} \\ Q_{2 \rightarrow 3} &= f_3 \cdot Q_{3 \rightarrow 4} \\ Q_{1 \rightarrow 2} &= f_2 \cdot Q_{2 \rightarrow 3} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $f_2, f_3, f_4$ 는 각각 유량  $Q_{2 \rightarrow 3}, Q_{3 \rightarrow 4}, Q_{out}$ 에 대해 이전 균열에서의 유량  $Q_{1 \rightarrow 2}, Q_{2 \rightarrow 3}, Q_{3 \rightarrow 4}$ 가 기여하는 정도를 나타내는 fraction 상수로써 0에서 1의 범위를 갖는다.

콜로이드 이동모델은 용질 이동모델인 식(1)에 콜로이드 입자 크기에 의한 필터링 효과를 다음과 같이 추가하였다.

$$\frac{\partial C_c}{\partial t} = -v \frac{\partial C_c}{\partial x} + D_c \frac{\partial^2 C_c}{\partial x^2} + \lambda v C_c \quad (3)$$

여기서  $C_c$ 는 콜로이드 농도,  $D_c$ 는 콜로이드의 수리분산 계수, 그리고  $\lambda$ 는 콜로이드의 1차원 필터

터링 상수(1/m)이다. 콜로이드에 대한 그 외 조건들은 모두 용질의 그것들과 모두 동일하게 적용하였다.

### 2.3 실험결과를 통한 모델 검증

개발된 균열망 이동모델의 검증을 위하여 비반응성 용질인 우라늄과 라텍스 콜로이드(1.0  $\mu\text{m}$ )의 현장 이동실험 결과를 이용하였다. 각 실험결과에 대한 모델 검증에서 최적화된 모델 상수들은 Table 1과 같다.

Table 1. Ranges and optimal values of model parameters.

	모델 상수	최소값	최대값	최적값
우라늄 용질 이동실험	$f_2$	1/10	1	1/1.2
	$f_3$	1/10	1	1/4.7
	$f_4$	1/5	1	1/3.7
	$a$ (m)	0.0001	1	0.362
라텍스 콜로이드 이동실험	$\lambda$ (1/m)	0.01	1	0.181
	$a_c$ (m)	0.0001	1	0.149

우라늄 용질 이동실험에 대한 모델 검증에서는 각 균열망에서의 유량 fraction 상수들과 우라늄의 분산도에 대한 최적값을 계산하였다. 그 결과, Fig. 2와 같이 현장 실측치와 비교하여 높은 상관도를 보이는 모델링 결과를 도출하였다. 콜로이드 이동실험에 대한 모델 검증에서는 우라늄 이동모델 검증에서 도출된 각 균열망에서의 유량 fraction 상수들이 균열망 교류의 특성값들이기 때문에 그들의 최적값을 상수로 적용하였다. 그리고, 단지 콜로이드의 필터링 상수와 분산도에 대한 최적값만을 계산하였다. 그 결과, Fig. 3과 같이 우라늄의 경우보다는 다소 낮지만 현장 실측치와 비교하여 높은 상관도를 보이는 모델링 결과를 도출하였다. 콜로이드 이동 모델의 상대적으로 낮은 상관도는 최고점에서 변동이 큰 콜로이드의 실측치에서 기인한 것으로 사료되었다.

일반적으로, 균열면의 교차점에서는 3개의 균열면으로부터의 유량이 하나의 균열면으로 흐르게 되므로 각 균열면으로부터의 유량 기여도인 fraction 상수의 이상적인 값은 1/3이다. 하지만, Table 1에서  $f_2$ 는 1/1.2로 상당히 높게 나타난 반면,  $f_3$ 는 1/4.7로 1/3보다 낮게 나타났다. 이러한 결과는 YH3-2와 YH3-1의 폐커 위치에 존재하는 두 균열면에서 두 균열면을 연결해주는 균열면에

서보다 상대적으로 작은 tortuosity 등에 의해 지하수 흐름 지연 기작이 낮게 나타나는 것을 의미한다.

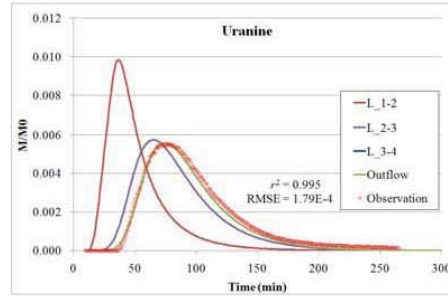


Fig. 2. Model verification results for the uranine transport.

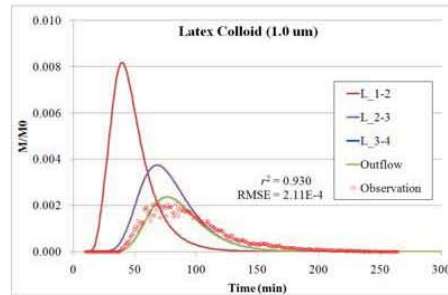


Fig. 3. Model verification results for the colloid transport.

우라늄과 라텍스 콜로이드의 분산도 비교에서는 예상했던대로 입자 크기가 1.0  $\mu\text{m}$ 인 라텍스 콜로이드의 분산도가 0.149 m로 우라늄의 분산도인 0.362 m의 절반정도로 나타났다. 콜로이드의 입자 크기에 의한 필터링 상수는 0.181 /m로 나타났다. 지하수 흐름내 콜로이드의 속도증가 현상을 고려하지 않고 콜로이드의 필터링만을 고려한 균열망 이동모델에서 Fig. 3과 같이 높은 정확도를 보인 것은 입자 크기 1.0  $\mu\text{m}$ 의 라텍스 콜로이드에 대한 수평방향으로의 이동이 가속화보다는 필터링 효과가 더 크게 나타나는 것을 의미한다.

### 3. 결론

본 연구에서는 KURT 현장 용질/콜로이드 이동 실험에 사용된 두 시추공 자료를 통해 균열망을 수학적으로 예측하고, 용질/콜로이드 이동을 수치적으로 계산하기 위하여 균열망 이동모델을 자체적으로 개발하였다. 현장 실측치를 통한 검증 결과, 우라늄과 콜로이드 모두에서 매우 높은 상관도를 보여 개발된 모델의 정확성을 입증하였다.