

# 단열 암반 내 방사성 핵종의 확산과 흡착에 관한 모델링 연구: TASK 9

박동규\*, 지성훈, 고용권

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

\*dkpark@kaeri.re.kr

## 1. 서론

단열 암반 내 방사성 핵종의 확산 (diffusion)과 흡착 (sorption)은 고준위폐기물 지중 처분의 안정성 평가에 있어 매우 중요한 요소 중 하나이다. 지난 수십 년간 암반에서의 확산과 흡착에 관한 여러 연구들이 있었지만, 이들만으로는 실제 단열 암반들에서 나타나는 현상을 온전히 설명하기 어려운 경우가 종종 있었다. 이와 관련하여 국제공동협력연구인 TASK 9은 단열 암반 내 핵종 거동에 관한 모델링이 보다 실제와 부합할 수 있도록 하는데 궁극적인 목적을 두고 있으며, 스웨덴의 Äspö HRL에서 수행된 LTDE-SD 프로젝트와 핀란드의 ONKALO에서 수행된 REPRO 프로젝트의 현장 실험 결과들에 대하여 역산 (inverse) 및 예측 모델링을 단계별로 수행하는 것을 주요 임무로 하고 있다 [1].

## 2. REPRO 프로젝트의 WPDE 실험

핀란드 POSIVA는 REPRO (rock matrix retention properties) 프로젝트의 현장 실험 중 하나로 WPDE (water phase diffusion experiment) 실험을 진행한 바 있다. 이 실험은 ONKALO 시설 내 약 400 m 심도에 위치한 시추공 ONK-323 (직경 56.5 mm)의 약 1.9 m 구간에 대하여 이루어졌다. 이 시추공과 중심이 일치하도록 원기둥 형태의 더미 (직경 24 mm)를 삽입하여 고리 모양의 틈 (두께 1.25 mm)을 만들고, 그곳에 현장 지하수와 유사한 성분을 갖도록 합성한 물로 일정한 흐름을 형성시켰다. 이러한 틈의 한쪽 편 (유입부에 해당)에 추적자 용액을 일정 시간 주입시킨 다음, 틈의 반대편에서 유출되는 물의 추적자 농도를 측정함으로써, 단열 내 지하수 흐름을 통한 핵종 거동시 매질 (matrix)로의 확산과 지연 양상 및 그 특성을 살펴보고자 하였다. Fig. 1은 시추공의 단면이며 전체적인 실험 세팅을 개념적으로 보여주고 있다. 시추공 내 실험 구간 주변 암석은 대부분 veined gneiss이며 일부 pegmatitic granite가 차지하고 있다. 이 실험은 지하수 유속을 20.1  $\mu\text{L}/\text{min}$  (WPDE-1)과 10.0  $\mu\text{L}/\text{min}$  (WPDE-2)으로 달리하여 각각 0.5 년과 1.5 년 동안 두 차례 진행되었다. WPDE-1에서는 HTO,

Na-22, Cl-36가 추적자로 이용되었으며, WPDE-2에서는 Sr-85와 Ba-133가 추가되었다. TASK 9의 첫 번째 단계로서 (이하 TASK 9A로 통칭), 바로 이 실험에 대한 모델링이 제안되었다 [1].

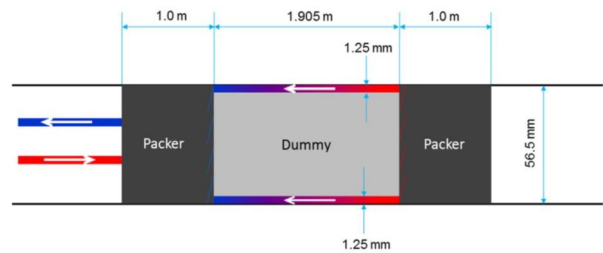


Fig. 1. The setup of the WPDE experiments.

## 3. TASK 9A 모델링 결과 및 토의

TASK 9A는 이후에 진행될 과정들을 위한 일종의 예비 단계로서, 기존에 널리 활용되고 있는 원리나 가정 (예: 균질 및 등방성 매질, Fickian diffusion, equilibrium sorption)이 모델링에 적용되도록 의도되었다. 본 연구에서는 WPDE 실험을 모의하기 위한 모델링 프로그램으로 COMSOL Multiphysics를 이용하였다. 시추공 내 틈으로 유입된 지하수 유동을 모의하기 위해 Reynolds number가 매우 낮은 조건에서의 유체 유동에 관한 “Creeping flow interface”와 틈과 매질 내 추적자들의 분산 (dispersion), 확산, 흡착과 같은 거동 현상을 모의하기 위해 “Transport in diluted solute interface”가 이용되었다.

TASK 9A에서는 3차원의 모의 영역을 구성하되, 원기둥 형태의 등방성 균질 매질을 가정하였으므로 그 대칭성을 감안하여 전체 크기의 1/8만을 모의하였다. 기본적인 모의 영역과 메쉬 구성은 Fig. 2와 같다.

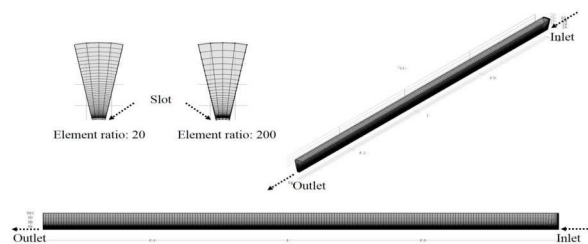


Fig. 2. The model domain and mesh discretization.

실내 실험을 통해 산정한 각 추적자의 확산계수와 분배계수 (흡착)를 활용하여, WPDE 실험에서 시간에 따라 유출되었을 각 추적자들의 농도를 예측하였다. 그리고 각 계수들이 갖는 불확실성에 따른 모델링 결과의 민감도 분석 또한 함께 이루어졌다. CI-36은 확산계수가 작고 흡착이 일어나지 않아 여러 추적자들 중에서 가장 빠르고 높은 첨두농도 (peak normalized decay corrected activity)와 뾰족한 형태의 이력곡선 (breakthrough curve)을 나타냈다. CI-36과 HTO의 민감도 분석 결과, 주어진 확산계수의 불확실성 범위 내에서는 실험 결과가 크게 달라지지 않는 것으로 판단되었다. 한편, WPDE-2 실험에서 대부분 추적자들이 540-735시간 이내에 최고 농도에 이르렀던 반면, Ba-133은 강한 흡착성으로 인해 유출구로의 거동이 상당히 지연되어 2544 시간이 되어야 최고농도에 이르렀다. 또한 시험 종료까지도 최고농도의 29% 이하로 농도가 떨어지지 않는 등 테일링 (tailing) 현상이 뚜렷하게 나타났다 (Fig. 3). 더욱이 Ba-133의 경우 주어진 분배계수의 범위 안에서 최고농도가 나타나는 시점이 1918 시간에서 3186 시간까지 완전히 달라지는 등 예측 결과가 산정값의 불확실성에 매우 민감하게 영향을 받고 있었다.

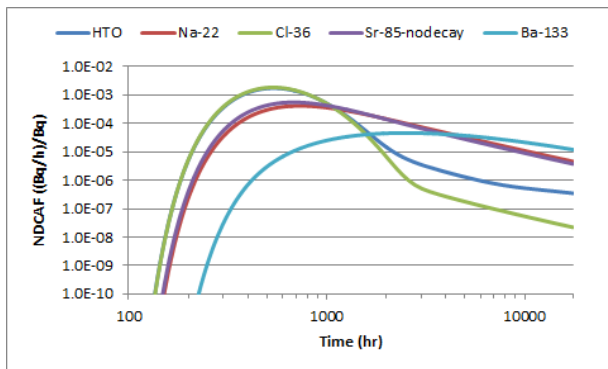


Fig. 3. The prediction results for WPDE-2.

나아가 메쉬 의존성 (mesh dependency) 평가를 통해, Ba-133과 같이 강한 흡착성을 갖는 추적자들을 모의하는 경우 이들이 단열면로부터 매질로 확산하는 것 또한 상당히 지연될 것이라는 점을 고려하여 단열과 매질 사이의 경계면에 해당하는 부분의 메쉬를 보다 촘촘하게 구성해야함을 보인 바 있다.

#### 4. 결론 및 향후 연구

이와 같이 TASK 9A는 기초적인 수준에서의 예비 모델링 단계였지만, 단열 암반 매질 내에서의 용질

거동 특성과 모델링 과정에 관한 여러 시사점을 주었다. 이미 그 결과가 다른 연구기관들의 결과들뿐만 아니라 실제 WPDE 실험 결과와도 비교된 바 있으나, TASK 9의 진행 과정상 이후 단계에서 다시 면밀히 살펴보게 될 예정이다.

현재 진행 중에 있는 TASK 9B는 Äspö HRL에서 수행된 LTDE-SD 프로젝트에 초점을 두고 있다. 이는 자연적으로 형성된 단열면을 통한 매질로의 확산에 관한 실험을 포함하고 있으며, 실험 결과 추적자가 단열면 주변과 매질 내부에 상이한 형태로 분포하고 있음이 보여졌다. 이러한 실험 결과가 단열면 근처에서의 광물 분포나 구조, 매질 내 소규모 ( $\mu\text{m}$ - $\text{mm}$ ) 단열 등에 따른 불균질성과 직간접적으로 관계가 있을 것으로 보고, 이에 대한 모델링 방안을 구체적으로 마련하고자 한다.

#### 5. 감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 원자력연구개발사업의 지원(NRF-2012M2A8A5007440)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 6. 참고문헌

- [1] M. Löfgren, K. Nilsson, and G.W. Lanyon, "Task 9: Increasing the realism in solute transport modelling- Modelling the field experiments of REPRO and LTDE-SD (Task description 9A)", SKB TASK FORCE on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes, p44 (2015).