

벤토나이트 완충재의 열-수리 거동에 대한 수치해석적 연구

이창수*, 이재원, 최영철, 최희주, 김건영, 김경수

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

*leecs@kaeri.re.kr

1. 서론

고준위 방사성 폐기물 처분시스템에서 처분 용기를 감싸고 있는 완충재는 처분용기의 열을 외부로 이동시키며, 핵종이동을 막는 등 중요한 역할을 한다. 따라서 이러한 완충재에 대한 열-수리적 거동 분석이 매우 중요하다. 본 논문에서는 완충재의 열적, 수리적, 역학적 장기 거동 실험 (Lab TH experiment)에 대한 열-수리 복합거동의 모델링 해석 결과를 소개하고자 한다.

2. Lab TH experiment

Fig. 1은 완충재의 열적, 수리적, 역학적 장기거동 실험이 가능한 시험장치를 보여주고 있다. 이때 완충재의 크기는 340 mm X 120 mm X 60 mm 이다. 열적 거동을 분석하기 위해 열전대 17채널, 수리적 거동을 측정하기 위해 상대습도 센서 4채널, 함습을 센서 5채널을 부착하였다. 또한 역학적 거동 특성 분석을 위해 간극수압계 5채널, 팽윤압 센서 5채널 등 총 36채널을 사용하여 데이터를 동시 측정할 수 있다(최영철 외, 2014).

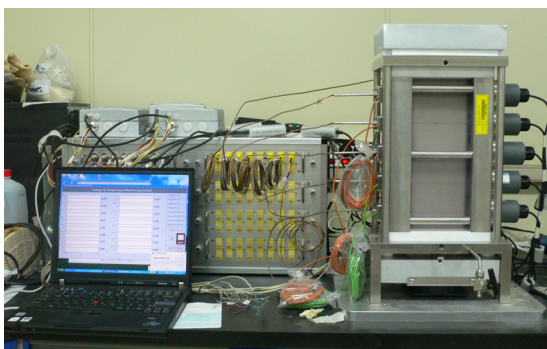


Fig. 1. Experimental setup for long-term evolution of a buffer(Choi et al., 2014).

3. 수치해석

3.1 해석 모델 및 벤토나이트 물성

불포화 매질에서 다상(multiphase) 및 다성분(multicomponent) 유체 혼합물의 다차원(multi-

dimensional) 열 및 유체흐름을 모사하기 위해 미국 Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL에서 개발된 Transport Of Unsaturated Groundwater and Heat 2, TOUGH2 code를 이용하여 수치해석을 수행하였으며, 해석 대상 모델은 벤토나이트, 폴리카보네이트, 스텐리스 스틸, 히터, 쿨러로 구성하였다.

3.2 벤토나이트 물성 및 입력변수

시험에 사용된 벤토나이트의 공극률과 건조밀도는 각각 0.444, 1.50 g/cm³와 40.5%이며, 초기 온도는 21.5°C로 설정하였으며, 모델링에서 사용된 물성은 Table 1에 정리하였다. 또한 실험실 온도는 계절별 온도 편차를 고려하여 Fig. 2와 같이 최대 온도는 설정하였다. 또한 히터의 온도는 시험기간 동안의 평균온도인 88.0도로 고정하였으며, 쿨러의 온도는 28.3도로 고정하였다.

Table 1. Input parameters for numerical modelling

Parameters	Values
Initial saturation (%)	40.5
Initial RH (%)	65
Density of grain (g/cm ³)	2.75
Tortuosity	0.8
Thermal conductivity (W/mK)	0.6 - 1.5
Heat capacity (J/kg·K)	980
Klinkenberg slip factor (Pa)	1.0E11
Permeability (m ²)	1.0E-20

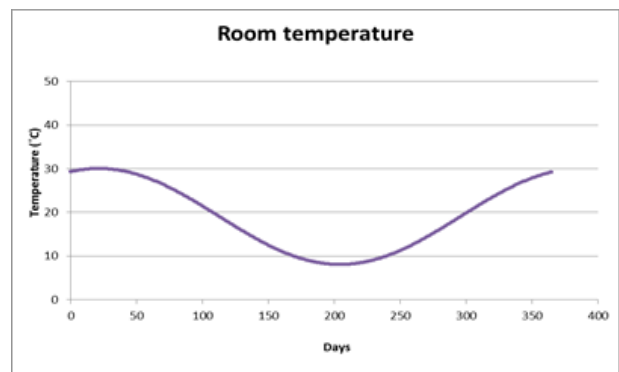


Fig. 2. Room temperature in the modelling.

열전도도의 경우, 포화도에 따라 건조 상태에서는 0.6 W/mK, 포화상태에서는 1.5로 선형적으로 변화하는 것으로 가정하였다. 벤토나이트에서의 포화도에 따른 capillary pressure의 변화는 van Genuchten model(Eq. 1)로 가정하였으며, S는 포화도이고 λ 는 0.2550, $1/P_0$ 는 2.60E-7 (1/Pa)로 결정하였다.

$$P_c = -P_0 \left(S^{-\frac{1}{\lambda}} - 1 \right)^{1-\lambda} \quad (1)$$

3.3 모델링 결과

Fig. 3은 상부 히터에서부터 5 cm, 11 cm, 23 cm, 29 cm 이격된 지점에서의 계측된 온도와 모델링으로부터 계산된 온도를 나타낸 것이다. Fig. 3에 나타나 있듯이 실험실 온도에 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며, 이는 시험장치의 열손실 때문에 발생한 것으로 판단된다. 추후 유사한 실험을 수행할 경우 시험장치 주변에 좀 더 많은 단열재를 설치하여 이러한 열손실을 막아야 할 것으로 판단된다. 계측된 온도와 계산된 온도는 거의 유사하게 나타나고 있으며, 이를 통해 가정된 벤토나이트의 열전도도는 실제 열전도도와 유사할 것으로 판단된다.

Fig. 4는 히터로부터 8 cm, 14 cm, 20 cm, 26 cm 이격된 지점에서의 계측된 상대습도와 모델링으로부터 계산된 상대습도를 나타낸 것이다. Fig. 4에 나타나 있는 것처럼 계산된 상대습도의 변화 양상과 실측된 상대습도는 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 특히 시험 초반부에서 나타나고 있는 vapor diffusion에 의한 건조현상(drying)이 잘 묘사되고 있음을 알 수 있었다. 하지만 건조현상으로 인한 상대습도 최대 변화 정도는 계측값이 약 85%로 조사된 반면 모델링으로부터 계산된 값은 약 75%로 다소 낮게 계산되고 있음을 알 수 있었다. 이러한 차이는 모델의 수리적 입력물성에서부터 기인한 것으로 보이며, 보다 정확한 모델링을 위해서는 벤토나이트 블록에 대한 정확한 수리적 물성이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

TOUGH2 code를 이용한 벤토나이트 블록에서의 열-수리 복합거동 모델링의 결과는 실험실 시험의 결과와 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 하지만 보다 정밀한 비교를 위해서는 벤토나이트 블록의 기본 물성값이 추후 보완되어야 할 것으로 판단된다. 또한 실험실 시험으로 검증된 모델링 기

법을 이용하여 추후 수행될 현장 THM 시험설계 및 결과 분석을 위한 모델링에 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

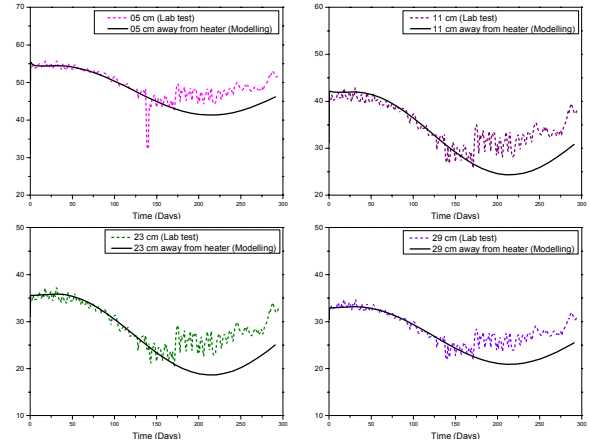


Fig. 3. Temperature evolution.

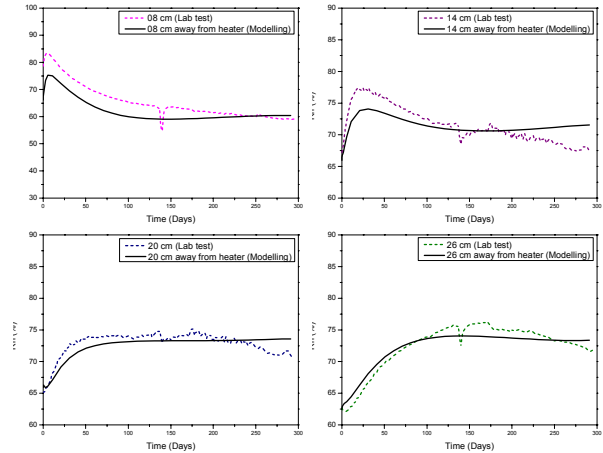


Fig. 4. Relative humidity evolution.

5. 감사의 글

본 연구는 미래창조과학부의 원자력 연구개발 중 장기 계획사업의 일환인 공학적방벽 성능향상 기술 개발 과제(53341-15)로 수행되었습니다.

6. 참고문헌

- [1] 최영철, 윤찬훈, 김진섭, 최희주. 한국방사성폐기물학회, 2014년 추계학술발표회 논문요약집, 175-176, 2014.