

가열 및 포화에 따른 공학적방벽시스템 내 압력분포 변화

조원진, 이재완, 권상기

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045, 305-600

wicho@kaeri.re.kr

1. 서론

고준위폐기물 처분장은 지하 수백 미터 깊이에 있는 심부 지층에 건설된 여러 개의 처분동굴들과 이를 연결하는 터널로 구성된다. 현재 제안되고 있는 고준위폐기물 처분장의 설계개념에 따르면, 처분동굴 바닥에 수직으로 처분공을 굴착하고, 그 속에 방사성폐기물을 밀봉한 처분용기를 넣은 후 처분용기와 처분공의 암반 벽 사이의 공간은 완충재(buffer material)로 충전시킨다. 처분동굴 내의 처분공들이 모두 폐기물로 채워지면, 처분동굴과 연결터널들은 뒷채움재(backfill material)로 채운 후 폐쇄한다. 고준위폐기물 처분장이 폐쇄된 후, 처분된 고준위폐기물로부터 발생하는 붕괴열에 의해 완충재의 온도가 상승하며, 주위 암반으로부터 지하수가 처분장 내로 침투함에 따라 완충재의 포화가 일어난다. 완충재가 지하수로 포화되면, 완충재의 팽윤 현상이 발생되며, 이로 인해 공학적방벽시스템 전반의 압력이 증가하게 된다. 이와 같이 공학적방벽시스템 내에서는 붕괴열에 의한 온도 상승, 지하수에 의한 완충재의 포화 및 이로 인한 압력 상승이 동시에 일어나며, 이 열-수리-역학적 복합거동(coupled thermal, hydraulic and mechanical behavior)은 고준위폐기물처분장의 설계 및 장기 성능평가에 중요한 영향을 미친다. 이 연구에서는 고준위폐기물처분장 공학적방벽시스템에서 일어나는 붕괴열과 지하수 포화에 따른 완충재 내의 압력 분포 변화를 해석하였다.

2. 실험 및 해석

공학적방벽시스템에서 일어나는 열-수리-역학적 거동을 규명하기 위해 한국원자력연구원에서는 공학적 규모 실증실험 시설인 KENTEX를 설치하고, 열-수리-역학적 거동 실증 실험을 수행하였다. KENTEX는 한국형 고준위폐기물처분장의 공학적방벽시스템을 1/3로 축소한 것이다. KENTEX는 고준위폐기물을 모사한 원통형 히터와 이를 둘러싼 벤토나이트 블록 완충재로 이루어진 원통형 본체, 지하수 공급시스템, 각종 계측 및 데이터 로깅 시스템, 제어시스템으로 구성되어 있다. 수직 원통형 탄소강 압력용기인 본체는 고준위폐기물처분장에서 처분터널 바닥에 굴착된 처분공을 모사한 것으로 내경과 높이는 각각 0.75 m와 1.36 m이다 (그림 1). 원통형 본체의 측면 벽에는 지하수 공급탱크로부터 지하수를 벤토나이트 완충재로 공급하기 위한 24개의 노즐이 설치되어 있다. 지하수 공급탱크에서 노즐을 통해 공급되는 지하수의 압력은 5기압이다. 본체 내에 설치된 벤토나이트 블록의 건조밀도는 1.5 Mg/m³ 이고, 고준위폐기물 처분용기를 모사한 원통형 히터와 벤토나이트 완충재 계면에서의 온도는 90°C로 유지시켰다.

KENTEX의 공학적방벽시스템에서 히터의 가열과 본체 측면 벽으로부터 공급되는 지하수에 의한 완충재의 포화에 따른 완충재 내의 압력분포는 TOUGH2 컴퓨터코드[1]를 이용하여 분석하였다. TOUGH2 컴퓨터코드는 불포화 매질에서 다상, 다성분 유체 혼합물의 다차원 유체 및 열의 흐름을 모사할 수 있는 다목적 수치모사 코드이다. 이 코드에서 KENTEX의 상세 구조는 반경 방향으로 대칭인 2차원 메시로 모델링되었으며, 이것은 원통형 탄소강 압력용기 본체 내에서 벤토나이트 완충재 블록에 의해 둘러싸여 있는 원통형 히터를 모사한 것이다. 벤토나이트의 팽윤압을 계산하기 위해 서브루틴 SWELL을 개발하여, TOUGH2 컴퓨터 코드에 추가하였다. 이 서브루틴에서 팽윤압은 다음과 같은 식에 의해 물의 포텐셜 헤드 함수 $S(\theta_1)$ 에 비례한다고 가정하였다.

$$S(\theta_1) = \int_{b_0}^{\theta_1} \frac{dh}{d\theta} d\theta$$

여기서 h 는 물의 포텐셜 헤드 (potential head), θ 는 체적함수비(volumetric water content)이다.

벤토나이트 완충재의 열, 수리 및 역학적 특성은 실험실 실험에서 측정하였으며, 벤토나이트-물 retention 관계[2]도 실험 데이터로부터 구하였다. 이러한 완충재의 특성들은 TOUGH2 컴퓨터 코드의 입력 자료로 사용되었다.

KENTEX에서 측정된 압력 분포와 TOUGH2로부터 계산된 전압력(total pressure)의 대표적 비교 결과를 그림 2에 나타내었다. 이 비교는 KENTEX에서 본체의 바닥에서 높이가 0.68 m인 지점에서 측정된 압력 데이터에 대한 것이다. 측정된 전압력은 히터에 가까운 부분에서는 계산된 값보다 낮았지만, 히터에서 멀리 떨어져 본체의 외벽에 가까운 부분에서는 계산 값보다 높게 나타났다. 그러나 전체적으로는 측정된 전압력과 TOUGH2에 의해 계산된 값은 차이가 크지 않았으며, 상당히 잘 일치하였다. 이러한 결과는 TOUGH2가 KENTEX 내에서 가열과 지하수 포화에 따라 일어나는 시간에 따른 압력 분포 변화를 잘 모사할 수 있음을 보여 준다.

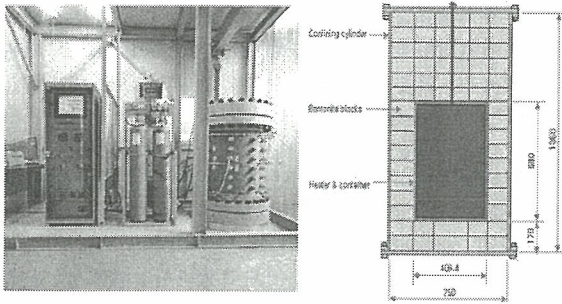


그림 1. KENTEX의 전경 및 본체 단면도

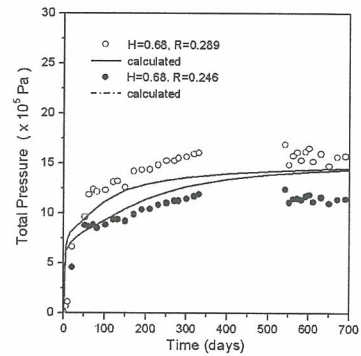


그림 2. 측정결과와 계산결과의 비교

3. 결론

고준위폐기물처분장 공학적방벽시스템을 모사한 공학적 규모 실증실험 장치인 KENTEX에서 일어나는 온도 상승, 지하수에 의한 완충재의 포화 및 이로 인한 압력 변화를 TOUGH2 컴퓨터 코드에 의해 해석하였다. 실험에서 측정된 전압력은 TOUGH2에 의해 계산된 값과 차이가 크지 않고 상당히 잘 일치하여, TOUGH2가 고준위폐기물처분장 공학적방벽시스템에서의 시간에 따른 압력 변화를 해석하는데 유용하다는 것이 입증되었다.

참고문헌

- [1] K. Pruess, C. Oldenburg and G. Moridis, "TOUGH2 User's Guide, Version 2.0, Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-43134 (1990).
- [2] Y. Mualem, "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media," Water Resour. Res., 12, 513 (1976).