

## 비정상 상태에서 고준위폐기물처분장 공학적방벽시스템의 열-역학적 거동 모사

조원진, 이재완, 권상기

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

wicho@kaeri.re.kr

## 1. 서론

현재 제안되고 있는 고준위폐기물 처분장의 설계개념에 따르면, 지하 수백 미터 깊이에 건설된 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 고준위폐기물 처분장의 설계 및 장기 성능평가에 매우 중요하다. 처분장의 설계기준은 처분용기 외벽과 완충재 사이의 계면 온도가 90℃를 넘지 않도록 규정하고 있다 [1]. 그러나 처분장 폐쇄 후 예기치 못한 이유로 인해 공학적 방벽시스템이 국부적으로 과열되어 기준 온도를 초과할 가능성이 있다. 이 연구에서는 고준위폐기물 처분용기와 완충재 계면에서의 온도가 기준치를 초과한 비정상 상태 (abnormal condition)에서 일어나는 공학적방벽시스템 내의 온도와 압력 변화를 해석하였다.

## 2. 실험 및 해석

## 2.1 실험

공학적방벽시스템에서 일어나는 열-수리-역학적

거동을 규명하기 위해 한국원자력연구원에서는 공학적 규모 실증실험 시설인 KENTEX를 설치하고, 열-수리-역학적 거동 실증 실험을 수행하였다 [2]. 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). 지하수 공급탱크에서 노즐을 통해 공급되는 지하수의 압력은 5 기압이며, 본체 내에 설치된 벤토나이트 블록의 건조밀도는 1.5 Mg/m<sup>3</sup>이다. 비정상 상태를 모사한 과열(over-heating) 실험에서는 원통형 히터와 벤토나이트 완충재 계면에서의 온도를 정상운전 온도인 90℃에서 120℃로 상승시킨 후 시간의 경과에 따라 일어나는 공학적방벽시스템 내의 온도 및 압력의 변화를 관찰하였다.

## 2.2 해석

과열 개시, 수 시간 경과 후에 완충재의 온도는 거의 120℃에 도달되어 정상상태를 유지하였다. 각 측정지점의 정상상태 온도는 히터에 가까울수록 높고 멀어질수록 낮은 값을 보였으며, 반경방향의 경우 안쪽이 바깥쪽보다 높은 온도분포를 보였다.

과열에 의해 KENTEX의 공학적방벽시스템 내에서 시간 경과에 따라 발생하는 온도 및 압력의 분포 변화를 TOUGH2 컴퓨터코드[2]를 이용하여 분석하였다. 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 개

발하여, TOUGH2 컴퓨터 코드에 추가하였다. 벤토나이트 완충재의 열, 수리 및 역학적 특성은 실험실 실험에서 측정하였으며, 벤토나이트-물 retention 관계[3]도 실험 데이터로부터 구하였다. 이러한 완충재의 특성들은 TOUGH2 컴퓨터 코드의 입력 자료로 사용되었다.

과열 조건에서 본체의 바닥에서 0.085 m 높이인 지점에서 측정된 온도 분포와 TOUGH2로부터 계산된 온도 분포의 비교 결과를 그림 2에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, 완충재 내의 온도는 빠르게 증가하여, 약 5일 경과 시에는 새로운 정상상태(steady state)에 도달하였다. TOUGH2에 의해 계산된 온도 분포는 실험에서 측정된 온도보다 조금 낮았으며, 그 차이는 히터에 가까운 부분에서는 작고, 본체의 외벽에 가까운 부분에서는 상대적으로 컸다. 평균 차이는 약 2-3 °C이었으며, 온도 상승이 시작된 직후인 과도 상태(transient state)에서 8 °C의 최대차이를 보였다. 과열에 따른 완충재 내의 전압력 분포 변화 패턴은 온도의 변화 패턴과 유사한 경향을 보였다. 측정된 압력 값들이 TOUGH2에 의한 계산 값보다 약간 작았으며, 온도 상승 전후에는 거의 일정한 값을 보였다. 이러한 결과들로부터 TOUGH2가 비정상 상태에서 KENTEX 내에서 일어나는 시간에 따른 온도와 압력의 분포 변화를 잘 모사할 수 있음을 알 수 있다.

3. 결론

고준위폐기물처분장 공학적방벽시스템을 모사한 공학적 규모 실증실험 장치인 KENTEX에서 일어나는 비정상 상태에서의 온도 및 전압력의 시간에 따른 변화를 TOUGH2 컴퓨터 코드를 이용하여 해석하였다. 실험에서 측정된 온도와 전압력은 TOUGH2 코드에 의해 계산된 값과 차이가 크지 않고 상당히 잘 일치하였다. 이로부터 TOUGH2 코드가 고준위폐기물 처분장 공학적방벽시스템의 비정상 상태 열-역학적 거동을 해석하는데 유용하다는 것을 알 수 있다.

4. 감사의 글

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국연구재단의 원자력기술개발사업으로 지원받았습니다.

5. 참고문헌

[1] J. Lee et al., "Concept of a Korean reference disposal system for spent fuels," J. of Nucl. Sci. Tech., 44, 1565-1573 (2007).  
 [2] J. O. Lee, J. H. Park and W. J. Cho, "Engineering-scale test on the thermal-hydro-mechanical behaviors in the clay barrier of a HLW Repository," Annals of Nuclear Energy, 35, 1386-1396 (2008).  
 [2] K. Pruess, C. Oldenburg and G. Moridis, "TOUGH2 User's Guide, Version 2.0, Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-43134 (1990).  
 [3] Y. Mualem, "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media," Water Resour. Res., 12, 513 (1976).

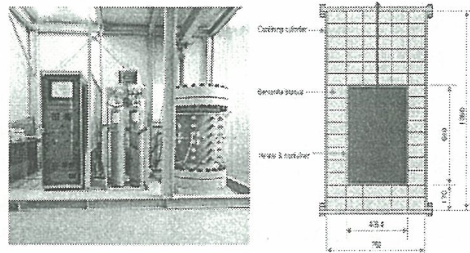


Fig. 1. KENTEX의 전경 및 본체 단면도

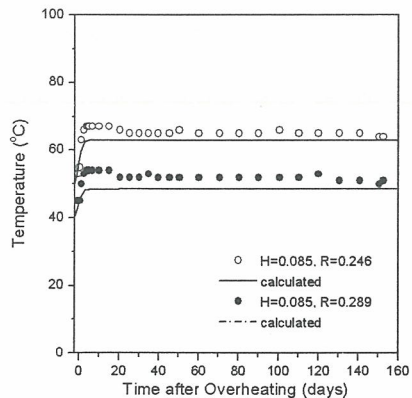


Fig. 2. 과열에 따른 온도 분포 변화