

고준위폐기물처분장의 열해석에서 재포화 현상의 중요성

조원진, 김진섭, 최중원

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

wicho@kaeri.re.kr

1. 서론

고준위폐기물 심지층처분장은 지하 500 m - 1000 m 깊이에 위치한 안정된 지층 내에 건설된 터널 형태의 구조물이다. 심지층처분장에서는 처분동굴 바닥에 수직으로 처분공을 굴착하고, 그 속에 고준위폐기물을 밀봉한 처분용기를 넣은 후 처분용기와 처분공 암반 벽 사이의 공간을 완충재(buffer material)로 충전시킨다. 처분동굴 내의 처분공들이 모두 폐기물로 채워지면, 처분동굴과 연결터널들을 뒷채움재(backfill material)로 채운 후 처분장을 폐쇄한다.

고준위폐기물은 처분장 폐쇄 후에도 상당기간 동안 붕괴열을 방출하므로, 처분장의 장기성능은 처분장 주위 온도분포의 영향을 크게 받는다. 따라서 처분장의 첨두온도(peak temperature)에 대해 다양한 기준이 제시되고 있다. 우리나라에서 심지층처분장 후보매질로 고려하고 있는 포화경암층 내에 건설된 처분장의 경우에는 완충재에 온도 제한이 설정되어 있다. 즉 처분용기의 외벽과 처분용기를 둘러싸고 있는 완충재 사이 계면에서의 첨두온도가 100 °C를 초과하지 않아야 한다는 것이다. 이러한 온도 제한은 고준위폐기물처분장의 설계와 처분밀도에 중요한 제약으로 작용한다. 온도 제한으로 인해 한 개의 처분공에 정치시킬 수 있는 고준위폐기물의 양과, 일정 처분장 면적 내에 처분할 수 있는 폐기물의 총량이 제한되기 때문이다. 따라서 고준위폐기물, 처분용기, 완충재, 뒷채움재로 구성된 공학적방벽시스템의 열해석은 고준위폐기물 처분의 경제성을 좌우하는 측면이 있을 뿐만 아니라, 실제 심지층처분장을 수용할 수 있는 충분한 면적의 부지를 확보할 수 있는가 하는 관점에서 중요하다.

공학적방벽시스템의 열해석에서는 특히 완충재 내에서의 온도 분포가 중요하다. 왜냐하면, 완충재 내의 온도는 뒷채움재 또는 근계암반(near-field rock)의 온도보다 훨씬 높으며, 더욱이 완충재에서는 폐기물로 부터의 붕괴열의 발생, 주위 근계암반으로 부터의 지하수의 침투 및 이에 따른 완충재의

팽윤 등 열-수리-역학적 복합거동이 일어나기 때문이다.

심지층처분장이 폐쇄된 후, 주위 근계암반에 존재하는 지하수가 처분장 내로 침투함에 따라 완충재의 포화가 일어나며, 이 현상을 재포화(resaturation)라고 한다. 이 연구에서는 재포화 현상이 고준위폐기물처분장 공학적방벽시스템의 열해석에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 모델링 및 해석

열해석에 고려된 시스템은 한국형기준처분장(Korea reference repository, KRS) 공학적방벽시스템으로, 그 개념도를 그림 1에 나타내었다 [1]. 처분용기에 포장된 PWR 사용후핵연료는 탄소강과 구리의 이중용기로 이루어진 처분용기 내에 포장된다. 원통형 처분용기의 외경은 1.02 m이고, 길이는 4.83 m이다. 처분용기는 직경 2.02 m인 수직 처분공에 정치된다. 처분공 벽과 처분용기 사이의 공간은 건조밀도 1.6 Mg/m³인 압축벤토나이트로 채운다. 처분동굴은 건조밀도 1.6 Mg/m³인 벤토나이트-모래 혼합물(30:70)로 뒷채움한다.

처분장 폐쇄후 시간의 경과에 따른 공학적방벽시스템 내의 온도분포를 TOUGH2 컴퓨터코드[2]를 이용하여 분석하였다. TOUGH2 컴퓨터코드는 불포화 매질에서 다상(multiphase) 및 다성분(multicomponent) 유체 혼합물의 다차원(multi-dimensional) 열 및 유체 흐름을 수치 모사하기 위한 컴퓨터코드이다. 이 코드에서는 유체의 이류(advection) 흐름을 Darcy의 법칙을 다상으로 확장시켜 모사한다. TOUGH2 컴퓨터 코드를 이용하여, 한국형기준처분장 공학적방벽시스템의 단면을 반경 방향으로 대칭인 2차원 격자구조로 모델링하였다. 모델링에서 좌우 대칭 조건이므로, 공학적방벽시스템의 수직 단면의 절반 부분만 고려하였다.

건조밀도 1.6 Mg/m³인 벤토나이트 완충재는 재포화 현상이 일어남에 따라 수분함량이 증가하게 되며, 수분함량의 증가에 따라 완충재의 열전도도, $\lambda(W/mK)$ 는 다음 식과 같이 선형적으로 증

가한다.

$$\lambda = 4.588 \omega + 0.124$$

여기서 ω 는 함수비이다.

만일 재포화 현상이 공학적방벽시스템의 열 해석에 고려된다면, 완충재와 뒷채움재의 열전도도는 시간이 경과함에 따라 증가하게 된다. 열전도도의 증가는 처분용기로부터 발생하는 열을 주위 근계압반으로 발산시키는 것을 촉진하여, 완충재 내에서의 온도를 감소시킨다. 공학적방벽시스템 내의 온도 분포에 미치는 재포화 현상의 영향을 분석하기 위해, 재포화현상을 고려하여 계산한 처분용기와 완충재 사이의 계면에서의 침투온도를 통상적으로 사용되는 일정한 완충재 열전도도 (1.0 W/mK)를 사용하여 계산한 침투온도와 비교하였다. 그 결과 재포화 현상을 고려한 경우가 일정 열전도도를 사용한 경우에 비해, 처분용기-완충재 계면에서의 침투온도가 약 10 °C 정도 감소하는 것으로 나타났다 (그림 2). 이러한 비교 결과는 재포화 현상을 고려하여 열해석을 수행한다면, 주어진 온도 제한 조건을 만족시키면서 한 처분공 내에 처분할 수 있는 사용후핵연료의 양을 30% 정도 증가시킬 수 있다는 것을 의미한다 (그림2).

3. 결론

한국형기준처분장(Korea reference repository, KRS) 공학적방벽시스템을 대상으로 TOUGH2 컴퓨터 코드를 이용하여, 고준위폐기물처분장의 폐쇄 후 일어나는 재포화 현상이 처분장 열해석에 미치는 영향을 분석하였다. 재포화 현상을 고려하면, 주어진 온도 제한 조건을 만족시키면서 한 처분공에 정치할 수 있는 사용후핵연료의 양을 약 30% 정도 증가시킬 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] K. Pruess, C. Oldenburg and G. Moridis, "TOUGH2 User's Guide, Version 2.0, Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-43134 (1990).

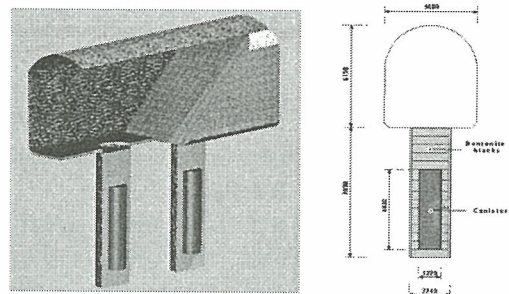


Fig. 1. 한국형기준처분장(KRS) 공학적방벽시스템 단면도.

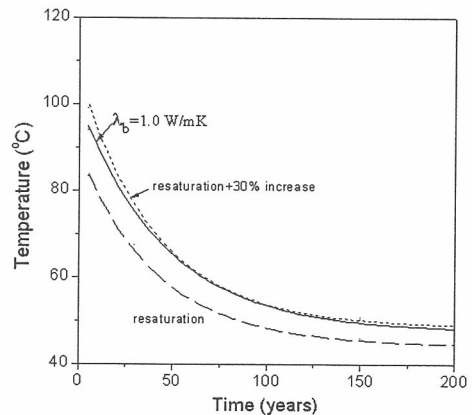


Fig. 2. 재포화 현상을 고려한 완충재에서의 침투온도 변화.