

# 고준위폐기물처분장 완충재 열해석에서의 갭 고려

이재완\*, 최희주

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

\*jolee@kaeri.re.kr

## 1. 서론

고준위폐기물처분장에서 완충재는 공학적방벽의 핵심 구성요소이다. 굴착 처분공에 완충재를 설치하면, 처분용기와 완충재 사이, 완충재와 처분공 벽 사이에 빈 공간, 즉 갭(gap)이 생성된다. 완충재 주변에 이러한 갭의 존재는 완충재의 차수능(water-retarding capacity)과 열전달 효율(heat-transferring efficiency)을 떨어뜨리고, 지하수 침식작용(erosion)에 의한 블록의 건전성 저하와 벤토나이트 콜로이드의 생성으로 인한 핵종 이동을 가속화할 수 있다. 본 연구에서는 KRS(Korean Reference disposal System) 처분장을 대상으로 완충재 주변의 갭이 완충재의 열적성능에 어떤 영향을 미치는지 분석하였다.

## 2. 대상 시스템 및 모델링

한국원자력연구원에서는 2008년에 한국형고준위 폐기물처분장 기준처분시스템(KRS)을 제안한 바 있다. KRS 처분장의 설계개념[1]에 의하면, 처분장은 심부 수백 미터 깊이에 위치한, 지반이 안정되고 균열이 적은 심부 암반층에 건설되며, 여러 개의 처분동굴과 이를 연결하는 터널로 구성된다. 처분동굴 바닥에는 수직의 처분공을 굴착하여 그 속에 방사성폐기물을 밀봉한 처분용기를 넣고, 처분용기와 처분공의 암반 벽 사이의 공간은 완충재(buffer)로 충전시킨다. 그리고 처분동굴 내의 처분공들이 모두 폐기물로 채워지게 되면, 처분동굴과 연결터널들은 뒷채움재(backfill)로 채운 후 폐쇄하게 된다(Fig. 1).

본 연구에서 완충재 주변의 갭을 고려한 열해석은 유한요소 코드인 COMSOL Multiphysics(Ver. 5.2)의 열전달 모듈(heat transfer module)을 사용하여 수행하였다. 열전달 모듈의 지배방정식(governing equation)은 다음과 같다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (1)$$

여기서  $T$ 는 온도,  $\rho$ 는 매질의 밀도,  $C_p$ 는 비열(specific heat capacity),  $k$ 는 열전도도(thermal conductivity),  $Q$ 는 열원(heat source), 그리고  $t$ 는 시간을 나타낸다. 열전달 모듈의 자세한 이론적 배경은 사용자 매뉴얼에 잘 기술되어 있다.

모델의 기하학적 형상은 처분터널 간의 거리 40 m, 처분공 간의 거리가 6 m인 처분장의 단위처분공을 대상으로, x와 y축에서의 대칭을 고려하여 x-방향 20 m x y-방향 3 m x z-방향 1000 m, 3D 1/4 모델링을 수행하였다. 완충재의 안쪽과 바깥쪽 너비는 각각  $1 \times 10^{-2}$  m,  $5 \times 10^{-2}$  m 하였다. 모든 구성물질은 균일(homogeneous)하고 등방성(isotropic)을 갖는다고 가정하였다. 사용후핵연료 캐니스터로부터 열 발생량은 Lee et al.[2]이 제안한 값을 사용하였다. 암반의 초기온도는 지표면의 온도(15°C)에 지열구배(3°C/100 m)를 고려한 값을 사용하였다. 모델 경계조건으로 x와 y축 및 모델 형상의 둘레는 대칭(symmetry)을, 상,하부면은 지열구배를 고려한 온도의 경계조건을 사용하였다. 기타 구성요소의 입력데이터는 Lee 등[3]의 논문에서 제시한 값을 사용하였다.

## 3. 시뮬레이션 결과 및 토의

열해석 시뮬레이션 결과, 완충재 내 온도분포는 시간이 경과할수록 주변으로 확산되었고, 완충재의 첨두온도(peak temperature)는 사용후핵연료가 들어있는 처분용기의 z축 방향 중간지점에서 나타났다. 이 지점에서의 시간에 따른 온도변이는 Fig. 2과 같다. 완충재 주변의 갭을 고려하지 않은 경우(Case A)가 갭을 고려한 경우보다 훨씬 낮은 온도 분포를 보였다. 그리고 갭 고려 시에는, 완충재 안쪽만 갭을 고려하고 바깥쪽은 갭채움재를 채운 경우(Case B)가 양쪽 모두 갭으로 둔 경우(Case B)보다 낮은 온도분포를 보였다.

Table 1에서 보는 바와 같이, Case A, Case B, Case C의 침투온도는 각각 112.6°C, 139.3°C, 189.6°C의 값을 보였다. 또 침투온도 도달하는 시간은 각각 11년, 5.3년, 2.9년으로, 갭이 존재함으로 짧아짐을 알 수 있다. Table 1은 완충재의 열해석에서 갭의 영향이 매우 큼을 보여주고 있다. 특히, 완충재 안쪽과 바깥쪽 갭을 그냥 둘 경우 침투온도는 설계기준(thermal design criteria)을 크게 상회함을 알 수 있다. 고준위폐기물처분장의 개념설정 단계에서는, 보통 완충재 주변의 갭에 대한 고려를 하지 않고 성능평가를 실시하지만, 이는 보수적 관점에서 실제 처분장 상황보다 과소평가(under-estimation) 할 가능성이 있다. 그러므로 신뢰성 있는 완충재의 열성능 평가를 위해서는 갭 공간을 갭채움재(gap-fill)로 마무리 하는 완충재 개념 개발과 함께 이를 고려한 완충재의 열해석이 필요하다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 열해석을 통해 KRS 완충재 주변의 갭이 완충재의 온도분포에 어떤 영향을 미치는지 분석하였다. 열해석 결과, 완충재의 침투온도는 갭의 존재에 의해 큰 영향을 받았다. 신뢰성 있는 완충재의 열성능 평가를 위해서는 갭 공간을 갭채움재(gap-fill)로 마무리 하는 완충재 개념 개발과 함께 이를 고려한 완충재의 열해석이 필요함을 확인할 수 있었다.

#### 5. 감사의 글

본 연구는 미래창조과학부의 원자력기술개발사업(NRF-2012M2A8A5025577)의 일환으로 수행되었습니다.

#### 6. 참고문헌

- [1] 최희주 외, "한국형 고준위폐기물 처분시스템", 한국원자력연구원, KAERI/TR-3563/2008(2008).
- [2] J.Y. Lee, et al., "Analysis of disposal efficiency based on nuclear spent fuel cooling time and disposal tunnel/pit spacing for the design of a geological repository", Progress in Nuclear Energy 53, 361-367 (2011).
- [3] J.O. Lee, "Coupled thermal-hydro analysis

of unsaturated buffer and backfill in a high-level waste repository", Annals of Nuc. Ene. 72, 63-75 (2014).

Table 1. Peak temperature in buffer

Gap	Time(year)	Peak temperature
NG	11	112.6
IGOF	5.3	139.3
IOGA	2.9	189.6

NG: no gap; IGOF: inner gap with air and outer gap with gap-fill; IOGA: inner and outer gaps with air;

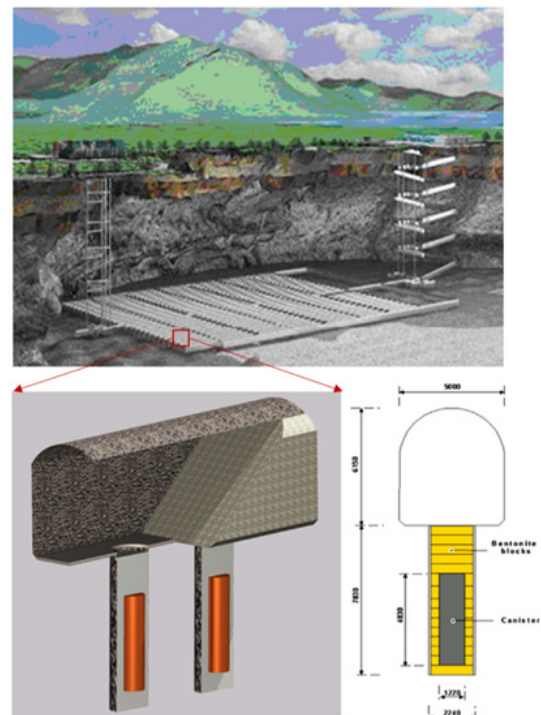


Fig. 1. Schematic picture of KRS.

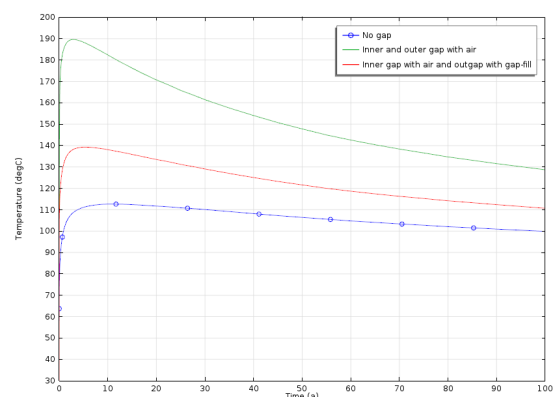


Fig. 2. Peak temperature in the buffer with respect to gap conditions.