

고준위 방사성폐기물 시설의 완충재의 거동특성

박흥락, 신호성*

울산대학교, 울산광역시 남구 대학로 93

*shingeo@ulsan.ac.kr

1. 서론

지하심부에 건설되는 고준위 방사성 폐기물 처분장에서 예상되는 THM 거동에 대한 이해는 완충재의 최적설계와 저장 시설의 장기적인 안정성 확보에 중요한 역할을 한다. 본 논문에서는 기존의 개발된 THM 유한요소 프로그램(신, 2011)을 이용하여 처분용기와 주위 암반사이에서 복잡한 열-수리-역학적 상호작용을 받는 완충재(clay-buffering, 일반적으로 다져진 팽창성 점토 사용)의 장기간인 거동특성에 대한 수치해석을 수행하였다. 사용된 완충재의 물성치는 FEBEX benonite(Gens, 2010; Table 1 참조)에 관한 자료를 사용하였으며, 처분용기는 강체로 가정하였다.

2. 본론

500 m 깊이에 위치한 심층 처분장에서 주위 암반은 초기에 완전포화 상태이고 공기압은 항상 영으로 일정하다고 가정하였다. 초기응력 조건은 $\bar{\sigma}_v = \sigma_v + P_l = 500 + 500 = 1000 \text{ tonf/m}^2$, $\bar{\sigma}_h = \sigma_h + P_l = k_0 \sigma_v = 250 + 500 = 750 \text{ tonf/m}^2$ 으로 산정하였으며, 초기 온도는 30°C (지표면 15°C; geothermal gradient=25-30°C/km) 로 가정하였다. 공학적 방벽시스템은 한국형 처분시스템의 단면(Cho 등, 2010; Fig. 1)을 사용하였다. 처분장의 수치해석 단계는 먼저 원지반을 굴착(굴착면의 전응력과 수압=0)하고, 처분용기와 원지반 사이에 완충재를 채웠다. 이때 채워진 완충재의 초기 흡입력은 $s = 50 \text{ tonf/m}^2$ (초기 포화도=99.5%)으로 가정하였다. 그리고 방사성 붕괴열이 작용하는 경우로 구분하여 해석을 수행하였다. 처분시스템의 시간경과에 의한 지반 물성의 변화를 정리하면 다음과 같다.

2.1 시간경과에 따른 지반 물성 변화

1) 완충재의 간극비는 지하수 유입에 의한 체적 팽창(~16year)으로 주위암반과 인접한 위치(점c)에서 급격하게 증가하며(Fig. 3), 이는 점b의 처분용기

중심으로의 수평방향 변위를 유발하였다 (Fig. 4). 하지만, 완충재가 완전 포화되면서 처분용기에 인접한 완충재 또한 팽창하여 점c의 간극비는 감소하고 점b의 수평방향 변위는 주위암반 방향으로 전환된다. 그리고 완충재의 팽창으로 인하여 방벽시스템이 전체적으로 팽창함을 알 수 있다 (Fig. 4, 점c). 방사성 붕괴열에 의한 추가적인 영향은 열확산이 최대가 되는 ~1년에 완충재의 탄성 열팽창으로 인하여 점b는 팽창하고 점c는 수축하는 경향을 보이고 있다 (Fig. 4).

2) 방사성 붕괴열의 고려시(Fig 2)에 처분용기에 작용하는 완충재의 팽창 압력은 시간경과에 따라 증가하면서 최대로 ~500 tonf/m^2 (~5 MPa)까지 근접함을 알 수 있다 (Fig. 5). 처분용기 설계시 다른 외부 하중과 더불어 팽창압을 고려하여야 한다.

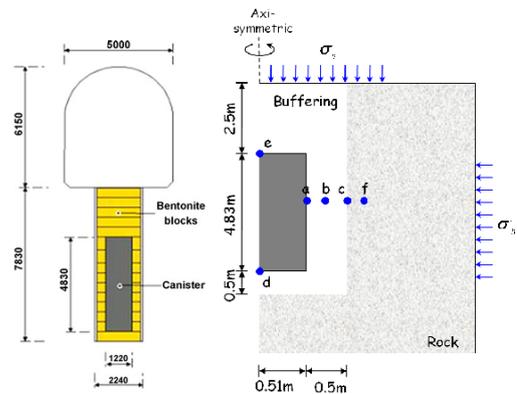


Fig. 1. Cross-section of the engineered barrier system of the Korean reference repository (Cho, 2010), 2-D cross-sectional axial symmetry (Nodes=12,281, Element=4,000).

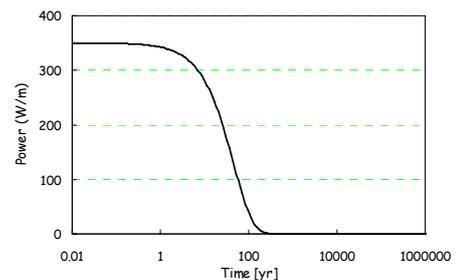


Fig. 2. variation with time of the radioactive decay heat ($P[W/m] = 350 \cdot e^{-0.0219 \cdot \text{Year}}$; Millard 등, 2005).

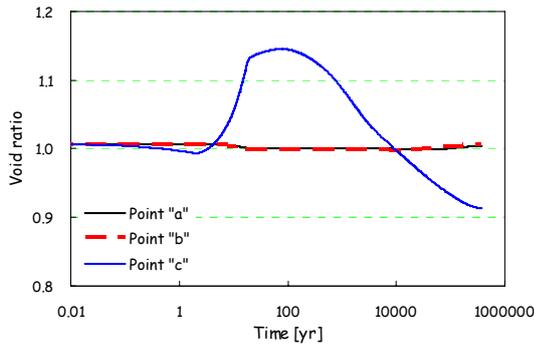


Fig. 3. Variation of void ratio.

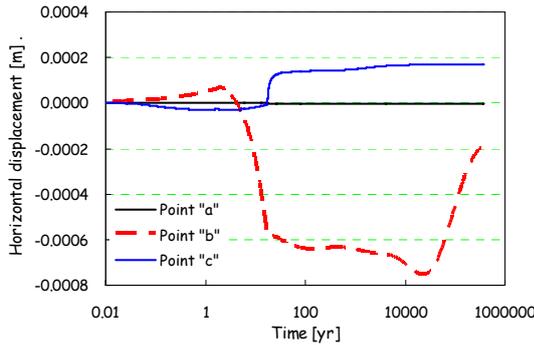


Fig. 4. Variation in horizontal displacement of each position.

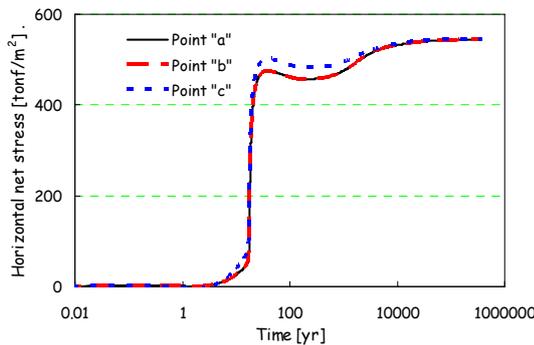


Fig. 5. Horizontal net stress.

3. 결론

고준위 방사성폐기물 시설의 완충재의 거동. 수치해석결과는 개발된 역학적 구성모델이 결합된 THM 현상의 매우 복잡한 거동을 효과적으로 모사할 수 있음을 보여 주었다. 특히, 완충재 내부의 응력과 변위의 변화는 방사성 열에너지 뿐만 아니라, 완충재의 초기 다짐조건에도 크게 의존함을 알 수 있다. 실제 현장조건에서 주요한 THM 현상과 이들간의 결합을 이해하고 설명하기 위해서는 지속적인 실험적 및 수치해석적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Table 1. Properties used in the analysis

| | |
|------------------|--|
| 역 학 적 | [Soil] $C_c(s=0) = 0.345$, $\beta = 1.0 \times 10^{-4} kPa^{-1}$, $r = 0.925$ |
| | $C_s = 0.115$, $N_{@1kpa} = 2.0$, $P_r = 500 kPa$, $\nu = 0.4$ |
| 수 리 학 적 | $M = 1.0$, $\alpha_T = -0.5 \times 10^{-4} ^\circ C^{-1}$, $\gamma_T = 0.5$, $T_{ref} = 30^\circ C$ |
| | [Rock] assume elastic material |
| 열 적 | $E = 3.94 \times 10^6 tonf/m^2$, $\nu = 0.3$, |
| | $\alpha_T = -0.5 \times 10^{-4} ^\circ C^{-1}$ (ENRESA,1998) |
| 수 리 학 적 | [Soil] |
| | · Water retention curve (van Genuchten model) $\lambda = 0.1$, $P_0 = 7.0 \times 10^3 kPa$, $S_{r,max} = 1.0$, $S_{r,min} = 0.01$ |
| 열 적 | · Intrinsic hydraulic conductivity (Kozeny-Carman equation) $K_0 = 1.9 \times 10^{-21} m^2$, $e_0 = 0.667$ |
| | · Relative hydraulic conductivity (Power law) $n = 3.0$, $S_{r,max} = 1.0$, $S_{r,min} = 0.01$, $k_{ri} = S_e^n$ |
| 수 리 학 적 | [Rock] · Water retention curve (van Genuchten model) $\lambda = 0.1$, $P_0 = 7.0 \times 10^3 kPa$, $S_{r,max} = 1.0$, $S_{r,min} = 0.01$ |
| | · Intrinsic hydraulic conductivity $K = 8.0 \times 10^{-18} m^2$ |
| 열 적 | · Relative hydraulic conductivity (van Genuchten model) $\lambda = 0.5$, $S_{r,max} = 1.0$, $S_{r,min} = 0.01$ (Enresa 1998) |
| | $k_{ri} = \sqrt{S_e} (1 - (1 - S_e^{1/\lambda})^\lambda)^2$ |
| 열 적 | [Soil] $\lambda_{sat} = 1.15 W/m \cdot K$, $C_{p,solid} = 732 J/kg \cdot K$ |
| | $C_{p,water} = 4200 J/kg \cdot K$, $\lambda = \lambda_{sat}^{s_r} \lambda_{dry}^{1-s_r}$, $\alpha = \frac{\lambda}{\rho_s C_s^*}$ |
| 열 적 | [Rock] $\lambda = 3.6 W/m \cdot K$, |
| | $C_{p,solid} = 1091 J/kg \cdot K$, $C_{p,water} = 4200 J/kg \cdot K$ |

4. 참고문헌

- [1] 신호성, "불포화지반에 대한 열-수리-역학 거동의 수식화", 한국지반공학회논문집, Vol. 27, 75-83 (2011).
- [2] 한국원자력연구소, "사용후핵연료 처분을 위한 처분용기, 완충재, 뒷채움재의 조건", KAERI/TR-2628 (2003).
- [3] Cho, W.-J., Lee, J.-O., and Kwon, S., "Analysis of thermo-hydro-mechanical process in the engineered barrier system of a high-level waste repository", Nuclear Engineering and Design, Vol. 240, 1688-1698 (2010).
- [4] Gens, A., "Soil-environment interactions in geotechnical engineering", Geotechnique, Vol. 60, 3-74 (2010).
- [5] Gens, A., Guimaraes, L.D., Garcia-Molina, A., and Alonso, E.E., "Factors controlling rock-clay buffer interaction in a radioactive waste repository", Engineering Geology, Vol. 64, 297-308 (2002).