

온도구배를 가진 불포화 매질에서의 음이온 핵종 이동 모사

조원진, 이재완, 권상기

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. 심지층 처분장이 폐쇄된 후, 처분된 고준위폐기물로부터 발생하는 붕괴열에 의해 완충재의 온도가 상승하며, 주위 암반에 존재하는 지하수가 처분장 내로 침투함에 따라 완충재의 포화가 일어난다.

완충재의 온도는 폐기물로부터 발생하는 붕괴열로 인해 상승하게 되며, 완충재의 온도 상승은 주위 암반으로부터 완충재 내로 지하수가 침투한 것을 상당기간 동안 지연시키는 역할을 한다. 따라서 처분장 폐쇄 후의 완충재는 온도구배가 존재하고, 포화도가 시간에 따라 달라지는 불포화 다공성 매질로 간주할 수 있다. 불포화 상태의 다공성 매질에서는 주로 액상으로 이동하는 방사성핵종의 이동 경로가 감소되므로, 포화 상태에 있는 매질의 경우보다 핵종의 이동이 늦어진다. 따라서 온도구배를 가진 불포화 매질에서의 핵종 이동을 분석, 평가하는 것은 고준위폐기물 처분장의 설계 및 장기 성능평가에 중요하다.

심지층처분장의 설계기준은 처분용기 외벽과 완충재 사이의 계면 온도가 90 °C를 넘지 않도록 규정하고 있다 [1]. 이러한 온도 제한에서, 완충재 공극 내에는 기상(gas phase)과 액상(liquid phase)이 공존하는 이상(two phase) 조건이 유지될 것이다. 이 연구에서는 붕괴열에 의해 온도 구배가 형성되는 고준위폐기물 처분장 완충재에서 지하수의 침투에 따른 완충재 내의

포화도 분포와 음이온 핵종인 Iodine의 이동 현상을 해석하였다.

2. 모델링 및 해석

온도 구배가 있는 불포화 매질에서의 핵종이동을 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. 이 연구에서 분석 대상으로 삼은 것은 한국원자력연구원에서 공학적방벽시스템에서 일어나는 열-수리-역학적-화학적 복합 거동을 규명하기 위해 실시하고 있는 공학적 규모 실증실험인 KENTEX-C이다 [2].

TOUGH2 컴퓨터 코드에서, KENTEX-C의 상세 구조를 반경 방향으로 대칭인 2차원 격자구조로 모델링하였으며, 이 구조는 원통형 탄소강 압력용기 본체 내에서 벤토나이트 완충재 블록에 의해 둘러싸여 있는 원통형 히터를 모사한 것이다. 모델링에서 좌우 대칭 조건이므로, 강제 압력용기의 수직 단면의 절반 부분만 고려하였다. 시뮬레이션을 위해 강제 압력용기의 반경방향 단면은 두 영역으로 구분하였다. 첫 번째 영역은 $0 \leq r \leq 0.204$ m 인 영역으로 격자 크기 0.017 m로 분할되었으며, 두 번째 영역은 $0.204 < r \leq 0.375$ m인 영역으로, 격자 크기를 0.0057 m로 감소시켰다. 압력용기의 축 방향은 0.0425 m의 균일한 격자 크기로 분할하였다. 완충재의 초기 조건은 수분함량이 중량비로 13 %, 온도는 25 °C, 압력은 1.0 bar 로 설정하였으며, 전기히터의 출력이 가변적으로 조절되어, 원통형 히터와 벤토나이트 완충재 계면에서의 온도가 90 °C로 유지되는 것으로 가정하였다. 외측 경계조건으로, 물이 주입되는 압력용기 벽은 일정 온도 (25 °C), 일정 압력 (5

bars) 및 포화조건이 유지되고, 모델 메쉬의 상부 및 하부 표면도 역시 일정 온도 (25 °C), 일정 압력 (1 bars)이 유지된다고 가정하였다.

200일이 경과되었을 때, 완충재 내의 포화도 분포 등고선을 그림 1(a)에 나타내었다. 가열 초기에는 히터 표면의 온도가 상승함에 따라 히터와 근접한 완충재 영역에서는 건조 현상이 일어난다. 시간이 경과함에 따라 모세관 압력에 의해 압력 용기 벽으로부터 완충재 내부로 물의 유입이 가속된다. 온도 상승에 따른 물의 점도 감소는 히터 근처에서 수리전도도를 증가시켜, 완충재 전반에서 포화도는 시간 경과에 따라 증가하게 된다. 실험 시작 후 200일이 경과되었을 때, 완충재 내에 분포된 Iodine의 농도 분포 등고선을 그림 1(b)에 나타내었다. 열-수리-역학적 복합 조건 하에서의 음이온의 이동 속도는 포화조건에서의 이동 속도에 비해 상당히 낮아, 200일이 경과된 후에도 주입된 iodine의 일부분만이 히터 근처에 도달하는 것으로 나타났다. 히터의 축 방향 길이의 정 중앙 부분 높이 지점에서, 원통형 히터의 표면과 중심으로부터 수평 거리에 따른 완충재의 iodine 농도의 변화를 시간 경과에 따라 나타내면 그림 2와 같다. 이와 같이 iodine의 이동이 늦게 나타나는 것은, THM 조건에서는 완충재가 상당 기간 동안 물로 포화되지 않고 불포화 상태를 유지하기 때문이다.

3. 결론

고준위폐기물처분장의 폐쇄 후, 공학적방벽시스템의 완충재에서 일어나는 음이온 핵종의 이동현상을 분석하였다. 공학적 규모 실증실험 장치인 KENTEX-C를 대상으로 온도구배가 존재하는 불포화 매질을 통한 음이온의 이동을 TOUGH2 컴퓨터 코드를 이용하여 해석하였다. 열-수리-역학적 복합 조건 하에서 음이온의 이동 속도는 일반적인 포화조건에서의 이동 속도에 비해 상당히 낮아, 200일이 경과된 후에도 주입된 iodine의 일부분만이 히터 근처에 도달하였다.

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).
- [3] K. Pruess, C. Oldenburg and G. Moridis, "TOUGH2 User's Guide, Version 2.0, Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-43134 (1990).

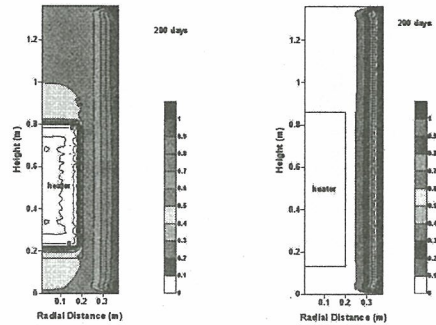


Fig. 1. 200일 경과 후의 (a)포화도 분포 및 (b) iodine 농도 분포 등고선

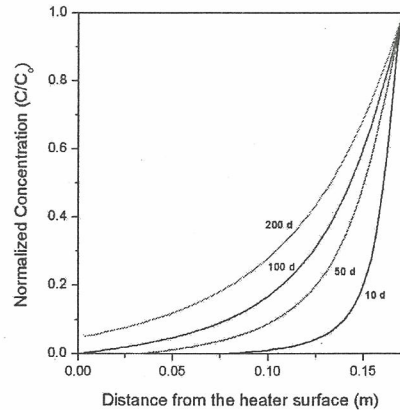


Fig. 2. 시간 경과에 따른 반경 방향의 iodine 농도 분포 변화