

고준위폐기물처분장 공학적방벽시스템의 열-수리-역학적 복합거동 해석모델 개발 현황 및 향후 과제

조원진, 김진섭, 이창수, 최희주

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

wicho@kaeri.re.kr

1. 서론

고준위폐기물 심지층처분장에서는 처분동굴 바다 또는 벽에 수직 혹은 수평으로 처분공을 굴착하고, 그 속에 고준위폐기물을 밀봉한 처분용기를 넣은 후 처분용기와 처분공 암반 벽 사이의 공간을 완충재로 충전시킨다. 처분동굴 내의 처분공들이 모두 폐기물로 채워지면, 처분동굴과 연결터널들을 뒷채움재로 채운 후 처분장을 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 거동 (thermal, hydraulic and mechanical behavior)은 고준위폐기물 처분장의 최적 설계 및 장기 성능평가에 매우 중요하다.

열-수리-역학적 거동은 한 거동에 의해 다른 거동이 영향을 받는 복합과정 (coupled process) 이어서 단일 거동만을 고려했을 때와는 다른 복잡한 양상을 나타내며, 복합과정에 포함된 여러 현상들이 비선형 거동을 보이기 때문에 수학적 모델링이 용이하지 않다. 따라서 심지층 고준위폐기물처분장의 공학적방벽시스템 에서 일어나는 열-수리-역학적 복합거동을 적절히 모사하기 위해서는 물리, 화학, 수리, 물질전달 및 역학 등과 같은 다양한 분야에 대한 종합적 이해와 관련된 현상을 지배방정식으로 구성할 수 있는 수학적 지식 뿐만 아니라, 컴퓨터 모델링 기법에 대한 지식도 요구된다. 세계 각국에서는 열-수리-역학적 복합거동 해석을 위해 많은 모델들이 개발되어 왔으며, 이들 모델의 신뢰성을 검증하기 위한

다양한 시도가 이루어졌다.

이 연구에서는 현재까지 개발된 고준위폐기물 심지층처분장 열-수리-역학적 복합거동 해석을 위한 컴퓨터코드의 개발 현황과 코드에 의한 계산결과를 분석하였다. 또 이를 바탕으로 향후 컴퓨터 모델의 개발 방향을 제시하였다.

2. THM 모델 현황 및 분석

각국에서 개발된 고준위폐기물 심지층처분장 열-수리-역학적 복합거동 해석 모델의 신뢰성 확보를 위해 모델 상호간의 비교, 현장실험 및 mock-up 실험 결과를 통한 검증을 위한 다수의 국제공동 연구 프로젝트들이 수행되었다.

이중 대표적인 것은 DECOVALEX (DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiment) 국제공동연구로서 1992년에 DECOVALEX-1이 시작된 이후, DECOVALEX-II, DECOVALEX-III, DECOVALEX-THMC가 연속해서 수행되었으며 [1], 최근에 DECOVALEX-2011이 종료되었다. DECOVALEX-THMC 공동 연구에서 참여한 컴퓨터코드 명칭 및 참여기관은 표 1과 같다. 이 공동연구에서는 Yucca Mt. 처분장과 같은 "open gas-filled tunnel" 형태의 처분장과 심부의 포화 경암층에 건설된 "back-filled tunnel" 형태의 처분장에 대해 분석이 수행되었다. 두 형태의 처분장에 대한 참여 컴퓨터코드의 해석결과는 수리거동 예측에서 일부 불일치가 있으나, 열적 및 역학적 거동의 해석 결과는 서로 잘 일치하였다고 보고되었다 [2]. 그러나 이러한 결과는 참여 컴퓨터코드 계산 결과 상호 간의 비교일 뿐, 현장실험이나, mock-up 실험 결과와의 비교를 통한 검증이 이루어진 것은 아니기 때문에 컴퓨터코드의 신뢰성을 확보하는 데는 한계가 있다.

현장실험과 mock-up 실험 결과를 이용한 열-수리-역학적 복합거동 해석 모델의 검증은 주로 유럽에서 수행되었다. 스페인 CIEMAT의

mock-up실험, 스위스 GTS의 FEBEX 현장실험 및 스웨덴 Aspö HRL의 prototype repository에서의 현장실험을 통한 검증이 대표적이다. 현장실험과 mock-up 실험 결과를 해석하기 위해 각국에서 개발된 여러 컴퓨터코드들이 적용되었으며, 대표적인 코드는 Code_BRIGHT, COMPASS, INVERSE-FADES-CORE, QUASI 등이다. 이 컴퓨터코드들 중 Code_BRIGHT가 FEBEX나 prototype repository 양쪽 모두에 널리 쓰이고 있다. Code_BRIGHT에 의한 prototype repository의 열-수리-역학적 거동 해석 결과 중 대표적인 것을 그림 1에 나타내었다 [3]. 이 그림에서 보는 바와 같이, 코드에 의해 예측된 완충재 내의 온도 분포는 실험 측정치와 잘 일치하고 있으나, 압력의 전개 양상은 예측치와 측정치가 서로 다른 경향을 보이고 있다. 수분함량 분포의 예측은 온도와 압력 중간 정도의 정확도를 보이고 있다. FEBEX 실증실험 측정치에 적용한 경우에도 비슷한 결론을 얻었다 [4].

Table 1. DECOVALEX-THMC 참여 컴퓨터코드.

국가	컴퓨터 코드	참여기관
미국	TOUGH-FLAC	DOE LBNL
미국	ROCMAS	DOE LBNL
독일	GeoSys/Rockflow	U. of Tübingen
중국	FRT-THM	CAS
일본	THAMES	U. of Kyoto

3. 결론

고준위폐기물 공학적방벽시스템의 열-수리-역학적 복합거동을 해석하기 위해 개발된 컴퓨터코드에 의한 계산결과를 현장실험 및 mock-up 실험에서 얻은 측정치에 적용한 결과를 살펴보았다. 그 결과 현재 제안된 열-수리-역학적 복합거동 해석모델은 공학적방벽시스템 내의 온도 분포는 비교적 잘 예측할 수 있으나, 수분분포와 압력분포에 대해서는 개선이 필요하다. 특히 압력의 전개 과정을 예측하는 모델의 경우에는 근본적인 개선이 요구된다.

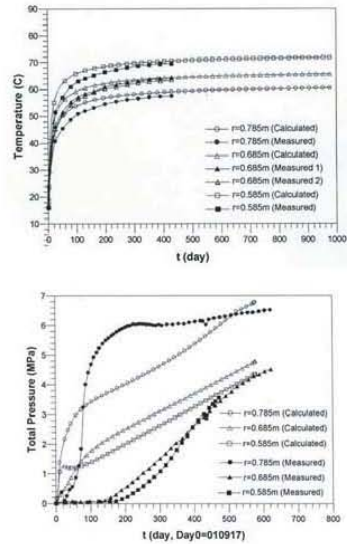


Fig 1. prototype repository 실험결과와 Code_BRIGHT 예측결과 비교.

4. 감사의 글

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국연구재단의 원자력기술개발사업으로 지원받았습니다.

5. 참고문헌

- [1] 권상기, 조원진, 최종원, "THM 복합거동 해석을 위한 DECOVALEX 국제공동연구 현황, 방사성폐기물학회지, 5, 323-338 (2007).
- [2] J. Rutqvist et al., "Results from an international study on coupled thermal, hydrological, and mechanical processes near geological nuclear waste repository," Nuclear Technology, 163, 101-109 (2008).
- [3] A. Gens, A. Ledesma, P. Pusch, L. Borgesson, "THMC Processes in Engineered Barriers: The Experience from Febex and Prototype Projects," Euradwaste'04 Conference, Luxembourg, March, 2004.
- [4] A. Gens et al., "A full-scale in situ heating test for high-level nuclear waste disposal: observation, analysis and interpretation, Géotechnique, 59, 377-399 (2009).