Current Status of the Numerical Models for the Analysis of Coupled Thermal-Hydrological-Mechanical Behavior of the Engineered Barrier System in a High-level Waste Repository

고준위폐기물처분장 공학적방벽시스템의 열-수리-역학적 복합거동 해석 모델 개발 현황

Won-Jin Cho*, Jin Seop Kim, Changsoo Lee and Heui-Joo Choi

Korea Atomic Energy Research Institute, Deaduk-Daero 989-111, Yuseong, Daejeon, Korea

조원진*, 김진섭, 이창수, 최희주

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received August 06, 2012 / Revised September 11, 2012 / Approved October 23, 2012)

The current status of the computer codes for the analysis of coupled thermal-hydrological-mechanical behavior occurred in a high-level waste repository was investigated. Based on the reported results on the comparison between the predictions using the computer codes and the experimental data from the in-situ tests, the reliability of the existing computer codes was analyzed. The presented codes simulated considerably well the coupled thermal-hydrological-mechanical behavior in the near-field rock of the repository without buffer, but the predictions for the engineered barrier system of the repository located at saturated hard rock were not satisfactory. To apply the current thermal-hydrological-mechanical models to the assessment of the performance of engineered barrier system, a major improvement on the mathematical models which analyze the distribution of water content and total pressure in the buffer is required.

Key words: Thermal-hydrological-mechanical behavior, High-level waste repository, Engineered barrier system, Numerical model, Validation

현재까지 개발된 고준위폐기물 심지층처분장의 열-수리-역학적 복합거동 해석을 위한 전산 코드의 현황을 조사하고, 문헌에 보고된 각 코드에 의한 계산치와 현장실험 측정치의 비교 결과를 이용하여, 기존 전산 코드들의 신뢰도를 분석하였다. 개발된 전산코드들은 완충재가 없는 처분장에서는 붕괴열에 따른 암반의 열-수리-역학적 거동을 비교적 잘 모사하였으나, 포화 경암 층에 위치한 완충재가 존재하는 처분장의 공학적방벽시스템 내에서 일어나는 열-수리-역학적 복합거동의 예측은 만족스럽지 못하였다. 현재 제안된 열-수리-역학적 복합거동 해석모델을 고준위폐기물 처분장 공학적방벽시스템의 거동 해석에 적용하기 위해서는 완충재 내의 수분함량 및 전 압력 분포를 보다 정교하게 모사할 수 있도록 수학적 모델의 개선이 필요하다.

중심단어 : 열-수리-역학적 거동, 고준위폐기물 처분장, 공학적방벽시스템, 수치 모델, 실증

*Corresponding Author . E-mail: wjcho@kaeri.re.kr, Tel: +82.42.868.2852

1. 서론

원자력 발전 과정에서 발생하는 사용후핵연료는 장 반감기 방사성핵종을 다량 함유하고 있으며, 상당량의 붕괴열을 방출할 뿐 아니라, 방사선 준위 또한 높은 고준위폐기물이다. 최근에 국민 건강과 환경에 대한 관심이 고조됨에 따라, 고준위폐기물의 안전관리 문제는 원자력발전의 지속적인 추진에 큰 영향을 미치는 국가적 관심사로 대두되고 있다. 따라서 고준위폐기물인 사용후핵연료는 그 유효기간 동안 생태계로부터 완전히 격리, 처분하여 인간 환경에 대한 방사선적 위험 가능성을 미연에 방지하여야 한다. 현재 가장 유력시 되고 있는 고준위폐기물 처분방식은 지하 수백 미터 깊이에 위치한 균열이 적고, 안정된 암반 내에 건설된 터널 형태의 지하구조물에 고준위폐기물을 격리시키는 심지층처분 방식이다. 고준위폐기물 심지층처분장에서는 처분동굴 바닥 또는 벽에 수직 혹은 수평으로 처분공을 굴착하고, 그 속에 고준위폐기물을 밀봉한 처분용기를 넣은 후 처분용기와 처분공 암반 내벽 사이의 공간을 완충재로 충전시킨다 [1]. 처분동굴 내의 처분공들이 모두 폐기물로 채워지면, 처분동굴과 연결터널들을 뒷채움재로 채운 후 처분장을 폐쇄한다. 이러한 심지층처분장에서 처분용기, 완충재 및 뒷채움재로 구성된 부분을 공학적방벽시스템 (Engineered barrier System, EBS)이라 하며, 이 공학적방벽시스템은 폐기물을 일차적으로 격리하고, 외부의 충격으로부터 보호하는 역할을 함으로써, 심지층처분장 폐기물 격리 성능을 좌우하는 핵심 구성 요소이다 (그림 1).

고준위폐기물 심지층처분장이 폐쇄된 후, 시간이 경과함에 따라 처분된 고준위폐기물로부터 발생하는 붕괴열에 의해 공학적방벽시스템의 온도가 상승하며, 주위 암반으로부터 지하수가 처분장 내로 침투함에 따라 완충재의 포화도

동시에 일어난다. 완충재가 지하수로 포화되면, 완충재의 팽윤 현상이 일어나, 공학적방벽시스템 전반의 압력이 상승하게 된다. 이와 같이 공학적방벽시스템 내에서는 붕괴열에 의한 온도 상승, 지하수에 의한 완충재의 포화 및 이로 인한 압력 상승이 동시에 일어나는 현상을 열-수리-역학적 거동이라고 하며, 이 열-수리-역학적 거동은 고준위폐기물 처분장의 격리 성능에 큰 영향을 미친다. 따라서 공학적방벽시스템에서 일어나는 열-수리-역학적 (thermal, hydrological, mechanical, THM) 거동을 해석하고, 예측하는 것은 심지층처분장의 장기 성능을 보장하고, 처분장 설계를 최적화하는데 매우 중요하다.

그러나 공학적방벽시스템 내에서 일어나는 열-수리-역학적 거동은 서로 독립된 것이 아니라, 한 거동에 의해 다른 거동이 영향을 받는 연계과정 (coupled process)인 복합 거동이기 때문에, 단일 거동만을 고려했을 때와는 다른 복잡한 양상을 나타낸다. 또 복합과정에 포함된 여러 현상들이 비선형 거동을 보이기 때문에 수학적 모델링이 용이하지 않은 난점도 있다. 따라서 심지층 고준위폐기물처분장의 공학적방벽시스템에서 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 지식뿐만 아니라, 전산 모델링 기법에 대한 지식도 요구된다.

세계 원자력 선진국에서는 심지층처분장의 열-수리-역학적 복합거동 해석을 위해 과거 수십 년 동안, 많은 전산 모델들이 개발되어 왔으며, 개발된 모델의 신뢰성을 검증하기 위해 현장실험을 포함한 다양한 시도가 이루어졌다. 이 논문에서는 현재까지 개발된 고준위폐기물 심지층처분장의 열-수리-역학적 복합거동 해석을 위한 전산 코드의 현황을 살펴보고, 각 코드에 의한 계산결과를 현장실험에서 측정된 결과와 비교함으로써, 전산코드의 신뢰도를 분석하였다. 또 이러한 분석 결과를 바탕으로 향후 심지층처분장 공학적방벽시스템의 열-수리-역학적 복합거동 해석을 위한 전산 모델의 개발 방향을 제시하였다.

2. 열-수리-역학적 복합 현상 및 수학적모델

공학적방벽시스템에서 일어나는 열-수리-역학적 현상이 현저하게 나타나는 영역은 완충재(buffer)이다. 완충재는 폐기물 처분용기를 감싸고 있으므로, 내측 경계를 통해 처분용기에서 발생하는 다량의 붕괴열이 완충재로 유입되어 완충재의 온도를 상승시킨다. 이 열은 완충재를 통해 완충재 외

Fig. 1. Cutaway view of the Korean reference high-level waste disposal system.

측 경계와 접촉하고 있는 근계 암반(near-field rock)으로 발산된다. 완충재의 수리전도도는 매우 낮아 완충재 내에서의 물의 이동 속도가 매우 느리기 때문에, 열의 이동을 지배하는 메커니즘은 전도이다. 따라서 붕괴열은 완충재와 주위 암반 사이에 형성된 온도 구배에 의해 주위 암반으로 발산되기 때문에 열전달을 지배하는 주요 인자는 완충재와 암반의 열전도도이다. 완충재의 내측 영역에서는 붕괴열에 의해 온도가 상승함에 따라 완충재 내에 함유되어 있던 물의 증발이 일어나 완충재의 건조현상이 발생하여, 포화도와 수압이 감소한다. 완충재 내측에서 증발에 의해 형성된 수증기는 완충재 외측으로 이동하게 되며, 완충재 외측은 온도가 상대적으로 낮아, 이동된 수증기의 응축이 일어나므로 포화도가 증가된다. 수증기의 확산은 열-수리-역학적 복합거동 초기의 물의 이동을 지배하는 주요 메커니즘으로서 열의 이동에도 상당한 영향을 미친다. 완충재는 벤토나이트로 이루어진 불포화 매질로서 모세관 현상에 의한 물의 흡입능력이 크기 때문에 주위 암반으로부터 완충재 내부로 물의 이동을 촉진하여 완충재의 수화현상을 가속시킨다. 이 때 완충재 내부 물 포텐셜의 분포는 완충재의 건조와 수증기 확산에 의해서도 크게 영향을 받는다. 시간이 경과하면 결국은 완충재가 주위 암반으로부터 유입된 지하수에 의해 포화되는데, 이 현상을 재포화(resaturation)라 하며, 완충재의 수리전도도가 작기 때문에 재포화에는 수 십 년이라는 상당히 긴 시간이 소요된다. 완충재의 건조는 매질의 수축을 초래하는 반면, 지하수의 침투로 인한 수화 현상은 반대로 완충재를 팽윤시킨다. 이러한 수축 및 팽윤 현상은 고밀도 벤토나이트로 제작된 완충재에서 특히 현저하다. 완충재는 처분용기와 처분공 내벽 암반 사이에 구축되어 있어, 체적이 일정하므로 완충재의 팽윤은 처분용기 벽면과 처분공 내벽 암반에 팽윤압을 가하게 되며, 이 팽윤압은 완충재의 밀도에 따라 다르나 수 MPa 까지 상승하기도 한다.

이러한 현상들은 서로 강하게 연계되어 있어 상호작용을 하며, 복합거동의 형태를 보이는 것이 특징이다. 예를 들면, 증발과 응축은 수리특성인 흡입과 열적 특성인 온도에 좌우되며, 이동 현상은 이류와 확산의 복합체로서 온도, 포화도 및 공극률의 영향을 받는다. 증기의 이동은 그 자체는 중요하지 않으나, 액상의 물을 반대 방향으로 이동시키는 효과가 있으며, 액상의 물의 이동은 온도, 포화도 및 공극률에 좌우된다. 열전달 측면에서도 각 과정들은 상호 영향을 미친다. 즉 열전도는 완충재의 열전도도에 의해 결정되는데, 열전도도는 포화도와 공극률에 좌우되며, 이외에도 다양한 연계 과정이 존재한다. 열-수리-역학적 복합거동 해석에서 고려되고 있는 각 과정 사이의 상호 작용 관계를 그림 2에 나타내었다 [2]. 이러한 각 현상의 연계과정을 고려하여, 공학적방벽 시스템의 열-수리-역학적 복합거동을 기술하기 위해서는 다음과 같은 현상들이 수학적 모델에 고려되어야 한다.

○ 물질 보존

- 액상 이류 (advection)
- 기상 확산 (diffusion)
- 상변화 (phase change)

○ 에너지 보존

- 전도 열전달 (heat conduction)
- 액상 및 기상 대류 열전달 (heat advection)
- 상변화 (phase change)
- 열 발생 및 소멸 (heat source/sink)

○ 역학적 거동

- 응력 및 변형
- 매질의 팽윤 및 열팽창
- 모세관 압력에 의한 흡입 거동

열-수리-역학적 현상 해석을 위한 전산모델에서는 유체 이동, 열 보존 및 평형을 기술하는 편미분 방정식을 상호 연계하여, 유한차분법 (FDM) 또는 유한요소법 (FEM)

Fig. 2. Examples of coupled THM processes.

으로 수치해를 구한다. 완충재 내로의 지하수 침투를 불포화 다공성 매질에서의 공극수 흐름으로 모사하며, 포화 다공성 매질에서의 물 흐름에 대한 일반 법칙인 Darcy 법칙을 포화도가 변하는 불포화 매질로 확장하여 해석한다. 또 온도 구배에 따른 기상에서의 증기 흐름과 물 및 다공성 매질의 열팽창에 의한 물의 이동 현상도 고려하며, 매질의 불포화 상태, 물과 매질의 압축성, 다공성 매질의 압밀로 인한 물의 보유 (retention) 효과를 고려한다. 열 보존 방정식에서는 열의 전도 및 대류에 의한 열 전달, 상변화에 따른 잠열 효과, 열의 발생 및 소멸을 다루며, 평형 방정식에서는 몸체 힘 (body force), 탄성, 열팽창에 의한 응력 및 변형, 다공성 매질의 모세관 압력 등을 고려한다 [3].

3. 열-수리-역학적 복합 거동 해석 전산 코드 현황 및 적용 사례 분석

세계 각국에서는 1980년대부터 심지층처분장의 열-수리-역학적 복합거동 해석을 위해 많은 전산 모델들이 개발되어 왔으며, 각국에서 개발된 모델의 신뢰성을 확보하기 위해 모델의 계산 결과를 상호 비교하고, 현장실험 및 mock-up 실험 결과를 통해 검증하기 위한 다수의 국제공동연구 프로젝트들이 수행되었다.

이 중 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 [4], 2011년에 DECOVALEX-2011이 종료되었다. 이 공동연구 중, 공학적방벽시스템의 열-수리-역학적 거동 모사를 위한 전산 모델의 상호 비교는 DECOVALEX-THMC Task A에서 다루어졌으며, 주요 내용은 다음과 같다.

- 폐기물 처분용기에 의한 압반의 가열과 이에 따른 압반의 열응력 (thermal stress)
- 열응력에 의한 압반의 수리지질학적 변화
- 수리지질학적 특성 변화에 의한 폐기물 거치동굴 주변의 유체 흐름 분포 변화

열-수리-역학적 복합거동은 지질역학 및 수리지질 특성에 변화를 초래할 수 있어, 처분장의 장기 성능 측면에서 중요하다. 즉 붕괴열에 의한 압반의 온도 상승으로 인해, 처분

Table 1. Computer Code applied in the DECOVALEX-THMC Cooperation Project.

Country	Computer Code	Research Team
USA	TOUGH-FLAC [7,8,25]	Department of Energy (DOE) Lawrence Berkely National Laboratory (LBNL)
USA	ROCMAS [11,26,27]	Department of Energy (DOE) Lawrence Berkely National Laboratory (LBNL)
Germany	GeoSys/Rockflow [12]	Univ. of Tübingen
China	FRT-THM [13]	Chinese Academy Science (CAS)
Japan	THAMES [14,28]	Univ. of Kyoto

터널 주변의 유체 흐름 패턴이 초기 상태와 달라지며, 이러한 변화는 영구적이어서 처분장의 온도 조건이 처분장 개설 이전 상태로 돌아간 후에도 지속될 수 있다. DECOVALEX-THMC 공동연구에서는 미국의 Yucca Mountain 처분장과 같이 불포화 화산암 층에 건설되고 온도가 상대적으로 높은 open gas-filled tunnel 형태의 처분장 (Type A)과 심부의 포화 경암층에 건설되고, 온도가 상대적으로 낮은 back-filled tunnel 형태의 처분장 (Type B)을 대상으로 하여, 열-수리-역학적 거동을 분석하였다. DECOVALEX-THMC 공동연구에서 참여한 전산코드의 명칭 및 참여기관은 표 1에 나타내었다. 이 표에 수록된 코드 중 ROCKMASS, THAMESS 및 FRT-THM은 단상 (single phase) 유동모델에 기반을 두고 있으며, 나머지 두 모델 TOUGH-FLAC 및 GeoSys/Rockflow는 이상 (two phase) 유동모델을 사용하고 있다. 열-수리-역학적 거동의 모사는 각 처분장 형태에 대해 크기와 열 부하가 다른 1개의 수평 처분터널을 고려한 2차원 drift scale 모델을 이용하여 수행되었다.

각 모델에 의해 계산된 결과들을 비교하면, 온도와 응력의 전개에 대한 계산 결과들은 서로 잘 일치하고 있으나, 처분장 특정 위치에서의 포화도 변화를 계산한 결과들은 서로 상당한 차이가 있었다. 이러한 차이는 GeoSys/Rockflow, FRT-THM, THAMES는 단일 연속체 모델을 사용하는 반면, ROCKMASS, TOUGH-FLAC은 이중연속체 (dual-continuum) 모델을 사용하는데서 오는 차이라고 보고되었다 [2,5]. 그러나 이 비교 결과는 공동연구에 참여한 전산코드에 의해 계산된 결과들을 상호 비교한 것일 뿐, 현장실험이나, mock-up 실험을 통해 얻은 측정 결과와 비교한 것이 아니기 때문에, 진정한 의미의 검증이라고 할 수 없어 모사에 사용된 전산코드의 신뢰성을 확보하는 데는 한계가 있었다.

3.1 Yucca Mountain DST 실험을 이용한 전산 코드 검증

고준위폐기물처분장 근계암반 (near-field rock)에 대한 열-수리-역학적 거동 모사를 위한 전산코드의 성능 검증은 1999년에서 2003년 사이에 수행된 DECOVA-LEX III Task B에서 수행되었다. 이 공동연구에서는 전산코드를 이용하여 계산한 결과를 미국 Yucca Mountain 처분장 부지에서 수행된 Drift Scale Test (DST)에서 얻은 실험 자료와 비교하여, 코드의 신뢰성을 검증하려고 시도하였다. DST는 Yucca Mountain 처분장 부지에서 열-수리-역학적 복합거동을 규명하기 위해 수행된 대규모 현장 히터 시험이다. 직경 5 m, 길이 40 m 인 원형 터널 내에 최대 전력 15 kW인 직경 1.7 m, 길이 4.6 m의 원통형 전기히터를 9개 설치하였으며, 인접 처분터널에서 발생하는 열의 영향을 고려하기 위해 양쪽 벽면에는 50개의 wing heater (길이 10 m, 2.1 kW)를 설치하였다 (그림 3). 1997년 12월에 히터의 가열을 시작하여 2002년 1월에 히터에 대한 전원 공급을 중단한 후

Fig. 3. Yucca Mountain Drift Scale Test.

Fig. 4. Comparison of the measured and calculated temperatures at the wall of heater tunnel in the DST.

Table 2. Computer Codes applied to the Simulation of THM Coupled Behavior for Yucca Mountain DST.

Country	Computer Code	Research Team	Coupling
USA	TOUGH-FLAC [7,8]	Lawrence Berkely National Laboratory (LBNL)	THM
Spain	CODE_BRIGHT [10]	Technical Univ. of Catalonia (UPC)	THM
France	CASTEM [9]	Commissariat a l'Energie Atomique (CEA)	TM
USA	FLAC [7]	Center for Nuclear Regulatory Analyses (CNWRA)	TM

4년간 냉각시켰다. 열, 수리, 역학, 화학적 변화를 측정하기 위해 총 길이 3,300 m에 이르는 147개의 관측공이 천공되었다. 이 실험에서 얻어진 열-수리-역학적 복합거동 데이터를 예측하기 위해 4개의 연구 팀이 참가하여, 4개의 다른 수치모델을 이용하였다. 참가 기관과 사용된 전산코드는 표 2와 같다 [6].

Fig. 5. Comparison of the measured and calculated displacements in extensometer anchors in borehole 155.

Fig. 6. Comparison of the measured and calculated permeability correction factor ($F_k = k/k_i$).

DST 히터 동굴 벽에서의 시간에 따른 온도 변화의 측정치와 계산 값의 비교를 그림 4에 나타내었다 [6]. 이 그림들에서 볼 수 있는 바와 같이, LBNL 모델이 측정된 온도 데이터를 가장 잘 모사할 수 있었으며, UPC 모델의 경우에도 근사한 결과를 얻었다. CEA와 CNWRA 팀의 경우는 온도 모사를 수행하지 않아 그림 3의 비교에 포함되지 않았다. 역학적 거동을 모사하기 위해 히터 동굴 축 방향 거리의 중앙부분에 위치한 시추공에서 시간에 따른 암반 변위(displacement)의 변화를 계산하였으며, 현장실험에서 얻은 측정치와 비교하였다. 그림 5에 No. 155 extensometer 시추공에 대한 측정치 및 계산 값의 비교를 나타내었다. 이 그림에서 보면, LBNL, CEA 및 CNWRA 팀에 의한 변위 예측 값들이 전반적으로 서로 잘 일치하고 있으나, 측정치와는 차이가 있고 온도의 경우보다 일치 정도가 좋지 않았다. 수리 특성 예측에서는 히터 터널 주변 암반의 수분 분포를 직접 예측하는 대신, 특정 시추공 위치에서의 균열 투수계수 변화를 예측하는 방식을 이용하여 간접적으로 수리 특성 변화를 조사하였다. 투수계수 변화에 대한 현장 실험 데이터를 얻기 위해 약 3개월간의 시차를 두고, 공기 주입실험을 규칙적으로 수행하였다. 히터 터널에서 30.2 m 지점에서 측정치와 예측 값의 비교를 그림 6에 나타내었으며, LBNL이 예측한 값이 측정치와 비슷한 경향을 보이고 있다 [6]. CNWRA 와 UPC가 예측한 값들은 서로 일치하기는 하였으나, 측정치와는 상당한 차이가 있었다.

3.2 Grimsel Test Site FEBEX 실험을 이용한 전산코드 실증

심지층처분장 공학적방벽시스템의 열-수리-역학적 복합거동 해석 모델에 대한 검증 작업은 주로 유럽에서 수행되었다. 검증을 위해 대규모의 현장실험과 mock-up 실험들이 수행되었는데, 스페인 CIEMAT의 mock-up 실험, 스위스 GTS의 FEBEX 현장실험 및 스웨덴 Aspö HRL의 prototype repository 현장실험이 대표적이다. 이들 현장실험과 mock-up 실험에서 얻은 측정 결과를 해석하기 위해 각국에서 개발된 여러 전산코드들이 적용되었는데, 이 중 대표적인 전산코드는 Code_BRIGHT, COMPASS, INVERSE-FADES-CORE, QUASI 등이다. 이들 전산코드 중 Code_BRIGHT가 가장 우수한 것으로 의견이 모아짐에 따라 Code_BRIGHT를 사용하여 FEBEX 현장실험과 prototype repository 현장실험의 결과를 해석하였다.

FEBEX 현장실험은 스위스 GTS (Grimsel Test Site) 지하 연구시설에서 수행되었으며, 스페인의 고준위폐기물처분장 개념을 실 규모로 모사한 실험이다. 스페인의 처분장 개념은 수평동굴에 처분용기를 거치하고, 용기와 동굴 내 벽 사이의 공간에 압축 벤토나이트를 충전시키는 방식이다. 실험 장치를 설치하기 위해 2.28 m 직경의 원형 터널을 TBM을 이용하여 굴착하였으며, 터널의 길이는 70.4 m로서 마지막 17.4 m 구간을 실험구간으로 하였다. 실험구간에는 두 개의 4.3 kW 히터가 수평 동굴의 축 방향으로 일렬로 설치되었다. 히터의 길이는 각각 4.54 m, 직경은 0.90 m로서 고준위폐기물에서 발생하는 열을 모사하며, 터널의

Fig. 7. Layout of the FEBEX in-situ experimental facility.

내벽과 히터 표면 사이의 공간은 압축벤토나이트로 충전하였다. 벤토나이트로 충전을 마친 후, 시험 구간은 2.7 m 길이의 콘크리트 플러그로 밀봉하였다 (그림 7).

FEBEX 현장실험의 모양은 양질의 Central Aare 화강암이며, 실험 구간은 lamprophyre dyke에 의해 관통되고 있다. 벤토나이트는 스펙타이트의 함량이 88-96% 정도이고, 소량의 석영, calcite, feldspar 등을 함유한다. 벤토나이트 블록은 건조밀도 1.7 Mg/m³, 평균 수분함량 14.4%이었으며, 블록 사이와 블록과 암반 사이의 간극으로 인해 설치 후의 벤토나이트 완충재의 최종 밀도는 1.6 Mg/m³ 이었다. 첫 번째 운전단계는 1997년 2월에 시작하여, 2002년 2월에 끝난 가열실험 단계로써, 이 기간 중 히터의 가열 온도는 100℃를 유지하였으며, 2002년 2월에 첫 번째 히터의 전원을 중단하였다. 2002년부터 2007년까지는 두 번째 운전단계로서, 첫 번째 히터 부분을 해체하여 벤토나이트 방벽 내의 열-수리-화학적 과정에 대한 데이터를 측정하였다. 그 후 제거한 첫 번째 히터가 있던 부분의 공백 중앙에 길이 1 m의 원통형 강철 통을 삽입하고, 총 길이 3 m의 콘크리트 플러그를 설치하였다. 첫 번째 히터의 해체 기간 중에도 두 번째 히터의 가동은 계속하여, 벤토나이트와 히터 접촉 부분의 온도

를 100℃로 유지하였으며, 2단계 실험을 2003년 6월에 착수하였다 [15,16].

FEBEX 1단계 실험이 종료된 후에 실시된, 실험결과에 대한 Benchmark 모델링의 비교에는 표 3과 같이 6개국에서 10개 팀이 참여하였다 [17]. 각 팀들이 공학적방벽시스템에서의 열-수리-역학적 거동을 모델링 결과, 일부 전산코드에 의한 계산 결과가 FEBEX 실험에서 얻은 측정치와 유사한 경향을 보이기도 하였으나, 상당수의 전산코드 예측 값이 측정치와는 전혀 다른 경향을 보였다. 구체적으로 열-수리-역학적 특성 중, 온도 분포의 경우에는 대부분의 전산코드가 실험에서 얻은 측정치를 용인할 수 있는 범위에서 예측할 수 있었다. 응력의 변화는 공학적방벽시스템과 근계암

Table 3. Modelling Research Team for FEBEX In-situ Experiment.

Funding Organisation	Modelling Team/Coordinator
National Radioactive Waste Management Agency (ANDRA)	- Laboratory "Sols, Solides, Structures" Grenoble. - Ecole Polytechnique
National Radioactive Waste Management Agency (ANDRA)	- Laboratoire Environnement, Ge"lome"Lcanique et Ouvrages. Ecole des Mines de Nancy
Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR)	- Federal Institute for Geosciences and Natural Resources
Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC)	- Canadian Nuclear Safety Commission - McGill University
U.S. Department of Energy (DOE)	- Sandia National Laboratories
Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety (IRSN)	- Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety - Ecole des Mines de Paris
Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC)	- Hazama Corporation - Kyoto University - Japan Nuclear Cycle Development Institute JNC
Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co(SKB)	- Clay Technology AB - FEM-Tech AB
Swedish Nuclear Power Inspectorate (SKI)	- Lawrence Berkeley National Laboratory
Radiation and Nuclear Safety Authority of Finland (STUK)	- Helsinki University of Technology
Empresa Nacional de Residuos Radiactivos SA (ENRESA)	- Technical University of Catalonia (Coordinator)

Fig. 8. Comparison of the measured and calculated temperatures at the upper region of heater #1 in the FEBEX.

Fig. 9. Comparison of the measured and calculated relative humidity at the upper region of heater #1 in the FEBEX.

반의 접촉 지점에서 측정치와 예측치의 비교한 결과, SKB 전산코드가 시간이 경과함에 따라 예측된 응력의 증가 속도가 측정치보다 느리게 나타나는 문제점이 있긴 하였지만 전체적으로 가장 양호한 예측 결과를 보여주었다. SKB 이외의 다른 기관들이 사용한 전산코드들은 응력을 실제 측정치보다 낮게 예측하였으며, 그 경향은 시간이 경과할수록 현저하였다.

FEBEX 실험 결과에 대한 Benchmark 모델링 공동연구가 현장실험에서 얻은 측정 결과를 만족스럽게 모사하는데 실패했기 때문에, 전산모델을 개선하기 위한 연구가 계속되었다. FEBEX 실증실험을 주관한 스페인을 중심으로 Code_BRIGHT [10]를 사용한 공학적방벽 내의 열-수리-역학적 거동을 모사하기 위한 연구가 수행되어, 총 5년간 1827일 동안 수행된 FEBEX 실증실험에서 얻은 측정 결과를 Code_BRIGHT를 이용하여 계산된 결과들을 비교하였다 [15].

그림 8은 FEBEX 실험 장치의 히터 전면 상단부의 여러 반경방향 거리에서 얻은 시간에 따른 온도 변화 측정치와 Code-BRIGHT에 의해 계산 값과의 비교를 보여 준다. 초기에는 공학적방벽시스템 전체에 걸쳐 온도가 급히 상승하며, 일반적으로 계산 값들이 실험에서 측정된 온도 분포를 잘 모사하고 있다. 수리특성의 해석은 온도의 경우보다 조금 더 복잡하다. 그림 9는 히터 상부에서 두 구역 즉, 하나는 히터에서 떨어져 온도가 낮은 구역과 다른 하나는 히터에서 가까운 온도가 높은 구역에서 측정된 상대습도의 시간에 따른 변화를 보여 준다. 실제 실험에서 측정되는 인자는 상대습도이며, 이 상대습도와 수분 흡입력(total suction) 사이의 관계는 Kelvin 방정식에 의해 나타낼 수 있다. 온도

Fig. 10. Comparison of the measured and calculated total pressures at the upper region of heater #1 in the FEBEX.

가 낮은 구역은 모암으로부터 유입되는 지하수에 의해 상대습도가 계속 증가 경향을 나타내나, 온도가 높은 구역에서는 위치에 따라 경향이 달라, 암반과 히터의 중간 정도의 지점에서는 상대습도가 지속적으로 증가하나, 히터에 접한 지점에서는 보다 복잡한 거동을 나타낸다. 즉 초기에는 건조현상이 일어나 상대습도가 급격히 감소하다가 시간이 경과함에 따라 다시 서서히 증가한다. 전산코드에 의한 상대습도 변화의 계산 값은 온도가 낮은 구역과 암반과 히터의 중간 지점에서는 측정치와 상당히 잘 일치하였으나, 히터에 가까운 지점에서는 예측 값과 측정치 간에 상당한 차이를 보이고 있다. 따라서 Code-BRIGHT는 공학적방벽시스템의 수리특성 변화를 제한적인 정확도 내에서 모사한다고 말할 수 있다. 공학적방벽시스템의 역학적 특성을 예측하는 일은 보다 복잡하다. FEBEX 현장실험의 두 지점 즉 히터 상단부에서 히터에 가까운 지점과 주위 암반에 인접한 지점에서 측정된 시간에 따른 전 압력 (total pressure)의 변화를 그림 10에 나타내었으며, Code-BRIGHT에 의해 계산된 전 압력들도 비교를 위해 함께 나타내었다. 공학적방벽시스템 내의 전 압력은 암반으로부터 지하수가 유입됨에 따라, 각 지점에서 모두 시간이 경과함에 따라 증가하였다. 전산코드에 의해 계산된 전 압력도 동일한 경향을 보이지만, 측정치와는 상당한 차이가 있으며, 이러한 차이는 두 지점에서 동일하게 관측된다. 따라서 Code-BRIGHT로는 공학적방벽시스템의 역학적 특성 변화를 해석할 수 없으며, 신뢰성 있는 해석을 위해서는 전산코드의 모델링에 대한 상당한 보완이 필요하다.

3.3 Aspö HRL Prototype Repository 실험을 이용한 전산코드 실증

스웨덴의 SKB에서는 Aspö HRL(Hard Rock Laboratory) 내에 스웨덴의 사용후핵연료 심지층처분개념인 KBS-3를 실 규모로 실증하기 위한 현장실험시설인 "Prototype Repository"를 건설하였다. Prototype Repository는 지하 460

Fig. 11. Layout of the Prototype repository.

m에 위치한 화강암반에 건설되었으며, 암반의 손상을 최소화하기 위해 굴착에 TBM 공법을 사용하였다. Prototype Repository는 직경이 5 m, 길이 63 m의 터널로서 터널 바닥에 직경 1.75 m, 길이 8.3 m인 수직 처분공 (deposition hole)이 6개 굴착되어 있다 [18]. Prototype Repository는 두 구역으로 나누어져 있는데, 안쪽의 길이 40 m 구역 (section I)에는 4개의 처분공이 있고, 길이 23 m의 바깥 쪽 구역 (section II)에는 2개의 처분공이 굴착되어 있다. 두 구역은 견고한 콘크리트 플러그에 의해 서로 분리되어 있으며, 바깥 쪽 구역도 콘크리트 플러그에 의해 HRL의 나머지 구역과 격리되어 있다 (그림 11). 히터를 장착한 원통형 처분용기는 직경이 1.05 m, 높이 4.83 m로서, 처분공 내에 정치

시킨 후, 높이 0.5 m, 외경 1.65 m인 링 모양의 압축벤토나이트 블록으로 둘러쌌다. 사용된 벤토나이트는 MX-80이었으며, 벤토나이트 블록의 초기 밀도는 1.78 Mg/m^3 이었다. 설치 시 여유를 위해 처분용기와 벤토나이트 블록 사이에 1 cm 정도의 틈을 두며, 암반과 벤토나이트 블록 사이의 틈(gap)에는 겔보기 밀도가 $1.97 - 2.11 \text{ Mg/m}^3$ 인 벤토나이트 펠렛을 채웠다. 완충재의 최종 밀도는 포화 조건에서 $2.02 - 2.04 \text{ Mg/m}^3$ 이다. 공학적방법의 열-수리-역학적 거동에 관한 정보를 얻기 위한 가열실험은 2001년 9월에 착수되었으며, 2004년에 종료되었다 [18].

Prototype Repository의 열-수리-역학적 거동 실증실험 결과에 대한 모델링이 몇몇 팀에 의해 이루어졌다 [19].

Fig. 12. Comparison of the temperatures measured in the prototype repository and the ones calculated by Code_Bright.

Fig. 13. Comparison of the degree of saturation measured in the prototype repository and the ones calculated by Code_Bright.

Fig. 14. Comparison of the total pressures measured in the prototype repository and the ones calculated by Code_Bright.

Fig. 15. Comparison of the temperatures and degree of saturation measured in the prototype repository and the ones calculated by COMPASS (Borehole No. 1).

Gens 등 [20]은 Code_BRIGHT에 의한 Prototype Repository의 모델링 결과를 보고하였다. Code_BRIGHT에 의해 계산된 완충재에서의 시간 경과에 따른 온도, 포화도 (degree of saturation) 및 전 압력 (total pressure)의 변화를 그림 12에서 그림 14에 나타내었으며, 현장실험을 통해 얻은 온도, 포화도 및 전 압력의 측정치도 비교를 위해 함께 나타내었다. 그림 12는 시추공 No. 1의 중간 면에 위치한 완충재 여러 지점의 온도 변화를 나타내고 있으며, 전산코드에 의한 계산치가 실험에서 얻은 측정치와 상당히 잘 일치하고 있다. 그림 13은 시추공 No. 1의 중간 면에서의 완충재 포화도의 변화를 나타낸다. 전산코드에 의한 계산 결과에 따르면, 암반에 접촉한 부분의 벤토나이트는 2년 후에는 거의 포화 상태에 도달하는 것으로 나타났다. 암반에 가까운 지점에서는 전산코드에 의한 계산된 완충재의 포화도가 실험에서 얻은 측정치와 잘 일치하고 있으나, 히터에 가까운 지점과 중간 지점에서는 계산 값과 측정치가 상당한 차이를 보이고 있다. 그림 14는 동일 지점들에 대해 전 압력의 측정치와 전산코드에 의한 계산 값의 비교를 나타낸 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이, 전 압력의 경우 계산 값과 측정치가 서로 큰 차이를 보이고 있으며, 시간에 따른 증가 패턴도 다르다. 이 결과로부터 현재로는 공학적 방벽시스템에서 전 압력을 예측하는 것은 상당히 어려운 문제로서, 적용 모델의 대폭적인 개선이 필요하다는 것을 알 수 있다. 더구나 이러한 계산 결과들은 현장실험 결과를 이용하여 전산모델의 입력인자 값을 보정한 후에 얻은 것이므로, 보정이 없는 상태의 일차 모델링에 의해 공학적 방벽시스템의 열-수리-역학적 거동을 예측하는 것은 아직 어렵다고 할 수 있다 [20].

Fig. 16. Comparison of the total pressures measured in the prototype repository and the ones calculated by COMPASS (Borehole No. 1).

Cleall 등 [21]은 COMPASS 코드 [22,23]를 이용하여, Prototype Repository의 현장실험 결과를 모사하였다. 시추공 No. 1에 설치된 처분용기의 중간 높이에서 반경 방향의 세 지점에 대해, 660일 까지 가열 시간에 따른 온도와 포화도를 계산하여 그 결과를 그림 15에 나타내었으며, 비교를 위해 현장실험에 측정된 온도 및 포화도 변화 데이터도 함께 나타내었다. 이 그림들에서 볼 수 있는 바와 같이, COMPASS 코드는 공학적 방벽시스템의 온도 분포를 상당히 정확히 모사할 수 있다. 포화도의 경우에는 완충재 내에서 일어나는 초기 건조 현상을 과대평가하는 경향을 보였으나, 이러한 현상은 시간이 경과함에 따라 개선

Fig. 17. Comparison of the time-dependent temperatures measured in the prototype repository and the ones calculated by Code_BRIGHT (Borehole No. 3).

Fig. 18. Comparison of the time-dependent degree of saturation measured in the prototype repository and the ones calculated by Code_BRIGHT (Borehole No. 5).

되어, 100 일이 경과한 후에는 계산 값이 측정치에 접근해 갔으며, 400일 후에는 계산 값과 측정치 모두 완충재가 완전히 포화되는 것으로 나타났다. 그림 16은 시추공 No. 1의 완충재 내의 네 지점에서 시간 경과에 따른 전 압력의 변화를 계산한 결과를 나타낸 것으로서, 비교를 위해 현장 실험에서 측정된 압력 변화도 함께 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이, 완충재 내의 전 압력은 계산 값과 측정치 사이에 명백한 차이가 있었으며, 그 차이는 벤토나이트와 암반이 접촉하는 지점에서 특히 현저하게 나타났다. 이러한 모사 결과를 종합하면, COMPASS 코드는 공학적방벽시스템의 열-수리-역학적 거동 중, 온도는 상당히 정확하게 예측할 수 있으나, 포화도의 경우는 초기 건조현상 모사 부분에 대한 보완이 필요하며, 역학적 거동 모사를 위해서는 모델에 대한 근본적인 수정이 이루어져야 한다고 할 수 있다. 이러한 평가는 앞에서 기술한 Code_BRIGHT에 의한 FEBEX 현장실험 결과 및 Prototype Repository 현장실험 데이터 모사에서 나타났던 문제점과 성격이 유사하다.

Chen 과 Ledesma [24]는 Code_BRIGHT에 사용되는 물성 입력인자를 실험실 실험과 부지 조사를 통해 주의 깊게 결정한 후, 수정된 입력인자들을 적용하여 Prototype Repository 현장실험 결과를 재해석하였다. 온도의 예측에는 3차원 열-수리적 모델이 사용되었으며, 상대습도와 응력을 계산하는 데는 2차원 열-수리-역학적 모델이 사용되었다.

시추공 No. 3의 중간 높이에서 반경 방향 0.585 m 지점의 시간에 따른 온도 분포 계산 값과 측정치의 비교를

Fig. 19. Comparison of the time-dependent total pressure measured in the prototype repository and the ones calculated by Code_BRIGHT (Borehole No. 5).

그림 17에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, 3차원 열-수리 모델이 가장 측정치를 잘 모사하고 있으며, 2차원 열-수리 모델은 3차원 모델에 비해 약 10℃ 낮은 예측치를 보여 준다. 그러므로 Prototype Repository에서 각 처분공이 6 m 거리를 두고 배치되어 있지만, 온도 예측의 정확성을 높이기 위해서는 각 처분용기 사이의 열적 상호작용을 고려한 3차원 모델이 필요하다는 것을 알 수 있다. 시추공 No. 5의 중간 높이에서 반경방향으로 0.585 m 지점에서의 시간 경과에 따른 상대 습도 변화의 계산 값과 측정치의 비교를 그림 18에 나타내었다. 이 그림에서 3차원 열-수리 모델과 2차원 열-수리 모델에 의한 상대습도 예측치는 매우 유사하였으며, 이로부터 인접 처분공 사이의 수리적 상호 작용은 무시할 수 있다는 것을 알 수 있다. 현 상태에서 명확한 결론을 내리기는 어렵지만, 전체적으로 2차원 열-수리-역학적 모델링이 완충재 내의 상대습도 변화에 보다 나은 결과를 보여 주었다. 시추공 No. 5의 중간 높이에서 반경방향 거리가 다른 세 지점에서의 전 응력 (total stress)의 계산 결과와 측정치의 비교를 그림 19에 나타내었다. 모델링에는 2차원 열-수리-역학적 모델이 사용되었으며, 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, 시간에 따른 전 응력의 변화에 대한 예측 값과 측정치의 차이가 심하고, 변화 패턴도 다르다. 따라서 Chen 과 Ledesma [24]에 의해 제안된 모델도 공학적방벽시스템 내의 온도는 측정치와 근사하게 예측할 수 있고, 상대습도의 예측도 어느 정도 측정치와 일치하는데 반해 전 압력의 예측은 측정치 사이에 상당한 오차를 보인다고 할 수 있다. 이러한 경향은 앞에서 기술한 다른 모델의 경우와 유사하며, 여전히 개선되지 않고 있다.

이상의 비교, 분석 결과에서 볼 수 있는 바와 같이, 특히 완충재의 전압력의 경우, 전산모델에 의한 해석 결과와 현장 실험으로부터 얻은 측정치 사이에 큰 차이를 보이고 있다. 이러한 차이가 생기는 주원인은 기존의 열-수리-역학적 복합거동해석 모델이 완충재의 팽윤압을 적절히 고려하지 못하기 때문으로 생각된다. 현재까지 개발된 기존 모델들에서는 전압력을 모사할 때, 몸체 힘 (body force), 탄성, 열 팽창에 의한 응력 및 변형, 다공성 매질의 모세관 압력 등을 고려할 뿐 벤토나이트의 팽윤압을 지배방정식 내에 포함시키지 못하고 있다. 그러나 포화 벤토나이트 내에서 발생하는 전압력을 지배하는 주요 인자는 팽윤압 (swelling pressure)이므로, 팽윤압이 고려되지 않은 모델에 의한 계산결과는 현장 측정치와 차이가 클 수밖에 없다. 따라서 평형방정식에 매질의 팽윤압을 포함시키기 위한 연구가 수행되어야 할 것이다.

4. 결 론

고준위폐기물처분장 공학적방벽시스템 내에서 일어나는 열-수리-역학적 복합과정을 예측하기 위해 세계 각국에서 다양한 전산 코드들이 개발되어 왔다. 이러한 전산 코드들의 신뢰성을 검증하기 위해, 이들 코드를 이용하여 계산된 결과를 현장실증실험에서 얻은 관측 데이터와 비교하기 위한 국제공동연구가 다수 수행되어 왔다. 현재까지 제안된 전산코드들은 미국의 Yucca Mountain 처분장과 같이 완충재가 없는 처분 개념에서는 붕괴열에 따른 암반의 열-수리-역학적 거동을 비교적 잘 모사할 수 있으나, 대다수의 국가가 채택하고 있는 포화 경암층에 위치하고 완충재가 존재하는 처분장에 대해서는 공학적방벽시스템 내에서 일어나는 열-수리-역학적 거동을 만족스럽게 예측하는 데 실패했다. 구체적인 특성별로 보면, 제안된 전산코드들은 완충재 내의 온도 분포는 실험 측정치를 비교적 잘 예측할 수 있으나, 전 압력의 경우는 예측된 시간에 따른 전개 패턴이 측정 결과와 다르며, 예측 값도 측정치와 큰 차이를 보이고 있다. 수분함량 분포의 예측은 온도의 예측과 전 압력 예측의 중간 정도의 정확도를 보이고 있다.

따라서 현재 제안된 열-수리-역학적 복합거동 해석모델을 실제 처분장의 공학적방벽시스템의 거동 해석에 적용하기 위해서는 수분함량 분포와 전 압력 분포를 보다 정확하게 모사할 수 있도록 모델의 개선이 필요하다. 특히 전 압력의 전개 과정을 예측하는 모델의 경우에는 근본적인 수정이 요구된다.

감사의 글

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국연구재단의 원자력기술개발사업으로 지원받았습니다.

REFERENCES

- [1] H.J. Choi, J.Y. Lee, D.G. Cho, S.K. Kim, S.S. Kim, K.Y. Kim, J.T. Jeong, M.S. Lee, J.W. Choi, J.W. Lee, K.S. Chun, P.O. Kim, Korean reference HLW disposal system, Korea Atomic Energy Research Institute Report, KAERI/TR-3563/2008 (2008).
- [2] J. Rutqvist, D. Barr, J.T. Birkholzer, M. Chijimatsu, O. Kolditz, Q. Liu, Y. Oda, W. Wang, and C. Zhang, "Results from an international study on coupled thermal, hydrological, and mechanical processes near geological nuclear waste repository", Nuclear Technology, 163, pp. 101-109 (2008).
- [3] A.P.S. Selvadurai and T.S. Nguyen, "Scoping analyses of the coupled thermal-hydrological-mechanical behaviour of the rock mass around a nuclear fuel waste repository", Engineering Geology, 47, pp. 370-400 (1996).
- [4] S. Kwon, W.J. Cho, and J.W. Choi, "Status of the international cooperation project, DECOVALEX for the THM coupling analysis", J. of the Korean Radioactive Waste Society, 5, pp. 323-338 (2007).
- [5] J. Rutqvist, D. Barr, J. T. Birkholzer, K. Fujisaki, O. Kolditz, Q. Liu, T. Fujita, W. Wang, and C. Zhang, "A comparative simulation study of coupled THM processes and their effect on fractured rock permeability around nuclear waste repositories", Environ. Geol., 57, pp. 1347-1360 (2009).
- [6] J. Rutqvist, D. Barr, J.R. Datta, A. Gens, A. Mil-lard, S. Olivella, C. Tsang, and Y. Tsang, "Coupled thermal-hydrological-mechanical analyses of the Yucca Mountain Drift Scale Test - Comparison of field measurements to prediction of four different numerical models", Int. J. of Rock Mech. Min. Sci., 42, pp. 680-697 (2005).
- [7] Itasca Consulting Group, FLAC-Fast Lagrangian analysis of continua, version 4.0 (2000).
- [8] K. Pruess, C. Oldenburg, and G. Moridis. TOUGH2 user's guide, version 2.0, Lawrence Berkeley National Laboratory Report, LBNL-43134 (1999).
- [9] CEA, CASTEM, An objective oriented finite element method framework (2000).
- [10] S. Olivella, A. Gens, J. Carrera, and E.E. Alonso, "Numerical formulation for a simulator 'CODE_BRIGHT' for the coupled analysis of saline media", Engineering Comput., 13, pp. 87-112 (1996).
- [11] J. Rutqvist, L. Borgesson, M. Chijimatsu, A. Kobayashi, T.S. Nguyen, L. Jing, J. Noorishad, and C.F. Tsang, "Thermohydromechanics of partially saturated geological media - Governing equation and formulation of four finite element models", Int. J. of Rock Mech. Min. Sci., 38, pp. 105-127 (2001).

- [12] O. Kolditz, S. Bauer, M. Beinhorn, J. Dejonge, K. Kalbacher, C. McDermont, W. Wang, M. Xie, R. Kaiser, and M. Kohlmeier, ROCKFLOW - Theory and user manual, release 3.9, Groundwater Group, Center for Applied Geoscience, University of Tübingen, and Institute of Fluid Mechanics, University of Hannover (2003).
- [13] Q. Liu, C. Zang, and X. Liu, "Practical method for coupled THM simulations of the Yacca Mountain and FEBEX case samples for Task D of the DECOVALEX-THMC Project", Proc. GEOPROC 2006 Int. Symp.; 2nd Int. Conf. Coupled Thermo-Hydro-Mechanical- Chemical Processes in Geosystems and Engineering, pp. 220-225, HoHai University, Nanjing, China (2006).
- [14] Y. Ohnishi and A. Kobayashi, "THAMES, coupled thermo-hydro-mechanical processes of fractured media", Developments in geotechnical engineering, O. Stephansson, L. Jing, and C.-F. Tsang, eds., pp. 545-549, Elsevier, New York (1996).
- [15] A. Gens, M. Sánchez, L. DON. Guimarães, E.E. Alonso, A. Lloret, S. Olivella, M.V. Villar and F. Huertas, "A full-scale in situ heating test for high-level nuclear waste disposal: observation, analysis and interpretation", Géotechnique, 59, pp. 377-399 (2009).
- [16] A.M. Fernández, A. Muurinen, E. Montarges-Pelletier, N. Jockwer, and P. Rivas, "Geochemical processes in the FEBEX bentonite after a heating and hydration in situ test in the Grimsel URL ", Clays in natural & engineered barriers for radioactive waste confinement, 4th Int. meeting, pp. 727-728, Nantes, France (2010).
- [17] E.E. Alonso, J. Alcoverro, F. Coste, L. Malinsky, V. Merrien-Soukatchoff, I. Kadiri, T. Nowak, H. Shao, T.S. Nguyen, A.P.S. Selvadurai, G. Armand, S.R. Sobolik, M. Itamura, C.M. Stone, S.W. Webb, A. Rejeb, M. Tijani, Z. Maouche, A. Kobayashi, H. Kurikami, A. Ito, Y. Sugita, M Chijimatsu, L. Börgesson, J. Hernelind, J. Rutqvist, C.-F. Tsang, and P. Jussila, "The FEBEX benchmark test : case definition and comparison of modelling approaches", Int. Journal of Rock Mech. Min. Sci., 42, pp. 611-638 (2005).
- [18] C. Andersson, I. Bárcena, N. Bono, L. Boergesson, P. Cleall, T. Forsmark, D. Gunnarsson, L.-E. Johannesson, A. Ledesma, L. Liedtke, A. Luukkonen, K. Pedersen, I. Puigdomenech, R. Pusch, I. Rhén, T. Rothfuchs, T. Sandén, J.-L. Sineriz, Y. Sugita1, C. Svemar, H. Thomas. Full-scale testing of the KBS-3V concept for the geological disposal of high-level radioactive waste, Prototype Repository, Final report, EUR 21924 (2005).
- [19] R. Pusch. Comparison of results from THMCB modelling of buffer, backfill and rock with measured data from Prototype Repository, International Project Report, IPR-04-11 (2004).
- [20] A. Gens, A. Ledesma, P. Pusch, and L. Borgesson, "THMC Processes in engineered barriers : The experience from Febex and Prototype Projects", Euradwaste'04 Conference, Luxembourg (2004).
- [21] P.J. Cleall, T.A. Melhuish, and H.R. Thomas, "Modelling in the three-dimensional behaviour of a prototype nuclear waste repository", Engineering Geology, 85, pp. 212-220 (2006).
- [22] H.R. Thomas and Y. He, "Modelling the behaviour of unsaturated soil using an elastic constitutive relationship", Geotechnique, 48, pp. 589-603 (1998)
- [23] H.R. Thomas and P.J. Cleall, "Inclusion of extensive clay behavior in coupled thermo hydraulic mechanical models", Engineering Geology, 54, pp. 93-108 (1999).
- [24] G.J. Chen and A. Ledesma, "Coupled thermo-hydromechanical modelling of the full-scale in situ test Prototype Repository", J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135, pp. 121-132 (2009).
- [25] J. Rutqvist and C.F. Chang, "Analysis of thermal-hydrologic-mechanical behavior near as emplacement drift at Yacca Mountain", J. Containment Hydrol., 62-63, pp. 637-652 (2003).
- [26] T.S. Nguyen, L. Börgesson, M. Chijimatsu, J. Rutqvist, T. Fujita, J. Hernelind, A. kobayashi, Y. Onishi, M. Tanaka, and L. Jing, "Hydro-mechanical response of a fractured rock mass to excavation of a test pit - the Kamaishi mine experiment in Japan", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 38, pp. 78-94 (2001).
- [27] J. Rutqvist, M. Chijimatsu, L. Jing, J. de Jonge,

- M. Kohlmeier, A. Millard, T.S. Nguyen, A. Rejeb, M. Souley, Y. Sugita, and C.F. Tsang, "Numerical study of the THM effects on the near-field safety of a hypothetical nuclear waste repository - BMT1 of the DECOVALEX III project. Part 3: Effects of THM coupling in fractured rock", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 42, pp. 745-755 (2005).
- [28] M. Chijimatsu, T.S. Nguyen, L. Jing, J. de Jonge, M. Kohlmeier, A. Millard, A. Rejeb, J. Rutqvist, M. Souley, and Y. Sugita, "Numerical study of the THM effects on the near-field safety of a hypothetical nuclear waste repository - BMT1 of the DECOVALEX III project. Part 1: Conceptualization and characterization of the problems and summary of the results", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 42, pp. 720-730 (2005).