TUNNEL & UNDERGROUND SPACE Vol.32, No.6, 2022, pp.518-529
https://doi.org/10.7474/TUS.2022.32.6.518 ISSN: 1225-1275(Print) ISSN: 2287-1748(Online)

ORIGINAL ARTICLE

Mont Terri FE 실험 대상 열-수리-역학 복합거동 수치해석: DECOVALEX-2023 Task C 내 Step 1 수치해석 연구

김태현[1], 박찬희[3*], 이창수[2], 김진섭[2]

[1]한국원자력연구원 선임연구원, [2]한국원자력연구원 책임연구원, [3]한국지질자원연구원 책임연구원

A Thermo-Hydro-Mechanical Coupled Numerical Simulation on the FE Experiment: Step 1 Simulation in Task C of DECOVALEX-2023

Taehyun Kim[1], Chan-Hee Park[3*], Changsoo Lee[2], and Jin-Seop Kim[2]

[1]Senior Researcher, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI)
[2]Principal Researcher, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI)
[3]Principal Researcher, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)

***Corresponding author:** chanhee.park@kigam.re.kr

Received: December 9, 2022
Revised: December 12, 2022
Accepted: December 13, 2022

ABSTRACT

In Task C of the DECOVALEX-2023 project, nine institutes from six nations are developing their numerical codes to simulate thermo-hydro-mechanical coupled behavior for the FE experiment performed at Mont Terri underground rock laboratory, Switzerland. Currently, Step 1 for comparing the simulation results to field data is the ongoing stage, and we used the OGS-FLAC simulator for a series of numerical simulations. As a result, temperature increase depending on the heating hysteresis was well simulated, and saturation variation in the bentonite depending on phase change was observed. However, due to the suction overestimation, relative humidity and temperature change in the bentonite and the pressure variation in the Opalinus clay showed a difference compared to the field data. From the observation, it is confirmed that the effect of the bentonite capillary pressure is dominant to the flow analysis in the disposal system. We further plan to draw improved results considering tunnel support material and accurate initial water pressure distribution. Additionally, the thermal, hydrological, and mechanical anisotropy of the Opalinus clay was well simulated. From the simulation results, we confirmed the applicability of the OGS-FLAC simulator in the disposal system analysis.

Keywords: DECOVALEX-2023 Task C, OGS-FLAC, Multi-phase flow, Thermo-Hydro-Mechanical coupled behavior

초록

DECOVALEX-2023 Task C에서는 6개국 9개 참여 기관들이 스위스 Mont Terri 지하처분연구시설에서 수행된 FE 실험을 대상으로 열-수리-역학 복합거동 모사를 위한 해석코드 개발을 수행하고 있다. 현재 현장시험 결과와 비교 분석을 위한 Step 1이 진행되고 있으며, 본 연구진은 OGS-FLAC 해석 시뮬레이터를 활용하여 일련의 해석을 진행하였다. 해석 결과 히터 가열에 따른 온도 상승이 잘 구현되었고, 상변화에 따른 완충재 내 포화도 변화를 관측할 수 있었다. 반면 완충재 흡입력의 과대평가로 완충재 내 상

© The Korean Society for Rock Mechanics and Rock Engineering 2022. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/ licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

대습도, 온도 변화 및 Opalinus 점토암 내 압력 변화가 현장 결과와 다소간 차이를 나타내는 것을 확인하였다. 이를 통해 완충재 흡입력이 처분시스템 해석 시 유동 해석 결과에 지배적인 영향을 미침을 확인할 수 있었으며, 향후 지보재 및 초기 수압 모사 개선을 통해 향상된 결과를 도출하고자 한다. 또한, Opalinus 점토암의 열, 수리, 역학적 이방성이 잘 구현되었으며 해석 결과를 통해 OGS-FLAC 시뮬레이터의 처분시스템 해석 적용성을 확인하였다.

핵심어: DECOVALEX-2023 Task C, OGS-FLAC, 다상유동, 열-수리-역학 복합거동

1. 서 론

고준위방사성 폐기물은 원자력 발전 과정에서 발생하는 고독성 폐기물을 통칭하며, 수십만 년에 달하는 긴 반감기를 고려하여 장시간 동안 인류 생활권으로부터 격리할 필요가 있다. 따라서 지하 수백 미터 이상 깊이에 폐기물을 처분하는 지층 처분(geological disposal) 방식이 가장 일반적인 처분 개념으로 받아들여지고 있다. 지층 처분 시 폐기물로부터 발생할 수 있는 핵종의 이동을 막기 위한 처분 시스템이 적용되며, 처분 시스템은 고준위방사성폐기물을 보관하는 처분 용기, 처분 용기와 주변 암반 사이에 위치하게 되는 완충재, 처분 터널 근계 암반으로 구성되는 공학적방벽(engineered barrier)과 처분 터널이 위치하는 암반을 명칭하는 천연방벽(natural barrier)으로 크게 나누어 볼 수 있다. 이 중 공학적방벽의 완충재로는 팽윤 특성을 지니고 있는 벤토나이트가 쓰이고 있으며, 처분 시 벤토나이트 내부에서는 처분용기에서 발생하는 고온의 열 및 근계암반으로부터 유입되는 지하수의 상호작용으로 인해 포화도가 변화하게 되고, 이로 인해 포화도에 따른 투수특성이 변하게 되며 유체 상변화로 인한 다상 유동이 함께 발생하게 된다. 또한, 고온의 열 전달 시 암반 내 지하수 팽창으로 인해 유체 압력 변화가 발생하며 심도에 따른 암반 내 지중 응력, 처분 시설 굴착에 따른 현지응력 교란 등의 역학적 요인이 함께 작용하여 유효 응력 변화로 인한 암반의 투수 특성이 변화할 수 있다. 상기한 바와 같이 고준위방사성폐기물의 지층 처분 시 열, 수리, 역학적인 요소가 복잡하게 상호작용하여 처분시스템에 영향을 미칠 수 있으며, 이는 처분시스템의 안정성과도 직접적으로 관련된다. 따라서 처분 시 발생할 수 있는 열-수리-역학 복합 거동 특성 연구를 위한 실험 및 수치해석 관련 연구가 다양하게 수행되어 왔으며(ENRESA, 2000, Rutqvist et al., 2001, Alonso et al. 2005, Beaucaire et al., 2012, Lee et al., 2020a), 규모를 고려하여 다양한 국제공동연구가 수행되고 있다. 이 중 DECOVALEX (DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments) 프로젝트는 복합거동 모사를 위한 해석 기법 및 수치 모델 개발을 목표로 하여 4년 주기로 수행되고 있는 국제공동연구로서 현재 8회차인 DECOVALEX-2023이 진행되고 있다(Kwon et al., 2007, Birkholzer et al., 2019, Lee et al., 2020b, Kim et al., 2021a).

DECOVALEX-2023에서는 총 7개의 Task가 진행되고 있으며(Kim et al., 2021a, Kim et al., 2021b), 이 중 Task C에서는 스위스 Mont Terri 지하처분 연구시설에서 수행된 실규모 히터 정치 시험인 FE (Full-scale Emplacement) 실험을 대상으로 하고 있다(Nagra, 2019). FE 실험에서는 Fig. 1과 같이 길이 4.6 m, 직경 1.05 m의 히터 3개를 수평으로 설치하고, 주변을 벤토나이트 블록 및 과립형 벤토나이트로 채운 후 2015년부터 가열을 시작하여 완충재 및 암반에서의 열, 수리, 역학적 변수들에 대한 계측을 진행하고 있다(Nagra, 2019, Kim et al., 2021b).

Task C에서는 FE 실험 터널 내 완충재 및 암반 내 열, 수리, 역학적 특성 변화를 모델링 하고 있으며, 벤치마크 모델 해석, 3차원 실규모 대상 예측(blind) 해석, 현장 데이터 기반 교정(calibration) 해석, 환기 과정을 포함한 3차원 실규모 해석 등 4단계로 나뉘어 연구가 진행되고 있다. 국내에서는 한국원자력연구원 및 한국지질자원연구원이 공동연구기관으로 참여하여 연구를 진행하고 있으

며, Kim et al.(2021b)이 Task C 및 벤치마크 모델 해석과 관련된 연구 결과를 소개한 바 있다. 본 논문은 그에 대한 후속 논문으로서 현재 진행 중인 3차원 실규모 해석 및 일부 현장 계측자료와의 비교 분석 결과를 소개하고자 한다.

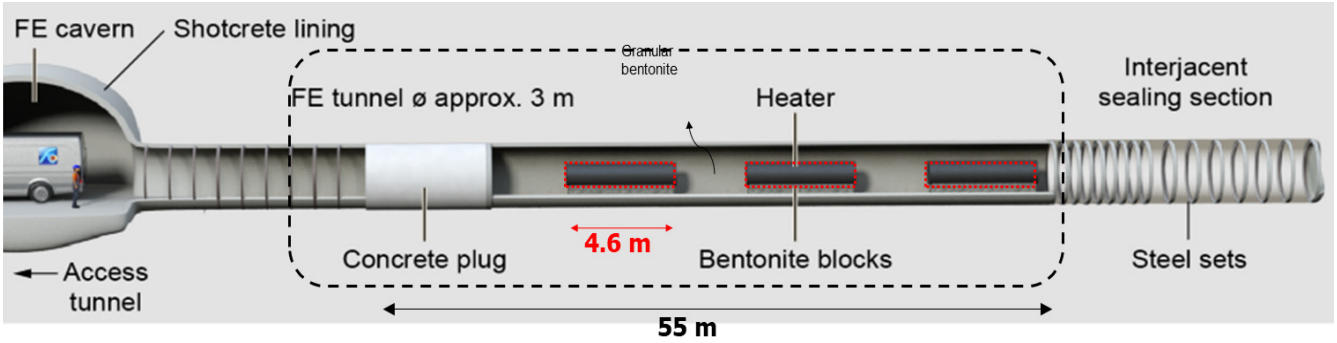


Fig. 1. A cross-section view of FE experiment tunnel at Mont Terri URL (modified from Graupner and Thatcher, 2020)

2. OGS-FLAC 해석 시뮬레이터

본 연구에서는 열-수리-역학 복합거동 해석을 위해 열-수리 해석을 위한 오픈소스 해석 프로그램인 OpenGeoSys ver. 5.8 (Kolditz et al., 2012)와 역학 해석을 위한 Itasca 사의 FLAC3D ver. 7.0(Itasca, 2013)을 파일 기반 순차적 연동해석 방식(file-based sequential coupling method)으로 결합한 OGS-FLAC을 활용하였다. OGS-FLAC은 Park et al.(2019)에 의해 처음 소개되었고, Park et al.(2020)은 OGS-FLAC과 오픈소스 기반의 다양한 전처리 및 후처리 프로그램들을 연동한 해석 플랫폼 구축 과정에 대해 소개한 바 있다. 이후 Kim et al.(2021c)은 DECOVALEX-2023의 Task C와 관련된 연구를 통해 다상유체 거동 시 열-수리-역학 복합거동 해석 분야에서의 적용성에 대해 보고한 바 있다. 또한 Park and Park(2022)은 매질의 변형 성분을 소스/싱크(source/sink)로 활용하여 해석해가 주어진 단상유체 기반 열-수리-역학 복합거동 벤치마크 문제를 검증한 바 있다. 이와 같이 OGS-FLAC은 열-수리-역학 해석 관련 문제들에 대해 적용성을 검증한 바 있으며, 기본적으로 오픈소스 프로그램인 OpenGeoSys를 주(master)로 기반하고 있기 때문에 사용자의 필요에 따라 연동해석 방식, 활용 플랫폼 등의 수정이 자유롭다는 장점을 지니고 있다. 본 연구에서 대상으로 하고 있는 FE 실험의 경우 실규모로 수행된 실험이므로 다상 유체 거동 및 해석 모델의 크기로 인한 해석 속도 저하가 예상되었으며, 이를 해결하기 위해 병렬 해석 수행이 필요하였다.

따라서 오픈소스 프로그램이 지니고 있는 장점을 활용하여 원활한 병렬 해석 수행을 위해 Fig. 2와 같이 OpenGeoSys는 리눅스 운영 체제에서 구동되며, FLAC3D는 Window 운영 체제에서 작동하면서 운영 체제 간 교차 해석이 진행될 수 있도록 시스템을 구축하였다. 이 때 병렬해석은 오픈MP (Open Multi-Processing) 기반의 병렬해석을 적용하였고, 하나의 워크스테이션에서 OGS-FLAC이 구동될 수 있도록 Window 운영 체제에서 지원하는 리눅스용 하위 운영 체제인 WSL 2 (Window Subsystem for Linux 2)를 활용하였다. 또한, 해석 메쉬(mesh) 생성을 위해서 또다른 오픈소스 프로그램인 GMSH를 활용하였으며, GMSH로 생성된 해석 메쉬 정보가 OpenGeoSys와 FLAC3D 각 프로그램에 호환될 수 있도록 파이썬 기반의 자체 코드를 작성하여 활용하였다.

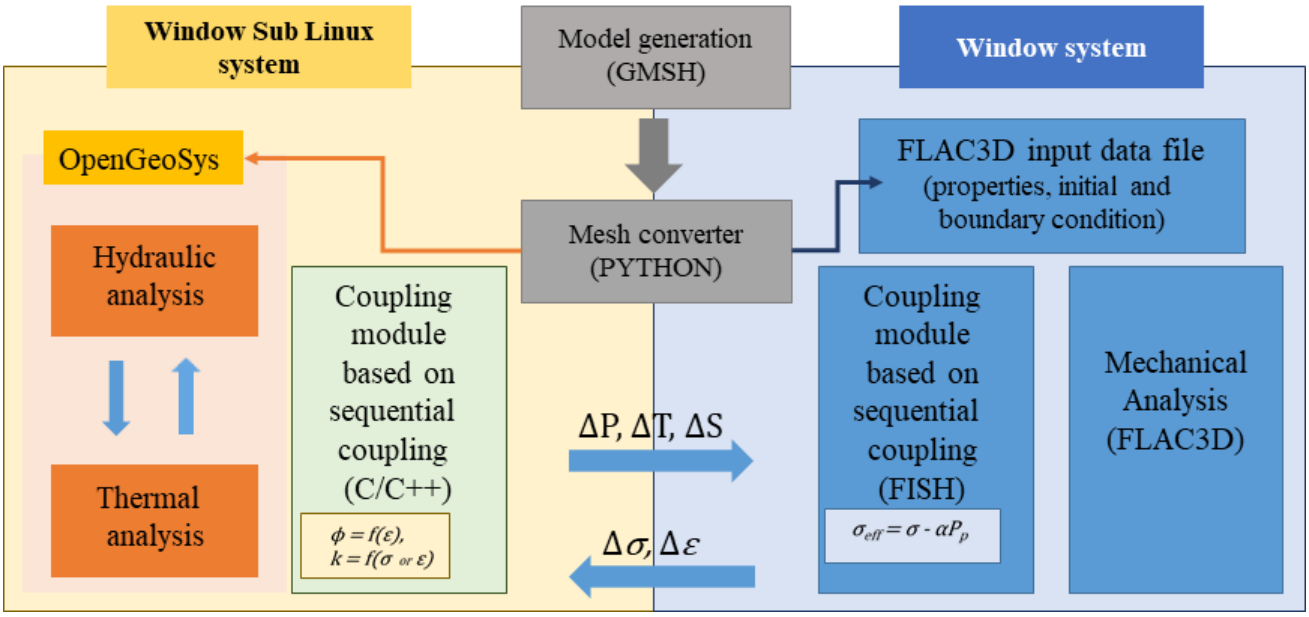


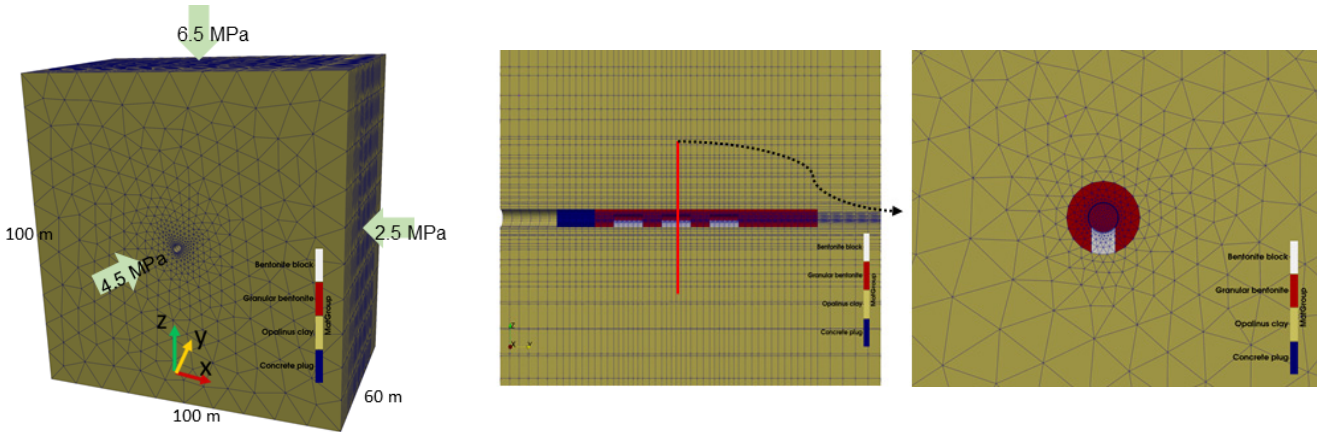
Fig. 2. Structure of OGS-FLAC for a THM coupled simulation with model generation

3. 수치 모델 및 해석조건

3.1 수치 모델

FE 실험이 수행된 처분 터널은 심도 250-300 m 구간에 위치하고 있으며, 터널의 총 연장은 약 55 m 에 해당한다(Fig. 1). 따라서 본 연구에서는 경계 조건에 따른 효과를 최소화하기 위하여 처분 터널을 중심으로 가로 100 m, 세로 100 m, 깊이 100 m에 해당하는 수치 모델을 생성하였다(Fig. 3). 생성한 수치 모델의 노드(node) 수는 약 38,000개이며, 요소(element)의 수는 약 72,000개이고 요소 형상은 삼각기둥(prism) 형태로 생성하였다.

실험이 수행된 모암인 Opalinus 점토암은 이방성을 지니고 있으며(Kim et al., 2021b), 실험 시 계측 기기도 이방성 방향으로 설치되었다. 따라서 수치 모델 역시 이방성 및 계측 위치를 고려하여 Fig. 3(b)와 같이 처분 터널 축을 중심으로 비대칭적으로 생성하였다. 처분 터널 내에는 실제 실험과 같이 직경 1.05 m, 길이 2.54 m의 히터 세 개를 위치시켰으며, 히터는 강체로 가정하여 모사하지 않고 히터와 완충재의 경계면에 변위 고정 조건을 적용하였다. 따라서 히터에서 발생하는 열은 히터와 완충재 경계면에 발생하는 것으로 가정하였고, 히터의 가열 일정은 실제 실험 자료와 동일하게 적용하였다. 히터 하부에는 히터를 거치할 수 있도록 역할을 하는 벤토나이트 블록을 생성하였고, 나머지 터널 공간은 과립형(granular) 벤토나이트를 모사하였다. 처분 터널의 입구 부분은 터널 폐쇄를 위해 사용된 콘크리트 플러그(plug)가 위치한 것으로 모사하였고, 입구에 해당하는 진입 터널(access tunnel) 구간은 내공 변위가 발생하지 않는 것으로 가정하였다.



(a) A three-dimensional numerical model (b) A cross-sectional view with an enlarged area around the heater

Fig. 3. A three-dimensional numerical model for the FE simulation using OGS-FLAC

3.2 해석조건

수치 모델의 외곽 경계부에는 현지 응력을 고려하여 Fig. 3(a)와 같이 일정 응력 조건을 적용하였으며, 완충재 및 암반에 적용된 초기 온도 및 포화도 조건은 Table 1과 같다. Table 1에 기록된 초기 조건은 현장 계측 자료를 기반으로 설정되었으며, 본 해석에서는 초기 해석단계로써 해석 단면의 전체 초기 수압은 심도를 고려하지 않고 1.5 MPa로 동일한 조건을 적용한 후 해석을 수행하였다. 현지응력은 중력 방향을 z 축으로 하여, x 방향으로 2.5 MPa, y 방향으로 4.5 MPa, z 방향으로 6.5 MPa을 적용하였으며, 중력 조건을 적용하여 심도에 따른 현지응력 구현이 가능하도록 하였다.

Table 1. Initial thermal and hydraulic conditions for the bentonite buffer and Opalinus clay for the numerical simulation

Variable	Material	Value
Initial temperature	Bentonite	18.0℃
	Opalinus clay	16.5℃
Initial relative humidity	Bentonite block	70.6%
	Granular bentonite	31.0%
	Concrete plug	44.2%
	Opalinus clay	100%

본 해석에서는 온도 증가에 따른 완충재 내 유체의 상 변화와 그에 따른 다상유체 거동 해석 적용이 필요했으므로 유체 해석을 위한 지배방정식으로 Richards 공식을 적용하였다.

$$n\left[\frac{\rho_w-\rho_v}{\rho_w}\frac{\delta S_w}{\delta p}+(1-S_w)\frac{\rho_v}{\rho_w^2 RT}\right]\frac{\delta p}{\delta t}+S_w(n\beta_w+(\alpha-n)\beta_s)\frac{\delta p}{\delta t}+\nabla\cdot(q_w+q_v)/\rho_w+S_w\alpha\nabla\cdot\frac{\delta u}{\delta t}$$
$$+n\frac{1-S_w}{\rho_w}\left(h_{re}\frac{\delta\rho_{vS}}{\delta T}+\frac{\rho_v p}{RT^2}\right)\frac{\delta T}{\delta t}-(nS_w\beta_w^{th}+(\alpha-n)3\beta_s^{th})\frac{\delta T}{\delta t}=0 \quad (1)$$

위 식에서 w, v는 각각 유체, 기체 상(phase)을 의미하며 n은 공극률, ρ는 밀도, p는 압력, S는 포화도, T는 온도, α는 Biot 상수, h_{re}는 상대습도(relative humidity), ρ_{vS}는 포화 상태 증기의 밀도, t는 시간을 의미한다. R은 이상기체 상수, β_w는 유체의 압축률(compressibility), β_s는 공극의 압축률, q는 유량(flux), β_w^{th}는 유체의 열팽창계수, β_s^{th}는 고체의 열팽창계수를 의미한다. Richards 공식은 Darcy 방정식을 기본으로 하여 유체의 상 변화를 고려하여 시간에 따른 온도 및 압력 변화에 따른 유체 흐름을 표현한 식으로써, 각 항이 의미하는 바를 살펴보면

$n\left[\frac{\rho_w-\rho_v}{\rho_w}\frac{\delta S_w}{\delta p}+(1-S_w)\frac{\rho_v}{\rho_w^2 RT}\right]\frac{\delta p}{\delta t}$는 저류량(storage), $\nabla\cdot(q_w+q_v)/\rho_w$는 유체 흐름(flux), $S_w\alpha\nabla\cdot\frac{\delta u}{\delta t}$는 유체가 흐르는 매질의 변형, $n\frac{1-S_w}{\rho_w}\left(h_{re}\frac{\delta\rho_{vS}}{\delta T}+\frac{\rho_v p}{RT^2}\right)\frac{\delta T}{\delta t}$는 기체 상의 확산(diffusion), $(nS_w\beta_w^{th}+(\alpha-n)3\beta_s^{th})\frac{\delta T}{\delta t}$는 열 팽창과 관련된 항을 뜻한다. 본 해석에서는 Park and Park(2022)와 다르게 매질의 변형($S_w\alpha\nabla\cdot\frac{\delta u}{\delta t}$) 부분은 적용하지 않았으며, 완충재와 같이 압축성이 큰 매질에는 결과에 영향을 미칠 수 있으므로 향후 코드 내 반영을 계획하고 있다.

열 유동 모사를 위해서는 다음 식 (2)와 같은 에너지 보존 방정식을 적용하였으며, 식 (2)에서 c^p는 비열용량(specific heat capacity), λ_m은 열전도도, q_w는 열유량, ΔT는 상온에 대한 온도 변화량, Q_T는 열원(heat source)을 의미한다.

$$((1-n)\rho_s c_s^p+nS\rho_w c_w^p)\frac{\delta T}{\delta t}-\nabla\cdot(\lambda_m I\Delta T)+c_w^p q_w\Delta T+Q_T=0 \tag{2}$$

위 식에서 $((1-n)\rho_s c_s^p+nS\rho_w c_w^p)\frac{\delta T}{\delta t}$는 매질의 열 용량(heat capacity)과 관련된 항이며, $\nabla\cdot(\lambda_m I\Delta T)$는 열 전도(conduction), $c_w^p q_w\Delta T$는 대류(convection)와 관련된 항이다.

마지막으로 역학적 해석을 위해서는 운동량 보존 방정식(linear momentum balance equation)을 적용하였으며, 다상 유동에 따른 압력 변화 및 열 팽창에 의한 응력 변화를 고려한 항을 함께 적용하였다. 식 (3)에서 σ는 응력, χ는 포화도를 고려한 Bishop 계수, β_T^S는 열팽창계수를 의미한다.

$$\nabla\cdot(\sigma-\alpha\chi pI-\beta_T^S C\Delta T)=0 \tag{3}$$

다상 유동 해석 시에는 완충재 내부 유효 포화도(θ_c)에 따른 모세관압(capillary pressure) 변화 및 상대투수계수(k_{re}) 변화를 모사할 수 있어야 하며, 본 연구에서는 Kim et al.(2021b)의 Step 0 해석과 같이 van Genuchten(1980)이 제안한 식 (4)을 적용하였다.

$$k_{re}=\theta_c^{\frac{1}{2}}\left[1-\left(1-\theta_c^{\frac{1}{m}}\right)^m\right]^2 \tag{4}$$

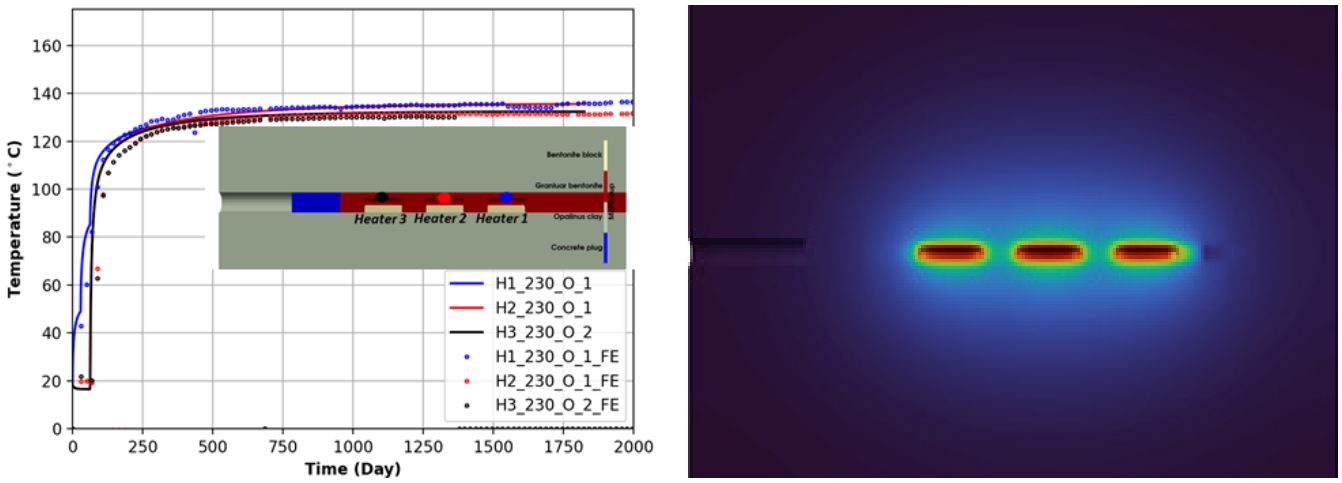
위 식 (4)에서 m은 물질 상수이며, 실제 해석에 적용된 입력 변수는 다음 Table 2와 같다. Table 2에 적용된 입력 변수들의 값은 참여 팀들에게 공통으로 주어진 값을 기반으로 하였다.

Table 2. Input parameters for Step 1 simulation in Task C of DECOVALEX-2023

	Input parameters	Unit	Opalinus clay	Granular bentonite	Bentonite block
Thermal parameters	Dry thermal conductivity parallel to bedding	W/m·K	2.15 (parallel to bedding) 1.19 (perpendicular to bedding)	0.28	0.26
	Saturated thermal conductivity parallel to bedding		2.15 (parallel to bedding) 1.19 (perpendicular to bedding)	1.0	0.96
Hydraulic parameters	Dry bulk density	kg/m^3	2340	1490	1690
	Porosity	-	0.13	0.331	0.331
	Intrinsic permeability	m^2	1.0×10^{-20} (parallel to bedding) 0.2×10^{-20} (perpendicular to bedding)	3.5×10^{-20}	1.0×10^{-22}
	van Genuchten entry pressure	MPa	20.0	28.6	30
	van Genuchten n	-	2.5	2.0	1.67
Mechanical parameters	Young's modulus	MPa	8000 (parallel to bedding) 4000 (perpendicular to bedding)	18	24
	Shear modulus	MPa	3500	-	-
	Poisson ratio	-	0.35 (parallel to bedding) 0.25 (perpendicular to bedding)	0.35	0.2
	Linear thermal expansion	1/K	1.5×10^{-5}	3.0×10^{-6}	3.0×10^{-6}

4. 수치해석 결과

Fig. 4(a)는 각 히터 상부에서 측정된 현장시험에서의 온도 결과(점으로 표시)와 수치해석을 통해 얻은 결과(실선으로 표시)를 비교해서 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 실험 시 터널 제일 안쪽에 위치한 1번 히터에서 먼저 가열이 단계적으로 시작되었으며, 이후 2번 히터, 3번 히터의 가열이 시작되었다. 현장시험 결과와 측정 결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났으며 수치해석 결과에서는 2번 히터에서 측정된 온도가 약 136°C로 가장 높은 것으로 나타났는데, 이는 2번 히터가 가운데 위치해 있기 때문에 온도 중첩에 의한 효과인 것으로 판단된다. 반면 현장 계측자료에서는 1번 히터에서의 온도가 약 138°C로 가장 높은 것으로 나타났는데, 수치해석 결과와의 차이에 대한 원인은 좀 더 파악이 필요할 것으로 판단된다. Fig. 4(b)는 5년 경과 후 터널 종심축을 따른 단면에서의 온도 분포 결과를 나타낸 것으로 터널 주변으로 온도가 상승한 후 암반으로 열이 전달되어 나갔음을 확인할 수 있다.



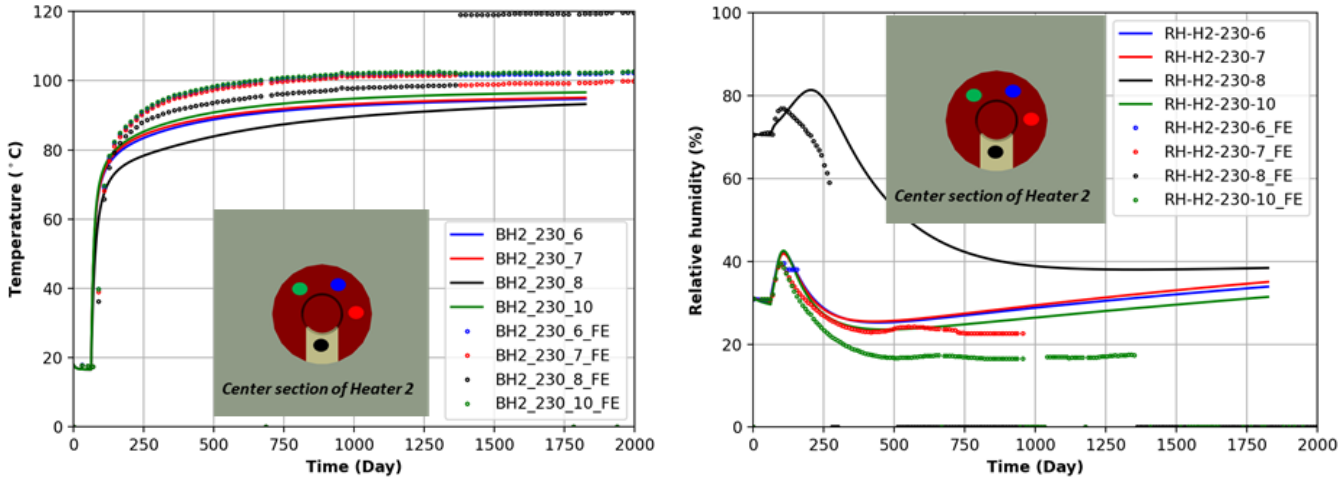
(a) Temperature results with the monitoring points (b) A cross-sectional view of temperature around the heaters

Fig. 4. Temperature comparison between measured data and simulation results

Fig. 5는 2번 히터 중심부에서 20 cm 이격된 거리의 벤토나이트 완충재 내부에서 측정된 온도 및 상대습도 결과를 나타내고 있다. 먼저 Fig. 5(a)에서 나타난 온도 결과의 경우 초기 온도 상승 속도는 비슷한 것으로 나타났으며, 수치해석 및 현장 결과 모두 벤토나이트 블록에서 계측된 온도(검은색 실선 및 점선)가 가장 낮은 것으로 나타났다. 벤토나이트의 열전도도는 포화도와 비례적 관계에 있으며, 따라서 Table 1에 나타난 바와 같이 초기 상대습도가 높은 벤토나이트 블록의 열전도도가 보다 높기 때문에 같은 열유속에 대해 온도 구배가 낮아서 더 낮은 온도를 보인 것으로 판단된다. 또한, 모든 계측지점에서 수치해석 결과가 현장 계측 결과보다 낮게 나타났는데, 이는 수치해석에서 나타난 상대습도 결과를 통해 분석이 가능하다. Fig. 5(b)에 나타난 바와 같이 수치해석 및 현장 자료의 초기 상대습도 변화는 유사한 것으로 나타나지만 약 250 일 경과 이후의 자료에서는 수치해석을 통한 상대습도 결과가 더 크게 나타난 것을 알 수 있다. 상대습도가 높을수록 포화도가 높아지면 따라서 높은 열전도도를 갖게 되므로 열이 축적되지 못하고 외부로 발산되어 낮은 온도를 보이는 것으로 판단할 수 있다. 시간 경과 시 상대습도가 높은 이유는 완충재의 흡입력이 실제보다 높게 해석되었기 때문인 것으로 판단되며, 완충재의 흡입력이 높은 것은 다음과 같은 이유를 생각해 볼 수 있다.

1) 부정확한 완충재 흡입력 평가 실험 결과
2) 터널 굴착 손상영역 모사 부재
3) 숏크리트 등 터널 지보 모사 부재

터널 내 완충재의 흡입력이 저하되기 위해서는 정확한 완충재 흡입력 평가 결과가 필요하며, 두 번째로는 완충재의 흡입력을 저하시킬 요소의 모사가 이루어지지 않았을 가능성을 고려할 수 있다. 향후 터널 굴착 손상영역 고려와 함께 숏크리트 등 터널 지보를 모사할 경우, 완충재와 암반의 직접적 접촉이 이뤄지지 않기 때문에 완충재의 흡입력이 저하될 것으로 판단되며, 현장 결과와 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 이번 해석 결과를 통해 처분 터널과 인접한 영역에서의 지하수 유동 모사 시 완충재의 흡입력이 지배적인 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다.



(a) Temperature results in the bentonite (b) Relative humidity results in the bentonite

Fig. 5. Temperature and relative humidity comparison between measured data and simulation results

Fig. 6는 2번 히터의 중심 단면을 기준으로 처분 터널 외부 영역인 Opalinus 점토암에서 측정된 온도 및 압력 결과를 나타내고 있다. 점으로 표시된 결과가 현장 계측 결과를 나타내고 있으며, 점선 및 실선으로 표시된 곡선이 각각 처분 터널의 좌측 및 우측 계측 지점에서 얻은 수치해석 결과를 나타내고 있다. 먼저 온도 분포 결과는 현장 및 수치해석 결과가 거의 동일한 것으로 나타났으며, 터널 우측에서 측정된 온도 결과가 더 높게 나타난 것을 확인할 수 있다. 이는 Table 2에 제시된 바와 같이 열전도도 이방성을 반영한 것으로, 층리면과 평행한 우측 방향의 열전도도(2.15 W/mK)가 수직한 방향의 좌측 열전도도(1.19 W/mK)보다 높기 때문이다. 이를 통해 열전도 이방성 모사가 해석을 통해 잘 구현되었음을 확인할 수 있다. 반면 수압 분포 해석 결과의 경우 현장 결과와 다소간 차이를 보이는 것을 확인할 수 있는데, 이는 상기한 바와 같이 초기 수압 분포 및 완충재의 흡입력 모사 개선을 통해 향상된 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 특징적으로는 처분 터널 우측에 위치해 있으며 가장 근접한 거리에 있는 BFEA002(파란색 실선)의 경우 시간 경과 시 압력 값이 음의 값으로 떨어지는 것을 볼 수 있는데 완충재의 흡입력이 과대 평가되었음을 또다시 확인할 수 있다. 또한 같은 거리에 위치해 있으나 터널의 좌측에 위치한 지점인 BFEA005(파란색 점선)의 경우 상대적으로 압력의 감소가 작게 나타나는데 이는 Table 2에 제시된 바와 같이 Opalinus 점토암의 투수계수 이방성이 잘 반영되었기 때문이다. 또한, 처분 터널로부터 멀리 떨어진 BFEA004 및 BFEA007의 경우 압력 감소가 나타나지 않음을 볼 수 있는데 이는 상대적으로 낮은 Opalinus 점토암의 투수계수로 인해 유체 흐름이 크게 발생하지 않았기 때문으로 판단된다.

마지막으로 Fig. 7은 2번 히터 중심부 단면에 위치한 계측지점에서 획득한 x 방향 변위의 비교 결과를 나타내고 있다. 현장 및 수치해석 결과가 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있으며, Opalinus 점토암의 층리에 따른 탄성계수 이방성(Table 2)의 영향으로 터널 좌측면 실험결과(파란색 및 빨간색)가 더 크게 나타남을 확인할 수 있다(Fig. 7(a)). 이는 Fig. 7(b)의 x방향 변위 분포도(contour)를 통해서도 잘 확인할 수 있다.

따라서 일련의 해석을 통해 OGS-FLAC이 다상 유체 해석을 포함한 T-H-M 복합거동을 잘 모사할 수 있음을 확인하였으며, 완충재의 흡입력 부분에 대한 개선을 통해 보다 향상된 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

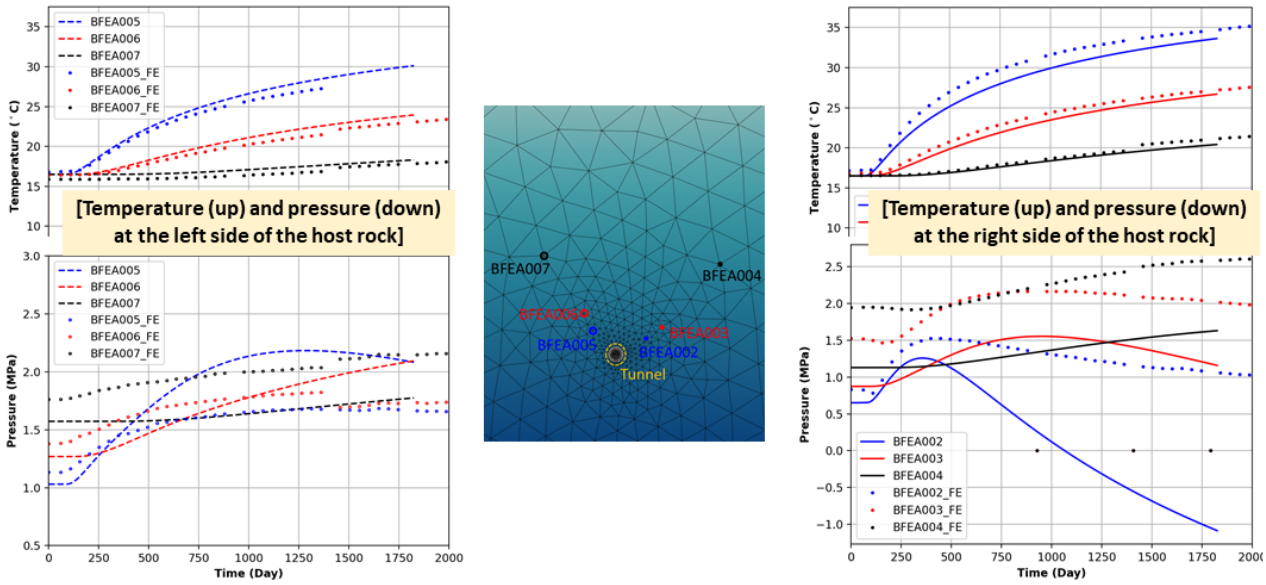
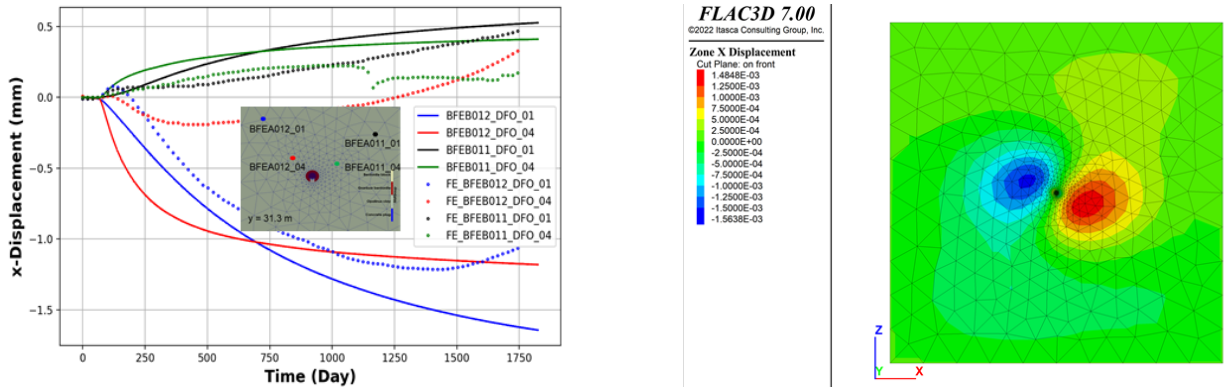


Fig. 6. Temperature and pressure results in the Opalinus clay with measured field data



(a) x-Displacement results (b) A section view of x-Displacement contour

Fig. 7. x-Displacement results in the Opalinus clay with measured field data

5. 결 론

본 논문에서는 Kim et al.(2021b)이 소개한 바 있는 DECOVALEX-2023 Task C의 후속 연구 결과를 소개하고자 하였다. DECOVALEX-2023 Task C에서는 스위스에서 수행된 실규모 히터 정치 시험을 대상으로 각국의 해석 코드를 사용하여 현장 시험 결과를 모사하고자 하였으며, 본 연구진은 OGS-FLAC 해석 시뮬레이터를 활용하여 처분 시스템 내 온도 변화에 따른 상변화를 포함한 열-수리-역학 복합거동을 모사하고자 하였다.

해석 도메인의 크기 및 요소 수를 고려하여 병렬 해석이 필요하다고 판단하였으며, 이를 위해 Linux 및 Window 운영체제 간 교차해석 및 OpenMP를 활용하여 해석 속도를 향상시킬 수 있었다. 또한, OpenGeoSys 및 FLAC3D 간 메쉬 호환성을 위해 오픈 소스 프로그램인 GMSH 및 파이썬 코드를 활용함으로써 효율적인 해석 플랫폼 구축을 시도하였다.

구축된 해석 플랫폼을 활용하여 (100 × 100 × 60) m 크기의 도메인에 대한 처분시스템 내 복합거동 해석을 수행하였다. 다상 유동 해석을 위한 지배 방정식을 적용하였으며, 입력 변수는 Task를 통해 주어진 공통의 입력변수를 기본으로 하여 일련의 해석을 진행하였다. 실제 현장 결과와 동일한 가열 이력을 적용하였고 히터 상부에서 계측한 실험 결과 및 해석 결과가 비교적 잘 일치하는 것을 확인하였다. 반면 완충재 내에서 측정된 상대 습도 및 온도의 경우 실험 결과와 다소간 차이를 나타내는 것을 확인하였는데, 이는 완충재 흡입력이 현장시험보다 과대평가 되었기 때문으로 판단된다. 여기에는 완충재 흡입력 물성 실험 결과 오차, 방벽 역할을 해줄 수 있는 터널 지보재 모사 부재, 투수 특성을 저하시킬 수 있는 굴착손상영역 부재 등을 원인으로 고려할 수 있으며, 향후 연구 진행을 통해 보완을 계획하고 있다. 또한 처분 터널 외부 Opalinus 점토암에서 계측된 수압 분포 결과 역시 과대평가된 완충재 흡입력의 영향으로 실험결과 및 현장결과가 차이를 나타내는 것을 확인할 수 있었으며, 이를 통해 처분 시스템 해석 시 완충재의 흡입력이 완충재 및 근계암반 내 지하수 유동 및 압력 분포, 온도 분포에 큰 영향을 미치게 됨을 알 수 있다. 따라서 처분 시스템 해석 시 상 변화 및 다상 유동을 고려한 해석이 필수적으로 요구됨을 확인할 수 있었다. 또한, 처분 터널을 중심으로 우측 및 좌측에서 계측된 압력 및 온도 분포 결과가 서로 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었으며 이는 Opalinus 점토암의 층리면에 따른 열, 수리, 역학적 이방성이 해석 시 잘 반영되었음을 알 수 있다.

DECOVALEX-2023의 해석 관련 연구는 2023년 말까지 지속될 예정이며, 연구 기간을 통해 확인된 미비점을 보완하여 향상된 해석 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 진행되고 있는 연구를 통해 OGS-FLAC의 처분시스템 해석에 대한 적용성을 확인할 수 있었으며 다상유체 거동이 있을 수 있는 각종 지중저장 및 지하공간 개발 분야에도 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors appreciate and thank the DECOVALEX-2023 Funding Organisations Andra, BASE, BGE, BGR, CAS, CNSC, COVRA, US DOE, ENRESA, ENSI, JAEA, KAERI, NWMO, RWM, SÚRAO, SSM and Taipower for their financial and technical support of the work described in this paper. The statements made in the paper are, however, solely those of the authors and do not necessarily reflect those of the Funding Organisations. This research was also supported by the Institute for Korea Spent Nuclear Fuel (iKSNF) and National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (Ministry of Science and ICT, MSIT) (2021M2E1A1085193) and the Basic Research Project of the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM, GP2020-010) funded by the Ministry of Science and ICT, Korea.

REFERENCES

Alonso, E.E., Alcoverro, J. et al., and Jussila, P., 2005, The FEBEX benchmark test: case definition and comparison of modelling approaches, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 42, 611-638.

Beaucaire, C., Tertre, E., Ferrage, E., Grenut, B., Pronier S., and Made, B., 2012, A thermodynamic model for the prediction of pore water composition of clayey rock at 25 and 80°C comparison with results from hydrothermal alteration experiments, Chemical Geology, 334, 62-76.

Birkholzer, J.T., Tsang, C.-F., Bond, A.E., Hudson, J.A., Jing L., and Stephansson, O., 2019, 25 years of DECOVALEX- Scientific advances and lessons learned from an international research collaboration in coupled subsurface processes, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 122, 103995.

ENRESA, 2000, FEBEX project. Full-scale Engineered Barriers Experiment for a Deep Geological Repository for High Level Radioactive Waste in Crystalline Host Rock. Madrid: Final report.

Graupner, B. and Thatcher, K., 2020, Task C THM modelling of the FE experiment (Presentation material), DECOVALEX-2023 1st workshop.

Itasca, 2013, FLAC3D (version 5.0) Online manual.

Kim, T., Lee, C., Kim, J.-W., Kang, S., Kwon, S., Kim, K.-I., Park, J.-W., Park C.-H., and Kim, J.-S., 2021a, Introduction to Tasks in the International Cooperation Project, DECOVALEX-2023 for the Simulation of Coupled Thermohydro-mechanical-chemical Behavior in a Deep Geological Disposal of High-level Radioactive Waste, Tunnel and Underground Space, 31(3), 167-183.

Kim, T., Park, C.-H., Lee C., and Kim, J.-S., 2021b, A numerical study on the Step 0 benchmark test in Task C of DECOVALEX-2023: Simulation for thermo-hydro-mechanical coupled behavior by using OGS-FLAC, Tunnel and Underground Space, 31(6), 610-622.

Kim, T., Park, C.-H., Watanabe, N., Park, E.-S., Park, J.-W., Jung, Y.-B., and Kolditz, O., 2021c, Numerical modeling of two‐phase flow in deformable porous media: application to CO2 injection analysis in the Otway Basin, Australia, Environmental Earth Sciences, 80(121), 1-15.

Kolditz, O, Bauer, S., Bilke, L., Böttcher, N., Delfs, J.O., Fischer, T., Görke, U.J., Kalbacher, T., Kosakowski, G., McDermott C. et al., 2012, Opengeosys: an open-source initiative for numerical simulation of thermo-hydro-mechanical/chemical (thm/c) processes in porous media, Environmental Earth Sciences, 67(2), 589-599.

Kwon, S., Cho W.-J., and Choi, J.-W., 2007, Status of the international cooperation project, DECOVALEX for THM coupling analysis, Journal of the Korean Radioactive Waste Society, 5(4), 323-338.

Lee, C., Choi, H.-J., and Kim, G.-Y., 2020a, Numerical modelling of coupled thermo-hydro-mechanical behavior of Heater Experiment－D (HE-D) at Mont Terri rock laboratory in Switzerland, Tunnel and Underground Space, 30(3), 242-255.

Lee, C., Kim, T., Lee, J., Park, J.-W., Kwon S., and Kim, J.-S., 2020b, Introduction of International Cooperation Project, DECOVALEX from 2008 to 2019, Tunnel and Underground Space, 30(4), 271-305.

Nagra, 2019, Implementation of the Full-scale Emplacement experiment at Mont Terri: Design, construction and preliminary results, Technical report 15-02, National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, 202p.

Park, C.-H., Kim, T., Park, E.-S., Jung Y.-B., and Bang, E.-S., 2019, Development and Verification of OGSFLAC Simulator for Hydro-mechanical Coupled Analysis: Single-phase Fluid Flow Analysis, Tunnel and Underground Space, 29(6), 468-479.

Park, C.-H., Kim, T., Park, E.-S., Jung Y.-B., and Bang, E.-S., 2020, Construction of open-source program platform for efficient numerical analysis andits case study, Tunnel and Underground Space, 30(6), 509-518.

Park, D. and Park, C.-H., 2022, Performance evaluation of OGS-FLAC simulator for coupled thermal-hydrological-mechanical analysis, Tunnel and Underground Space, 32(2), 144-159.

Rutqvist, J., Börgesson, L. et al. and Tsang, C.-F., 2001, Coupled thermo-hydro-mechanical analysis of a heater test in fractured rock and bentonite at Kamaishi Mine - comparison of field results to predictions of four finite element codes, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 38, 129-142.

van Genuchten, M.T., 1980, A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Science Society of America Journal, 44(5), 892-898.