

## Decovalex-2015 Task B2를 위한 THM 해석기법 개발 및 적용

권상기\*, 이창수, 박승훈

## THM Coupling Analysis for Decovalex-2015 Task B2

Sangki Kwon\*, Changsoo Lee, Seung-Hun Park

**Abstract** The evaluation of THM coupling behavior in deep underground repository condition is essential for the long term safety and stability assessment of high-level radioactive waste repository. In order to develop reliable THM analysis techniques effectively, an international cooperation project, DECOVALEX, is carried out. In DECOVALEX-2015 Task B2, the in situ THM experiment planned to be conducted by JAEA was modeled by the research teams from the participating countries. In this study, a THM coupling technique combining TOUGH2 and FLAC was developed and applied to 1 dimensional THM modeling, in which rock, buffer, and heater are considered. The results were compared with those from other research teams.

**Key words** THM, DECOVALEX, TOUGH-FLAC, HLW disposal

**초 록** 고준위방사성폐기물 처분장의 장기 안전성 및 안정성 평가를 위해서는 심지층 처분장 환경에서의 열-수리-역학적 복합 거동에 대한 평가가 필요하다. 신뢰도 높은 THM 해석 기법의 개발을 효과적으로 하기 위해 DECOVALEX 국제공동연구가 수행되고 있다. DECOVALEX-2015 Task B2에서는 일본 JAEA에서 계획중인 현장 THM 실험에 대하여 세계 각국의 연구진이 모델링을 실시하였다. 본 연구에서는 TOUGH2-FLAC을 연계한 THM 해석 기법을 개발하고 이를 이용하여 암반, 완충재, 히터로 구성되는 1차원 THM 모델링을 수행하였으며 해석 결과를 외국의 연구팀 결과와 비교하였다.

**핵심어** 열-수리-역학, DECOVALEX, TOUGH-FLAC, 고준위 처분

## 1. 서 론

국내 원자력 발전을 통해 발생하는 고준위 폐기물은 매년 750톤 정도로 1978년 고리원자력발전소가 가동된 이후 총 누적 사용후핵연료의 양이 2013년 말 기준 13,000톤에 달하고 있다. 발전소 내에 설치된 사용후핵연료 임시저장시설은 2016년 고리원전을 시작으로 포화수준에 도달하며 조밀저장이나 호기 간 이동으로 저장용량을 추가 확보하더라도 일정 기간 후 포화되는 것은 피할 수 없을 것으로 예상된다. 사용후핵연료에 대

해 안전한 관리 방안을 마련하는 것은 지속 가능한 원자력 발전을 위해 필수적으로 해결해야 할 국가적 과제로 인식되고 있다. 국내 원자력 발전을 통해 발생하는 사용후핵연료의 관리기반 계획을 수립하기 위한 과정의 일환으로 공론화를 주관했던 사용후핵연료 공론화위원회는 2013~2015년까지 20개월의 공론화 작업을 통해 최근 사용후핵연료 관리 방안에 대한 정부 권고안을 발표한 바 있다. 권고안에서는 2050년에 처분시설을 건설, 운영하여야 하며 이를 위해 지하연구시설의 부지를 2020년까지 선정하도록 하고 있다.

방사성붕괴열이 발생하며 장기간의 관리방안이 요구되는 고준위 폐기물의 경우에는, 여러 가지 대안 중에서 지하 심부 암반에 처분하는 것이 기술적, 안정성, 경제적 측면에서 가장 타당한 방안으로 현재 세계 각국에서 고려되고 있다. 국내에서는 한국원자력연구원을 중심으로 심지층 처분 방안을 마련하기 위해 다양한 연구가 수행되고 있다(Lee et al., 2011; Choi et al., 2008).

**Received:** Dec. 11, 2015

**Revised:** Dec. 24, 2015

**Accepted:** Dec. 24, 2015

**\*Corresponding Author:** Sangki Kwon

Tel) +82328607554, Fax) +82328727550

E-Mail) kwonsk@inha.ac.kr

INHA University, 100, Inha-ro, Nam-gu, Incheon, Korea

심부 암반에 작용하는 높은 응력, 지하수압, 방사선과 함께 방사성 붕괴열이 작용하는 심부 처분장 환경에서는 처분장 주변 매질의 장기 거동을 신뢰도 높게 예측하는 것이 매우 중요하다. 특히 처분부지의 평가 및 처분시스템의 설계에 활용하기 위해서는 공학적 방벽 및 암반의 장기 열-수리-역학적 복합거동의 이해를 필요로 한다(Tsang et al., 2012).

고준위폐기물의 지층처분을 고려하는 세계 각국에서는 지하연구시설에서의 현장시험과 실험실 실험, 그리고 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 예측기법의 개발을 위해 노력하고 있다. 열-수리-역학-화학적(T-H-M-C) 상호작용에 대한 해석의 신뢰도를 높이기 위해 1992년부터 DECOVALEX(Development of COupled models and their VALidation against EXperiments) 국제공동연구가 착수되어 현재까지 진행되고 있다(Hudson and Jing, 2013).

본 연구에서는 고준위폐기물의 지층처분 시 처분장 주변에서의 열-수리-역학적(THM) 복합거동을 예측하기 위한 해석기법을 개발하고자 하였다. 복잡한 THM 상호작용을 보다 효과적으로 모사하기 위해 열-수리 거동 해석에 많이 사용되고 있는 TOUGH2 코드와 역학적 해석에서 널리 사용되고 있는 FLAC 프로그램을 연동시키는 기법을 개발하였다. 이를 DECOVALEX-2015 Task B에 적용하여 다른 연구팀의 결과와 상호 비교함으로써 해석 기법의 타당성을 검증하고자 하였다.

## 2. DECOVALEX 국제공동연구

### 2.1 개요

DECOVALEX 국제공동연구는 방사성폐기물이 처분되는 지하 암반에서의 THMC 해석 기법 개발을 위해 1992년에 착수되어 현재까지 진행되고 있는 가장 대표적인 국제공동연구 중 하나이다. 각국에서 참가하는 연구진은 특정한 실험실 실험이나 현장시험을 대상으로 동일한 물성자료와 실험조건을 고려하여 blind test 방식으로 모델링을 수행하고 이를 매년 2회 개최되는 정기 workshop에서 발표하게 된다. 국제공동연구에 참여한 연구진은 해석 결과에 대한 상호 비교 또는 현장시험 및 실험실 실험을 통해 얻어진 결과와 비교함으로써 해석 기법에 대한 타당성을 검증할 수 있는 기회를 가지게 된다. DECOVALEX 국제공동연구는 1992년 이후, 4년 단위로 DECOVALEX-I, DECOVALEX-II, DECOVALEX-III, DECOVALEX-THMC, DECOVALEX-2011이 완료되었고 2012년에는 DECOVALEX-2015가 착수되어 2015년 말까지 진행되었다. Table 1은

DECOVALEX에서 수행된 Task 들을 보여준다. 한국은 2008년부터 시작된 DECOVALEX-2011에 처음으로 정식 회원국으로 참여하였으며 한국원자력연구원을 중심으로 연구팀을 구성하여 독자적인 해석기법을 개발하였고 해석기법의 검증을 통해 신뢰도를 높이는 연구를 수행하였다. DECOVALEX-2011의 경우, 한국은 스웨덴 Äspö 지하연구시설에서 수행된 Pillar Stability 시험(Andersson, 2007)을 대상으로 하는 Task B에 참여하였다(Kwon et al., 2013). 현재 진행중인 DECOVALEX-2015 국제공동연구는 Task A, B1, B2, C1, C2 로 구성되며 본 연구는 DECOVALEX-2015 Task B2에 관한 것으로 Task B2에는 5개 연구팀이 참여하고 있다. 2015년 DECOVALEX-2015가 마무리됨에 따라 DECOVALEX-2019(2016년-2019년)에 대한 계획이 논의 중에 있다.

### 2.2 Decovalex-2015 Task B2

DECOVALEX-2015 Task B2는 일본 JAEA(Japan Atomic Energy Agency)가 운영하고 있는 홋카이도 최북단 와카나이에 위치한 Horonobe URL(Underground Research Lab.)에서 계획하고 있는 full scale 현장 EBS (Engineered Barrier System) 실험을 모델링 대상으로 한다. 현장시험에서는 다양한 센서를 통해 히터가 장착된 overpack, 벤토나이트 완충재, 뒷채움재(backfill), 그리고 암반에서의 열-수리-역학적 거동을 관찰하게 된다. Task B2에 참여하고 있는 기관은 BGR(Germany), CAS(China), DOE(USA), KAERI(Korea)와 JAEA(Japan)이며 각 참여 기관은 자체 또는 위탁 연구팀(BGR, CAS, LBNL, 인하대, JAEA)을 구성하여 참여하고 있다. Task B2에 참가하는 연구팀은 수직 처분공에 거치된 EBS 내부와 주변에서의 THM(C) 거동을 예측하고 이를 바탕으로 보다 의미 있는 현장시험을 위한 센서의 설치에 대한 제안을 하며 추후 실측된 현장시험 결과와 예측결과를 비교함으로써 모델링 기법을 검증하게 된다.

Horonobe EBS 실험은 일본의 고준위 심지층 처분 개념을 모사하기 위한 실험으로 일본의 처분개념은 H12 보고서에 상세히 기술되어 있다(JNC, 2000). H12 보고서에 따르면 유리화된 고준위폐기물은 탄소강으로 만들어진 overpack에 넣어져 처분된다. Overpack을 감싸는 완충재는 일본 Kunigel 벤토나이트와 모래를 혼합한 후 고밀도로 가압하여 제작된다. 지하 수백 미터에 위치하는 처분 터널의 바닥에 여러 개의 수직 처분공을 뚫고 완충재와 폐기물을 거치하며 작업이 완료된 처분 터널은 Kunigel 벤토나이트와 파쇄암을 혼합하여 뒷채움하게 된다.

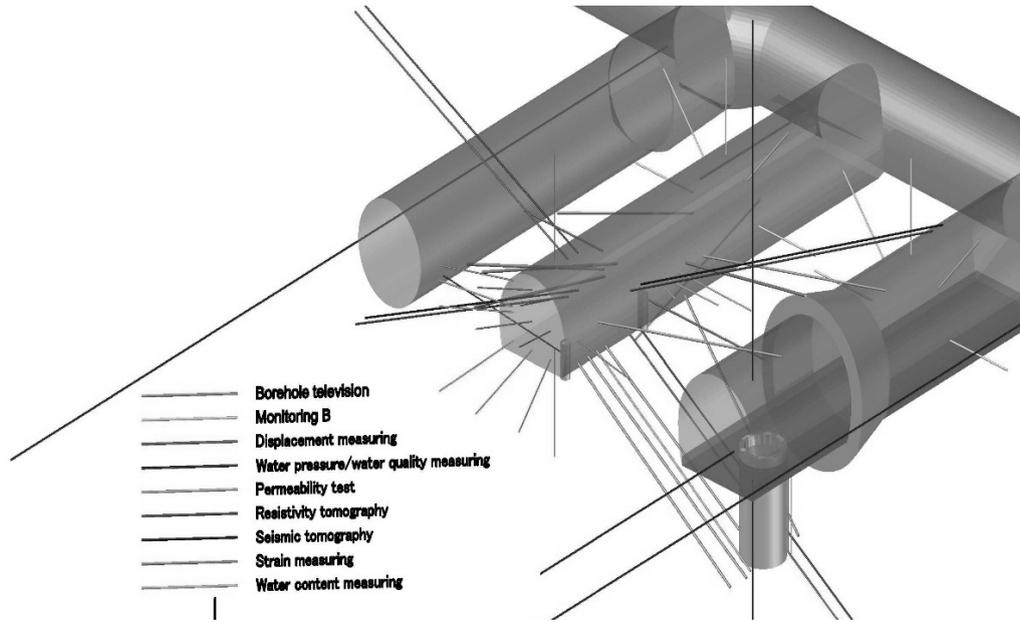
Horonobe EBS 실험의 개념 및 시험터널의 형상과

**Table 1.** Tasks covered in DECOVALEX international cooperation projects

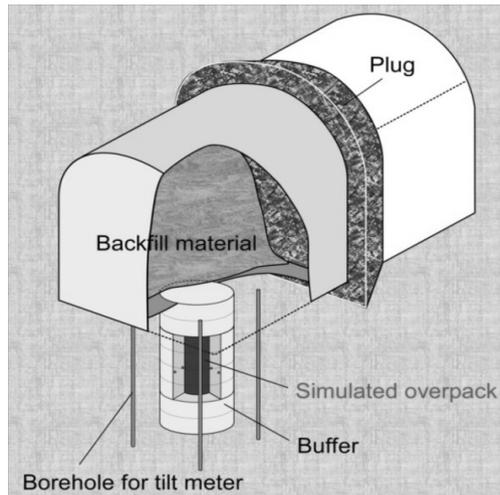
Phase (Period)	Task name	Tasks
D-I (1992-1995)	BMT 1	Heat source in fractured rock
	BMT 2	Heat source in hard rock with 4 fractures
	BMT 3	KBS-3 concept in fractured rock mass
	TC 1	Shear-flow test on rock core
	TC 2	Field experiment at Fanay-Augeres
	TC 3	Large-scale test of bentonite
	TC 4	Laboratory stress-flow test on fracture
	TC 5	Shear-flow experiment of a single joint
	TC 6	Hydraulic injection test in a borehole
D-II (1995-2000)	Task 1	Numerical study of Nirex's shaft excavation
	Task 2	In-situ THM experiment in Kamaish mine
	Task 3	Review of constitutive relations for rock joints
	Task 4	THM processes related to design and PA
D-III (2000-2003)	TC 1	FEDEX full-scale engineering barrier experiment
	TC 2	Yucca mountain drift scale test
	BMT 1	Implications of THM of near-field safety
	BMT 2	THM in fractured rock for large-scale repository PA
	BMT 3	THM response to glacial cycle
D-THMC (2004-2007)	Task A	Influence of near-field THM and PA
	Task B	THMC studies of the EDZ
	Task C	EDZ in the argillaceous rock
	Task D	Property change in EDZ and near-field due to THC and THM processes for volcanic and crystalline rocks
	Task E	Long-term climate change
D-2011 (2008-2011)	Task A	HMC processes in argillaceous rocks: the ventilation experiment
	Task B	Aspo pillar stability test
	Task C	HMC studies of single fractures and fracture networks
D-2015 (2011-2015)	Task A	The SEALEX In-Situ Experiment,
	Task B	.B1 : HE-E Heater Test, Mont Terri .B2 : EBS Experiment, Horonobe
	Task C	THMC of single fractures

크기는 H12 보고서의 처분개념과 동일하다. 처분시스템의 설계 기준으로 고려되고 있는 완충재에서의 최대 온도 100°C를 고려하여 overpack의 표면 온도는 100°C 이하로 유지하도록 한다. 완충재의 최대온도 설계기준은 고온에서 예상되는 완충재의 화학적 변이로 인한 차폐 성능 저하를 막기 위한 것이다. Fig. 1은 Horonobe URL에서 계획하고 있는 현장 THM 시험의 개요도로 각 요소들의 규격 및 형상을 보여주고 있다. 발파에 의

해 만들어지는 시험터널은 지하 350 m 지점에 위치하며 크기는 약 5 m × 5.5 m 이다. 터널 바닥에 천공되는 4.2 m 깊이의 처분공 직경은 2.5 m이며 처분공에 거치되는 원통형 overpack의 직경은 0.82 m이다(Fig. 2). Fig. 3는 Overpack의 시간에 따른 온도 변화를 보여준다. 초기 온도 15°C 에서 10일 동안 100°C 로 온도가 상승하는 것으로 가정하였다. Overpack 하부에 놓이는 완충재의 두께는 0.7 m이며 측면에는 0.72 m 두께의 완충재



(a) Layout of Observation and test tunnel



(b) Conceptual design of in situ EBS experiment

Fig. 1. The Horonobe EBS experiment (provided by JAEA)

와 12 cm 두께의 모래층이 암반과 overpack 사이를 채우게 된다. 콘크리트 라이닝으로 보강되는 시험터널은 뒷채움재로 채워지며 마지막으로 터널에 콘크리트 플러그를 설치하여 시험구간을 밀봉하게 된다. Horonobe 현장시험에서의 THM 거동 예측을 위해 Task B2 참여하고 있는 각 연구팀이 사용하는 코드 및 접근법은 Table 2와 같다.

### 3. TOUGH2-FLAC THM 해석

#### 3.1 기존 TOUGH2-FLAC 해석

본 연구에서 사용하는 TOUGH2 코드는 불포화 매질에서의 다상(multiphase) 및 다성분(multicomponent) 유체 혼합물의 다차원(multi-dimensional) 열-수리 해석을 수행할 수 있는 유한차분 해석 코드로 미국 LBNL

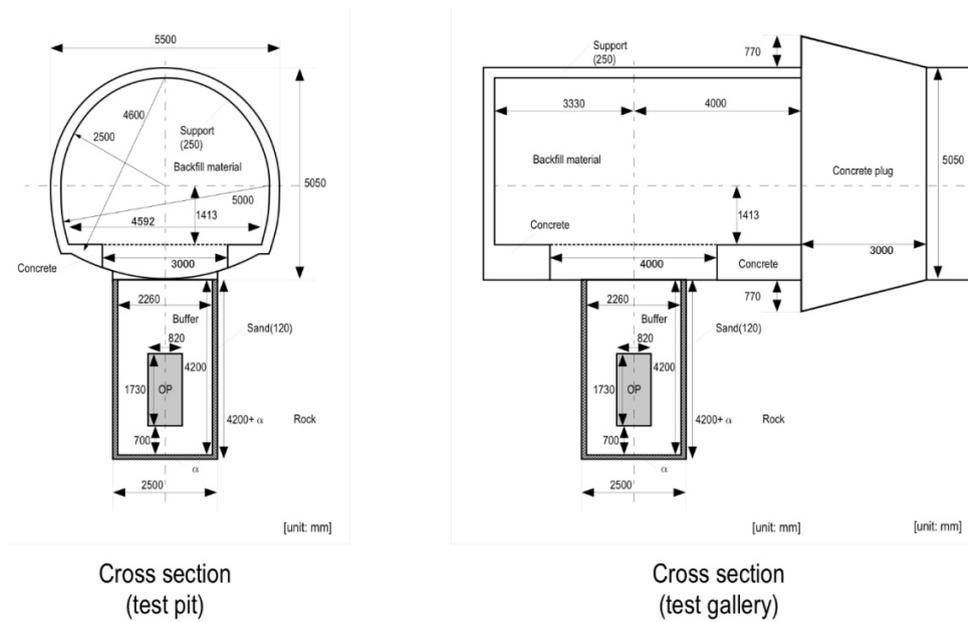


Fig. 2. Planned layout of the in situ THM experiment at Horonobe URL(provided by JAEA)

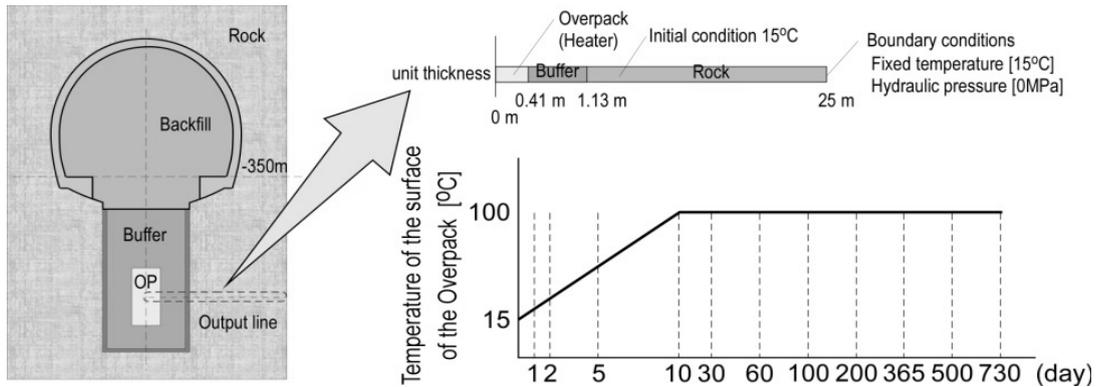


Fig. 3. Boundary conditions for the 1D THM analysis(Provided by JAEA)

Table 2. Modeling approach of each research team for DECOVALEX Task B2

Country	Germany	China	Japan	Korea	USA
Funding Org.	BGR	CAS	JAEA	KAERI	DOE
Research team	BGR	CAS	JAEA	Inha Univ	LBNL
Code	OpenGeoSYs	EPCA3D	THAMES	TOUGH2-FLAC	TOUGHREACT-FLAC
Model	Continuous FEM	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous
Coupling	THM	THM	THM	THM	THMC
Mechanical (Buffer)	Elastic	Elastic	Elasto-plastic	Elasto-plastic	Elastic
Hydraulic (phase)	Single phase	Single phase	Two phases	Two phases	Two phases

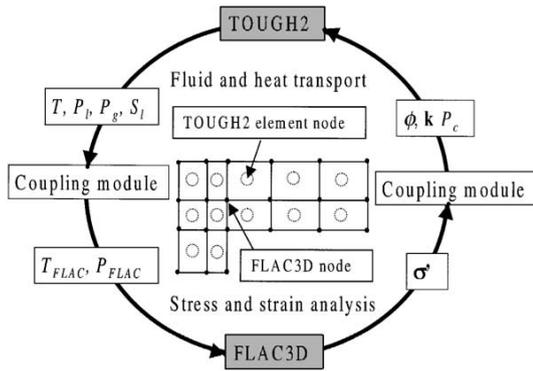


Fig. 4. Schematic of linking TOUGH2 and FLAC3D for a coupled THM simulation (Rutqvist et al., 2002)

에서 개발되어 전세계적으로 사용되고 있다(Pruess, 1999). 다양한 종류의 EOS(Equation of State)를 제공함으로써 유체의 특성과 조건에 맞는 해석을 수행할 수 있으며 미국 고준위 방사성폐기물 처분장 프로젝트인 Yucca mountain 프로젝트를 비롯하여 이산화탄소 지중저장, 지열개발 등에 널리 사용된 바 있다. FLAC은 유한차분법을 기반으로 하는 지반 및 터널 구조해석을 위한 2차원 연속체 해석 프로그램이다. TOUGH2와 FLAC을 연동시켜 수행하는 THM 해석은 Rutqvist 등(2002)에 의해 개발된 이후 이산화탄소 지중저장, 고준위폐기물 처분, 지열에너지 개발, 가스하이드레이트 개발 등에서 활용이 되고 있다. Fig. 4는 Rutqvist가 개발한 TOUGH2-FLAC3D를 연동한 THM 해석기법의 흐름도를 보여준다. TOUGH2에서 수행된 열-수리해석의 결과로 얻어진 각 모델격자에서의 공극압(pore pressure)은 FLAC3D에서 수행되는 역학해석의 입력자료로 활용되며 FLAC3D에서 얻어진 공극률 변화는 다시 TOUGH2의 입력자료로 활용되어진다. 이러한 열-수리, 역학해석의 반복을 통해 THM 해석을 수행하게 된다.

### 3.2 개발된 THM 모델링 기법

#### 가. 모델링 개요

본 연구에서 개발된 TOUGH2-FLAC 해석 기법의 기본적인 흐름도는 Rutqvist의 해석 기법과 유사하지만 차별되는 기능을 가진다. 기존의 해석 기법에서는 FLAC에서 역학 해석만을 실시하는데 반해, 본 연구에서 개발된 모델링에서는 FLAC에서 열-역학(TM) 해석을 실시한다는 점에서 차이가 있다. FLAC에서 TM 연동해석을 실시함으로써, TOUGH2에서 얻어진 매질의 포화도 변화에 따른 완충재와 암반에서의 열적 물성 및 역학적

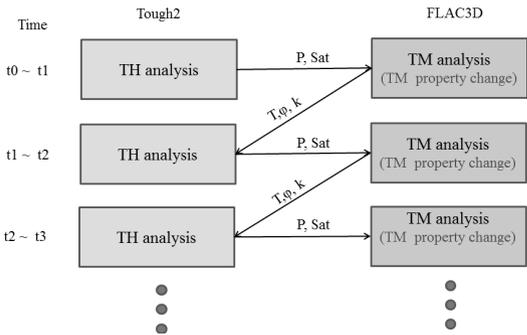
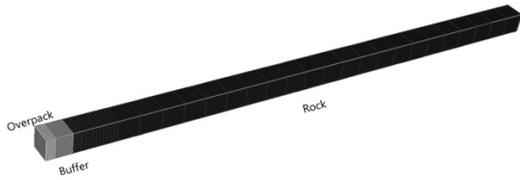


Fig. 5. Modeling process for the THM analysis using TOUGH2 and FLAC3D

물성 변화가 결과에 미칠 수 있는 영향을 고려할 수 있게 된다. TOUGH2 계산을 통해 생성된 output file에서 각 zone의 포화도와 수압을 구하고 각 계산 시간별 FLAC의 초깃값으로 입력될 수 있도록 하였다. FLAC에서는 온도 상승에 따른 열용력, 변위, 주응력 변화, 소성영역의 발생과 같은 역학적 변화를 관찰하였으며 계산된 온도, 공극률 변화 등은 TOUGH2의 초기자료로 제공될 수 있도록 하였다. 열-수리해석(TH)은 TOUGH2 EOS3 모듈을 이용하였다. Fig. 5는 본 연구에서 개발된, 두 코드를 이용한 THM 해석의 흐름도를 보여준다. 이러한 순차적인 THM 해석 기법은 시간 경과에 따른 열적, 수리적, 역학적 거동 변화가 야기할 수 있는 매질의 물성변화를 효과적으로 반영할 수 있는 장점이 있다. THM 연동 해석을 위해 동일한 격자망과 물성을 배치하였으며 TOUGH2-FLAC 간 자료 공유를 위해 입력 파일이 자동 생성될 수 있도록 하였으며 이를 위해 여러 개의 Fortran 프로그램과 Fish 프로그램이 작성되었다.

#### 나. 모델 격자망

본 연구에서는 TOUGH-FLAC을 이용한 1차원 해석을 실시하였다. Fig. 6은 1차원 해석에 사용된 격자망을 보여준다. 완충재에서의 THM 거동에 초점을 맞추어 비교할 수 있도록 Task B2의 모든 연구팀은 완충재와 암반 사이의 모래층은 고려하지 않았다. 처분공 주변의 격자 간격은 조밀하게 하였으며 시험구간에서 먼 경우 상대적으로 큰 격자가 놓일 수 있도록 하였다. Dirichlet 경계조건을 사용하기 위해 경계면에 0.1 m 두께의 격자를 배치하였으며 boundary 요소에는 1e20 m<sup>3</sup>의 부피를 할당하여 온도와 압력이 일정하게 유지될 수 있도록 하였다. 해석에 사용된 격자망의 요소 수는 61개이다.



**Fig. 6.** Model mesh for one-dimensional THM analysis for Task B2

#### 다. 초기조건 및 경계조건

초기 온도는 15°C로 설정하였으며 암반에서 작용하는 현저응력은 고려하지 않고 열응력에 의한 응력변화만을 계산하였다. 공기압은 1.013 MPa을 초깃값으로 가정하였으며 완충재에서의 초기 포화도는 0.5, 암반에

서의 초기 포화도는 1.0으로 두었다.

#### 라. 해석에 사용된 물성

Overpack, 완충재, 암반을 포함한 재료의 열-수리-역학적 물성은 JAEA 연구팀에 의해 제공되었으며 Table 3과 같다. 암반과 overpack은 탄성매질로 고려하였으며 소성거동이 예상되는 완충재는 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 본 해석에서는 물성변화에 따른 영향을 고려하기 위해 계산 과정 중 포화도의 변화에 따른 열적, 역학적 물성의 변화가 지속적으로 반영될 수 있도록 하였다. Table 4는 JAEA에서 제공된 함수비에 따른 암반과 완충재에서의 물성 변화식을 보여준다. 시간의 경과에 따라 함수비가 변화하며 이에 따라 물성이 변화할 수 있기 때문에 모델링에서는 Table 4의 식을 이용하여

**Table 3.** Material properties of buffer, rock, and overpack

	buffer	rock	overpack
Mechanical	Model type	M-C	Elastic
	Bulk modulus (Pa)	9.08e7	2.33e10
	Shear modulus (Pa)	4.19e7	1.07e10
	Cohesion (Pa)	0	-
	Friction angle	16.6	-
	Density (kg/m <sup>3</sup> )	1,600	2,480
	Poisson's ratio	0.3	0.25
Thermal	Dry thermal conductivity (w/m·K)	0.44	0.579
	Wet thermal conductivity (w/m·K)	2.0	1.231
	Specific heat (J/kg·K)	767	833
	Thermal expansion coeff.	1e-6	1.34e-5
Hydraulic	Permeability (m <sup>2</sup> )	4e-20	1.33e-15
	Porosity	0.403	0.386
Van Genuchten	$\alpha$ (1/m)	8e-3	9.928e-3
	n	1.6	2.01

**Table 4.** Variation of material properties with the variation of water content

Material	Properties	Equation
Rock	Thermal conductivity(w/mk) *	0.579+0.0197w
	Specific heat (J/kgk) *	(62.6+3.2w)/(100+w)
	Relative permeability*	S <sup>4</sup>
Buffer	Thermal conductivity(w/mk) *	0.44+0.038+6.14e-3w <sup>2</sup> -1.69e-4w <sup>3</sup>
	Specific heat (J/kgk) *	(34.1+4.18w)/(100+w)
	Young's modulus(MPa) *	84.34-3.744w
	Relative permeability*	S <sub>i</sub> <sup>1.3</sup>

(\*) material properties adjusted during the iteration

함수비에 따른 물성 변화를 고려하는 것이 필요하다. 완충재 및 암반에서의 함수율 변화는 TOUGH2를 이용한 TH 해석에서 얻어지며 FLAC의 FISH 함수를 이용하여 계산 시 물성 변화가 반영될 수 있도록 하였다. 완충재의 물성은 다음과 같다.

a. 완충재의 역학적 물성

해석에서 완충재는 Mohr-Coulomb 소성 모델을 사용하여 해석하였다. 점착력은 0으로 가정하였으며 내부마찰각은 16.7°, Biot 상수는 1.0으로 가정하였다.

b. 완충재의 열적 물성

완충재의 열전도도(KT)는 함수비(w)에 따라 달라지며 함수비와 열전도도의 관계는 다음 식 (1)과 같다.

$$KT=0.444+0.038w+6.14e-3w^2-1.69e-4w^3 \quad (1)$$

완충재의 초기 함수비는 12.5%이며, 따라서 초기 열전도도는 1.2458 w/m·k이다. 완전 건조 상태의 완충재 열전도도는 0.44w/m·k이며 완전히 포화된 상태에서의 완충재 열전도도는 2.0w/m·k로 계산된다.

c. 완충재의 수리물성

초기 상태에서 완충재의 투수계수(permeability)는 4e-20 m<sup>2</sup>이며 모세관압(capillary pressure)의 경우 Van Geuchten 함수를 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$P_c = P_o [S_e^{-1/a} - 1]^{1-a} \quad (2)$$

$$P_o = \frac{1}{\alpha} \quad (3)$$

$$a = 1-1/n \quad (4)$$

여기서 Se는 유효 포화도이다. Table 3에서 α는 8e-3(1/m), n 은 1.6이므로 Po와 a는 각각 1.22 MPa와 0.375로 계산된다. 해석에서는 최대 모세관압을 10 MPa로 가정하였다. 완충재의 상대 투수계수(relative permeability)는 Corey 함수로 가정하며 다음과 같이 계산된다.

$$RP_{liq} = S^4 \quad (5)$$

$$RP_{gas} = (1-S^2)(1-S^2) \quad (6)$$

$$S = (S_1 - S_{lr}) / (1 - S_{lr} - S_{gr}) \quad (7)$$

여기서 RP<sub>liq</sub>와 RP<sub>gas</sub>는 액체와 기체의 상대 투수계수, S<sub>1</sub>은 포화도, S<sub>lr</sub>은 물의 잔류 포화도(residual liquid saturation), S<sub>gr</sub>은 가스의 잔류 포화도(residual gas saturation)를 의미한다. 본 해석에서 S<sub>lr</sub>=S<sub>gr</sub>=0으로 가정하였다.

암반의 물성은 다음과 같다.

a. 암반의 역학적 물성

암반은 탄성체로 가정하여 탄성계수와 포아송비를 이용하여 계산된 Bulk modulus와 Shear modulus 는 각각 1.046 GPa 와 765 MPa이다. 암석의 건조 시 밀도는 1,354 kg/m<sup>3</sup> 이며 공극률은 44.82% 이다. 초기 조건에서 암반은 완전히 포화되어 있는 것으로 가정하였으며, 암반의 Biot 상수는 1.0으로 설정하였다.

b. 암반의 열적 물성

건조 상태에서 암반의 열전도도는 0.579 w/m·K이며 완전 포화상태에서는 1.231 w/m·K이다. 함수비의 변화에 따라 암반의 열전도도는 선형적으로 변화하는 것으로 가정하였다.

c. 암반의 수리적 물성

암반의 초기 함수비는 33.1%이다. 암반의 수리전도도는 2.8e-8 m/sec 로 측정되었으며 모델링에서는 이 값을 사용하였다. 20°C에서 물의 dynamic viscosity가 0.001002kg/m<sup>2</sup> 이므로 암반의 투수계수는 2.858e-15m<sup>2</sup> 로 계산된다. 암반의 Van Geuchten parameter α는 9.928e-3(1/m) 이므로 Po = 0.987MPa로 계산된다. 완전 포화된 상태를 가정하는 초기 조건에서 암반의 모세관압은 0이다.

$$P_o = \frac{1}{9.928e-3} = 100.7 \text{ m} = 0.987 \text{ MPa} \quad (8)$$

Overpack의 물성은 다음과 같다.

a. 역학적 물성

히터를 감싸는 용기는 탄성체로 가정하며 역학적 물성은 JAEA에서 제공된 탄성계수 200GPa, 포아송비 0.3이 사용되었다.

b. 열적 물성

용기의 열전도도는 53 w/m·K, 비열은 460 J/kg·K, 열팽창계수는 1.64e-6을 사용하였다. TOUGH2 해석에서는 용기의 온도를 일정하게 유지하도록 하기 위해 용기를 구성하는 요소의 부피에 1e20을 곱하여 사용하였

다. Fig. 3에서와 같이, 용기의 온도를 10일(864,000초) 동안에 15°C에서 100°C까지 85°C를 높이기 위해서 필요한 열량은 다음 식과 같이 계산할 수 있다.

$$\dot{Q} = V\rho C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (9)$$

$$= 1e20 \times 7800 \times 460 \times 85/864000 = 3.53e22 \text{ (J/sec)}$$

c. 수리적 물성

용기에서의 유체유동은 없는 것으로 가정하여 매우 낮은 투수계수 값을 할당하여 모델링을 수행하였다.

4. THM 해석 결과

4.1 물성 변화의 영향

Fig. 7은 FLAC을 이용한 THM 해석에서 얻어진 최대 주응력의 시간에 따른 변화를 보여준다. 완충재의 물성이 변하지 않는 경우와 함수비에 따라 다음 식 (10)에서처럼 변화하는 경우를 비교하였다.

$$E = 84.34 - 3.744w \text{ (MPa)} \quad (10)$$

Fig. 7에서와 같이 탄성계수와 함수비의 관계를 고려하는 경우 상대적으로 낮은 응력값을 나타내었다. 함수비에 따른 완충재의 물성을 고려하는 경우 결과에는 큰 차이가 나타날 수 있음을 알 수 있다. 이는 재료의 열전도도, 비열, 수리전도도, 탄성계수가 함수비에 따라 변화하는 현상을 모델링에서 구현하는 것이 중요하다는 것을 의미한다.

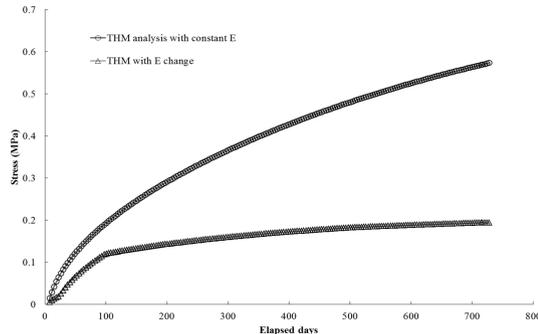


Fig. 7. Variation of stress from FLAC calculation

4.2 거리에 따른 변화

Fig. 8은 히터 중심에서 암반쪽으로 거리에 따른 시간대별 온도 변화를 보여준다. 시간 경과에 따라 히터 주변 온도는 상승하며 격자망의 경계인 25 m에서 15°C로 수렴함을 알 수 있다. Fig. 9는 완충재에서의 포화도 변화를 보여준다. 초기 포화도 0.5에서 시간 경과에 따라 포화도가 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 10은 완충재에서의 수압 변화를 보여준다. 초기에는 낮은 포화도에 기인하는 모세관압(약 3.5MPa)이 크게 작용하며 포화도의 증가에 따라 서서히 감소함을 알 수 있다. Fig. 11은 거리에 따른 변위 변화를 보여준다. 격자망 경계 고정되어 있고 온도 증가에 따른 열팽창에 의해 히터 부근에서는 최대 8 mm까지 바깥쪽으로 변위가 발생함을 알 수 있다.

4.3. 시간에 따른 변화

Fig. 12~16은 여러 지점에서의 시간에 따른 온도, 포

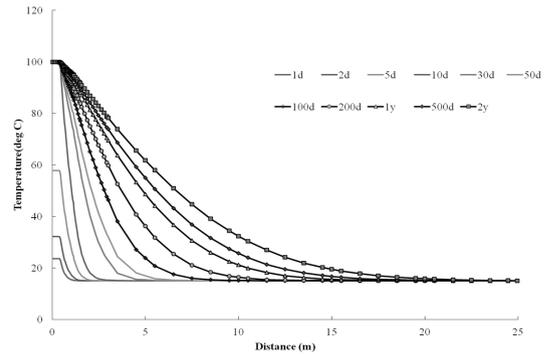


Fig. 8. Temperature along a horizontal line at different times

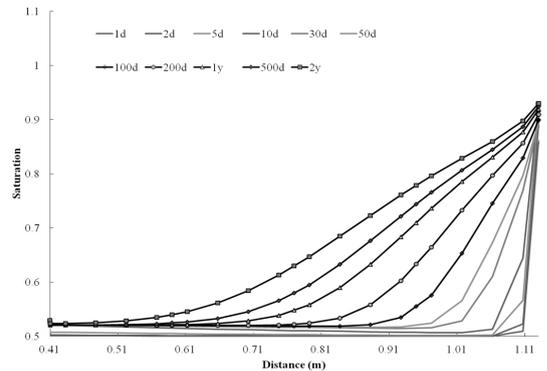


Fig. 9. Variation of saturation along the horizontal line at different time

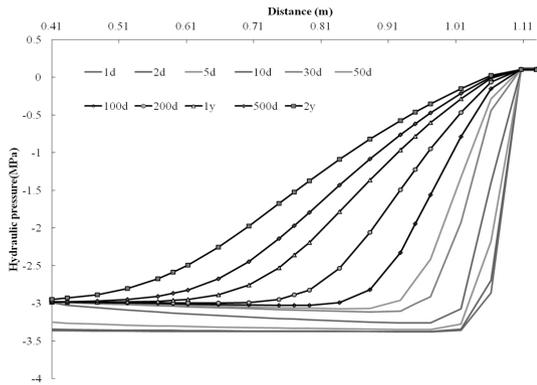


Fig. 10. Variation of hydraulic pressure in buffer

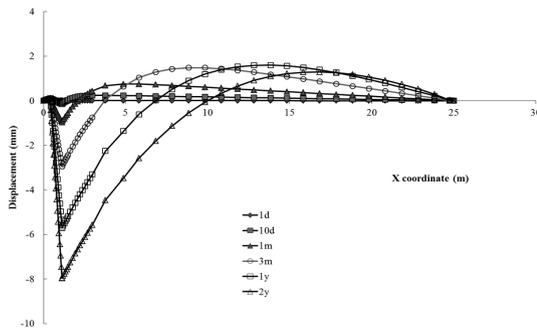


Fig. 11. Variation of displacement along X axis

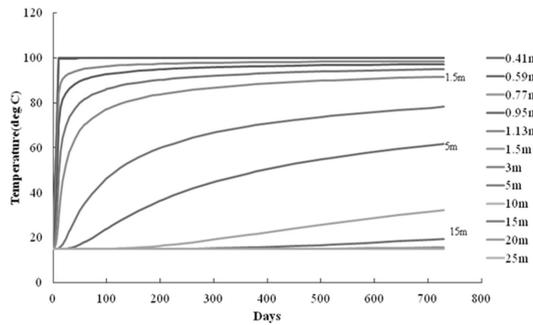


Fig. 12. Variation of temperature with time

화도, 함수비, 수압변화 및 변위변화를 보여준다. 완충재에서의 함수비는 포화도( $S_w$ )와 공극률( $\phi$ ), 밀도( $\rho$ )를 이용하여 다음 식과 같이 계산된다.

$$w = \frac{\phi S_w}{\rho} \quad (11)$$

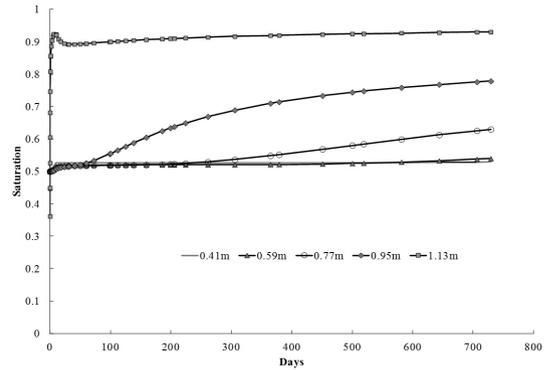


Fig. 13. Variation of saturation in buffer with time

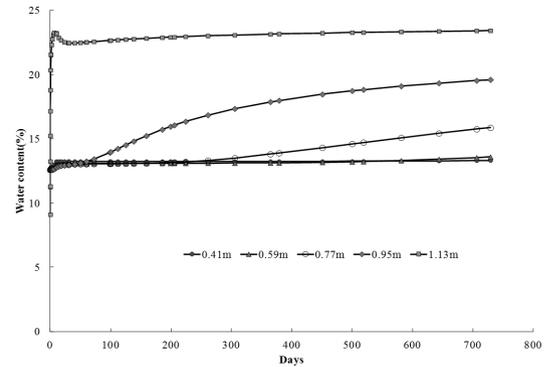


Fig. 14. Variation of water content in buffer with time

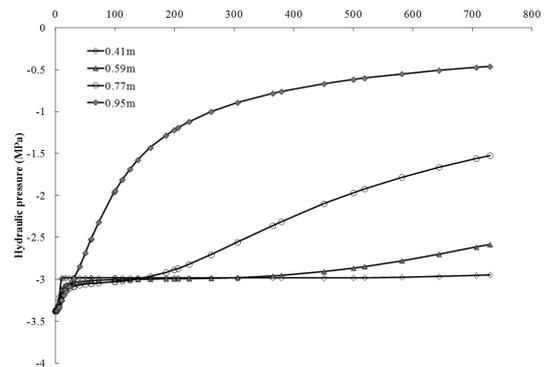


Fig. 15. Variation of hydraulic pressure with time

#### 4.4 해석 결과의 비교

Decovalex-2015 Task B2에 참여한 각 연구팀은 JAEA에서 제공하는 물성자료 및 현장시험 개요도를 바탕으로

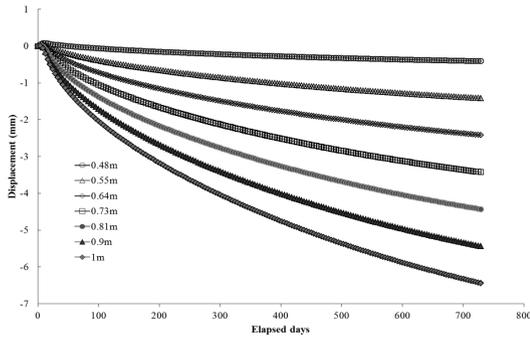


Fig. 16. Displacement change with time

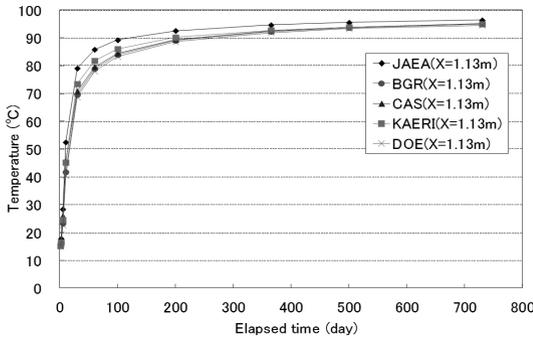


Fig. 17. Comparison of the analytical results on variation of temperature at the output point (X=1.13m) (Sugita et al., 2014)

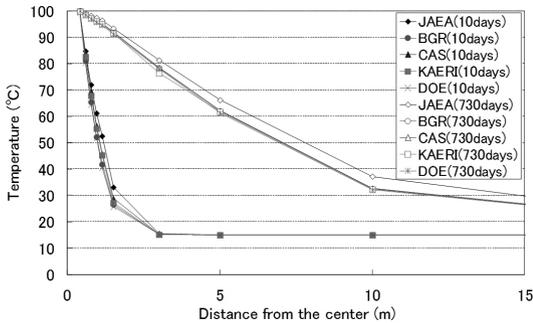


Fig. 18. Comparison of the analytical results on variation of temperature at the output point (X=1.13m) (Sugita et al., 2014)

로 독자적인 해석을 수행하고 그 결과를 비교하였다. Fig. 17은 완충재와 암반이 접하는 지점에서의 시간에 따른 온도변화에 대한 결과를 비교하여 보여준다. Fig. 18은 히터 가열 후 10일, 2년 경과한 시점에서의 거리에 따른 온도 변화를 보여준다. 각 연구팀의 결과는 유

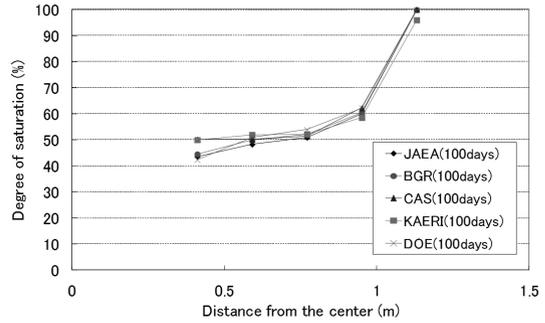


Fig. 19. Comparison of the analytical results on degree of saturation in the buffer after 100 days (Sugita et al., 2014)

사하게 나타났으며 일부 차이는 완충재와 암반에서의 포화에 따른 열전도도와 비열과 같은 물성의 변화를 고려하였는지에 따라 발생한 것으로 판단된다. Fig. 19는 히터 가열 후 100일이 경과한 시점에서, 완충재 구간에서의 거리에 따른 포화도 변화를 보여준다. 각 연구팀의 결과가 대체적으로 유사함을 알 수 있다.

### 5. 결론

이산화탄소 지중저장, 고준위 방사성폐기물 처분, 심부 지하자원개발, 비전통에너지 자원개발, 지중 열에너지 저장, 지열개발, 압축공기저장 등 심부 암반을 활용하는 다양한 프로젝트에서 열-수리-역학적 복합거동의 예측은 암반의 장기 안전성 및 안정성 평가를 위해 필수적이다. 특히, 수만 년 이상의 장기적인 안전성을 고려해야 하는 고준위폐기물 처분장 주변에서 예상되는 열-수리-역학적 복합거동에 대한 해석은 부지선정, 처분장 설계 및 운영, 폐쇄 후 감시를 위해 매우 중요하다. 본 연구에서는 열-수리 해석 코드로 널리 사용되고 있는 TOUGH2 코드와 역학 해석에 뛰어난 FLAC 코드를 결합하는 방법으로 효과적으로 THM 해석을 수행하는 기법을 개발하였다. 본 연구를 통해 개발된 THM 해석 기법에서는 TOUGH2 코드를 이용하여 열-수리 해석을 실시하고 시간에 따른 포화도 및 공극수압 변화를 FLAC으로 가져온 후 포화도 변화에 따른 재료의 열적, 역학적 물성 변화를 반영하여 열-역학 해석을 실시하였다. 개발된 THM 해석기법을 DECOVALEX-2015 Task B2에서 해석 대상으로 고려하고 있는 수직 처분공 개념에 대하여 적용하였으며 해석 결과를 해외 전문가들의 결과와 비교함으로써 해석 기법의 타당성을 검증하

였다. 1차원 해석 결과에 대한 비교를 통해 대체적으로 일치하는 결과를 얻을 수 있었으며 일부 상이한 결과는 초기조건 및 물성의 변화에 대한 고려 여부에 따라 나타난 것으로 보인다. 향후 추가적인 연구를 통해 해석 기법을 보완해 나갈 계획이다.

## References

1. Andersson, J.C., 2007. Äspö Pillar Stability Experiment. Final report. SKB TR-07-01.
2. Choi, H.J., Lee, J.Y. and Choi, J.W., 2008, Korean Reference HLW Disposal System, Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI/TR-3563/2008, pp. 23-35.
3. Hudson, J.A., Jing, L., 2013, Demonstration of coupled models and their validation against experiment: The current phase DECOVALEX 2015, Rock Characterization, Modelling and Engineering Design Methods - Proceedings of the 3rd ISRM SINOROCK, Symposium, pp. 391-396.
4. JNC, 2000, H12 project to establish technical basis for HLW disposal in Japan, JNC TN 1410 2000, JAEA, Tokai, Japan.
5. Kwon, S., Lee, D., Jeon, S., Choi, H. J., 2013, Thermo-mechanical coupling analysis of APSE using submodels and neural networks, Journal of rock mechanical and geotechnical engineering, Vol.5, pp. 32-43.
6. Lee, J.Y., Cho, D.K., Choi, H.J. and Wang, L.M., 2011, Analyses of Disposal Efficiency Based on Nuclear Spent Fuels Cooling Time and Disposal Tunnel/Pit Spacing for the Design of a Geological Repository, Progress in Nuclear Energy 53, pp. 361-367.
7. Pruess, K., 1999, TOUGH2 User's Guide, Lawrence Berkeley National Laboratory.
8. Rutqvist, J., Wu, Y.S., Tsang, C.F., Bodvarsson, G., 2002. A modeling approach for analysis of coupled multiphase fluid flow, heat transfer, and deformation in fractured porous rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.39, pp.429-442.
9. Sugita, Y., Lee, C., Maßmann, J., Pan, P., and Rutqvist, J., 2014, Step 1 of the task B2 of the Decovalex-2015, Decovalex-2015 Task B2, interim report.
10. Tsang, C.F., Barnichon, J.D., Birkholzer, J., Lid, X.L., Liu, H.H., Sillene, X., 2012, Coupled thermo-hydro-mechanical processes in the near field of a high-level radioactive waste repository in clay formations, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.49, pp.31-44.

### 권상기



1987년 서울대학교 자원공학과 공학사  
1989년 서울대학교 자원공학과 공학석사  
1996년 University of Missouri-Rolla  
Mining Eng. 공학박사

Tel: 032-860-7554  
E-mail: kwonsk@inha.ac.kr  
현재 인하대학교 에너지자원공학과  
부교수

### 이창수



2004년 서울대학교 공과대학 지구환경  
시스템공학부 공학사  
2012년 서울대학교 공과대학 에너지시  
스템공학부 공학박사

Tel: 042-868-8162  
E-mail: leecs@kaeri.re.kr  
현재 한국원자력연구원 방사성폐기물  
처분연구부 선임연구원

### 박승훈



2012년 조선대학교 공과대학 에너지자  
원공학과 공학사  
2014년 인하대학교 대학원 에너지자원  
공학과 공학석사

Tel: 032-860-7550  
E-mail: wartrip@naver.com  
현재 인하대학교 에너지자원공학과 박  
사과정