J. of the Korean Radioactive Waste Society
Vol.5(4), P. 323-338, Dec. 2007.

[Technical Paper]

Status of the International Cooperation Project, DECOVALEX for THM Coupling Analysis

THM 복합거동 해석을 위한 DECOVALEX 국제공동연구 현황

Sangki Kwon, Won-Jin Cho and Jong-Won Choi
Korea Atomic Energy Research Institute, 1045 Daedeokdaero, Yuseong-gu, Daejeon

kwonsk@kaeri.re.kr

권상기, 조원진, 최종원
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

(Received June 28, 2007/Approved August 6, 2007)

Abstract

For the assessment of the performance and safety of a deep underground radioactive repository system, the thermal, hydraulic, mechanical, and chemical behaviors and their coupling should be studied. In order to analyze the THMC coupling behavior more effectively, which requires complex mathematical models and modelling techniques, DECOVALEX international cooperation project was launched in 1992. Since its beginning, four major stages of the project were successfully completed and THMC modelling techniques for various conditions could be developed. In this study, the current status and major achievements from the project were reviewed and possible benefits of the participation to the project were discussed.

Keywords : DECOVALEX, THMC coupling, underground repository, geological disposal, code validation, international project

요 약

방사성폐기물 심지층 처분 시스템의 성능과 안정성을 평가하기 위해서는 처분장 환경에서의 열적, 역학적, 수리적, 화학적 거동에 대한 이해와 함께 이들 상호간의 영향을 파악하여야 한다. 복잡한 수학 모델과 모델링 기법을 요하는 THMC 복합거동에 대한 해석을 보다 효과적으로 수행하기 위해 DECOVALEX 국제공동연구가 진행되고 있다. 1992년 이후 4단계에 걸친 국제공동연구를 통해 다양한 조건에서의 THMC 복합거동을 해석하는 기법이 개발되어 왔다. 본 연구에서는 DECOVALEX의 주요 내용 및 현황을 정리하고 향후 참여방안 및 참여효과에

대해 논의한다.

중심단어 : DECOVALEX, THMC 복합거동, 지하처분장, 지층처분, 코드검증, 국제공동연구

Ⅰ. 서 론

고준위 방사성폐기물을 생태계로 부터 영구 격리시키기 위한 방안으로 세계 각국에서는 지하 수백 미터에 위치하는 신선한 암반 내에 폐기물을 처분하는 심지층 처분 개념이 연구되고 있다. 고준위폐기물을 지하 심부 암반 내에 안전하게 처분하기 위해서는 처분장이 위치하는 심부 지하 환경에서의 암반과 지하수 및 핵종의 상호반응 특성을 고려한 처분장 설계와 이에 따른 안전성 평가가 실시되어야 한다. 처분시스템의 안전성 분석을 위해서는 심부 지하 암반의 안정성, 응력변화, 처분된 고준위폐기물로 부터 발생되는 붕괴열의 영향, 지하수 유동, 지화학적 변화 등이 상호작용하는 열적(T)-수리적(H)-역학적(M)-화학적(C) 복합거동(coupling process)에 대한 이해가 요구된다. 복합거동이란 한 거동에 의해 다른 거동이 영향을 받음으로써 단일 거동을 고려했을 때와는 다른 복잡한 변화양상을 보여주는 것을 의미한다. Fig.1은 지층처분 환경에서 예상되는 주요 THMC 복합거동을 보여준다. 복합거동에 관여하는 여러 현상이 비선형적인 거동을 보이며 구성방정식에 필요한 인자의 수가 많기 때문에 처분장 주변에서 예상되는

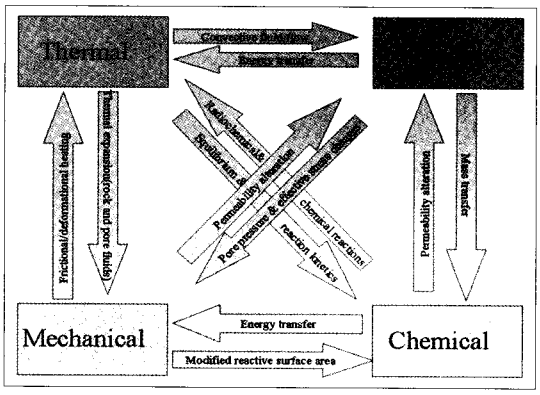

Fig. 1. THMC coupling process

복합거동을 정확히 해석하는 것은 매우 어렵다. 특히 수 만년 이상의 장기간의 안전성에 대한 평가가 요구되는 처분 환경에서 THMC 사이의 복잡한 복합거동의 영향을 정확히 파악하기 위해서는 물리, 화학, 역학, 수리, 생물학과 같은 여러 분야에 대한 통합적 이해가 필요하며 이를 표현할 수 있는 수학 모델과 컴퓨터 모델링 기법의 개발이 요구된다. 심지층 처분을 고려하고 있는 세계 각국에서는 THMC 거동을 이해하기 위해 자체 실험실 실험, 현장실험을 바탕으로 다양한 수학 모델과 모델링 기법이 제안하였으나 장기간에 걸쳐 발생하는 복합거동의 복잡성 때문에 만족할 만한 성과를 거두지 못하였다. 이에 따라 각국에서 제안된 모델과 해석 기법에 대한 전문가 상호검증과 관련 경험 공유, 대규모 현장 및 실험실 실험 결과의 공유 필요성이 부각되었다.

이러한 흐름 속에서 THMC 복합거동 해석 기술 개발을 위한 국제공동연구인 DECOVALEX (DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments) 프로젝트가 추진되었다. 1992년 DECOVALEX-I이 착수된 후 현재까지 DECOVALEX-II, DECOVALEX-III, DECOVALEX-THMC로 이어져 진행되고 있으며 2007년 현재 DECOVALEX-2011이 계획 중에 있다. DECOVALEX 프로젝트에서는 방사성폐기물의 지층처분을 위한 완충재와 균열암반에서의 THM process를 모사하는 수학적 모델 및 컴퓨터 코드를 개발하고 이를 실험실과 현장 시험을 통해 검증하기 위해 다음과 같은 목표를 설정하였다.

- THM 모델링을 위한 컴퓨터 코드의 개발 지원
- THM 모델링을 위한 알고리즘의 개발 및 적용에 관한 연구
- 모델 계산 결과와 현장 및 실험실 시험 결과와의 비교
- 코드 개발을 위한 새로운 시험 설계

- THM 모델링을 성능 및 안전성 평가에 적용하기 위한 연구

4-5년 단위로 4단계에 걸쳐 진행되면서 DECOVALEX 프로젝트의 연구대상의 폭과 심도는 확장되어왔다. 초기 단계에서 수행되었던 TH, TM, HM 해석은 THM 해석으로 발전한 후 현재 화학적 거동을 포함하는 THC와 THMC 거동이 모델링을 통해 연구되고 있다. 결정질암에서의 연구는 벤토나이트 완충재의 영향을 고려한 해석으로 확장되었으며 또한 점토암에 대한 해석이 추가되었다. 균질 암반에서 터널 주변에 발생하는 암반 손상대의 영향을 고려한 해석도 현재 수행되고 있다. Table 1은 각 단계별 주요 과제를 보여준다.

DECOVALEX 프로젝트에 참가하는 기관은 일정액의 참가비를 부담해야하며 운영위원회에 위원을 추천하여 프로젝트의 운영에 관여할 수 있다. 또한 국내외 산학연에서 연구팀을 구성하거나 자체 연구팀으로 관심있는 연구과제에 참여할 수 있다. DECOVALEX 프로젝트 추진 체계는 Fig. 2와 같으며 6~8개월마다 개최되는 정기 모임을 포함한 전반적인 프로젝트 관리는 스웨덴 SKI와 KTH에 의해 이루어진다. 운영위원회는 프로젝트의 목적에 부합하는 BMT(Bench-Mark Test)와 TC(Test Case)를 설정한다. BMT는 상이한 해석 기법에 대한 비교를 위해 제안된 가상의 문제이며 TC는 실제 실험실 실험이나 현장 실험에 대한 것으로 구분할 수 있다. 참가 연구팀은 독자적 방법과 모델을 이용한 해석을

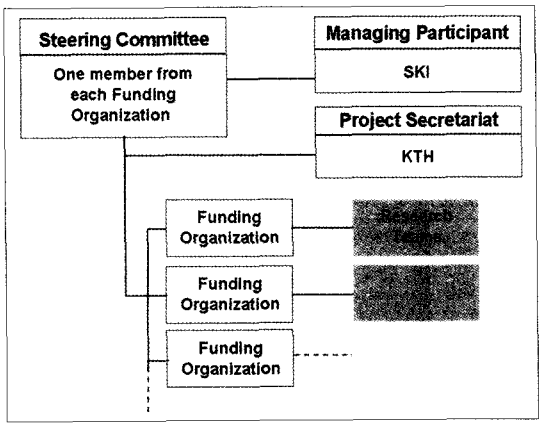

Fig.2. DECOVALEX organization.

Table 1. Tasks studied in DECOVALEX project

Phase (Period)	Task name	Task
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
D-II (1995-2000)	TC 6	Hydraulic injection test in a borehole
	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	FEBEX 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

실시하고 이를 운영위가 정기적으로 개최하는 워크숍을 통해 발표하게 된다. 각 연구팀의 해석 결과는 다른 연구팀에 의해 상호 검토되어지며 이를 통해 연구팀간 심도있는 정보의 교류가 가능하도록 하고 있다. 프로젝트에 참여하는 연구팀은 THM 거동 이해에 필요한 현장시험, 실험실 시험 결과를 공유하며 특별 주제를 선정하여 의견을 교환하기도 한다. 이러한 공동 연구를 통한 결과 비교는 THM 거동의 이해 뿐 아니라 각 연구팀의 접근법, 개념모델 및 사용 코드의 장, 단점 파악에 도움을 주게 된다. Table 2는 DECOVALEX 프로젝트에 참여했던 국가와 기관을 보여준다.

국내 처분장 개념 설계 및 안전성 평가를 통한 처분개념 성능 평가를 위해 THM 복합거동 해석 기법의 개발은 중요한 사안으로 여겨진다. THMC 복합거동에 대한 해석 기법의 확보는 현재 활발하게 추진되고 있는 중저준위 처분장을 포함한 방사성폐기물 처분뿐 아니라 저온 지하가스저장고, 지열개발, 석유비축기지, 고체 폐기물 처분, 지하구조물의 건설, 이산화탄소 격리, 심부 광산 개발, 사면 해석 등에서 요구되는 복합거동 해석에도 기여할 수 있을 것이다. 해석기법을 개발하기 위해서는 실험실 및 현장시험 결과와의 비교를 통한 검증이 필수적이다. 현장시험의 경우, 해석기법의 검증에 활용될 수 있을 정도의 자료를 얻기 위해서는 적합한 시험공간과 충분한 예산의 확보, 장기간의 시험 기간이 필요하다. THM 복합거동 해석 기법 개발 시, 기 개발된 기법과의 상호 비교 및 외국의 얻어진 실험실 및 현장시험 결과를 이용하여 검증할 수 있으면 보다 효과적인 기술 개발이 가능할 것이다. 현재 국내에서는 완충재의 THM 거동을 파악하기 위한 공학적 규모의 실내 실험 및 THM 해석 기법의 개발 연구가 한

Table 2. Member countries and organizations in DECOVALEX I,II,III

Country	Funding organizations	Acronym	Research teams
France	National Agency for Radioactive Waste Management	ANDRA	INERIS-LAEGO, Ecole des Mines de Nacy(EMN)
			Ecole Polytech., G3S
	Commisariat a l'Energi Atomique de Cadarache	CEA	CEA/DM25/SEMT
	Institute for Protection and Nuclear Safety	ISRN	Paris school of Mines
			CEA/DM25/SEMT
Germany	Federal Institute for Geosciences and Natural Resources	BGR	U. of Tuebingen
			U. of Hannoveer
			Federal Institute for Geosciences and natural Resources
Canada	Canadian Nuclear Safety Commission	CNSC	Canadian Nuclear Safety Commission
	Ontario Power Generation	OPG	Atomic Energy of Canada
USA	Department of Energy	DOE	Sandia National Laboratory
			Lawrence Berkeley National Lab.
	Nuclear Regulatory Commission	NRC	CNWRA, Southwest Research Institute
Spain	Empresa Nacional de Residoos Radioactivds	ENRESA	U. Politecnica de Catalunya
			U. Politecnica de Valencia
EU	European Commission	EU	U. of Edinburgh (UK)
			Royal Institute of Technology (Sweden)
			INERIS-LAEGO, Ecole des Mines de Nancy (France)
			U. Politecnica de Valencia (Spain)
			CEA/DM25/SEMT (France)
			Chalmers U. of Technology (Sweden)
Japan	Japan Nuclear Cycle Development Institute	JNC	Tokai Works
			Hazama Corporation
			Kyoto University
UK	Nires Ltd.	NIREX	U. of Birmingham
Sweden	Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.	SKB	Calmers U. of Technology
			Clay Technology AB
	Swedish Nuclear Power Inspectorate	SKI	Lawrence Berkeley National Lab.
			Royal Institute of Technology
Finland	Radiation and Nuclear Safety Authority	STUK	Technical U. of Helsinki
			Uppsala University

국원자력연구원에 의해 수행되고 있으며 이와 함께 2006년 11월 준공된 지하처분연구시설(KAERI Underground Research Tunnel, KURT)을 이용한 현장시험도 활발하게 준비되고 있다. 원자력연구원 부지 안의 화강암반에 건설된 255 m 길이의 KURT에서는 히터시험, 용질이동시험, 지하수 및 지하수 화학 시험과 같은 시험들이 준비되고 있다.

기 발표된 DECOVALEX 관련 연구논문의 경우[1,3-8], 실험의 개요 및 코드 검증 결과를 기술하는데 중점을 두고 있으므로 국내 THM 해석 기법의 검증에 활용하는데 필요한 제반 물성 및 모델링 조건들을 얻는데는 제약이 있다. 따라서 현 시점에서 대규모 현장시험을 바탕으로 THMC 복합거동을 모사하기 위한 국제 공동연구인 DECOVALEX 프로젝트의 현황을 분석하고 참여방안을 검토하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 현재까지 수행된 DECOVALEX 국제공동연구의 주요 내용을 정리하고 향후 추진 방향에 대해 소개하고 한국의 참여 방안에 대해 논의하고자 한다.

Ⅱ. DECOVALEX I (1992-1995)

1992년 착수된 DECOVALEX I에는 7개 국가(캐나다, 프랑스, 영국, 미국, 일본, 스웨덴, 핀란드)에서 9개 기관이 참여했으며 중국과 러시아는 옵저버 자격으로 참여했다. 3종류의 BMT와 6개의 TC에 대한 해석이 다양한 코드를 이용하여 실시되었다[1]. DECOVALEX I을 통해 얻어진 주요 연구성과들은 1995년 국제 학술지인 Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech.에서 특집호로 발표되었다[10].

가. BMT1

지하 500 m 균열 암반에 위치한 처분장에서의 원계영역(far-field) THM 거동을 모사하기 위해 Fig. 3과 같은 2차원 모델이 제안되었다. 모델의 크기는 3 km x 1 km이며 2 set의 절리군이 직각으로 존재하며 절리 간격은 100 m, 50 m, 25 m인 경우를 가정하였다[2].

나. BMT2

0.75 m x 0.5 m 크기의 암석 블록에 2개의 수직절리와 2개의 수평절리가 존재하는 경우 절리면과 암석의 THM 거동을 예측하기 위해 Fig. 4와 같은 2차원 모델이 제안되었다.

다. BMT3

스웨덴 Stripa 광산에서 조사된 균열망을 가진 50 m x 50 m 크기의 블록에서의 THM 거동 해석이 실시되었다. BMT3 에서는 Fig. 5와 같은 경계조건에서 히터에서 발생하는 열에 따라 6580개의 균열이 존재하는 처분터널 주변에서의 THM 거동을 모사하기 위해 제안되었다.

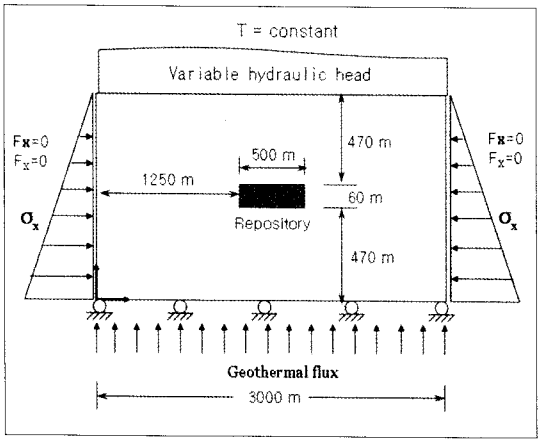

Fig. 3. Thermal, hydraulic and mechanical boundary conditions of BMT 1, D-I[11].

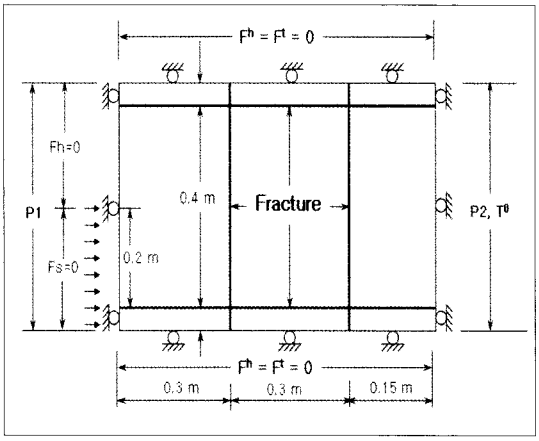

Fig. 4. Thermal, hydraulic and mechanical boundary conditions of BMT2, D-I[11].

라. TC1

단일 절리를 포함하고 있는 암석 시편을 Fig. 6과 같이 설치하고 절리를 따라 유체를 주입하면서 외부에서 작용하는 힘의 변화에 따른 절리변형, 유체의 이동속도 및 응력 변화를 측정할 수 있는 시험을 실시하고 이를 모델링 결과와 비교하도록 하였다.

Ⅲ. DECOVALEX II (1995-1999)

1995년 시작된 DECOVLAEX II에서는 7개국(캐나다, 프랑스, 영국, 스페인, 일본, 스웨덴, 핀란드) 11개 기관이 참여하였으며 다음과 같은 연구 목표들이 선정되었다[3].

i) 균열 암반과 완충물질(buffer)에서의 THM 연동 거동에 대한 이해 증진

ii) 균열 암반과 완충물질의 THM 모델링을 위한 수학 모델 적용

iii) 현장 시험에 대한 코드의 적용성 평가

iv) 시험 자료의 공유 및 암석 절리의 거동 이해 증진

v) THM 복합거동과 성능평가

이를 위해 대규모 현장시험을 포함하는 4개의 Task 가 제시되었으며 이에 대한 연구팀의 결과를 비교, 검토하기 위해 7번의 모임이 개최되었다. DECOVALEX II의 연구성과들은 2001년 Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech.에서 특집호로 발표된 바 있다[12].

가. Task 1

영국 Nirex에 의해 제안된 Task 1은 영국 Sellafield 수직갱 굴착 시 암반의 거동과 펌핑시험에 대한 수리-역학적 복합거동 해석이 수행되었으며 손상대에 대한 연구도 수행되었다. 직경 5.4 m의 Sellafield 수직갱은 발파기법으로 굴착되었으며 한번 발파로 2.5 m 굴진장을 얻었다. 지하수 유입량이 25 l/min 이상인 경우 그라우팅이 실시되었으며 암반의 보강을 위해 암반의 상태에 따라 록볼트, 와이어메쉬, 숏크리트가 적정하게 설치되었고 터널 벽면은 라이닝으로 보강되었다. 수리-역학적 복합

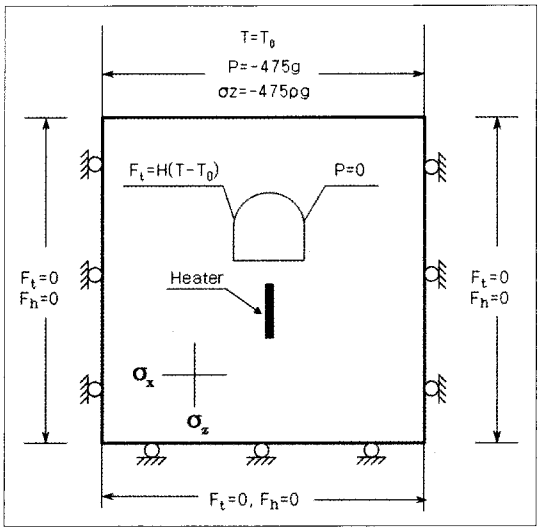

Fig. 5. Thermal, hydraulic and mechanical boundary conditions of BMT3, D-I[11].

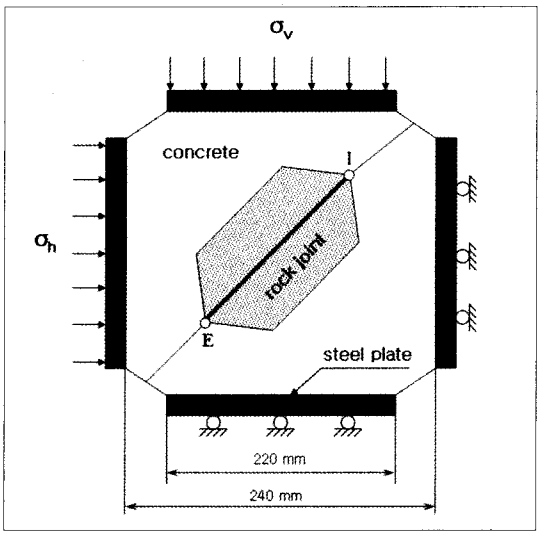

Fig. 6. Geometry and boundary conditions of TC1, D-I[11]

거동 모델링에 필요한 암석 및 절리물성은 Nirex에 의해 제공되었다.

나. Task 2

일본 Kamaishi mine에서는 현장 THM 시험이 실시되었으며 시험 개요도는 Fig. 7과 같다. 수직 시험공 중심에 가열을 위한 히터를 설치하고 주변에 10cm 두께의 층상으로 압축 벤토나이트를 설치하였다[4]. 벤토나이트 상부에는 50 cm 두께의 콘

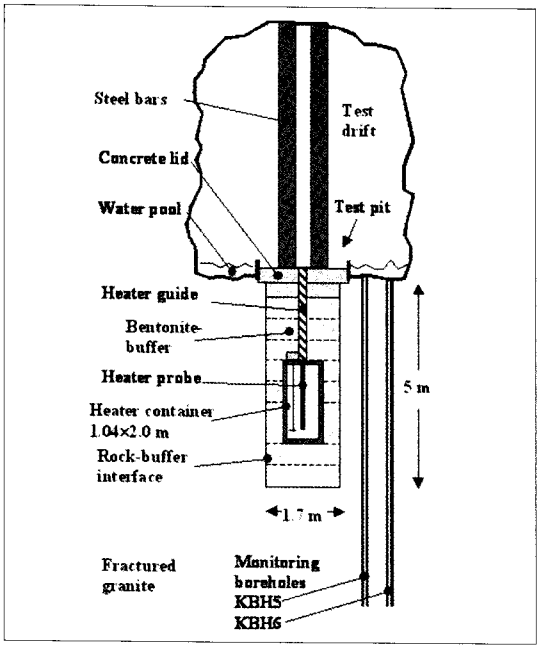

Fig.7. In situ heater test in Kamaishi Mine in Japan[4].

크리트 뚜껑을 놓고 벤토나이트의 팽윤으로 인한 수직 변위를 억제하기 위해 철봉을 콘크리트 뚜껑 위에 설치하였다. 터널 바닥에는 수조를 설치한 뒤 물을 40 cm 깊이가 되도록 채웠다. 현장 THM 시험은 가열기간과 냉각기간으로 나누어 실시되었으며 258일 동안의 가열기간에는 히터의 중심온도는 100℃로 유지하였다. 이후 히터를 끈 뒤 180일 동안 자연 냉각시키면서 완충재와 암반에서의 변화를 측정하였다. Kamaish mine THM 시험에 대한 모델링 연구에는 캐나다, 일본, 스웨덴, 프랑스에서 5개 연구팀에 참여했다.

다. Task 3

D-II, Task 3에서는 암석 절리의 구성방정식(constitutive equation)에 관한 전문가 의견 수렴이 이루어졌으며 이를 위해 각 참가 기관의 현황이 워크숍을 통해 소개되었다. Task 3과 관련하여 별도의 보고서는 발표되지는 않았다.

라. Task 4

방사성폐기물 처분장의 설계 및 성능평가와 관련된 THM 복합거동에 관한 연구가 수행된 D-II, Task 4에서는 각 참가 기관에서 1명 이상의 성능평가 전문가를 선정하고 기 작성된 보고서[5]에 대한 검토 의견을 이들 전문가들에게 요청하였으며 이를 최종 보고서에 수록하였다.

Ⅳ. DECOVALEX III(1999-2003)

1999년 착수된 DECOLALEX III 프로젝트는 수년간 지속된 2개의 대형 현장 시험을 포함하여 다음 4개의 task 들이 수행되었다[6].

i) 스위스 Grimsel site에서 full-scale engineering barrier 실험

ii) 미국 Yucca Mountain에서의 터널 규모 히터시험

iii) PA 관련 benchmark tests

iv) 안전성과 성능평가를 위한 THM

DECOVALEX-III 프로젝트는 유럽연합이 주관한 "BENCHPAR (Benchmark Tests and Guidance on Coupled Processes for Performance Assessment of Nuclear Waste Repositories)" 프로젝트와 밀접한 협력관계를 유지하면서 추진되었다. BENCHPAR 프로젝트에서 수행한 5개의 과제 중 3개가 DECOVALEX-III의 BMT1, BMT2, BMT3와 동일한 것이었다. DECOVALEX-III에서는 지질계에서의 THMC 복합거동에 관한 최초의 국제 학술회의인 GeoProc 2003을 조직하고 연구 성과들을 발표하였으며 여기서 발표된 논문들은 Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. 의 특집호로 발간되었다[13].

가. TASK 1: FEBEX in situ THM experiment

FEBEX(Full-scale Engineered Barriers EXperiment in crystalline host rock)는 결정질 암반에서의 암반-완충재의 THM coupling 에 대한 연구를 위해 스위스 Grimsel 지하연구시설에서 수행된 현장 실험으로 실제 처분환경에서 벤토나이트가 방벽으로서의 역할을 하는지와 근계영역(near-field)에서의 THM 거동에 대한 측정 자료를 얻고자 수행되었다. FEBEX 는 유럽연합의 지원으로 1994년 스페인의 ENRESA에 의해 착수되었으며 방사성

폐기물을 담은 처분용기는 결정질 암반 내 수평처분공에 거치되고 공학적방벽으로 압축 벤토나이트 사용되는 스페인 처분개념을 기초로 설계되었다. FEBEX 시험에서는 Fig. 8과 같이 처분용기에서 발생하는 열을 모사하기 위해 2개의 히터를 설치하였다.

FEBEX 현장 시험을 통해 시간에 따른 응력, 변위, 함수량, 수압, 온도 분포가 측정되었으며 암반과 완충재의 다양한 물성은 실험실 실험을 통해 결정되었다. 암반/완충재 물성과 현장시험을 통해 측정된 값을 이용하여 균열암반-완충재-히터로 구성되는 FEBEX 시스템에서의 THM 거동을 파악하기 위한 BMT가 제안되었다. 이를 통해 THM 거동 해석 모델을 검증하고 모델링의 신뢰도를 높이며 가열 상태에서의 균열 암반과 완충재의 상호작용에 대한 이해를 증진시키고자 하였다. D-III, Task 1에서는 2가지 과제가 제안되었다.

1) HM 모델링: 터널 굴착에 의한 암반 변형과 응력변화, 유동 속도의 변화와 지하수위 변화에 대한 예측이 모델링을 통해 계산되고 이는 터널 굴착 전, 후에 터널 주변에서 실시한 시험 결과와 비교.

2) THM 모델링: 가열 상태에서 암반-완충재-히터 시스템에서의 THM 복합거동 시뮬레이션을 통해 완충재와 암반에서의 온도변화, 함수율, 지하수압, 응력과 변위와 소요 전력의 시간에 따른 변화에 대한 계산하고 측정결과와 비교.

FEBEX 모델링에는 10개 연구팀이 참여하였으며 다음과 같은 연구결과를 얻었다.

1) 화강암 구조가 완충재의 수화(hydration)에 미치는 영향은 미미하였으며 이는 완충재와 암반의 수리전도도 차이가 크기 때문으로 판단됨.

2) 가스의 투수계수가 높기 때문에 가스압은 일정함.

3) 외부 화강암반의 영향으로 벤토나이트 자체의 소성변형은 크게 중요하지 않음.

4) 가열 시간이 공극수압의 분산에 필요한 시간보다 크기 때문에 열에 의한 지하수 유동은 암반의 불균질성에 크게 영향을 받지 않음.

나. TASK 2: US DOE's proposed test case

미국 네바다주 Yucca Mountain 처분장 후보부지에서 1997년 12월에 시작된 Drift Scale Test(DST)는 처분장에서 예상되는 THMC 복합거동에 대한 이해를 돕기 위해 수행된 대규모 현장 히터시험이다. 직경 5 m, 길이 48 m의 터널 안에 최대 전력 15 kw 인 직경 1.7 m, 길이 4.6 m의 원

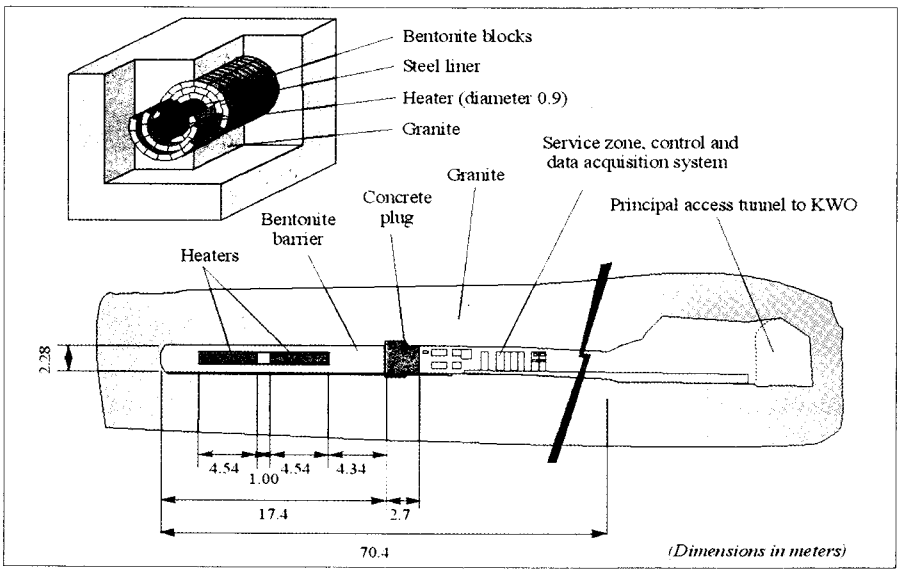

Fig. 8. General scheme of the FEBEX in situ test[14].

통형 전기 히터를 9개 설치하였으며 인접 처분터널에서 발생하는 열의 영향을 고려하기 위해 양쪽 벽면에는 50개의 wing heater(길이 10 m, 2.1 kw)를 설치하였다. 1997년 12월 총 187 kw의 전력으로 히터 가열이 시작되었다. 2002년 1월 14일 히터에 대한 전원 공급을 중단하였으며 이후 4년 동안의 냉각기간에 들어갔다. 열적, 수리적, 기계적, 화학적 변화를 측정하기 위해 147개의 관측공이 천공되었으며 이들의 총 길이는 3,300 m에 달하였다. 각 관측공들의 위치 및 측정되는 내용은 Fig. 9에 나타나 있다.

DECOVALEX III 에서는 DST 관련 다음 4개의 과제를 선정하였으며 6개 연구팀이 참여하여 연구를 수행하였다.

(1) 암반의 TH 거동에 대한 수학적 모사
(2) 암반의 THM 모델 개발
(3) 측정된 온도를 사용한 암반의 TH 모델링
(4) THC 복합거동 모델링

DST를 통해 Yucca Mountain의 균열 응회암에서는 전도에 의한 열전달이 가장 우세한 것으로 나타났으며 기화된 지하수는 균열을 따라 히터에서 바깥쪽으로 이동한 뒤 온도가 낮은 지점에서 응결되면서 균열을 메움으로써 수리전도도를 낮추는 것으로 분석되었다. 모델링에 사용된 개념 모델들에 대한 결과 비교를 통해 균열과 암반을 동시에 고려하는 개념 모델이 정확도가 높음을 알 수 있었다. 2차원과 3차원 모델 비교에서는 wing heater 부근에서 최대 10 ℃의 온도 차이가 나타나는 것으로 조사되었다.

다. TASK 3: Benchmark test problems for treatment of coupled T-H-M

D-III, Task 3에서는 암반에 위치한 처분장의 장기 성능 평가를 위한 THM 해석 방법과 관련된 3가지의 BMT가 수행되었다. 연구팀은 기 수행된 대규모 현장시험에서 얻어진 데이타베이스를 기초로 개념 모델과 물성, 경계조건을 독자적으로 정의하고 모델링을 수행하였다. BMT는 참가국들의 상이한 처분 현황을 고려하여 유연성을 고려하여 선정되었으며 제안된 3가지 BMT는 다음과 같다.

① BMT1 : Resaturation BMT

심지층 처분장 설계시 성능평가에 미치는 THM 복합거동의 중요성을 평가하기 위해 수행된 BMT1에서는 폐기물이 1000 m 심도에 위치하는 처분터

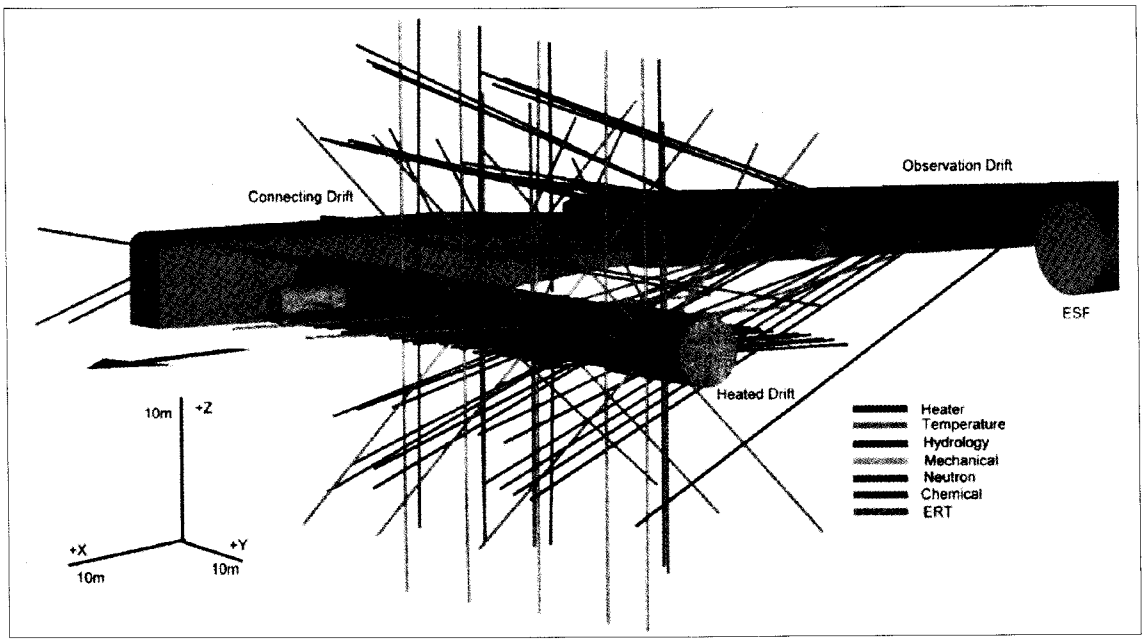

Fig. 9. Location and types of observation holes[6].

널 바닥의 수직 처분공에 거치되는 것으로 가정하였다. 가상 처분장의 폐쇄 직후 재포화(resaturation)가 이루어진다고 가정하였다. 각국의 상이한 처분 개념을 반영하기 위해 균열 경암과 퇴적암에 심지층 처분장이 놓이는 것을 가정하였다. 가상 처분장은 일본의 처분장 개념도를 따르며 암반 물성은 캐나다에서 얻어진 값을, 완충재의 물성은 스위스의 FEBEX 현장 실험과 Monterri 에서 얻어진 데이타베이스를 사용하였다. 모델링을 통해 암반의 투수계수 변화와 파괴 발생 여부, 완충재에서의 최대온도/재포화 시점/최대응력을 파악함으로써 THM 복합거동이 안전성 평가에 미치는 영향을 분석하고자 하였다[7].

BMT1 에는 6개 연구팀 (IRSN/SEA, CNSC, ANDRA/INERIS, JNC, BGR/ISEB/ZAG, SKI/KTH)이 참여했다. 각 연구팀은 현장시험을 통해 얻어진 열, 수리, 역학적 변수와 암반 조건을 가지고 코드를 보정한 뒤 다양한 조건에서의 THM 해석을 실시하여 처분장 건설과 안전성에 미치는 주요 THM 복합거동 메커니즘을 분석하였다. Fig. 10은 BMT1에서 고려된 가상 처분장의 처분공과 처분터널 및 해석을 위해 사용된 격자망을 보여준다. BMT1을 통해 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

i) HM 복합거동은 열전달에 큰 영향이 없으며 열전도에 의한 온도 변화가 가장 우세함.

ii) 완충재 재포화는 열전달 과정에 영향을 받지만 역학적 거동에 따른 영향은 크지 않음.

iii) 완충재 압력은 수리 거동에 큰 영향을 받으며 열전달에 의해서는 약간의 영향을 받음.

iv) 암반 역학적 건전성은 TH 복합 거동에 큰 영향을 받음.

② BMT2: The homogenization BMT

BMT2에서는 암반내에 존재하는 균열을 모델에 직접 구현하는 방법과 간접적으로 암반 물성에 반영하는 방법에 대한 차이를 파악하고자 하였다. 사용된 암반 물성은 실험실 실험 및 대규모 현장시험에서 얻어진 결과와 불확실성 해석을 통해 결정하였다. Fig. 11에서와 같이 소규모 상세 모델에서는 절리를 직접 입력해서 변형과 유체이동을 계산하였고 대규모 모델에서는 균질 암반으로 모델

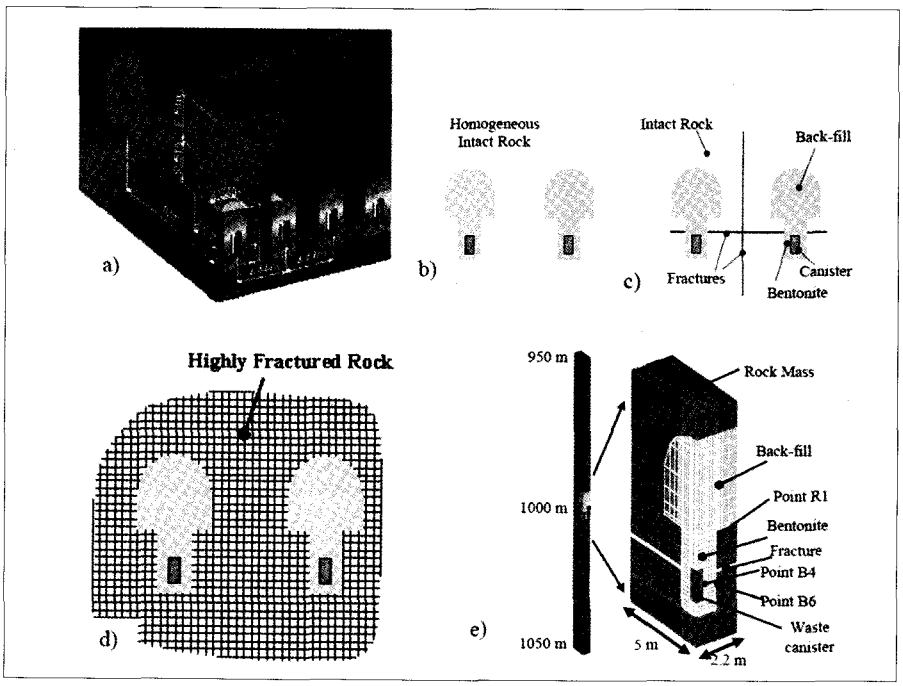

Fig. 10. Generic design of a hypothetical repository for D-III, BMT1[13].

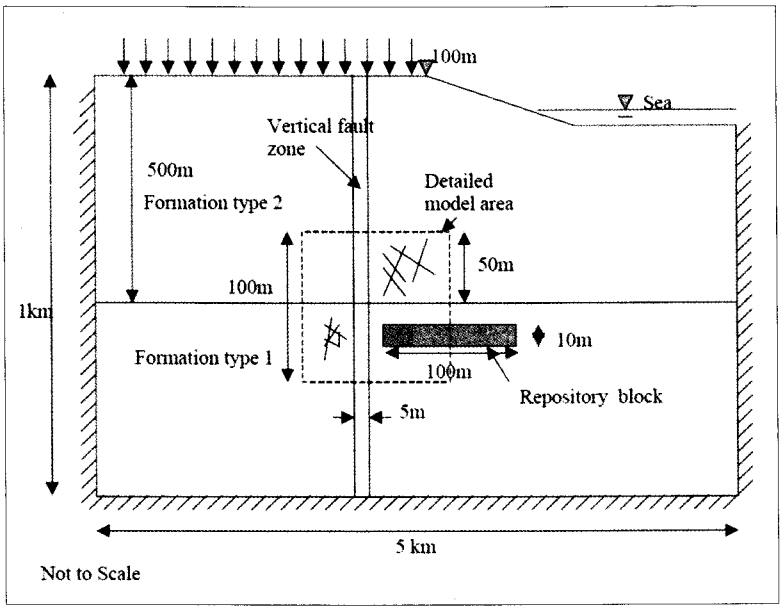

Fig.11. Reference problem geometry of D-III, BMT2 [13].

링을 실시했다. BMT의 구성에는 D-II, Task I에서 수행된 영국 Sellafield 데이터베이스가 활용되었다.

③ BMT3 : The glaciation BMT

BMT3에서는 빙하기와 해빙기에 의한 수리-역학적 영향을 보기위해 처분장 폐쇄 후 10만년까지의 장기간에 걸친 처분장 성능을 평가하였다[8]. 얼음-암반 접촉면 상태, 동토층, 처분장 위치, 해수위 변화, 염수 침투, 균열의 발생과 확장과 같은 다양한 시나리오에 대한 평가가 실시되었다. 해석을 통해 최대 변위, 암반의 투수계수변화, 유동 패턴 변화, 위험한 유동로의 형성 여부, 지표면의 침강과 융기 등이 분석되었다.

BMT3에서의 지질조건은 캐나다 Whiteshell Research Area(WRA)에 기초하여 설정되었다(Fig. 12). 암반은 넓이 25km x 37 km, 심도 4 km 까지 존재하는 sparsely fractured rock, moderately fractured rock, highly fractured rock 으로 구성되며 처분장은 500 m 심도에 위치하고 지하수위는 지표면과 일치하는 것으로 가정하였다. BMT3에서는 다양한 각도를 가진 총 17개의 균열대가 모델링에 포함되도록 하였다.

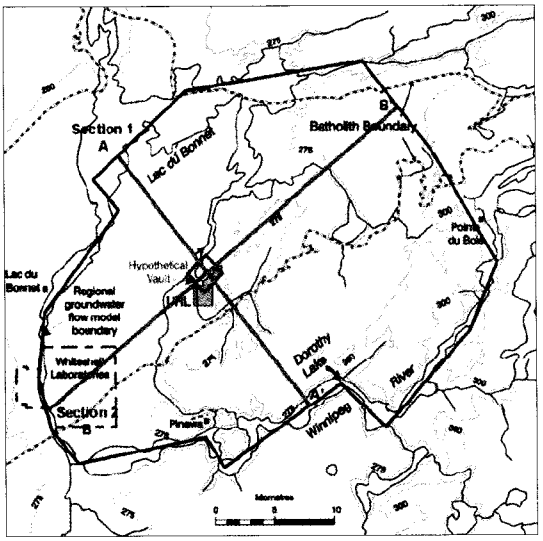

Fig. 12. Simplified topographic map of the Whiteshell Research Area [10].

라. TASK 4: Forum and documentation on treatment of THM in Performance Assessment

THM coupling과 성능평가(PA)와의 상관성에 대한 이해를 위해 제안된 Task 4에서는 PA 관점에서의 THM에 대한 국제적인 현황에 대한 점검과

이와 관련된 회의와 자료수집이 수행되었다. Task 4는 다음 2가지 subtask 로 구성되었다.

① Task 4a

D-III, Task 4a는 D-II, Task 4 보고서인 "Coupled THM processes related to performance assessment" 와 "Examples of treatment of mechanical and thermo-hydro-mechanical issues in some safety assessments" 에 대한 전문가 검토를 통해 상이한 방사성폐기물 연구개발 프로그램에서 수행되었거나 수행중인 성과를 종합하고 이를 state-of-the-art 검토 보고서로 작성하였다.

② Task 4b

PA 분야에서의 국제적 전문가를 초청, PA 해석의 근황과 관련 THM 이슈에 대한 발표가 있었다. 이를 통해 참여 연구팀이 PA 과정과 관련 이슈들에 대한 시야를 넓힘으로써 프로젝트에 참여한 연구팀이 수행하는 연구가 PA 관점에서 접근할 수 있도록 하였다.

V. DECOVALEX-THMC (2004-2007)

2004년부터 균열암반과 완충재에서 THM과 화학적 거동을 고려한 THMC 거동의 모델링을 위해 D-THMC가 수행되었다. D-THMC에서는 방사성 핵종의 누출과 이동에 있어서 중요한 몇 가지 과정이 다루어졌으며 코드 개발자에게 상호 검토의 기회가 주어졌다. D-THMC를 통해 성능평가를 위한 THMC 모델링과 실증을 위해 실험실 및 현장 시험 자료의 교환이 있었다. 스웨덴, 핀란드, 프랑스, 독일, 중국, 일본, 캐나다, 미국에서 14개 기관이 참여하며 2007년 11월 최종 보고서를 제출할 예정으로 있다. D-THMC는 다음 5개의 Task로 구성된다.

가. Task A : Near field coupled THM phenomena on PA

Task A에서는 성능평가에 대한 근계영역에서의 THM 현상의 영향에 대한 연구가 수행되었다. D-III, BMT1에서 얻어진 경험에 기초해서 (a) 캐나다 암반 조건과 현장 시험에 기초한 암석-완충재-처분장 시스템의 보다 실질적인 파악, (b)근계 THM 모델링과 PA 평가 사이의 상호작용에 대한 종합적 파악, (c)암석의 손상과 균열 발생의 고려 및 이에 따른 투수계수와 안정성 변화, (d)캐나다 URL에서의 완충재-용기 시험과 터널 밀폐시험(TSX)에서 얻어진 자료를 이용한 수학모델의 개발과 보정에 관한 연구가 수행되었다. 이를 위해 Task A에서는 다음과 같은 단계별 연구가 진행되었다.

i) Phase 1 - 현재 성능평가 해석에서 고려되고 있는 현상과 물성, 처분장 설계에 기초한 예비 근계영역 THM 해석

ii) Phase 2 - 암반손상과 불포화 완충재/뒷채움재 거동을 포함하는 코드를 개발하고 실험실 자료와 캐나다 URL의 현장 자료를 이용한 모델 보정

iii) Phase 3 - 최종 THM 해석 수행하여 굴착과 폐기물 거치기간(30년), 감시기간(70년), 폐쇄 후 기간(200-900년)의 온도, 암반 손상대의 규모, 암반 투수계수 변화, 암반 수압변화, 공학적 방벽에서의 함수율 변화 및 팽윤압 등을 계산

iv) Phase 4 - THM 해석 결과에 대해 성능평가 전문가와 협의

나. Task B : TMHC studies of the EDZ

Task B에서는 터널 굴착 및 응력 재분포에 의해 터널 주변에 발생하는 손상대가 THMC 거동에 미치는 영향을 연구하였다. BMT와 현장 시험 결과를 활용해서 손상대가 처분장 성능과 안전성 평가에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 화강암반과 같은 균열이 존재하는 경암에 만들어진 처분장의 굴착에서부터 폐쇄 후에 걸쳐 근계영역에서의 열전달, 유체이동, 응력, 변위, 파괴발생, 균열면의 광물 침전효과와 이들의 상호작용 등이 연구되었다[9]. Task B에서는 다음과 같은 단계로 연구가 진행되었다.

i) 문헌조사와 일반적 개념에 기초한 손상대 효과와 특성에 대한 자료 수집

ii) 역학적, 수리적 측면에서의 손상대 특성에 대한 연구 프로그램 개발 및 BMT 모델 정의

iii) 암반, 손상대, 변위를 고려한 손상대에서의

HMC 영향과 균열면에서의 광물 침전에 의한 투수계수 변화에 초점을 맞춘 BMT 모델링

iv) 모델링과 입력 자료에 존재하는 불확실성에 대한 연구

v) 스웨덴 에서 수행된 현장 heated pillar stability experiment(APSE)에 대한 TC 해석

다. Task C: EDZ in the argillaceous tournemire site, France

프랑스 Tournemire에서 수행된 점토질 암반에서의 손상대 발생 현상에 대한 연구에 기초해서 점토질 암반에서의 지하구조물 굴착과 관련된 수리-역학적 거동에 대한 물리적 현상을 이해하고 적합한 해석 모델을 개발, 적용하며 다양한 모델링 접근법에 대한 비교와 함께 현장 시험 및 실험실 시험 결과와의 비교를 수행하기 위해 Task C가 제안되었다. Task C에서는 점토질 암반에서의 HMC 복합거동이 터널 주변 손상대의 형성과 변화에 미치는 영향에 초점을 맞추어 연구가 진행되었다. 실험실에서 측정된 흡착 특성과 암반의 시간에 따른 변형거동, Acoustic Emission과 지구물리적 측정 자료가 활용되었다. 단계별 연구과정은 다음과 같다.

i) Step 1: 기존의 터널 주변에 발생한 손상대의 규모에 대한 모델링을 통해 현장 지질조건과 응력 상태, 암반구조에 따른 파괴 메커니즘을 규명하고 측정 자료에 대한 blind prediction-calibration 을 수행.

ii) Step 2: 시간에 따른 손상대 변화를 모델링하고 이를 100년 전, 9년 전, 2년 전에 굴착된 3개의 터널에서 측정된 손상대를 모델링과 비교.

iii) Step 3: 균열대가 손상대에 미치는 영향을 모델링.

iv) Step 4: 상이한 암반조건을 가진 여러 부지에 대한 손상대 모델링 결과 비교를 통해 암석 물성이 손상대의 규모와 특성에 미치는 영향을 평가.

라. Task D : Long-term permeability/porosity changes in the EDZ and near field

Task D에서는 처분터널 인근의 암반 수리 물성이 장기간에 걸쳐 변화하는 경향을 연구하였다. THM과 THC 복합거동에 의해 야기된 수리 물성의 영구적인 변화는 처분터널 주변 암반에서의 지하수 유동에 영향을 줄 수 있기 때문에 성능평가에서 고려하여야 한다. 이를 위해 열전달, 유체 이동, 응력/변위, 핵종 이동이 고려되었으며 근계 수리 특성의 장기적인 변화를 야기할 수 있는 THM, THC 복합거동에서는 응력 변화나 균열을 따른 전단 변위, 균열 확장, 광물 침전과 용해에 따른 균열의 변화가 분석되었다.

참가 연구팀은 처분장 주변 균열 암반에서의 시간에 따른 THM, THC 거동을 모델링하고 수리적 특성의 변화를 예측하며 이에 따른 근계 영역에서의 유체 흐름 변화를 평가하였다. 비교를 위해 포화 결정질암, 불포화 화산암에 건설된 가상 처분장이 설정되었다. THM과 THC에 대한 해석은 독립적으로 수행되며 THM과 THC 해석 결과의 비교를 통해 THMC 복합거동 해석의 필요성이 평가되었다. THM과 THC 모델링에서는 Yucca Mountain과 FEBEX 현장시험 및 일본 COUPLE 실험실에서 얻어진 THMC 물성 자료가 사용되었다.

마. Task E : Long-term climate change

처분장 성능평가에서 장기 기후변화의 영향을 고려하기 위해 제안된 Task E에서는 장기 기후변화가 지하수 유동 시스템과 처분장 성능에 미칠 영향을 연구하였다. 연구에서는 빙하기 동안 염도 변화가 지하수 유동에 미칠 영향, 균열 방향과 연결성이 지하수 유동 속도와 경로, 균열의 변위 등에 미칠 영향 등에 대해 고려하였다. 이를 위해 다음과 같은 연구가 진행되었다.

i) 처분장 안전성에서 장기 기후변화를 다루는 방법에 대한 조사와 THM 복합거동과 장기 기후변화 및 처분장 성능에 미치는 영향과 관련하여 필요한 정보 정의.

ii) 내륙과 연안 처분장을 고려한 3차원 THM 개념 모델을 개발.

iii) 빙하기 동안의 원계 영역에서의 지하수 유동 시스템에 대한 H, HM, TH, THM 민감도 해석을

실시하여 지하수의 수두 및 수두경사(hydraulic gradient), Darcy 속도, 온도에 대한 시간, 공간적 변화에 대한 예측.

iv) 유동 시스템의 안정성과 관련된 THMC 모델링.

v) 장기 기후변화가 처분장 성능에 미칠 영향을 보여줄 수 있는 THM 유동 시스템 영상 제작.

VI. DECOVALEX-2011 계획

DECOVALEX-THMC가 완료되는 2008년부터는 DECOVALEX-2011이 추진될 예정으로 있다. 2006년 10월 독일 Hanover에서 개최된 DECOVALEX-2011 계획을 위한 워크숍에서 다음과 같은 안건들에 대한 발표 및 논의가 있었다.

- 프랑스 ISRN이 제안한 점토암에 대한 연구
- 점토질 암석에서의 THMC 상호작용
- 가스가 관여하는 거동
- 스웨덴 Aspo 지하연구시설에서의 열역학적 연구
- 균열의 특성 및 모델링
- 균열 결정질암과 벤토나이트 완충재에서의 THM 과 화학반응 상호작용
- 미국 Yucca Mountain 에 분포하는 손상대에서의 HM 모델링과 균열망 특성
- 단일 균열에서의 THMC 실험에 대한 복합거동 모델링
- 빙하기(장기기후변화)에 관한 워킹 그룹 제안

VII. 결 론

국제공동 연구로 추진되고 있는 DECOVALEX 프로젝트에서는 세계 각국의 다양한 분야의 전문가들이 모여 지하 암반 내에 건설되는 방사성폐기물 처분장 환경에서의 THMC 복합거동을 위한 해석 기법 및 코드 개발을 하고 있다. 본 프로젝트에서는 단순한 정보교환의 틀을 벗어나 동일한 문제에 대해 각국의 전문가들이 수행한 현장 및 실험실 실험 결과, 실험에 대한 다양한 관점과 방법을 활용한 해석 결과에 대한 상호 검토 및 토의를 통해 보다 효과적인 해석 기법의 개발을 할 수 있도록 하고 있다. 1992년 이후 4 단계에 걸쳐 수행된 공동연구를 통해 (a) TH, TM, HM 해석을 위한 단순 모델에서 THM 및 THMC 해석이 가능한 모델로, (b) 균질 암반에서 손상대를 포함한 불균질 암반으로, (c) 실험실 소규모 실험에서 대규모 현장시험 결과 해석으로, (d) 결정질 암반 해석에서 완충제의 영향을 고려한 해석으로, (e) 원계 영역 해석에서 근계영역 해석으로 단계적인 발전을 이루어왔다. DECOVALEX 프로젝트의 성과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- BMT와 TC의 활용으로 모델링 기법 개발을 성공적으로 수행
- 균열 암반과 완충재에서의 복합거동에 대한 이해도 증진
- 지구과학과 공학의 다분야간 연계
- 연속체 및 불연속체 모델링 접근법의 연계
- 상호 검토의 과정을 통한 기술과 경험의 공유

국내에서는 1997년 고준위폐기물 처분 기술개발을 위한 중장기 연구가 시작된 이후 2006년에 한국형 기준처분시스템이 도출되었으며, 처분 기술의 현장실험을 수행하기 위해 필수적인 인프라인 지하처분연구시설(KURT)이 건설되었다. 2007년부터는 지하처분연구시설을 이용한 현장 실증 실험 및 공학적 규모 실험 장치를 이용한 공학적 방벽 시스템의 THM 거동 해석을 위한 기법 개발이 추진되고 있다. THMC 복합거동 모델링 기법 개발 및 현장 실증실험을 통한 검증을 효과적으로 수행하기 위해서는 우리나라도 2008년부터 착수되는 국제공동연구인 DECOVALEX-2011 프로젝트에 정규 회원국으로 적극 참여하는 것이 필요한 것으로 판단되며, 이 참여를 통해 다음과 같은 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

(1) 대규모 현장시험과 고비용의 실험실 실험을 토대로 한 선진 각국의 연구개발 경험을 공유함으로써 국내 THM 기법 개발에 활용 가능

(2) 해석 기법의 검증 시 외국의 전문가와 동일한 조건에서 blind test를 실시함으로써 투명한 검증이 가능

(3) 필요시 국내 현장시험을 해석 대상으로 제공

함으로써 각국의 기법과 코드를 이용한 결과를 국내 현장시험 해석에 효과적으로 접목

(4) 각국의 전문가들에 의한 검토를 기반으로 국내 THM 해석 기법의 보완 및 현장시험 계획의 보정

(5) 권위있는 국제공동연구 프로젝트에 참여함으로써 국내 연구결과 및 처분 프로그램의 신뢰도 향상

참고문헌

[1] C.F.Tsang, O.Stephansson, F.Kautsky and L.Jing, "An overview of the DECOVALEX project on coupled THM processes in fractured rock-bentonite systems," Geoproc 2003, pp.3-13(2003).

[2] 황용수, "DECOVALEX 국제 공동연구 현황 분석," 터널과 지하공간, 7, pp. 246-252(1997).

[3] E.Elorante(ed.), "DECOVALEX II-The summary report of the Finnish contributions 1995-1999,", STUK-YTO-TR163(2000).

[4] M.Chijimatsu, T.Fujita, Y.Sugita, K.Amemiya and A.Kobayashi, "Field experiment, results and THM behavior in the Kamaishi mine experiment," Int.J.of Rock Mechanics and Mining Science, 38(1),pp.67-78(2001)

[5] O.Stephansson, J.A.Hudson, C.F.Tsang, L.Jing, J.Andersson, "DECOVALEX II project. coupled THM issues related to repository design and performance-Task4. SKI report 99:7(1999)

[6] C.F.Tsang, L.Jing, O.Stephansson and F.Kautsky,"The Decovalex III project:A summary of activities and lessons learned," Int.J.of Rock Mechanics and Mining Science, 42,pp.593-610(2005).

[7] A,Millard, A.Rejeb, M.Chijimatsu, L.Jing, J.De Jonge, M.Kohlmeier, T.S.Nguyen, J.Rutqvist, M.Souley and Y.Sugita, "Evaluation of THM coupling on the safety assessment of a nuclear fuel waste repository in an homogeneous hard rock," Proc. of GeoProc 2003, pp. 199-204, Stockholm, Sweden(2003).

[8] T. Chan, R. Christianssonb, G.S. Boultonc, L.O. Ericssond, J. Hartikainene, M.R. Jensenf, D. Mas Ivarsg, F.W. Stanchella, P. Vistrandd and T. Wallrothd, "DECOVALEX III BMT3/BENCHPAR WP4: The thermo-hydro-mechanical responses to a glacial cycle and their potential implications for deep geological disposal of nuclear fuel waste in a fractured crystalline rock mass," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 42, pp. 805-827(2005).

[9] 이희석, "방사성폐기물 처분장 주변 암반의 손상영역 특성 고찰을 위한 BMT 모델," 한국암반공학회 창립 25주년 기념 특별 심포지엄, pp.25-36(2006).

[10] T.Chan and F.W.Stanchell, "Subsurface hydro-mechanical(HM) impacts of glaciation:Sensitivity to transient analysis, HM coupling, fracture zone connectivity and model dimensionality," 42, pp.828-849(2005).

[11] L. Jing, C.F. Tsang and O. Stephansson, "DECOVALEX?an international co-operative research project on mathematical models of coupled THM processes for safety analysis of radioactive waste repositories." Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr., 32, pp. 389?398 (1995).

[12] J.A.Hudson, O. Stephansson, J.Andersson, C.F.Tsang and L.Jing, "COupled T-H-M issues relating to radioactive waste repository design and performance," Int.J.of Rock Mechanics and Mining Science, 38,

pp.143-161(2001).

[13] C.F.Tsang, L.Jing, O.Stephansson and F.Kautsky, "The DECOVALEX III project: A summary of activities and lessons learned," 42, pp.593-610(2005).

[14] T.S.Nguyen, A.P.S.Selvadurai and G.Armand, "Modelling of FEBEX THM experiment using a state surface approach," 42, pp.639-651(205).