

방사성폐기물 처분장 주변 암반의 손상 특성 고찰을 위한 벤치마크 시험 모델 해석

이희석^{1)*}

Analysis of Benchmark Test Model for Evaluation of Damage Characteristics of Rock Mass near Radioactive Waste Repository

Hee-Suk Lee

Abstract Severe damage can occur around deposition holes due to complex interaction of thermo-hydro-mechanical (THM) loading during the long term operation of high level radioactive waste repository. Many candidate sites for repository are located in crystalline rock mass, therefore mechanism of damage follows the form of brittle fracture and failure. This paper briefly introduces major outcomes from 15 years international collaborative project, DECOVALEX, and presents major study results for current ongoing benchmark test study from DECOVALEX-THMC, to evaluate the effect of THM loading to rock mass in excavation damaged zone (EDZ) near deposition holes. Through benchmark test model by simplifying THM loading to boundary loading obtained numerical results are compared, and discrete fracture interaction after up to 1 million years operation is discussed.

Key words High level radioactive waste, thermo-hydro-mechanical coupling, excavation damaged zone (EDZ), DECOVALEX project, rock fracture

초 록 암반구조물의 파괴는 초기응력의 크기, 무결암의 강도 그리고 단층이나 절리와 같이 암반 내에 존재하는 불연속면의 상태에 의해 좌우된다. 일반적으로 고심도에 건설되는 암반구조물의 경우 높은 현지응력과 공동 굴착에 따른 유도응력으로 인해 공동 경계면에서 스펙링이나 슬래빙과 같은 취성파괴가 발생할 수 있다. 최근 고심도에 건설되는 암반구조물이 증가함에 따라 취성파괴의 발생사태가 증가하고 있으며, 더욱이 국내의 저심도 구간에서도 스펙링 현상이 보고되어 취성파괴에 대한 연구의 필요성이 요구되고 있다. 그러나 아직까지 취성파괴에 대해 명확하게 규명되지 않아 본 보고에서 취성파괴현상을 규명하기 위해 수행되었던 기존 연구결과를 중심으로 취성파괴와 그 특징에 대하여 요약정리하였다.

핵심어 고준위 방사성 폐기물, 열-수리-역학 상호작용, 굴착손상영역 (EDZ), DECOVALEX 프로젝트, 암석 균열

1. 서 론

고준위 방사성폐기물 처분장의 장기 운영시 처분된 고준위 폐기물에 의해 생성되는 열로 인한 열-수리-역학(THM) 하중의 복잡한 작용에 의해 처분공 벽면은 심각한 손상을 받을 수 있다(권상기 외, 2002). 많은 처분 후보지들은 결정질 암반 내에 위치하며 따라서 손상의 양상 역시 취성 파괴(brittle fracture)의 형태를 띤다(Lee

et al., 2006).

방사성 폐기물 처분장 설계 및 성능평가를 위한 DECOVALEX-THMC 국제 협력 연구 프로젝트의 일환으로서 방사성폐기물 처분공 주변의 굴착 손상 영역 (Excavation Damaged Zone, EDZ)에서의 열-수리-역학-화학(THMC)의 영향을 평가하기 위해 Task B의 벤치마크 시험 모델(Benchmark Test)이 제안되어 이 모델들에 대해 관련 연구팀들이 현재 연구를 진행 중에 있다. 이 연구 과제의 주요 내용은 균열 생성 및 전개, 블록 및 암석 이동, EDZ 응력의 상호작용, 암석 균열 수리적 특성, 시간의존 거동의 영향 및 화학적 작용의 영향 등을 포함한다(Rutqvist et al., 2006b).

¹⁾ SK건설 GSUC팀 부장

* 교신저자 : hslee@skec.co.kr

접수일 : 2007년 2월 5일

심사 완료일 : 2007년 2월 23일

저자는 FRACOM 소속으로 DECOVALEX THMC 벤치마크 시험 모델 연구에 직접 참여한 바 있다. 이 논문에서는 15년에 걸친 DECOVALEX 프로젝트의 주요 내용들을 간단히 소개하고, 이 중 현재 진행되고 있는 처분장 주변 암반의 EDZ에서 열-수리-역학 하중에 의한 암반의 영향을 평가하기 위한 Task B의 주요 연구 방향 및 결과를 제시한다. BMT 모델을 통한 각 수치해석 모델링 결과의 주요 내용들을 비교하였으며, 이 중 처분 후 1백만 년까지 기간 동안 열-수리-역학 하중으로 인한 처분공 벽면에서 이산 균열들의 반응을 모사한 결과를 제시한다.

2. DECOVALEX 연구 프로젝트

2.1 DECOVALEX 프로젝트 개요

DECOVALEX(International co-operative project for the Development of COupled models and their VALida-

tion against EXperiments in nuclear waste isolation) 연구 프로젝트는 방사성폐기물 처분장 주변 암반의 복잡한 열-수리-역학 상호작용 현상의 규명 및 실제 처분장 설계 및 성능평가의 적용을 위해 1992년에 시작되어 현재까지 진행되고 있는 국제 협력 연구 프로젝트이다 (Stephansson et al., 2006, 황용수, 1997). 1992년 Phase I이 시작된 이후 총 9개국 24개 기관이 예산 및 연구팀을 구성하여 현재 DECOVALEX -THMC Phase의 4단계 연구가 진행되고 있다.

표 1 및 표 2에 현재까지 진행된 각 단계별 프로젝트의 주요 내용 및 참고문헌, 그리고 주요 참여기관을 열거하였다. 표에서 Task는 연구 과제를 의미하며, BMT는 Benchmark Test 모델로서 처분장의 특징적인 주변 환경을 대표적으로 설정한 모델이며, TC는 Test Case로서 관련 실험실 및 현장 시험 내용을 의미한다. 이 프로젝트는 THM 현상에 대한 심층적 이해 증진 뿐만 아니라, 암석 절리의 분포 특성 및 그 역학 및 수리학적 특성,

표 1. DECOVALEX 프로젝트의 각 단계별 주요 과제 내용 (Stephansson et al., 2006)

Phase I/년도	과제명	주요 내용	주요 참고 문헌
DECOVALEX -I 1992-1995	BMT1	열원이 있는 두개의 직교 연장 절리 시스템 암반	Coupled-T-H-M Process of Fractured Media (Stephansson et al., 1996) Special Issue of Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. Vol. 32 No. 5, 1995
	BMT2	유한 길이 열원의 4개 이산 절리 시스템을 갖는 암반	
	BMT3	Stripa 광산으로부터의 6580개의 실제 균열망 암반	
	TC 1	단일 절리 암석 코어의 실험실 진단-유동 시험	
	TC 2	Fanay-Augeres의 균열 암반의 현장 실험	
	TC 3	공학 완충재의 대규모 실험실시험 (Big-Ben, 일본)	
	TC 4	암석 균열의 실험실 응력-유동 시험	
	TC 5	단일 절리의 암석 블록의 진단-유동 실험실 시험	
DECOVALEX -II 1995-2000	Task 1	영국 Nirex 암반 조사시설 (RCF) 수갱 굴착 수치해석	Special Issue of Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 38 No. 1, 2001
	Task 2	일본 PNC의 Kamaishi 광산 현지 THM 실험	
	Task 3	암석 절리의 구성방정식 연구 현황 정리	
	Task 4	방사성폐기물 처분장의 설계 및 성능평가와 관련된 THM 상호작용의 현 단계의 이해	
DECOVALEX -III 2000-2003	Task 1	FEBEX (Full-Scale Engineered Barriers Experiment in Crystalline Host Rock)	Proceedings of GeoProc 2003 Special Issue of Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol 42 No.5-6, 2005
	Task 2	Yucca Mountain의 갱도 시험 (Drift Scale Test)	
	BMT 1	핵폐기물 처분장의 근거리장 안전에 대한 THM 상호작용의 의미	
	BMT 2	균열 암반의 THM 물성의 Upscaling 및 대규모 처분장 성능평가의 중요성	
DECOVALEX -THMC 2004-	BMT 3	THM의 빙하작용의 영향 및 균열 암반 내 심부 지질 처분장에 대한 의미	Proceedings of GeoProc. 2006
	Task A	사용 후 핵연료 처분장의 성능에 대한 근거리 상호작용 현상의 영향	
	Task B	굴착손상영역 (EDZ)의 특성 이해	
	Task C	Tournemire 현장 (프랑스)의 퇴적암반 굴착 손상 영역	
	Task D	화산암 및 결정질암-벤토나이트 시스템의 THM 및 THC 작용으로 인한 EDZ 및 근거리장의 장기 투수율/공극률 변화	
	Task E	장기 기후 변화와 관련된 THM 작용: 빙하 사례 연구	

표 2. DECOVALEX 프로젝트 기금 출연 기관 및 연구팀

약자	국가	기금출연기관명	연구팀 명 (약자)
SKB	스웨덴	Swedish Nuclear Fuel & Waste Management Co.	Chalmers Univ. of Tech. (CTH)
			Clay tech. AB, (CLAY)
SKI	스웨덴	Swedish Nuclear Power Inspectorate	Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL, 미국)
			Royal Institute of Technology (KTH, 스웨덴)
STUK	핀란드	Radiation and Nuclear Safety Authority	Helsinki University of Technology (HUT)
			FRACOM Ltd
			Uppsala University (UU, Sweden)
ANDRA	프랑스	National Agency for Radioactive Waste Management, France	INERIS-LAEGO,
			Ecole des Mines de Nancy (EMN)
			Ecole Polytechnique (EP), G3S
CEA	프랑스	Commissariat a l'Energi Atomique de Cadarache	CEA/DM25/SEMT
IRSN	프랑스	Institute for Protection and Nuclear Safety	Paris School of Mines (PSM)
DOE	미국	Department of Energy	Sandia National Lab. (SNL)
			LBNL
NRC	미국	Nuclear Regulatory Commission	CNWRA, Southwest Research Institute (SWRI)
OPG	캐나다	Ontario Power Generation	Atomic Energy of Canada Ltd. (AECL)
CNSC	캐나다	Canadian Nuclear Safety Commission	Canadian Nuclear Safety Commission
JNC (JAEA)	일본	Japan Nuclear Cycle Development Institute (현재 JAEA)	Tokai Works, JNC
			Hazama Corporation
			Kyoto University
NIREX	영국	Nirex Ltd.	Univ. of Birmingham (UoB)
BGR	독일	Federal Institute for Geosciences and Natural Resources	Univ. of Tuebingen
			Univ. of Hannover,
			Federal Institute for Geosciences and Natural Resources
ENRESA	스페인	Empresa Nacional de Residoos Radioactivds, SA	Universidad Politecnica de Catalunya
			Universidad Politecnica de Valencia

암석 균열의 생성 및 전파, 암석의 시간의존성 거동, 암석의 화학적인 작용의 영향 등 다양한 암반공학 연구주제들에 대해 오랜 기간의 연구 성과들을 축적하면서 암반공학의 핵심적인 기술발전에 기여해 왔다.

2.2 DEOCOVALEX-THMC Task B

표 1에 나타낸 바와 같이 DECOVALEX-THMC 프로젝트는 처분장 설계 및 성능평가에 초점을 맞춘 THMC 상호작용 관련 총 5개의 연구과제가 진행 중에 있다. 이 중 Task B는 결정질 암반의 굴착 손상영역과 관련된다. EDZ는 처분공과 수갱 또는 시추공 벽면 주위에 발생하여 잠재적으로 지하수 유동 통로를 형성할 수 있으며 이를 통한 핵종 이동의 가능성이 있으므로 처분장 성능 및 안전 평가에 중요하다(Rutqvist et al., 2006a).

그림 1은 방사성폐기물 처분장 주변에서 전개되는 EDZ의 주요 발전단계를 설명하고 있다. 이 경우 EDZ는 단지 굴착만으로 의한 손상 뿐 아니라 그 이후 열수 리액션 하중과 결합된 총칭적인 의미에서의 손상영역

을 의미한다.

그림 2는 DECOVALEX-THMC 프로젝트 Task B의 연구과제의 진행 단계를 보여준다. 그림 2에서 Phase 1은 주로 화학적 반응 측면에 집중되었는데, 다른 역학적 부분은 이미 많은 지식들이 축적되어 왔기 때문이다. Phase 2는 EDZ의 특성을 정확히 모델화하기 위한 구성방정식의 확립을 위해 일축압축 하의 무결암의 파괴를 모사하는 수치모델 결과의 비교를 주목적으로 한다. Åspö 지하암반 실험실로부터의 암석 코어의 결과를 활용한다. Phase 3은 본 논문에서 주로 다루고 있는 BMT 모델로서 다양한 연구진들에 의한 wall block 및 근거리장(near-field)에서의 손상영역의 특성 모델의 수치해석 비교를 실시한다. Phase 4에서는 SKB의 EDZ 관련 현장 실험 결과를 통합하여 처분장 건설시 불확실성을 고려할 수 있는 방법을 연구할 예정이며, 마지막으로 Phase 5에서는 전체 결과들을 통합하여 최종적으로 결정질 암반에서 굴착시 EDZ의 특성 및 평가에 대한 지침서를 발간할 예정이다. 그림 3은 Phase 2에서 수치해

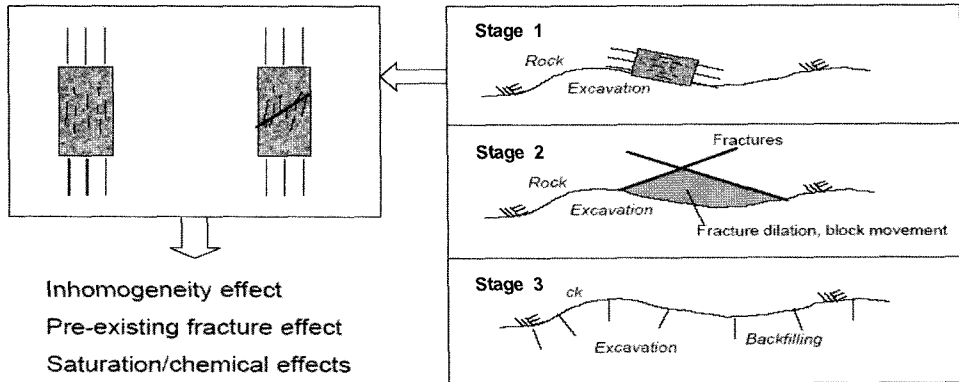


그림 1. 처분장 생애주기 동안 EDZ 발전의 주요 3 단계

Stage 1: 초기 굴착 단계: 주로 역학 및 수리 환경을 변경시킴
 Stage 2: 굴착 후 폐쇄 전 단계: 굴착 면으로의 물 유동, 암석의 건조가 발생하며 균열을 따라 화학적인 변화가 발생
 Stage 3: 처분단계: canister와 충전재(backfill)가 설치되고 온도 증가하여 장기간에 걸쳐 새로운 평형상태에 이르는 과정

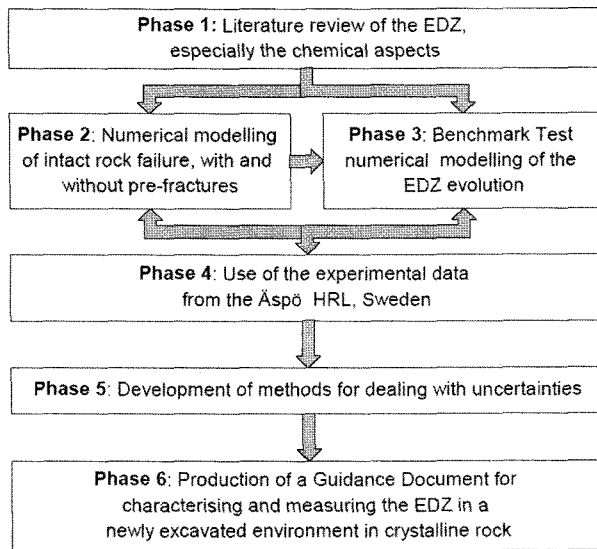


그림 2. Task B의 6가지 연구 단계 Flow chart

석으로 구현된 기본 일축압축 특성을 모식적으로 보여 준다. Äspö 지하암반 실험실 주변 암석 코어에서 발생하는 전형적인 Class II 거동의 암반의 형태를 나타내며, 일반적인 변형을 연화 현상과는 차이를 보인다. Phase 3의 BMT 모델의 해석 결과 내용은 이후에 상술한다.

3. 손상 영역 고찰을 위한 BMT 모델

본 BMT 모델에서는 그림 4와 같이 THMC 환경 하의 처분장 생애주기인 1백만 년에 걸친 EDZ 전개 양상을 모사하기 위해 두 가지 다른 규모의 모델 영역을 설정하였다.

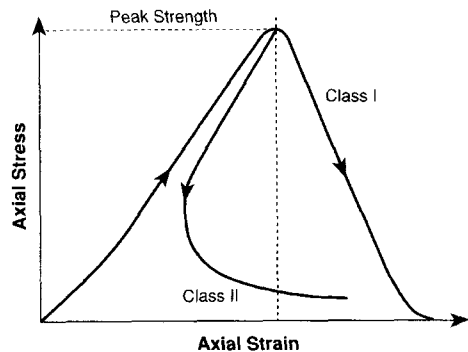


그림 3. Class I 및 Class II 거동의 정의

즉 근거리장 모델(near-field model) 갱도 벽면으로부터 몇 m 정도까지의 범위를 나타내며 EDZ의 전개 및 연장을 고려한다. 훨씬 작은 규모의 wall block 모델은 EDZ 내부에서의 THMC 과정의 상세해석을 위해 고안되었다. 그림 5와 6은 다양한 균열 정도를 고려한

전형적인 BMT 모델을 보여준다.

근거리장 및 wall block 모델이 일반적인 THM 해석 도메인에 비해 매우 작은 영역이므로 THMC 환경은 특별히 고안된 시간의존 경계조건 및 내부조건을 통해 재현되었다. 이 BMT 해석을 위해서 DECOVALEX-THMC Task D에서 수행된 대규모 THM 및 THM 해석의 결과를 사용하여 그림 7과 같이 시간의존 경계 및 내부 조건을 설정하였다(Rutqvist et al., 2006b).

각 해석은 다음과 같은 단계로 진행되었다.

- Stage 1-Linear thermal-hydro-elastic modeling: 선형탄성 물성으로의 모델링
- Stage 2-Non-linear, elasto-plastic failure modeling: 비선형/탄소성 특성 고려한 파괴 해석
- Stage 3-Time dependent failure modeling: creep 및 역학적 분해를 고려한 시간의존거동 모델
- Stage 4-Chemo-mechanical modeling(optional): 단순화된 화학반응 고려하거나 다른 화학/역학

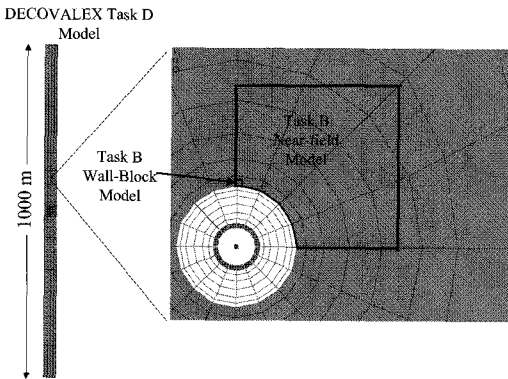


그림 4. Task B BMT 모델의 위치

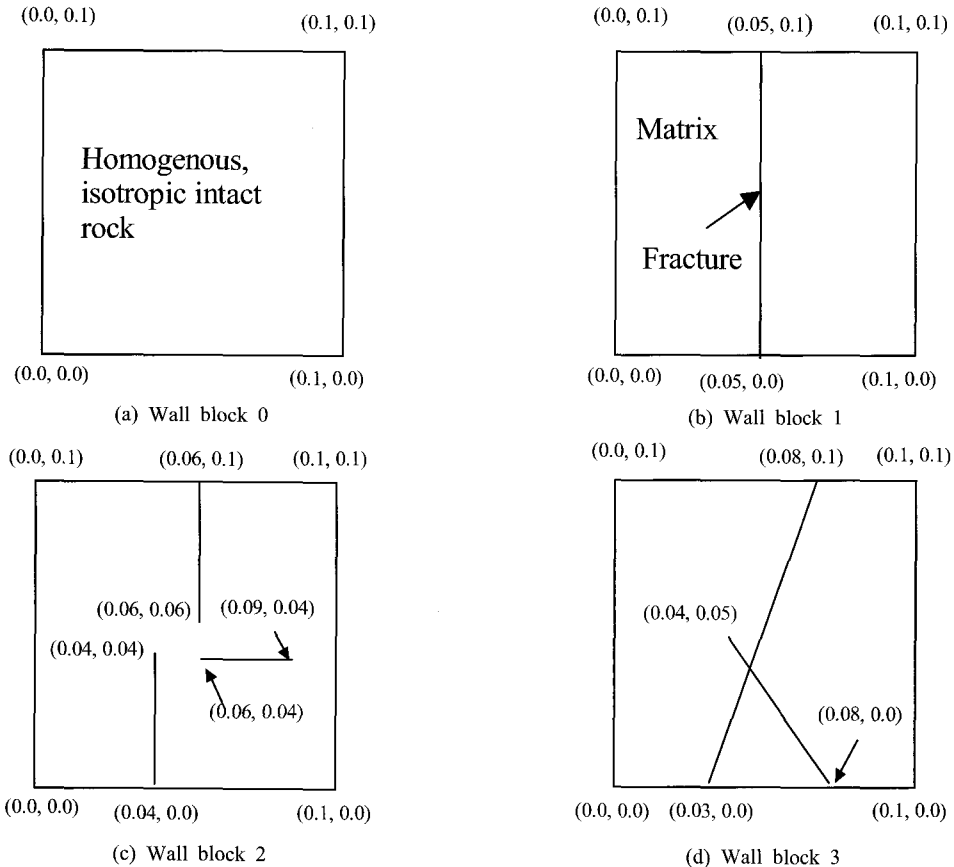


그림 5. 4가지 형태의 wall block 모델

영향 고려

Stage 5-Full THMC modeling(optional): 4단계에서 개발된 화학-역학 모델을 THC 및 THM에 결합한 완전 상호작용 모델

표 3은 BMT 모델에 참여한 연구진들 및 사용된 해석 기법을 보여준다.

4. 모델 해석 결과

4.1 근거리장 모델

무결암으로 설정된 근거리장 모델에 대한 대표적인 해석 결과가 그림 8에 나와 있다. 3.42 m×3.42 m의 상대적으로 작은 모델 크기로 인해 모델의 하부 우측 모서리부에 이례적인 응력집중이 발생했다(그림 8).

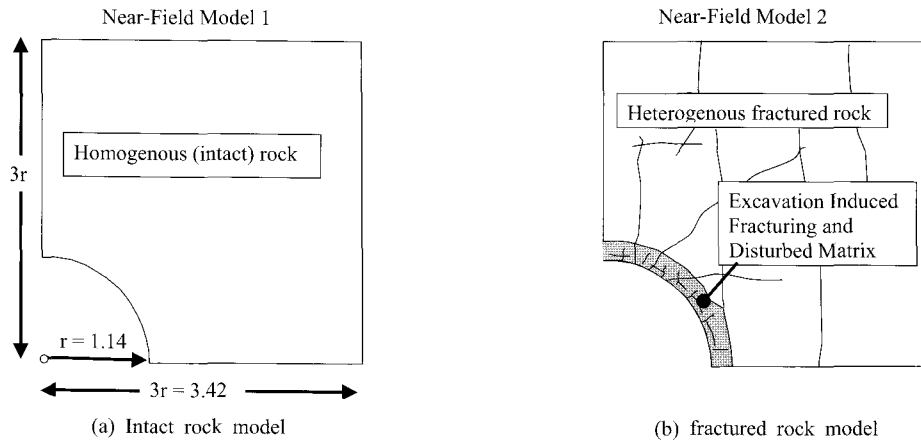


그림 6. 2가지 형태의 근거리장 모델

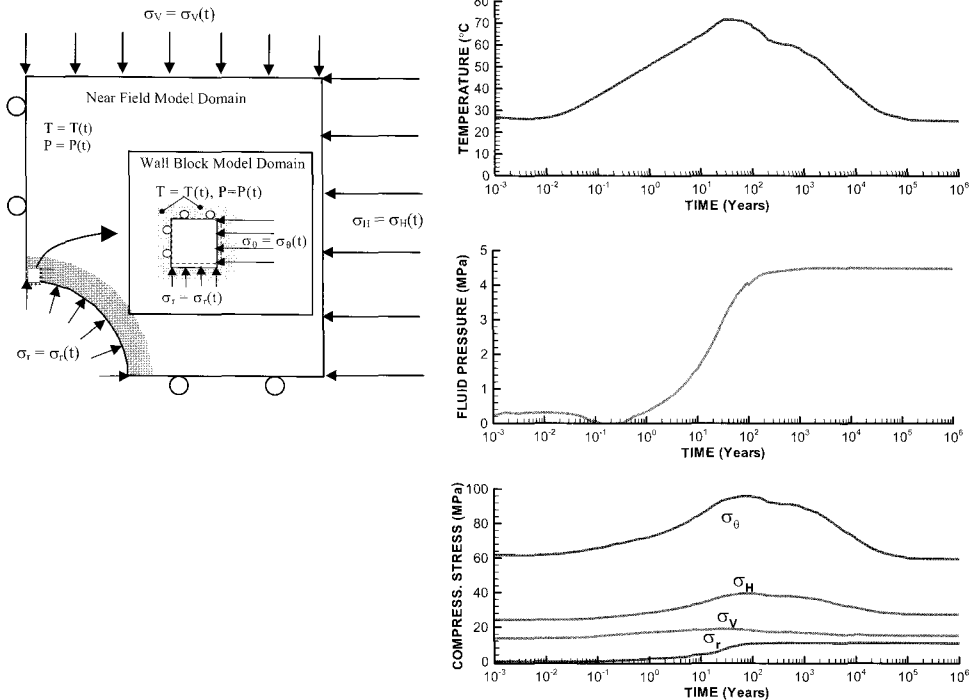


그림 7. 해석에 사용된 시간의존 THM 경계 및 내부 조건(Rutqvist et al., 2006b)

그림 9는 $x=0, y=0$ 을 따라서 응력분포 결과를 비교한 것이다. 그림 9에 나타난 바와 같이 주요 관심 대상인 공동 벽면 주변에서는 이 모델 도메인으로도 충분한 정확도를 나타냈다. BMT 모델은 공동 벽면 1 m 이내에서의 EDZ의 전개 과정에 초점을 맞추었으므로, 보다 세밀한 요소망을 이용하면 이 정도 크기의 모델로 충분한

정확도를 얻을 수 있을 것으로 생각된다(그림 9). 또한 그림 9에서 비교한 바와 같이 완전 THM 상호작용을 모델을 고려한 경우(Task D)와 본 연구에서와 같이 시간의존 특수 경계 및 내부 조건을 고려한 경우 결과적인 응력분포는 공동 벽면 주변에서 잘 일치하므로 특수 경계조건을 사용하여 처분공 주변의 손상 정도를 해

표 3. BMT 모델의 연구진 및 수치해석 기법

연구진	수치해석 기법
DOE: Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)	유한차분법을 이용한 TOUGH-FLAC 모사
	ROCMAS 유한 요소 코드
CAS: Chinese Academy of Sciences' Research Team	Cellular automaton 접근법
FRACOM: FRACOM Ltd, Finland	이산 경계요소 균열전파 모델인 FRACOD
JAEA: Japan Atomic Energy Agency's Research Team, including Kyoto University	THAMES 유한요소 코드
SKI: Royal Institute of Technology, Stockholm	PFC 개별요소 입자 모델

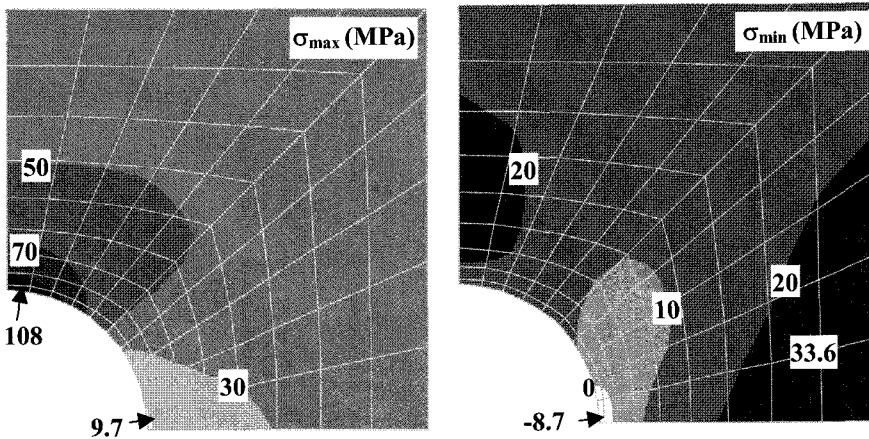


그림 8. Stage 1에 대한 100년 후 근거리장 모델: 최대 및 최소 주응력 분포 (DOE 연구진)

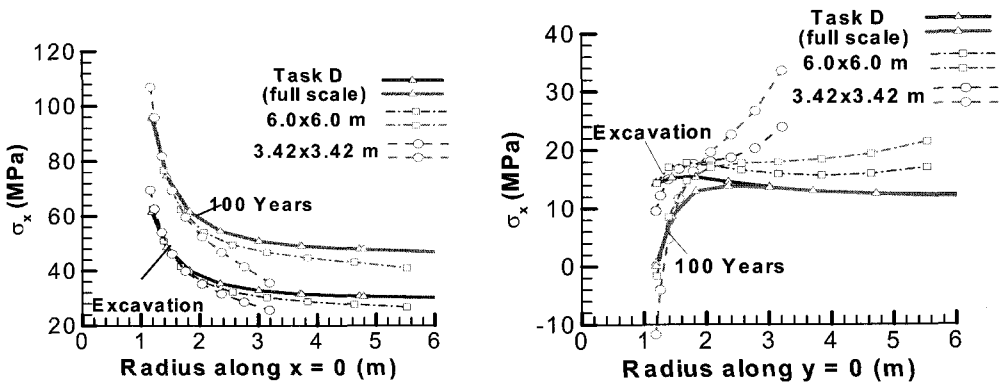


그림 9. Stage 1에 대한 100년 후 근거리장 모델: $x=0, y=0$ 을 따르서의 응력 분포 비교 (DOE 연구진)

석해도 무방함을 확인할 수 있다.

무결암으로 설정된 근거리장 모델 해석 결과는 spring line을 따라서 인장 균열 또는 반경방향 기존 균열의 벌어질 가능성이 있는 것으로 예측되었으며, 반면에 벽면 크라운 부에서는 전단 파괴의 가능성이 있음을 보여준다. 3개 연구팀(FRACOM, DOE and CAS)의 결과는 응력 면에서는 상당히 잘 일치함을 보여주었다. 하지만 변위의 경우에는 FRACOM의 결과가 다소 다르게 나타났는데, 이는 모델에서 내부 열에 의한 열변형을 직접적으로 고려하지 않았기 때문이다.

하지만 기존 균열 네트워크와 벽면 손상 균열을 고려한 경우에는 그 경향이 상당히 달라진다. 그림 10은 현시 암반균열 및 처분공 주변의 손상 균열을 고려한 균열 암반 모델에 대한 해석 결과를 보여준다. 그림에서 선들은 기존 균열 또는 전파된 균열들을 나타낸다. 무결암으로 모델링했을 경우 최대 응력 집중이 108 MPa

정도인데 비해 그림 10에서 보듯이 최대 응력집중은 190 MPa에 이르고 또한 기존 균열들의 영향으로 인해 매우 불규칙한 분포를 보인다.

4.1 Wall block 모델

각 연구진들로부터의 wall block 모델 해석 결과 분석을 통해 블록 내의 응력 분포는 균열의 존재 여부와 그 기하형상에 따라 매우 의존함을 알 수 있었다. 또한 1백만년까지의 열-수리-하중 중 처분후 100년 경과시에 그 영향이 가장 크게 나타났다. 그 대표적인 결과로서 Wall-Block 모델 2(WB2)에 대해 처분 후 100년이 경과한 후 3개 다른 모델을 사용한 계산 결과를 그림 11에 나타내었다.

처분 후 100년 경과시 최대 주응력은 중앙 무결암 부분에 집중되며 최대 크기는 약 100 MPa 정도로 나타났다. 하지만 계산된 최대주응력 크기는 사용된 모델에

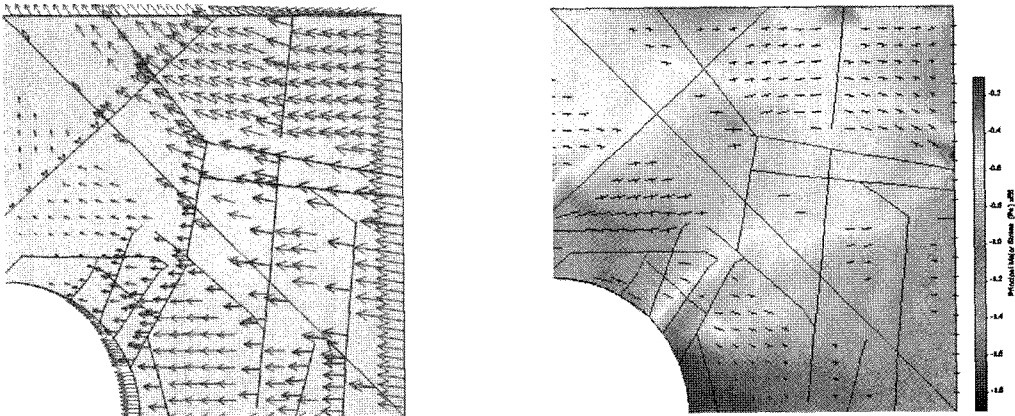


그림 10. FRACOD를 이용한 처분 후 100년 경과시 균열 암반에 대한 근거리장 모델링 결과

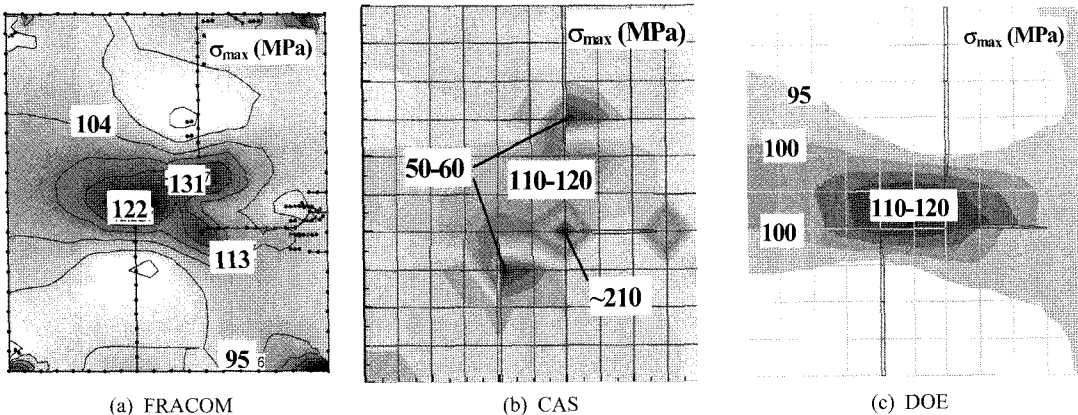


그림 11. WB2에 대한 100년 후 최대주응력 분포

따라 상당히 차이가 났는데, 이는 요소망의 이산화 정도의 차이에 주로 기인한 것으로 생각된다. 특히 기존 균열 주변의 상세한 응력 분포에 대한 정확한 계산을 위해서는 보다 세밀한 요소망의 사용이 필요하다.

그림 12는 wall block 모델 결과로부터 처분공 벽면을 따라서의 수평 및 수직 변위 단면도를 보여준다. DOE, CAS 및 JAEA의 계산결과는 서로 상당히 비슷하지만 완전히 일치하지는 않았다. 또한 무결 압축 모델(wall block 0)에 대해 구한 변위 결과를 식 (1) 및 (2)와 같은 해석해(analytical solution)를 이용하여 비교 하였다.

$$\frac{u_x}{L_x} = -\frac{(1-\nu^2)}{E}(\Delta\sigma'_x) + \frac{\nu(1+\nu)}{E}(\Delta\sigma'_y) + (1+\nu)\alpha_T\Delta T \quad (1)$$

(압축응력이+)

$$\frac{u_y}{L_y} = \frac{(1-\nu^2)}{E}(\Delta\sigma'_y) - \frac{\nu(1+\nu)}{E}(\Delta\sigma'_x) - (1+\nu)\alpha_T\Delta T \quad (2)$$

(압축응력이+)

여기서 u_x 와 u_y 는 해석을 통해 구한 변위이고 L_x 과 L_y 는 블록 모델의 크기로서 각각 0.1 m이다. α_T 는 암석

의 열팽창계수이며 ΔT 는 온도 변화, E 와 ν 는 각각 탄 성계수와 포아송비를 나타낸다.

그림 13은 위 식에서 구한 해석해 결과와 우하부 코 너에서의 x- 및 y-변위 결과를 비교한 것이다. 결과는

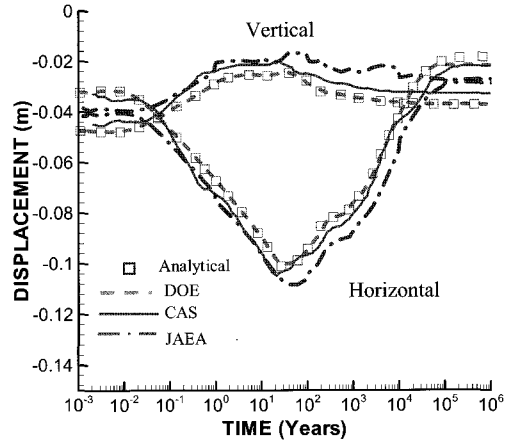
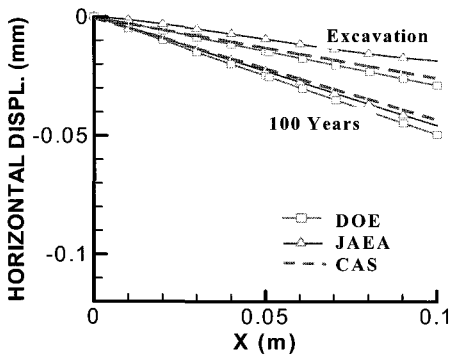
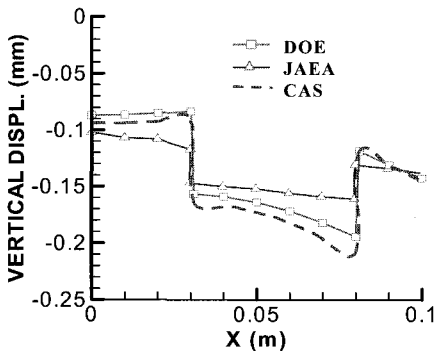
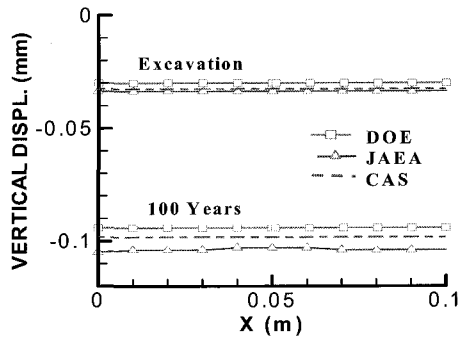


그림 13. WB0의 하부 우측 모서리 (0.1,0)에서의 수평 및 수직 변위 비교



(a) wall block 0



(b) wall block 3

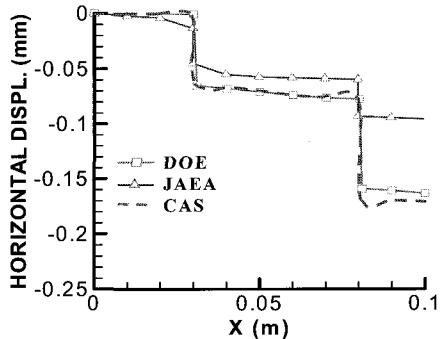


그림 12. Wall block 모델 결과로부터 처분공 벽면을 따라서의 수평 및 수직 변위 비교

DOE에 의한 해석 결과는 해석해와 잘 일치하였지만, CAS와 JAEA의 결과는 어느 정도 일치하였지만 약간의 차이를 보였다. 이러한 차이는 내부 및 경계조건을 적용하는데 있어서 BMT 해석의 차이에 기인하는 것으로 보인다. 경계요소 코드인 FRACOD로 계산한 결과는 다른 결과와 상당한 차이를 보였는데 이는 경계요소 모델에서 내부 열팽창의 영향을 배제되었기 때문이다. 응력 수준에 기초한 압식 균열이 주요한 관심사일 경우에는 이러한 FRACOM의 접근법도 실용적인 면에서 타당하지만, 정확한 열변형이 고려되어야 할 경우에는 문제가 될 수 있다.

DOE 및 CAS에 의한 민감도 분석 결과 내부 열팽창은 계산된 변위에 큰 영향을 주지만 응력 분포에는 별 영향을 주지 않는 것으로 밝혀졌다. 즉 내부 열팽창을 고려한 경우의 발생 변위가 매우 작으므로(0.1 mm 이내) 전체적인 모델 결과 비교에는 크게 중요하지 않다. 따라서 본 연구에서 초점을 맞춘 손상 영역 해석 시에는 내부 열팽창을 무시하여 응력 분포와 파괴 과정에 초점을 맞추어 해석하는 것이 가능할 것이다.

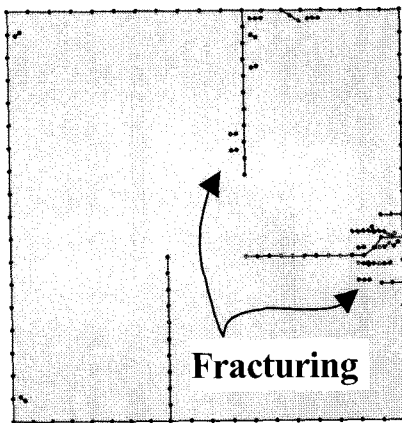
이산 균열의 전파 및 생성 또는 소성영역을 직접적으로 고려한 wall block 모델의 주요 결과를 그림 14에 나타내었다. 경계요소법을 사용한 이산 균열 전파를 모델링한 결과와(FRACOM) cellular automation법을 이용한 유도 소성변형율의 경우(CAS) 예측 균열 발생대가 대체적으로 일치하고 있다. 즉 수평 기준 균열의 경계 접촉부, 상부 균열 첨단 부위를 중심으로 명시적인 균열(FRACOM) 또는 소성 변형률이 축적되어 파괴나 균열 전파 상태임을 알 수 있다.

5. 결 론

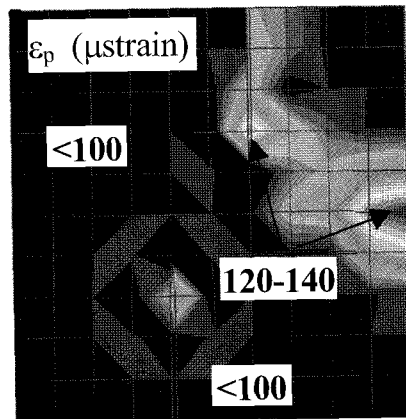
본 논문에서는 DECOVALEX 국제 협력 연구 프로젝트의 현황을 소개하고 저자가 직접 참여한 방사성폐기물 처분공 주변 굴착 손상영역(EDZ)에서의 열, 수리, 역학 및 화학 상호작용으로 인한 영향을 모사하기 위한 국제 협력 BMT 모델링의 주요 결과를 제시하였다.

시간의존 특수 경계 및 내부 조건을 고려한 wall block 및 근거리장 두 가지 BMT 모델 들로부터의 해석결과는 연구진들 사이에 상당히 유사하게 산출되어, 이러한 벤치마크 시험이 EDZ 영향을 설명할 수 있는 좋은 일 방법임을 확인할 수 있었다. 근거리장 모델 해석의 경우 최대주응력은 갱도 crown에서 약 100 MPa 정도였으며 최소 주응력은 약 10 MPa을 보였다. 이 정도의 응력 크기는 무결한 화강암반에서 즉각적인 파괴를 야기할 만한 수준은 아닌 것으로 보인다. 하지만 80-100 MPa 정도의 큰 압축응력이 수천 년 동안 유지되고 60 MPa 이상의 응력이 전체 100,000년 이상 전 처분 생애주기 동안에 지속됨을 유의해야 한다. 이러한 조건은 암석을 약화시키는 응력 부식(stress corrosion) 현상을 야기할 수 있으며, 심각한 시간 의존 거동을 발생시킬 수 있다. 또한 기존 균열 압박을 고려한 근거리장 모델의 경우에는 응력 및 변위 분포가 상당히 불연속적으로 분포하고 국부적으로 기존 균열 근처에서는 190 MPa에 이르는 큰 응력 집중이 발생하였다.

기존 균열이 있는 wall block 모델의 경우 그 이상의 응력 집중을 보여서 파괴 과정에 큰 영향을 줄을 확인하였다. 이러한 영향은 향후 BMT Stage 2와 Stage 3의 상세한 연구를 통해 규명될 수 있을 것이다.



(a) FRACOM의 경계요소법



(b) CAS의 cellular automation 방법

그림 14. 처분 후 100년 경과 시 이산 균열 발생 예측 결과

사 사

본 연구는 국제 협력 연구인 DECOVALEX-THMC 프로젝트에 저자가 직접 참여하여 수행되었다. 본문에서 언급한 모든 기금 출연 기관 및 공동 연구를 진행하고 결과를 논의한 Task B 관련 모든 연구진에 깊은 감사사를 드리는 바이다.

참고문헌

1. 권상기, 박정화, 최종원, 강철형, 2002, THM coupling 메커니즘에 대한 고찰 - 심지층처분 시스템 개발, 한국원자력연구원 연구 보고서, KAERI/AR-627/2002.
2. 황용수, 1997, DECOVALEX 국제 공동연구 현황 분석, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, Vol. 7, 246-252.
3. Lee H.-S., Rinne, M. and Shen, B. 2006. Modeling discrete fracturing of wall blocks on a deposition hole by THM loading. Proceedings of GeoProc 2006 Conference, Nanjing, China, 332-337.
4. Rutqvist J., Birkholzer J.T., Chijimatsu, M., Kolditz, O., Liu, Q.-S. Oda, Y., Wang, W. and Zhang, C.-Y. 2006c. Comparative simulation study of coupled THM processes near back-filled and open-drift nuclear waste repositories in Task D of the International DECOVALEX Project. Proceedings of GeoProc 2006 Conference, 428-433.
5. Rutqvist, J., Feng, X.-T., Hudson, J., Jing, L., Kobayashi, A., Koyama, T., Pan, P.-Z., Lee, H.-S., Rinne, M., Sonnenthal, E. and Yamamoto, Y., 2006a, Multiple-code benchmark simulation study of coupled THMC processes in the excavation disturbed zone associated with geological nuclear waste repositories. Proceedings of GeoProc 2006 Conference, Nanjing, China, 397-402.
6. Rutqvist, J., Sonnenthal, E., Jing, L. and Hudson, J. 2006b. Task definition for DECOVALEX THMC Task B, Phase 3: A Bench Mark Test on Drift Wall Coupled THMC Processes.
7. Stephansson, O., Tsang, C.-F., Jing, L. and Kautsky, F., DECOVALEX project 1992-2006: purposes, tasks and main achievements, Proceedings of GeoProc 2006 Conference, Nanjing, China, 31-44.



이 희 석

1993년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1995년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1999년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사
Tel: 02-3700-7229
E-mail: hslee@skec.co.kr
현재 SK건설 GSUC팀 부장