

방사성 폐기물의 열하중에 의한 절리암반의 거동에 관한 수치해석적 연구*

문현구¹⁾ · 주광수²⁾

A Numerical Study on the Response of Jointed Rock Mass Due to Thermal Loading of Radioactive Waste

Hyun-Koo Moon and Kwang-Sue Jue

ABSTRACT

Thermomechanical analysis is conducted on the radioactive repository in deep rock mass considering the in-situ stress, excavation and thermal loading of a radioactive waste. Thermomechanical properties of a discontinuous rock mass are estimated by a theoretical method so called sequential analysis. Using the estimated properties as input for finite element analysis, the influence on temperature distribution and thermal stress is analyzed within the scope of 2-dimensional steady state and transient heat transfer and coupled thermal elastic plastic behaviour. Granitic rock mass is taken for this analysis. The analysis is done for two different rock mass conditions, i.e. continuous-homogeneous and highly jointed conditions, for the purpose of comparison. In the case of steady state, the extent of disturbed zone around the storage tunnel due to the heat production of the spent-fuel canister varies depending on the thermomechanical properties of the rock mass. In the case of transient analysis, the response of the jointed rock mass to the thermal loading after radioactive waste disposal varies significantly with time, resulting in dramatic changes in the both size and location of disturbed zone.

1. 서 론

전력수요의 증가와 전체 에너지 중 원자력이 차지하는 분담율의 점진적인 증가로 인해 방사성 폐기물의 양도 점차 증가하는 추세에 있다. 원자력 발전 후 발생하는 방사성 폐기물은 방사성 동위원소의 농도, 방사능 붕괴시간 등에 따라 저준위, 중준위, 고준위 방사성 폐기물로 나눌 수 있다. 중·저준위 방사성 폐기물에 대한 국내의 관리방법은 기체 또는 허용치 이하의 액체 폐기물의 경우 고성능 필터를 통해 여과 회색시킨 후 대기 또는 해양으로 방출시키고 있다.

고체 폐기물의 경우 소각, 압축하여 아스팔트나 시멘트와 함께 고화하여 특수용기에 저장한 후 지하 10~30 m에 임시 저장하고 있다. 특히, 높은 발열특성과 방사능을 다량 함유하여 보관이 어려운 사용후 핵연료(고준위 방사성 폐기물)는 원자력 발전소 내 봉산수 저장조에 임시 보관되고 있다.^{1,2)}

현재 우리나라는 8기의 경수로형 발전기와 1기의 중수로형 발전기를 가동하고 있으며, 2기의 발전기를 추가 건설중에 있다. 총 9기의 원자력 발전소에서 발생하는 사용 후 핵연료는 연간 230~270 톤에 이르며, 중·저준위 폐기물의 경우 연간 약 6250 드럼이

* 1994년 7월 26일 접수

* 이 연구는 1991-1993년도 한국과학재단 연구비 지원에 의한 결과임.

과제번호 : 911-0508-005-2

1) 정회원, 한양대학교 자원공학과 부교수

2) 학생회원, 한양대학교 자원공학과

발생하고 있다. 이러한 추세로 볼 때 원자력 발전소 내 임시 저장시설은 가까운 장래에 거의 포화상태에 이를 것이다.^{1,2)} 이에 정부는 처분에 위험성이 거의 없는 중·저준위 방사성 폐기물의 경우 높이 5~10 m의 인공방벽을 만들어 천층에 영구 처분하기로 결정하였다. 현재 정부에서 추진하고 있는 방사성 폐기물 처분장은 중·저준위 폐기물 처분장이지만 가까운 장래에 고준위 폐기물의 처리문제가 대두될 것이다.

방사성 폐기물을 심부 암반내에 처분한다고 가정할 때, 방사성 폐기물 처분시설의 일반적인 구조는 지상시설로부터 약 300~1200 m의 저장심도까지 수직 또는 경사터널로 접근한 후 수평으로 진입터널과 저장터널을 굴착한다. 저장터널은 보통 면적 800 ha의 장방형 영역 또는 반경 1.5 km 범위 내에 규칙적으로 배열한다.^{3,4)} 저장터널의 바닥 또는 측벽에 일정한 간격으로 다수의 용기저장공(canister borehole)을 굴착하여 처분용기를 밀폐하게 된다. 이 처분장 시설은 저준위 폐기물의 경우 약 300년, 고준위 폐기물은 약 10만년 동안 안정성이 유지되도록 설계되어야 하며, 이중 시설 운영기간은 약 25년에서 30년, 회수를 대비한 감시기간은 약 50년을 예상하고 그 이후 남은 수명동안 원격감시를 계속한다.⁵⁾

지하 심부암반에 방사성 폐기물 처분장을 설계하는 과정은 긴 시설수명과 폐기물의 발열특성이 주변암반에 미치는 영향, 방사성 핵종이 환경에 미치는 영향 등을 종합적으로 분석하여야 하는 기술적 특수성을 지니고 있다. 또한 저장시설의 반경을 고려할 때 절리, 층리 등의 불연속면의 분포를 예상하는 것도 처분장 설계의 필수조건이라 할 수 있다. 본 연구는 불연속 암반의 열역학적 성질을 이론적으로 규명하고, 그 결과 얻어진 암반의 열역학적 변수들을 입력자료로 하여 방사성 폐기물 저장터널의 굴착에 의한 응력과 폐기물 저장후 열응력이 주변암반에 미치는 영향을 파악하기 위해 수행되었다.

다수의 절리가 존재하는 불연속 암반의 열적 성질을 파악하기 위해 불연속 암반의 등가 열전도계수 및 등가 열팽창계수를 추정하는 이론적 방법을 사용하였다. 불연속 암반의 등가물성과 열전달 유한요소법을 사용하여 방사성 폐기물을 저장하는 용기저장공 주변암반의 온도분포를 정상 및 천이상태에서 분석하였다. 열응력 해석의 경우 열탄소성 유한요소법을

사용하여 초기응력, 저장터널 굴착에 의한 응력 및 열하중에 의한 열응력을 종합적으로 분석하였다. 처분장 암반은 연속 균질암반, 4개의 절리군이 존재하는 암반 등 2가지 경우를 각각 비교하였다.

2. 고준위 방사성 폐기물 처분장에 대한 개관

고준위 방사성 폐기물(이하 “방사성 폐기물”은 “고준위 방사성 폐기물”을 지칭함)의 처분은 처분장의 운영 및 감시기간 그리고 폐쇄 후의 장기간 동안 방사능 누출량을 설정된 허용치 이하로 유지하여 인간 생활환경과 생태계에 영향을 미치지 않도록 하여야 한다. 일반적으로 고려되는 방사성 폐기물 처분장소는 현실적인 기술문제와 경제성 및 안정성 문제를 고려할 때 지하 심부가 가장 적절한 지역으로 알려져 있으며, 대부분의 국가에서는 지하 심부암반에 폐기물 처분장을 건설하는 계획을 진행중이다. 이러한 심부암반에 방사성 폐기물을 안전하게 처분하기 위해서는 모암의 지질학적 역학적 특성을 고려하고 천연방벽, 인공방벽, 폐기물 밀폐용기를 선별하는 등의 종합적인 방법이 요구된다.

2.1 천연방벽

천연방벽은 방사성 핵종의 흐름을 억제하는 모암 주변의 자연환경을 의미한다. 방사성 폐기물 처분장 건설시 모암은 (1) 열의 확산을 쉽게 하기 위한 높은 열전도성, (2) 방사성 핵종의 이동을 지연시키기 위한 높은 흡착성, (3) 지하수면과의 격리성, (4) 모암의 낮은 투수성, (5) 처분장의 굴착을 용이하게 하는 높은 소성특성, (6) 미래 개발 가능성에 대한 회박성, (7) 장기간의 안정성 유지를 위한 희박한 지질학적 변동 가능성 등의 특성을 고려하여야 한다. 이와 같은 요소들을 고려할 때 방사성 폐기물 처분장의 모암은 암염층, 점토암 및 화강암, 현무암, 편마암, 석회암 등과 같은 결정암 지대가 적당하다고 볼 수 있다.⁶⁻⁸⁾

암염층은 매우 낮은 지하수 함량을 지니고 있으며 높은 열전도성 및 소성특성을 지니고 있으며 굴착이 용이한 장점을 지니고 있다. 점토암의 경우 높은 소성특성과 낮은 투수성을 지니고 있으며 핵종의 흡착력이 좋은 장점을 지니고 있다. 그러나 열전도성이 암염층에 비해 약 2~4배 낮고, 폐기물이 방출하는

높은 열하중을 장기간 받을 경우 안정성에 문제가 있으며 굴착작업의 어려움을 해결하여야 한다. 또한 점토암의 분포지역이 주로 지표부근에만 존재하므로 방사성 폐기물의 심부 처분장으로는 적당하지 않다. 결정암의 경우 매질의 불연속성에 기인한 지하수 유동에 영향을 받으나 지하 심부에 처분장을 건설할 경우, 높은 지압에 의한 불연속면들의 압착에 의한 지하수 유동의 억제효과를 고려한다면 암반의 견고성 등의 장점으로 인해 적절한 장소라고 할 수 있다.^{9,10)}

2.2 인공방벽(engineered barriers)

고준위 방사성 폐기물 처분장 설계시 고려되는 방벽의 설계개념은 복수방벽(multi-barrier) 개념이 일반적이다. 복수방벽 개념이란 처분장은 모암의 특성을 감안한 천연방벽과 인공방벽으로 구성되어야 한다는 개념이다. 이는 처분장 운영시 장기간의 안정성을 한가지 방벽에 의존하기 보다는 다수의 방벽에 의존함으로써 발생 가능한 위험성을 줄이기 위한 것이다. 일반적으로 방사성 폐기물 처분장에 사용되는 인공방벽은 완충재(buffer), 뒤채움재(backfill), 처분용기, 그라우팅 등이 있다.

2.2.1 충전재

충전재는 완충재와 뒤채움재를 통칭하는 용어이다. 완충재는 저장공에 처분용기(canister)를 넣은 후 저장공을 채우는 물질이다. 완충재의 역할은 (1) 처분용기의 표면에 지하수의 접근과 부식을 억제시키고, (2) 방사성 핵종이 주변암석으로 확산되는 것을 방지하며, (3) 폐기물이 방출하는 열이 주변암반에 미치는 영향을 최소화하고, (4) 열응력에 의한 응력집중으로부터 처분용기를 보호하는 것이다. 완충재의 주요 구성물질은 벤토나이트 점토이며 높은 강도를 유지하기 위해 일반적으로 규사, 세일, 화강암, 현무암 및 석영조각 등과 혼합하여 사용되고 있다. 뒤채움재로 사용되는 물질은 일반적으로 완충재와 같은 물질을 사용하며 터널의 안정성을 유지하고 지하수의 유입을 방지하는 것이 주 목적이다.

2.2.2 폐기물 처분용기

처분용기는 고준위 방사성 폐기물이 방출하는 고열에 직접 접촉하므로 강한 열적 저항력을 가져야 하며, 장기간의 응력집중에 의한 변형을 방지하기 위해 높은 강도 특성을 지녀야 한다. 스웨덴의 방사성 폐기물 처리회사(SKB)가 기획한 KBS-3(Nuclear Fuel

Table 1. Design properties for selected disposal packages.¹³⁾

Package type	KFADP	KCRDP
Outer diameter (mm)	727	501
Total length (mm)	4360	4020
Empty weight (ton)	4.60	2.26
Loaded weight (ton)	7.02	4.67
Thermal load (W)	901.2	

KFADP: Korean Fuel Assembly Disposal Package
KCRDP: Korean Consolidated Rod Disposal Package

Safety), VLH(Very Long Hole) 처분장 설계에 사용된 처분용기는 주납(cast lead)으로 채워진 구리 처분용기, 50 mm 두께의 구리표면으로 된 강철 처분용기가 고려되고 있다.¹¹⁾ 캐나다의 경우 6.35 mm의 티타늄 합금 처분용기를 사용하고 있다.¹²⁾

처분용기의 크기는 처분할 폐기물의 양 및 준위에 따라 여러가지 형태가 사용된다. 중수로 원자로만 사용하는 캐나다의 경우 72개의 사용 후 핵연료를 다발로 묶어 처분용기에 폐기할 계획이다.¹²⁾ 우리나라는 경수로 및 중수로 발전기를 함께 운영하고 있으므로 사용후 핵연료에 따라 2가지 형태의 처분용기를 고려하고 있다(Table 1).

2.3 지하 시험시설

고준위 방사성 폐기물을 지하 심부암반 내에 처분할 경우 처분장의 안전성에 미치는 영향은 실내 모형시험 또는 실험실 실험에 의한 연구의 한계성 때문에 처분장과 유사한 지질학적 성질을 지닌 대규모 암반내에 지하 시험시설을 운영할 필요가 있다. 지하 실험시설에서 다루고 있는 내용은 (1) 폐기물의 발열특성으로 인한 모암의 열역학적 거동시험, (2) 지하수의 유동시험, (3) 방사성 핵종의 이동시험, (4) 지하학적 특성 시험, (5) 인공방벽에 대한 시험, (6) 굴착에 의한 터널의 안정성 평가시험의 6가지로 나눌 수 있다.^{7,12,14)}

외국의 경우 이미 십여년 전부터 이러한 지하 시험시설을 설치 운영하고 있으며, 2000년 초에 고준위 방사성 폐기물 처분장을 운영할 계획이다. 각국의 고준위 방사성 폐기물 처분장으로 고려하고 있는 모암과 지하 시험시설은 Table 2와 같다.

2.3.1 Stripa

Table 2. The Rock laboratories and related national disposal systems.⁶⁾

Countries	Repository (High Level Waste)		Rock Laboratories	
	First Operation (year)	Host Rock	Name/Location	Host Rock
West Germany	2000	Salt dome	ASSE/Wolfenbuttel KONRAD/Salzgitter GORLEBEN GTS/Grimsel(CH)	Saltdome iron ore, clay salt dome granite
France	2000	Granite, schist clay, salt (decision 1991)	Fanay-Augerès	Granite
Japan	2020	Crystalline	Akenobe Mine	Granite
Canada	2020	Granite	URL/Manitoba	Granite
Sweden	2020	Granite	HRL/Simpevarp Stripa	Granite
USA	2003	Tuff, Salt (decision 1993)	Yucca Mt/Nevada NSTF/Hanford WIPP/New Mexico Avery Island/Louisiana Salt Vault/Kansas	Tuff Basalt Salt Salt Salt

NSTF: Near Surface Test Facility, WIPP: Waste Isolation Pilot Plant, HRL: Hard Rock Laboratory, URL: Underground Research Laboratory

스웨덴 스톡홀름 서쪽으로 250 km 지점에 위치한 스트리파 폐철광에 경제협력개발기구(OECD)의 후원으로 1980년부터 심부 화강암 내에 방사성 폐기물을 처분하기 위한 연구를 수행하고 있다. 시험시설은 심도 338~360 m에 위치하며, 1986년부터 현재까지 3단계 과정이 진행되고 있다. 이 계획에 참가하고 있는 국가는 캐나다, 핀란드, 일본, 스페인, 영국, 스위스, 미국이며 국제 합동 기술위원회를 구성하고 있다. 이 위원회의 지도하에 스웨덴 방사성 폐기물 처리회사의 주관으로 연구가 진행되고 있다.

연구내용의 핵심은 (1) 처분장 부지의 특성을 파악하는 장비와 과정개발, (2) 결정암내의 균열을 통한 지하수 이동 및 용질이동 문제의 전산모델링, (3) 처분용기와 모암 주위의 지하수 흐름을 억제함으로써 폐기물을 고립시킬 수 있는 인공방벽의 설계의 3가지이다. 스트리파 계획의 단계별 조직은 Fig. 1, 2와

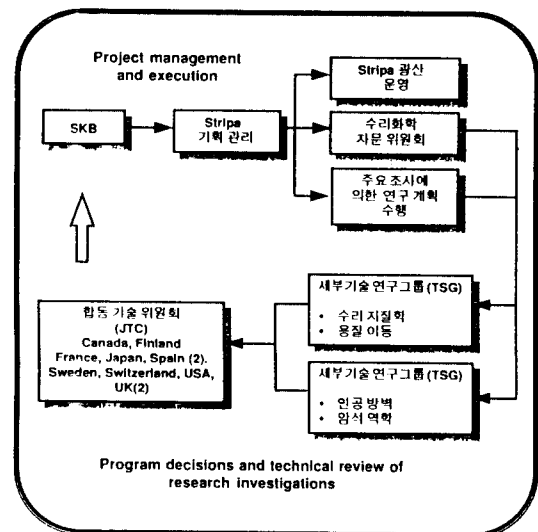


Fig. 1. Organization of Phases 1 and 2 of the Stripa project.

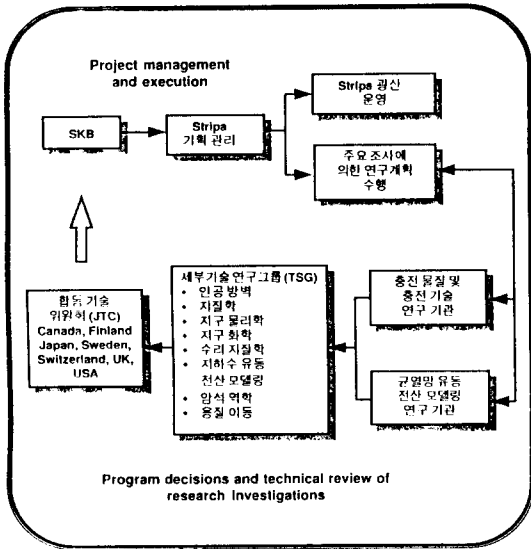


Fig. 2. Organization of Phases 3 of the Stripa project.

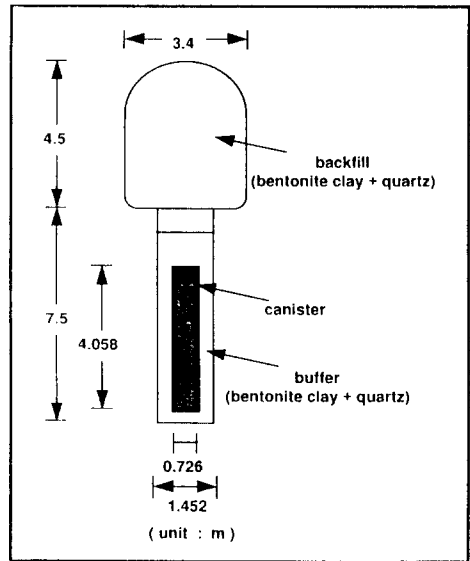


Fig. 3. The disposal hole with canister and buffer material.

같다.¹⁵⁾

2.3.2 URL

캐나다의 URL은 Manitoba의 반상 화강암 지대에 1984년에 건설되어 1986년부터 운영되었다. 시험시설은 심도 240 m, 440 m에 위치하며 1994년까지 운영할 계획이다.⁷⁾ 이 시험시설의 주요 시험내용은 건설기간 중 각종 지질학적 특성 시험, 현장응력 측정, 지하수위 강하, 수갱굴착에 따른 암반거동, 암반의 열역학적 거동, 수리지질 시험 등이다.

3. 유한요소모델 설정

방사성 폐기물 처분장의 해석은 해석목적에 따라 저장터널을 중심으로 한 국부적 해석과 처분장 주변 전체를 다루는 광역적 해석으로 확대할 수 있다. 해석영역을 처분장 전체로 정할 경우는 지하수 유동과 핵종의 이동경로를 분석하는데 목적이 있다. 본 연구에서는 처분용기에서 발생하는 열원의 영향을 파악하는데 초점을 두었기 때문에 해석영역을 저장터널 규모로 한정하였다. 저장터널의 형태는 스웨덴의 방사성 폐기물 처리회사(SKB)가 기획하고 있는 말굽형 터널을 사용하였다(Fig. 3). 이 터널의 폭은 3.4 m, 높이 4.5 m이며, 터널의 바닥에 직경 1.452 m, 길이 7.5 m의 원통형 용기저장공이 굴착되어 있다.¹⁶⁾ 용기저장공은

저장터널의 바닥면을 따라 등간격으로 굴착되어 있으며, 저장터널 또한 일정한 간격(25 m)으로 굴착되어 있다.

상기 저장터널을 대상으로 전산 모델링을 수행하기 위한 2차원 유한요소망을 작성하였다.¹⁷⁾ 모델의 크기는 저장터널의 배열과 대칭면을 고려하고, 외곽경계면의 영향을 최소화하기 위해 가로 25 m, 세로 60 m로 하였다(Fig. 4). 용기저장공은 지하 900 m에 위치하며 용기저장공내 처분용기(canister)는 길이 4.058 m, 반경 36.3 cm의 크기를 가정하였다. 처분용기와 저장공사이의 틈은 36.3 cm이며 이 공간을 완충재로 충전하였다(Fig. 3).

일반적으로 암반내에 작용하는 응력은 그 형성원인에 따라 지하에 공동을 굴착하기 이전에 존재하는 초기응력과 공동굴착으로 재분배된 2차응력으로 나눌 수 있다. 지하암반 구조물의 설계 및 시공에서 2차 응력에 영향을 미치는 초기응력 조건의 결정은 터널의 안정성 평가에 중요한 요소라 할 수 있다. 초기응력의 결정은 지질구조 및 지형적 특성에 따라 상이하기 때문에 일반적으로 통용될 수 있는 식을 제시하기는 어렵다. 본 모델실험에 사용한 초기 현장응력의 크기는 국내 문헌에 보고된 초기 현장응력식을 Fig. 4의 유한요소망에 적용하였다.¹⁸⁾

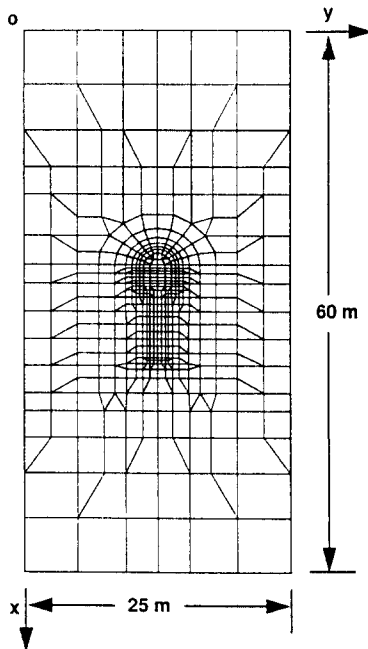


Fig. 4. The finite element mesh for radioactive waste storage tunnel.

4. 대상암반의 열역학적 물성

저장터널 주위암반은 연속 균질암반과 절리암반의 2가지 경우를 가정하였다. 연속 균질암반의 경우 문헌에 보고된 실험치를 사용하였다. 또한 암반내 존

재하는 불연속면이 암반의 열역학적 성질에 미치는 영향을 파악하기 위해 이론적 방법에 의하여 절리암반의 열역학적 성질을 추정하였다.

4.1 연속 균질암반

저장터널의 대상암반은 결정질 암반 중 화강암을 대상으로 하였으며, 그 물성은 문헌조사를 통해 얻어진 화강암 물성들의 평균값을 사용하였다.¹⁹⁾ 암반의 물성은 모두 등방성을 갖는다고 가정하였으며, 완충재는 벤토나이트 점토와 석영조각을 혼합하였을 경우의 물성을 사용하였다.^{19,20)} 그 물성은 Table 3과 같다.

4.2 절리암반

암반내 존재하는 절리는 일정한 두께를 가지는 것으로 가정하고 절리암반에 대한 등가물성치를 계산하였다. 본 연구에 사용한 절리자료는 Stripa 지역의 4개 절리군에 관한 절리자료를 인용한 것이다(Table 4). Table 4에 나타난 절리자료로부터 통계적 방법을 사용하여 절리도를 발생시켰다(Fig. 5). 이때 절리의 분포는 Poisson 분포를 따르며 절리의 간격은 음지수 분포, 절리의 길이는 로그정상분포를 따른다고 가정하였다.²²⁾ 이러한 통계적 절리재현 방법은 절리의 기하학적 분포상태를 충실하게 반영할 수 있는 장점이 있다. 가로 25 m, 세로 60 m 영역에 발생시킨 절리도는 Fig. 5와 같다

Table 3. Thermomechanical properties of granite and buffer material.

	E (GPa)	G (GPa)	ν	C (MPa)	T (MPa)	R (MPa)	k (W/m ² °C)	α (10 ⁻⁵ /°C)
화강암	60	25	0.2	150	10	22	2.6	1
완충재	19	7	0.3	—	—	—	0.6	1

E: Young's modulus, G: 전단탄성계수, ν : Poisson's ratio, C: 압축강도, T: 인장강도, R: 전단강도, k: 열전도계수, α : 열팽창계수

Table 4. Geometric data on joint sets.²¹⁾

Joint set number	Number of joints	Mean joint trace length (m)	Standard deviation of joint trace length (m)	Mean dip (degree)
1	666	2.190	2.269	66
2	872	1.113	1.039	85
3	427	1.607	1.852	52
4	744	1.378	1.125	5

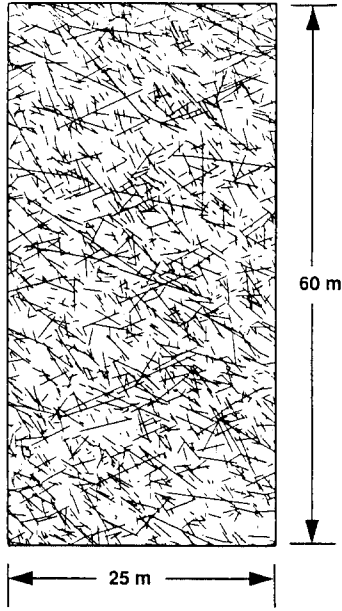


Fig. 5. The realization of joint map from Stripa geologic data.

4.2.1 탄소성 계수

일반적인 절리의 변형특성은 암석의 종류, 절리면의 거칠기, 지하수 및 충전물질의 상태에 따라 변하며, 절리의 수직강성률 K_n 과 전단강성률 K_s 는 식 (1)과 같다. 여기서 t_j 는 절리의 간극을 나타내며, 아래첨자 j 는 절리의 번호를 나타낸다.

$$K_n = \frac{E_j}{t_j}, \quad K_s = \frac{G_j}{t_j} \quad (1)$$

일반적인 절리의 간극은 0.025~0.5 cm에 분포하며, 본 연구에서 사용한 절리의 간극은 문헌에 나타난 화강암의 평균간극인 380 μm 를 가정하였다.²³⁾ 절리의 간극과 Table 4의 절리군에 관한 자료를 이용하여 각 절리군의 체적분율을 계산하였다(Table 5). 한편 절리와 주변암석간의 탄성대비(modulus contrast)는 일반적인 절리의 전단강성율이 0.01~31.6 GPa/m에 분포하는 것을 감안하여 10^4 으로 가정하였다.¹⁹⁾

각 절리군의 방향성과 체적분율 및 탄성대비를 순차적 해석법(sequential analysis)에 적용하여 절리암반의 탄성계수를 계산하였다.²⁴⁾ 절리암반의 강도특성은 절리의 방향성, 점착력, 마찰각을 고려한 Mohr-Coulomb 전단 파괴조건과 인장 파괴조건으로부터

Table 5. Volume fraction of each joint set.

Joint set number	Volume fraction ($\times 10^{-2}\%$)
1	1.69
2	2.21
3	1.08
4	1.88
Total = $6.86 \times 10^{-2}\%$	

Table 6. Elastic and strength properties of jointed rock mass.

Elastic properties		Strength properties (MPa)	
E_x^*	14.6 GPa	C_x^*	3.6
E_y^*	10.6 GPa	C_y^*	7.4
E_z^*	59.9 GPa	C_z^*	150
G_{xy}^*	3.8 GPa	T_x^*	0.6
G_{yz}^*	4.7 GPa	T_y^*	0.6
G_{zx}^*	7.0 GPa	T_z^*	10
ν_{xy}^*	0.2389	R_x^*	0.7
ν_{yz}^*	0.0355	R_y^*	0.6
ν_{zx}^*	0.2	R_z^*	0.6

계산하였다.²⁵⁾ 절리의 평균 점착강도 600 KPa, 마찰각 40° 를 사용하여,¹⁹⁾ 4개 절리군을 포함하는 암반의 강도성분을 계산하였다. Table 6은 4개 절리군을 포함하는 암반의 탄성계수와 강도값이다.

4.2.2 열전도계수

열전도계수는 암반의 온도분포 해석에 필수적인 요소이다. 직교 이방성을 가진 암석의 경우 열류량-온도구배의 관계식은 식 (2)와 같은 Fourier 식으로 표현된다. 절리암반은 절리와 주변암석의 2상 혼성모델(2-phase composite)로서 각 상에 식 (2)의 Fourier 식을 적용할 수 있다.

$$\{q_i\} = -[k_{ij}] \{\phi_{,j}\}, \quad \phi_{,j} = \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \quad (2)$$

여기서, $\{q_i\}$ 는 열류벡터, $\{\phi_{,j}\}$ 는 온도구배벡터, i, j 는 직교 좌표축 x_1, x_2, x_3 (또는 x, y, z), ϕ 는 온도를 나타내며, k_{ij} 는 열전도계수이다.

직교 좌표계에서 y 축이 절리면에 수직인 축일 경우 절리면에 평행한 방향으로의 적합조건과 수직인 방향으로의 평형조건을 적용하면 열류량-온도구배 관계

식은 식 (3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} q_x + \Delta q_x^{(p)} \\ q_y \\ q_z + \Delta q_z^{(p)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11}^{(p)} & k_{12}^{(p)} & k_{13}^{(p)} \\ k_{21}^{(p)} & k_{22}^{(p)} & k_{23}^{(p)} \\ k_{31}^{(p)} & k_{32}^{(p)} & k_{33}^{(p)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial\phi/\partial x \\ \partial\phi/\partial y + \Delta(\partial\phi^{(p)}/\partial y) \\ \partial\phi/\partial z \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 $[k_{ij}^{(p)}]$ 는 암석($p=1$) 및 절리($p=2$)에서의 열전도계수, $\Delta q_x^{(p)}$, $\Delta q_z^{(p)}$ 는 암석 또는 절리에서의 열류편차, $\Delta(\partial\phi^{(p)}/\partial y)$ 는 암석 및 절리에서의 온도구배 편차를 나타낸다. 절리암반 내에서의 등가 열전도계수 텐서는 식 (4)와 같은 형태를 갖는다.

$$\{q_i\}^* = -[k_{ij}^*] \{\phi_{,j}\}^* \quad (4)$$

식 (3)에서 절리암반 전체의 평균열류량과 평균온도구배의 성질에 의해 각 편차를 제거하고, 그 식을 식 (4)와 비교함으로써 9개 성분의 등가 열전도계수를 유도하였다. 단일 경사절리를 포함하는 암반의 경우 식 (5)에 의한 좌표변환으로 유도될 수 있다.

$$[k_{ij}^*] = [T] [k_{ij}] [T]^t \quad (5)$$

여기서 $[T]$ 는 (3×3) 직교행렬의 방향여현 성분이며, 위첨자 t 는 전치행렬을 나타낸다. 한편 다수의 절리가 존재하는 암반의 등가 열전도계수는 원하는 절리암반의 형상을 얻을 때까지 각 절리를 순서적으로 삽입하고 회전시키는 순차적 방법을 반복 적용하였다.²⁶⁾

4.2.3 열팽창계수

등방성 물질에 응력이 작용하지 않을 경우 온도차에 의한 열변형을 ϵ_{ij} 는 열탄성 이론에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon_{ij} = \alpha \Delta T \delta_{ij} \quad (6)$$

여기서 α 는 등방 열팽창계수, ΔT 는 물질의 온도차, δ_{ij} 는 Kronecker delta를 나타낸다.

절리암반의 등가 열팽창계수를 구하기 위해 Levin에 의한 2상 혼성물에 대한 열팽창 이론에 의한 기본적 결과와 Rosen과 Hashin의 일반 이방성 혼성물에 대한 열팽창계수를 구하는 이론식을 사용하였

Table 7. Equivalent thermal properties of jointed rock mass.

Thermal conductivity (W/m°C)		Thermal expansion coefficient ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	
k_{xx}^*	k_{yy}^*	α_{xx}^*	α_{yy}^*
2.53	2.49	12.61	11.97

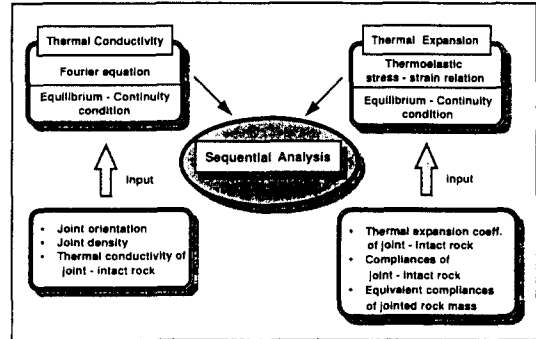


Fig. 6. The scheme for estimating thermal properties of jointed rock mass.

다.²⁷⁾ 즉 절리와 암석의 2상 모델을 혼성물로 간주함으로써 절리암반의 이방성 등가 열팽창계수 α_{ij}^* 는 다음과 같이 표현된다.²⁸⁾

$$\alpha_{ij}^* = \bar{\alpha}_{ij} + P_{klmn} (M_{mnij}^* - \bar{M}_{mnij}) (\alpha_{kl}^{(1)} - \alpha_{kl}^{(2)}) \quad (7)$$

$$P_{klmn} (M_{mnrs}^{(1)} - M_{mnrs}^{(2)}) = I_{klrs} \quad (8)$$

여기서, $\bar{\alpha}_{ij}$ 는 절리 및 암석의 열팽창계수의 체적 평균, M_{ijk}^* , \bar{M}_{ijk} 은 절리암반의 등가 compliance, 절리 및 암석의 compliance의 체적평균, I_{klrs} 는 4차 단위 행렬이다. 위첨자 (1)은 암석, (2)는 절리를 나타낸다.

암석의 열역학적 성질(Table 3)과 절리의 열전도계수 $k_j = 0.026 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ 와 열팽창계수 $\alpha_j = 367 \times 10^{-5} / ^{\circ}\text{C}$ 를 이용하여²⁹⁾ 절리암반의 등가 열전도계수와 등가 열팽창계수를 계산하였다(Table 7). Fig. 6은 절리암반의 열적 물성을 구하는 과정을 나타낸 것이다.

5. 전산해석 조건

방사성 폐기물 저장터널 주위암반의 온도분포는 처분용기에서 발생하는 열량과 처분용기 표면에서의 온도에 의해 좌우된다. 일반적으로 처분용기에서 발

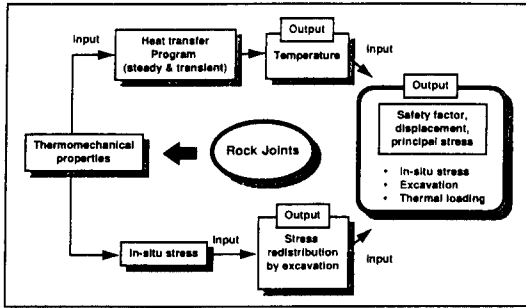


Fig. 7. Flow diagram for thermomechanical analysis.

생하는 열량과 온도는 폐기물을 밀폐한 후 중간 저장소에서의 냉각기간과 밀폐되는 폐기물의 양에 따라 상당한 차이를 보이고 있다.³⁰⁾ 정상상태에서 저장터널 주변암반의 온도분포를 예측하기 위해 사용한 경계 조건은 폐기물 처분용기의 발생열량을 500 W/m로 가정하였으며,^{31,32)} 외부경계는 지표의 온도를 27°C로 가정하고 심도에 따른 지온상승율(0.03 °C/m)을 고려한 온도경계조건을 사용하였다.

마지막으로 4개의 절리군을 포함하는 암반을 대상으로 폐기물 처분용기에서 발생하는 열이 시간에 따라 감소하는 영향을 고려하기 위해 2차원 천이(transient) 열전달 프로그램을 사용하여 시간에 따른 저장터널 주위암반의 온도변화를 분석하였다. 사용한 경계조건은 외부경계의 경우 정상상태에 의한 경우와 같이 심도에 따른 온도경계조건을 사용하였다. 폐기물 처분용기에서 발생하는 시간에 따른 열량 $q(t)$ 는 식 (9)와 같이 프랑스의 방사성 폐기물 저장시설에 관한 연구문헌에서 보고된 식을 사용하였다.³³⁾

$$q(t) = q_0 e^{-\beta t} \quad (9)$$

$$q_0 = \frac{Q_0}{2\pi r} \quad (10)$$

여기서 t 는 시간(year), β 는 실험상수(0.024/year), q_0 와 Q_0 는 각각 처분용기에서 발생하는 초기 열류량(W/m²)과 열량(500 W/m), r 은 처분용기의 반경을 나타낸다.

열응력 해석의 경우 열탄소성 유한요소 프로그램을 사용하여 2차원 평면 변형을 조건하에서 분석하였다. 저장터널 주위암반의 초기응력 상태는 처분용기를 처분한 시점을 초기조건으로 하여 시간에 따른 저장

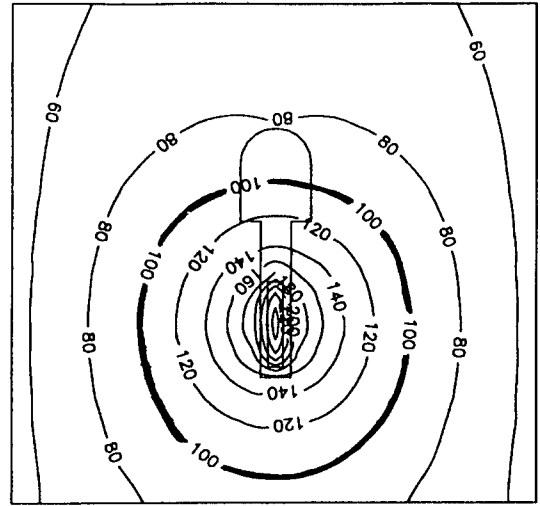


Fig. 8. The isotherms around the waste storage tunnel(steady state: continuous isotropic rock mass).

터널 주위암반의 온도차에 의한 열역학적 거동을 분석하였다. Fig. 7은 본 연구에 사용된 유한요소 프로그램에 의한 해석과정을 나타낸다.

6. 결과 및 고찰

4절의 암반의 열역학적 물성에 관한 입력자료와 5절의 해석조건에 의하여 정상상태 및 천이상태의 2가지 경우로 하여 저장터널 주위암반의 온도분포와 열역학적 거동을 분석하였다. 열응력 해석은 정상상태의 경우 암반의 주응력 분포 및 안전율 분포를 대상암반에 따라 비교 분석하였다. 또한 천이상태의 경우 온도변화에 따른 변위, 변형율, 교란대의 변화양상을 분석하였다.

6.1 정상상태

6.1.1 온도분포

Fig. 8은 연속 균질암반의 경우 저장터널을 중심으로 가로, 세로 25 m의 영역에서의 온도분포를 나타낸 것이다. 연속 균질암반의 경우 처분용기(최대 240°C)를 중심으로 동심원의 온도분포양상을 이루며 감소하는 경향을 보였다(Fig. 8). 4개의 절리군을 포함하는 암반의 경우 연속 균질암반의 온도분포와 근사한 경향을 보이는데 이는 낮은 절리밀도(Table 5)와 각 절

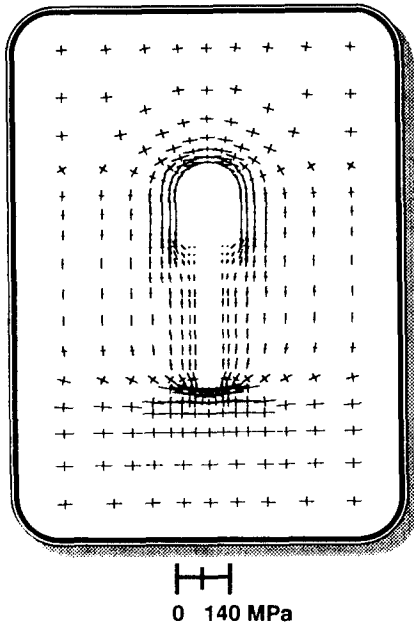


Fig. 9. The principal stresses due to excavation and thermal loading(continuous isotropic rock mass).

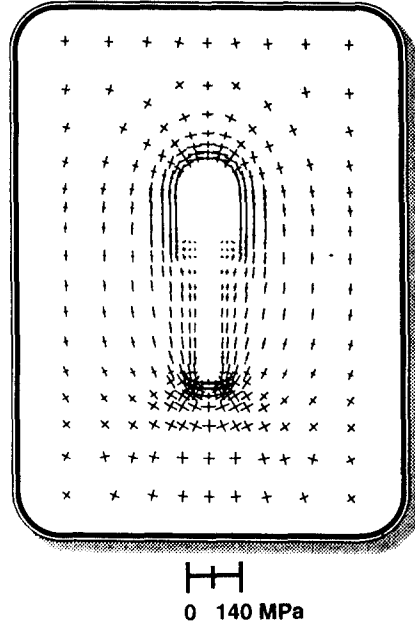


Fig. 10. The principal stresses due to excavation and thermal loading(jointed rock mass).

리군의 방향성에 따라 등방성에 가까운 열전도계수 (Table 7)에 의한 영향 때문이라고 생각된다. 처분용기를 중심으로 수평방향으로 더 높은 온도구배를 보이는 것은 처분용기의 길이비에 따른 영향이라고 생각된다.

6.1.2 열응력 해석

연속 균질암반의 경우 주응력 분포는 Fig. 9와 같이 저장터널 바닥, 용기저장공 상, 하단 측벽부에서 수평방향으로 국부적인 인장응력대가 형성되었으며 저장공 하단에서 수직방향으로 인장응력대(최대 2 MPa)가 형성되었다. 또한 터널 천정부와 용기저장공 하단부에서 압축응력에 의한 응력집중 현상이 발생하였다(터널 천정부: 최대 80 MPa, 저장공 하단: 최대 122 MPa). 이러한 응력집중 현상과 인장응력대는 4 개의 절리군을 포함하는 암반의 경우에서도 유사하게 나타났다(Fig. 10). 인장응력대의 경우 최대 8 MPa이 발생하였으며, 터널 천정과 저장공 하단의 응력집중은 각각 최대 60 MPa, 74 MPa이 발생하였다.

주응력 분포에 따른 안전율은 연속 균질암반의 경우 Fig. 11과 같이 처분용기에서 발생하는 열에 의해 용기저장공 측벽부에서 2 이하의 안전율을 보였으며,

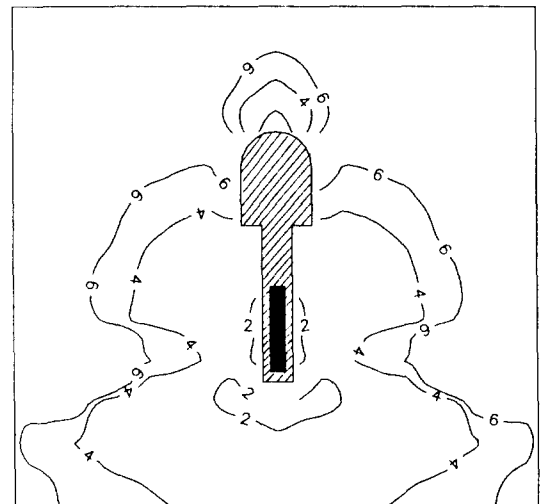


Fig. 11. The safety factor contours around the waste storage tunnel(continuous isotropic rock mass).

터널 천정부, 저장공 하단부에서 2 이하의 안전율을 보였다. 소성대의 분포는 터널 천정부와 저장공 바닥에서 국부적으로 형성되었다(Fig. 13). 절리암반의 경우 연속 균질암반의 경우보다 광범위하게 터널 천

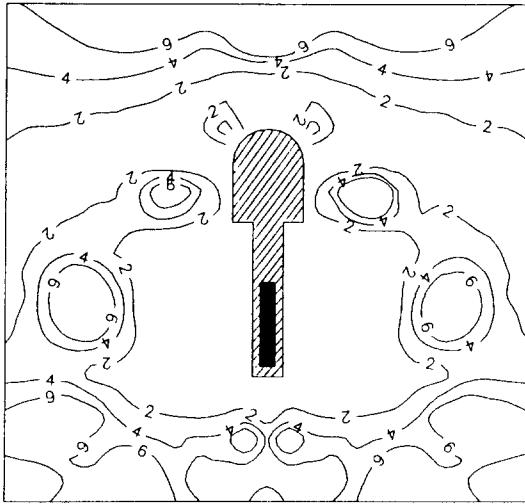


Fig. 12. The safety factor contours around the waste storage tunnel(jointed rock mass).

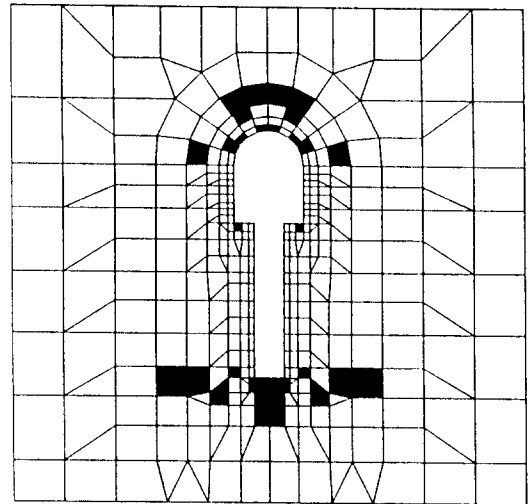


Fig. 14. The disturbed zone around the waste storage tunnel(jointed rock mass).

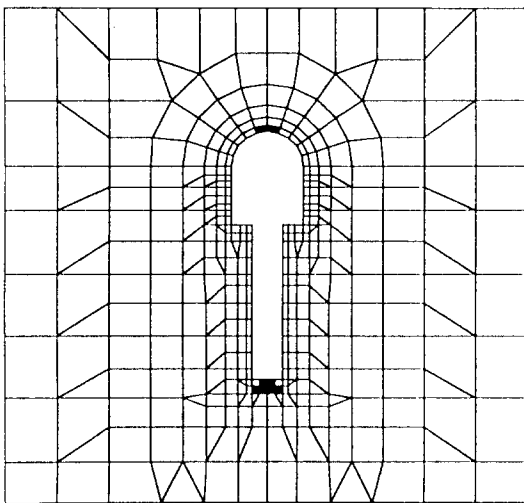


Fig. 13. The disturbed zone around the waste storage tunnel(continuous isotropic rock mass).

정부, 저장공 측벽부 및 하단부에서 가장 낮은 2 이하의 안전율 분포를 보였다(Fig. 12). 또한 열응력에 의한 교란대(disturbed zone)는 터널 천정부와 저장공 하단을 중심으로 연속 균질암반의 경우보다 상대적으로 넓은 범위에 걸쳐 형성되었다(Fig. 14). 이는 절리암반의 탄소성 성질의 상대적인 취약성(Table 6) 때문에 나타난 것이라고 사료된다. 여기서 안전율 1 이하의 지역을 소성대라고 해석하지 않고 교란대로

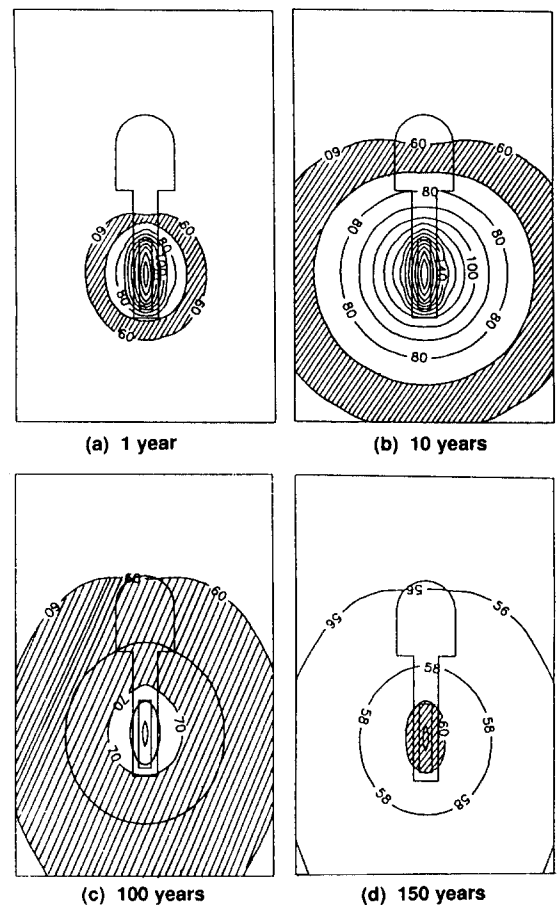


Fig. 15. Evolution of isotherms with time around the waste storage tunnel.

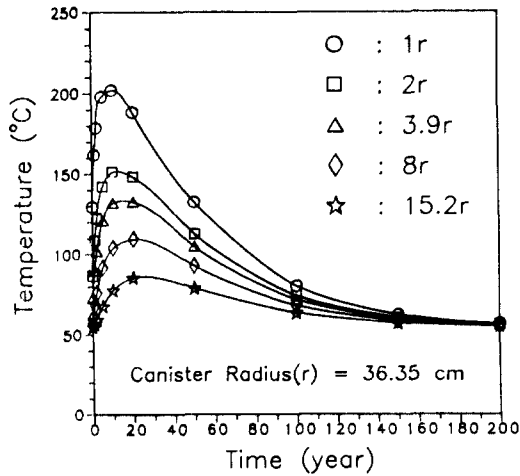


Fig. 16. Variation of temperature with time at 5 different locations around the canister.

보는 이유는 절리암반의 파괴는 절리 사이의 신선암의 파괴에 기인한다기 보다는 절리면의 전단 및 인장파괴가 요소의 안전율을 좌우하기 때문이다.

6.2 천이상태

6.2.1 온도분포

Fig. 15는 저장터널을 중심으로 가로 15 m, 세로 25 m 영역에서 시간에 따른 온도분포의 변화를 나타낸 것이다. 처분용기를 밀폐한 뒤 1년이 경과한 뒤의 온도분포는 Fig. 15(a)와 같이 처분용기를 중심으로 반경 약 8배 이내에서 국부적으로 높은 온도변화(60~162°C)를 보이며, 이 지역 이상의 영역에서는 처분용기의 열에 의한 영향을 받지 않아 초기 암반의 온도를 유지하는 경향을 보였다. 10년이 지난 경우(Fig. 15(b)) 처분용기에서 발생하는 열이 주위 암반에 전달하는 영향이 점진적으로 증가함에 따라 반경 25배 이내에서 가장 높은 온도분포(60~202°C)를 나타냈다. 10년 이후의 온도분포 양상은 시간에 따른 처분용기의 열량감소로 인해 처분용기 주위에서 온도가 감소하는 현상을 보이지만, 처분용기에서 먼 지역의 암반의 온도는 계속해서 증가하는 경향을 보였다. 100년이 지난 후 저장터널 주위암반의 온도분포는 Fig. 15(c)와 같이 처분용기의 열량의 급속한 감소로 인해 초기의 지온에 의한 암반의 온도로 회복하는 경향을 보이며, 150년이 지난 후 이러한 양상은 더욱 뚜렷이 나타남을 알 수 있다(Fig. 15(d)). 처분용기를 중심으로 반경,

Table 8. The temperature distribution between canister surface and rock-buffer interface.

Time (year)	Temperature range (°C)
0	86-129
1	108-162
2	122-179
5	142-197
10	151-202
20	148-188
50	112-132
100	74-80
150	60-62
200	56-56.5

시간에 따른 온도분포는 Fig. 16과 같다.

이상의 시간에 따른 저장터널 주위암반의 온도분포의 변화는 그 시기에 따라 2가지 측면에서 암반의 거동에 복합적인 영향을 미친다. 첫째, 처분용기에서 발생하는 강한 열에 의해 주위암반의 온도가 급격히 상승하는 동안 처분용기 주위 암반의 열에 의한 팽창으로 인해 처분용기에서 상대적으로 멀리 위치하는 암반내 균열의 간극을 넓히는 영향을 줄 수 있다. 이러한 현상은 암반의 응력상태가 처분용기의 열에 의한 팽창을 상쇄시킬 정도로 크지 않다면 저장터널 주위암반의 과압현상에 영향을 미칠 것이다. 둘째, 처분용기에서 발생하는 열이 현저히 감소하는 기간 동안 용기저장공에 근접한 암반의 온도차에 의한 상대적 수축(contraction)현상은 처분용기에 근접한 암반내 균열을 열리게 할 수 있다. 여기서 상대적 수축현상은 열하중의 감소에 의한 팽창성질의 감소현상을 의미한다.

이러한 2가지 경로에 의한 암반내 균열의 간극변화는 처분용기내에 밀폐된 핵종이 지하수에 의해 생물권으로 이동될 수 있는 치명적인 결과를 야기할 수 있다. 스웨덴의 KBS-3, VLH 처분장을 대상으로 개별요소 프로그램 UDEC에 의한 분석결과¹¹⁾에 따르면 용기저장공에 근접한 암반에 존재하는 균열은 암반의 온도가 상승하는 동안 대부분이 압축하는 경향을 보이다가 온도감소 기간동안 원래의 간극을 회복하는 경향을 보이지만, 일부는 원래의 간극으로 회복되지 않는 거동을 보였다. 이러한 결과는 처분용기에서 발생하는 열이 암반에 미치는 영향 뿐만 아니라 온

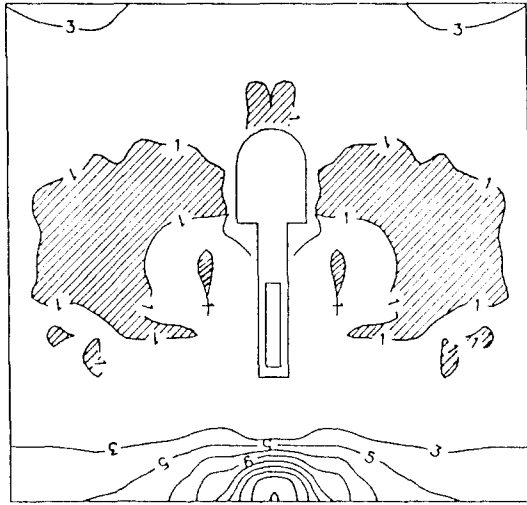


Fig. 17. Safety factor contours in 1 year after disposal(Hatched area indicates disturbed rock mass).

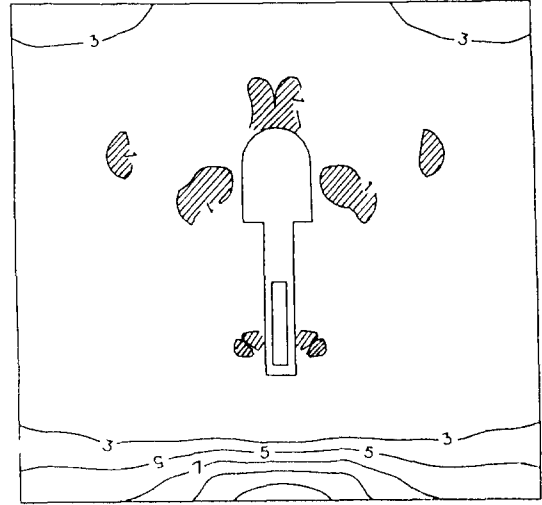


Fig. 19. Safety factor contours in 100 years after disposal(Hatched area indicates disturbed rock mass).

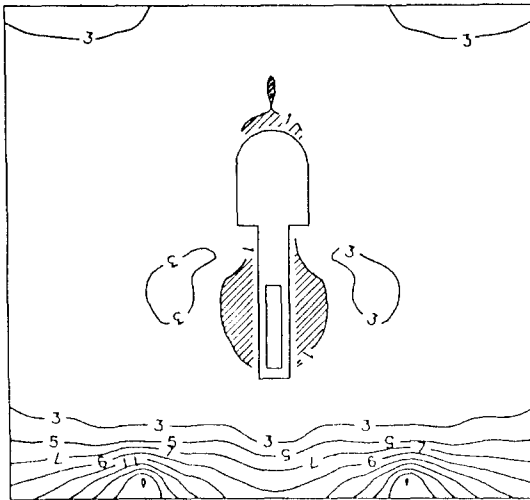


Fig. 18. Safety factor contours in 10 year after disposal(Hatched area indicates disturbed rock mass).

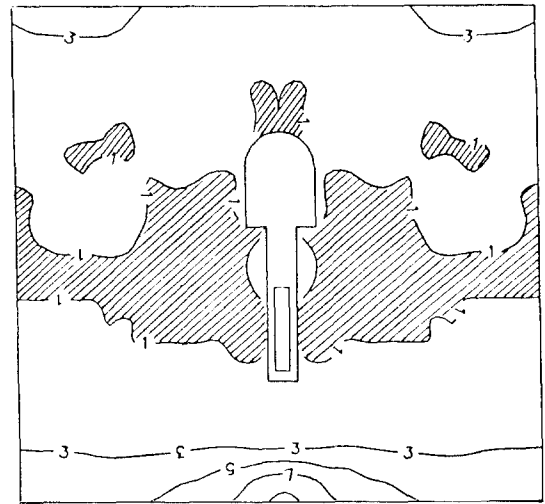


Fig. 20. Safety factor contours in 150 years after disposal(Hatched area indicates disturbed rock mass).

도감소에 의한 암반의 거동도 처분장 시설의 핵종의 누출 가능성에 큰 영향을 미친다는 사실을 입증하는 것이다.

또한, 장기간의 온도변화는 충전재로 사용된 벤토 나이트 점토의 팽창(swelling)과 자체밀폐(self-sealing) 특성을 변화시킴으로써 방사성 물질의 누출 가능성에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 130°C 이상의

온도에서 충전재로 쓰이는 점토의 팽창성과 자체밀폐 기능이 상실되는 현상(cementation)이 발생하는 것으로 나타났다.^{15,34)} 따라서 Table 8의 용기저장공 내 완충재의 온도변화를 고려할 때(특히 처분 후 2년부터 50년까지), 충전재의 기능 저하로 인해 처분용기가 지하수에 노출될 가능성이 높다고 생각된다.

6.2.2 열응력 해석

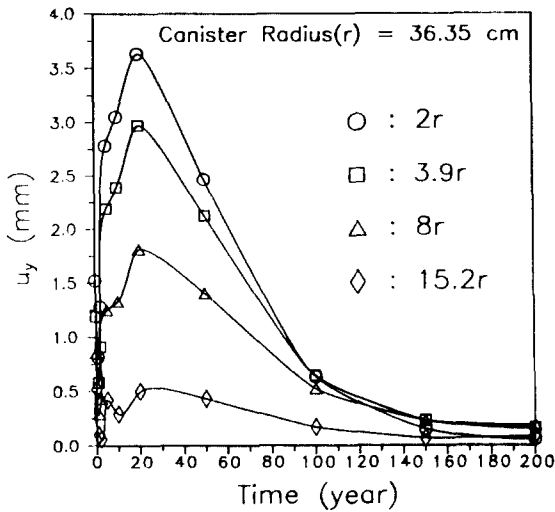


Fig. 21. Variation of horizontal displacement with time at 4 different locations around the canister: Outward displacement is positive.

초기응력 및 시간에 따른 온도분포에 의한 안전율 분포는 Fig. 17~20과 같다. 처분용기를 밀폐하고 1년이 지난 뒤의 안전율 분포는 Fig. 17과 같이 처분용기를 중심으로 국부적으로 높은 온도구배에 의한 팽창성질과 외곽 지역의 상대적으로 낮은 온도분포에 의해(Fig. 15(a)) 처분용기에서 떨어진 지역에 대칭형의 교란대가 형성되었다. 반면, 10년이 지난 후의 안전율 분포는 Fig. 18과 같이 처분용기에서 발생하는 열에 의한 점진적인 암반의 온도증가와 처분용기에 인접한 암반의 열에 의해 처분용기를 중심으로 대칭형의 교란대가 발생하였다.

100년이 지난 뒤의 저장터널 주위암반의 교란대는 처분용기에서 발생하는 열량의 현저한 감소로 인해 고온에 의한 암반의 팽창성질이 상대적으로 수축하려는 성질로 전환함에 따라서 처분용기에 근접한 암반에서 국부적인 교란대가 발생하였다(Fig. 19). 이러한 온도감소에 의한 암반의 수축현상에 의해 발생하는 교란대는 150년이 지난 뒤의 안전율 분포에서 현저히 나타났다(Fig. 20). 초기의 고온에 의한 암반의 팽창성질이 처분용기에서 발생하는 열량의 급격한 감소로 인해 원래의 처분용기를 밀폐하기 전의 암반의 온도로 전환함에 따라 암반이 수축하려는 경향이 증가되어 처분용기를 중심으로 광범위한 지역에 교란대가 형성되었다.

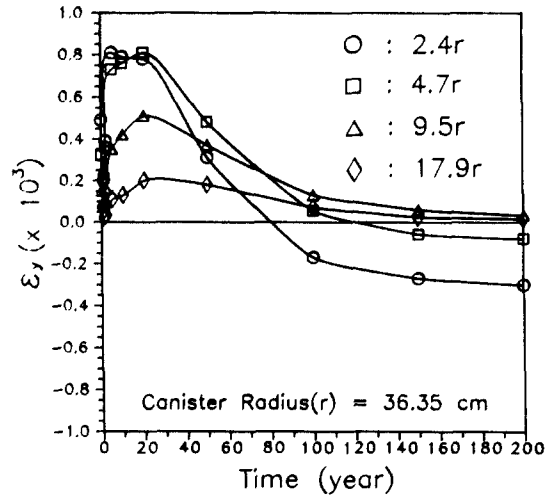


Fig. 22. Variation of horizontal strain with time at 4 different locations around the canister.

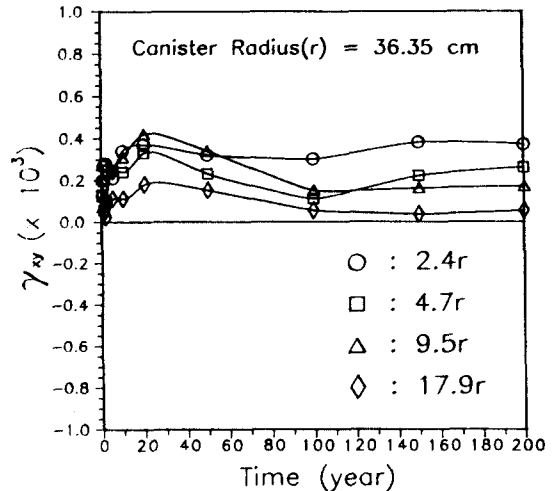


Fig. 23. Variation of shear strain with time at 4 different locations around the canister.

처분용기를 중심으로 반경 및 시간에 따른 수평변위는 Fig. 21에서 알 수 있듯이 처분 후 20년까지 온도증가에 의하여 반경에 따라 점진적으로 증가하는 경향을 보이며 용기저장공 벽면에서 최대 3.6 mm의 변위가 발생하였다. 그 이후의 변위는 열하중의 감소로 초기의 암반온도로 회복됨에 따라 감소하는 경향을 보인다. 수평 변형율의 경우 Fig. 22와 같이 처분용기에서 근접한 지역의 변형율은 초기의 온도증가에 따라 압축에 의한 변형율이 발생하며 시간이

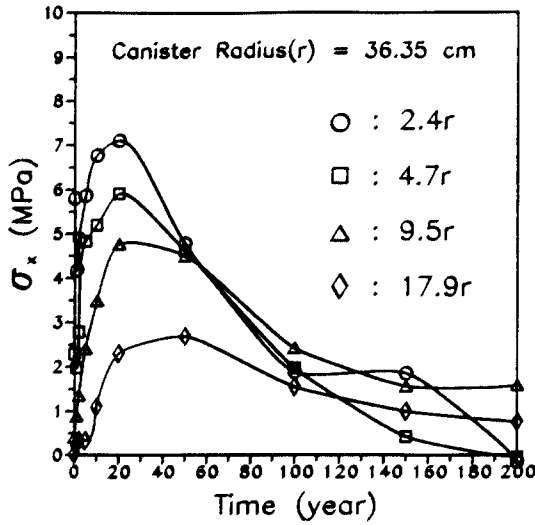


Fig. 24. Variation of vertical stress with time at 4 different locations around the canister.

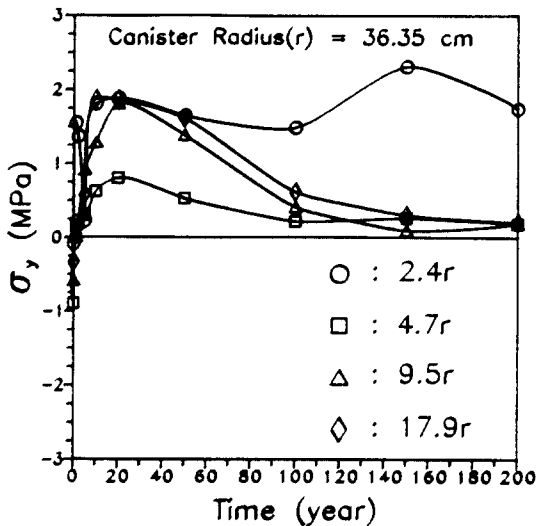


Fig. 25. Variation of horizontal stress with time at 4 different locations around the canister.

지남에 따라 열하중의 감소에 의해 인장에 의한 변형율이 발생하는 경향을 보였다. 반면 처분용기에서 떨어진 지역의 변형율은 열하중의 영향을 상대적으로 적게 받기 때문에 시간에 따라서 감소하여 0에 근접하는 경향을 보였다. 열하중의 증가에 따른 전단 변형율의 경우 처분용기 인접지역에서 처분 후 20년까지 점진적인 증가를 보이며 그 이후에도 감소하지 않는 경향을 보인다(Fig. 23).

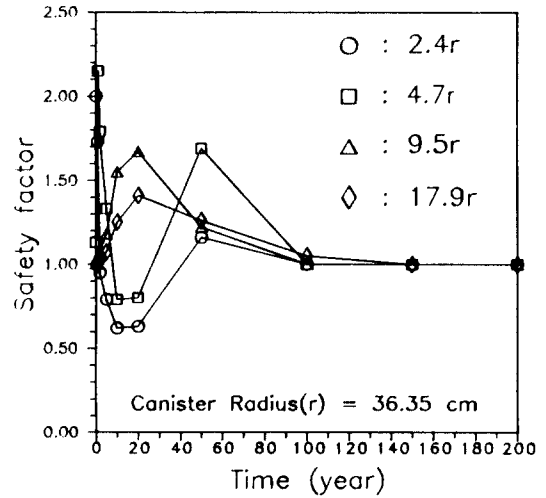


Fig. 26. Variation of safety factor with time at 4 different locations around the canister.

이상의 결과를 종합해 볼 때 폐기물 처분 후 열하중에 의한 초기의 점진적인 온도상승에 의해 형성된 교란대는 폐기물 처분 이후 암반의 응력상태를 변화시킴으로써 저장시설의 전체적인 안정성에 큰 영향을 미친다. 특히 처분용기에 근접한 암반의 높은 열하중에 의한 응력집중은 저장터널 주위의 응력을 이완시키고 암반내 존재하는 균열의 간극을 변화시키는데 큰 영향을 준다. 연직응력의 경우(Fig. 24) 처분 후 20년까지 온도상승에 의해 압축응력이 증가(최대 7.1 MPa)하는 경향을 보이며 그 이후 온도감소에 따라 줄어드는 경향을 보인다. 또한 처분용기의 열하중에 직접적인 영향을 받는 수평응력은 Fig. 25와 같이 전반적으로 연직응력보다 낮은 응력상태를 나타내었다. 초기의 온도증가에 따라 각 지역에서 압축응력이 증가하는 경향을 보이며(최대 2 MPa) 그 이후 열하중의 영향을 가장 크게 받는 용기저장공에 인접한 지역(2.4 r)을 제외하고 온도감소에 의해 압축응력이 감소하는 경향을 보였다.

또한 열하중의 감소에 의한 암반의 변형은 암반을 원위치로 회복시키지만 일부 변위는 회복되지 않으므로써(Fig. 22, 23) 저장터널 주위에 새로운 유로를 형성할 수 있다. 이러한 양상은 최근의 Stripa 지역내 시추공에서의 현장실험에 의한 결과와 부합된다.³⁴⁾

시추공벽의 온도를 증가하고 냉각함에 따른 시추공 주위의 수리전도계수를 측정된 결과 냉각 이후의 수

리전도계수가 가열 전보다 약 2배 증가하였다. 이는 저장터널의 안정성은 열하중이 감소하는 경우에도 큰 영향을 미친다는 사실을 예증하는 것이다. 즉 Fig. 26에서 알 수 있듯이 처분용기를 중심으로 반경에 따른 암반의 안전율 분포는 시간이 지남에 따라서 1에 가까운 값으로 수렴하는 현상을 보인다. 이는 장기간의 온도감소에 의하여 암반이 취약해지는 것을 의미한다.

7. 결 론

본 연구를 통하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 심부 암반내 방사성 폐기물 처분시설의 설계시 절리, 층리와 같은 불연속면을 포함하는 암반의 열역학적 성질을 이론적 방법에 의하여 추정하였다. 이러한 이론적 방법은 암반내에 존재하는 임의의 방향성과 밀도분포를 갖는 개개 절리와 주변암석의 물성을 순서적으로 반영하여 절리암반 전체의 물성을 추정하는 것이다.

(2) 이론적 방법에 의한 불연속 암반의 열역학적 성질을 입력자료로 하여 방사성 폐기물 저장터널을 대상으로 2차원 정상 열전달 프로그램을 사용하여 저장터널 주위암반의 온도분포를 계산하였고 열탄소성 프로그램을 사용하여 초기응력, 굴착, 온도에 의한 열응력 해석을 수행하였다. 분석결과 절리암반의 안정성은 절리의 방향성에 큰 영향을 받으며, 교란대의 발생은 상대적인 탄소성 성질의 취약성에 의해 연속 균열암반의 경우보다 광범위하게 나타났다.

(3) 절리암반을 대상으로 2차원 천이 열전달 프로그램을 사용하여 폐기물 처분용기에서 발생하는 열량의 감소에 따른 저장터널 주위암반의 온도변화를 분석하고 이에 따른 열응력 해석을 수행하여 저장터널 주위암반의 안정성을 분석하였다. 저장터널 주위암반의 교란대는 처분용기에서 발생하는 열량에 큰 영향을 받으며, 처분용기에서 발생하는 열에 의한 영향 뿐만 아니라 시간에 따른 온도감소에도 큰 영향을 받음을 알 수 있다.

(4) 방사성 폐기물 저장터널 주위에 형성된 교란대는 암반내 존재하는 균열을 통한 유체의 흐름을 변화시킴으로써 처분장 시설의 안정성에 큰 영향을 미친다. 특히, 용기저장공 근처에 형성된 교란대는 유체의 이동경로를 변경함으로써 핵종의 누출 가능

성에 큰 영향을 줄 것이라고 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) 신 희순, 정 소걸 (1991) 방사성 폐기물 저장을 위한 화성암의 열역학적 거동특성, 터널과 지하공간, 한국암반학회지, Vol. 1, pp. 49-65.
- 2) Myong Jae Song, Sang Woon Shin and Yang Keun Chung (1991) The evaluation of back-end fuel cycle costs in Korea, High level radioactive waste and spent fuel management: Proc. of the 1991 Joint Int. Waste Management Conference, Vol. 2, pp. 249-253.
- 3) Nataraja, M.S. & Daemen, J.J. (1988) An overview of the civilian high-level nuclear waste repository program in the United States of America, Int. Symp. on Underground Engineering, Vol. 1, pp. 471-479.
- 4) Abramson, L.W. & Schmidt, B. (1984) Rock support for nuclear waste repository, Proc. 25th U.S. Rock Mechanics, Illinois, pp. 1103-1114.
- 5) St. John, C.M. & Hardy, M.P. (1982) Geotechnical monitoring of high-level nuclear waste repository performance, Proc. 23rd U.S. Symp. Rock Mechanics, California pp. 846-854.
- 6) Kunsoo Kim (1990) Review of geoscience and engineering issues in geologic disposal of nuclear waste, Korea Institute of Energy and Resources.
- 7) 강병무 (1991) 방사성 폐기물 동굴처분과 지하실험 시설, 한국 자원공학회 춘계학회, 특별 심포지움 및 제 55회 학술발표회, pp. 74-89.
- 8) Prabhat Kumar & Bhawani Singh (1988) On the use of underground space of nuclear waste, Int. Symp. of Underground Engng., Vol. 1, pp. 521-530.
- 9) A.M. Muir Wood & D.E. Crook (1984) Engineering aspects of nuclear waste disposal in argillaceous rocks, Design and Performance of Underground Excavations, ISRM/BGS, pp. 45-52.
- 10) F. Djahanguiri (1984) Critical aspects of mining technology in excavation of nuclear waste repository in salt, Design and Performance of Underground Excavations, ISRM/BGS, pp. 327-336.
- 11) Roland Pusch & Christer Svemar (1993) Influence of rock properties on selection of design for a spent fuel nuclear repository, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 8, No. 3, pp. 345-356.
- 12) K. Nuttal & D.F. Torgerson (1991) Developments in the Canadian concept for disposing of nuclear

- fuel waste, High Level Radioactive Waste and Spent Fuel Management: Proc. of the 1991 Joint Int. Waste Management Conference, Vol. 2, pp. 189-196.
- 13) Kwan-Sik Chun, Joo-Ho Whang, Jong-Won Choi and Hyun-Soo Park (1991) Comparison of direct disposal alternatives for spent nuclear fuel, High Level Radioactive waste and Spent Fuel Management: Proc. of the 1991 Joint Int. Waste Management Conference, Vol. 2, pp. 225-229.
 - 14) Hans S. Carlsson (1988) Progress of the Swedish radioactive waste management program, Field Measurement in Geomechanics: Proc. of 2nd Int. Symp. on Field Measurement in Geomechanics, Vol. 2, pp. 937-950.
 - 15) Charles Fairhurst, Ferruccio Gera, Paul Grink, Malcolm Gray & Bengt Stillborg (1993) The international Stripa project: an Overview, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 8, No. 3, pp. 315-343.
 - 16) O. Stephanson & B. Shen (1991) Modelling of rock masses for site location of a nuclear waste repository, Int. Society for Rock Mech., Vol. 1, pp. 157-162.
 - 17) 조영호 (1992) 암반내 고준위 방사성 폐기물 처분장의 열역학적 거동에 관한 수치해석적 연구, 석사학위 논문, 한양대학교.
 - 18) 강원대학교, 자원개발 연구소 (1990) 무주 양수 발전소 암반응력 측정 및 해석 보고서, pp. 4-9, 55-64.
 - 19) Fred. H. Kulhawy (1975) Stress deformation properties of rock and rock discontinuities, Engng. Geology, Vol. 9, pp. 327-350.
 - 20) S. Sata, A. Kobayashi, K. Hara, H. Ishkawa & N. Sasaki (1991) Full-scale test on coupled thermo-hydrmechanical process in engineered barrier system, High-Level Radioactive waste and Spent Fuel Management: Proc. of the 1991 Joint Int. Waste Management Conference, Vol. 2, pp. 237-242.
 - 21) A. Rouleau & J.E. Gale (1987) Stochastic discrete fracture simulation of groundwater flow into an underground excavation in granite, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 24, No. 2, pp. 99-112.
 - 22) 이근채 (1992) 통계적 절리구조 모델링과 지하공동 안정성 평가에의 적용, 석사학위 논문, 한양대학교.
 - 23) E. Hakami & N. Barton (1990) Aperture measurements and flow experiments using transparent replicas of rock joints, Proc. of Int. Symp. on Rock Joints, pp. 203-210.
 - 24) Moon, H. (1987) Elastic moduli of well-jointed rock masses, Ph. D. Dissertation, Univ. Utah, pp. 284.
 - 25) 김창용 (1991) 불연속 암반의 강도특성과 지하 양수발전소 설계에의 적용, 석사학위 논문, 한양대학교.
 - 26) 주광수 (1991) 불연속 암반의 열전도계수와 열응력 해석을 위한 전산 모델연구, 석사학위논문, 한양대학교.
 - 27) B.W. Rosen & Z. Hashin (1970) Effective thermal expansion coefficient & specific heats of composite materials, Int. J. Engng. Sci., Vol. 8, pp. 157-173.
 - 28) Moon Hyun-Koo & Jue Kwang-Sue (1993) Equivalent thermal and hydraulic properties of jointed rock masses, EUROCK '93, Proc. of ISRM Int. Symp., Ribeiro Sousa & Grossmann(eds), pp. 337-346.
 - 29) Carslaw, H.S. & J.C. Jaeger (1959) Conduction of heat in solids, 2nd Ed. Oxford, pp. 497.
 - 30) Bernard L. Cohen (1977) The disposal of radioactive wastes from fission reactors, Scientific American, Vol. 236, pp. 21-31.
 - 31) P.A. Forsyth (1990) Radioactive waste disposal heating effects in unsaturated fractured rock, Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 17, pp. 29-51.
 - 32) Christine Doughty and Karstem Preuss (1988) A semianalytical solution for heat-pipe effects near high-level nuclear waste packages buried in partially saturated geological media, Int. J. Heat & Mass Transfer, Vol. 31, No. 1, pp. 79-90.
 - 33) Pierre Habib & Pierre Berest (1993) Rock mechanics for underground nuclear waste in France, Comprehensive Rock Engineering, Pergamon Press, Vol. 5-II, pp. 547-563.
 - 34) Roland Pusche (1993) Rock-bakfill interaction in radwaste repositories, Comprehensive Rock Engineering, Pergamon Press, Vol. 5-II, pp. 565-581.