

방사성 폐기물 심지층 처분시설 건설을 위한 암석역학의 응용

권상기¹⁾ · 박병윤¹⁾ · 최종원²⁾ · 강철형²⁾

1. 서 론

1978년 가동이 시작된 고리원자력발전소를 비롯하여 현재 한국에는 11기의 가압경수형 원자로 (PWR) 와 3 기의 가압중수형 원자로 (CANDU)가 운전 중에 있으며, 현재 건설 중인 원자로를 포함하여 2015년까지 13기가 추가될 예정으로 있다. 가압경수로의 경우, 약 15-18개월 주기로 핵연료의 1/3 이 새로운 핵연료로 교체된다. 전기 출력 65만KW 급인 고리 2호기의 경우 연간 약 16톤의 사용 후 핵연료가 발생하고 있다. 이들 사용 후 핵연료는 발전소의 소내 저장 수조에 약 10년간 임시 저장되게 되는데 이는 단기적으로 효과적일지는 모르지만 영구적인 처분방법이 될 수는 없다. 따라서 원자력을 안전하게 이용하기 위해서는 영구적으로 방사성 폐기물을 안전하게 처분할 수 있는 방법의 개발은 중요한 과제라 할 수 있다. 과거 수십 년간 방사성 폐기물의 영구처분을 위해 원자력발전소 부지에 남겨두는 방법, 해저에 묻어두는 방법, 빙하에 묻는 방법, 우주로 방사하는 방법, 시추공에 투척하는 방법, 지하구조물에 처분하는 방법 등 여러 가지 방법들이 제안되고 연구되어 왔다. 이들 방법들에 대한 기술성, 안전성, 경제성 등을 고려한 환경평가의 결과 지하심부에 구조물을 만들고 방사성 폐기물을 처분하는 방법이 가장 안전한 방법으로 고려되고있다 (Tang and Saling,1990).

서아프리카의 가봉공화국의 Oklo 라는 지역에는 약 20 억년 전에 우라늄핵에서 자연적으로 발생한 핵분열 반응 (natural reactor) 에 의해 만들어진 핵분열 및 붕괴 생성물들이 현재까지 이 장소에 안전하게 존재하고 있다는 사실을 보여주고 있는데, 이는 지하심부 구조물에 방사성 폐기물을 처분하는 것이 영구적으로 안전할 수 있다는 실질적인 증거로 여겨지고 있다. 미국의 뉴멕시코주에 위치한 Transuranic (TRU) 방사성 폐기물 처분시설인 Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) 에서는 수 십년 간의 연구 끝에 1999년 3월 방사성 폐기물을 지하에 처분하는 작업을 성공적으로 시작함으로써 방사성 폐기물의 지하심부처

분에 새로운 전기를 마련하였다. 한국의 경우1988년 7월 제 220차 원자력위원회에서 중저준위 방사성 폐기물 처분에 관한 기본 방침이 확정되었으며 폐기물의 관리정책은 원자력법에 규정되어있다. 현재 한국원자력연구소에서는 1997년부터 고준위 방사성 폐기물 처분개념 설정을 위한 연구를 3단계로 나누어서 수행 중에 있으며 2003년까지 국내에서 평가되는 대표적인 값들을 기준으로 예비처분개념을 설정하고 2006년까지 국내심부지질환경 자료를 근거로 최적화개념이 도입된 기준 처분 개념을 완성하는 계획으로 있다. 이 연구에서는 2015년 까지 국내에서 운영될 원자로 27기가 각각 수명기간동안 발생할 고준위 폐기물은 가압경수로에서 발생하는 PWR 20,000톤 과 가압중수로에서 발생하는 CANDU 16,000톤으로서 이들 상이한 두 종류의 방사성 폐기물을 한 처분장에 처분해야 한다는 가정을 전제조건으로 두고 있다. 또한 국내의 처분지질 환경이 외국과 상이하기 때문에 외국의 처분장 설계 기준을 그대로 사용하는데 어려움이 있으며 따라서 국내의 처분기술의 취약한 부분들에 대한 독자적인 기술개발이 시급한 상황이라 할 수 있다.

핀란드의 경우 2020년 사용후 핵연료 심지층 처분장 운영을 목표로 1991년부터 1996년 까지 총예산 15 million FIM (1 FIM (204원) 의 대규모 암석역학관련 프로젝트인 Rock Engineering 2000을 수행하였다 (Johansson et al., 1996). 표 1은 이 프로젝트에서 수행된 주된 연구과제와 연구기간을 보여주고 있다. 표 1에서 볼 수 있듯이 부지선정에서부터 지하구조물의 설계, 건설, 유지를 위해서는 암석역학의 원리들이 적용되어야 한다. 본 연구에서는 고준위 방사성 폐기물 처분장의 건설을 위해 수행되어야 할 암석역학의 응용에 대하여 논하고자 한다.

2. 방사성 폐기물 처분개요

1) 정회원, 한국원자력연구소

2) 한국원자력연구소

Table 1. Main R&D project schedules of the Rock Engineering 2000 (Johansson et al., 1996)

Project	Research area	Period	Combined with
Construction techniques for small rock caverns	1.1 Typical layout for rock caverns 1.2 Construction methods and equipments for small caverns		
Grouting and drainage methods	2.1 Development of grouting technique 2.2 Development of drainage channels in shotcrete structures and mechanized installation 2.3 Water protection and frost-isolation structures, their installation and dire protection	1991-1996 1991-1993 1993-1996	
Excavation techniques	3.1 Effect of blasting and rock quality on the excavation profile 3.2 Utilization of the information registrated during drilling 3.3 Integrated navigation system for drilling, location measurements and control of excavation profile 3.4 Utilization of shafts in excavation of caverns and tunnels 3.5 Automatization and guidance systems for explosives and charging 3.6 Drilling and blasting in long tunnel rounds 3.7 Blasting vibrations and threshold values for structures and sensitive installations 3.8 Corrosion on rock bolts	1991-1992 1995-1996 1992-1996 1991-1992	6.3
Construction works in underground facilities	4.1 Problems in construction works in underground facilities 4.2 Construction techniques for radiation shelters 4.3 Structural systems in underground facilities	1991-1992 1993-1996	4.3
Economy and management of underground utilization	5.1 Development of cost-management systems 5.2 Standardization of contract documents and risk-sharing systems 5.3 Underground city planning techniques	1994-1996 1995-1996	
Rock mechanics and site investigations	6.1 Deformation and strength properties of the bedrock 6.2 Correlation between site investigations and real rock structure 6.3 Interpretation of information registrated during boring and core-drilling 6.4 Utilization of site investigations in rock mechanics design 6.5 Principles and methods in rock mechanics design	1992-1995 1992-1996	6.4 6.4 6.4
Ventilation and heating system	7.1 Problems in heating and ventilation 7.2 Design of ventilation systems 7.3 Energy balance in underground facilities 7.4 Lighting in underground facilities	1991-1992 1993-1996	7.2

2.1 방사성 폐기물이란?

방사성 폐기물은 방사능 정도, 발생원인, 잔류물질의 특성에 따라 다음과 같이 분류될 수 있다 (Tang and Saling, 1990) :

a. 고준위 방사성 폐기물 (High Level Waste, HLW) : 사용후핵연료로부터 우라늄이나 플루토늄을 회수하는 재처리과정에서 나오는 액체나 슬러지 형태의 방사성 폐기물을 말한다. 사용후핵연료도 고준위 방사성 폐기물에 포함시키기도 하는데 우리나라와 같이 재처리로 인한 고준위 폐기물의 발생이 없는 나라에서는 사용후핵연료와 고준위 방사성 폐기물이 동일한 개념으로 사용된다.

b. 사용후핵연료 (Spent nuclear Fuel, SF) : 사용이 끝나서 교체된 핵연료로서 고준위의 방사성 물질이다. 현

재 사용후핵연료는 원자력발전소 부지 내 수조에 보관되거나 일정 시간이 지난 사용후핵연료는 건식 저장되고 있다. 1998년 정부에서는 2016년 사용후핵연료 중간저장 시설 방안을 확정하 바 있기 때문에 이때까지는 소내 저장으로 해결할 수 밖에 없는 상황이다. 국내 원자력발전소의 경우 사용후핵연료 임시저장소의 포화년도는 고리와 월성이 2006년, 울진은 2008년, 영광의 경우 2009년으로 예상되고 있다.

c. Transuranic (TRU) 폐기물 : Np, Pu, 과 Am 등 우라늄보다 무거운 초우란 방사성 물질들을 포함하며 주로 알파 방사선을 장기적으로 방출하는 폐기물로서 핵무기의 개발과 관련된 작업에서 발생한다 (Munson et al., 1990).

d. 저준위 방사성 폐기물 (Low-level waste, LLW) : 상대적으로 낮은 방사선을 내며 TRU 원자를 포함하지 않는 폐기물로서 원자력발전소 해체폐기물 대부분도 저준위 방사성 폐기물로 분류된다. 1978년에 운전을 시작한 고리 1호기의 경우 오는 2008년에 해체될 예정으로 있다.

e. 우라늄 mill tailings : 우라늄의 채광과 정련과정에서 발생하는 폐기물로서 역시 처리에 주의를 요한다.

방사성 물질들은 방사선을 외부로 방출하는 방법으로 에너지를 발산시킨다. 방사성 물질에서 나오는 방사선의 양을 측정하는 단위로는 퀴리가 사용되는데 1 퀴리란 초당 3백70억회의 원자핵이 붕괴하여 방사선을 내는 것을 말한다. 방사선의 피해정도는 발생하는 방사선의 종류에 따라 다르게 나타난다. 이와 같이 방사선이 인체에 미치는 영향을 고려하여 방사선의 정도를 결정하기 위해 사용하는 단위가 rem 이다. 1 rem 이란 1 퀴리 (라듐 1g) 의 방사능으로부터 1m 떨어진 거리에서 1시간 동안 받는 방사선과 거의 같은 영향을 나타낸다. 미국인의 경우 평균적으로 년 360 mrem 의 방사선에 노출되며 대략 300 mrem 은 자연적으로 발생하는 방사선이며 나머지 60 millirem 은 x-선 촬영 등 인위적인 원인으로부터 발생하는 것으로 보고되고 있다. 방사선이 인체에 미치는 영향은 (a) 방사선에 과다하게 노출될 경우 암의 발생 가능성이 증가하는 것과 (b) 인체의 유전자에 손상을 준다는 것으로 나눌 수 있다. 방사성 물질은 안전한 물질로 변환되는 과정에서 방사선을 배출하기 때문에 시간이 지남에 따라 방사성 물질의 양은 감소된다. 따라서 시간의 경과에 따라 방사성 물질의 위험도는 점점 낮아진다고 할 수 있다. 방사성 물질의 양이 절반으로 줄어들 때까지 걸리는 시간을 반감기라 하며 이는 물질의 고유한 성질이다. 방사성 물질 중 우라늄 238 은 반감기가 45억년으로 가장 긴 반감기를 가진다. 어떤 방사성 동위원소들은 매우 불안정하여 백만분의 1초 정도의 매우 짧은 반감기를 가지기도 한다.

2.2 방사성 폐기물 처분기술

방사성 폐기물의 처분을 위해 다음의 다양한 방법들이 제안되고 연구되어졌다.

a. 천층처분 : 관리가 쉽고 유사시 회수하기가 쉬운 반면 지진, 풍화, 유성낙하, 전쟁 등 천재지변에 대한 수 만년 이상의 장기적 안전성을 확보하는데 어려움이 있다.

b. 우주처분 : 비용이 많이 들며 방사체의 폭발가능성이

존재하기 때문에 안전한 처분 방법으로 여겨지지 않고 있다.

c. 빙하처분: 폐기물에서 발생하는 열에 의해 폐기물이 아래로 서서히 이동해 빙하 바닥에서 장기간 처분되는 개념으로 장기간 발생하는 열에 의해 폐기물이 빙하의 가장자리로 움직여갈 가능성이 있다.

d. Borehole 처분 : 3-5 km 깊이의 처분공 (Deposition hole)을 뚫고 폐기물을 처분하는 방법으로 폐기물이 화학 작용 또는 마그마와 작용할 가능성이 있어 안전하지 않다. 스웨덴에서의 연구결과에 따르면 긴 수직 또는 수평 처분공에 폐기물을 처분하는 방법은 기술성, 안전성, 경제성 측면에서 터널처분에 비해 불리한 것으로 나타난다 (Autio, etal, 1996)

e. 심해저 처분 : 심해저에 처분하는 개념으로 문제점은 심해저에서 발생하는 일들에 대해 현재까지의 지식수준이 안전성을 보장하는데 부족하는 것이다.

f. 심지층 처분: 수백미터 지하에 수직터널과 수평터널을 뚫고 폐기물을 처분하는 방법으로서 현재까지 제안된 방법들 중에서 경제적으로나 안전성 측면에서 유리하기 때문에 현재 가장 많은 연구가 수행되고 있다. 터널을 굴착함으로써 처분장의 지질 구조 등을 파악할 수 있는 반면 관리나 유사시 폐기물을 회수해야 하는 경우 천층처분에 비해 어려움이 따른다.

1980년대에 수행된 이들 방법들에 대한 환경평가를 통해 Tang 과 Saling (1990) 은 각각의 개념들에 대해 안전성, 경제성, 기술 수준 등을 고려하여 Table 2 와 같이 처분방법의 순위를 결정하였다. 이와 같이 지하심부에 구조물을 만들고 방사성 폐기물을 처분하는 방법이 가장 안전한 방법으로 고려되고 있는데 지하심부에 처분장을 건설하는 일반적인 과정은 다음과 같다 (Krauskopf, 1988).

a. 지표면에서부터 지하 처분장이 위치할 지점까지 수직 터널을 천공, 발파로 굴착한다.

b. 수직터널에서부터 주요 진입 터널들을 굴착한다

c. 3-4개의 환기, 수송용 수직터널을 상향 보링법 (raise boring)으로 굴착한다.

d. 방사성 폐기물을 구리와 같은 금속 처분용기 (canister) 에 넣은 다음 터널의 바닥이나 벽에 뚫은 처분공에 삽입하고 수착능이 크고 투수성이 낮은 벤토나이트를 용기와 암반사이의 공간을 채운다.

e. 물리화학적 방벽으로서 벤토나이트의 장점과 굴착 폐기물인 파쇄암을 재활용한다는 관점에서 파쇄암과 벤토나이트 혼합체를 터널과 수직터널을 되메움(backfill)한다.

Table 2. Ranking of different disposal methods for high-level nuclear waste

Case	Case assessed	Ranking
A	Mined geologic repository with SF	1
B	Very deep hole with SF	4
C	Subseabed with SF	2
D	Mined geologic repository with HLW	1
E	Very deep hole with HLW	4
F	Rock melting with HLW	5
G	Subseabed with HLW	2
H	Space disposal	3

f. 콘크리트와 같은 Plugging 물질로 터널을 밀봉(sealing) 한다.

g. 현장 측정을 계속하며 문제가 발생하면 방사성 폐기물을 회수한다.

심지층 처분 방법은 이와 같이 처분용기, 완충재, 암반을 이용하여 방사성 폐기물을 인간환경으로부터 장기간 격리시키는 다중방벽개념 (Multi-barrier concept) 이 기본 개념이라 할 수 있다. 미국에서는 처분용기가 폐기물을 300 - 1000년 동안 완전 격리시킬 수 있도록 설계되어야 한다고 10CFR60에 규정하고 있다. 완충재 또한 처분

용기에서 누출되는 방사성 핵종을 1000년 간 처분 공간 내에 잔류시킬 수 있도록 설계되어야 하며 완충재를 빠져 나온 방사성 핵종은 최종적으로 암반에 의해 그 이동이 장기간 지연되어야 한다. 대부분의 핵분열 생성물들은 500년 내에 방사 붕괴되어 없어지거나 안정 원소로 변하지만 요소 (I-129), 플로투륨 (Pu)이나 아메리슘 (Am) 과 같은 장반감기 방사성 동위원소들은 100,000년 동안 위험한 물질 (radiotoxic element) 로 남게 된다. 일반적으로 방사성 폐기물 처분 시 고려되는 기간은 100,000년 동안으로 이는 처분된 방사성 폐기물에서 발생하는 방사능의 독성 수준이 100,000년 이후면 천연 우라늄광산에서의 방사능 수준과 비슷해지기 때문이다 (Roxburgh, 1987).

3. 방사성 폐기물 처분 일반 현황

현재 세계 31개국에서 원자력발전소를 운영하고 있으며 이들에서 발생하는 방사성 폐기물을 처분하기 위한 연구를 수행 중에 있다. 표 3 은 세계각국에서 연구중인 방사성 폐기물 처분시스템을 보여주고 있다. Clay 는 낮은 투수도, 뛰어난 흡착성으로 안전하게 핵종을 보관할 수 있으며 또한 역학적으로는 연성을 가지고 있기 때문에 지진의 발생시 구조적으로 안전한 모암으로 여겨진다(Su-

Table 3. Worldwide geologic disposal and repository design concepts

Country	Available time	Rock type	Design concept
Belgium	2035	Clay	Room & Pillar (225 m)
Canada	2030	Granite	Room & Pillar (500-1000 m)
Denmark	2040	Salt	Deep borehole(1200-2500 m)
Finland	2020	Granite	Room & Pillar
France	2020+	Granite	Room & Pillar
Germany	2008	Salt	Room & Pillar
India	TBD	Granite/Gneiss	
Italy	TBD	Clay	
Japan	2030+	TBD	Room & Pillar
Korea	TBD	Granite	Room & Pillar (500 m)
Netherlands	TBD	Salt	Deep borehole
Spain	TBD	Salt/Granite	
Sweden	2020	Granite/Gneiss	Room & Pillar (500 m)
Switzerland	2020	Granite	Room & Pillar (400-1000 m)
U.K.	2040	Granite	
U.S.A.	2010	Salt/Tuff	Room & Pillar (650 m) Room & Pillar (300 m)

* TBD : To Be Determined

merling and Thompson, 1987). 미국과 독일에서 처분장 모양으로 고려중인 암염은 뛰어난 불투수성, 높은 열전도성, 연성, 불포화 암반 등의 특성으로 인해 최적의 처분장 모양으로 여겨지고 있다. 화강암/화강편마암은 단단한 결정질 암반으로서 높은 강도, 풍화에 대한 저항성, 핵종 이동을 지연시키는 흡착 능력 등의 이유로 여러 나라에서 처분장의 모양으로 고려하고 있다. 미국의 Yucca Mountain 에서 고준위 폐기물 처분장을 응회암에 건설 중에 있는데 응회암은 화산재로 구성된 암석이다.

현재 방사성 폐기물의 심지층 처분 방법의 개발 및 성능평가에 관한 연구는 미국, 스웨덴, 캐나다, 핀란드, 벨기에, 스위스, 일본 등에서 활발히 진행이 되고 있다. 방사성 폐기물 처분시설의 안정성을 확보하기 위한 연구를 위해 지하 처분연구시설 (Underground Research Laboratory, URL) 을 건설하고 이론적 연구와 함께 현장시험연구를 병행하여 수행하고 있다.

세계의 주요 심지층 처분시험시설의 현황은 다음과 같다 (Table 4 참조).

Table 4. Underground Research Laboratories in the world.

Country	URL	Rock type	Starting Year	Total budget	Major research topics	Comments
Sweden	Aspo	Granite (depth 450m)	1990 (Built in 1996)	· 0.5 billion krona · Foreign investment : 0.1 billion Krona	<ul style="list-style-type: none"> · Site selection · Investigation of in situ rock · Prediction of variation during URL construction · Improvement of excavation and testing · Ground water and radionuclide transportation 	<ul style="list-style-type: none"> · Plan to build prototype repository · 800 t waste emplacement in 2008 · Full scale repository in 2020 · Corporation with research groups for general wastw since Apr., 1996 · International corporation project : USA<Canada, Japan, UK, Finland, Germany, Swiss
USA	ESF (Exploratory Study Facility)	Welded tuff (depth 300m)	1993	· \$16 billion ~ \$114 billion until 2028	<ul style="list-style-type: none"> · Excavation using TBM · Geology & Hydraulic properties in unsaturated rock mass · TRACER test & Heater test 	<ul style="list-style-type: none"> · Unsaturated tuff located at 100m above the water table
	WIPP (Waste Isolation Pilot Plant)	Rock salt (depth 650m)	1975	· ~95 : 1.7 billion dollar · Total : 10.7 billion dollar · Construction : 0.4 billion dollar	<ul style="list-style-type: none"> · Long-term deformation and fracture behavior of Rock mass · Support design for rock salt · Creep deformation measurement 	<ul style="list-style-type: none"> · TRU wastes from military projects · Start operation since Mar., 1999
Germany	Goleben	Rock salt (depth 840 ~ 1200m)	1979	· 4.4 billion Mark · Operation cost : 65million Mark/year	<ul style="list-style-type: none"> · Properties of rock salt · Rock stress and opening stability · In situ opening deformation 	<ul style="list-style-type: none"> · Repository candiate · Finish site investigation in 2003 · Operation in 2011
Japan	Tono	Uranium mine	1995	· ¥ 60 billion · construction : ¥ 20 billion · research : ¥ 40 billion	<ul style="list-style-type: none"> · Geological environments · Long term geological stability · Tools and technology development · Earthquake effect 	<ul style="list-style-type: none"> Research programs · 1 stage : Surface investigation for 5 years · 2 stage : Tunnel excavation · 3 stage : Research in underground excavations
Canada	URL	Granite (depth 240m-420m)	1980	About 0.11 billion dollar	<ul style="list-style-type: none"> · Site characterization, tracing discontinuities, surface geological exploration, hydro-geology and geochemical characteristics, transfortation in fractured rock, and tests of buffer and canister 	<ul style="list-style-type: none"> International corporation project : Canada, USA, Japan

3.1 스웨덴 에스페 프로젝트

스트리파 폐철광산에서 1980년부터 1992년까지 국제공동연구로 수행된 스트리파 프로젝트의 후속사업으로 CLAB 사용후핵연료 중간저장소가 있는 에스페섬의 화강암반에서 부지실측조사를 위한 연구를 1990년대 초반부터 본격적으로 진행되었다. 1992년부터 수직터널이 굴착되었으며 이와 함께 지하 ramp도 건설되었다. 1994년 현재 에스페 내 총 터널의 길이는 약 3.2 km로서 여기서 다음과 같은 다양한 연구들이 진행되고 있다. (a) 터널굴착에 따라 터널주위에서 발생하는 EDZ (Excavation Disturbed Zone) 가 지하수 유동에 미치는 영향 (b) 균열망 (Fracture network)을 통한 지하수 유동현상을 파악하고 새로운 지하수 유동프로그램 개발 (c) 균열대를 밀봉하는 기법에 대한 연구 (d) 되메움과 밀봉기법에 대한 실증 (e) 처분공의 굴착, 폐기물 거치와 회수기법에 대한 실증 (d) 각종 부지 탐사장비 개발.

3.2 Yucca Mountain 프로젝트

1983년 부터 미국 에너지성 (Department of Energy, DOE)은 방사성 폐기물 처분장 부지로서 9 곳의 후보지에 대한 평가를 실시하였으며 1987년에 Yucca Mountain (YM) 이 일단의 후보 부지로 선정되었다. YM 은 고준위 방사성 폐기물을 처분하기 위한 연구 및 영구처분후보 부지로서 네바다주 라스베가스에서 약 160 km 떨어진 사막지대에 위치하고 있다. 이곳은 강우량이 년 15 cm 정도로 매우 낮으며 따라서 증발이 쉽게 일어나는 지대이다. YM 부지는 과거 수 백만년 전에 여러 번의 화산분출작용에 의해 분출된 화산재 등이 압축되어 만들어진 응회암 (tuff) 층으로서 주위에 7개의 화산이 13-43 km 거리에 위치하며 이들의 분출은 40만년-100만년 전에 발생하였다.

1993년 초 폭 9 m, 높이 10 m, 길이 60 m 의 착공터널이 천공-발파기법에 의해 만들어졌으며 여기서부터 1994년 초 7.6 m 직경의 TBM (Tunnel Boring Machine) 을 사용하여 공동의 굴착이 시작되었으며 1997년 연구를 위한 ESF (Exploratory Studies Facility) 굴착이 완료되었다. 방사성 폐기물을 처분하기 위한 지하구조물은 2개의 블록으로 나뉜다. 상부블록은 3.24 km² (800 에이커) 이며 상부블록보다 65-70 m 깊은 곳에 위치하는 하부블록은 0.7 km² (170 에이커)로서 이들 블록들은 지하 200-300 m 에 위치하며 이들은 지하수면보다 약 100 m 위쪽에 위치하게 된다. 방사성 폐기물들은 100 여 개의 처분터널 (Deposition tunnel) 에 거치되게 되는데 이 처분터

널들은 길이가 약 250 m - 600 m이며 각 처분터널 사이에는 22.5 m 의 간격을 둔다. 1998년 현재 미국 DOE로부터 YM 부지 적합성에 대한 긍정적 평가를 받은 후 1999년 말까지 대통령 및 국회의 판정을 얻을 예정이다. 이후 2005년부터 본격적인 지하처분장 건설 착수 후 2010년에 방사성 폐기물을 처분할 계획으로 있다. 처분될 방사성 폐기물은 사용후핵연료 63,000 MTU (Metric Tons of Uranium) 와 7,000 MTU의 고준위폐기물로서 고준위 폐기물은 유리화 후 20,000개의 용기에 포장된 다음 처분할 계획으로 있다. 표 5 는 YM 에서 계획된 암석역학관련 실험들을 보여주고 있다 (Blejewas, 1987).

3.3 Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) 프로젝트

WIPP은 TRU 폐기물의 처리를 위해 뉴멕시코주 사막지대의 지하심부에 건설된 대규모 방사성 폐기물 처분 연구 시설이다. WIPP 지하구조물의 건설은 미국 DOE 에 의해 1981년에 시작되었다. 이 지하구조물은 지하 약 650 m 에 위치한 암염층에 설치되어 있다. 이 암염층의 두께는 약 1000 m 로서 지금으로부터 약 2억2천5백만년 전에 형성된 지층이다.

WIPP 지상구조물과 지하구조물을 연결하고 자재와 폐기물의 운반, 통기, 작업자의 이동을 위해 4 개의 수직터널이 설치되어있다. Salt Handling 터널은 주요 이동 통로로서 역할을 하며, Air Intake 터널과 Exhaust 터널은 통기를 위해 설치되었으며 Waste 터널은 방사성 폐기물의 이동을 위해 설치되어있다. 지하구조물은 크게 3영역 - (1) Site and Preliminary Design Validation (SPDV) 영역, (2) Experimental 영역, (3) 8개의 처분패널로 구성되는 TRU waste storage 영역으로 나뉜다 (Munson, et al., 1990). Storage 영역은 8개의 패널이 만들어질 계획으로 있으며 각 패널은 7개의 방으로 구성된다. 각 방은 직사각형 형태로서 방의 높이는 4 m, 폭은 10 m, 길이는 100 m 이며 지보를 위해 각 방 사이에 약 30 m 두께의 pillar를 남겨두게 된다. SPDV 영역은 지하공동의 거동을 직접 관찰하고 연구하기 위해 처분패널의 공동과 동일한 크기로 만들어졌다.

SPDV 영역과 experimental 영역 그리고 storage 영역 중의 한 패널이 현재 굴착이 완료되었고 이들 굴착된 영역에서는 각종 측정기기들을 이용하여 공동 주위 암반의 변위와 응력의 시간에 따른 변화가 현재까지 주의 깊게 측정되고 있다 (Kwon, 1996). 1999년 3월에는 수십 년 간의 연구 끝에 Panel 1의 Room 7 에 방사성 폐기물을

Table 5. Rock mechanics tests in Yucca Mountain

General area of investigation	Planned experiments	Description
Excavation Investigation	Shaft convergence	<ul style="list-style-type: none"> · In situ stress measurements. · Displacement measurements within the rock wall. · Pressure measurements within the concrete liner
	Demonstration breakout Rooms	· Displacement measurements within the surrounding rock as the excavation advances
	Sequential drift mining	· Measurement of displacement induced by the neighbor mining
In situ mechanical properties	Plate load	· Rock deformation measurement using plate-bearing test
	Rock mass strength.	<ul style="list-style-type: none"> · Measurement of rock mass strength · Measurement of large-scale joint properties
In situ thermomechanical investigation	Canister scale heater	· Measurement of the temperatures and displacements around a heater emplaced in a hole
	Heater experiment in unit.	· Heater experiment in rock unit
	YM heated block.	· Thermal and mechanical loading of a block of welded tuff about 2 m on all sides
	Thermal stress measurements.	· Measurement of compressive stress in the rock mass under thermal loading by rows of heaters for the validation of the thermomechanical models
	Heated room.	· Monitoring of a room that is heated using several heaters in the walls and/or floors
Laboratory mechanical properties of intact rock	Compressive mechanical properties of intact rock.	· Laboratory measurements of UCS, E, and Poisson's ratio
	Effects of variable environmental conditions.	· Measurements of compressive mechanical properties for the variations of sample strain rate, saturation, confining pressure, and temperature
	Tensile strength.	· Tensile strength measurements using the Brazilian test and direct-pull tests
Laboratory thermal properties	Density and porosity.	· Laboratory measurements of density and porosity
	Volumetric heat capacity.	· Heat capacity measurements of solid tuff material
	Thermal conductivity.	· Measurements of thermal conductivity of solid tuff
	Thermal expansion.	· Measurement of thermal expansion
Laboratory determination of the mechanical properties of fractures	Mechanical properties of Fractures.	· Measurement of cohesion, coefficient of friction, shear stiffness, and normal stiffness
	Effect of variable environmental conditions.	· Laboratory measurements to evaluate the effect of varying displacement rate, saturation, temperature, normal stress, and sample size on cohesion, coefficient of friction, shear stiffness, and normal stiffness of fractures

지하에 처분하는 작업을 시작하였다.

3.4 독일 굴레벤

중저준위와 사용후핵연료를 영구처분하기 위한 굴레벤 시설은 1979년부터 추진되었다. 약 2억 5천만년 전에 형성된 고생대의 암염 돔 (Salt dome)이 방사성 폐기물 처분장으로서 적합한지를 파악하기 위한 지상 및 지하실험이 진행되고 있다. 처분예정지점에서 지하수면까지의 거리

는 650 m 충분히 안전한 거리를 두고 있다. 통기를 위해 940 m 와 840 m 길이의 두개의 수직터널이 건설되었으며 여기서부터 건설되는 수평터널에서 암염의 물리적, 화학적, 광물학적, 지화학적 특성들에 대한 연구 및 암염 돔에서의 응력과 공동의 안정성과 같은 암석역학적 연구를 비롯한 다양한 연구가 진행되고 있다.

3.5 일본 토노 광산

일본에서 처분 관련 연구기술 개발을 1980년대 초에 착수하였으며 1998년 JNC (Japan Nuclear Cycle Development Institute) 을 중심으로 연구를 수행하고 있으며 고준위 방사성 폐기물을 30 - 40년간 중간 저장 후 2030년대에 처분하는 것을 국가방침으로 정해놓고 있다. 1995년 토노 광산을 연구지역으로 선정하여 향후 약 20년간 600억엔의 예산으로 다음의 3 단계 연구 프로젝트를 계획하고 있다.

(a) 지하시험시설 건설 전 : 지표 중심 조사 및 연구와 예측

(b) 지하시험시설 건설 중 : 수직터널 및 시험공동 굴착 중 1단계에서의 예측결과와 비교 연구

(c) 지하시험시설 건설 후 : 심부 지질 환경하에서의 각종 현상 연구

3.6 캐나다 URL

캐나다 Manitoba 지역의 240 - 420 m 의 건전한 결정질 암반에 시험시설이 만들어져 있다. 1980년부터 1984년 까지의 부지조사 후 1984년부터 2년간 255 m 의 수직터널을 굴착하고 실험시설을 건설하였으며 1987년부터 1990년까지의 제 2단계 건설에서는 433 m 까지 수직터널을 연장하고 420 m 에 실험시설을 건설하였다. 미국, 일본, 스웨덴과의 공동연구로 지질조사, 심부암반과 지하수의 거동, 불연속면의 탐지기술, 완충재와 용기특성, 폐기물의 포장과 운반, 지상 및 지하 구조물의 건설과 폐쇄, 안전성평가, 환경에 대한 영향 등에 대한 연구가 진행되고 있다.

3.7 기타 프로젝트

a. 스웨덴 Stripa Mine 프로젝트

스웨덴의 Stripa 철광산에서 1980년부터 1992년까지 10여년간 스웨덴을 비롯, 캐나다, 핀란드, 프랑스, 일본, 스위스, 영국, 미국 등이 참가한 국제공동연구로서 화강암에서의 처분장 건설을 위한 연구들이 수행되었다. 총예산 4천만불로 폐철광 지하 약 400 m 의 처분연구시설을 건설하고 결정질 암반에서의 지하수의 유동특성, 균열망, 완충재의 특성, heat test, 굴착에 따른 수리-역학적 상호작용해석, 균열 및 터널 밀봉 (Sealing) 실험, 폐기물 처분 후의 화학적특성에 관한 연구들이 현장실험을 통해 수행하였다.

b. 독일 Asse Salt Mine

독일의 Asse Salt Mine 에서 지하 약 230 m에 시험

시설을 건설하였다. 독일, 네덜란드와 미국이 공동으로 진행된 연구로서 주로 brine 의 이동, 감마선의 영향, 방사능에 의한 가스발생, 부식과 용해, 암염의 물성변화 등에 관한 연구들을 수행하였으며 1995년 폐쇄되었다.

c. 벨기에 Clay 처분 프로그램

벨기에에서 clay 층에 방사성 폐기물을 처분하는 방법에 대한 연구가 1975년에 시작되었다. 초기 5년간은 현장과 실험실 실험과 더불어 220 m 지하의 clay 층에 처분하는 방법의 기술적, 경제적 측면에서의 이론적인 연구가 수행되었다. 그 후에는 URL 의 건설을 통한 현장자료의 수집과 실험실 결과의 검증, clay와 폐기물 용기간의 물리화학적 반응, 지하수유동에 대한 연구들이 진행되었다.

4. 방사성 폐기물 처분을 위한 암석역학의 응용

4.1 부지조사

방사성 폐기물 처분시설에 적합한 부지를 결정하기 위해서 각종 부지조사를 실시한다. 방사성 폐기물을 안전하게 처분하기 위해서는 부지선정과정에서 다음의 항목들이 조사, 검토되어야 한다.

(a) 지질 조건 : 지형, 암석의 종류, 불연속면의 발달정도, 단층의 존재, 절리 분포, 암층의 심도와 두께, 지하수면의 위치, 현지응력 상태 등

(b) 화산활동과 지진

(c) 암석의 성질 : 암석강도, 투수도, 공극률, 탄성계수, 변형계수, 열전도도 등

(d) 부지특성 : 부지가 위치하는 지역의 강우량, 지하자원의 존재유무, 부지부근의 인구밀도, 교통 시설 등

(e) 방사성 폐기물의 종류와 양

방사성 폐기물 처분장 부지선정을 위해서 수행되어야 할 암석역학 관련 작업과 연구들에 대한 간략한 소개는 다음과 같다.

4.1.1. 시추공 천공과 검증

부지선정을 위해서는 예상 부지에 여러 개의 시추공을 뚫어 예비지반조사를 실시한다. 이를 통해 암반 내의 균열과 시추공에서의 수리, 화학적 특성들이 조사된다. Yucca Mountain 에서는 1983년부터 1986년 까지 72 개의 시추공이 천공되었으며 그 후 1993년에 지하수의 유동을 보다 정확하게 파악하기 위해 24개의 시추공이 천공되었다. 시추공에서 얻어진 5 cm 직경의 암석코어들을 통

해 암반의 지질형상과 암석의 물리적, 기계적 특성이 조사되었다. 또한 이들 시추공들을 통해 각종 검층장비를 이용한 물리검층이 가능하다. 방사성 폐기물 처분시설의 부지조사를 위한 시추공의 시추는 암층과 토층의 자연상태를 훼손하지 않도록 주의 깊게 실시되어야 한다. Yucca mountain에서의 시추공 시추에 의해 발생하는 암석 파편들을 유체를 사용하여 제거하는 대신에 진공식으로 이들을 제거함으로써 지층의 손상을 최대한 줄이도록 하였다.

4.1.2. 암석시험

시추공으로부터 회수된 암석코어와 암석 파편들은 실험실에서 각종 시험에 이용된다. 실험실에서 암석시편을 사용한 시험을 통해 암석의 밀도, 공극률, 암석내 파동속도, 탄성계수, 암석 강도 등을 결정할 수 있다. 기타 실험실에서 결정할 수 있는 암석의 성질들로는 암석의 열전도도, 투수계수, 파괴강도, 불순물의 함량 등을 들 수 있다. 또한 현장에서의 시험을 통해 암석의 현장물성을 결정할 필요가 있다. 다음은 암석의 물성을 결정하기 위해 수행되는 실험실 시험과 현장시험을 보여주고 있다 (Attewell, 1993).

a. 실험실 시험

- i. 직접 또는 간접인장시험: 암석의 인장강도를 얻을 수 있다.
- ii. 삼축압축강도시험 : 파괴곡선을 얻는다.
- iii. 단축압축강도시험 : 압축강도, 탄성계수와 포아송비를 얻는다.
- iv. 탄성파속도측정 : 동탄성계수를 결정한다.
- v. Creep 시험 : 암석의 시간의존적인 변형거동 특성을 파악
- vi. 전단강도시험 : 전단강도 등 절리의 물성과파악
- vii. 투수도와 공극률시험 : 수리물성과파악
- viii. 열전도도 측정시험: 열적 물성과파악
- ix. 암석의 피로특성
- x. 파괴인성시험: 암석의 균열발생 특성을 파악

b. 현장시험

- i. 공내재하시험 및 평판재하시험 : 현장 변형계수를 결정한다.
- ii. 직접인장시험: 전단강도계수를 결정한다.
- iii. Pull-out 시험 : 암석 앵커의 저항도 측정
- iv. 열팽창시험: 암반의 열적 특성을 규명
- v. 투수도시험: 지하공동으로의 유체유입 정도를 결정한다.

이러한 실험실 시험이나 암석의 물성들은 처분장 부지

의 결정, 암반분류, 처분장의 설계를 위한 수치해석, 지보의 설계 등을 위한 기본자료로서 사용되어진다.

4.1.3. 암반분류법 (Rock Mass Classification)

암반분류법은 암반상태와 암석의 여러 가지 물성에 기초하여 이를 수치화함으로써 암반의 종합적인 상태를 분류할 수 있도록 한다. 암반분류를 통해 얻어진 값과 다른 현장에서의 경험에 기초하여 적합한 공동 및 지보의 설계를 하게 된다. 여러 가지 암반분류법중 Q 시스템과 RMR 시스템이 현재 가장 널리 이용되고 있다. RMR의 경우 암반분류를 위해 (1) 암석강도, (2) RQD, (3) 불연속면 간격, (4) 불연속면의 상태, (5) 지하수의 상태 등 5 가지 요소를 고려하여 계산되며 현장 변형률의 결정, 암반강도의 추정, stand-up time 의 결정, 지보 하중의 계산 등에 이용된다. 방사성 폐기물 처분장의 설계에서는 폐기물에서 발생하는 열을 장기적으로 고려하여야 하기 때문에 RMR 이나 Q 에서 계산되는 지보 보다는 좀 더 보수적인 지보 설계가 필요할 것으로 생각된다.

4.1.4. 불연속면과 단층의 조사

암반의 거동에 영향을 미치는 불연속면의 성질로는 불연속면의 길이, 형태, 발달 방향 등을 들 수 있으며 이러한 불연속면의 존재는 암석의 거동에 다양한 형태로 영향을 미치게 된다 (Brown, 1993).

- (i) 암반의 인장 및 전단강도를 전반적으로 감소시킨다.
- (ii) 지하수를 비롯한 유체의 주요 통로 역할을 하게 된다.
- (iii) 암반 내 응력의 분포에 영향을 미친다.
- (iv) 암석의 회전과 전이를 위한 자유면을 제공한다.
- (v) 발파에 의한 탄성파의 반사면의 역할을 한다.

표 6은 스웨덴 화강암에서 조사된 불연속면의 간격과

Table 6. Fracture distribution for a typical Swedish bedrock (SKB, 1992)

Fracture	Spacing	Width	Hydraulic conductivity
Regional fracture zones (1st order)	3 km-7 km	50 m-100 m	10 ⁻⁷ m/s
Fracture zone (2nd order)	400 m-800 m	1 m-20 m	10 ⁻⁸ m/s
Fracture zone (3rd order)	100 m	0.5 m-2 m	10 ⁻⁹ m/s
Bedrock including (4th order)	0.8 m-1.1 m	0.01 m	10 ⁻¹¹ m/s
Major subhorizontal Fracture zones	700 m	-	10 ⁻⁷ m/s

수리전도도를 보여주고 있다. YM의 경우 미터 당 0.8 - 3.9 개의 fracture가 존재하는 것으로 조사되었다.

단층은 전단 변위가 발생하는 균열면을 말하며 활성단층의 존재는 지진의 발생과 밀접하게 관련되기 때문에 방사성 폐기물 처분시설의 부지 조사 시 활성단층의 존재는 주의 깊게 조사되어야 한다. YM에는 처분장 주위에 4개의 단층면이 발견되었으며 이들 단층면이 지하수의 거동에 미치는 영향에 대한 연구가 진행 중이다. 이들 단층들은 지난 10여년간 연구되어오고 있으며 YM주위에서 발생하는 지진을 기록하고 단층의 이동과 지진이 YM의 안전성에 미치는 영향을 연구하고 있다. 또한 과거 200만년 동안의 단층이동을 조사하여 단층이동의 주기와 이동량을 결정하는 연구를 수행하고 있다. 그 동안의 연구 결과에 따르면 YM에서는 단층면을 따른 이동이 작고 단층 이동간에 수 천년의 시간간격이 존재하기 때문에 지상-지하 구조물의 안전성에는 큰 위협이 되지 않는다고 여겨지고 있다.

4.1.5. 초기응력측정

초기응력이란 암반에 공동을 굴착하기 전의 현장응력으로서 지하구조물 주위에 형성되는 응력상태는 이 초기응력과 굴착에 의해 발생하는 응력에 의해 결정된다. 공동의 굴착에 의해 발생하는 응력은 초기응력에 직접적으로 관계되므로 암반의 초기응력은 지하구조물의 설계 시 매우 중요한 요소가 된다. 암반의 초기응력은 수압파쇄법, Flatjack을 이용한 측정법, 또는 시추공의 변형을 측정하는 방법을 사용하여 결정할 수 있다. 이들 중 수압파쇄법은 관심 지층까지 시추공을 천공하여 실험을 실시하기 때문에 초기응력의 원거리 측정이 가능한 방법이다. 핀란드에서는 Olkiluto, Kivetty, Romuvaara의 3개의 후보 부지에 대한 부지 조사를 위해 수압파쇄법을 이용한 현지응력을 측정하였다. 이에 따르면 심도 500 m에서의 최대 수평응력은 수직응력의 2.3배 정도로 나타났다.

4.1.6. 지하수 유동조사

방사성 폐기물에서 발생하는 핵종의 주된 이동은 불연속면을 따른 지하수의 이동에 의해 결정되기 때문에 지하 암반에 존재하는 불연속면을 따른 지하수의 거동을 파악하는 것이 중요하다. 스웨덴에서는 Stripa 폐철광에서 관측 시추공을 통해 균열대 존재를 파악하였으며 Tracer Test를 통해 Channeling 효과를 확인하였다 (Herbert and Spawski, 1980). 균열을 따라 흐르는 지하수의 유동을 파악하기 위해서는 시추를 통해 조사된 불연속면의 통계자료를 이용하여야 한다. 즉, 불연속면을 통계적 방법에

의해 만들고 이를 통한 지하수의 유동거동을 해석하는 연구들이 수행되어야 한다.

4.2 지하공동의 설계

지하공동의 설계는 공동의 안전성에 결정적인 영향을 미친다. 공동의 크기는 구조적 안전성과 지하에서 사용될 처분용기 취급 및 거치공정과 해당 기계장비의 크기를 고려하여 결정된다. 방사성 폐기물 처분장의 경우 운영기간이 40 - 50년 정도이며 만약 회수 운영 조건의 경우 (monitored retrieval operation) 운영 기간이 약 50 - 100년 정도 추가로 고려되기 때문에 공동을 100 - 150년 이상 견뎌내도록 유지시킬 수 있도록 설계가 이루어져야 할 것이다. 고준위 폐기물을 공동 바닥이나 벽면에 뚫은 처분공에 처분하는 경우, 처분공의 직경과 처분공간의 간격은 처분용기에서 발생하는 열과 지질, 응력의 영향 등을 고려하여 결정하여야 한다. 스웨덴, 핀란드, 캐나다 처분 개념의 경우 처분용기 거치 전후에 벤토나이트 완충재를 처분용기 주위에 설치하게 하는데 완충재가 제 기능을 (팽창함으로써 수리전도도를 낮추어 지하수의 유입을 방지)을 할 수 있도록 해야 한다. 즉 처분 용기 주위의 벤토나이트의 두께가 너무 두꺼울 경우 벤토나이트의 열전도도가 낮기 때문에 폐기물에서 발생하는 열을 방출하는데 지장이 생겨 온도를 상승시키는 결과를 낳기 때문에 적정 두께로 설계하는 것이 필요하다. 또한 구조적 안정성 측면에서 터널 사이의 암반에서의 응력이 강도의 절반이하로 유지될 수 있도록 처분공과 처분터널을 설계하여야 한다. 이러한 측면에서 일반적으로 굴착비율 (Extraction ratio)은 30% 이하로 유지하도록 하고 있다. 캐나다의 경우 수직터널에서의 온도상승을 방지하기 위해 수직터널의 위치를 처분장소에서 적어도 200 m 이격시키는 설계 조건을 제시하고 있다.

적합한 수학적식이나 수치해석을 실시하여 지하구조물의 전반적인 거동을 예측하여 이를 공동의 설계에 이용할 수 있다. 일반적으로 탄성암체로 분류되는 현무암, 화강암, 응회암(tuff) 등에 방사성 폐기물 처분시설이 설치되더라도 이들이 지하 심부에 위치하고 따라서 높은 압력의 영향을 받기 때문에 그림 1과 같은 형태의 시간 의존적인 creep 변형거동을 보이게 된다. 이러한 creep 변형은 지하구조물의 장기적인 안전성을 해치며 또한 수리전도도를 증가시키는 결과를 낳기 때문에 공동의 설계 시 어느 정도 이상의 creep 변형이 발생하지 않도록 해야 한다. 예를 들어 미국의 WIPP에서는 실험실 실험에서 얻어진

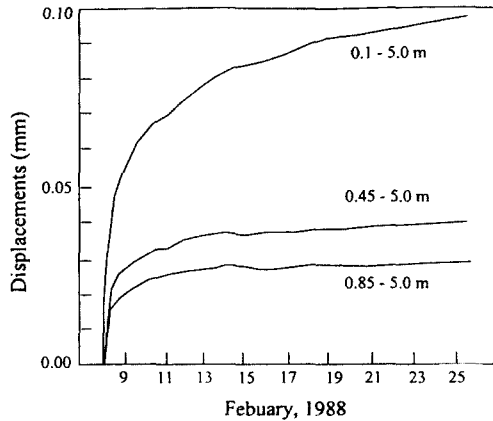


Fig. 1. Time-dependent deformation of a shaft located at 340 m deep granite.

변형계수를 사용한 수치해석의 결과에 기초하여 공동들이 공동 굴착 후 5년 동안의 수평내공변위가 23 cm, 수직내 공변위가 30 cm 이내가 될 수 있도록 설계하였다. 응회암 층에 설치되는 방사성 폐기물 처분시설의 변위는 100년 동안 15 cm를 넘지 않아야 한다고 규정하고 있다 (Hardy and Bauer, 1993). 또한 변위속도가 클 경우 공동의 안전성에 손상이 될 수 있기 때문에 주요 터널의 경우 변위속도가 1 mm/year를 넘지 않도록 하고 기타 처분 터널을 비롯한 기타 터널의 경우 변위속도가 3 mm/year를 넘지 않도록 하고 있다 (Hardy and Bauer, 1993). 지하 공동의 설계는 이러한 기준들을 만족시킬 수 있도록 하여야 한다.

이와 같이 세계 각국은 방사성 폐기물의 종류와 양, 처분 압반 및 심도 등을 고려하여 처분장의 설계 기준들을 만들고 이에 따라 독자적인 처분개념을 개발하였다. 표 7

과 표 8 은 스웨덴, 미국, 캐나다의 처분장 기준 처분 개념과 지하구조물의 개념을 비교하고 있다.

1. 스웨덴 처분개념 : 스웨덴에서는 지하 500 m 에 위치하는 화강암반에 처분장을 건설하고 처분터널 바닥에 직경 약 1.6 m 길이 7.6 m 의 처분공을 뚫고 여기에 처분용기를 거치한 후 용기 주변에 벤토나이트 완충재를 채우는 개념을 기준 개념으로 선정하였다. 8000 톤의 폐기물을 처분하기 위한 지하 처분장의 면적은 1 km²이며 처분공 사이의 간격은 6 m이다.

2. 미국 처분개념 : 미국의 처분 개념에 따르면 1.8 m 직경의 처분용기를 TBM 으로 굴착된 5 m 직경의 수평 처분공에 처분한 다음 100년 동안의 감시기간동안 퇴매움을 채우지 않은 상태로 유지하게 된다. 환기용으로 2개의 수직터널이 건설되며 무게가 최대 91톤인 처분용기는 7.6 m 직경의 ramp 를 통해 운반된다.

3. 캐나다 처분개념 : CANDU 사용후핵연료를 처분해야 하는 캐나다에서는 지하 약 500 - 1000 m 의 화강암반에 처분공을 뚫고 처분용기를 거치하고 용기 주변에 벤토나이트를 채우는 개념을 채택하고 있다.

지하공동의 설계시 환기시스템, 버럭 처리, 배수 등을 고려한 설계가 필요하다. 환기시스템은 지열과 폐기물에서 발생하는 열에 의해 작업에 지장이 생기지 않도록 공기의 온도를 적정하게 유지할 수 있도록 설계되어야 한다. 캐나다, 스웨덴이나 미국의 개념설계에 따르면 처분공동의 구배를 일정 정도 (1 % 내외) 두도록 함으로써 배수가 원활히 되도록 하고 있다. 또한 폐기물의 거치와 처분터널의 굴착이 동시에 진행되는 개념이기 때문에 작업자의 안전, 작업기계의 효율적 사용과 원활한 작업을 고려하여 굴착기법, 굴착순서, 수직터널의 수, 터널의 길이 및 진행

Table 7. Reference disposal concepts in Sweden, USA and Canada

	Sweden	USA	Canada
Waste type and weight	BWR & PWR8000 ton	- SF : 63000 ton - HLW : 7000 ton	CANDU 190,000 ton
Emplacement method	Vertical borehole	Horizontal drift	Vertical borehole
Host rock	Granite	Welded Tuff (1.8 km thick)	Granite
Depth	500 m	300 m (100 m above the water table)	500 - 1000 m
Area of subsurface	1 km ²	3.94 km ²	4 km ²
Buffer	Compacted bentonite	-	Compacted bentonite
Backfilling	bentonite & sand (10% bentonite, 90% sand)	quartz sand or crushed, screened, mined rock	25 wt% glacial-lake clay + 75 wt% crushed granite
Canister	Copper + cast iron	Carbon steel and Nickel alloy	Titanium and Carbon steel

Table 8. Reference concepts of underground excavations in Sweden, USA and Canada

		Sweden	USA	Canada
Shaft	Number	2	2	5
	Diameter	4 - 5 m	6.1 m	3.6 - 7.3 m
	Excavation method	Drill and Blasting	Raise boring & blasting	Drill and blasting
Ramp	Diameter	6 m	7.62 m	-
	Slope	1 : 7	< 3 %	-
	Excavation method	TBM	TBM	-
Access tunnel	Size	Height 7 m Width 7 m	Diameter 7.62 m	Height 5 - 6.5 m Width 6 m
	Excavation method	Drill and blasting	TBM	Drill and blasting
Deposition tunnel	Size	Height 5 m Width 4 m	Diameter 5 - 5.5 m	Height 5 - 5.5 m Width 8 m
	Length	250 m	250 - 600 m	230 m
	Spacing	40 m	28 m	23 m
	Excavation method	Drill and blasting	TBM	Drill and blasting
Deposition hole	Size	Length 7.58 m Diameter 1.6 m	-	Length 5 m Diameter 1.24 m
	Spacing	6 m	-	2.1 m
	Excavation method	blind boring	-	blind boring

방향등에 대한 결정이 이루어져야 한다. 그 외에 터널의 크기, 처분장 심도, 지보, 작업간격, 작업기계, 현장 측정 기기들의 설치등에 대한 설계가 필요하다.

공동의 설계 단계에서 전체적인 설계의 적합성을 해석하기 위해서 컴퓨터를 이용한 해석이 주로 이용된다. 컴퓨터 시뮬레이션은 (a) 설계에 따른 영향을 평가하는 도구로서, (b) 설계시 경험적으로는 얻을 수 없는 기초값의 계산하기 위해서, (c) 가장 발생 위험이 높은 파괴 메커니즘을 파악하고 이를 피하기 위한 대안을 제시하며, (d) 기존의 공동에서 얻어진 현장측정 자료와 비교·검토하는 목적으로 사용되어진다 (Whyatt and Julien, 1988). 현재 Finite Element Method (FEM), Boundary Element Method (BEM), Distinct Element Method (DEM) 등 여러 종류의 시뮬레이션 프로그램들이 개발되어 공동의 변형 및 파괴거동의 이해와 예측 그리고 공동의 거동에 영향을 미치는 요소들에 대한 연구에 이용되고 있다. WIPP의 경우 공동의 시간의존적인 거동을 해석하기 위해 오래 동안의 연구를 통해 WIPP reference creep law 라는 constitutive equation이 개발되어 사용되고 있다.

고준위 방사성 폐기물에서 발생하는 열은 암반의 역학적, 수리적 물성을 변화시키기 때문에 이들간의 상호작용을 규명하기 위한 해석이 필요하다. 일반적으로 완충체의 팽창압은 10 MPa 정도이며 폐기물에서 발생하는 열에

의한 응력은 20-30 MPa 정도로 보고되고 있다 (Johansson et al., 1993). 따라서 이들의 영향을 고려한 해석이 실시되어야 한다. 즉, 처분용기에서 발생하는 열에 의해 완충재나 암반의 물성변화, 완충재의 습윤팽창에 의한 처분용기나 암반의 응력변화, 암반의 변형에 따른 완충재의 물성 변화 등을 기술할 수 있는 기법들의 개발이 필요하다.

처분장 주위에 균열대(fractured zone)나 단층이 존재하는 경우 암반의 역학적, 수리적 거동에 큰 영향을 미치기 때문에 균열대의 존재에 따른 영향을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증하는 과정이 필요하다. 또한 심부 지하구조물이 지진이나 발파충격에 의해 손상되는 정도를 추정하기 위한 시뮬레이션도 설계과정에서 검증되어야 한다. 지진에 의해 터널에 생기는 손상은 불연속면을 따라 발생하는 변위와 인장, 압축응력의 증가에 의한 손상으로 나눌 수 있으며, 지진파의 최대지반가속도 (peak surface acceleration)가 0.2 g 보다 낮은 경우에 지하 공동에 손상이 생기지 않고 최대지반가속도가 0.2에서 0.4 g 사이의 지진파의 경우 국부적인 손상만이 발생하여야 한다는 기준들이 제시되어 있다 (Dowding & Rozen, 1978). 여기서 g 는 중력가속도를 나타내고, 국부적인 손상이란 새로운 균열의 발생과 소규모 암석의 낙하를 의미한다.

이상에서 살펴 본 바와 같이 공동의 설계단계에서는 공

동의 안정성에 영향을 줄 수 있는 각종 현상들, 예를 들면 불연속면, 균열대, 단층, 지열, 완충제의 팽창, 열-수리-기계적 상호작용, 지진 등이 미칠 영향들이 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증되어야 한다. 그 외에 블록이론 (block theory), 전문가시스템 (expert system), 프랙탈 해석 등의 이론들이 공동의 구조적 안정성 평가를 위해 공동의 설계단계에서 사용되어질 수 있다.

4.3 터널굴착

터널굴착단계에서는 지하구조물의 굴착과 함께 굴착과정에서 얻어지는 자료들을 수집하고 이를 통해 지하 처분장의 거동을 예측하고 결과적으로 터널설계를 개선하는 작업이 수행된다. 공동의 형태와 암석의 종류, 암반의 상태, 균열면, 응력상태 등을 고려하여 적절한 채굴법이 결정되어야 한다.

수직터널의 경우 천공, 발파 또는 상향 보오링에 의해 굴착된다. 보오링으로 굴착되는 환기용 수직터널은 상대적으로 깨끗한 벽면을 가지기 때문에 공기의 흐름에 대한 저항을 감소시키는 장점이 있다.

경사터널의 경우 YM 경우처럼 TBM을 사용하여 굴착하거나 발파에 의해 굴착한다. 매우 단단하고 지질구조가 복잡한 암반에 공동을 굴착하는 경우 smooth-wall blasting 기법을 이용하는 것이 TBM을 이용하는 것 보다 효과적이다. YM에서는 TBM 조립 및 해체 장소와 같이 짧은 터널의 경우에는 TBM 보다 이동이 용이한 roadheader를 사용하기도 한다. 발파에 의한 공동굴착의 문제로는 발파충격에 의한 공동 주위의 손상을 들 수 있다. Colorado School of Mines 의 experimental mine에서 발파에 의한 암반의 손상에 대한 연구가 미국-캐나다 공동연구의 일환으로 수행되었다. 효과적인 발파를 위해서는 적절한 채굴순서에 따라 적절한 폭약을 적절한 시간간격으로 기폭시키는 것이 중요하다. 또한 pre-splitting과 같은 새로운 발파기술을 이용함으로써 보다 효과적인 발파 결과를 얻을 수 있다. 스웨덴에서의 연구에 따르면, 제어발파를 실시함으로써 손상대의 크기를 0.3 m 까지 줄일 수 있는 것으로 보고되고 있다. 현재 스웨덴의 에스페에서는 발파와 TBM 굴착에 따른 EDZ의 발생과 EDZ가 지하수 유동에 미치는 영향에 대한 연구 (ZEDEX 프로그램)가 진행되고 있으며 이 연구결과에 따라 향후 굴착방법이 결정될 것이다.

4.4 처분시설의 운영 및 유지

4.4.1. 지보 설계

처분장의 운영 조건에 따라 다르겠지만, 회수운영 조건 가장 하에서 처분장은 건설 후 약 50년 동안의 처분을 위한 운영기간과 폐기물 처분 후 약 50년 동안의 감시기간 동안 지하구조물은 안정한 상태를 유지할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 암반의 조건에 적합한 지보를 설치하는 것이 필요하다. 지보를 실시하는 궁극적인 목적은 암반의 고유강도를 이용하여 암반이 자체적으로 유지될 수 있도록 하는 것으로 인장시킨 rockbolt 나 cable, hydraulic prob, expandable segmented 콘크리트라이닝, powered support 등과 같은 능동 지보와 Steel 라이닝, 인장시키지 않은 grouted rock bolt 등과 같은 수동 지보들이 사용될 수 있다. 지보는 공동의 설계가 변경되거나 공동 주위 암반의 상태 변화에 따라 적절히 설계되어야 한다. 예를 들면 WIPP의 경우 지보 설계 시, 천반 약 2 m 지점에 위치하는 clay seam에서 발생하는 수직, 수평변위를 고려하여 지보를 설계하였다 (Figure 2). 방사성폐기물이 처분될 공동에서의 지보의 경우, 27개의 steel channel을 공동의 폭을 따라 설치하고 각 channel마다 11 개의 rock bolt를 설치하였다. 이러한 지보는 storage 영역의 공동들이 공동 굴착 후 적어도 12년 동안 안전하게 유지될 수 있도록 설계된 것으로 공동부근의 Clay층 (Clay 'G')을 따르는 수평변위에 의해 rock bolt가 전단 파괴되는 현상을 줄이기 위해 터널에서부터 Clay 'G'까지는 150 mm 직경의 공을 천공한 것을 볼 수 있다.

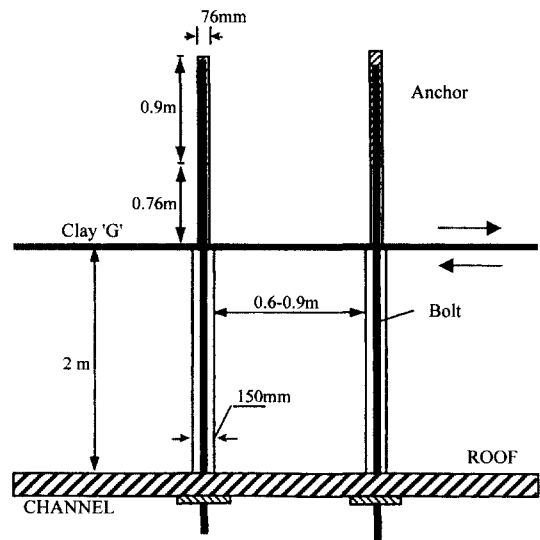


Fig. 2. Rock bolt installation in the roof at WIPP

YM의 경우 rock bolt를 기본 지보 방법으로 하고 교차로나 손상이 심한 터널에서는 wiremesh, fibercrete를 설치하는 것으로 하고 있다. YM에서는 grout bolt를 사용하지 않고 swellex bolt를 사용하고 있는데 현재까지 굴착된 약 70%의 터널을 지보하기 위해 20,000개 이상의 swellex bolt가 사용되었고 향후 20년간 100만 개 이상의 swellex bolt가 사용될 것으로 보고 있다.

처분공 주위에 존재하는 불연속면을 통한 지하수의 유입을 막기 위해 굴착이 시작되기 전에 그라우팅을 하여야 하며 파쇄대 지역에서는 그라우팅을 통해 터널의 안정성을 확보해야 한다. 스웨덴의 Stripa에서는 균열대를 그라우팅으로 밀봉하는 방법에 한 연구가 있었다 (Pusch et al., 1992). 그라우팅은 고비용의 많은 시간을 요하는 작업으로서 성공적인 결과를 얻기 위해서는 주의가 필요하다. 특히 적합한 그라우팅압으로 주입하는 것이 중요하며 안전한 그라우팅 압력은 현장에서 결정되어야 한다. 주입방법에 따라 stage grouting, series grouting, circuit grouting, packer grouting 등으로 나눌 수 있다 (Bickel and Kuesel, 1982). 한국지질의 경우 다른 나라에 비해 파쇄대가 많이 존재하는 것으로 알려져 있으므로 그라우팅 기법에 대한 연구가 앞으로 많이 필요하리라 본다.

4.4.2. 현장측정

현장에서 측정되는 응력, 변위자료는 공동의 거동을 파악하고 예측하는데 가장 정확하고도 중요한 자료라 할 수 있다. 또한 이들 현장측정자료에는 공동의 거동에 영향을 미치는 각종 요소들 - 현장응력, 공동의 형태, 암석의 성질, 현장상태, 온도 등 - 의 영향이 반영되어있기 때문에 적절한 해석을 수행할 경우 이들 요소들이 공동의 거동에 미치는 영향을 정확하게 평가할 수도 있다. 정확한 관찰을 위해서는 공동이 굴착된 직후부터 공동의 붕락이 발생할 때까지 각종 현장 측정기기들을 이용하여 공동의 거동을 기록되어야 한다. 공동변위의 경우 암반 내부의 변위를 보여주는 extensometer, 공동의 내공변위를 측정하는 closure points 그리고 공동주의 암반의 수평변위를 보여주는 inclinometer를 사용하여 자세히 기록될 수 있다. 이들을 통해 공동의 시간에 따른 변형 및 파괴거동을 이해하고 공동의 붕락을 어느 정도 예측할 수 있다. 또한 이들을 적절히 사용함으로써 공동의 시간에 따른 실제 거동의 변화를 정확하게 표현할 수 있다 (Kwon and Miller, 1995).

공동의 굴착에 따라 기존의 평형상태에 있던 응력이 재분포되는데, 이러한 응력의 재분포에 의한 응력집중에 의

해 공동의 안정성이 손상되는 것을 파악하기 위해 rockbolt load cell, pressure cells, stress meters 등이 이용될 수 있다. 현장에서 측정되는 응력자료의 해석은 여러 가지 이유로 난해한 작업으로서 주의를 요한다 (Munson et al., 1987).

4.4.3. 공동의 안정성 평가

공동 굴착 후 측정되는 현장자료와 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 지하 방사성 폐기물 처분시설 설계의 적합성을 검토할 수 있다. 현장에서 측정되는 자료를 체계적으로 해석할 경우 공동의 거동에 영향을 미치는 여러 가지 요소들 예를 들면 공동의 형태, 온도, 현장상태, 응력, 채굴법, 지보, 지질, 시간경과 등의 영향을 정량적으로 평가할 수 있다. 이를 통해 공동주위 암반에서의 파괴양상과 시간에 따른 변형거동을 파악할 수도 있게 된다. 하지만 현장에서 측정하기 어려운 응력의 변화나 공동에서 멀리 위치한 암반의 변형거동을 이해하기 위해서는 컴퓨터 시뮬레이션을 이용해야 한다. 이와 같이 컴퓨터 시뮬레이션과 현장측정 자료를 이용함으로써 공동이 설치된 암반의 전체적인 거동 메커니즘을 이해할 수 있게 된다. 특히 컴퓨터 시뮬레이션의 결과와 현장측정 자료를 비교함으로써 현지 암반의 물성에 대한 보다 정확한 이해가 가능하며 컴퓨터 시뮬레이션의 정확도를 향상시킬 수 있다. 이러한 과정을 역해석 (Back Analysis) 이라고 한다. 즉 일반적으로 컴퓨터 시뮬레이션의 목적은 응력과 암반의 물성을 입력하여 공동의 변위를 예측하는 것이지만 역해석에서는 현장에서 측정된 변위자료를 입력자료로 하여 현지응력이나 암반의 물성을 역으로 계산해내게 된다.

공동굴착의 영향으로 발생하는 공동주위 암반의 균열은 공동의 안정성 평가에 큰 영향을 미친다. 이들 균열에 의해 암반의 물성이 변화된 영역을 EDZ (Excavation Disturbed Zone) 라고 한다. 이 EDZ의 크기와 암반물성의 변화를 결정하는 것은 공동의 안정성 평가에 중요한 역할을 한다. 따라서 EDZ의 발생과 규모에 영향을 미치는 각종 요소들에 대한 연구가 수행되어야 한다. 공동주위에서 발생하는 균열을 조사하는 방법으로 사용되고 있는 것은 다음과 같다.

(a) Ground Probing Radar (GPR) - 균열면에서 반사되는 전자기 신호를 분석하여 균열면의 존재를 찾아낼 수 있다. 전자기 신호의 주파수에 따라 조사되는 암반의 깊이가 결정된다. 즉 고주파신호를 사용할 경우 해상도는 증가하나 신호가 침투하는 깊이는 감소한다 (Cook and Roggenthen, 1991).

(b) 시추공 관찰 - 공동 주위에 시추공을 뚫어 균열면을 직접 파악한다. WIPP에서는 150개 이상의 시추공을 뚫어 시추공 카메라 등을 사용하여 균열면의 시간에 따른 발생을 1년 주기로 조사하고 있다 (U.S.DOE, 1992).

(c) 전기저항도 조사 - 시간경과에 따른 암석의 전기저항도를 측정한다. 공동주위에 균열이 발생함에 따라 암반의 전기저항도는 증가한다.

(d) 투수계수측정 - 균열면의 발생에 따라 공동주위 암반의 투수도에 변화가 생기게 되는데 이러한 투수도의 변화를 측정함으로써 균열면의 발생을 간접적으로 파악할 수 있다 (Stormont and Daemen, 1992).

4.4.4. 공동의 거동 예측

컴퓨터 시뮬레이션이 공동의 거동을 예측하는 방법으로 주로 이용되고 있다. 컴퓨터 시뮬레이션을 이용할 경우 암석의 물성을 비롯한 여러 가지 가정들 때문에 정확한 예측에 어려움이 따른다. 이러한 문제는 현장에서 측정된 변위자료를 이용하여 역해석을 실시함으로써 어느 정도 보완이 가능해진다. 즉 역해석을 통해 얻어진 암반의 물성과 현지응력을 컴퓨터 시뮬레이션에 입력함으로써 보다 정확한 예측이 가능해진다. 인공신경망 (Neural Network) 을 사용하여 현장에서 측정된 다양한 자료들을 합리적으로 처리함으로써 공동의 거동을 예측하는 기법을 개발하는 것도 필요하다. 또한 현장에서 측정되는 변위자료를 이용하여 공동의 붕락을 비교적 정확하게 예측할 수 있다.

4.5 방사성 폐기물 처분 후 관리

스웨덴과 캐나다의 기본처분개념의 경우 방사성 폐기물을 지하공동에 처분한 후 폐기물의 주위는 압축 벤토나이트를 채우게 된다. 이 압축 벤토나이트는 지하수의 유입이 있을 경우 팽창하고 투수도는 낮아지게 되며 따라서 지하수가 폐기물에 접촉하는 것을 방지하는 역할을 한다. 처분공에서의 작업이 끝나면 처분터널, 접근터널 그리고 수직터널을 되메움하게 된다. 이러한 되메움의 목적은 다음과 같다 (Chapman and McKinley, 1987).

- 지하수가 폐기물로 접근하는 것을 최소화 한다.
 - 지하수의 화학성분을 변화시킨다.
 - 방사성 핵종의 이동을 지연시킨다.
 - 방사능 물질에 의해 발생하는 열의 전달체로서의 역할을 한다.
 - 현지응력의 집중을 방지한다.
- 균열이 많은 결정질 암반에 설치되는 처분시설의 경우

팽창성이 있는 벤토나이트와 파쇄암을 혼합하여 되메움을 실시하는 것이 일반적이다. 현무암 암반에 고준위 방사성 폐기물을 처분하는 경우 현무암 분말이, 그리고 암염에 설치되는 처분시설에서는 암염 분말이 가장 적합한 되메움 물질로 고려되고 있다. Yucca Mountain 과 같이 매우 건조한 지역에 방사성 폐기물 처분시설을 건설하는 경우에는 폐기물 처분 후 회수기간 (폐기물 거치 후 약 50 - 100년간) 동안에는 되메움 없이 빈공간을 남겨두는 방법이 선호되기도 한다.

되메움 작업 후 각 터널과 수직터널은 콘크리트 등으로 밀봉하게 되는데 장기적으로 열적, 구조적, 화학적으로 안전한 방법을 선택하여야 한다. 캐나다의 경우 밀봉재는 250,000년간 밀봉기능을 유지하여야 한다고 규정하고 있다.

방사성 폐기물을 처분한 이후 방사능 물질의 이동을 계속적으로 측정하여야 하며 어떤 이유로 방사성 폐기물의 처분 후 수년 혹은 수 십년 내에 방사성 폐기물 처분시설에 심각한 문제가 발생한 경우를 대비하여 방사성 폐기물을 안전하게 그리고 완전히 회수하는 방법에 대한 연구도 진행되어야 한다 (Krauskopf, 1988).

5. 결 론

본 연구에서는 지하심부 암반에 고준위 방사성 폐기물 처분장 건설을 고려하고 있는 세계 각국의 연구현황에 대한 조사와 함께 심지층 암반에 처분장을 안전하게 건설하기 위한 암석역학의 응용 대하여 서술하였으며 이를 통한 결론은 다음과 같다.

1. 현재 고려중인 지하 처분장은 처분용기, 완충재, 되메움재로 핵종의 이동을 차단하고 최종적으로 암반을 이용하여 방사성물질을 장기간 격리시키는 다중방벽개념이라 할 수 있다. 따라서 주요 방벽으로서 역할을 하는 암반의 물성은 처분장의 안전성에 절대적인 영향을 미치기 때문에 각종 암반의 물성을 현장시험과 실험실 시험을 통해 정확히 파악하고 이를 고려하여 부지선정, 지하처분장의 설계를 하여야 한다.

2. 방사성 폐기물 처분장의 경우 공동 굴착 후 적어도 40 - 50년 간의 운영기간 또는 회수운영 고려 시 100 - 150년의 운영 및 감시 기간 동안 역학적으로 안정된 상태를 유지하여야 하므로 방사성 폐기물을 안전하게 처분하기 위해서는 장기적인 관점에서 공동의 거동을 예측할 수 있는 기법에 대한 연구가 필요하다.

3. 방사성 폐기물 처분장의 부지선정, 처분장 건설 및 유지를 위해서는 처분장이 위치하는 암반의 물성과 암석역학의 여러 가지 원리들의 이용하여 공동주위 암반의 파괴, 변형거동을 이해하고 예측할 수 있어야 한다.

4. 방사성 폐기물 처분시설은 지하 심부에 위치하기 때문에 지하심부의 암반물성을 고려한 설계가 필요하다. 심부암반에서의 높은 응력으로 인해 지하공동은 시간 의존적인 파괴 및 변형 거동을 보이게 되는데, 이러한 지하공동의 거동을 정확히 파악하기 위해서는 현장에서 측정되는 자료를 체계적으로 분석하여야 한다. 현장에서 측정되는 자료는 공동의 파괴, 변형거동을 직접적으로 보여주는 것이기 때문에 공동의 안정성 평가에 가장 중요한 자료로 사용되어야 한다. 이들 자료의 보다 합리적인 사용을 위해 필요한 경우 적절한 자료 해석의 방법들이 개발되어야 한다.

5. 향후 지하 심부 암반에 설치되는 공동의 굴착 시, 손상대를 줄일 수 있는 경제적인 방법, 굴착후의 지보, 지수를 위한 효과적인 방법에 대한 연구가 필요하며 불연속면과 공동 주위의 손상대가 공동의 장기적 거동에 미치는 영향에 대한 연구가 수행되어야 한다. 또한 처분용기 주변의 완충재, 되메움재, 방사성 폐기물에서 발생하는 열에 의한 암반의 물성변화에 대하여 다양한 조건하에서 연구되어야 한다. 또한 암반의 물성변화가 지하수의 유동, 공동의 구조적 안정성에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- Attewell, P.B., 1993, The role of engineering geology in the design of surface and underground structures, *Compressive Rock Engineering*, 1, 111-154.
- Autio, J., et al, 1996, Assessment of alternative disposal concepts, POSIVA report, POSIVA-96-12.
- Bickel, J.O. and Kuesel, T.R., 1982, *Tunnel engineering handbook*, Von Nostrand Reinhold Co. Inc., New York.
- Blejwas, T.E., 1987, Planning a program in experimental rock mechanics for the Nevada nuclear waste storage investigations project, 28th US Symp. on rock mechanics, Tucson, AZ, 1043-1051.
- Chapman, N.A. and McKinley, I.G., 1987, *The geological disposal of NW*, John Wiley & Sons, NY.
- Cook, R.F. and Roggenthen, W.M., 1991, Fracturing around excavations in salt at the WIPP, Proc. of the 32th U.S. Symp., Univ. of Oklahoma, 889-898.
- Dowding C.H. and Rozen, A., 1978, Damage to rock tunnels from earthquake shaking, *J. of Geotech. Eng. Div., ASCE*, 104, 175-191.
- Hardy, M.P. and Bauer, S.J., 1993, Radioactive waste repository design, *Comprehensive Rock Engineering*, Ch. 19, 465-499.
- Herbert, A. and Spawski, B.A., 1980, A prediction of flows to be measured in the Stripa D-Hole experiment: An application of the fracture network approach, AEA D&R 0024, AEA Technology.
- Johansson, E. et al., 1993, Rock mass behavior around a nuclear waste repository in hard crystalline rock - Overview based on numerical modelling, Work Report, TEKA-93-02.
- Johansson, E., Polla, J., and Holopainen, P., 1996, Predicted and observed behaviour of weakness zones in a hard, jointed rock mass, *EUROCK'96*, 271-276.
- Kwon, S., 1996, An Investigation of the deformation of underground excavations in salt and potash mines, Ph.D. thesis, University of Missouri-Rolla.
- Kwon, S. and Miller, H., 1995, A new technique for describing the deformation behavior of the rock mass around an underground opening in salt. Proc. of the 35th U.S. Symp. Rock Mechanics, University of Nevada, Reno, 425-430.
- Krauskopf, K.B., 1988, *Radioactive waste disposal and geology*, Chapman and Hall, NY.
- Munson, D.E., et al., 1990, Overtest for simulated defense high-level waste (Room B) : In situ data report, SAND 89-2671, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico.
- Munson, D.E., et al., 1987, Heated axisymmetric pillar test (Room H): in situ data report, SAND 870-2488, Sandia National Laboratory, Albuquerque, New Mexico.
- Pusch, R. et al., 1992, Sealing project executive summary and general conclusions of the rock sealing project, Stripa PR 92-27, SKB.
- Roxburgh, I.S., 1987, *Geology of high-level nuclear waste disposal - An introduction*, Chapman and Hall, New York.
- Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 1992, Treatment and final disposal of nuclear waste, SKB RD&D Programme 92.
- Stormont, J.C. and Daemen, J.J.K., 1992, Laboratory study of gas permeability changes in rock salt during deformation, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 29, 325-342.
- Sumerling, T.J. and Thompson, B.G.J., 1987, Information requirements for the probabilistic risk assessment of underground disposal of low level wastes, Waste Management'87, Proc. of the Symp. on Waste Management, 1, Tucson, AZ, 505-511.
- Tang, Y.S. and Saling, J.H., 1990, *Radioactive waste management*, Hemisphere publishing co., New York.
- U.S.DOE, 1992, Geotechnical field data and analysis report, DOE/WIPP 92-010.

권 상 기



1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
1989년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학석사
1996년 미국 Missouri-Rolla 대학교 Mining Engineering, 공학박사

Tel : 042-868-2632

E-mail : swonsk@nanum.kaeri.re.kr

현 재 한국원자력연구소 고준위 폐기물 처분기술개발팀, Post-Dr.

박 병 윤



1982년 서울대학교 공과대학 원자핵공학과, 공학사
1985년 서울대학교 공과대학 토목공학과, 공학석사
2000년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학박사 예정

Tel : 042-868-8376

E-mail : bypark@nanum.kaeri.re.kr

현 재 한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구팀

최 종 원



1984년 한양대 원자력공학과, 공학사
1992년 한양대학 공과대학 원자력공학과, 공학박사

Tel : 042-868-2041

E-mail : njwchoi@kaeri.re.kr

현 재 한국원자력연구소 방사성폐기물 처분 연구팀 책임연구원

강 철 형



1977년 서울대학교 공과대학 원자핵공학과, 공학사
1984년 미국 Washington 대학교 대학원 원자핵공학과, 공학석사
1989년 미국 Berkeley 대학교 대학원 원자핵공학과, 공학박사

Tel : 042-868-8914

E-mail : chkang@kaeri.re.kr

현 재 한국원자력연구소 고준위 폐기물 처분기술개발팀, 실장