처분개념 실증을 위한 지하 연구시설의 개념 설계

권상기, 박정화, 조원진
한국원자력연구소

1. 서론

현재 국내에는 4기의 중수로(CANDU) 와 14기의 경수로(PWR)가 운영중에 있으며 이를 통해 국내 총전력 생산량의 39% 정도가 생산되고 있다. 원자로 가동에 따라 사용후핵연료가 발생되고 있으며 2020년이면 19,000톤이 될 것으로 예상된다. 1997년 이후 한국원자력연구소에서는 고준위폐기물 처분장 개념 설계를 위한 연구를 수행하고 있으며 이를 통해 2002년 기준처분개념을 제시하였으며 이후 한국형 처분개념의 도출을 위한 연구가 수행되고 있다. 현재 고려되고 있는 고준위폐기물 처분개념에 따르면 처분장은 지하 500m의 결정질 암반에 위치하며 ramp 또는 수직터널을 통해 지상시설과 연결된다. 접근터널 및 처분터널은 발파기법을 통해 굴착되며 처분용기가 거치되는 직경 약 2m, 8m 길이의 수직처분공은 보아링 기계를 사용해서 천공된다. 방사능핵종이 생태계로 유출되는 것을 차단하기 위해 인공방벽과 자연방벽으로 구성되는 다중방벽 개념의 처분개념이 적용되며 주요한 인공 방벽으로는 처분용기, 완충재, 뒷채움재를 들 수 있다. 기술적, 경제적, 안전성 측면에서 국내 환경에 적합한 처분개념의 도출을 위해서는 처분장 모암으로 고려되는 암반과 유사한 암반에 처분연구시설을 건설하고 처분개념의 실증과 관련된 각종 현장실험을 실시하여야 한다. 고준위폐기물의 처분을 고려하고 있는 세계 각국에서는 자체 지하연구시설(URL, Underground Research Lab.) 을 건설하고 다양한 현장 실험을 실시하고 있다. 지하 암반의 거동과 암반에서의 핵종 이동, 지하수의 유동에 대한 연구를 위해서는 지하연구시설의 건설이 필수적이며 이 때문에 방사성폐기물 처분을 고려하는 세계 각국에서는 표 1에서와 같은 다양한 규모의 지하연구시설을 건설하고 각종 현장 실험을 실시하고 있다. 세계의 주요 처분연구시설의 현황은 권상기(2002)에 의해 정리된 바 있다. 실험실 연구단계에서 부터 최종 처분부지에 지하연구시설을 건설하는 단계까지는 그림 1에서 보는 것과 같이 각국의 현실에 적합한 접근법이 선택되고 있다. 한국의 경우 대규모 연구용 URL 을 추진하는데 따르는 부지선정과 비용 문제 때문에 소규모의 지하연구시설을 건설하여 경험과 기술을 축적한 후 처분부지 URL 을 추진하는 것을 기본 방향으로 고려하고 있다. 본 연구에서는 소규모 지하연구시설을 원자력연구소 부지 내에 건설하는 방안에 대해 부지조사, 3차원 구조안정성 해석을 통해 적합한 개념 설계를 수행하고자 하였다.

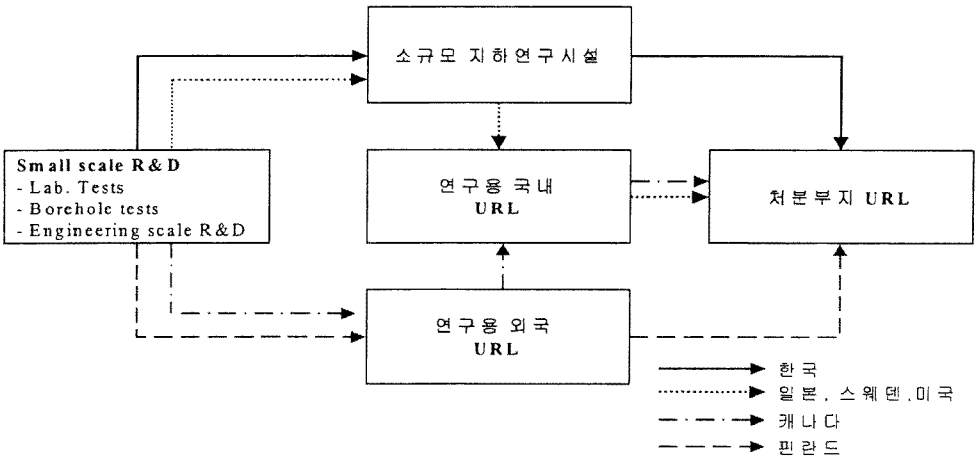


그림 1. 세계 각국의 고준위폐기물 처분연구 주요 추진 경로

표 1. 외국의 고준위폐기물 처분을 위한 지하시험시설 현황

Country	URL (Operation period)	Host Rock	Depth(m)	Tunnel type
Canada	Whiteshell URL (1984~)	Granite	240~420	Shaft
Japan	Kamaishi (1988~1998)	Granite	260	Tunnel
	Tono (1986~)	Sed. Rock	200	Shaft
	Mizunami URL	Granite		Under Construction
	Honorobe URL	Sed. Rock		Under Construction
Swiss	Grimsel Test Site (1983 ~)	Granite	450	Tunnel
	Mt. Terri (1995~)	Hard Clay	400	Tunnel
Sweden	Stripa (1980~1992)	Granite	360~410	Tunnel
	Aspo Hard Rock Lab.(1995~)	Granite	200~450	Shaft
Belgium	Hades URF (1984~)	Boom Clay	230	Shaft
Finland	Olkiluoto Tunnel (1992~)	Granite	50~100	Tunnel
France	Bure URL	Hard Clay		Under Construction
USA	Busted Butte (1998~)	Bedded Tuff	70	Tunnel
	Yucca Mountain	Tuff	300	Tunnel

2.부지조사

2.1지표지질조사

지하에 지질구조나 기반암의 분포 상태 등 본 지역을 구성하고 있는 지반의 암석학적 및 공학적 특성을 파악하기 위해 지표상에 드러난 지형/지질상의 특징을 관찰, 분석하기 위해 원자력연구소 주변 부지지형도와 한국지질도 유성 도폭을 참고하였다. 조사지역에서의 상세 지표지질 조사를 위해서 현장답사를 통해 노두관찰과 지형 특성 분석 등을 실시하였다. 하지만 풍화토층 구간이 두껍게 발달하고 있어서 조사선 방법(Scanline survey)으로 관찰할

수 있는 노두는 없었으며, 부분적인 소규모 노두만 확인하였다. 조사 지역의 지질은 복운모 화강암과 이를 관입한 산성,염기성 암맥 그리고 제4기 풍화잔류토층으로 구성되어 있으며 복운모화강암은 지역적으로 흑운모 화강암이나 편상화강암 등과 접촉하고 있다.

2.2 굴절법탄성파탐사

가. 측정 방법

처분지하연구시설 부지에 분포하는 지질구조대의 예상위치와 규모를 파악함은 물론 전반적인 지층분포 상태를 조사하여 설계에 반영함으로써 보다 안정적이고 경제적인 설계 및 시공이 이루어질 수 있도록 하기 위해 굴절법 탄성파 탐사가 실시되었다. 원자력연구소내에서의 작업이기 때문에 발파진동과 소음을 줄이기 위해 진동원으로 SISSY를 사용했으며 14HZ와 28 HZ 의 지오폰을 사용한 48채널 Seismograph McSEIS를 이용하여 측정을 실시하였다. 본 탐사시 수진 간격은 5m로 설정하고, 발진은 종측선의 경우는 7회, 횡측선의 경우에는 5회 발파를 기본으로 수행하였으며, 탐사측선은 그림 2에 S-1,S-2,...,S-7 로 표시되어 있다. 처분지하연구시설 부지의 전반적인 지층분포 현황 및 지질구조대를 파악하고 탄성파속도에 의한 지반의 공학적 특성 분류를 목적으로 진입터널을 횡단하는 방향으로 4개 측선을 100m 간격으로 배열하고, 3개의 종측선을 진입터널 및 터널 좌우에 50m 간격으로 배열하여 격자상이 되도록 측선을 설정하하였다. 탄성파탐사 측선의 길이는 터널 진행방향으로 놓이는 측선의 경우 350-450m, 터널에 직각인 측선의 길이는 120m이며 7개 측선의 총 연장은 1.6km이다.

나. 측정 결과

7개 측선에 대한 탄성파 탐사가 일주일에 걸쳐 수행되었다. 그림3은 터널 진행 방향과 유사하게 놓이는 S-2 측선을 따른 주시곡선도 및 탐사결과도를 보여주고 있다. S-2 측선의 경우 상부 토사 및 풍화대에 해당하는 탄성파속도 1,200m/sec 이하의 지층은 측점 80~230m 구간을 제외하면 평균 15.0m 내외의 두께로 비교적 깊게 분포하고 있으며, 측점 80~230m 구간은 평균 5.0m 내외의 두께로 분포하는 것으로 나타난다. 측점 250m 및 360m 지점에서 나타나는 저속도 이상대는 파쇄대로 여겨진다. 측점 30m 지점에서 나타나는 저속도 이상대가 관찰되는데, 이는 전기비저항탐사 결과 분석된 연구모듈과 평행한 방향의 파쇄대로 분석된다. 측선을 따라서 모두 3개의 저속도 이상대가 나타나고 있다.

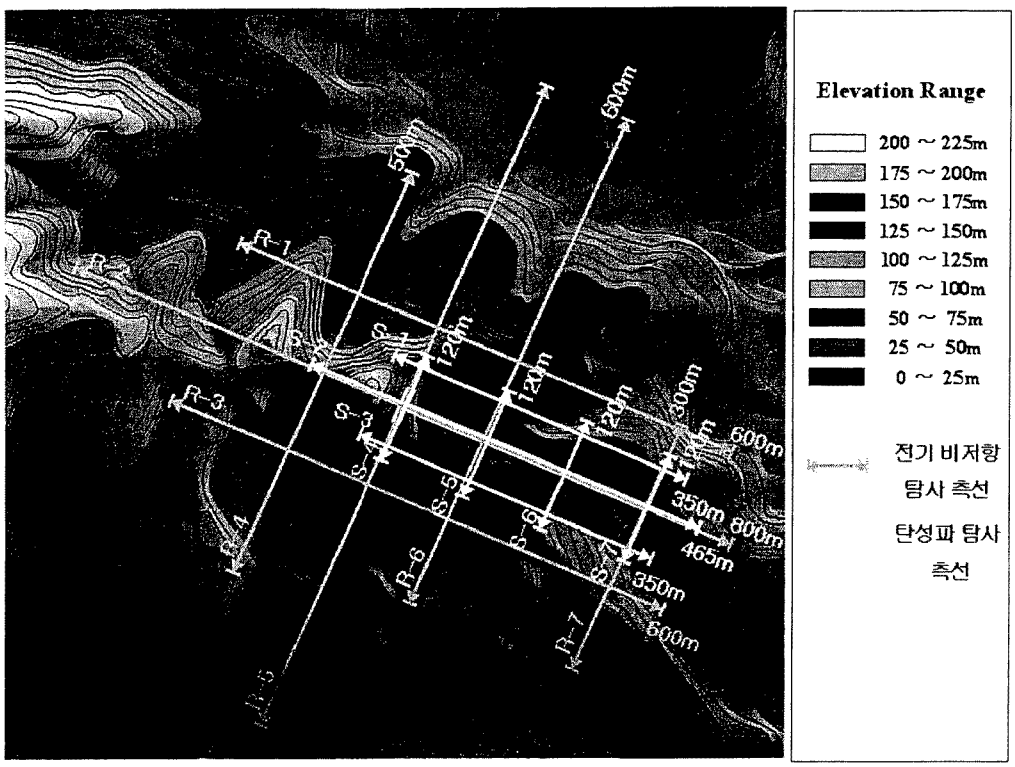


그림 2. 굴절법 탄성파 탐사 및 전기비저항 탐사 측선

2.3전기비저항탐사

가. 측정 방법

부지내에 분포할 것으로 예상되는 파쇄대 및 터널굴착 대상구간의 상대적인 암질평가를 위해 전기비저항탐사가 실시되었다. 전기비저항 탐사에서는 신호 대 잡음비와 분해능이 어느 정도 우수하고 측정자료의 수가 확보되며 단층/파쇄대 등의 수직구조 규명에 가장 적합한 단극 쌍극자(pole-dipole) 배열을 적용하였다. 본 탐사시 전극 간격은 탐사심도에 따라 10~140m로 설정하고, 원거리 전극(remote electrode)은 최대 전극 간격의 10배 이상에 위치한 지점에 설치하여 탐사를 수행하였다. 처분지하연구시설 부지 내에 분포할 것으로 예상되는 파쇄대를 파악하고 터널 굴착 대상구간의 암질평가를 목적으로 진입터널을 횡단하는 방향으로 4개 측선을 100~200m 간격으로 배열하고, 3개의 종측선을 진입터널 및 터널 좌우에 100m 간격으로 각각 배열하여 격자상이 되도록 측선을 설정한 후 상세한 탐사를 시행하였다. 전기 비저항 측선은 그림 2에 R-1,..,R-7로 표시되어 있으며 총측선길이는 4.2km이다.

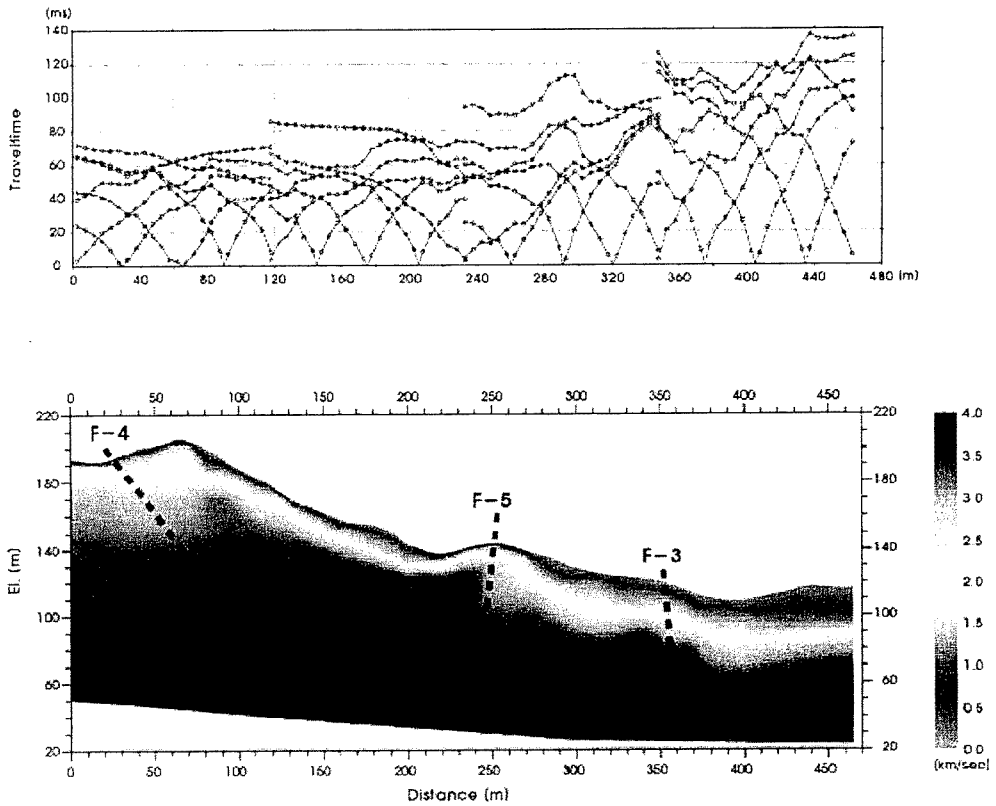


그림 3. S-2 주시곡선도 및 탐사결과도

나. 전기비저항 탐사결과

터널 진행방향과 나란하게 놓이는 R-2 측선을 따른 탐사결과는 그림 4와 같다. 터널의 상부에 놓이는 R-2 측선을 따른 탐사결과를 보면 측선 시점의 저비저항 하부에 고비저항이 분포하는 2층구조와 측점 550~600m 지점의 저비저항 분포를 제외하면 전반적으로 저→고→저→고비저항의 4층구조를 보여준다. 측선 중앙의 4층구조는 측점 170m 지점의 지표상에서 측점 400m 지점의 탐사심도 하부까지 분포하는 저비저항 이상대로 인해 상부의 기반암과 하부의 기반암이 분리된 형태로 추정된다. 파쇄대로 추정되는 지점은 측점 270~290m 및 측점 470~530m 지점으로 측점 470~530m 지점은 파쇄대로 추정되는 저비저항대가 지하 100m 내외의 심도까지 분포하는데, 단면의 분포범위 및 양상으로 볼 때 2조의 파쇄대가 측선을 사교하는 것으로 판단된다. 또한, 측점 630~670m 지점에서도 단면 하부에 파쇄대로 추정되는 저비저항대가 관찰되며, 측점 170m 지점의 지표에서 측점 400m 지점의 하부까지 분포하는 저비저항대도 파쇄대로 추정된다. 측점 570~580m 지점에서 나타나는 저비저항대는 측선을 직교하여 있는 철재 울타리의 영향으로 보인다. R-1과 R-3 측선의 경우에서도 R-2와 유사한 경향을 보여준다.

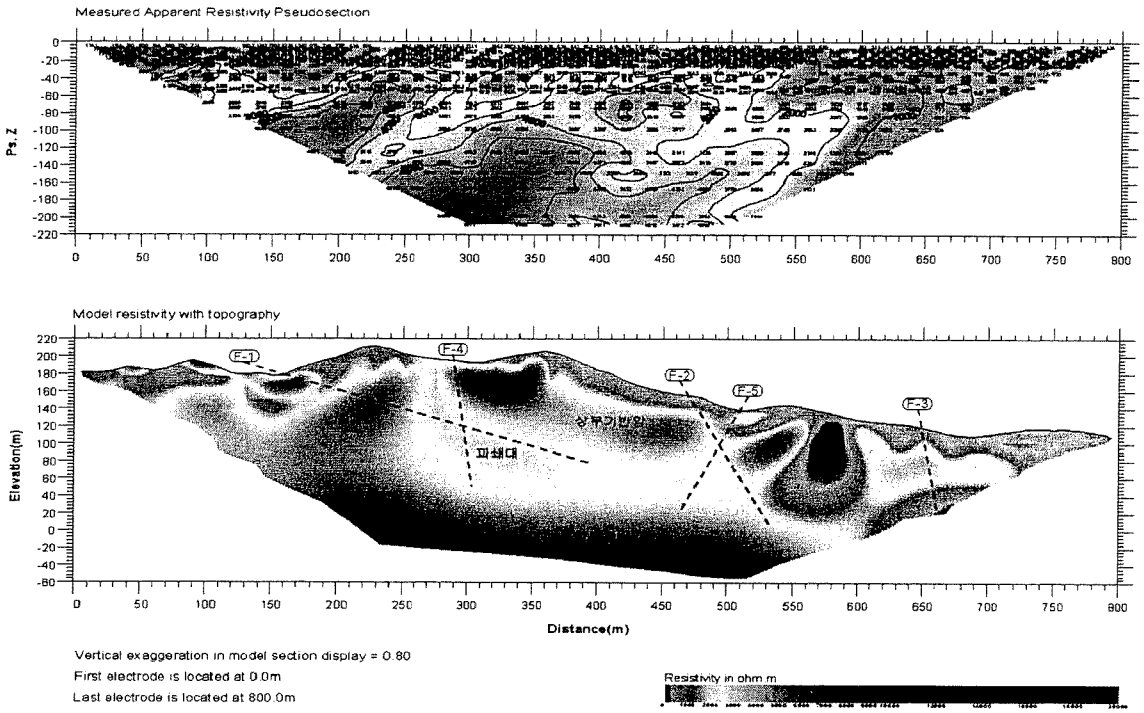


그림 4. R-2 측선을 따른 겉보기 비저항 단면도 및 탐사결과도

2.4 시추조사

부지의 지반공학적 특성, 기반암의 분포상태 및 풍화도 등 파악하고, 시료의 채취 및 각종 원위치 공내시험을 실시하여 설계에 필요한 지반자료를 파악하기 위하여 수직시추와 경사시추가 실시되었다. 수직시추는 터널의 입구부에서 60m 깊이로 실시되었으며 경사시추는 터널의 예상 경사인 하향 10%(5.7°)로 터널의 진행방향과 동일하게 실시하였다. 두 경우 모두 유압회전식 시추가 실시되었으며 기반암에서는 다이아몬드 코어 비트를 사용하여 천공작업이 수행되었다. 더블 코아배럴을 사용하여 암석 코어 회수율을 높이도록 하였으며 토층의 경우 표준관입시험으로 시료를 채취하였다. 토사층이나 파쇄대 지층, 또는 공동 구간 등이 붕괴되는 것을 방지하기 위한 시추공 입구부에 케이싱을 설치하였다.

가. 수직공 조사결과

수직공 시추결과 상부로부터 2m까지 풍화토, 4.2m까지 풍화암, 10.3m까지 연암, 19.8m까지 보통암, 그 하부로 경암이 존재하는 것으로 나타났다. 상부 일부구간 (4.0m~4.2m, 4.8m~6.3m)에서만 안산암질 암맥이 관찰되며, 전체적으로 흑운모 화강암과 판상 화강암이 호층을 이루며 나타나며, 일부구간에 페그마타이트가 관찰된다. 17.2m~17.6m, 19.5m~19.8m, 34.0m~34.3m 구간에서 파쇄대가 관찰된다. 캐이싱은 4.2m까지 설치하였으며, 시멘트 그라우팅은 13.1m까지 실시하였다.

나. 경사공 조사결과

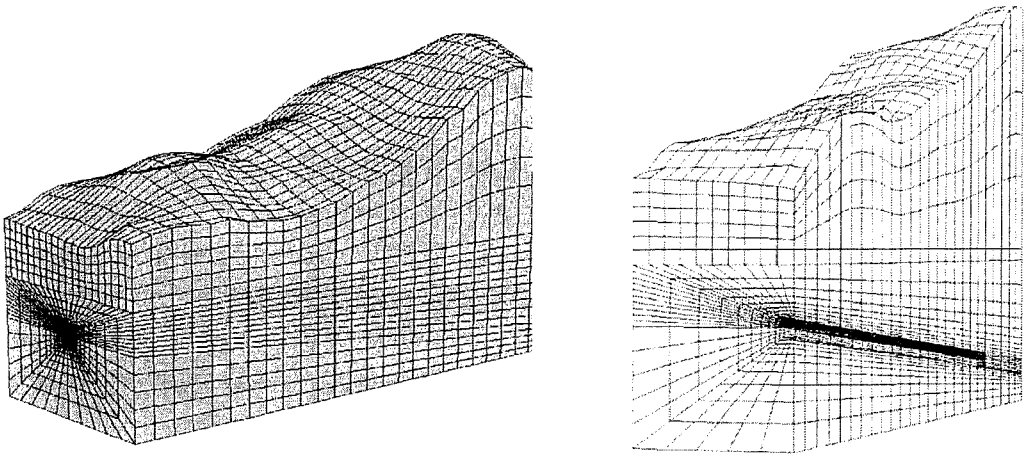
터널 진행 방향을 따른 10% 경사시추 결과 시추공 입구에서 4m 까지 풍화토, 14m 까지 풍화암, 28m 까지 연암이 나오며 이후 경암이 나타났다. 입구에서 28m, 47m, 118m, 124m, 235m 의 5구간에서 폭 1~3m의 안산암질 암맥 11개가 관찰되고 있으며 전체적으로 흑운모 화강암과 판상화강암이 호층을 이루고 있다. 관찰 가능한 페그마타이트는 10여 군데에서 발견되었다. 단층점토와 단층각력이 나타나는 구간은 70m 지점에서 0.8m 그리고 75m 지점에서 2m 폭으로 나타난다. 시추공을 따른 암반의 상태는 입구에서 90m까지 절리가 많다가 90~110m 까지는 양호한 암반을 만나며 110~125m 구간에서 절리가 많아지고 이후 180m까지 양질의 경암 구간이 나타난다. 180-190m에서 파쇄가 많으며 이후 252m까지는 양호한 암반을 구성하고 있는 것으로 나타난다. 시추 작업중 50m와 80m 구간에서 지하수의 유입이 많았으며 이는 그 구간에 위치하는 파쇄대의 영향으로 보인다.

2.5 구조안정성해석

연구소부지내의 예상 부지에 소규모의 연구용 터널이 위치하는 경우, 터널의 구조 안정성을 평가하기 위해 3차원 코드인 FLAC3D를 이용한 역학적 해석을 수행하였다. 모델링에 사용된 암반의 물성은 기존의 인접 시추공에서 회수된 암석코아를 이용한 물성시험과 시추공에서의 불연속면에 대한 조사를 통해 얻어진 값으로 주요 물성을 표2에 정리하였다. 무결함 암석의 물성과 불연속면의 물성을 사용하여 유효 bulk modulus, 유효 shear modulus 를 이용하여 불연속면의 영향을 간접적으로 반영하였다(Fossum,1985)). 표 2의 값을 이용하면 암반의 bulk modulus, shear modulus는 20.8GPa, 10.84GPa 로 각각 계산된다.

가. 초기조건과 경계조건

처분연구용지하시설의 개념에 대한 역학적 안정성을 평가하기 위해 그림 5(a)와 같은 모델 메쉬를 작성하였다. 터널의 위치가 지표면에서 가까운 곳에 위치하며 터널을 따른 지형의 변화가 심하기 때문에 이의 영향을 고려하기 위해 실제 지형의 변화를 모델 메쉬 작성에 반영하였다. 또한 터널의 경사가 10%인 경우로 수평터널인 경우와 차이를 보일 것으로 판단하여 모델 메쉬의 작성시 터널에 경사를 줄 수 있도록 하였다. 터널 굴착시 터널 주변에서의 응력 및 변위 변화가 심할 것으로 예상되므로 모델 메쉬 작성시 터널 부근의 메쉬는 상대적으로 작은 크기를 갖도록 하였다. 그림 5(b) 는 터널의 위치와 경사를 보여주기 위해 모델의 절반을 잘라낸 형태를 보여주고 있다. 전체 모델의 크기는 폭 100m, 길이 250m 이며 높이는 지형에 따라서 160m~250m 까지 변하게 된다. 일반적으로 터널크기의 3~4배 정도의 모델이면 역학적 해석에 충분하다고 보고 있지만 본 연구에서 고려하는 터널의 경우 지표면의 변화가 심하기 때문에 이의 영향을 고려하기 위해 충분한 크기의 폭을 갖도록 하였다. 지표면을 제외한 모든 면에서 경계면의 수직 방향으로 발생하는 변위는 구속되도록 경계조건을 설정하였다. 전체 암반은 화강암으로 구성되며 동일한 물성을 가지는 것으로 는 가정하였다. 암반의 초기응력은 자중에 의해 발생되는 응력으로 가정하였다.



(a) full model (b) half model

그림 5. Model mesh for FLAC3D analysis

표 2. 모델링에 사용된 암반 물성

Properties	Unit	Value
Density	kg/m^3	2660
UCS	MPa	132.5
Young's modulus	GPa	46.8
Poisson's ratio		0.28
Tensile strength	MPa	9.27
Cohesion	MPa	30.4
Joint spacing	M	0.26
Joint normal stiffness	GPa/m	100
Joint shear stiffness	GPa/m	10

나. 해석결과

(1) 응력분포 : 터널이 굴착된 이후의 변화를 예측하기 위해 200m의 터널이 굴착되는 경우를 해석하였다. 터널은 단계별로 굴착이 되겠지만 해석의 단순화를 위해서 전체 터널이 동시에 굴착되는 것으로 가정하였다. 그림6은 터널 굴착 전,후의 최대주응력 분포를 보여 준다. 터널굴착전 최대주응력은 압축응력으로 약 4MPa 정도이나 터널 굴착후 최대 응력은 압축응력으로 5.3 MPa 증가하고 있다. 응력의 집중 현상은 터널의 벽면에서 두더러지게 나타나며 터널 상부와 하부의 경우 최대주응력이 굴착 전에 비해 낮아지는 응력이완 현상이 나타나고 있다. 이러한 응력이완 현상은 굴착전 최대 주응력인 수직 방향으로 작용하는 응력이 터널 굴착으로 인해 터널 상,하부에서 완화되기 때문이다. 모델링의 경우 한 메쉬 내에서는 응력이 균일하게 나타나며 만약 메쉬의 크기가 줄게 되면 응력의 최대값은 높아지고 최소값은 낮아 질 것이다. 본 모델의 경우 터널 방향으로의 메쉬 크기가 10m 이기 때문에 실제의 경우 보다 응력의 집중이나 이완현상이 완화되어 나타난 것으로 볼 수 있다. 따라서 터널벽면의 응력집중 현상과 터널 상하부에서의 응력 이완현상은 실제 측정시 모델링 결과보다 더욱 심하게 나타날 것으로 예상된다. 또한 수평응력이 수직응력보다 큰 경우 터널 주변에서의 응력값은 더욱 높아질 것으로 예상된다. 하지만 화강암의 단축압축강도는 100MPa 이상되기 때문에 터널의 굴착후 응력집중에 의해 암석이 파괴되거나 소성영역이 발생하지는 않을 것으로 판단된다.

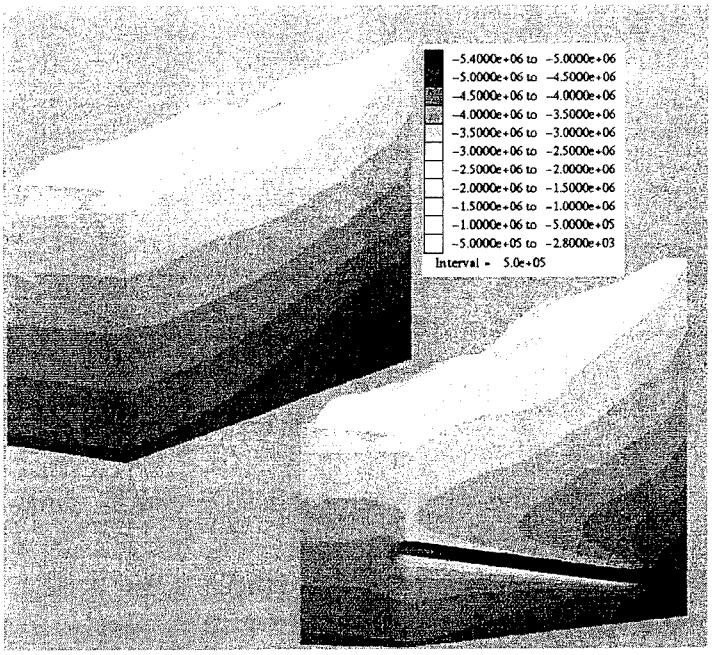


그림 6. 터널 굴착 전, 후의 최소주응력 분포

(2) 변위분포 : 터널 굴착후 터널 방향으로의 변위가 발생하게 된다. 즉 터널 상부에서는 아래쪽으로의 변위가 발생하며 터널 바닥에서는 위쪽으로 변위가 발생한다. 그림 7은 터널 굴착이후의 변위 분포를 보여주고 있다. 터널 주변에서의 변위가 크게 나타나며 터널의 깊이가 깊어짐에 따라 변위도 증가함을 볼 수 있다. 지표면의 지형의 변화와 터널의 경사 때문에 터널을 따른 변위 분포가 비대칭의 형태로 나타난다. 최대 변위는 0.58mm 로 터널 천정부에서 나타난다. 터널의 굴착의 영향으로 터널 중앙 상부 지표면에서 터널 주변에서 발생하는 변위의 약 1/10 정도의 지표면 지반 침하가 발생하고 있음을 알 수 있다.

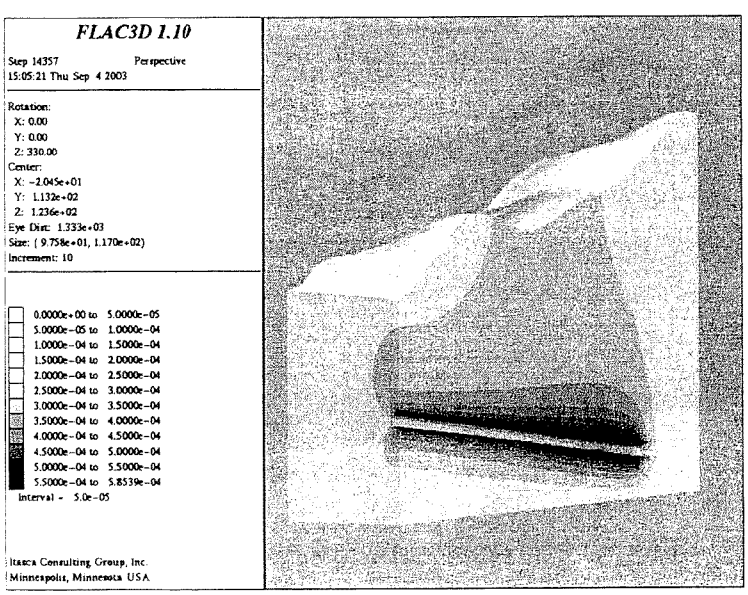


그림 7. 터널굴착 이후 예상되는 변위분포

3. 처분연구터널의 개요

원자력연구소 부지내에 지하처분연구 터널을 건설하는 경우에 대한 자료조사 및 전기비저항탐사와 탄성파탐사, 수직 및 경사 시추, 3차원 구조해석이 실시되었으며 이를 통해 진입터널과 연구모듈의 개념을 다음과 같이 도출하였다.

- o 연구모듈이 지표면에서 가장 깊은 곳에 위치할 수 있도록 약 230m 길이의 진입터널을 굴착한다 (그림 8). 터널을 발파에 의해 굴착되며 진입터널과 연구모듈의 형태는 말밥굽 형태를 갖도록 한다. 터널 단면의 크기는 6mx6m 로 기계식 천공 및 발파작업이 가능하게 함으로써 깨끗한 터널 곡면을 얻을 수 있도록 한다.
- o 연구모듈이 심부에 위치할 수 있도록 진입터널의 경사는 하향으로 하며 굴착 및 지보 작업, 운영시의 작업성 및 현지의 지형, 지질 조건 고려하여 5 ~ 10% 범위에서 조정하도록 한다. 터널로 유입되는 지하수의 배출을 위해 적합한 sump 및 펌프 설계가 필요하다.
- o 풍화대가 존재하는 진입터널의 입구부근은 라이닝 등으로 충분히 보강하고, 터널 안쪽 부분과 안전에 지장이 없는 범위에서 암반의 거동을 파악하기 위해 가급적 지보를 최소화하며 특히 연구모듈의 경우 터널 벽면과 바닥의 암반이 노출될 수 있도록 한다.
- o 진입터널 양쪽으로 길이 약 25m 로 2개의 연구모듈을 설치한다. 연구모듈의 경사는 상향 1~3%로 자연배수가 가능하도록 설계한다. 진입터널은 원활한 장비 및 작업원 진출입을 위해 바닥 콘크리트를 타설한다.
- o 연구모듈은 원칙적으로 진입터널 끝 부분에 좌우 양쪽에 하나씩 배치하되, 산 정상부 아래에 위치하도록 하여 모듈의 지하 심도가 최대가 되도록 한다(그림 8).

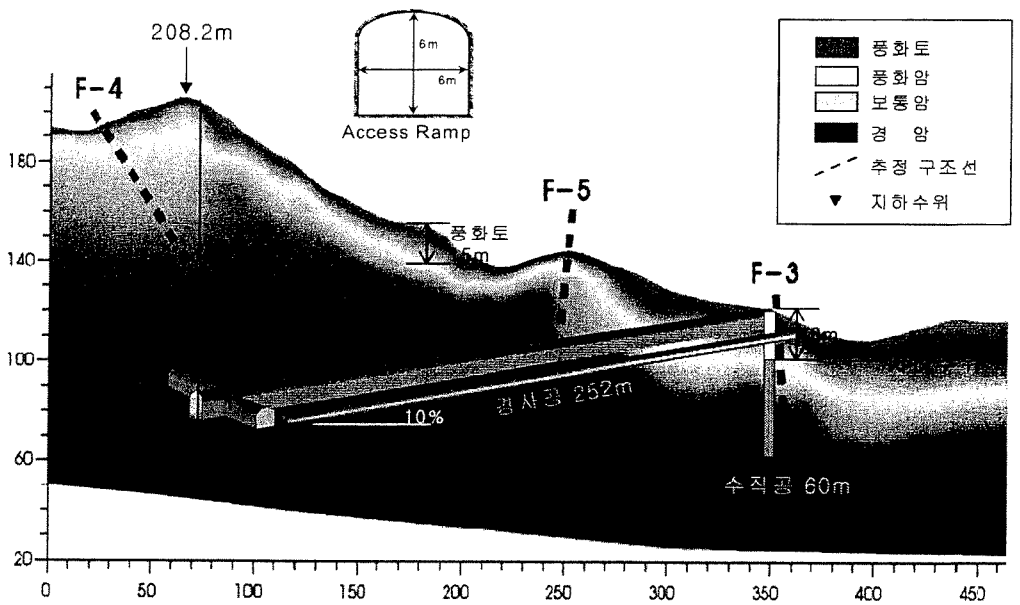


그림 8. 처분연구시설의 개요

4. 결론

고준위방사성폐기물의 처분을 위해서는 지하 연구 시설을 건설하고 암반 및 지하수의 거동을 파악함으로써 처분개념의 안전성을 평가하는 것이 필요하다. 연구 터널의 개념을 선정하기 위해서는 처분장에서의 지하구조물의 개념, 처분개념, 수행될 실험과 지질조건 등을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 원자력연구소내에 처분연구 지하시설이 건설되는 경우, 예상 부지에서의 지표지질조사, 물리탐사, 수직시추 및 경사시추 작업, 3차원 구조안정성 해석을 실시되었으며 이를 통해 지하처분연구용 진입터널 및 연구모듈의 개념을 선정할 수 있었다. 굴절파탐사 및 전기비저항 탐사를 통해 부지에서의 풍화토의 두께, 구조선의 위치 및 경사 등을 예상할 수 있었다. 물리탐사 결과 국지 단열대는 진입터널을 사교하는 NW 방향군과 NE 방향군이 존재하는 것으로 나타나며 상부 토사 및 풍화대는 터널 종축방향을 따라 평균 5~15 m 내외의 두께로, 터널 횡축방향을 따라서는 평균 8 ~13 m 내외로 지형을 따라 비교적 깊게 분포할 것으로 예상된다. 물리탐사를 통해 예측된 구조대의 존재 및 풍화대, 연암의 분포는 수직공과 경사공 시추를 통해 확인할 수 있었다.

연구시설의 예상 부지에 6mx6m 크기의 하향 경사 터널을 지하 120미터에 건설하는 경우에 대한 3차원 구조 안정성해석을 실시해본 결과 지표면 지형의 영향을 파악할 수 있었으며 연구시설의 구조안정성을 확인할 수 있었다. 계획대로 연구시설이 건설될 경우, 터널입구부에서 약 70~80미터 정도에서 경사도가 급한 파쇄구간을 만나게 될 것으로 예상되며 이에 대한 터널 보강방안이 설계에 반영되어야 할 것으로 판단된다. 터널을 따른 일부구간에서 폭 1m 이하의 안산암질 암맥들이 나타날 것으로 예상되지만 구조적인 영향을 크지 않을 것으로 보인다.

참고문헌

1. 권상기, 2002, 고준위 방사성폐기물 처분연구, 자원공학회지, 39, 387- 402.
2. Fossum, A.F., 1985 Effective elastic properties for a randomly jointed rock mass, Int. J. of Rock mechanics and mining sciences, 22, 467-470.