

고준위 처분 연구용 지하시설의 개념설계

Concept Development for HLW Disposal Research Tunnel

권상기, 김경수, 박정화, 조원진, 한필수
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

고준위방사성폐기물의 지층처분을 위해서는 대상 암반에 연구용 터널을 굴착하고 암반의 거동과 암반에서의 지하수의 이동을 파악함으로써 처분개념의 안전성을 평가하는 것이 필요하다. 지하연구용 터널의 개념은 처분개념, 처분장에서의 지하구조물의 형상, 수행될 실험과 지질조건에 영향을 받게된다. 본 연구에서는 원자력연구소 내에 처분연구용 터널을 건설하는 경우에 대한 장단점 분석, 발파영향분석, FLAC3D 를 이용한 3 차원 구조해석을 통해 지하 처분연구용 터널의 개념을 선정하였다.

Abstract

In order to dispose high-level radioactive waste in a geological formation, it is necessary to assess the safety of a disposal concept by excavating a research tunnel in the same geological formation as the host rock mass. The design concept of a research tunnel depends on the actual disposal concept, repository geometry, experiments to be carried at the tunnel, and geological conditions. In this study, analysis of the characteristics of the disposal research tunnel, which is planned to be constructed at KAERI site, calculation of the influence of blasting impact on neighbor facilities, and computer simulation for mechanical stability analysis using a three-dimensional code, FLAC3D, had been carried out to develop the design concept of the research tunnel.

1. 서론

고준위폐기물 처분의 경우 심부 암반에 만들어진 처분장에 영구처분하는 것이 최선의 방안으로 여겨지고 있다. 이러한 심지층처분의 경우 자연방벽인 암반층이 두텁기 때문에 처분장에서 지표까지의 지하수의 이동 경로가 길고 지하수의 유동이 제한적이기 때문에 생태계로 유입되는데 걸리는 시간이 길어진다는 장점이 있다. 하지만 지하 심부의 암반에 대한 물리적, 화학적, 역학적, 열적

물성과 이들과 핵종이동의 관계, 처분환경에서의 공학적 방벽 및 암반의 거동이 처분장 안정성 및 안전성에 미치는 영향 등을 파악해야하는 어려움이 따른다. 특히 고준위폐기물 처분의 경우 장기간의 안전성을 고려해야하기 때문에 자연방벽과 공학적 방벽의 시간에 따른 거동변화도 고려하여야 할 필요가 있다.

한국원자력연구소에서는 1997 년 이후 심지층처분개념(deep geological disposal concept)을 선정하기 위한 연구를 수행하고 있으며 이를 통해 2002 년 말 기준처분개념(reference disposal concept)을 선정하였으며 2006 년 한국형처분개념 선정을 목표로 연구가 진행되고 있다. 한국형 처분개념의 선정을 위해서는 한국의 지질특성 및 심부 암반에서의 열적, 수리적, 화학적, 역학적 조건에서 처분개념의 안전성이 고려되어야 한다.

지하 암반의 거동과 암반에서의 핵종 이동, 지하수의 유동에 대한 연구를 위해서는 지하연구시설의 건설이 필수적이며 이 때문에 방사성폐기물 처분을 고려하는 세계 각국에서는 다양한 규모의 지하연구시설을 건설하고 각종 시험을 실시하고 있다. 세계의 주요 처분연구시설의 현황은 권상기⁽¹⁾에 의해 정리된 바 있다. 실험실 연구단계에서 최종 처분부지에 지하연구시설을 건설하는 단계까지는 각국의 현실에 적합한 접근법이 선택되고 있다. 그림 1 은 지하연구시설에 관한 다양한 접근법을 보여주고 있다.

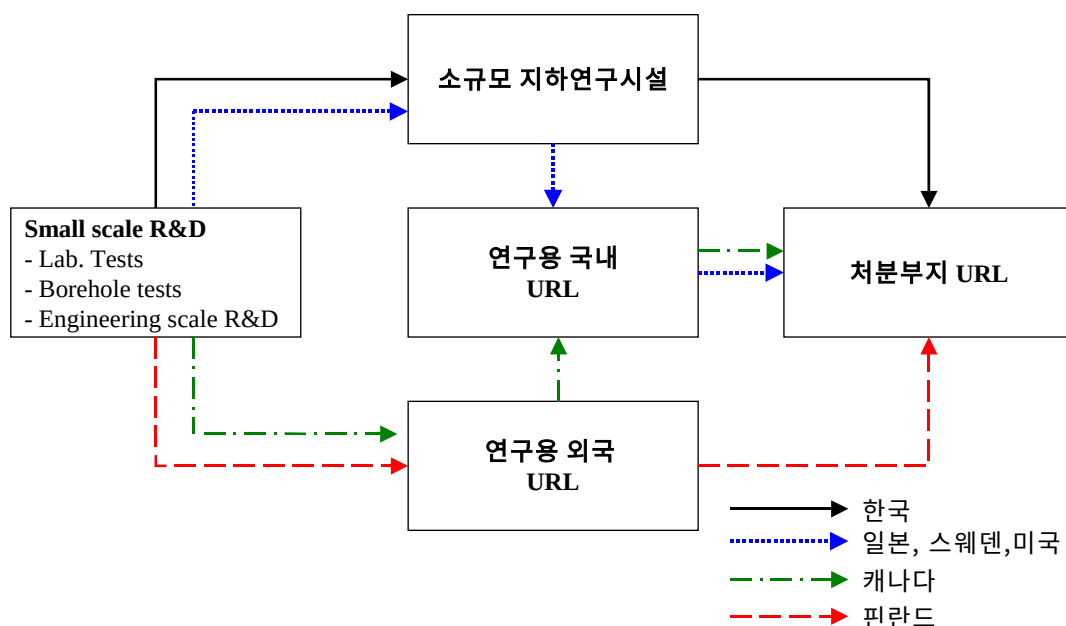


그림 1. 세계 각국의 고준위폐기물 처분연구 주요 추진 경로

일본, 스웨덴, 미국의 경우 실험실 규모의 연구를 거쳐 소규모 지하연구시설과 연구용 국내 URL 을 건설을 통해 처분기술을 검증하였으며 최종적으로 처분대상 부지에 지하연구시설을 건설하는 과정을 고려하고 있다. 캐나다의 경우 외국 URL 연구에 참여한 후 연구용 대규모 URL 을 건설하였으며 향후 처분부지 URL 을 추진하는 계획으로 있다. 핀란드는 외국의 URL 에 참여하여 기술을 습득한 후 처분부지에서의 URL 을 추진하고자 하고 있다. 한국의 경우 대규모 연구용 URL 을 추진하는데 따르는 부지선정과 비용 문제 때문에 소규모의 지하연구시설을 건설한 이후 처분부지 URL 을 추진하는 것이 바람직할

것으로 판단된다. 본 논문에서는 소규모 지하연구시설의 개념설계를 위해 수행되었던 연구내용들을 정리하였다. 고준위폐기물 처분개념에 대해 소개하고 연구용 터널의 개념선정을 위해 수행되었던 자료조사, 발파영향 분석, FLAC3D를 이용한 역학적 안정성 해석 결과를 정리 분석하였다.

3. 처분지하연구터널의 개념 설계

처분지하연구터널의 기본개념을 도출하기 위해 다음 내용들에 대한 연구가 수행되었다.

3.1 처분시스템 개요

현재 고려되고 있는 고준위폐기물 처분개념에 따르면 처분장은 지하 500m의 결정질 화강암에 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 자연방벽의 다중방벽 개념의 처분개념이 적용되며 주요한 인공 방벽으로는 처분용기, 완충재, 뒷채움재를 들 수 있다.

3.2 처분지하연구터널에서의 수행 연구

방사성폐기물처분 연구개발을 위한 중요 인프라 구축의 일환으로 처분연구용 터널이 건설되면 터널 주변에서의 암석역학적 거동, 응력, 불연속면 영향, 손상대(EDZ) 발생연구, 불연속면을 통한 유체의 이동, 암반에서의 heater test, 공학적방벽의 열-수리-역학적(THM) 거동, 완충재-암반 계면에서의 콜로이드 생성 및 이동, 지하 환원 환경에서 이온이동, 처분 시스템에서의 운반, 거치, 회수와 같은 처분 공정의 실증 등이 실시될 수 있을 것이다.

3.3 기존터널 활용 방안에 대한 고찰

처분지하연구터널을 원자력연구소내에 건설하는 방안과 도로터널 또는 폐광산을 활용하는 방안을 비교하였다. 표 1에서 보는 바와 같이 폐광산이나 도로터널의 경우 기존의 터널과 설비를 활용할 수 있다는 장점이 있는 반면에 처분연구에 적합한 조건 및 환경을 구축하는데는 어려움이 따를 것으로 판단된다. 기존의 지하구조물을 이용하는 경우 건설에 따르는 초기비용은 절감할 수 있을지 모르지만 연구의 편의성과 연구내용의 적합성, 홍보시설로의 활용성 등의 측면에서는 연구소내에 소규모의 지하구조물을 건설하는 것이 필요하다. 특히 굴착전의 부지조사 및 설계, 굴착, 운영 및 폐쇄까지의 전과정을 실증하고 굴착에 따른 지하수 및 암반에 미치는 영향에 대한 연구를 위해서는 소내시설의 확보가 최선의 방안일 것이다. 하지만 소내시설의 경우 연구용원자로인 하나로가 주변에 위치하고 있기 때문에 굴착작업에 주의를 요하며 설계시 소음 및 진동이 주변 환경에 미칠 영향을 분석하는 작업이 필요하다.

표 1. 처분연구터널의 위치에 따른 장,단점

	소내시설	도로터널	폐광산
장점	. 접근이 용이하므로 장기간 활용시 경제적 (연구소 기간시설의 활용 및 연구 요원의 접근성)	. 진입터널 굴착 필요 없음	. 진입터널 굴착 필요 없음
	. 굴착전 조사,설계 작업을 통한 부지조사기법 확충 (물리탐사기법,풍화대,균열)	. 다양한 규모의 터널 선택 가능	. 깊은 심도에서의 시설 가능
	. 계획된 연구에 적합한 규격의 터널 건설이 가능	. 기존 설비 및 기존 지질조사 자료의 활용 가능	. 기존 설비 활용 가능
	. 처분 연구에 적합한 암반 조건(기존 굴착에 의해 손상되지 않은 암반)	. 지질조건의 선택 폭이 넓음(예, 단층,절리)	. 민감한 시설이 인근에 없으므로 발파가 용이
	. 접근터널 굴착시 지질관련 예측기법에 대한 검증 작업이 가능 (처분장 폭의 1/10 의 터널 제공)	. 민감한 시설이 인근에 없으므로 발파작업이 용이	
	. 기존의 부지조사 및 심부시추(500m)자료활용 가능		
	. 처분장 굴착기법(smooth blasting)과의 유사성		
	. 기타 용도 (식품저장, 홍보시설) 로 활용가능성		
	. 계획, 설계,시공, 폐쇄까지의 전과정 실증.		
단점	. 하나로 등 시설물에 대한 영향	. 계획되지 않은 굴착작업으로 암반이 손상됨.	. 계획되지 않은 굴착작업으로 암반이 손상
	. 진입터널 굴착에 따른 초기비용 증가.	. 접근상의 어려움 때문에 장기간 활용시 비경제적	. 외지에 있으므로 연구의 계획,운영에 지장
	. 향후 연구소내 부지 활용에 제한 요소가 될 수 있음	. 제한된 용도로 밖에 사용할 수 없음	. 지하수의 유입으로 인해 기존 심부 갱도는 지하수로 채워질 가능성 높음.
	. 인허가 과정이 필요 (그린벨트내)	. 적합한 암반, 지하수 조건을 찾는데 어려움	. 적합한 암반, 지하수조건 확보 곤란
		. 부지조사 관련 및 부지 조건 예측에 관한 URL 추진 필요	. 부지조사 관련 및 부지 조건 예측에 관한 URL 추진 필요
		. 굴착 길이가 짧기 때문에 굴착적 예측결과와 비교 하는데 어려움이 있음.	. 광화대 주변으로 지질학적 환경이 처분 환경과 차이(광물농집).
		. 수평터널로 산악 터널이 아닌 경우 원하는 심도를 얻는데 어려움이 있음.	. 장기간 관리가 되지 않은 경우 안전성 문제 상존. 지보를 다시 하는 경우 비경제적
		. 홍보시설로의 활용에 어려움	. 향후 자원개발의 가능성
			. 홍보시설로의 활용에 어려움

3.4 산화-환원 환경

고준위폐기물 처분장의 경우 지하 심부 위치하며 지하수는 환원상태일 것으로 일반적으로 가정한다. 지하수에 용해된 산소가 다른 원소와의 결합으로 완전히 소비된 상태로서 환원조건에서는 모든 철성분이 ferrous 상태로 존재하게 되는데 지하수가 - 250~ 320 mV, pH 7.3-8.3 에서 환원 상태가 된다고 본다. 환원 정도를 나타내는 REDOX(amount of dissolved oxygen) potential 은 $Fe^{III} - Fe^{II}$ 로 계산된다. 만약 소량의 산소가 물속에 남아 있으면 Eh 값에 큰 영향을 미친다. 산소는 sulphide 와 급속히 반응하기 때문에 측정가능한 정도의 sulphide 가 지하수에 있다는 것은 이 물이 환원 상태임을 의미한다. 이와 같은 환원상태에서는 산화환경에 비해 dose 의 양이 two order 낮게 나타난다⁽²⁾. 빗물속에 포함된 산소는 토양과 암반의 상층부를 통과하면서 감소되며 심도가 깊어지면서 지하수는 환원상태로 바뀌게 된다. 이는 심도가 깊어질수록 산소를 포함하고 있는 지하수가 주변 암반의 철성분과 결합해서 소모되므로 용해된 산소의 양이 감소하게 되기 때문이다. 스웨덴에서 수행된 연구결과에 따르면 30-40 개 시추공 중에서 100 미터 이상의 심도에서 산소가 측정된 시추공은 1 개였으며 이를 통해 심도 100 미터 이상의 지하수는 환원상태에 놓이는 것으로 보고 있다⁽²⁾. 따라서 처분지하연구터널의 심도가 100m 이상이 되도록 설계하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다.

3.5 발파 영향에 대한 계산

처분연구용터널의 발파 작업에 의한 하나로 및 터널 인접 시설인 수송용기 시설에 미치는 발파진동과 소음을 계산하였다.

가. 발파진동속도

일반적으로 적용되는 발파진동 조건식은 다음과 같다.

$$V = k \left(\frac{D}{W^b} \right)^n$$

여기서, V 는 예상진동속도 (cm/sec), D 는 폭원에서 이격거리 (m), W 는 지발당 장약량 (kg/delay)이며 k, n 과 b 는 시험발파를 통해서 결정되는 상수이다. 발파진동식의 상수들은 시험발파를 통하여 결정되어야 하지만 개념 설계단계에서는 예비검토를 위한 추정식을 사용하였다. 국내에서는 미광무국(US Bureau of Mine)에서 제안된 k=160, n=-1.6, b=0.5 를 널리 적용하고 있으므로 본 연구에서도 이를 사용하였다. 예상되는 시험터널 입구에서 연구용 하나로 원자로까지의 거리 약 640m 로서 최대 지발당 장약량을 15kg/delay 로 가정하는 경우, 발파진동 속도는

$$V = 160 \left(\frac{640}{\sqrt{15}} \right)^{-1.6} = 0.046637 \text{ (cm./sec)}$$

로 예상된다. 서울 지하철 시방기준의 경우 문화재 및 정밀기기의 설치 건물인 경우 발파진동은 0.2cm/sec 이하가 되도록 발파 작업이 진행되도록 해야한다. 건교부의 터널설계 기준에 따르면 진동예민 구조물의 경우 0.2cm/sec 이하가 되도록 규정하고 있으며 일반 주택이나 아파트의 경우 0.5cm/sec 이하의 발파진동이 허용되고 있다(표 2). 하나로의 경우 예상 발파진동이 0.047cm/sec 로 이는 표 3 에서 보듯이 일상적인 걷기에 의한 진동 수준보다도 낮은 것으로 볼 수 있다.

표 2. 국내 공공기관의 발파진동 허용 기준 (단위 : cm/sec)

구 분	진동 속도에 따른 규제 기준	
	진 물 종 류	허용 진동치
서울시 지하철 시방기준	문화재, 정밀기기 설치건물	0.2
	주택, 아파트	0.5
	상가, 사무실, 공공건물	1.0
	RC, 철골조 공장	4.0
건교부 터널설계기준 (1999)	진동예민 구조물(문화재등)	0.3
	조적식벽체와 목재 천장구조물(재래가옥등)	1.0
	조적식 중소형건축물(저층양옥, 연립주택등)	2.0
	철근콘크리트 중소형건축물(중,저층 아파트등)	3.0
	철근콘크리트 대형건축물(고층아파트등)	5.0

표 3. 미국 광무국(USBM)의 조사자료에 따른 일상적인 생활에서의 진동 수준.

구 분	진 동 수 준 (cm/sec)
일상 활동 걷기	0.08
뒹뒹기	0.71
문을 째 닫았을 때	1.27
벽면에 못을 박을 때	2.24

나. 발파진동 가속도

발파에 의해 발생하는 진동의 속도(V)는 진동변위의 시간에 대한 변화율을 나타내며, 진동가속도(A)는 진동속도의 시간에 대한 변화율로서 이를 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$V = \frac{A}{2\pi f}$$

여기서, f 는 진동주파수로 cycle/sec 이다. 미광무국(USBM)과 내무부 노천광업청(OSM, Office of Surface Mining)에서 제안한 구조물에 대한 발파진동의 안전수준은 그림 2 와 같다. 우리 나라에서 가동중에 있거나 건설중에 있는 원전의 설계지진인 안전정지지진 값은 표에서 보여주는 바와 같이 최대지반가속도로서 중력가속도의 20%인 0.2g 를 정하여 발전소의 내진설계를 하고 있다.

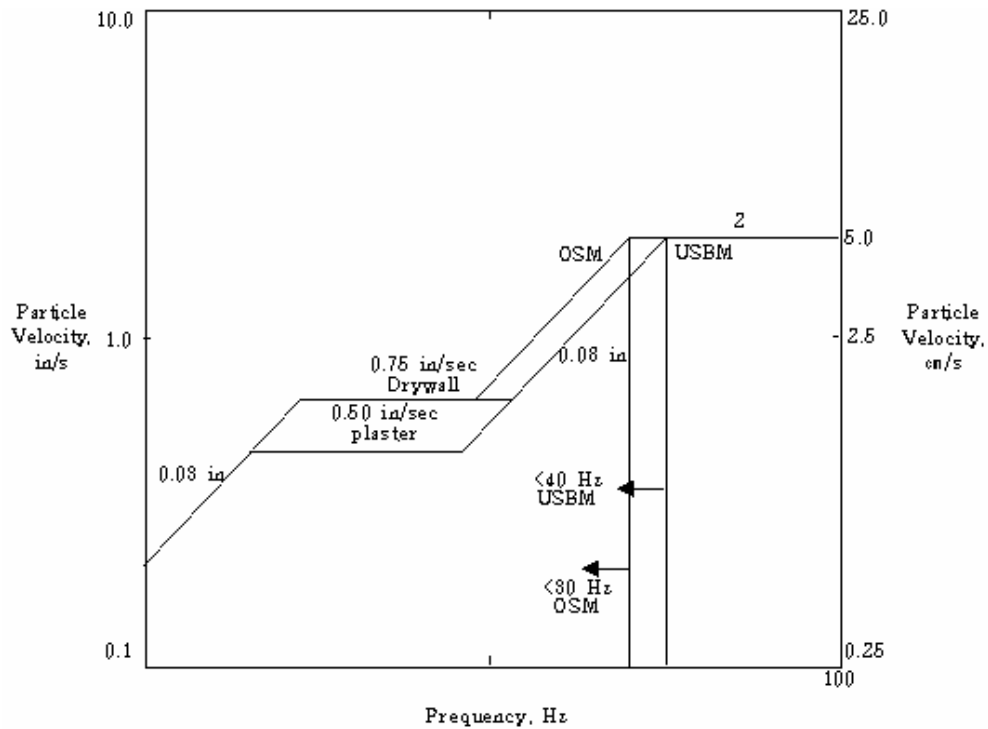


그림 2. 미국의 발파진동 안전수준

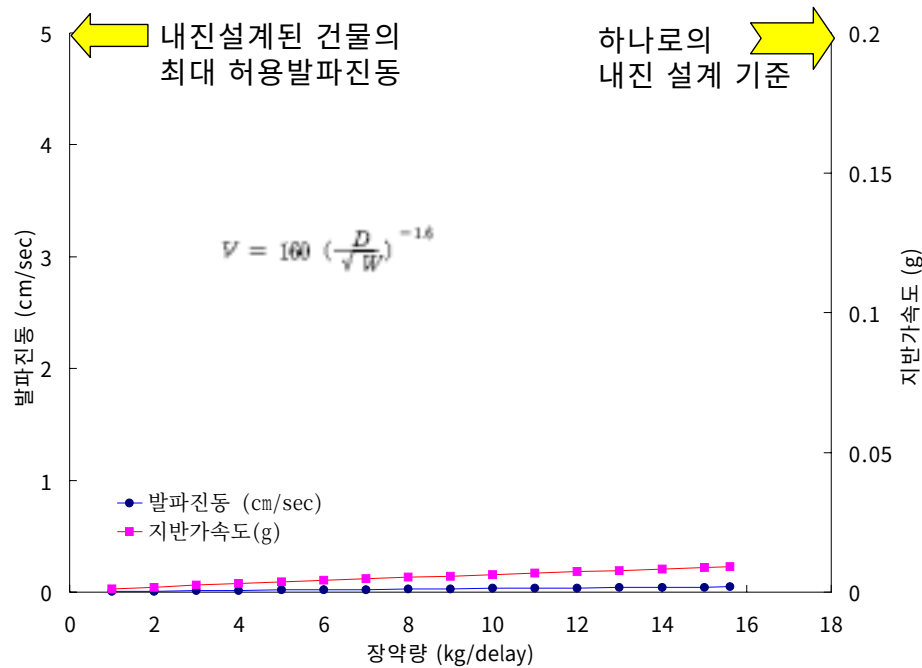


그림 3. 지발당 장약량에 따른 발파진동 및 지반가속도 변화

미국 내무부 노천광업청의 주파수 경계인 30Hz 를 기준으로 보수적으로 계산 하는 경우 발파에 의해 하나로 원자로에서 예상되는 지반가속도는

$$2 \times 3.14 \times 30 \times 0.047 = 8.9 \text{ cm/sec}^2 = 0.009 \text{ g}$$

로 예상된다. 이는 하나로의 설계 기준인 0.2g 보다 훨씬 낮은 값을 알 수 있다. 진도와 지반가속도와의 관계식은 여러 연구자들에 의해서 제시되었고, Trifunac and Brady⁽³⁾ 는 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$\log_{10} A = 0.3 \times MMI + 0.014$$

위의 식에서 최대지반가속도(A)의 단위는 cm/sec^2 이고 MMI 는 수정 메르칼리 진도 (Modified Mercalli Intensity)이다. 하나로에서의 지반가속도 8.9cm/sec^2 를 MMI 규모로 환산하면 3.1 로 계산된다. 지진 규모와 지진이 발생한 위치에서의 진도, 즉 최대진도의 정확한 관계식의 경우 미국의 동부와 서부에서 관측된 수많은 지진자료를 이용하여 다음과 같은 경험식이 제시되어 있다.

$$Mag = \frac{1}{2} MMI + 1.75 \quad : \text{미국 동부의 경험식}$$

$$Mag = \frac{2}{3} MMI + 1 \quad : \text{미국 서부의 경험식}$$

따라서 하나로의 경우, 최대 장약량으로 발파작업을 진행한 경우 발생하는 지진의 규모는 3 정도일 것으로 예상된다. 아래 그림은 장약량 변화에 따른 지진규모 및 진도의 변화를 보여준다.

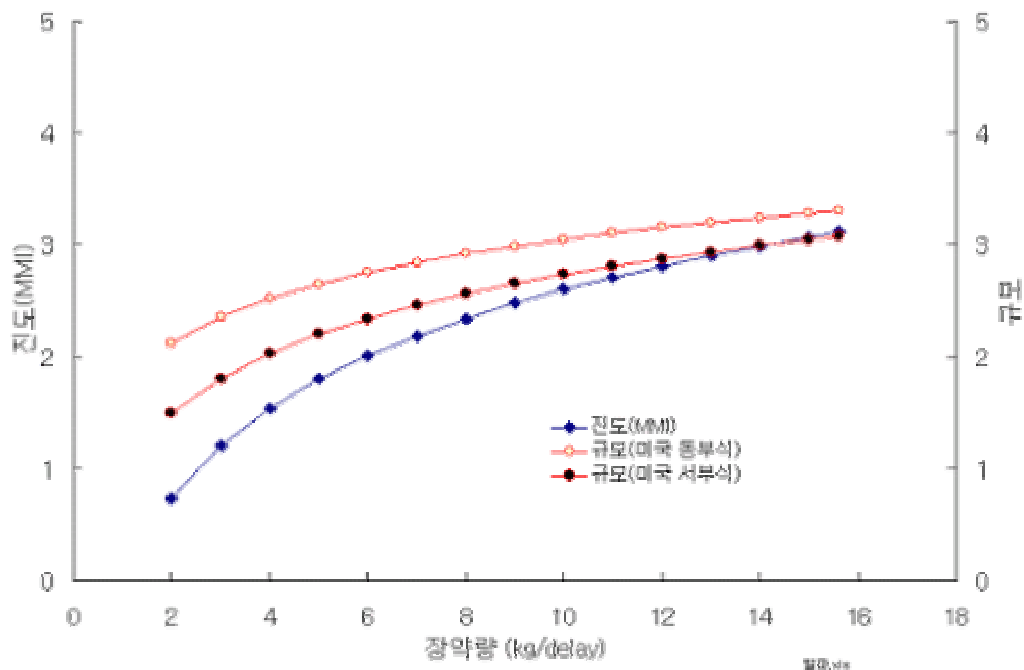


그림 4. 장약량 변화에 따른 지반 진동의 규모

다. 소음

발파에 의한 소음은 다음 식으로 계산된다.

$$Y = 20 \log V + 71$$

여기서 V 는 최대 진동속도치(mm/sec), Y 는 진동레벨(dB)이다. 하나로 원자로의 경우 발파진동이 0.47 mm/sec 로 예상되므로 발파로 인해 예상되는 소음 정도는 64 dB 정도이다. 표 4 의 소음에 따른 구조물 및 인체 반응을 보면 하나로 원자로에서는 발파에 의한 소음이 64dB 정도로 이는 일상적인 대화의 수준에 해당한다.

표 4. 폭풍압 크기에 의한 구조물 및 인체 반응

dB	구조물 및 인체 반응
180	구조물 손상
170	대부분의 유리창이 깨어짐
150	일부 유리창들이 깨어짐
140	피해 한계
130	미광무국 허용 한계치
120	미광무국 안전 수치
110	고통 한계(고통을 느끼는 시점)
100	불평 한계 (접시나 창문 흔들림)
80	안정
60	일상적대화
20	속삭임
0	가청 한계

3.6 구조 안정성 해석

연구소부지내의 예상 부지에 소규모의 연구용 터널이 위치하는 경우, 터널의 구조 안정성을 평가하기 위해 상업용 3 차원 코드인 FLAC3D 를 이용한 역학적 해석을 수행하였다. FLAC3D 는 미국의 Itasca consulting 사에 의해 개발된 finite difference code 로서 지하 암반이나 지반 구조물의 해석에 널리 이용되고 있는 코드이다⁽⁴⁾.

가. 암반물성

모델링에 사용된 암반의 물성은 기존의 인접 시추공에서 회수된 암석코아를 이용한 물성시험과 시추공에서의 불연속면에 대한 조사를 통해 얻어진 값으로 주요 물성을 표 5 에 정리하였다. 불연속면의 영향은 Fossum⁽⁵⁾에 의해 제안된 식을 이용하여 간접적으로 고려할 수 있다. 유효 bulk modulus, 유효 shear modulus 는 무결함 암석의 물성과 불연속면의 물성을 사용하여 다음과 같이 계산된다.

$$K_m = \frac{1}{9} E \left[\frac{3(1+\nu)sk_N + 2E}{(1+\nu)(1-2\nu)sk_N + (1-\nu)E} \right]$$

$$G_m = \frac{1}{30} \left[\left(\frac{E}{1+\nu} \right) \frac{9(1+\nu)(1-2\nu)sk_N + (7-5\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)sk_N + (1-\nu)E} \right] + \frac{2}{5} \frac{ESk_s}{2(1+\nu)Sk_s + E}$$

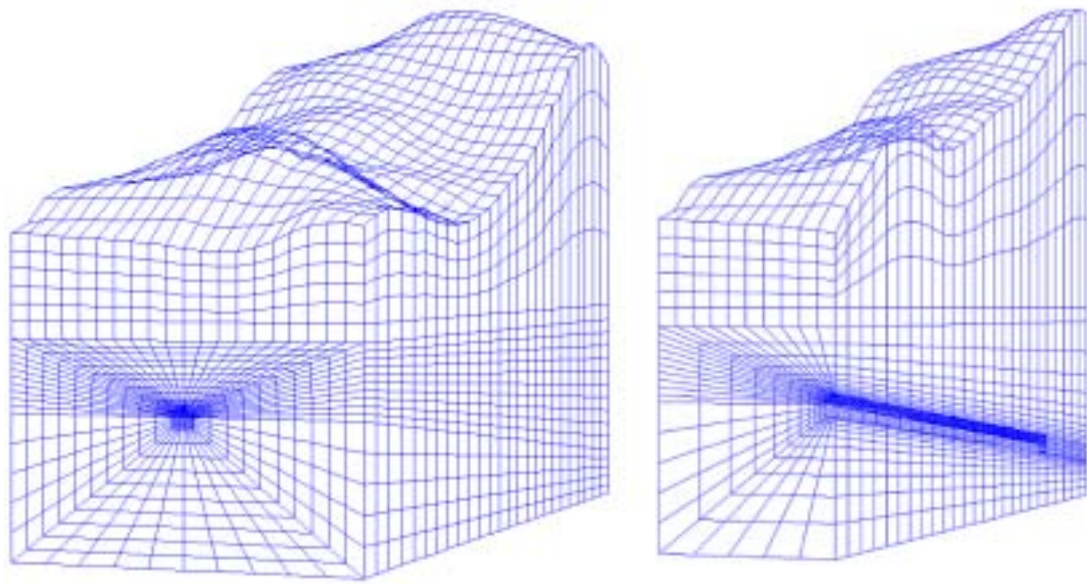
여기서 E 는 무결암의 탄성계수, ν 는 무결암의 포아송비, S 는 절리간격, k_n 과 k_s 는 불연속면의 수직강성 및 전단강성을 나타낸다. 표 5 의 값을 이용하여 암반의 bulk modulus, K_m 과 shear modulus, G_m 을 계산하면 $K_m = 20.8\text{GPa}$, $G_m = 10.84\text{GPa}$ 로 계산된다.

표 5. Properties of Yusung granite rock

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. 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. 터널 부근에서의 응력, 변위 변화가 심할 것으로 판단하여 메쉬의 크기가 상대적으로 작게 조절하였다. 모델의 크기는 폭 100m, 길이 250m 이며 높이는 지형에 따라서 160m-250m 까지 변하게 된다. 터널의 크기가 6m 인 경우 터널크기의 3-4 배 정도의 모델이면 역학적 해석에 충분하다고 일반적으로 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 0 이 되도록 경계조건을 설정하였다. 전체 암반은 화강암으로 구성되며 동일한 물성을 가지는 것으로 가정하였다.



(a) full model

(b) half model

그림 5. Model mesh for FLAC3D analysis

가. 해석결과

(1) 응력분포 : 터널이 굴착된 이후의 변화를 예측하기 위해 200 미터의 터널이 굴착되는 경우를 해석하였다. 터널은 단계별로 굴착이 되겠지만 해석의 단순화를 위해서 전체 터널이 동시에 굴착되는 것으로 가정하였다. 그림 6 은 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 두드러지게 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. 하지만 화강암의 단축압축강도는 100MPa 이상되기 때문에 터널의 굴착후 응력집중에 의해 암석이 파괴되거나 소성영역이 발생하지는 않을 것으로 판단된다.

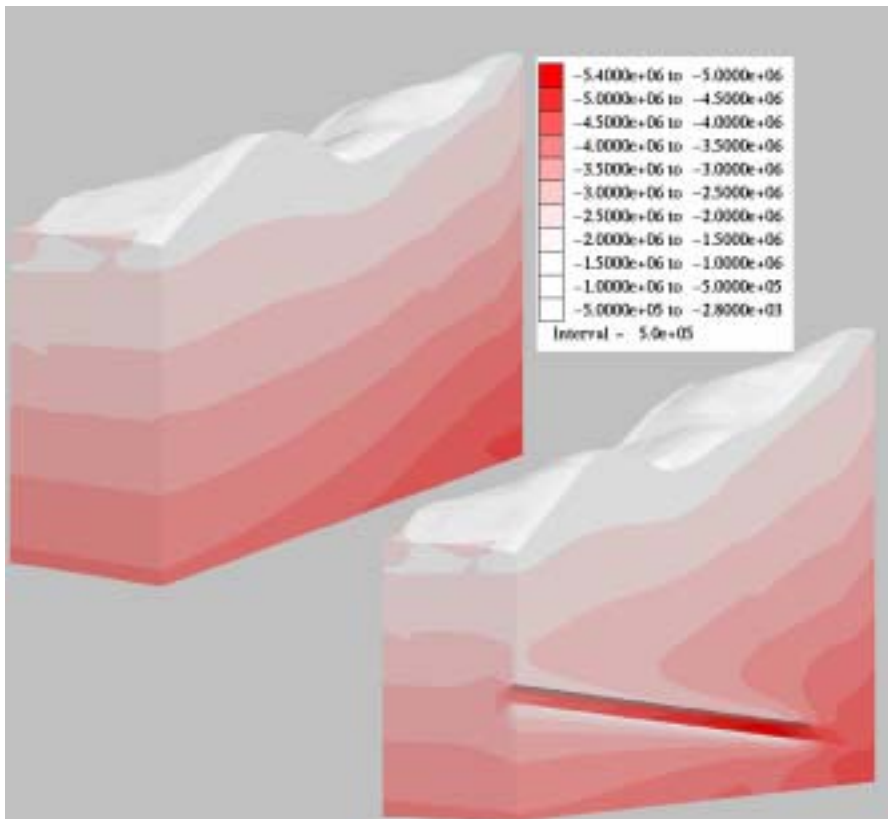


그림 6. 터널 굴착 전, 후의 최소주응력 분포

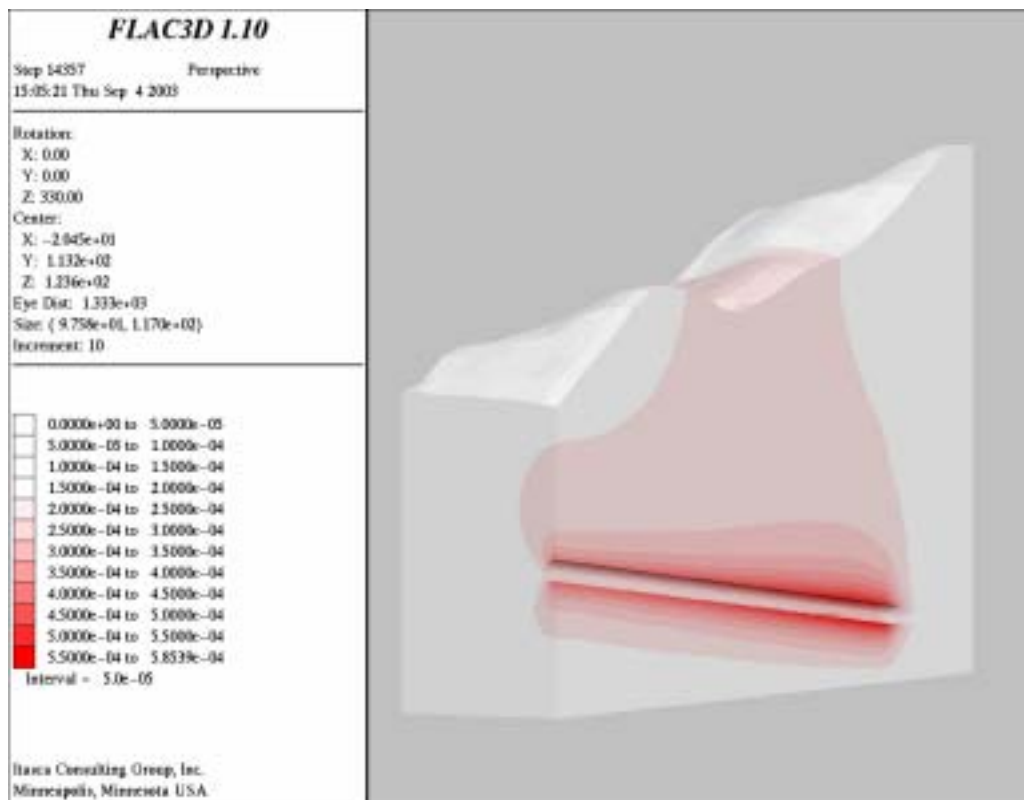


그림 7. 터널굴착 이후 예상되는 변위분포

(2) 변위분포 : 터널 굴착후 터널 방향으로의 변위가 발생하게 된다. 즉 터널 상부에서는 아래쪽으로의 변위가 발생하며 터널 바닥에서는 위쪽으로 변위가 발생한다. 그림 7 은 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 0.58 mm 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.

5. 처분연구 터널의 개요

원자력연구소 부지내에 지하처분연구 터널을 건설하는 경우, 굴착에 따른 발파영향을 분석하였으며 FLAC3D 를 이용한 역학적 해석을 수행하였다. 이를 통해 진입터널과 연구모듈의 개념을 다음과 같이 도출하였다.

- 연구모듈이 지표면에서 가장 깊은 곳에 위치할 수 있도록 약 200m 길이의 진입터널을 굴착한다 (그림 8). 터널을 발파에 의해 굴착되며 진입터널과 연구모듈의 형태는 말뚝굽형태를 갖도록 한다. 터널 단면의 크기는 6mx6m 로 기계식 천공 및 발파작업이 가능하게 함으로써 깨끗한 터널 곡면을 얻을 수 있도록 한다.
- 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.
- 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.
- 진입터널은 원활한 장비 및 작업원 진출입을 위해 바닥 콘크리트를 타설한다.
- 진입터널 양쪽으로 길이 약 25m 로 2 개의 연구모듈을 설치한다. 연구모듈의 경사는 상향 1~3%로 자연배수가 가능하도록 설계한다.
- 연구모듈은 원칙적으로 진입터널 끝 부분에 좌우 양쪽에 하나씩 배치하되, 산 정상부 아래에 위치하도록 하여 모듈의 지하 심도가 최대가 되도록 한다(그림 9).

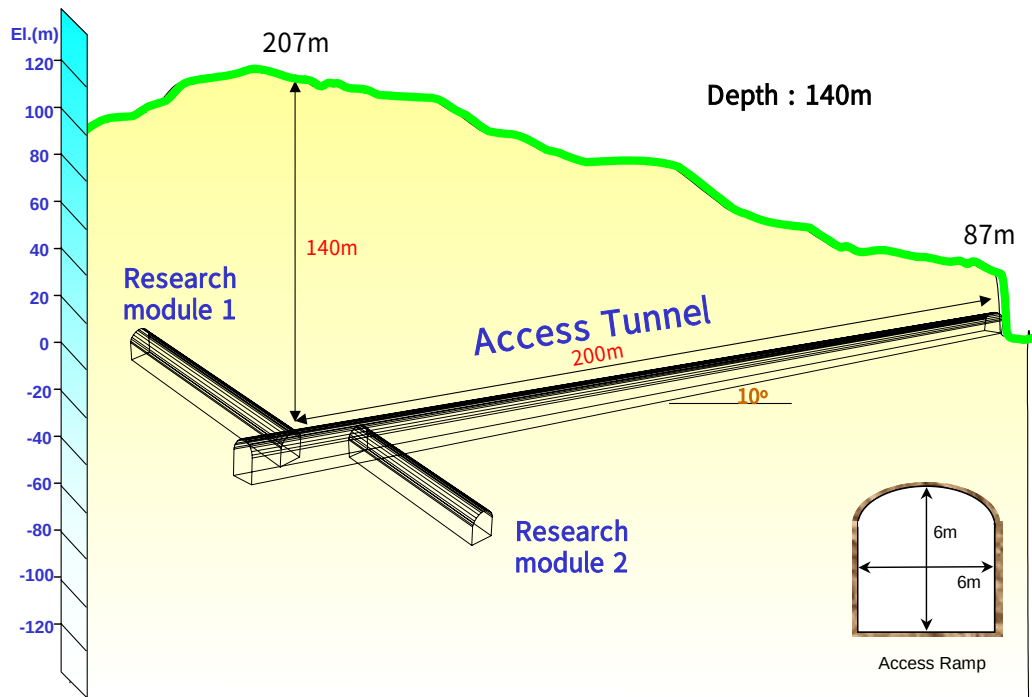


그림 8. 처분용 터널의 입체도 및 터널 단면

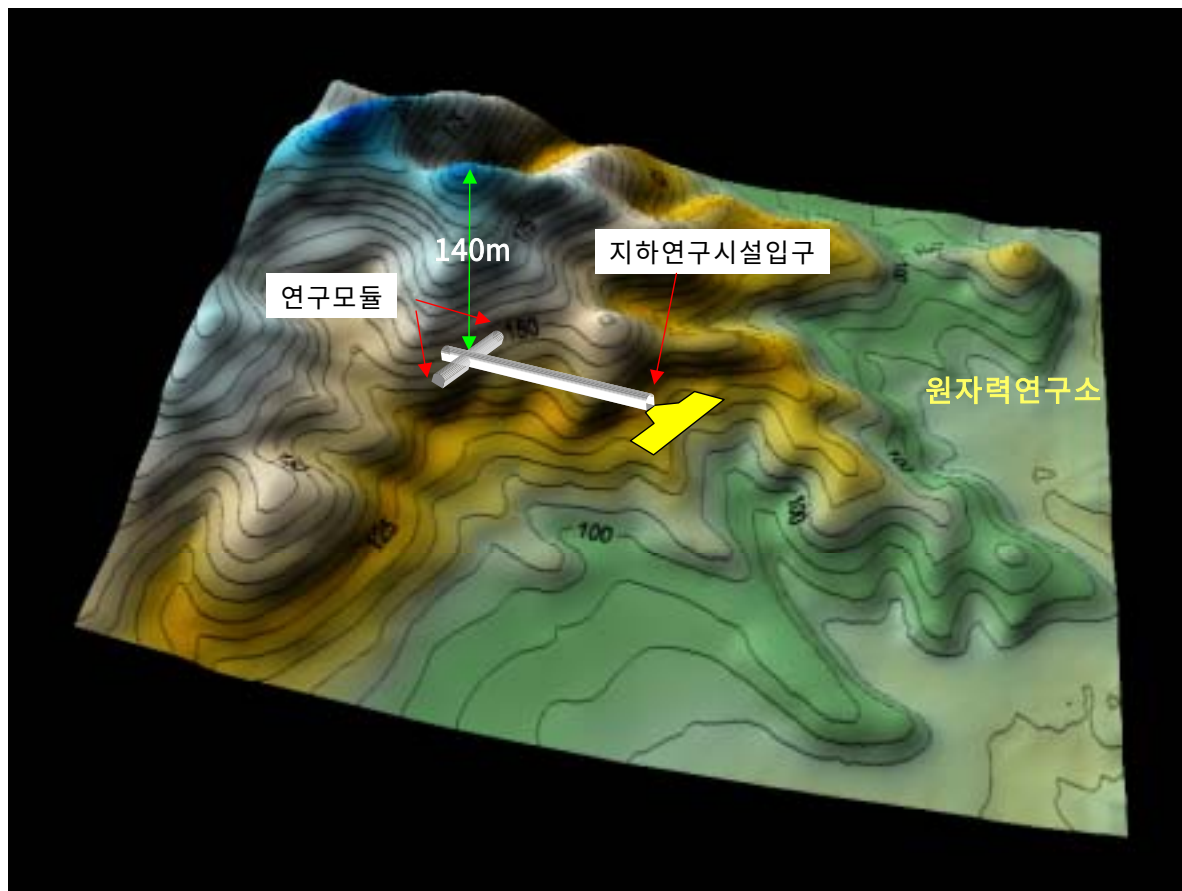


그림 9. 처분연구용 터널의 위치를 보여주는 지형도

6. 결론

고준위방사성폐기물의 지층처분을 위해서는 대상 암반에 연구용 터널을 굴착하고 암반의 거동과 암반에서의 지하수의 이동을 파악함으로써 처분개념의 안전성을 평가하는 것이 필요하다. 지하연구용 터널의 개념을 선정하기 위해서는 처분장에서의 지하구조물의 개념, 처분개념, 수행될 실험과 지질조건 등을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 원자력연구소 내에 처분연구용 터널을 건설하는 경우에 대한 장단점 분석, 발파영향분석, FLAC3D 를 이용한 3 차원 구조해석을 수행하였으며 이를 통해 지하처분연구용 진입터널 및 연구모듈의 개념을 선정할 수 있었다. 원자력연구소 부지내에 처분연구용 터널을 발파기법을 사용해서 굴착하는 경우 인접 지상 구조물에 미치는 진동 및 소음 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 진입터널의 크기가 6mx6m 이고 경사가 10%인 경우에 대한 3 차원 구조 해석결과 암반의 변형이나 응력집중은 터널의 안정성에 영향을 미치지 않을 정도로 낮게 나타났다. 이러한 연구결과에 따라 진입터널과 연구모듈에 대한 개념을 다음 표와 같이 도출할 수 있었다.

	진입터널	연구모듈
길이	200m	25m (2 개)
경사	5-10% 하향	1-3% 상향
형태	말발굽형태	말발굽형태
굴착기법	천공 및 발파	천공 및 발파
특징	입구부는 라이닝 등으로 충분히 보강하고 안쪽은 지보를 최소화하여 암반이 노출될 수 있게한다. 바닥에는 콘크리트를 타설하여 작성을 원할하게 한다.	안전한 범위내에서 지보를 최소화하여 터널 벽면과 천정, 바닥의 암반이 노출될 수 있도록 한다.

참고문헌

1. 권상기(2002), 고준위 방사성폐기물 처분연구, 자원공학회지, Vol. 39, No. 4, pp.387-402.
2. SKB(1993), aspo hard rock laboratory annual report 1992, SKB TR 93-08.
3. Trifunac, M. D., and A. G. Brady (1975). On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded ground motion, Bull. Seism.Soc. AM. Vol. 65, pp.139-162.
4. Itasca Consulting Group, 1996, FLAC3D User' s manual.
5. Fossum, A.F.(1985) Effective elastic properties for a randomly jointed rock mass, Int. J. of Rock mechanics and mining sciences, Vol.22(6), pp.467-470.