

원자력연구소내 지하 처분연구 시설 건설을 위한 지반조사 및 개념설계 권상기^{1)*}, 박정화¹⁾, 조원진¹⁾

Concept design and site characterization for the Underground Disposal Research Tunnel at KAERI site

Sangki Kwon, Jeung-Hwa Park and Won-Jin Cho

1. 서 론

고준위방사성폐기물 처분의 경우 심부 암반에 만들어진 처분장에 연구처분하는 것이 최선의 방안으로 여겨지고 있다. 하지만 지하 심부의 암반에 대한 물리적, 화학적, 역학적, 열적, 수리적 물성과 이들과 핵종이동의 관계, 처분환경에서의 공학적 방벽 및 암반의 거동이 처분장 안정성 및 안전성에 미치는 영향 등을 파악해야 하는 어려움이 따른다. 특히 고준위폐기물 처분의 경우 장기간의 안전성을 고려해야 하기 때문에 자연방벽과 공학적 방벽의 시간에 따른 거동변화도 고려하여야 할 필요가 있다.

한국원자력연구소에서는 심지층처분시스템(deep geological disposal system)을 선정하기 위한 중장기 연구를 수행하고 있으며 이를 통해 2002년 기준처분시스템(reference disposal system)을 선정하였으며 2006년 한국형처분시스템 도출을 목표로 중장기 연구가 진행되고 있다. 지하 암반의 거동과 암반에서의 핵종 이동, 지하수의 유동에 대한 연구를 위해서는 지하연구시설의 건설이 필수적이며 이 때문에 방사성폐기물 처분을 고려하는 세계 각국에서는 다양한 규모의 지하연구시설(Underground Research Lab., URL)을 건설하고 지층처분 관련 각종 시험을 실시하고 있다. 세계의 주요 지하처분연구시설의 현황은 권상기(2002)에 의해 정리된 바 있다. 실험실 연구단계에서 최종 처분부지에 지하연구시설을 건설하는 단계까지는 각국의 현실에 적합한 접근법이 선택되고 있으며 한국의 경우 소규모 지하연구

구시설을 건설하여 경험과 기술을 축적한 후 처분 부지에서의 URL을 추진하는 것을 기본 방향으로 하고 있다(권상기 등, 2003).

지하처분연구시설이 심부 지하환경과 유사한 지하 조건을 구현할 수 있도록 하기 위해서는 지하 수백 미터의 깊이에 있는 신선한 암반층에 시설을 건설하는 것이 이상적이지만, 이를 위해서는 막대한 건설 및 운영 비용이 소요되며 또한 적합한 부지를 확보하는데 어려움이 따를 것이다. 따라서 당면한 처분시스템 개발 및 처분 안전성 평가 관련 연구들을 수행하기 위해서는 현실적인 관점에서 지하처분연구시설이 갖추어야 할 최소 요구사항을 충족시킬 수 있는 방안을 확보하는 것이 요구된다.

2. 지하처분연구시설의 기본 개념

2.1 개념 도출시의 고려사항

지하처분연구시설의 기본개념을 도출하기 위해서는 처분시스템과 연구터널에서의 수행될 연구내용, 부지의 수리화학적 조건, 지질학적 조건, 암석역학적 안정성 등이 고려되어야 한다. 현재까지 도출된 고준위폐기물 처분 기준 개념에 따르면 지하 처분장은 지하 수백 m에 위치하는 결정질 암반에 위치하며 경사터널 또는 수직터널을 통해 지상시설과 연결된다(권상기, 2002). 처분 터널을 포함한 각종 터널은 조절 발파기법을 통해 굴착되며 처분장의 안전성 확보를 위해 처분용기, 완충재, 뒷채움재로 구성되는 인공방벽과 암반과 토층으로 구성되는 자연방벽의 다중방벽(multi-barrier) 처분개념이 적용된다.

적합한 조건을 갖춘 암반에 건설되는 처분연구용 지하시설의 확보는 이러한 처분개념의 타당성, 안전성,

¹⁾ 한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구팀
*교신저자(Corresponding Author): kwonsk@kaeri.re.kr
접수일: 2004년 4월 12일
심사 완료일: 2004년 6월 22일

적합성에 대한 실험적 검증은 위해 필요하다. 처분연구용 지하시설의 건설은 방사성폐기물처분 연구개발을 위한 핵심 인프라 구축을 의미하며 지하시설을 통해 암석역학적 거동, 응력 및 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 실증이 이루어질 수 있을 것이다. Table 1은 지하연구 시설에서 2007년 이후 주로 수행하게 될 연구 항목들을 보여준다.

지하처분연구시설을 원자력연구소내에 건설하는 방안과 도로터널 또는 폐광산을 활용하는 방안에 대한 장, 단점은 권상기 등 (2003)에 의해 비교된 바 있다. 폐광산이나 도로터널의 경우 기존의 터널과 설비를 활용할 수 있다는 장점이 있는 반면에 처분연구에 적합한 조건 및 환경을 구축하는 데는 어려움이 따를 것으로 판단된다. 기존의 지하구조물을 이용하는 경우 건설에 따르는 초기비용은 절감할 수 있을 지 모르지만 연구의 편의성과 연구내용의 적합성, 홍보시설로의 활용성 등의 측면에서는 연구소내에 소규모의 지하구조물을 건설하는 것 보다는 불리할 것이다. 특히 굴착작업의 부지조사 및 설계, 굴착, 운영 및 폐쇄까지의 전과정을 실증하고 굴착에 따른 지하수 및 암반에 미치는 영향에 대한 연구를 원활히 수행하기 위해서는 소내시설의 확보가 최선의 방안일 것으로 판단된다. 하지만 연구소내에 시설을 건설하는 경우 부지의 선택폭이 좁고 연구용원자재인 하나로를 비롯한 연구시설이 주변에 위치하고 있기 때문에 굴착작업 및 부지의 선정에 주의를 요하며 설계시 소음 및 진동이 주변 환경에 미칠 영향을 분석하는 작업이 필요하다.

고준위폐기물 처분장의 경우 지하 심부에 위치하는 것이 바람직하는데 그 이유중 하나가 지하 심부로 내려갈수록 환원환경의 확보가 유리하다는 것이다. 처분장의 환원환경 확보는 지하수에서의 actinide의 화학적 물성, 처분용기의 부식과 산화우라늄의 용해 측면에서 중요하다. 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. 지하수에 용해된 산소가 다른 원소와의 결합으로 완전히 소비된 상태인 환원조건에서는 모든 철성분이 제철철(ferrous) 상태로 존재하게 된다. 따라서 환원 정도를 나타내는 REDOX potential 은 Fe^{II} 와 Fe^{III} 의 상대

적비로 파악할 수 있다. 또한 산소는 황화물과 급속히 반응하기 때문에 측정가능한 정도의 황화물이 지하수에 있다는 것은 이 물이 환원 상태임을 의미한다. 스웨덴에서 수행된 연구결과에 따르면 30~40개 시추공 중에서 100 m 이상의 심도에서 산소가 측정된 시추공은 1개였으며 이를 통해 심도 100 m 이상의 지하수는 환원상태에 놓이는 것으로 보고 있다(SKB,1993). 따라서 처분지하연구터널의 심도가 100 m 이상이 되도록 설계

Table 1. Research items to be carried out at the URT

R&D items
<ul style="list-style-type: none"> ● Rock Mechanics - Rock Mass Classification - Rock Stress and Deformation Measurement and Analysis - Properties and Mechanical Effects of Rock Discontinuity and Fracture Zone - Effects of Stress Change on the Hydraulic Properties of Rock Discontinuity - Blasting Techniques and Blasting Effect on Adjacent Tunnels - EDZ development and its properties - Evaluation of Tunnel Stability and Rock Support Design - Thermal Property of Rock (Heater Test) - Influence of Earthquake on Underground Facility
<ul style="list-style-type: none"> ● Geology - Prediction of Rock Boundaries - Distribution Rock Discontinuity and Fracture Zone - Groundwater network and Flow Characteristics in Rock Discontinuity - Flow Test through Fracture System - Prediction Technique of Flow Rate into Tunnel
<ul style="list-style-type: none"> ● Engineered Barrier System - Thermal-Hydro-Mechanical(THM) Behavior of EBS - Gas Migration in Engineered Barrier System - Contaminant Diffusion and Chemical Buffering of Buffer - Colloid Generation and Migration at the Interface between Buffer and Rock
<ul style="list-style-type: none"> ● Fluid Migration - Contaminant Migration in Rock Mass - Gas Migration in Shear Zone - Contaminant Diffusion in Rock Matrix - Colloid Migration and Retardation in Geosphere
<ul style="list-style-type: none"> ● System Design - Demonstration of Emplacement Technology - Tunnel Sealing Technology - Verification of Deposition Hole Drilling - Concrete Plug Design and its Application - Verification of Retrieval Operation - Verification of Transportation Method

하는 것이 바람직할 것이다. 이와 같은 검토를 통해 지하처분연구시설의 최소 요구사항을 다음과 같이 도출하였다.

- 연구모듈은 고준위 처분장 모양으로 고려되는 결정질암에 위치하여야 한다.
- 처분관련 연구가 주로 수행될 연구모듈은 100 m 두께 이상의 지반에 의해 격리되어야 한다.
- 연구모듈은 와이어메쉬나 록볼트와 같은 최소한의 지보로 장기간 유지가 가능한 양호한 암반에 설치되어야 한다.
- 진입터널에서의 암반 거동 및 지하수 유동 연구가 가능하여야 한다.
- 처분개념실증, 안전성평가와 관련된 연구 및 완충재의 THM 시험 등이 가능하여야 한다.

연구소내 최적 부지의 선정을 위해 1996년 수행되었던 “처분기술모의시험” 연구 (김진웅 외, 1996)에서 상세 조사된 바 있는 원자력연구소 부지 서쪽 후면의 부지조사 결과와 시설 설계안에 대한 검토가 먼저 실시되었다. Fig. 1은 1996년 조사지역과 6개의 수직 시추공 위치를 보여주고 있다. 기존 자료에 대한 조사를 통해 상기 요건을 만족시키기 위한 다음과 같은 시설의 개요가 제안, 검토되었다.

- 진입터널
 - 갱구 위치: 수송용기시험시설 부근
 - 길이: 600 m (경사: 10%)
 - 단면: 6 m × 6 m (마제형)
- 연구모듈
 - 위치: 진입터널 양측



Fig. 1. Areas of site investigation in 1996 and 2003

- 길이: 25 m (2%)
- 단면: 6 m × 6 m (마제형)

하지만 이 경우 진입터널의 길이가 길어 건설 및 유지비용이 과다할 것으로 판단되어 진입터널의 길이를 단축시키면서 최소요건을 만족할 수 있는 방안을 강구할 필요성이 대두되었다. 이와 함께 연구시설이 연구소 부지내에 위치하도록 함으로써 민원발생이 없도록 해야 하며 또한 토지의 형질 변경과 그린벨트 훼손 허가와 관련된 업무의 원활한 진행을 위해 지하처분연구시설이 국가공업단지개발 계획선 내에 위치하도록 지하처분연구시설의 배치와 선형을 결정해야 한다. 이러한 전제조건과 시설의 최소 요건을 동시에 만족시키면서 효과적으로 심도를 확보하기 위해 고도가 높고 경사가 급한 원자력연구소 부지 경계부에 위치하는 산지에 진입터널을 건설하는 방안이 제안되었다. Fig. 1에 표시된 개념과 같이 지하처분연구시설을 건설하는 경우, 최소요건을 만족하는지를 확인하기 위해 2003년 11월부터 2004년 2월까지 수송용기 시설 좌측 부지에 대한 부지조사를 실시하였다.

2. 지질조사

2.1 지표지질조사

지하에 지질구조나 기반암의 분포 상태 등 본 지역을 구성하고 있는 지반의 암석학적 및 공학적 특성을 파악하기 위해 지표상에 드러난 지형/지질상의 특징을 관찰, 분석하였다. 이를 위해 1:2,000 축척의 연구소 주변 부지 지형도와 1:50,000 한국지질도 유성 도폭(박희인 외, 1977)을 참고하였다. 연구소 주변에서는 선캄브리아기의 변성암류와 중생대 화강암류 및 맥암이 나타나고 있다. Fig. 2에서 보듯이 조사 지역의 지질은 복운모화강암과 이를 관입한 안산암질 암맥 그리고 제4기 풍화잔류토층으로 구성되어 있으며 복운모화강암은 흑운모화강암이나 편상화강암 등과 접촉하고 있으나 그 관계가 모호하며 점이적인 변화를 보이는 것으로 보아 관입접촉인 것으로 추정된다. 그림에서 208 m 고지 인근 하부에 연구용 모듈이 위치하게 된다. 조사지역에서의 상세 지표지질 조사를 위해서 현장 노두관찰과 지형 특성 분석 등을 실시하였지만, 풍화토층 구간이 두껍게 발달하고 있어서 조사선 방법(Scanline survey)으로 관찰할 수 있는 노두를 찾을 수 없었다.

Fig. 3은 항공사진 분석을 통해 얻어진 선구조도를 보여주고 있다. 선구조의 주 방향은 N30°W이고, 2차 방향은 N50°E이었으며, 기존 조사자료를 종합 분석한 결과 화강암 절리는 NS~N30°W이고, 맥암류는 N40°W~

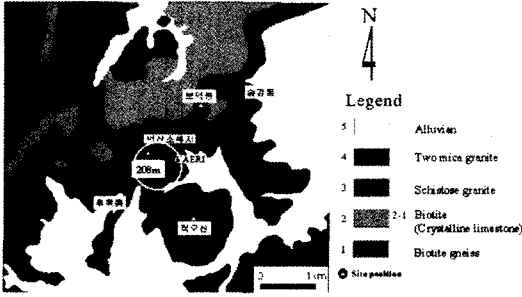


Fig. 2. Geology around the URT site in KAERI



Fig. 3. Lineament analysis from aerial photograph around KAERI site

N30°E가 주방향이다. 그리고, 편암은 N45°W~N60°E로 경사가 30°~70°로 다양하게 나타난다. 이러한 개략적인 선구조도는 물리탐사와 시추를 통해 확인, 보완되었다.

2.2 굴절법 탄성파 탐사

- 측정 방법

지하처분연구시설 부지에 분포하는 지질구조대의 예상위치와 규모를 파악하고 전반적인 지층분포 상태를 조사하여 설계에 반영하기 위해 굴절법 탄성파 탐사가 실시되었다. 원자력연구소내에서의 작업이기 때문에 발파진동과 소음을 줄이기 위해 SISSY를 사용했으며 14 HZ와 28 HZ의 지오폰을 사용한 48채널 Seismograph McSEIS를 이용하여 측정을 실시하였다.

본 탐사시 수진 간격은 5 m로 설정하고, 발진은 종측선의 경우는 7회(remote shot), 횡측선의 경우에는 5회 발파를 기본으로 수행하였으며, 탐사측선은 Fig. 4와 같다. 측량을 통해 확인된 지표지형을 고려하여 진입터널의 방향이 N66W로 놓이는 경우에 대해 측선을 배열하였다. 진입터널을 횡단하는 방향으로 4개 측선을 등간격(100 m)으로 배열하고, 3개의 종측선을 진입터널 및 터널 좌우에 등간격(50 m)으로 각각 배열하여 격자상으로 되도록 측선을 설정하여 터널부지 인근에 대한 상세한 탐사를 시행하였다. 측선배열은 Table 2와 같으며 7개 측선의 총 연장은 1,645 m이다.

- 측정 결과

터널 진행 방향과 유사하게 놓이는 S-2 측선의 경우 상부 토사 및 풍화대에 해당하는 탄성파속도 1,200 m/sec 이하의 지층은 측점 80~230 m 구간을 제외하면 평균 15 m 내외의 두께로 비교적 깊게 분포하고 있으며, 측점 80~230 m 구간은 평균 5 m 내외의 두께로 분포하는 것으로 나타난다. 측점 250 m 및 360 m 지점에서 나타나는 저속도 이상대는 파쇄대로 보인다. 측점 30 m 지점에서 나타나는 저속도 이상대가 관찰되는데, 이는 연구모듈과 평행한 방향의 파쇄대로 분석된다. Fig. 5는 S-2 측선을 따른 주시곡선도 및 탐사결과도를 보여주고 있으며 3개의 파쇄대가 나타나고 있다.

S-1 측선의 경우 토사 및 풍화대의 두께는 연구모듈 쪽에서는 2~4 m의 박층으로 존재하다가 계곡부를 중심으로 발생한 파쇄대의 영향으로 터널 입구부에서 15

Table 2. Seismic refraction survey lines

측선명	측선방향	수진기간격(m)	측선연장(m)	비고
S-1	N66W	5.0	350	7발진, remote shot
S-2	N66W	5.0	465	7발진, remote shot
S-3	N66W	5.0	350	7발진, remote shot
S-4	N24E	5.0	120	5발진
S-5	N24E	5.0	120	5발진
S-6	N24E	5.0	120	5발진
S-7	N24E	5.0	120	5발진

m로 두터워진다. 기타 측선의 경우 측선을 따라서 풍화대의 두께가 약간씩 변하지만 대체적으로 10 m 내외의 두께를 가지는 것으로 나타난다.

2.3 전기비저항탐사

- 측정 방법

지하처분연구시설 부지내에 분포할 것으로 예상되는 단층/파쇄대 및 터널굴착 대상구간의 상대적인 압밀평가를 목적으로 전기비저항탐사가 실시되었다. 전기비저항 탐사에서는 신호 대 잡음비와 분해능이 어느 정도 우수하고 측정자료의 수가 확보되며 단층/파쇄대 등의 수직구조 규명에 가장 적합한 단극-쌍극자 배열을 적용하였다. 본 탐사시 전극 간격은 탐사심도에 따라 10~140 m로 설정하고, 원거리 전극(remote electrode)은 최대 전극 간격의 10배 이상에 위치한 지점에 설치하여 탐사를 수행하였다. 진입터널을 횡단하는 방향으로 4개 측선을 등간격(100~200 m)으로 배열하고, 3개의 종측선을 진입터널 및 터널 좌우에 등간격(100 m)으로 각각 배열하여 격자상이 되도록 측선을 설정한 후 상세한 탐사를 시행하였다. 각 측선에 대한 자세한 내용은 Fig. 4와 Table 3에 정리되어 있다.

- 전기비저항 탐사결과

진입터널 진행방향과 나란하게 놓이는 R-1, R-2, R-3 측선을 따른 탐사결과는 Fig. 6과 같다. 터널의 상부에 놓이는 R-2 측선을 따른 탐사결과를 보면 전반적으로 저→고→저→고비저항의 4층 구조를 보여준다. 측선 시점은 상부의 풍화대 하부에 기반암이 분포하는 2층구조로 판단되며, R-2 측선을 따른 측점 550~600 m 지점은 철재 울타리 및 전주의 영향으로 인해 비정상적인 저비저항 분포를 보이는 것으로 판단된다. 또한 측선 중앙의 4층 구조는 R-2 측선의 측점 170 m 지점의 지표상에서 측점 400 m 지점의 탐사심도 하부까지 분포

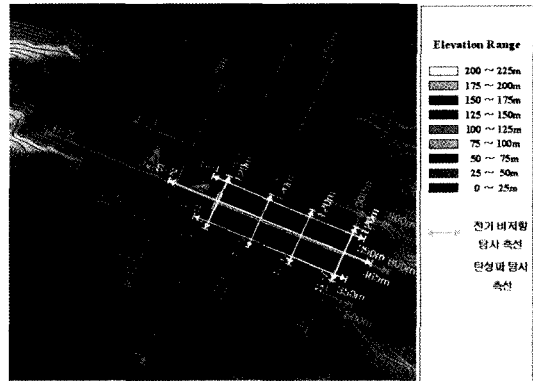


Fig. 4. Seismic refraction survey(S) and electric resistivity survey lines(R)

Table 3. Electric resistivity survey lines

측선명	측선방향	전극간격(m)		측선연장(m)
		P1-P2(a)	C1-P1(na)	
R-1	N66°W	10~140	10~360	600
R-2	N66°W	10~100	10~500	800
R-3	N66°W	10~140	10~360	600
R-4	N24°E	10~70	10~250	500
R-5	N24°E	10~100	10~500	800
R-6	N24°E	10~140	10~360	600
R-7	N24°E	10~60	10~200	300

하는 저비저항 이상대로 인해 상부의 기반암과 하부의 기반암이 분리된 형태로 추정된다. 4층구조에 대한 판단은 탄성파 탐사, 시추조사결과와의 비교 그리고 필요시 추가시추를 통해 확인하는 작업이 필요할 것으로 보인다. 파쇄대로 추정되는 지점은 R-2 측선의 측점 270~290 m 및 측점 470~530 m 지점으로 측점 470~530

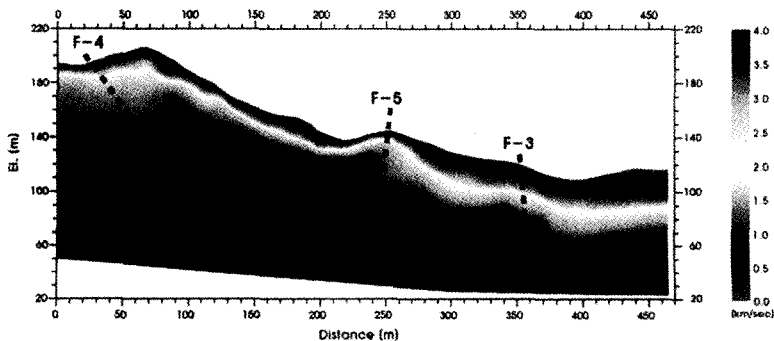


Fig. 5. Seismic survey result along S-2 line

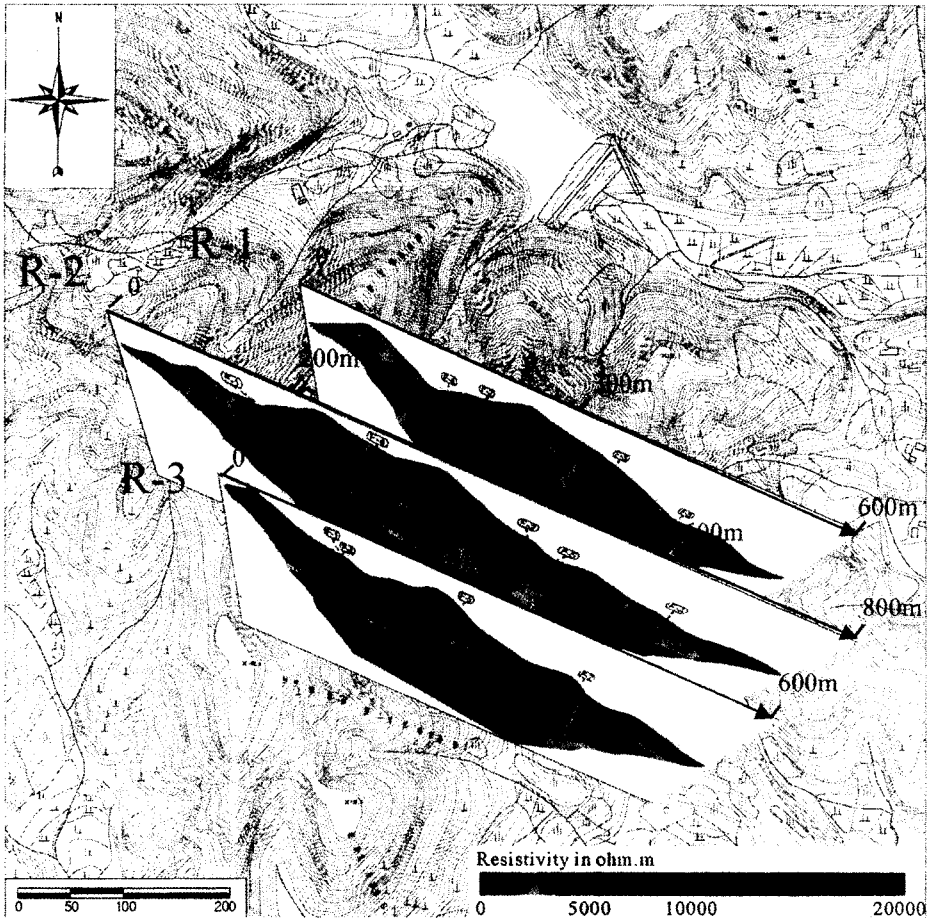


Fig. 6. Electric resistivity plot along the survey lines parallel with the access tunnel

m 지점은 파쇄대로 추정되는 저비저항대가 지표아래 100 m 내외의 심도까지 분포하는데, 결과 단면의 분포 범위 및 양상으로 볼 때 2조의 파쇄대(F-2, F-5)가 축선을 사교할 것으로 판단된다. 또한, R-2 축선의 축점 630~670 m 지점에서도 결과단면 하부에 파쇄대(F-3)로 추정되는 저비저항대가 관찰되며, 축점 170 m 지점의 지표에서 축점 400 m 지점의 하부까지 분포하는 저비저항대도 파쇄대로 추정된다.

고도별 전기비저항 분포도는 Fig. 7과 같다. 탐사지역에 분포하는 저비저항 이상대는 진입터널을 사교하는 저비저항 이상대(F-2, F-3, F-5)와 이에 대하여 수직으로 발달하는 이상대(F-4)로 대별되는데, 이들 저비저항대는 단층 또는 파쇄대로 추정된다. 한편, 진입터널 및 연구모듈 구간의 전기비저항 분포를 살펴보면 3개의 단층 또는 파쇄대(F-2, F-3, F-5)가 진입터널을 사교하는

방향으로 발달하고 있는 것으로 보이며, 이들 파쇄대대인해 터널 시점에서 중앙은 저비저항의 다소 불량한 암질분포를, 연구모듈이 위치하는 터널 종점은 대체로 2,000 Ω·m 이상의 양호한 암질분포를 보일 것으로 예상된다.

연구용 모듈이 위치할 곳과 가장 인접한 곳에서 터널을 가로지르는 R-5 축선을 따른 전기비저항 탐사결과는 Fig. 8과 같다. 그림에서 보듯이 연구모듈은 단단한 기반암 내에 위치할 것으로 예상되며 모듈의 안정성에 영향을 줄 수 있는 파쇄대에서 어느 정도의 거리를 두고 있음을 알 수 있다.

2.4 시추조사

- 시추작업 개요

지층의 상태와 지반공학적 특성, 기반암의 분포상태

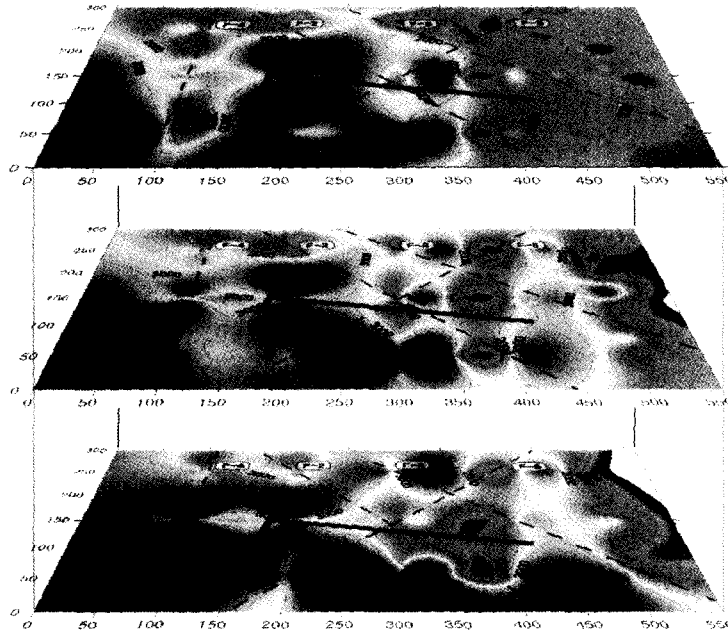


Fig. 7. Variation of electric resistivity with depth

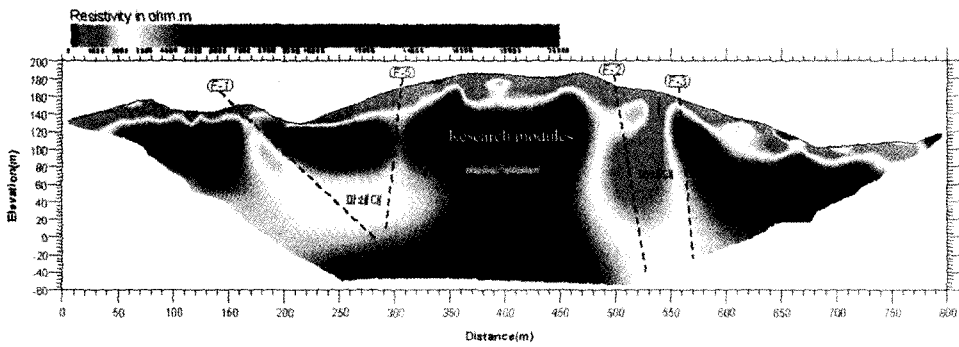


Fig. 8. Electric resistivity plot along R-5 survey line, which can show the rock condition around the research modules

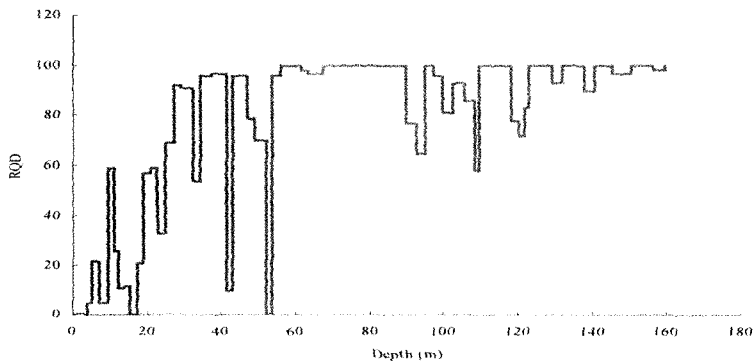


Fig. 9. Variation of rock condition along the vertical borehole, KP-2

Table 4. Vertical and 10% declined borehole

공 번	지반고(EL.m)	방향	경사(°)	심 도	
				굴진심도	공저심도
KP-1(경사공)	116.3	N56W	5.7	252 m	EL.91.1 m
KP-2(수직공)	114.6	-	90	160 m	EL.154.6 m

및 풍화도 등 파악하고, 시료의 채취 및 각종 원위치 공 내시험을 실시하여 설계에 필요한 지반자료를 파악하기 위하여 수직시추와 경사시추가 실시되었다. 수직시추는 터널의 입구부에서 2단계에 걸쳐 160 m 깊이까지 실시되었으며 경사시추는 터널의 예상 경사인 10% (5.7)로 터널의 진행방향과 동일하게 실시하였다. Table 4는 두 시추공에 대한 기본 정보를 보여준다. 두 경우 모두 유압회전식 시추가 실시되었으며 기반암에서는 다이아몬드 코어 비트를 사용하여 천공 작업이 수행되었다. 터블 코아베를을 사용하여 암석 코어 회수율을 높이도록 하였으며 토층의 경우 표준관입시험으로 시료를 채취하였다.

- 수직공 조사결과

수직공 시추결과 상부로부터 2.0 m까지 풍화토, 4.2 m까지 풍화암, 10.3 m까지 연암, 19.8 m까지 보통암, 그 하부로 경암이 시추심도 60.8 m까지 존재하는 것으로 나타났다. 상부 일부구간 (4.0 m~4.2 m, 4.8 m~6.3 m)에서만 안산암질 암맥이 관찰되며, 전체적으로 흑운모 화강암(biotite granite)과 판상 화강암(schistose granite)이 호층을 이루며 나타나며, 일부 구간에 페그마타이트가 관찰된다. 17.2 m~17.6 m, 19.5 m~19.8 m, 34.0 m~34.3 m 구간에서 파쇄대가 관찰된다. 케이싱은 4.2 m까지 설치하였으며, 시멘트 그라우팅은 13.1 m까지 실시하였다. 수직공에서의 지하수위는 지하 18.5 m에 일정하게 유지되는 것으로 나타난다. Fig. 9는 수직공 심도에 따른 RQD 변화를 보여준다. 암반의 상태는 심도의 증가에 따라 향상되고 있으며 심도 25 m 이상에서는 양호한 (fair) 암반으로 나타나고 있다.

- 경사공 조사결과

Fig. 10은 터널 진행 방향을 따른 10% 하향 경사시추 작업을 보여준다. 경사시추 결과 시추공 입구에서 4 m까지 풍화토, 14 m까지 풍화암, 28 m까지 연암이 나오며 이후 경암이 나타났다. 입구에서 28 m, 47 m, 118 m, 124 m, 235 m의 5구간에서 폭 1~3 m의 안산암질 암맥 11개가 관찰되고 있으며 전체적으로 흑운모 화강암과 판상화강암이 호층을 이루고 있다. 관찰 가능한

페그마타이트는 10여 군데에서 발견되었다. 단층점토와 단층각력이 나타나는 단층대는 70 m 구간에서 0.8 m 그리고 75 m 구간에서 2 m 폭으로 나타난다. 시추공을 따른 암반의 상태는 입구에서 90 m까지 절리가 많다가 90~110 m까지는 양호한 암반을 만나며 110~125 m 구간에서 절리가 많아지고 이후 180 m까지 양질의 경암구간이 나타난다. 180~190 m에서 파쇄가 많으며 이후 252 m까지는 양호한 암반을 구성하고 있는 것으로 나타난다. 시추 작업중 50 m와 80 m 구간, 그리고 180 m에서 지하수의 유입이 많았으며 이는 그 구간에 위치하는 구조대의 영향으로 보인다. Fig. 11은 경사공을 따라서 파악된 암반의 변화를 암종변화와 RQD로 표시한 것이다. RQD 값이 부분적으로 극히 낮은 값을 보이는 구간이 나타나는데, 경사공에서의 암석변화와 함께 그려보면 큰 암맥이 위치하는 구간에서 낮은 RQD가 나타남을 알 수 있다. 암맥이 나타나지 않은 70 m 지점에서의 낮은 RQD값은 이 구간에 위치하는 단층대의 영향에 의한 것이며 180 m에서의 낮은 RQD도 구조선의 영향일 것으로 추정된다.

Fig.12는 경사공 시추를 통해 결정된 RMR 과 Q의 심도에 따른 변화를 보여주고 있으며 RMR-Q 사이의 관계는 다음 식으로 표현된다.

$$RMR=51+7.48 \ln Q \quad (7)$$

경사공에서의 RQD 값 변화와 풍화대 및 주요 구조선을 고려하여 Fig. 11과 같이 전체를 6개 구간으로 나



Fig. 10. Drilling of 10% declined borehole

늘 수 있다. Table 5는 30 m 이후 경암에서의 각 구간별 암반 상태를 보여준다. 절리간격의 경우 구간별로 2.8 cm에서 80 cm까지 차이를 보이며 평균 28 cm로 나타난다. 각 구간의 폭을 고려해서 계산된 평균 RQD는 71이며 RQD가 50 이상인 구간이 전체의 70%로서 전체적으로 "Fair rock"으로 볼 수 있다. 연구모듈이 위

치할 구간의 암반의 경우 RQD가 79로서 "Good rock"으로 분류된다. RMR 분류의 경우, "Fair rock" 이상으로 분류할 수 있는 RMR 41 이상의 구간은 풍화대를 포함한 전체구간의 87%, "Good rock" 이상으로 분류되는 RMR 61 이상의 구간은 60%, RMR 81 이상의 "Very good rock" 구간도 24%가 나타난다. 암반 구간에서 구

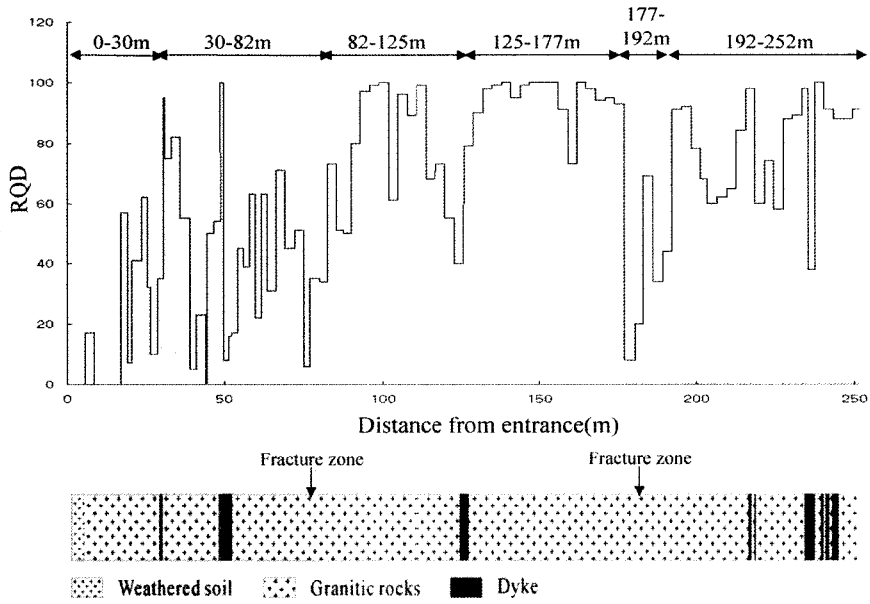


Fig. 11. RQD and rock type variation along the declined borehole, KP-1

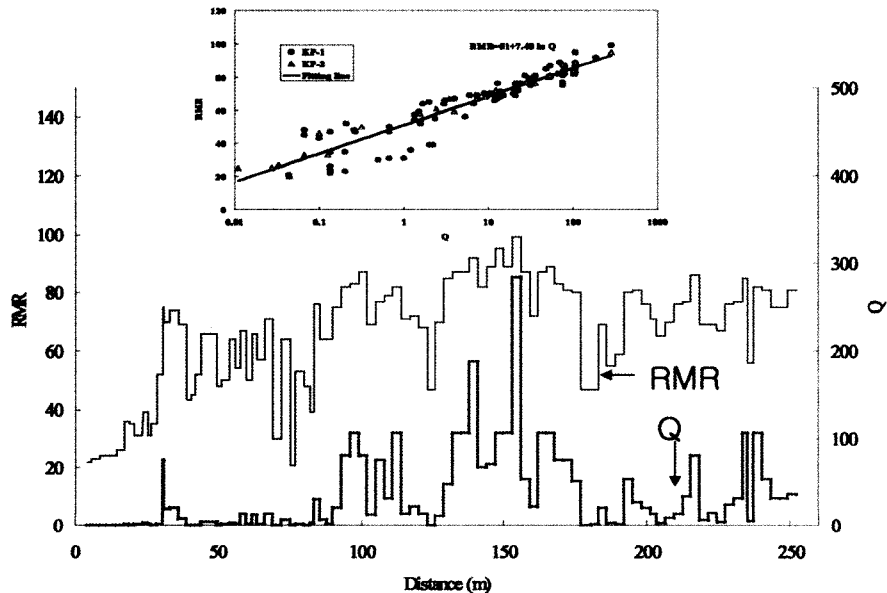


Fig. 12. RMR and Q along the declined drill hole, KP-1

Table 5. Joint spacing, RMR, and Q in the ranges along the declined hole, KP-1

Range (m)	Interval (m)	Avg. joint spacing (cm)	Avg. RQD (%)	Avg. RMR	Avg. Q
30-82	52.9	5.2	44	57	6
82-125	42.6	24	76	73	42
125-177	51	80	94	86	93
177-192	15.2	2.8	35	55	5
192-252	60.1	15	79	75	33
0	Average	28	71	71	40

간의 폭을 고려하여 계산된 RMR 평균값은 71로서 전체적으로 “Good rock”으로 분류할 수 있다. 연구모듈이 위치하는 구간에서의 Q 값을 이용하여 최대무지보 터널 폭을 추정할 수 있다(Bieniawski, 1984).

$$\text{Maximum span (m)} = 2 \text{ ESR } Q^{0.4} \quad (8)$$

ESR을 1로 가정하면 무지보 최대 터널 폭은 8.1 m, ESR=0.8인 경우 6.5 m로 계산된다.

지하 암반에서의 불연속면의 방향성이나 발달상태에 의한 암반의 이완영역 분포양상 등을 파악하기 위해 텔레뷰어를 통한 시추공 조사가 실시되었다. Fig. 13은 경사공에서 얻어진 절리 방향을 통계처리한 것으로 N30°E 방향과 NS 방향의 절리가 우세하게 나타남을 알 수 있다. 현재 고려중인 터널의 방향(N56W)이 주절리 방향과 직각에 가깝게 놓이기 때문에 터널 안정성을 유지하는데 유리할 것으로 판단된다.

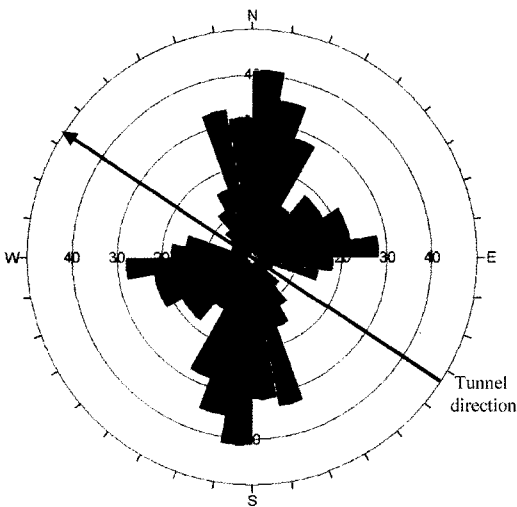


Fig. 13. Rose diagram of joints detected from televiewer in KP-1 hole

2.5 지질조사를 통해 얻어진 선구조도

Fig. 14는 선구조분석을 통해 예상했던 구조선과 물리탐사 및 시추조사를 통해 파악된 구조선을 비교하고 있다. 물리탐사를 통해 음영기복도에서의 선구조 분석에서 찾아낼 수 없었던 구조선들을 찾아낼 수 있었으며 이를 경사시추를 통해 확인할 수 있었다. 그림에서 보듯이 원으로 표시된 조사지역에 여러 개의 구조선이 존재하며 조사지역 중앙에 터널을 Fig. 14(b)와 같이 건설하게 되는 경우 3개의 구조선이 터널과 교차할 것으로 예상된다. 향후 처분장 안전성에 큰 영향을 미치는 구조선 주변에서의 연구 계획 및 구조선의 영향을 반영한 보강 방안이 수립되어야 할 것이다.

3. 처분연구 터널의 개요

원자력연구소 부지내에 지하처분연구 터널을 건설하는 경우에 대한 자료조사 및 전기비저항탐사와 탄성파탐사, 시추 및 시추공 시험이 실시되었으며 이를 통해 지하처분연구시설의 최소요건을 만족할 수 있도록 진입터널과 연구모듈의 개념을 다음과 같이 도출하였다.

- 연구모듈은 원칙적으로 진입터널 끝 부분에 좌우 양쪽에 하나씩 배치하며, 산 정상부 아래에 위치하도록 함으로써 효과적으로 심도를 확보할 수 있도록 한다.
- 연구모듈이 지표면에서 가장 깊은 곳에 위치할 수 있도록 약 230 m 길이의 진입터널을 굴착한다(Fig. 15).
- 진입터널의 경사는 하향으로 하며 굴착 및 지보 작업, 운영시의 작업성 및 현지의 지형, 지질 조건 고려하여 5~10% 범위에서 조정하도록 한다(Fig. 16).
- 진입터널 양쪽의 연구모듈의 길이는 각각 25m로 경사를 상향 1~3%로 함으로써 자연배수가 가능하도록 설계한다.
- 터널을 발파에 의해 굴착되며 진입터널과 연구모듈의 형태는 말뚝굴형태를 갖도록 한다. 터널 단면의 크기는 6 m×6 m로 기계식 천공 및 발파작업이 가능하게 함으로써 깨끗한 터널 곡면을 얻을 수 있도록 한다.

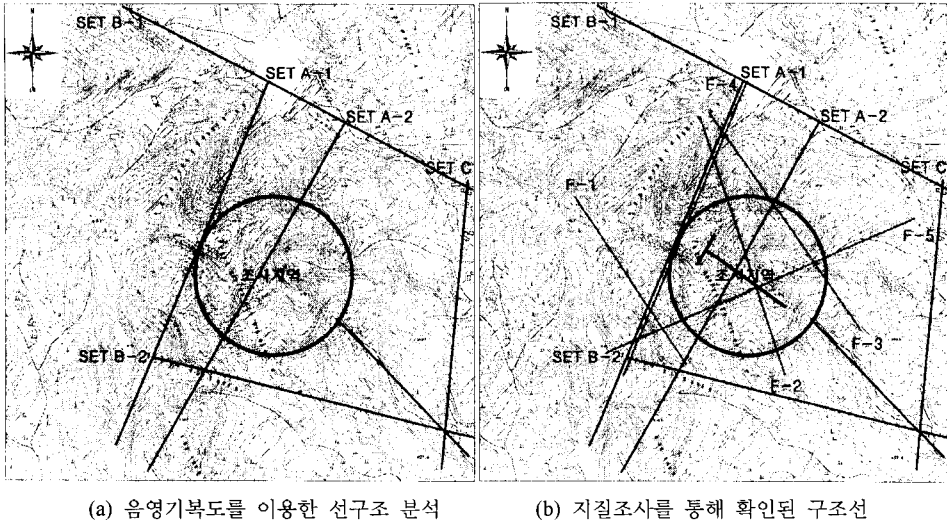


Fig. 14. Lineaments from geological survey

- 적합한 집수정 및 펌프 설계를 통해 터널로 유입되는 지하수를 배출하도록 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.

4. 결 론

고준위방사성폐기물의 지층처분을 위한 개념 도출을 위해서는 처분장 모양으로 고려하는 암반과 유사한 암반에 연구용 터널을 굴착하고 암반의 거동과 암반에서의 지하수의 이동을 파악함으로써 처분개념의 안전성을 평가하는 것이 필요하다. 지하연구용 터널의 개념을 선정하기 위해서는 처분장에서의 지하구조물 개념, 처분개념, 수행될 실험과 지질조건 등을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 원자력연구소 부지내에 지하처분연구

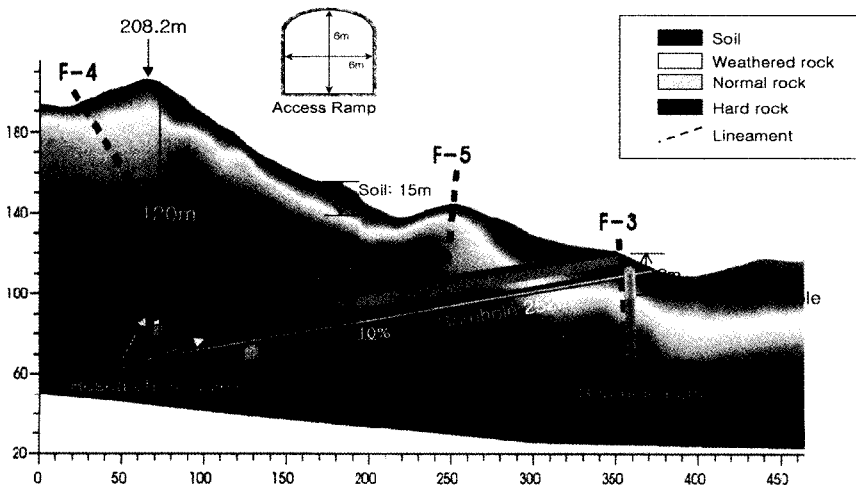


Fig. 15. Overview of the underground research tunnel

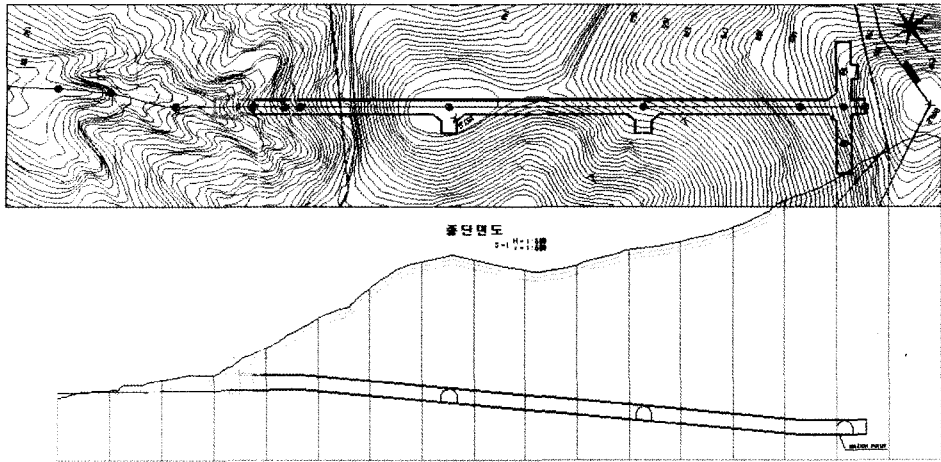


Fig. 16. Concept design of the underground research tunnel

시설을 건설하는 경우를 가정하여 예상 부지에서의 지표지질조사, 물리탐사, 수직시추 및 경사시추 작업을 실시하였으며 이를 통해 지하처분연구시설의 최소요건을 효과적으로 만족시킬 수 있는 진입터널 및 연구모듈의 개념을 선정하였다.

굴절파탐사 및 전기비저항 탐사를 통해 부지에서의 풍화토의 두께, 구조선의 위치 및 경사 등을 예상할 수 있었다. 국지 균열대는 진입터널을 사교하는 NW 방향 균과 NE 방향균이 존재하는 것으로 나타났다. 텔레뷰어를 통한 절리 분포 분석 결과, 주요 절리균의 방향은 N30E와 NS 방향으로 예상 터널 방향에 거의 직각으로 놓이므로 터널 안정성 확보에 유리할 것으로 판단된다. 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 분포하며, 그 하부는 연암층 이상의 암반이 풍화대와 유사한 분포 양상을 보이고 있다. 선구조분석과 물리탐사를 통해 예측된 구조대의 존재, 풍화대 및 연암의 분포, 절리균의 분포는 수직공과 경사공 시추를 통해 확인할 수 있었다. 특히 터널 예상 진행 방향으로의 경사공 시추를 통해 터널이 굴착되는 경우 예상되는 지층의 변화, 암반의 상태, 단층 및 파쇄대, 지하수 유입 구간, 암반의 물성 등을 파악할 수 있었으며 이러한 자료를 설계에 반영함으로써 보다 안전하고 경제적인 시공이 가능할 것이다.

처분관련 연구가 주로 수행될 연구모듈을 최소 100 m 두께 이상의 심도에 의해 격리시키기 위해 하향 10%의 경사로 터널을 굴착하는 경우, 진입터널의 대부분과 연구모듈이 고준위 처분장 모암으로 고려되는 화강암반에 위치함을 시추를 통해 알 수 있었다. 암반 분류 결

과 진입터널은 부분적으로 연약한 지반을 만나겠지만 대체적으로 양호한 암반(fair rock)이상의 암반에 건설될 것으로 보인다. 연구모듈이 위치할 암반의 경우, RQD는 약 80, RMR=75, Q=33으로서 와이어메쉬나 록볼트와 같은 지보로 유지가 가능할 것이며 따라서 THM 시험을 포함한 암반에서의 각종 시험을 수행이 가능할 것으로 판단된다. 수직공에서 측정된 지하수위는 지표 아래 18.5 m로 일정하게 유지되기 때문에 연구모듈이나 진입터널에서의 지하수 유동 연구 수행이 가능할 것이다. 구간별로 변화하는 암반조건과 단층 및 함수절리대의 존재는 암반 거동 연구나 처분개념실증, 안전성평가에 필요한 입력 자료 생산에 필요한 연구 환경을 제공할 것으로 보인다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부 주관 국가중장기 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 권상기, 2002, 고준위 방사성폐기물 처분연구, 한국자원공학회지, Vol. 39, 387-402.
2. 권상기, 김경수, 박정화, 조원진, 2003, Concept Development for HLW Disposal Research Tunnel, 2003추계 원자력학회, 용평.
3. 김진웅 외, 1996, 고준위폐기물 처분기술개발-처분시스템 엔지니어링 연구, 제 1차년도 연구보고서, KAERI/NEMAC/RR 174/96, 한국원자력연구소.
4. SKB, 1993, Aspo hard rock laboratory annual report 1992, SKB technical report, SKB TR 93-08.

- 5. 박희인, 이준동, 정지인, 1977, 지질도폭 설명서, 유성도폭, 자원개발연구소.
- 6. Bieniawski, Z. T., 1984, Rock mechanics design in mining and tunneling, A. A. Balkema, Rotterdam.

권 상 기



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

Tel: 042-868-8914
E-mail: kwonsk@kaeri.re.kr
현재 한국원자력연구소 방사성폐기물처
분연구팀 선임연구원

박 정 화



1977년 충남대학교 공과대학 화학공학과
공학사
1982년 충남대학교 공과대학 화학공학과
공학석사
1988년 충남대학교 공과대학 화학공학과
공학박사

Tel: 042-868-2633
E-mail: njhpark@kaeri.re.kr
현재 한국원자력연구소 방사성폐기물처
분연구부 책임연구원

조 원 진



1979년 고려대학교 공과대학 화학공학과
공학사
1984년 한국과학기술원 핵공학과
공학석사
1990년 한국과학기술원 원자력공학과
공학박사

Tel: 042-868-2852
E-mail: wjcho@kaeri.re.kr
현재 한국원자력연구소 방사성폐기물처
분연구부 처분시스템거동실증연구과제책임자, 책임연구원