

KAERI Underground Research Tunnel (KURT)

한국원자력연구원 지하처분연구시설

Won-Jin Cho, Sangki Kwon, Jeong-Hwa Park and Jong-Won Choi
Korea Atomic Energy Research Institute, 1045 Daedeokdaero, Yuseong-gu, Daejeon

wjcho@kaeri.re.kr

조원진, 권상기, 박정화, 최종원
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

(Received March 27, 2007/Approved June 26, 2007)

Abstract

An underground research tunnel is essential to validate the integrity of a high-level waste disposal system, and the safety of geological disposal. In this study, KAERI underground research tunnel (KURT) was constructed in the site of Korea Atomic Energy Research Institute(KAERI). The results of the site investigation and the design of underground tunnel were presented. The procedure for the construction permits and the construction of KURT were described briefly. The in-situ experiments being carried out at KURT were also introduced.

Keywords : underground research tunnel, high-level waste, site investigation, design, construction, in-situ experiments

요약

고준위폐기물 기준처분시스템의 건전성과 처분안전성의 실험적 검증에 필수적 시설인 지하처분연구시설이 한국원자력연구원 부지 내에 건설되었다. 지하처분연구시설의 부지조사 결과에 대해 기술하고, 이 부지에 건설될 지하처분연구시설의 설계, 인허가, 건설 과정과 건설된 시설의 개요에 대해 요약하였다. 또 지하처분연구시설에서 수행 중인 현장실험에 대해 소개하였다.

중심단어 : 지하연구시설, 고준위폐기물, 부지조사, 설계, 건설, 현장실험

I. 서론

원자력연구개발 중장기계획사업의 일환으로 수행된 고준위폐기물처분기술개발의 연구 결과로서 고준위폐기물 기준처분시스템이 제안되었으며, 현재 기준처분시스템의 바탕 위에 국내 고유의 자연환경 조건을 고려한 한국형처분시스템이 개발되고 있다. 이러한 한국형처분시스템의 개발이 성공적으로 이루어지기 위해서는 먼저 처분시스템의 주요 구성요소의 타당성(feasibility), 안정성(stability), 안전성(safety) 및 적합성(appropriateness)에 대한 실험적 검증을 통해 한국형처분시스템의 신뢰도가 확보되어야 한다. 고준위폐기물 처분시스템의 건전성을 실험적으로 입증하기 위해서는 처분시스템이 위치하게 될 지하 환경을 모사할 수 있는 지하처분연구시설의 확보가 필수적이다. 또 향후 처분연구의 방향이 기 개발된 기술의 실증에 집중될 것이며, 고준위폐기물관리 국가정책 수립을 지원하기 위한 실증적 연구도 그 중요성이 점차 부각될 것이다. 따라서 이러한 다양한 요구를 동시에 충족시킬 수 있는 핵심 인프라로서 지하처분연구시설의 확보가 시급한 문제로 대두되었다. 지하처분연구시설에서는 처분시스템의 건전성과 처분안전성에 대한 실험적 검증 외에도 심부지하조건의 예측, 암반의 역학적 특성 규명 등 고준위폐기물처분장의 부지조사, 설계/건설/운영/폐쇄 및 폐쇄 후 관리와 관련된 다양한 기술의 실증이 가능하다. 그러므로 지하처분연구시설의 확보는 국내의 처분기술 수준을 크게 향상시킬 수 있는 좋은 계기가 될 것이다.

지하처분연구시설을 국내에 확보하는 대신, 선진 외국에 이미 건설되어 있는 지하연구시설(URL)을 활용하여 처분관련 연구를 수행하는 방안도 고려해볼 수 있다. 그러나 해외 지하연구시설을 활용하는 방안은 지하연구시설을 소유하고 있는 국가의 연구 및 시설활용 계획에 맞추어 우리나라의 연구항목, 시설 활용시기 등을 조정하여야 하므로, 효율적인 연구수행에 많은 제약이 있고, 시설을 이용하기 위하여 부담하여야 하는 분담금의 규모가 커서 경제적 관점에서 불리하다. 또한 국내 지질환경과 유사한 해외

지하연구시설을 확보할 수 있는 가능성이 적고, 처분 안전성에 대한 대 국민 홍보시설로 활용하는 것도 불가능하다. 따라서 원자력 선진국들은 모두 자국에 독자적인 지하처분연구시설을 건설하여, 연구를 수행하고 있으며, 시설의 규모와 심도는 각국의 실정에 따라 다양하다 [1-10]. 이러한 사항들을 종합적으로 고려할 때, 국내에 소규모의 지하처분연구시설을 확보하고 이를 활용하여 연구를 수행하는 방안이 가장 경제적이고, 효율적인 대안이라고 할 수 있다.

국내에서는 2002년 3 단계 원자력연구개발사업 기획 과정에서 향후 고준위폐기물처분연구의 방향과 관련하여 지하처분연구시설의 조기 확보 필요성이 강력히 제기되었다. 이에 따라 한국원자력연구원 부지 내에 지하처분연구시설 후보부지가 선정되었다. 선정된 후보부지에 대해 지표지질조사, 물리탐사, 시추, 암석 및 암반 물성시험을 포함한 지질조사가 실시되었으며, 지질조사 결과를 바탕으로 지하처분연구시설이 설계, 건설되었다. 유사시설로 한국지질자원연구원에서 폐광을 이용한 지하연구시설을 계획하고 있으나, 폐광을 이용한 시설은 기존의 지하공동을 활용하는 특성 상, 지하암질이 양호하지 못하고 균열이 많아 신선한 기반암을 필요로 하는 고준위폐기물 처분 연구에는 적합하지 않다. 이 논문에서는 한국원자력연구원에 건설된 지하처분연구시설의 건설과정과 시설 개요를 기술하고, 이 시설에서 수행되는 현장실험계획을 소개함으로써, 지하처분연구시설을 이용한 고준위폐기물처분 관련 현장실험을 활성화하고, 다 분야 간의 협력 체제 구축에 기여하고자 한다.

II. 지하처분연구시설 부지

가. 위치

지하처분연구시설의 부지는 지형 자체가 경사가 급한 산지와 구릉으로 되어 있어, 지표면으로부터 자연적인 격리효과를 얻을 수 있는 곳이 적합하다. 부지는 대전광역시 유성구 덕진동 150번지 한국원자력연구원 후면에 위치한 산지로서 한국원자력연구원 부지 북쪽 경계 지역과 인접해 있다 (그림 1). 이 지역은 한국원자력연구원 소유이며, 지목은 개발제한구역(그린벨트)이다.

나. 지질

부지 주변의 지질은 선캠브리아기의 변성암류와 중생대 화강암류 및 맥암이 나타나는 지역이다. 선캠브리아기의 암석은 주로 반상편마상화강암에 의하여 관입되고 기타지역에서는 편상화강암, 복운모화강암, 흑운모화강암, 반상화강암 및 각종 암맥류(안산암류 맥암)에 의하여 넓게 관입되어 있다. 암석은 흑운모편마암을 주로 하고 호상편마암, 석회규산염암, 흑운모편암, 복운모편암 등으로 구성되어 있다. 편마암류와 화강암류의 관계는 점적이다. 중생대 암석은 대부분을 차지하고 있는 복운모화강암이 앞에서 말한 한 선캠브리아기의 흑운모편암을 관입하고, 이를 석영반암 및 맥암류가 관입하고 있다. 중립질 내지 세립질로서 맥상 또는 렌즈상 페그마타이트를 다량 함유하고 있으며 페그마타이트가 농집된 곳에서는 입자가 크다. 부지의 지질은 중생대 복운모화강암과 이를 관입한 산성과 염기성 암맥 및 제4기 풍화잔류토층으로 구성되어 있다. 복운모화강암은 지역적으로 흑운모화강암이나 편상화강암 등과 접촉하고 있으며, 그 관계가 모호하나 점리적인 변화를 보이는 것으로 보아 관입

접촉인 것으로 추정된다. 염기성 암맥은 반상조각이 보이는 안산암질로 확인 되었다. 부지 주변의 단열체계는 N-S계열이 우세하고, 2차적으로는 E-W계열이 우세하며, 맥암류는 N-S계열로 조사되었다. 항공사진에서 관측된 선구조의 주 방향은 N30°W이고 2차 방향은 N50°E이었다. 화강암 질리는 NS~N30°W이고, 맥암류는 N40°W~N30°E가 주방향이다. 편암은 N45°W~N60°E로 경사가 30°~70°로 다양하다 [11].

다. 물리탐사

① 탄성과 탐사

탄성과 탐사의 목적은 부지에 분포하는 지질구조대의 예상 위치와 규모를 파악하고, 전반적인 지층 분포 상태를, 특히 천층부의 연속적인 지층 분포와 지질구조대를 파악하는 것이다. 지하처분연구시설 부지 조사에는 굴절법 탄성과 탐사법이 사용되었다. 처분지하 연구시설 진입터널의 횡단 방향으로 4개 측선을 등 간격(100 m)으로 배열하고, 진입터널 중앙부 및 터널 좌우에 3개의 종 측선을 등 간격(50 m)으로 배열하였다. 탐사 측선의 배열은 그림 2와 같다.

S-1에서 S-3 까지 3개 주요 측선에 대한 탄성과 탐사 결과는 다음과 같다 [11].

1). S-1

탄성과 속도 1,200 m/sec 이하인 상부 토사 및 풍화대에 해당하는 지층이, 측정 200~240 m의 구간을 경계로 시점 쪽에는 평균 2~4 m 내외의 박층으로 분포하고, 종점 쪽에는 평균 15 m 내외의 두께로 비교적 깊게 분포되어 있다. 또 탄성과 속도가 1,200 m/sec 이

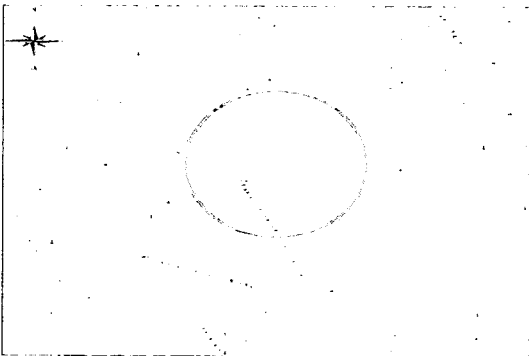


Fig. 1. Location and View of KURT site

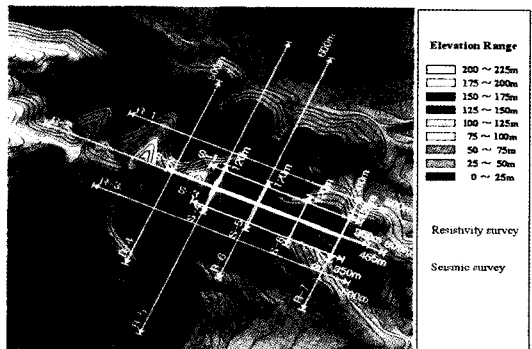


Fig. 2. Survey lines for the seismic survey and the electric resistivity survey

상인 연암층 이상에 해당하는 지층의 분포 양상은 상부의 풍화대 층의 분포와 같은 양상을 보이고 있다 (그림 3). 계곡부를 중심으로 파쇄대가 발달하였으며, 이에 따른 차별풍화로 인해 축선 종점에 저속도 층이 비교적 깊게 분포하는 것으로 판단된다. 탐사 축선에서 파쇄대로 추정되는 지점은 축점 200 m 및 220 m 지점으로, 주시곡선도 및 탐사결과도를 보면 저속도 이상대가 비교적 뚜렷이 나타나는데, 이것은 파쇄대와 연관이 있는 것으로 분석된다.

2). S-2

탄성과 속도 1,200 m/sec 이하인 상부 토사 및 풍화대에 해당하는 지층이 축점 80~230 m 구간을 제외하면 평균 15 m 내외의 두께로 비교적 깊게 분포되어 있으며, 축점 80~230 m 구간은 평균 5 m 내외의 두께로 분포되어 있다. 탄성과 속도가 1,200 m/sec 이상인 연암층 이상에 해당하는 지층은 상부의 풍화대 층과 같은 분포 양상을 보이고 있으며, 이러한 양상은 탐사 결과도에서 볼 수 있는 저속도 이상대와 연관이 있는 것으로 추정된다 (그림 4). 이 축선에서 파쇄대로 추정되는 지점은 축점 250 m 및 360 m 지점이다. 주시곡선도 및 탐사결과도에서 보면 저속도 이상대가 비교적 뚜렷이 나타나는데, 이는 파쇄대와도 연관이 있는 것으로 분석된다. 또 축점 30 m 지점에서도 저속도 이상대가 관찰되는데, 이는 축선과 직각 방향의 파쇄대로 추정된다.

3). S-3

탄성과 속도가 1,200 m/sec 이하인 상부 토사 및 풍화대에 해당하는 지층의 분포 심도는 평균 8~10 m 내외로 지형과 유사한 분포를 보이나, 탄성과속도가

1,200~1,900 m/sec인 연암층은 축점 150~180 m 구간을 경계로 종점에 비해 시점 쪽으로 갈수록 깊게 분포되는 경향이 나타난다. 이러한 양상은 저속도 이상대와 관련된 것으로 추정된다 (그림 5). 탐사 축선에서 파쇄대로 추정되는 지점은 축선 시점에서 축점 180 m 지점으로, 주시곡선도 및 탐사결과도에서 보면 비교적 뚜렷한 저속도 이상대가 관찰된다. 또 축점 325 m 지점에서도 파쇄대와 관련된 것으로 보이는 저속도 이상대가 관찰된다.

② 전기비저항탐사

전기비저항탐사는 단층/파쇄대 및 각종 연약대로 추정되는 저비저항대의 분포 상황을 조사하기 위한 것이다. 지하처분연구시설 진입터널의 횡단 방향으로 4개 축선을 등 간격(100~200 m)으로 배열하고, 진입터널 중앙부 및 터널 좌우에 3개의 종 축선을 등 간격(100 m)으로 배열하였다. 탐사 축선의 배열은 그림 2와 같다.

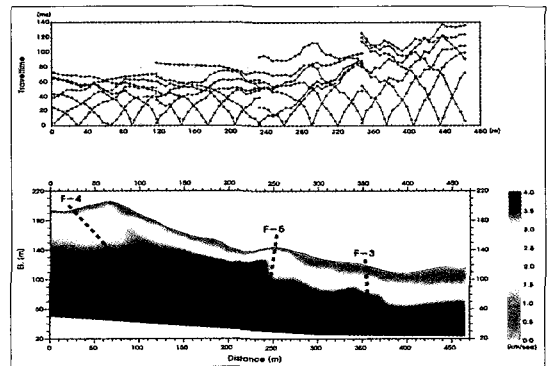


Fig. 4. Seismic survey results along the S-2 line

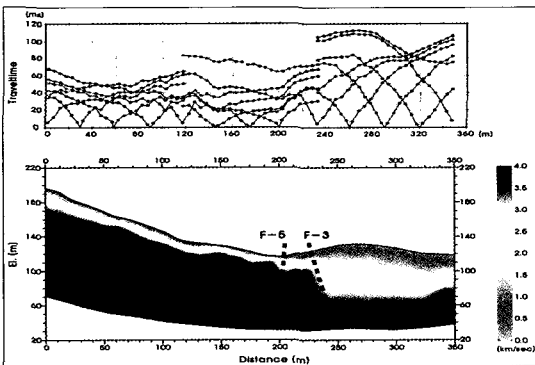


Fig. 3. Seismic survey results along the S-1 line

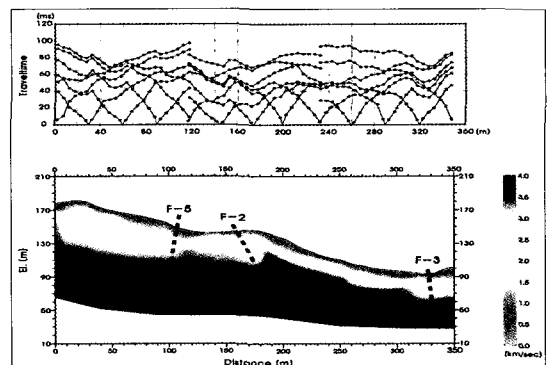


Fig. 5. Seismic survey results along the S-3 line

R-1에서 R-3 까지 3개 주요 축선에 대한 전기비저항 탐사의 결과는 다음과 같다 [11].

1) R-1

이 축선에서는 전반적으로 저 비저항을 나타내는 지층의 하부에 고 비저항의 지층이 분포하는 2층 구조를 보여주고 있으며, 지형 및 지질조건에 의한 영향으로 축선의 시, 종점에서는 1층 구조를, 중앙부에서는 저→고→중→고 비저항 지층의 4층 구조를 부분적으로 보여주고 있다 (그림 6). 탐사결과도의 상부의 저 비저항 층은 토사 및 풍화대로 추정되며, 시점에서 종점으로 갈수록 깊어지는 양상을 보인다. 이 저 비저항의 지층 하부에는 기반암으로 추정되는 치밀한 고 비저항의 지층구조가 분포하고 있다. 파쇄대로 추정되는 지점은 측점 160~270 m 및 측점 340~390 m 지점이다. 특히 160~270 m 지점은 파쇄대로 추정되는 저 비저항대가 지표 하 100 m 내외의 심도까지 분포하는데, 탐사결과도의 분포 범위 및 양상으로 볼 때 2 조의 파쇄대가 축선을 사교하는 것으로 추정된다.

2) R-2

이 축선에서는 시점 부근에서 저 비저항 지층 하부에 고 비저항 지층이 존재하는 2층 구조를 나타내고, 측점 550~600 m 지점에서 저 비저항 지층이 분포하는 것을 제외하면, 전반적으로 저→고→저→고 비저항 지층의 4층 구조를 나타내고 있다 (그림 7). 축선 시점은 상부 풍화대의 하부에 기반암이 분포하는 2층 구조로 추정되며, 측점 550~600 m 지점은 철책선과 전주의 영향으로 인해 비정상적인 저 비저항 분포를 보이는 것으로 추정된다. 또 축선 중앙의 4층 구조는 측

점 170 m 지점의 지표상에서 측점 400 m 지점의 탐사 심도 하부까지 분포하는 저 비저항 이상대로 인해 상부의 기반암과 하부의 기반암이 분리된 형태로 존재하는 것으로 추정된다. 파쇄대로 추정되는 지점은 측점 270~290 m 및 측점 470~530 m 지점이다. 특히 측점 470~530 m 지점은 파쇄대로 추정되는 저 비저항대가 지표 하 100 m 내외의 심도까지 분포하는데, 탐사결과도의 분포 범위 및 양상으로 미루어볼 때 2 조의 파쇄대가 축선을 사교하는 것으로 판단된다.

3) R-3

이 축선은 시점 및 측점 390~440 m 지점에서 나타나는 저 비저항대와 측점 180~260 m 지점의 저→고→중→고 비저항 지층의 4층 구조를 제외하면 전반적으로 저 비저항 지층 하부에 고비저항 지층이 분포하는 2층 구조를 나타낸다 (그림 8). 탐사결과도에 나타나는 상부의 저 비저항 지층은 토사 및 풍화대로 추정되며, 그 하부에는 기반암으로 추정되는 치밀한 고 비

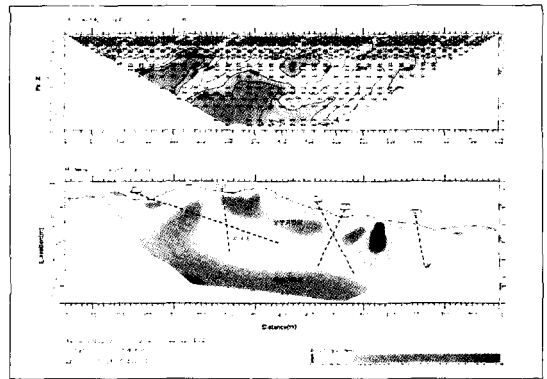


Fig. 7. Electric resistivity survey results along the R-2 line

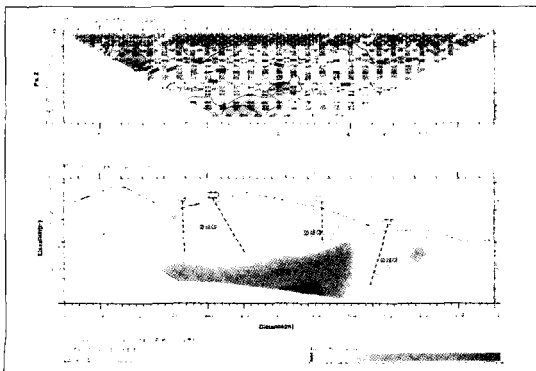


Fig. 6. Electric resistivity survey results along the R-1 line

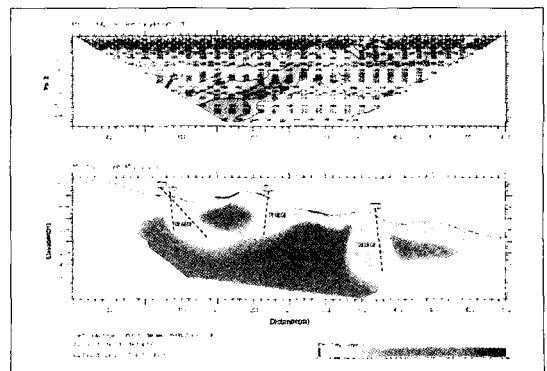


Fig. 8. Electric resistivity survey results along the R-3 line

저항의 지층 구조가 분포되어 있다. 또 측점 180~260 m 지점에서 나타나는 4층 구조는 측점 130~170 m 지점 및 측점 260~290 m 지점에 위치한 저 비저항대의 영향으로 상부 기반암과 하부 기반암이 분리된 형태인 것으로 추정된다. 이 측선의 결과는 R-2 측선의 결과와 유사한 경향을 나타낸다. 파쇄대로 추정되는 지점은 측점 130~170 m 및 측점 260~290 m의 지점이다. 이 중 130~170 m 지점은 파쇄대로 추정되는 저 비저항대가 지표 아래 60 m 내외의 심도까지 분포하고 있다.

이상과 같은 측선 별 전기비저항 자료를 종합하여 지하처분연구시설 진입터널 및 연구모듈 건설 예상 지점의 수평적 전기비저항 분포를 분석, 평가하면 그림 9와 같다. 이 그림을 통해 대상 지역의 지질구조대를 파악하고, 암질을 평가할 수 있다. 진입터널 및 연구모듈의 심도에서의 전기비저항 영상들을 살펴보면, 이 지역에 분포하는 저 비저항 이상대는 크게 진입터널을 사교하는 저 비저항 이상대(F-2, F-3, F-5)와 이에 대해 수직 방향으로 발달한 이상대(F-4)로 나눌 수 있는데, 이들 저 비저항대는 단층 또는 파쇄대로 추정된다. 진입터널 및 연구모듈 구간의 전기비저항 분포를 살펴보면 3개의 단층 또는 파쇄대(F-2, F-3, F-5)가 진입터널을 사교하는 방향으로 발달하고 있는 것으로 추정되며, 이들 파쇄대로 인해 터널 시점에서 중앙에 이르는 지역은 비저항이 낮은 다소 불량한 암질이 분포되어 있는 것으로 보이나, 연구모듈이 위치하는 터널 종점은 대체로 비저항이 2,000 Ω·m 이상인 양호한 암질이 분포되어 있다.

라. 시추조사

지층의 상태와 지반공학적 특성, 기반암의 분포상태 및 풍화도 등 파악하고, 시료의 채취 및 각종 원위 치 공내시험을 실시하여 설계에 필요한 지반자료를 파악하기 위하여 수직시추와 경사시추가 실시되었다 [11,12]. 수직시추공과 경사시추공의 위치를 그림 10에 나타내었다.

① 수직시추

터널 갱구부가 위치할 것으로 예상되는 지역의 풍화도층 깊이 및 풍화대 양상을 확인하여 갱구부 안정

성여부를 파악하고, 지질공학적 특성을 확인하기 위하여 예상 터널 갱구부 위치에 상하 좌우로 약 10 m 이격시켜 수직방향으로 160 m (EL. 55 m)까지 시추하

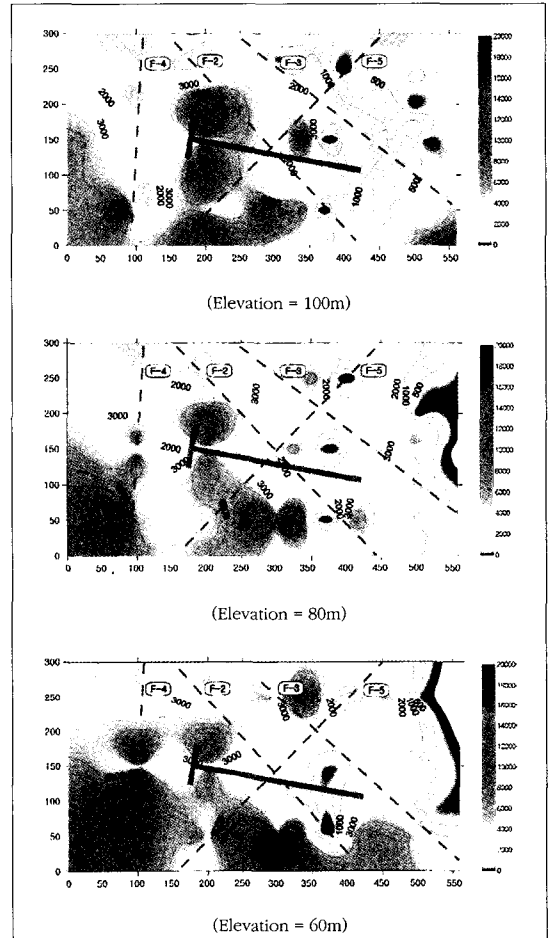


Fig. 9. Electric resistivity contour at the different elevations

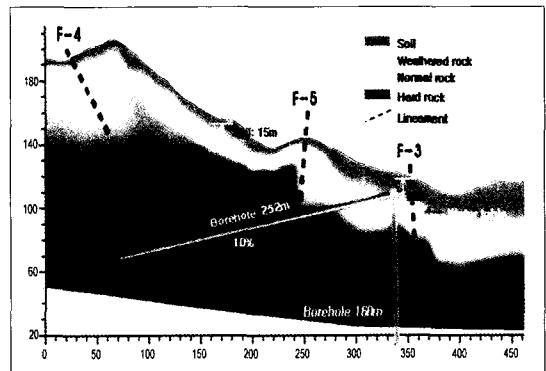


Fig. 10. Schematic view of the borehole drilling

였다. 수직공 시추결과 상부로부터 2.0 m까지 풍화토, 4.2 m까지 풍화암, 10.3 m까지 연암, 19.8 m까지 보통암, 그 하부로 경암이 존재하는 것으로 나타났다. 상부 일부구간 (4.0 m~4.2 m, 4.8 m~6.3 m)에서만 안산암질 암맥이 관찰되며, 전체적으로 흑운모 화강암이 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. 수직공에서의 지하수면은 지하 18.5 m에 일정하게 유지되고 있다.

기반암인 편마암질 화강암 및 흑운모 화강암 외에 안산암질 중성 암맥 (4.1~4.2 m, 4.7~6.3 m)이 분포하는 것을 확인하였다. 중성 암맥 경사는 45NW로 가정할 경우 중성 암맥 폭은 0.2~1 m 내외로, 산출 상태로 보아 갱구부 입구 중성암맥 양상과 동일한 것으로 판단된다. 중성 암맥의 상부 구간은 심하게 파쇄되어 있을 뿐 아니라 풍화변질도 심하게 받아, 전체적으로 매우 불량한 상태를 나타낸다. 또한, 52 m~55 m 구간은 파쇄대 구간으로 접촉면은 smooth한 상태이다. 기반암인 담회색인 편마암질 화강암과 담홍색인 흑운모 화강암은 점이적인 변화로 복잡한 양상이고, 21 m 중심으로 상하부가 현저한 차이를 보인다. 상부 구간은 풍화대가 다수 발달하고 있어 이로 인해 전반적으로 RQD가 낮게 나타난다. 그러나 하부구간은 조사 지역의 전반적인 기반암 상태와 마찬가지로 RQD가 거의 90~100%에 가까운 매우 양호한 상태를 보여 준다 (그림 11).

② 경사시추

경사시추는 진입터널 및 연구모듈 굴착 부분의 지

반투성을 조사하여 진입터널과 연구모듈의 설계에 반영하기 위한 것이다. 탄성과 탐사 및 전기 비저항 탐사 결과와 지형특성을 종합적으로 해석하면, 진입터널이 위치할 것으로 예상되는 지역에 대규모 지질구조선이 N30E 방향으로, 소규모 지질구조선이 N30W와 NS 방향으로 분포하는 등 3 조 이상의 지질구조선이 존재할 것으로 예상된다. 따라서 진입터널의 굴진방향과 평행하게 시추하여 NS, N30W, N30E 방향의 지질구조선의 지질학적 및 지질공학적 특성을 확인하였으며, 특히 가장 상태가 좋지 않은 것으로 추정되는 N30E 방향의 지질구조선의 특성을 확인하는데 중점을 두었다. 이를 위해 시추 위치는 갱구부 예상위치에서 상하, 좌우로 약 10 m 이격시켜, 진입터널 굴착 방향과 평행하게 (NS6W 방향), 하향 경사 10%로 252 m를 굴착하였다.

경사시추 결과, 시추공 입구에서 4 m 까지 풍화토, 14 m 까지 풍화암, 28 m까지는 연암이 나오며 이후에는 경암이 나타난다. 단층 점토와 단층 각력이 나타나는 단층대는 70 m 구간에서 0.8 m, 75 m 구간에서 2 m 폭으로 나타난다. 시추공을 따른 암반의 상태는 입구에서 90 m까지는 절리가 많으나, 9~110 m 구간에는 양호한 암반이 나타난다. 110~125 m 구간은 절리가 많으며, 이후 180 m까지 양질의 경암 구간이 계속 되다가 180~190 m에서 파쇄대가 나타나며, 그 이후에는 252 m까지 양호한 암반이 나타났다 (그림 12).

기반암인 편마암질 화강암 및 흑운모 화강암 외에 안산암질 중성 암맥이 10 개소 (28.2~29.0 m, 47.3~47.5 m, 47.9~48.3 m, 48.5~51.2 m, 124.7~127.4 m,

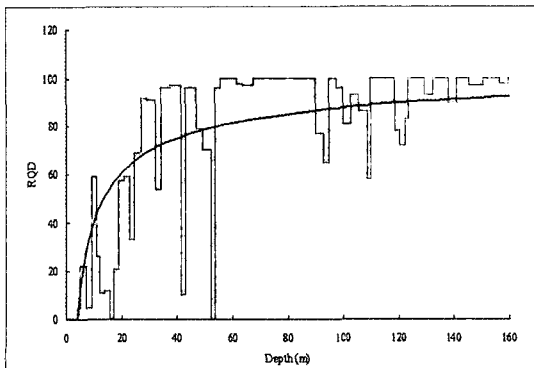


Fig. 11. Variation of RQD(Rock Quality Designation) values

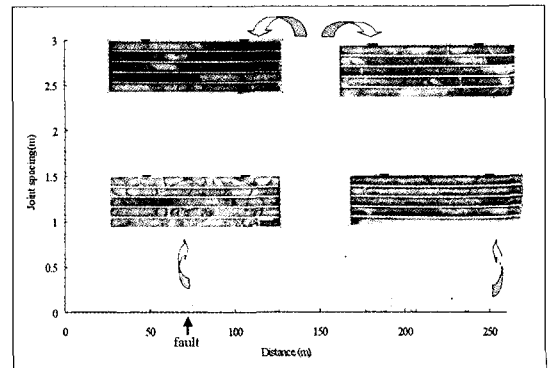


Fig. 12. Variation of the joint spacing along the declined borehole

217.2~218.0 m, 235.3~238.4 m, 240.5~241.1 m, 241.9~243.0 m, 244.1~246.0 m)에 분포하는 것을 확인하였다. 중성 암맥의 경사를 45NW로 가정할 경우 중성 암맥의 폭은 3~5 m 내외로, 산출상태로 보아 갭구부 입구에 있는 중성암맥의 양상과 동일할 것으로 예상된다. 중성 암맥의 상부 구간은 심하게 파쇄되어 있을 뿐 아니라 풍화변질도 심하게 받아 전체적으로 매우 불량한 상태를 나타낸다. 중성 암맥의 하부 구간은 편마암질 화강암이나 흑운모 화강암으로 신선하고 예리한 관입접촉 관계를 보인다. 69~77 m 구간은 단층 및 파쇄대구간으로, 단층면 상태가 smooth 내지 slickenside 형태로 관찰되어 물리탐사에서 예상한 N30E 구조선인 것으로 추정된다. 이 구간은 지하수 피압구간으로, 지하수 유출량은 11 ton/day이다. 177~190 m 구간은 파쇄대 구간으로 시추굴진 후 다량의 지하수가 유출되는 것을 확인했으며, 투수시험에서 얻은 투수계수도 다른 구간에 비해 다소 높다.

기반암인 담회색 편마암질 화강암과 담홍색인 흑운모 화강암은 점이적인 변화 양상을 나타내며, 50 m 중심으로 상하부가 현저한 차이를 보여준다. 상부 구간은 풍화대가 다수 발달하고 있어 이로 인해 전반적으로 RQD가 낮게 나타난다. 그러나 하부구간은 조사 지역의 전반적인 기반암 상태와 마찬가지로 RQD가 거의 90~100%에 가까운 매우 양호한 상태를 나타낸다.

마. 부지 지질 특성

지하처분연구시설 부지 대상 지역은 풍화토와 풍화암이 진입터널의 종축방향을 따라 평균 5~15 m 내외, 터널 횡축방향으로는 평균 8~13 m 내외의 두께로 지형을 따라 분포하고 있다. 암반의 상태는 심도가 증가함에 따라 향상되어, 지표 하 25 m 이상에서는 양호한 암반이 나타난다. 따라서 이 지역에 지하처분연구시설을 건설한다면, 최단 거리의 진입터널로서 지표로부터 상당한 심도를 확보할 수 있다. 대상 지역 내에 존재하는 절리군은 지하시설의 안정성에 긍정적인 방향으로 발달되어 있으며, 지하수면도 안정되어 있다. 또 연구모듈이 위치하는 진입터널 종점 부근은 양호한 암질이 분포되어 있고, 암맥과 접촉면이나 지질

구조선 주변을 제외하고는, 전체적으로 풍화나 변질을 거의 받지 않은 매우 신선한 상태를 나타내어, 지하처분연구시설 대상 암반으로서 양호한 조건을 갖추고 있다.

Ⅲ. 지하처분연구시설 설계

가. 심도

지하처분연구시설이 가져야 하는 최소 요구사항은 연구시설이 지표로부터 두께가 최소 50 m 이상인 신선한 암반층에 의해 격리된 지하에 위치하여야 한다는 것이다. 지하 심부환경에 대한 연구결과 [13]에 따르면, 두께 50 m 이상의 신선한 암반층에 의해 격리된 지하에서는 산화환원준위(redox potential)가 급격히 감소하여 비산화 조건(anaerobic condition) 혹은 환원 조건(reducing condition)이 얻어지는 것으로 확인되었다. 일단 두께가 최소 50 m 이상의 신선한 암반층이 확보되면, 이 이상 깊이에서는 산화, 환원조건이 심도와는 큰 관계가 없고, 암반에 존재하는 광물의 종류에 따라 달라진다 [13]. 따라서 지하처분연구시설이 이러한 최소 심도의 요건을 만족시키면서도, 지상으로부터 지하시설에 이르는 진입터널의 길이는 최소화시켜 경제성을 높일 수 있도록 부지를 선정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 이러한 제약조건을 감안하고, 앞 절에서 기술된 부지조사 결과를 고려하여, 분석 및 평가[14-17]를 거쳐 최적 지하처분연구시설을 설계하였다.

나. 시설의 구성 및 배치

지하처분연구시설은 크게 나누어 처분관련 연구의 대부분이 수행되는 심부 암반 내에 위치한 연구모듈(research module)과 연구모듈과 지상을 연결하는 진입터널(access tunnel)로 구성된다.

지하처분연구시설의 배치와 선형을 결정하는데 있어 가장 중요한 원칙은 지하시설이 한국원자력연구원 소유의 토지 안에 위치하여야 하며, 토지의 경계선으로부터 상당히 떨어져 있어야 한다는 점이다. 만일 연구시설의 일부분이라도 연구소 소유의

토지 경계를 벗어나게 되면, 비록 지표로부터 토지의 법적 소유권이 미치는 심도 아래에 있는 심부 암반에 위치하고 있다하더라도 각종 민원사항이 발생될 우려가 있다. 또 연구시설 부지는 개발제한구역(그린벨트) 내에 위치하고 있으므로 시설을 건설하기 위해서는 토지의 형질 변경과 그린벨트 훼손 허가를 얻어야 하며, 이러한 허가가 가능하기 위해서는 지하처분연구시설이 국가공업단지개발계획선 내에 위치하여야 한다.

연구모듈이 부지 내에서 고도가 가장 높은 산 정상부 부근의 지하 암반에 위치하도록 하면서도 진입터널의 길이를 가장 짧게 하기 위해서는, 진입터널의 선형을 직선으로 하여야 한다. 또 주어진 지형 조건과 동일한 진입터널의 길이로 연구모듈의 심도를 최대한으로 크게 하기 위해서는 진입터널이 하향경사를 갖도록 하여야 한다. 터널은 가급적 직선으로 하되, 지질 상태를 고려하여, 필요한 구간에서 약간의 곡선 부분을 허용한다. 하향경사를 가진 진입터널이 끝나는 부분에서, 진입터널을 사이에 두고 양쪽에 하나씩 모두 두개의 연구 모듈을 서로 마주보게 T자 형으로 배치하는 것을 원칙으로 하나, 지하 암반의 상태에 따라 다소 변경시킬 수 있다. 연구모듈은 산 정상 부근 하부에 위치하도록 하여 모듈의 지하 심도가 최대가 되도록 한다. 연구모듈은 상향경사를 가져 주위 암반으로부터 모듈 내로 누수되는 지하수가 자연적으로 진입터널 막장 부분과 연구모듈이 만나는 접합부에 설치된 집수정(sump)에 모이도록 한다. 진입터널의 갱구부(portal)는 그 설치 위치에 따라 진입터널의 길이가 달라지므로 경제성 측면에서 중요하다. 이 지하연구시설에서는 산 정상의 지하에 연구모듈을 배치하면서도 가급적 진입터널의 길이를 짧게 하기 위해 부지에 있는 계곡이 끝나는 막다른 지점에 갱구부를 굴착하였다.

다. 기본설계

지하처분연구시설의 건설과 운영이 경제적이고 효율적이 될 수 있도록 위에서 언급한 구성 및 배치계획에 따라 설계를 수행하였다.

① 갱구부

갱구부 구조물의 종류는 안정성, 시공성, 미관 및 기상조건을 고려하여 결정하는데, 갱구부 굴착 시 다량의 대결토가 발생하여 산림과 자연경관이 심하게 훼손이 우려가 있으므로, 환경친화적이고 자연훼손을 최소화할 수 있도록 하는 것이 중요하다. 지하처분연구시설의 경우 시점부는 종단상 급경사를 형성하고 있고 교통량이 거의 없으므로, 공사비가 저렴하고 자연훼손 면적이 작으며 시공이 용이한 면벽형을 선정하였다. 갱구 부근은 암반의 특성이 불량하여 구조적으로 취약하므로, 터널 벽을 록볼트(rock bolt), 슛크리트, 라이닝 등으로 충분히 보강한다 (그림 13).

② 지하시설

지하터널의 배치 방향은 터널의 안정성 및 수리 안정성을 유지하면서, 가장 경제적으로 건설될 수 있도록 결정되어야 한다. 이를 위해 부지조사 과정에서 확인된 지질구조대 및 절리 등의 지질구조선 분포 상태, 수리지질 특성, 주응력 방향 등을 고려하여 터널의 배치 방향을 결정하였다.

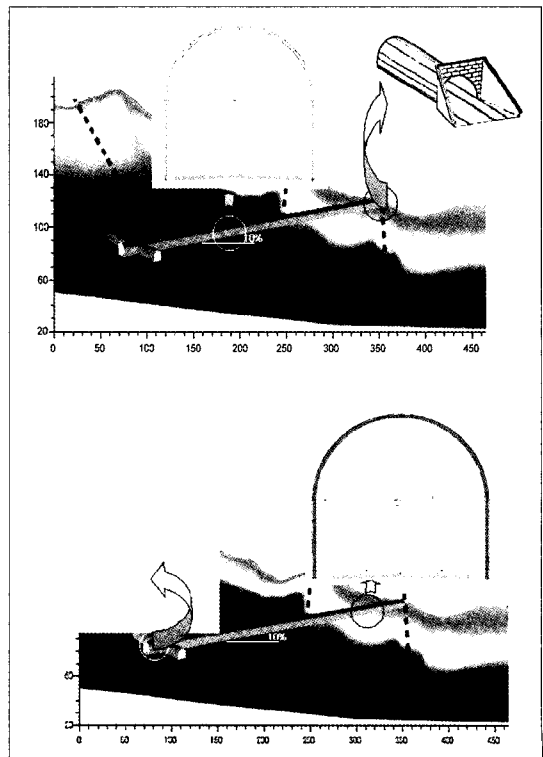


Fig 13. Sectional design concept of KURT

도로설계요령[18]에 따르면, 지하시설의 평면선형은 시설의 사용목적과 시공 측면을 감안하여 가급적 직선으로 계획하고, 부득이한 경우에는 큰 곡선반경을 적용하여 설계하도록 규정하고 있다. 따라서 지하처분연구시설의 진입터널과 연구모듈의 평면선형은 모두 직선으로 하였으며 설계속도는 20 km/hr로 하였다. 연구모듈은 지반등급 분류 Type-II 이상인 지역에 위치하도록 하며, 심도는 지상으로부터 80 m 이상 확보하도록 한다. 진입터널은 연구모듈이 이 심도를 확보할 수 있는 종단 경사를 가져야 하며, 터널의 종단경사는 이 외에도 주행의 안정성, 환기의 효율성, 방재 설비, 배수 및 시공능률 등을 고려하여 결정하였다. 진입터널의 하향경사 기울기가 크면 클수록 동일한 진입터널의 길이로 얻을 수 있는 연구모듈의 심도가 크나, 건설비용이 증가하고, 시설의 운영에 어려움이 커진다. 여기서는 차량 및 사람의 통행 편의를 고려하여 진입터널의 하향경사를 -10%로 하였다. -10%는 통상적인 차량의 통행이나, 보행에 특별한 불편이 없는 터널의 기울기이다. 연구모듈은 주위 암반으로부터 모듈 내로 누수되는 지하수가 자연배수될 수 있도록 상향경사 +2%를 갖도록 하였다. 진입터널과 연구모듈의 표준 횡단경사는 좌우 측벽 부 유도배수를 위하여 2%를 적용하였다. 진입터널의 연장은 180 m이고, 연구모듈은 진입터널 종점에서 좌우측에 배치된 길이가 각각 45 m 및 30 m인 2개 모듈로 구성되어 총 연장이 75 m이다.

진입터널과 연구모듈의 단면은 연구설비의 설치 및 운영에 필요한 최소 단면과 환기에 필요한 최소 단면을 고려하여 선정하였다. 지하처분연구시설의 터널은 단면의 규모가 작기 때문에 단면 형태나 규격에 따라 활용성, 시공성 및 경제성이 달라진다. 따라서 시공 용이성 및 장비 조합 등을 검토하여 단면 검토 안을 설정하고, 이 안들에 대해 구조적 안정성을 분석한 후, 안정성이 확보된 방안들에 대해 경제성을 고려하여, 최적 단면을 선정하였다. 선정된 진입터널 및 연구모듈의 내공단면은 모두 마제형으로, 폭 6 m 및 높이 6 m이다.

지하처분연구시설은 처분 관련 연구에 적합하도록 천연 상태의 모암을 노출시키기 위해 가능한 한 최소

지보공을 이용하여 설계하였다. 터널 설계 시, 지하시설의 요구 성능, 터널 시공의 안전성, 경제성뿐만 아니라 완공 후 터널의 안정성과 지하시설 내에서 연구자의 안전을 확보하기 위한 부대설비도 함께 고려하여야 한다. 진입터널 및 연구모듈 부분의 벽은 안전에 지장이 없는 범위에서 지보를 최소화하며, 특히 연구모듈은 안전에 지장이 없는 범위에서 가급적 록볼트 (rock bolt) 등으로 지보를 최소화하여, 터널 벽과 바닥의 암반이 노출되도록 한다 (그림 13). 연구 모듈의 굴착에는 터널의 여굴을 최소화하기 위해 조절발과 공법을 적용한다.

이상과 같은 지하처분연구시설 개념을 그림 14에 나타내었으며, overall layout은 그림 15와 같다.

시험발파를 통해 얻어진 진동 추정식을 이용하여 발파설계에 따라 터널건설이 이루어지는 경우에 대해 주요 지점에서의 발파 진동을 예측하였다. 터널 입구에서 140 - 170 m 구간의 경우 Type-1 에 해당하는 양

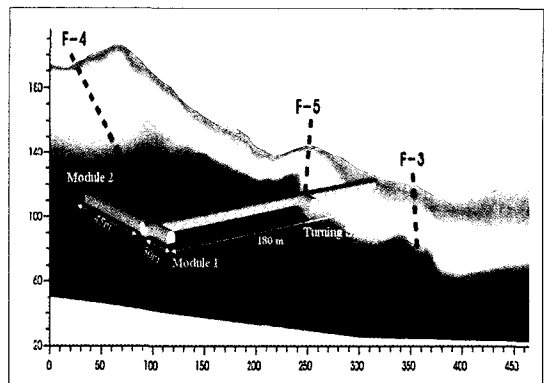


Fig. 14. Schematic drawing of KURT

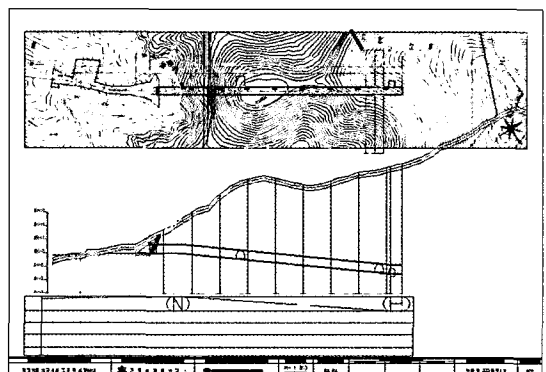


Fig. 15. Overall layout of KURT

질의 암반이 나타나며 이곳에서 발파에서는 총 장약량은 117 kg, 지발당 최대 장약량은 9 kg 으로 가정한다. 주변장에 설치되는 정밀 폭약은 26 kg이다. 터널 입구부의 경우 Type-6 약한 암반이 나타나며 이곳에서는 총장약량 31 kg, 지발당 장약량은 2.25 kg 정도로 사용함으로써 발파에 의한 암반 손상이 과다하게 발생하지 않도록 한다. 200 m 거리에서 P-1 발파 타입에 의해서 발생될 것으로 추정되는 진동은 0.189 cm/sec 로 타나났다 (그림 18). 터널 입구에서 100 m 정도 떨어진 STA-168에서 P-2 타입으로 발파가 있을 경우, 최대의 발파진동이 나타날 것으로 예상되며 이때 수송용기시험시설에서 0.092 cm/sec의 최대 진동이 예상되지만 발파 설계 기준인 0.2 cm/sec에 비해서는 절반 정도임을 알 수 있다.

라. 구조적 안전성 분석

지하처분연구시설 설계의 구조적 안전성을 평가하기 위해 3차원 유한차분프로그램인 FLAC3D [19]를 이용한 역학적 해석을 수행하였다.

안정성해석 모델링에 사용된 암반의 물성은 부지의 시추공에서 회수된 암석코어를 이용한 물성시험과 시추공에서의 불연속면에 대한 조사를 통해 얻어진 값을 사용하였다 (표 1). 불연속면의 영향은 Fossum에 의해 제안된 식을 이용하여 간접적으로 고려하였으며, 유효 bulk modulus, 유효 shear modulus는 무결함 암석의 물성과 불연속면의 물성을 사용하여 다음과 같이 계산하였다.

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

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

여기서 E는 무결함의 탄성계수, ν는 무결함의 포아송비, S는 절리간격, kn 과 ks는 불연속면의 수직강성 및 전단강성을 나타낸다. 표 1의 값을 이용하여 암반의 bulk modulus, K_m 과 shear modulus, G_m 을 구하면 $K_m = 20.8$ GPa, $G_m = 10.84$ GPa 이다 [16].

터널이 지표면에서 가까운 곳에 위치하며, 터널 진행 방향으로 지형의 변화가 심하기 때문에, 이를

Table 1. Properties of the Granite in KURT Sit

| 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 |

고려하기 위해 실제 지형의 변화를 역학적 안정성 평가 모델의 메쉬 작성에 반영하였다. 또 터널의 경사가 -10%인 경우, 수평터널의 경우와 차이가 있는 것을 고려하여 모델 메쉬의 작성 시에 터널에 경사를 줄 수 있도록 하였다. 터널 굴착 시, 터널 주변에서 응력 및 변위의 변화가 심할 것으로 예상되므로 터널 부근의 메쉬는 크기를 상대적으로 작게 조절

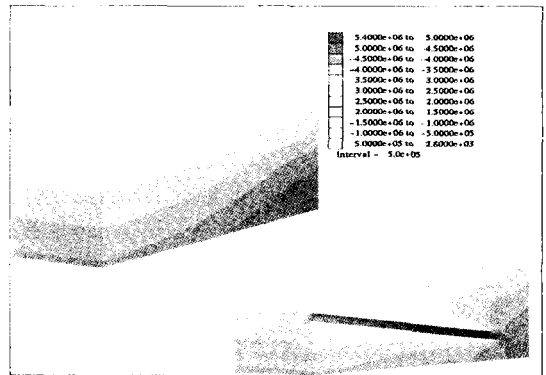


Fig. 16. Stress variation before and after excavation of the tunnel

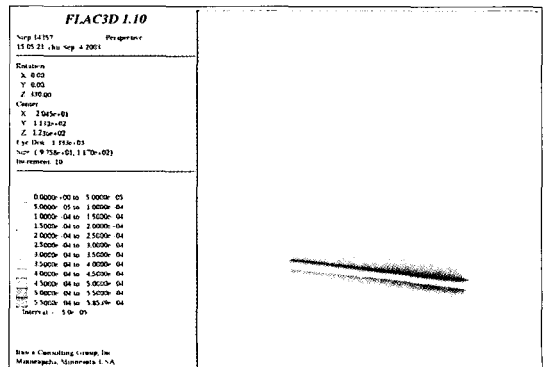


Fig. 17. Distribution of displacement after the excavation of tunnel

하였다. 모델의 크기는 폭 100 m, 길이 250 m 이며 높이는 지형에 따라서 160~250 m 까지 변한다. 일반적으로 터널의 크기가 6 m인 경우 터널크기의 3-4 배 정도의 모델이면 역학적 해석에 충분하다고 하나, 지하처분연구시설의 경우 지표면의 변화가 심하기 때문에 이를 고려하기 위해 충분한 크기의 폭을 갖도록 하였다. 지표면을 제외한 모든 면에서 경계면의 수직 방향으로 발생하는 변위는 0이 되도록 경계조건을 설정하였다. 전체 암반은 화강암으로 구성되며 동일한 물성을 가지는 것으로 가정하였다 [16,17].

터널이 굴착된 후의 변화를 예측하기 위해 200 m의 터널이 굴착되는 경우를 해석하였다[16]. 터널은 단계별로 굴착이 되지만, 해석의 단순화를 위해서 전체 터널이 동시에 굴착되는 것으로 가정하였다. 그림 16은 터널 굴착 전, 후의 최대주응력 분포를 보여 준다. 터널굴착 전 최대주응력은 압축응력으로 약 4 MPa 정도이나 터널 굴착 후 최대 응력은 압축응력으로 5.3 MPa로 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 굴착 전 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. 여기서는 터널 방향으로의 메쉬 크기가 10 m 이기 때문에 실제의 경우보다 응력의 집중이나 이완현상이 완화되어 나타난 것으로 볼 수 있다. 따라서 터널벽면의 응력집중 현상과 터널 상하부에서의 응력 이완현상은 실제 측정 시, 모델링 결과보다 더욱 심하게 나타날 것으로 예상된다. 그러나 신선한 화강암의 일축압축강도는 100 MPa 이상이기 때문에 터널의 굴착 후 응력집중에 의해 암석이 파괴되거나 소성영역이 발생하지는 않을 것으로 판단된다.

터널 굴착 후 터널 방향으로의 변위가 발생하게 된다. 즉 터널 상부에서는 아래쪽에서의 변위가 발

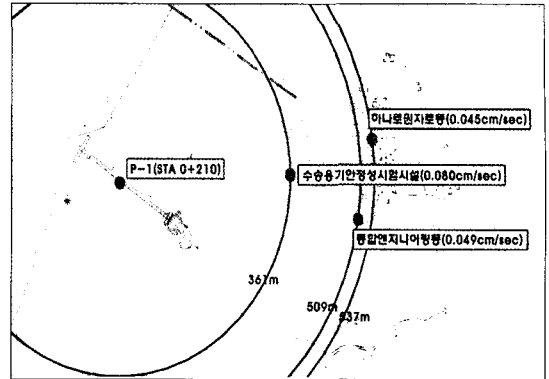


Fig. 18. Measuring locations of the blasting impact

생하며, 터널 바닥에서는 위쪽으로 변위가 발생한다. 그림17은 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 나타나며, 최대 변위는 0.58 mm로 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.

IV. 인허가

지하처분연구시설을 한국원자력연구원 부지 내에 건설하기 위해서는 몇 단계의 인허가 절차를 밟았다. 즉 한국원자력연구원이 대덕연구단지 내에 있기 때문에, 새로운 시설을 건설하기 위한 대덕연구단지 입주(변경) 승인을 과학기술부로부터 받았다 (2004. 6. 29). 또 지하처분연구시설 부지가 개발제한구역(그린벨트)이므로 시설 건설을 위한 그린벨트 해제를 위해 대전광역시로부터 산업단지개발사업 실시 계획(변경) 승인을 받았다 (대전광역시 고시 제 2004-125호, 2004. 8. 20). 개발제한구역이 해제된 후에는 유성구청으로부터 개발제한구역 내 행위허가를 받고 (허가 번호: GB 제 99-20 호, 2004. 11. 3), 관련법에 따른 개발제한구역 훼손분담금 및 면허세를 납부하여 2004년 11월 3일에 지하처분연구시설 건설을 위한 인허가 절차를 완료하였다.

V. 건 설

지하처분연구시설 건설공사는 2005년 3월에 착수되어 2006년 7월에 완료되었다. 시공은 (주)현대건설이, 감리는 (주)벽산엔지니어링이 담당하였다. 건설공사가 완료된 후, 환기시설, 안전설비 등의 부대시설공사를 거쳐, 2006년 11월 8일에 지하처분연구시설을 준공하였다.

가. 시험발파

터널 발파작업 시 발생하는 소음, 진동을 평가하여 현장 적용패턴의 적정성 여부를 검토, 인근의 주요 건물에 대한 영향을 최소화하기 위해 지하처분연구시설 건설공사 현장에서 2005년 5월 27일 시험발파를 실시하였다.

현장의 진동적용 기준치는 원자력연구소 내 구조물, 실험실동, 원자로의 특수성을 감안하여 실시설계 시 설계기준으로 설정한 0.2 cm/sec을 기준으로 설정하였다. 소음기준치는 소음진동 규제법을 참조하여 80 dB(A)로 설정하였다. 진동 적용 기준치 0.2 cm/sec는 국내 원자력 발전소의 내진 설계 값의 10~20% 수준으로 매우 안전한 수준이다 [17].

시험발파 결과, 가장 인접한 거리에 위치하고 있는 수송용기 시험시설에서 측정된 진동 최대값은 0.051 cm/sec이며, 이는 진동허용기준치인 0.2 cm/sec의 25%에 해당되는 수치이다. 종합엔지니어링동, 하나로원자로동의 경우 계측지점이 발파지점으로 부터 원거리에 위치하여, 전파된 진동 속도의 크기가 Trigger Level 이하(진동측정기 최저 설정 레벨 0.013 cm/sec이하)로서 진동이 계측되지 않았다. 수송용기 시험시설에서 측정된 소음 최대값은 54.2 dB(A)이며, 이는 과업 현장 소음허용기준치인 80 dB(A)의 68%에 해당되는 수치이다 [17].

시험발파를 통해 얻어진 진동 추정식을 이용하여 발파설계에 따라 터널건설이 이루어지는 경우에 대해 주요 지점에서의 발파 진동을 예측하였다. 터널 입구에서 140 - 170 m 구간의 경우 Type-1 에 해당하는 양질의 암반이 나타나며 이곳에서 발파에서는 총 장약량은 117 kg, 지발당 최대 장약량은 9 kg 으

로 가정한다. 주변장에 설치되는 정밀 폭약은 26 kg 이다. 터널 입구부의 경우 Type-6 약한 암반이 나타나며 이곳에서는 총장약량 31 kg, 지발당 장약량은 2.25 kg 정도로 사용함으로써 발파에 의한 암반 손상이 과다하게 발생하지 않도록 한다. 200 m 거리에서 P-1 발파 타입에 의해서 발생될 것으로 추정되는 진동은 0.189 cm/sec 로 타나났다 (그림 18). 터널 입구에서 100 m 정도 떨어진 STA-168에서 P-2 타입으로 발파가 있을 경우, 최대의 발파진동이 나타날 것으로 예상되며 이때 수송용기시험시설에서 0.092 cm/sec의 최대 진동이 예상되지만 발파 설계 기준인 0.2 cm/sec에 비해서는 절반 정도임을 알 수 있다.

나. 굴착

굴착시 1차 자유면이 막장면 밖에 존재하지 않기 때문에 암석이 상당히 구속된 상태이다. 따라서 심빼기 발파를 통해 2차 자유면이 형성시키고 본 발파를 실시하게 된다. 심빼기 발파는 경사공 심빼기와 평행공 심빼기 등이 있는데 지하처분연구시설 굴착에서는 경사공 심빼기가 실시되었다. 지하처분연구시설 터널 굴착은 천공, 장약, 발파공 연결 및 기폭, 버력처리, 발파면 정리 및 지보의 과정들이 반복되는 작업이다.

발파공 천공작업에는 안전성의 확보를 위하여 점보 드릴을 사용하였다. 사용된 점보 드릴은 2 boom 점보로 길이는 13 m, 폭은 2.5 m, 총중량은 26 ton이다. 발파 시에는 비전기식 뇌관(NONEL)을 발파공 끝의 폭약 아래쪽에 끼워서 각 발파공에 삽입한 뒤, 모래주머니로 발파공 입구를 막아 발파효과를 높이는 전색작업을 실시하였다. 발파공은 Bunch connector를 사용하여 연결하며 인원과 장비를 터널 밖으로 철수시킨 후 터널 외부 안전한 장소에서 뇌관을 기폭시킨다. 발파 시 발생하는 충격파를 완화시키고 비석을 차단하기 위해 기폭 전 터널 입구에 방음막을 설치한다. 공기 중으로 전달되는 발파 작업에 의한 소음은 지발당 장약량 보다는 지형의 영향을 많이 받는데, 언덕 너머에 있는 연구소 건물 내에서는 발파소음을 거의 인식하지 못하였다.

버력반출은 터널시공 공기 중에서 1/4~1/3을 차

지하는 요소이며 어떻게 합리적으로 기계를 조합시키는가에 따라 공기의 단축도 가능하며 1일당 굴착 진행을 좌우하고 굴착정비에 크게 영향을 미친다. 공기 중 착공, 발파, 지보재에 요하는 시간은 터널 내 경, 지질 등에 의해 결정되어서 큰 단축은 곤란하나 버력 반출 시간은 그 터널에 합당한 기구의 조합 여하에 따라서 단축될 수 있다. 발파장소 주변에 쌓인 버력은 페이로더를 사용해서 15톤 덤프트럭에 실은 뒤 임시로 마련된 버력 보관 장소로 운반하였다.

발파 후 이완된 상태로 남아 있는 터널 주변부의 손상된 암반이나 제거하여 추후 작업의 안전성을 확보하고 절리면의 영향 등으로 인해 터널면이 확보되지 않은 구간을 확보하기 위해 베크호를 이용해서 발파면을 정리한다. 발파면 정리가 끝나면 암반의 상태에 따라 록볼트, 슛크리트, 철재지보를 설치하며 배수, 조명 시설을 포함하는 유틸리티 설치 작업이 이어졌다. 이와 함께 노출된 암반의 상태를 조사하여 균열망(fracture network)을 조사하고 암반 분류를 실시하였다. 록볼트 설치 광경을 그림 19에 나타내었다.



Fig. 19. View of installing the rockbolt

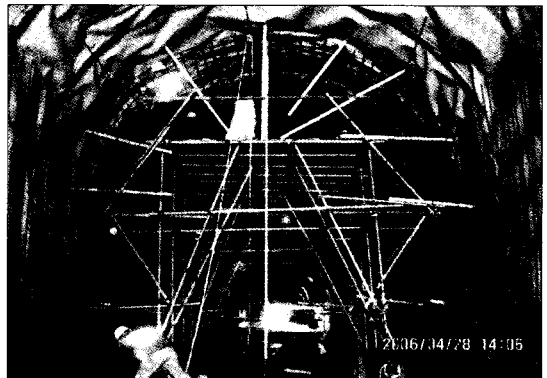


Fig. 20. View of installing the lining

다. 라이닝 및 갱구부

콘크리트 라이닝 구조물은 터널의 구조상 중요한 요소로서, 토압, 수압 등의 하중을 장기간 지탱하여 균열, 변형 및 파괴 등이 일어나지 않고, 내구성 및 수밀성과 평탄성을 가져, 터널의 공간과 기능을 유지하도록 하는 역할을 한다. 터널 입구부에서 40 m 구간의 연약구간은 30 cm 두께의 콘크리트 라이닝을 설치하여 보강하였다. 그림 20은 라이닝 설치 공정을 보여준다. 갱구부 구조물은 면벽형을 설치하였다 (그림 21).



Fig. 21. View of the construction of the portal

Ⅵ. 시설의 개요

완공된 지하저분연구시설의 각 부분의 사진을 그림 22에 나타내었다. 지하저분연구시설의 규모는 다음과 같다.

- 진입터널
길이 : 180 m

- 단면 : 6 m (H) x 6 m (W) (마제형 단면)
- 경사 : -10 %
- 연구모듈
길이 : 75 m (45 m, 30 m 2 개소)
- 단면 : 6 m (H) x 6 m (W) (마제형 단면)
- 경사 : +2 %
- 갱구부 : 면벽식

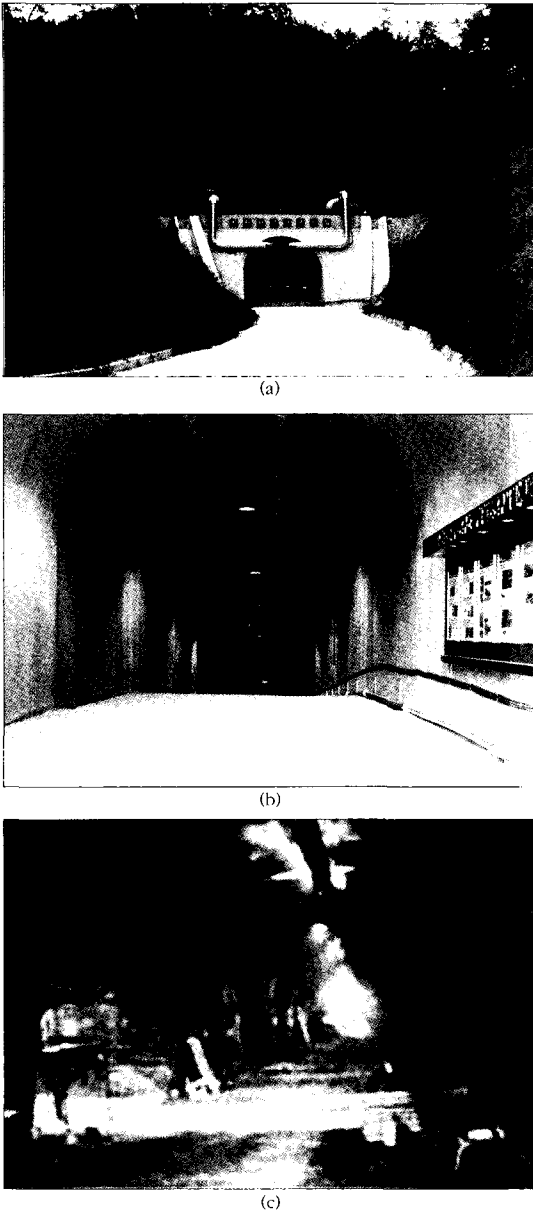


Fig. 22. View of KURT (a) portal area, (b) access tunnel, and (c) research module

VII. 연구 활용 분야

지하처분연구시설에서는 심부 암반에 건설된 고준위폐기물처분장의 환경을 모사할 수 있으므로, 처분과 관련된 다양한 연구를 수행할 수 있으며, 이러한 연구들은 크게 암반 및 수리특성 연구, 공학적방

벽 특성 연구, 천연방벽의 핵종이동 저지특성 연구 등으로 나눌 수 있다. 지하처분연구시설에서는 다양한 현장실험 연구 항목 중에서 중요도와 시급성, 그리고 자체 수행 필요성 등을 고려하여 선정된 다음과 같은 현장실험들이 수행되고 있다.

가. 암반의 열적거동 현장실험

고준위폐기물은 폐기물에 함유된 방사성물질의 붕괴에서 발생하는 열을 방출하며, 이 열로 인해 주위 암반의 온도가 상승된다. 암반의 온도가 상승하면, 암반의 응력, 변형특성 및 강도와 같은 역학적 특성에 영향을 미치게 된다. 또한 지하수의 유동과 지하수화학에도 변화를 초래하여 처분안전성에도 영향을 줄 수 있다. 이 실험에서는 터널 벽면에 11 cm 직경의 히터공을 굴착하고 히터(5 kW)를 장착한다. 이 히터를 이용하여 암반을 가열하면서 온도 상승에 따른 암반의 열적특성의 변화, 암반에서의 열-수리, 열-역학적 복합 현상의 해석, 암반의 열-역학적 거동에 대해 암석 질리의 존재가 미치는 영향, 암반 손상대(EDZ)의 열-역학적 거동 특성 등을 조사한다.

나. 암반 손상대(EDZ) 특성 현장실험

지하암반에 터널을 굴착할 때, 발생하는 균열이나 파괴면에 의해 암반의 물리적, 화학적 물성이 변화된 손상대(EDZ)가 형성되며, 이 손상대는 암반 거동과 지하수 유동에 영향을 미친다. 이 실험에서는 발파 작업에 의한 손상대의 발생 특성을 파악하기 위해 암반의 물성 변화 및 현저응력을 추정하는 시험을 실시하고 각종 센서를 설치하여 구간별 암반물성의 변화를 파악한다. 현장에서 채취된 암석 코어를 이용하여 암석의 열적, 역학적 물성변화를 측정된 후 현장시험 결과와 비교 검증한다. 또 지구물리적 기법을 적용하여 암반에 발생된 손상대의 규모를 추정한다.

다. 지하암반 균열에서의 용질 및 콜로이드 이동 지연특성 현장실험

지하암반 균열대에서의 용질 및 콜로이드 이동 지연 특성 규명을 위해, 시추공을 이용한 암반 균열을 통한 용질의 dipole 이동 현장실험을 수행하여, 균열

구성광물과 용질과의 상호작용(광물학 및 분광학적 해석), 암반균열을 통한 콜로이드 여과 현상 등을 규명한다. 또 지하터널 벽면에 드러난 작은 규모의 단층 또는 균열 면을 선택하여 균열 면을 따라 수착성 용질을 일정량 주입한 후 일정시간이 지난 후 표면 개봉하여 균열면에 대한 광물학 및 지화학적 조사를 통해 용질 이동 경로를 관찰하고, 그 특성을 파악하여 충전광물이 용질이동에 미친 영향을 규명한다.

라. 심부지질 조사기술 개발

지하처분연구시설을 이용하여, 다양한 심부지질 조사기술을 개발한다. 즉 터널 바닥에 심부 시추공(deep borehole)을 천공하고, 이 조사공을 이용하여 심부지질특성 조사기술 및 각종시험에 요구되는 품질관리 절차를 개발한다. 구체적인 연구대상 기술은 시추기술 및 절차, 코아 로깅 방법, 암석, 광물 및 지하수시료 채취 방법, 수리시험 방법 및 해석기술, 시추공 검증방법 및 해석기술, 장기 모니터링 기술 등이다.

마. 수리지질 및 지화학 기초자료 조사

지하처분연구시설에서는 각종 현장시험에서 필요한 수리지질학적 및 지구화학적 경계조건 제공을 위한 기초자료 조사도 수행된다. 구체적인 연구대상 항목은 산화환원준위 전이대 조사, 심도별 지하수압력 및 수질변화 특성 장기 모니터링, 지하수 유입량 측정, 현장시험 주변 지질구조 및 경계조건 조사 등이다.

VIII. 결 론

고준위폐기물 기준처분시스템의 건전성과 처분안전성의 실험적 검증에 필수적인 지하처분연구시설이 건설되었다. 시설의 건설을 위한 부지조사, 시설 설계 및 인허가 업무가 수행되었으며, 2005년 3월에 건설에 착수하여, 2006년 11월에 준공하였다. 지하처분연구시설은 연구모듈, 진입터널 및 갱구부로 구성된다. 진입터널은 길이는 180 m, 선형은 직선, 경사는 -10 % 이고, 내공단면은 마제형으로 직경 6 m, 높

이 6 m이다. 두개의 연구모듈은 진입터널을 사이에 두고 서로 마주보게 배치되었으며, 각 연구모듈의 길이는 45 m와 30 m이고 경사는 +2 %, 내공단면은 진입터널과 같다. 갱구부는 면벽식이다. 또 지하처분연구시설에서는 준위폐기물처분시스템의 건전성과 처분안전성의 실험적 검증을 위한 다양한 현장실험이 수행 중에 있다.

지하처분연구시설의 확보는 고준위폐기물 처분과 관련된 다양한 기술의 실증을 가능하게 함으로써, 국내의 처분기술 수준을 크게 향상시킬 수 있는 좋은 계기가 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관하는 원자력 중장기계획사업의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

[1] AECL, "Environmental Impact Statement on the Concept for Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste," AECL-10711, Atomic Energy of Canada Limited Report, 1994.
 [2] NAGRA, "Grimsel Test Site (GTS) 1996", NAGRA Bulletin No. 27, 1996.
 [3] NAGRA, "Rock Laboratories," NAGRA Bulletin No. 34, 2002.
 [4] SKB, "Aspo Hard Rock Laboratory, 10 Years of Research," SKB, 1996.
 [5] NEA, "The International STRIPA Project," NEA/OECD, 1983.
 [6] NEA, "The Role of Underground Laboratories in Nuclear Waste Disposal Programmes," NEA/OECD, 2001.
 [7] JNC, "Geoscience- Tono Geoscience Center," JNC, 2002.
 [8] Tono Geoscience Center, "Master Plan of the Mizunami Underground Research Laboratory Project," Japan Nuclear Cycle

- Development Institute, 2002.
- [9] Horonobe Underground Research Center, "Horonobe Underground Research Laboratory Project Plan for Surface-based Investigation," Japan Nuclear Cycle Development Institute, 2003.
- [10] ANDRA, "The Four Experimentation Themes of the Meuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory," ANDRA, 2002.
- [11] 조원진, 박정화, 권상기, "소규모지하처분연구 시설 부지조사 및 평가," 기술보고서, KAERI/TR-2751/2004, 한국원자력연구소, 2004.
- [12] 권상기, 박정화, 조원진, "원자력연구소내 지하처분연구시설 부지의 지반특성," 기술보고서, KAERI/TR-2805/2004, 한국원자력연구소, 2004.
- [13] J. Smellie and M. Laaksoharju, "The Aspö Hard Rock Laboratory: Final Evaluation of the Hydrogeochemical Pre-investigations in Relation to Existing Geologic and Hydraulic Conditions," SKB Technical Report 92-31, SKB, 1992.
- [14] 조원진, 박정화, 권상기, "소규모지하처분연구 시설의 설계," 기술보고서, KAERI/TR-2769/2004, 한국원자력연구소, 2004.
- [15] 조원진, 권상기, 박정화, 한필수, "고준위폐기물 처분연구용 지하터널의 기본 설계," 방사성폐기물학회지, 2(4), pp. 279-292 (2004).
- [16] 권상기, 김경수, 박정화, 조원진, "원자력연구소내 지하처분연구시설에 대한 3차원 구조 안정성 해석," 기술보고서, KAERI/TR-2688/2004, 한국원자력연구소, 2004.
- [17] 권상기, 조원진, "원자력연구소내 지하처분연구 시설의 지반거동 예측," 기술보고서, KAERI/TR-2939/2005, 한국원자력연구소, 2005.
- [18] 한국도로공사, 도로설계요령, 한국도로교통협회, 2002.
- [19] 한국도로공사, 도로설계요령, 한국도로교통협회, 2002.