

## 원자력연구소 지하처분연구시설(KURT)에서의 암석역학 관련 연구

### Rock mechanics studies at the KAERI Underground Research Tunnel

권상기, 조원진 (한국원자력연구소)

**요약문 :** 현재 한국원자력연구소에서는 고준위폐기물 처분시스템의 다양한 현장 실증연구를 위해 원자력연구소내 지하처분연구시설(KAERI Underground Research Tunnel, KURT)가 건설되었다. 터널 크기 6mx6m, 총길이 255m(진입터널 180m, 연구모듈 75m) 인 KURT 는 결정질 화강암반에 위치하고 있다. KURT 에서는 개념설계, 부지조사, 시설설계, 건설 과정에서 다양한 암석역학 관련 연구들이 수행되었다. 물리탐사, 시추공조사, 암석물성시험, 현장 물성 시험 등을 통해 KURT 의 구조적 안정성 평가에 필요한 암석 및 암반의 물성이 얻어졌으며 이들 물성은 해석 모델의 입력자료로 활용되었다. 본 연구에서는 KURT 에서 수행되었던 암석역학 관련 시험과 주요들을 소개하고 시험을 통해 얻어진 주요 결과와 이를 활용한 3차원 구조해석에 대해 논의하고자 한다.

#### 1. 서 론

고준위방사성폐기물 처분연구를 위해서는 지하 심부 암반의 물리적, 화학적, 역학적, 열적, 수리적 물성과 이들과 핵종이동의 관계, 처분환경에서의 공학적 방벽 및 암반의 거동이 처분장 안정성 및 안전성에 미치는 영향 등을 파악해야 하며 이를 위한 지하연구시설의 건설은 반드시 필요하다. 한국 원자력연구소에서는 심지층처분시스템을 개발하기 위한 중장기 연구를 수행하고 있으며 이를 통해 2002년 기준처분시스템(reference disposal system)을 도출하였으며 2006년 한국형처분시스템 제시를 목표로 중장기 연구가 진행되고 있다. 고준위처분 연구의 실증을 위해서는 지하연구시설의 건설이 필수적이며 따라서 방사성폐기물 처분을 고려하는 세계 각국에서는 다양한 규모의 지하연구시설(Underground Research Lab.)을 건설하고 지층처분 관련 각종 시험을 실시하고 있다. 적합한 조건을 갖춘 암반에 건설되는 처분연구용 지하시설의 확보는 이러한 처분개념의 타당성, 안전성, 안정성, 적합성에 대한 실험적 검증을 위해 필요하다.

현재까지 도출된 고준위폐기물 처분 기준 개념에 따르면 지하 처분장은 지하 수백 m에 위치하는 결정질 암반에 위치하며 경사터널 또는 수직터널을 통해 지상시설과 연결된다. 처분 터널을 포함한

각종 터널은 조절 발파기법을 통해 굴착되며 처분장의 안전성 확보를 위해 처분용기, 완충재, 뒷채움재로 구성되는 인공방벽과 암반과 토층으로 구성되는 자연방벽의 다중방벽 처분개념이 적용된다. 지하처분연구시설이 심부 지하환경과 유사한 지하 조건을 구현할 수 있도록 하기 위해서는 지하 수백미터의 깊이에는 신선한 암반층에 시설을 건설하는 것이 이상적이지만, 이에 따르는 막대한 건설 및 운영 비용, 및 부지 확보의 어려움 때문에 소규모의 지하처분연구시설 건설 방안이 강구되었다. 2003년 하반기에서 2004년도 전반기에 걸쳐 지표지질조사, 물리탐사, 시추 작업이 실시되었으며 부지조사를 통해 얻어진 부지특성을 고려한 기본설계가 실시된 바 있다(조원진 등, 2004). 2005년 5월부터 시작된 1단계 공사를 통해 진입도록, 갱구부, 103m의 진입터널이 굴착되었으며 2006년 7월 180m의 진입터널과 75m의 연구모듈에 대한 굴착 작업이 완료되었다.

지하처분연구시설 확보를 통해 단계별 실증연구를 활발히 수행할 수 있을 것으로 예상된다. 조사 및 시설확보 단계의 경우 지표 지질조사와 물리탐사, 그리고 시추조사를 통하여 지하처분연구시설이 입지하게 될 암반이 실증연구를 위한 처분유사환경 조건을 만족하는가를 평가하고, 해석된 지질조건에서 최대한 효과적인 실증연구가 수행될 수 있도록 시설을 설계할 수 있을 것이다. 처분장 건설의 안전성 및 안정성 평가에 이용될 컴퓨터 프로그램의 규제기관과의 협의 및 평가에 필요한 지질구조, 지하수, 핵종이동, 선량평가 관련 입력 자료에 대한 체계적으로 수집이 가능할 것이며 또한 터널 굴착 기간 중의 암반 변형을 예측, 감시하는 방법론을 적용하고 관련 기술을 실증할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 지하처분연구시설 부지에서의 암석역학 관련 연구에 대해 소개하고자 한다.

## 2. 지하처분연구시설 개요

심도를 효과적으로 확보하기 위해 고도가 높고 경사가 급한 원자력연구소 부지 경계부에 위치하는 산지에 진입터널을 건설하는 방안이 채택되었다. 지층의 상태와 지반공학적 특성, 기반암의 분포상태 및 풍화도 등 파악, 시료의 채취 및 각종 원위치 공내시험을 실시하여 설계에 필요한 지반자료를 파악하기 위하여 수직시추와 경사시추가 실시되었다. 수직시추는 터널의 입구부에서 160m 깊이로 실시되었으며 252m 길이의 경사시추는 터널의 예상 경사인 10%(5.7°)로 터널의 진행방향과 동일하게 실시하였다. 2003년 11월부터 2004년 2월까지 부지에 대한 지표지질조사, 물리탐사, 시추를 포함한 부지조사 작업이 실시되었으며 이를 통해 터널 설계가 이루어졌으며 굴착중 확인된 지질조건의 변화를 고려하여 회차구간과 연구모듈, 집수정의 위치에 대한 설계 변경이 있었다. Fig.1은 최종 터널 단면도를 보여준다.

터널은 6mx6m 크기의 마제형으로 two-boom 점보드릴을 이용한 천공이 실시되었다. 터널의 굴착은 조절발파기법으로 이루어졌으며 경사공에서 얻어진 지질자료를 통해 결정된 암반 타입에 따라 발파설계가 이루어졌다. 심빼기 및 확장공에는 에플라이트가 사용되었으며 주변공에는 정밀폭약이 사용되었다. 암반타입이 1-2타입인 경우 굴진장은 2-3m였으며, 3-5타입 암반의 경우 굴진장은 1.5m 내외로 조정하였다. 암반의 상태에 따라 슛크리트, 록볼트, 격자지보가 선택적으로 사용되었으며 터널입구부에서 40m 구간은 30cm 두께의 라이닝이 설치되었다. Fig. 2는 완공후의 터널 전면부의 모습을 보여준다.

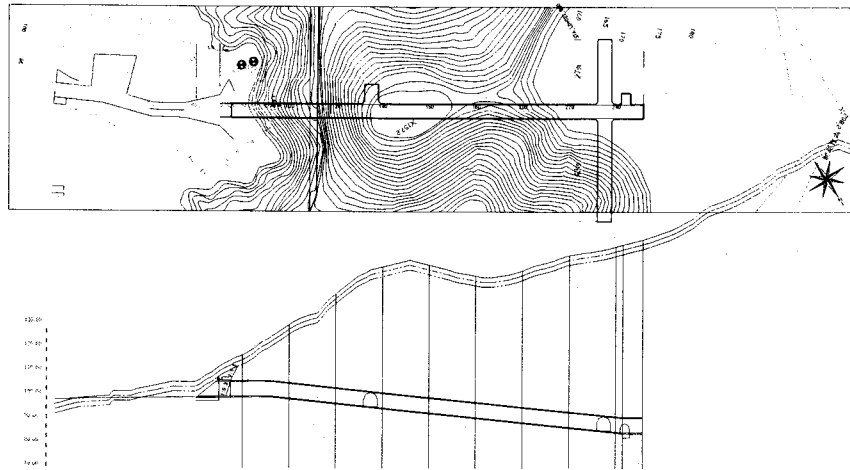


Fig. 1. Final layout of KURT

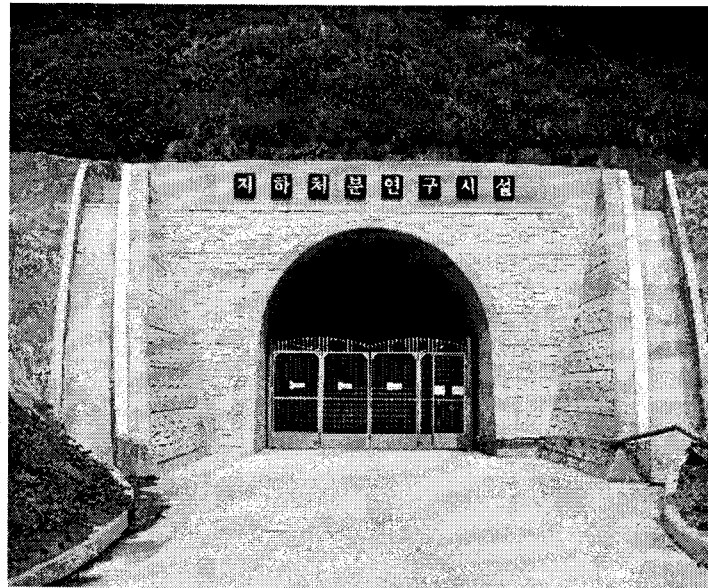


Fig. 2. KURT portal

### 3. 역학적 안정성 모델링

본 연구에서는 지하처분연구터널에 대해 FLAC3D 를 이용한 구조적 안정성 해석을 실시하였다.

#### 3.1 암반물성 및 초기조건

모델링에서는 시추공 및 시추코어를 이용한 실험실 및 현장시험을 통해 얻어진 물성을 이용하였으며 터널 굴착에 따른 암질의 변화를 모사하고자 하였다. 표 1 은 모델링에서 이용된 암반의 물성을 보여준다. 암반의 인장강도는 125~177 m 구간에서 최대 0.5 MPa 로 나타나며 입구부와 180 m 구간

은 매우 낮은 인장강도를 보인다. 암반의 변형계수는 Hoek et al. (2002) 이 제안한 식으로 추정하였으며 125~177 m 구간에서 최대의 변형계수 값을 그리고 30~82 m 구간에서 가장 낮은 변형계수를 나타냄을 알 수 있다. 터널이 위치하고 있는 산지 지형의 변화를 3차원 격자망에 표현하기 위해 개발된 FISH 프로그램이 이용되었다. 현장 측량을 통해 구해진 지표면 고도 변화를 FLAC3D 에 입력하기 위해 Surfer 프로그램이 이용되었다. 모델링에서는 지표면 지형변화, 터널의 경사 및 터널 형상, 구간별 암질의 변화, 측압계수를 함께 고려하였다. 특히 측압계수의 모사를 위해 지표면 지형의 상부 모델을 단계별로 제거하는 기법을 사용하였다. 심도 증가에 따른 현지 응력 변화를 모사하기 위해 부지에서 측량된 현재의 지형이 단계적인 침식에 의해 형성된 것으로 가정하고 이를 모사하기 위해 Fig. 3 과 같이 모델을 단계적으로 제거하였다. 측압계수를 고려하여 초기응력을 분포시킨 후 각 침식 단계마다 역학적 평형상태에 도달할 때까지 반복계산을 실시하였다.

Table 1. Rock mass properties used in modeling

Parameters	Range(m)				
	30-82	82-125	125-177	177-192	192-252
Interval(m)	52.9	42.6	51	15.2	60.1
Dip of the range	88	68-88	68-90	90	90
UCS(MPa)	30.8	58.4	71.6	77.6	82.7
Em(GPa)	3.2	12.1	37.9	6.21	20.4
Bulk modulus(GPa)	2.13	8.07	25.3	4.14	13.6
Shear modulus(GPa)	1.28	4.84	15.16	2.48	8.16
Cohesion(MPa)	1.7	4.2	6.7	4.6	6.4
Friction angle	35	40	46	36	42
Tensile strength(MPa)	0.014	0.102	0.49	0.047	0.23

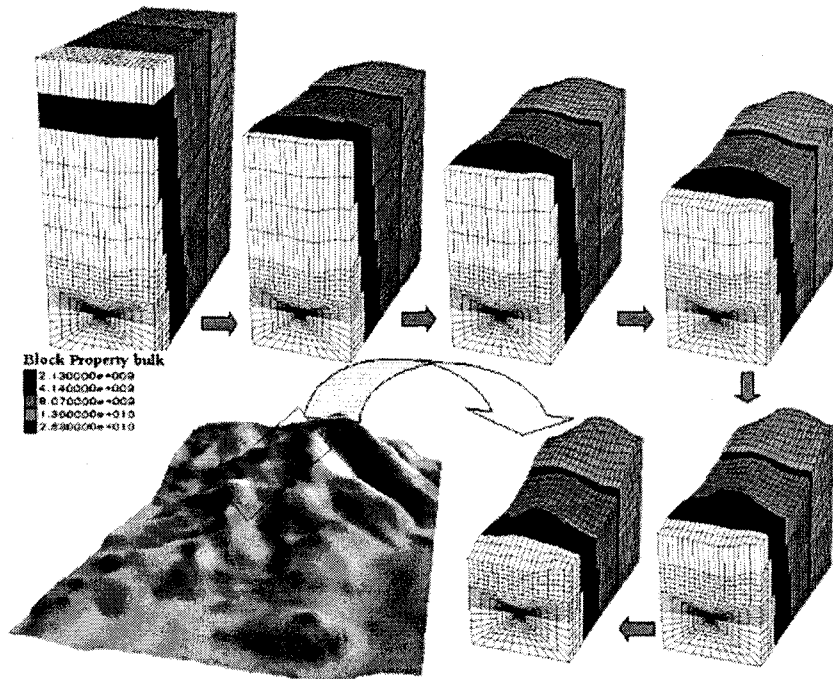


Fig. 3. Steps for simulating the erosion effect

모델링에서 사용된 초기조건과 경계조건을 검증하기 위해 터널 굴착전의 모델링에서 얻어진 측압계수를 수압파쇄를 통해 결정된 측압계수의 심도에 따른 변화와 비교하였다. Fig. 4는 수직 시추공 위치에서 실측된 측압계수와 다양한 초기 측압계수 ( $K_{ini}$ ) 조건에서 침식이 완료된 이후의 측압계수의 심도에 따른 변화를 비교해서 보여준다. 상재하중만이 작용하는 경우, 측압계수는 지표면 부근에서 1에 가까운 값을 가지다가 심도 증가에 따라 0.3으로 수렴하는 경향을 보인다. 이는 실측된 측압계수에 비해 매우 낮은 것으로 나타난다. 이에 반해  $K_{ini}=2$  경우, 실측된 값보다 높게 나타나며  $K_{ini}=1$  인 경우 실측치에 비해 약간 낮은 값을 가지면서 실측된 결과와 유사한 양상으로 심도에 따라 감소함을 알 수 있다. 이는  $K_{ini}=1$ 로 두고 침식전의 초기응력을 계산하는 것이 타당하다는 것을 의미한다. 침식의 진행에 따라 지표면 부근에서는 소성대가 발생하게 되는데 Fig. 5는 침식이 완료된 이후 터널 진행 단면에서의 소성대 발생 구간을 보여준다. 터널 입구부의 암반 구간에서 소성대의 발생이 두드러지게 나타나며 일부 구간의 경우 소성대가 터널이 굴착될 심도까지 나타나고 있다. 이러한 구간은 향후 터널 건설에서 역학적이나 수리적으로 취약한 부분이 될 것이다. 모델링을 통해 예상되는 소성대와 전기비저항 탐사를 통해 얻어진 결과를 비교해 보면 정성적으로 유사한 경향으로 지표면의 연약대가 분포함을 알 수 있다.

굴착은 단계적으로 이루어졌으며 굴착 후 최대 10 MPa의 압축 응력이 터널 천정부에 발생하는데 이는 높은 수평응력 때문으로 판단된다. 최소 주응력의 경우 터널 입구부 부근 바닥에서 0.4 MPa 정도의 인장응력이 발생함을 알 수 있다. 변위의 경우 암반의 변형계수가 낮은 터널 입구부의 벽면에서 약 9 mm의 최대 변위가 발생하며 터널 진행에 따라 변위는 감소함을 알 수 있다. Fig. 6은 단계적 굴착 후 예상되는 소성대의 발생을 보여준다. 터널 바닥 일부 구간의 경우 최대 3 m까지의 소성대가 발생하며 터널 중앙부를 제외한 대부분의 터널 바닥과 터널 벽면에서는 1 m 내외의 소성대가 발생하고 있다. 대부분의 소성대 발생은 인장응력에 의해 발생하며 입구부의 터널 주변에서만 전단응력에 의한 소성영역이 발생하고 있다. 인장응력에 의한 광범위한 소성영역의 발생은 Table 1에서 보듯이 0.5 MPa 이하로 추정된 암반의 인장강도 값 때문으로 판단된다. 터널 입구부의 경우, 역학적으로 취약한 구간이 나타날 수 있기 때문에 터널 굴착 전, 후에 암반 보강이 필요할 것으로 보이며 터널 중앙부 이후의 암반은 비교적 견고하게 유지가 될 수 있을 것으로 판단된다.

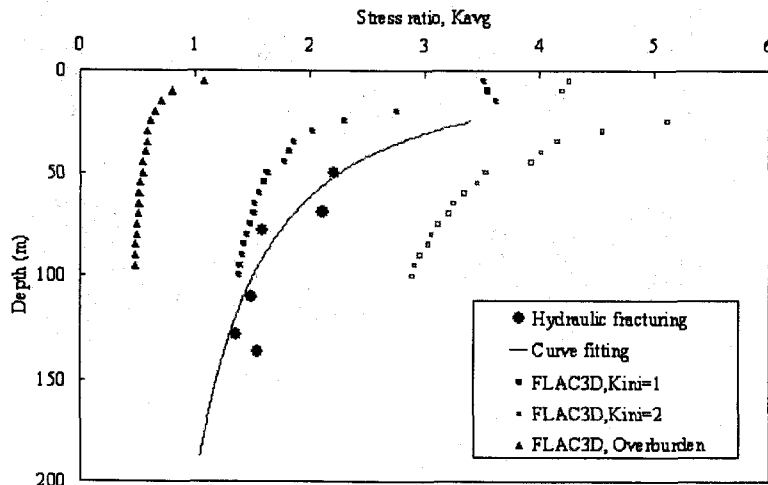
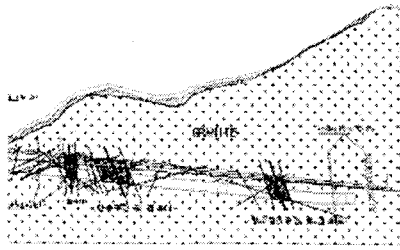
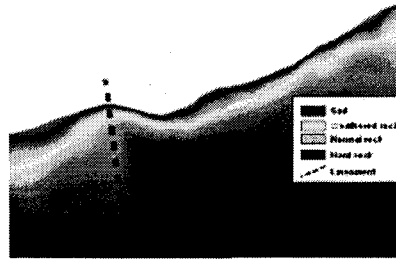


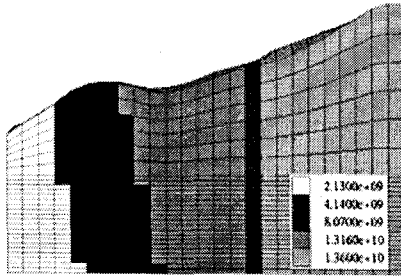
Fig. 4. Variation of the stress ratio with depth after erosion



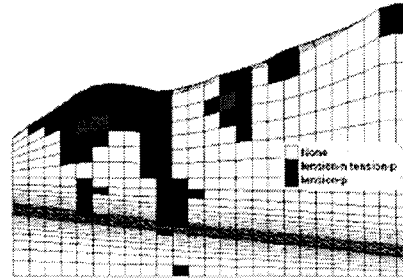
(a) Result from geological survey



(b) Result from resistivity survey

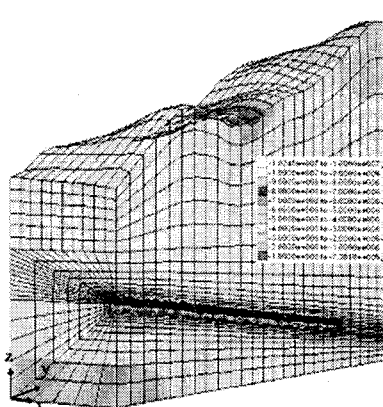


(c) Bulk modulus in FLAC3D

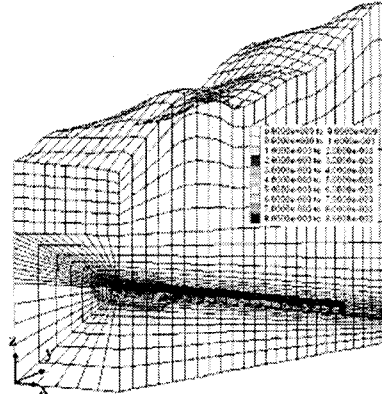


(d) Plastic zone before excavation from FLAC3D

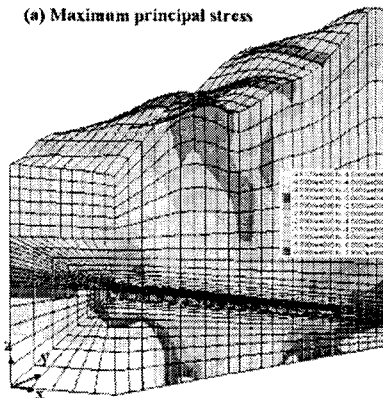
Fig.5. Plastic zone development before the excavation of URT



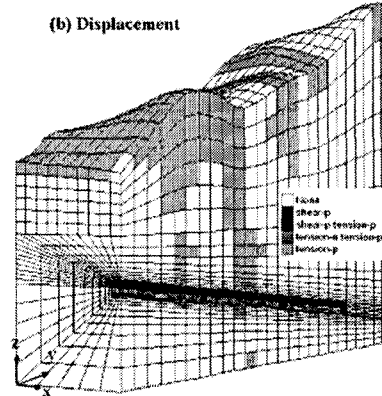
(a) Maximum principal stress



(b) Displacement



(c) Minimum principal stress



(d) Plastic zone development

Fig.6. Modeling results after excavation

## 4. 현장시험 및 계측

지하처분연구시설이 위치할 부지에 대한 지질조사단계에서부터 터널의 건설전과 건설중에 암반의 특성 파악을 위한 다양한 현장시험이 실시되었다. 터널 굴착전 터널 입구부에 160 m 깊이의 수직공과 250 m 길이의 경사시추공을 천공하고 시추공전단시험, 공내재하시험, 수압파쇄시험, 수압시험과 같은 현장 시험이 실시되어 부지 특성에 맞는 지하시설의 설계에 활용되었다. 주요 현장시험에 대한 결과는 다음과 같다.

### 4.1 부지조사단계

가. 수압시험 : 암반의 투수계수 선정을 위해 시추공 10 m 간격으로 double packer를 설치하고 수압시험을 실시하였다. 수직 및 경사시추공에서 총 36 회의 수압시험을 실시하였다. 경사공의 경우, 구간에 따라  $1e-9 \sim 1e-5$  m/sec 사이의 수리전도도를 가지는 것으로 나타났다.

나. 공내재하시험: Goodman Jack을 사용하여 암반에서의 정하중조건에 대한 변형특성을 규명하기 위한 공내재하시험이 실시되었다. 수직공 15 m, 30 m, 60 m 구간에서의 암반의 변형계수를 결정할 수 있었다. 변형계수는 2.59~8.48 GPa, 탄성계수는 6.15~12.1 GPa 범위에 놓이며 심도에 따라서 증가하는 경향을 보였다.

다. 시추공전단시험: 풍화토 구간의 강도정수 선정을 위해 시추전단시험이 실시되었다. 공내전단시험 결과 풍화토의 점착력 및 내부마찰각은 각각  $0.16 \sim 0.89$  t/m<sup>2</sup>,  $23.0 \sim 30.5^\circ$  로 분석되었다.

라. BIPS : 수직공에서의 불연속면의 방향성이나 발달 상태에 의한 암반의 이완영역 분포양상 등을 명확하게 파악하기 위해 BIPS (Borehole Image Processing System) 를 이용한 시추공 조사가 실시되었다. BIPS 를 이용하여 절리 방향성, 절리 간격, 위경사도, 암반 균열상태에 대해 파악할 수 있었다.

마. BHTV : BHTV (Borehole Televierer)를 이용한 수직공 및 경사공에서의 불연속면 조사가 실시되었으며 절리 방향성, 심도에 따른 절리교차빈도, 절리 틈의 크기, 암석강도지수 (Rock Strength Index)등을 결정할 수 있다.

바. 수압파쇄시험: 지하처분연구시설 주변에 작용하는 초기응력을 파악하기 위해 수압파쇄시험이 실시되었다. 수압파쇄 후 Impression Packer를 이용한 균열의 방향성이 결정되었다. 수직공 50 m~155 m 사이에 위치하는 7개 지점에서 수압파쇄 시험을 실시하였다.

### 4.2 건설전 시험발파

지하처분연구시설이 원자력연구소내에 건설되기 때문에 터널 굴착을 위한 발파작업이 연구용원자로인 하나로를 비롯한 인접 연구시설들에 영향을 미치지 않도록 발파설계가 이루어져야 한다. 지하 연구시설을 발파작업을 통해 건설하기 위해서는 시험발파를 통해 부지의 동적 특성을 파악하여 발파에 의해 발생 가능한 진동 및 소음을 예측 평가하고자 하였다. 시험발파는 2005년 5월27일 실시되었다. 시험발파시 Fig. 7과 같이 하나로 원자로 주변을 포함한 3곳의 주요 시설 주변과 현장부근에 8대의 진동측정기를 설치하여 거리에 따른 발파진동치를 측정하여 다음과 같은 발파진동식을 얻을 수 있었다.

$$V = 83.24 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.45}$$

여기서, V= 발파진동속도 (cm/sec), W= 지발당 최대 장약량 (kg), D= 발파지점으로부터의 거리 (m)이다. 얻어진 발파진동식을 사용하여 지발당장약량이 9kg으로 Type I 암반이 나타나는 터널 중심부를 굴착하는 경우, 하나로에서의 예상진동은 0.045cm/sec 로 진동기준치인 0.2cm/sec 보다 훨씬 낮음을 알 수 있었다.

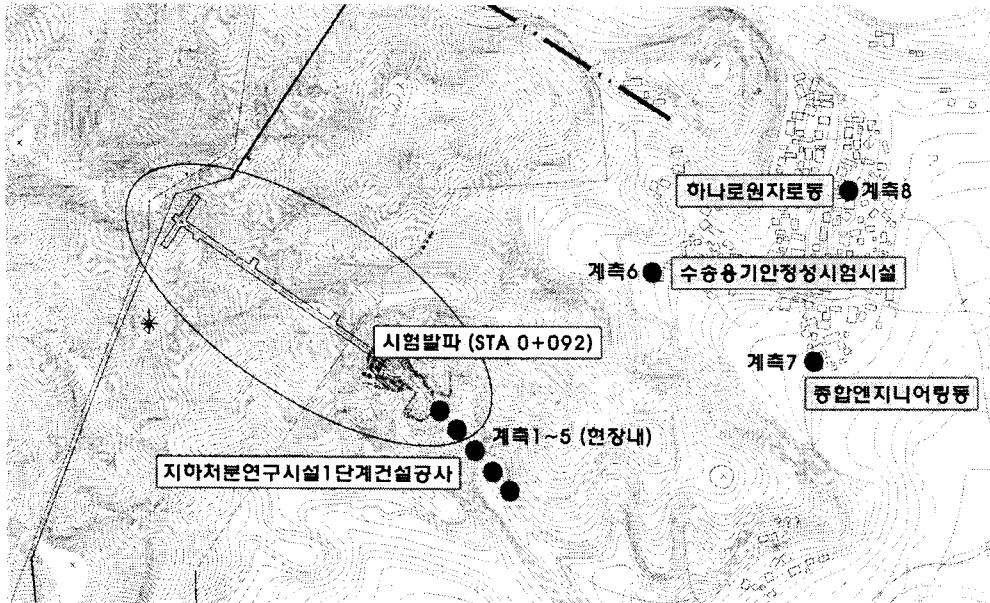


Fig. 7. Location of sensors for measuring ground vibration by test blasting

### 4.3 건설중 현장연구

굴착중 암반의 특성을 파악하기 위해 다음과 같은 현장 조사 및 시험이 실시되었다.

#### 가. 대표단면 계측

터널입구에서 25m, 65m 떨어진 대표지점에 Fig. 8과 같은 계측 시스템을 구축하고 굴착후의 내공 변위, 록볼트 응력, 슛크리트 응력을 자동계측하였다. 연구터널의 심도가 얇고 비교적 단단한 결정질 암반에 위치하기 때문에 굴착후 변위 변화는 미미했다. 1단계 굴착이 완료된 시점에서 65m 지점에 지질자원연구소의 전단면 자동계측기가 설치되어 변위번호를 측정하기도 하였다. Fig. 9는 25m 지점 터널 벽면에서의 변위변화를 보여준다.



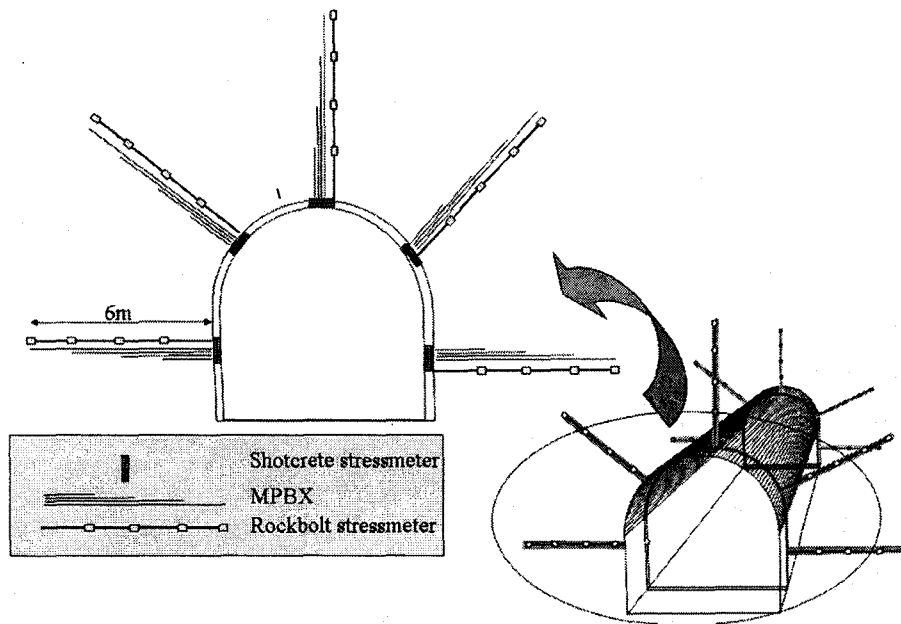


Fig. 8. Combination of measuring sensors

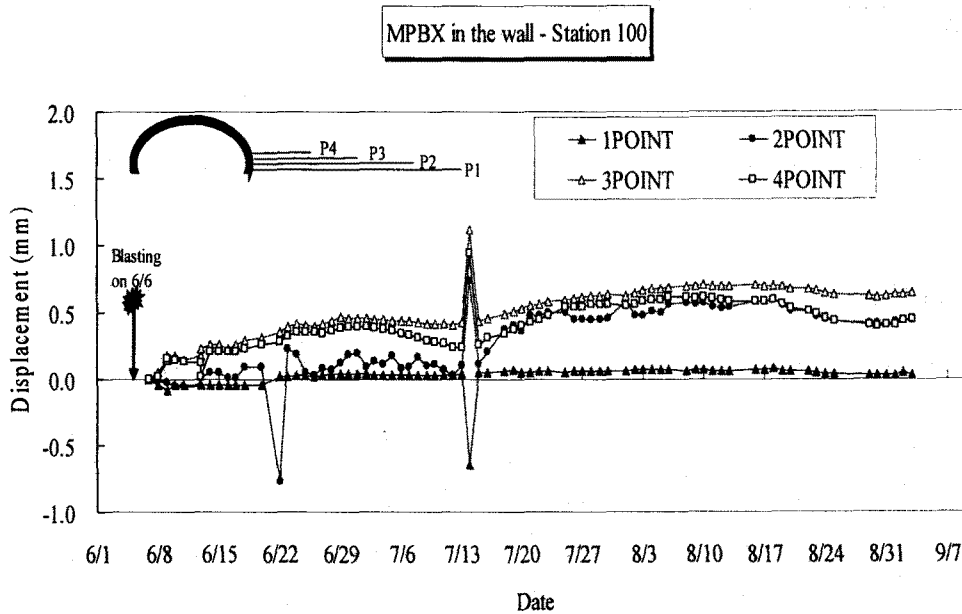


Fig.9. Displacement change with time from a MPBX installed at the station 100

#### 나. EDZ 연구

공동의 굴착으로 인해 발생하는 균열이나 파괴면의 영향으로 암반의 물리적, 화학적 물성이 변화된 영역을 Excavation Disturbed Zone (EDZ) 이라 한다. 본 연구에서는 발파 작업에 의한 EDZ 의

발생 특성을 파악하기 위해 진입터널 입구에서 65m 지점에 설치된 회차구간에서 발파에 의한 암반 손상대의 특성을 파악하기 위한 연구가 실시되었다. 발파전후에 총 120m 길이의 시추공이 10개 지점에 설치되었으며 Goodman jack test와 borehole radar 를 이용한 지구물리 조사가 실시되었다. 발파전후의 물성변화를 측정하기 위해 회수된 암석코어를 이용한 실험실 실험이 이루어졌으며 굴착된 시추공에 stressmeter와 MPBX 를 설치해서 응력과 변위변화를 관찰하고자 하였다. Fig.10은 시추공의 설치 위치 및 시험내용을 보여준다. Fig. 11 은 EDZ 연구 구간에서의 fracture mapping 결과이다. 2mx3m 구간에 대한 절리 조사가 실시되었으며 조사된 절리의 절리방향, 경사에 따라 joint set 을 구분하고 정량적 평가를 위해 fractal 해석이 실시되었다(박승익 등, 2005).

Fig. 12는 발파전에 설치된 시추공과 발파후의 시추공에서 Goodman jack 시험을 통해 얻어진 암반 변형계수를 비교하고 있다. 전체적으로 볼 때 발파후의 변형계수가 발파전에 비해 낮게 나타나고 있으며 벽면에서 1.5m 거리에서도 발파후의 변형계수가 낮게 나타남을 알 수 있다. 비록 한 시추공에서 3점의 변형계수값만으로 확정적인 결론을 도출하기는 어렵겠지만, 향후 동일 시추공에서 발파전후의 변형계수값을 보다 많은 지점에서 측정한다면 EDZ 의 발생 크기 및 EDZ 구간에서의 변형계수를 보다 정확하게 산정하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

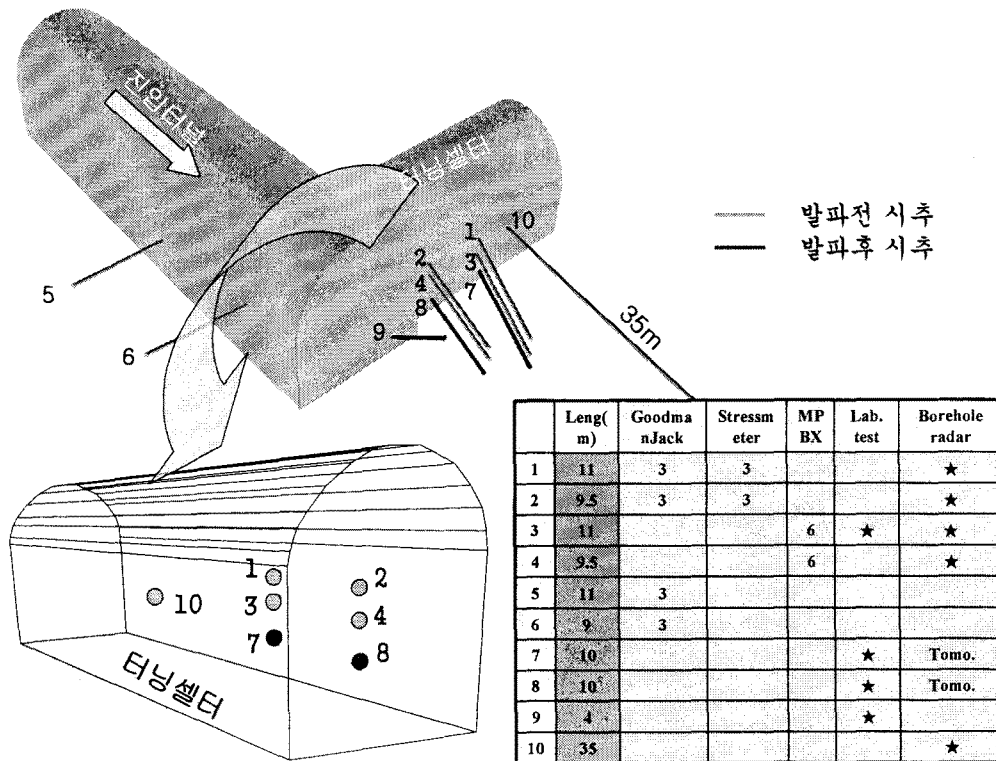


Fig.10. Installation of boreholes and in situ tests at the boreholes for the EDZ study

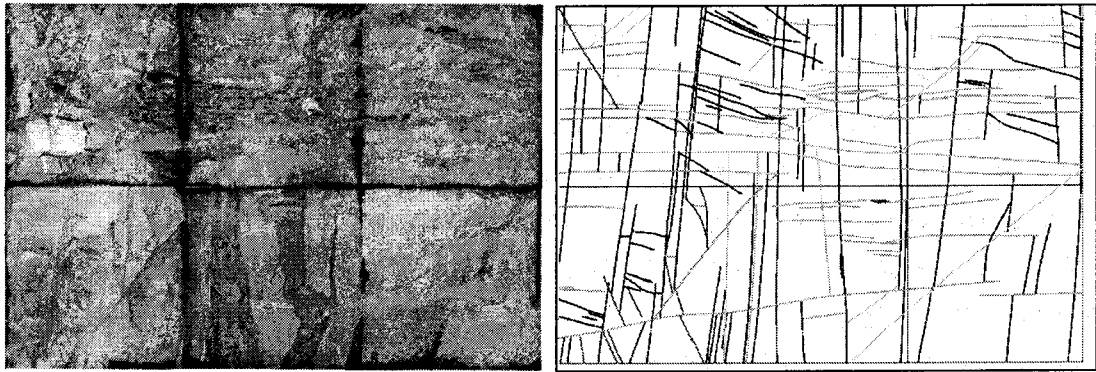


Fig. 11. Fracturing mapping at the EDZ study zone

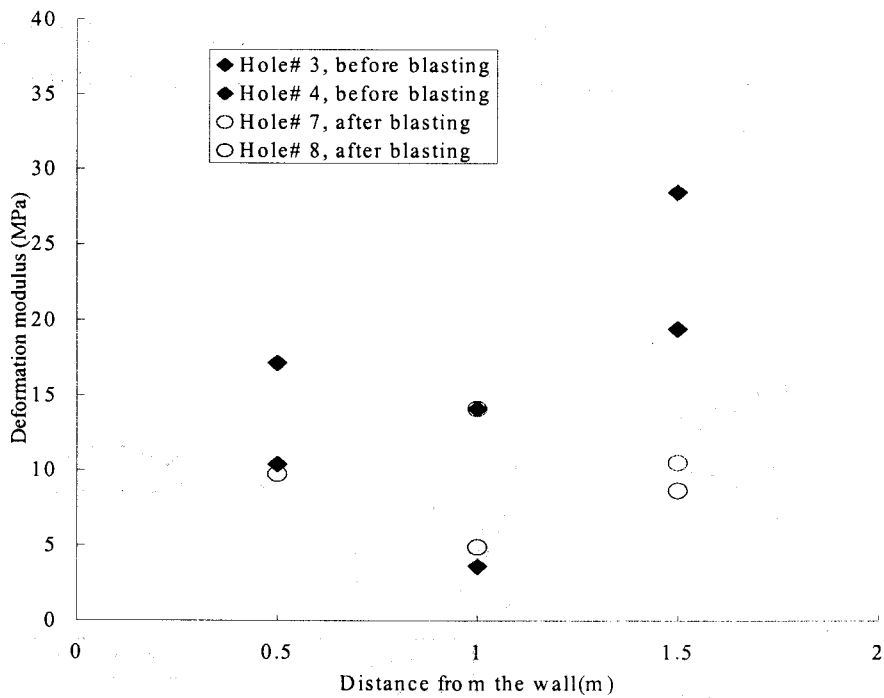


Fig.12. Comparison of rock mass modulus before and after blasting

#### 다. 암반분류

부지조사를 통해 얻어진 부지의 특성값은 터널 굴착면에서 얻어진 값과 비교 검토할 수 있다. Fig.13은 시추공을 이용한 부지조사를 통해 추정된 암반의 RMR 값과 터널 발파후 노출된 암반면에서 평가한 RMR(불연속면, 암반물성, 지하수 상태 등을 종합적으로 고려하여 암반의 상태를 정량적으로 평가한 값)을 비교하여 보여준다. RMR은 값이 높을수록 양질의 암반임을 뜻한다. 비교 결과 수직 절리가 많은 터널입구부와 dyke가 대규모로 나타나는 70m 구간에서 차이를 보여주지만 대체적으로 유사한 경향을 보이며 터널이 깊어짐에 따라 암질도 나아짐을 알 수 있다.

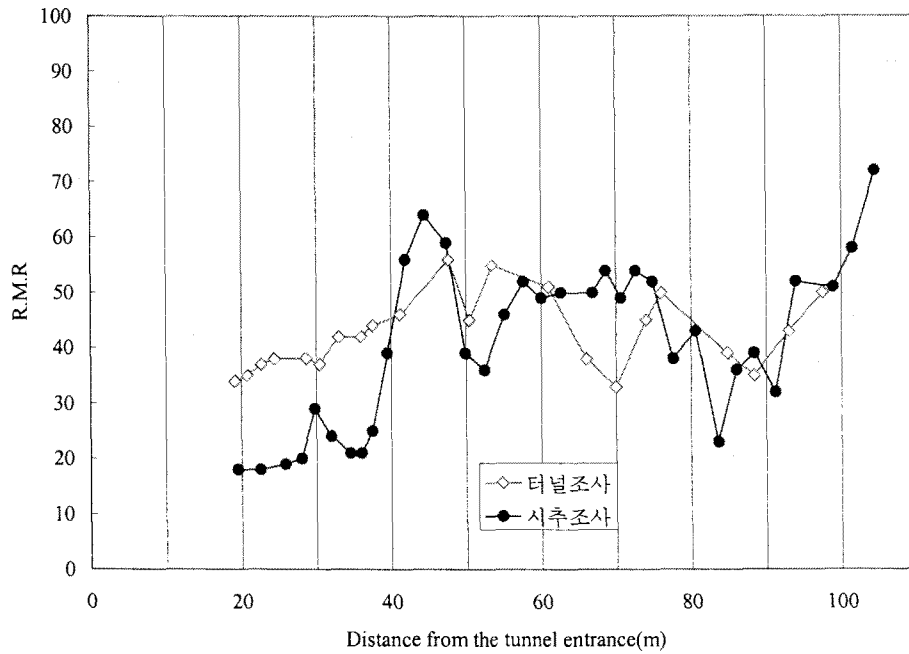


Fig. 13. Comparison of RMR values evaluated from borehole and tunnel face

라. 발파진동 측정

Fig. 14는 URT의 굴진에 따른 측정 지점(터널 입구에서 약 200m 떨어진 곳)에서의 발파진동 변화를 보여준다. 터널 굴진과 함께 폭약량이 늘어나면서 측정지점에서의 발파진동 및 소음이 증가하고 있음을 알 수 있지만 진동기준치에 비해서는 낮음을 알 수 있다.

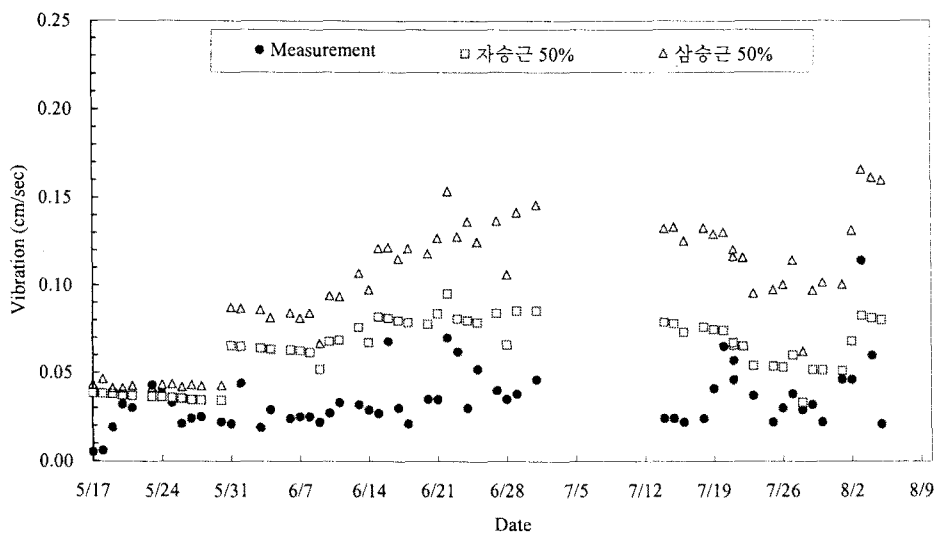


Fig. 15. Comparison of ground vibrations from prediction and measurement

## 6. 결 론

고준위폐기물 처분연구를 위한 소규모 지하처분연구시설(KAERI Underground Research Tunnel, KURT)이 2006년 7월 한국원자력연구소내 산지에 건설되었다. 2003년 실시된 부지조사를 바탕으로 2004년 설계가 완성되었으며 2005년 1단계 건설공사가 이루어졌으며 2006년 총 길이 255미터의 터널이 완공되었다. 부지조사단계와 건설중 다양한 암석역학 관련 연구들이 실시되었으며 이는 구조물의 안정성 평가, 개념설계, 건설중 설계 변경 등의 기초자료로 활용되었다. 향후 지하처분연구시설은 암석역학 관련 현장시험을 비롯한 각종 현장시험에 활용됨으로써 고준위폐기물 처분 개념의 실증과 처분안전성 평가에 기여할 것이다. 장기간의 연구가 필수적이며 고비용이 소요되는 암석역학 관련 대규모 현장 시험을 위해서는 관련 기업체, 학교, 연구소의 공동 연구 시스템이 도입될 필요가 있을 것이다. 이와 함께 국가적 차원에서의 연구 지원과 국제 협력을 통한 연구 효율성 및 신뢰성 증진도 요구된다.

### ■ 참고문헌 ■

- 박승익, 권상기, 조원진, 안산암질암맥에 발달한 단열망의 프랙탈 해석(지하처분시설에서의 사례연구), 대한지질학회 2005 추계 학술발표회, pp. 130. (2005)
- Hoek E., C.Carranza\_Torres and B.Corkum.,2002, Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. In: Proceedings of the Fifth North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada, 1, 267-273.
- 조원진,박정화,권상기,2004,소규모 지하처분연구시설 기본설계, KAERI/TR-2769/2004
- R.Pusch, 1994, Waste disposal in rock, Elsevier, New York