

## 방사성 폐기물 저장을 위한 불연속 암반의 특성 및 고온하에서의 암반의 수리열역학적 상호작용에 관한 연구

이희근<sup>1)</sup> · 김영근<sup>2)</sup> · 이희석<sup>3)</sup>

### A Study on Characteristics of Jointed Rock Masses and Thermo-hydro-mechanical Behavior of Rock Mass under High Temperature

Hi-Keun Lee, Young-Geun Kim and Hee-Suk Lee

**ABSTRACT** In order to dispose radioactive wastes safely, it is needed to understand the mechanical, thermal, fluid behavior of rockmass and physico-chemical interactions between rockmass and water. Also, the knowledge about mechanical and hydraulic properties of rocks is required to predict and to model many conditions of geological structure, underground in-situ stress, folding, hot water interaction, intrusion of magma, plate tectonics etc. This study is based on researches about rock mechanics issues associated with a waste disposal in deep rockmass. This paper includes the mechanical and hydraulic behavior of rocks in varying temperature conditions, thermo-hydro-mechanical coupling analysis in rock mass and deformation behavior of discontinuous rocks. The mechanical properties were measured with Interaken rock mechanics testing systems and hydraulic properties were measured with transient pulse permeability measuring systems. In all results, rock properties were sensitive to temperature variation.

**Key words** : radioactive waste disposal, mechanical, hydraulic behavior of rock mass, thermo-hydro-mechanical coupling, deformation of discontinuous rock.

**초 록** 방사성 폐기물의 안전한 처분을 위해서는 암반의 역학적, 열적, 유체 거동 뿐 아니라 암반과 물 사이의 물리 화학적 상호작용을 이해할 필요가 있다. 또한 지질 구조, 지하 현저 응력, 습곡, 열수작용, 마그마의 관입, 판구조 등과 같은 많은 조건을 모델링하고 예측하기 위해서는 암석의 역학적, 수리적 특성을 알아야 한다. 이 연구는 심부 암반에 폐기물 처분과 관련된 암석역학적인 사항들에 대한 연구들에 기초하고 있다. 이 논문은 변하는 온도 상태에서 암반의 역학적 수리적 거동, 암반의 열-수리-역학적 상호작용 해석과 불연속 암석의 거동 특성 등을 포함한다. 역학적 특성은 Interaken 암석역학 시험 시스템으로 측정되었으며, 수리적 특성에는 순간 증압 투수계수 측정 시스템이 사용되었다. 모든 결과에서 암석 특성은 온도 변화에 민감함을 보였다.

**핵심어** : 방사성 폐기물 처분, 암반의 역학적, 수리적 거동, 열-수리-역학적 상호작용, 불연속 암석 변형

## 1. 서 론

전세계적으로 방사성 폐기물의 처분 문제가 사회적 이슈가 되고 있는 현재, 각국에서는 이에 대한 기술적인 뒷받침을 위해 수십년전부터 많은 연구를 진행해 오고 있으며, 최근 DECOVALEX 국제협력연구과제 등을 통해 국가간의 연구협력을 증대시키고 있는 추세이다. 심부 암반 지하 공동내 처분이 가장 현실적인 대안으로 제시되고 있지만, 고준위 폐기물에 대한 처분시설은 아직까지 연구단계에 있으며, 국제적으로 이를 시

행한 국가는 아직 없는 상태이다. 국내에서도 굴업도 중-저준위 폐기물 처분장이 현실화되었지만, 안정성 문제에 대한 국민 정서 등으로 이에 대한 계획이 전면 유보된 상황이다. 이때까지 이와 관련한 연구는 개념 및 실험상의 어려움과 많은 비용 상의 문제, 그리고 인식 부족 등으로 인해, 아직까지 국내에서는 암반공동 내 폐기물 처분을 위한 기초적인 연구조차 활성화되지 못

1) 정회원, 서울대학교 자원공학과 교수

2) 정회원, (주)대우 건설기술연구소 주임연구원

3) 학생회원, 서울대학교 대학원 자원공학과 박사과정 수료

하고 있는 실정이다. 하지만, 빠른 시일 내에 어떠한 형태로든 방사성 폐기물의 자국내 처분의 불가피성을 고려할 때, 이에 대한 기술적인 축적 및 안정성 제고를 통해 폐기물 처분에 대한 국민의 불안감을 해소해야 할 것이다.

암반공학 분야에서 방사성 폐기물 지하처분과 관련한 주요 연구분야로서는 T-H-M(Thermo-hydro-mechanical) 상호작용과 암석의 역학적, 수리적 특성에 관한 온도의존성에 관한 연구, 불연속면을 통한 유체 유동 및 역학적 거동 해석 등을 들 수 있다.

초기에 이러한 해석은 암반을 연속체로서 가정하여 열원에 의한 열응력, 다공질 매체를 통과하는 열 대류에 의한 지하수 유동, 그리고 암반내 지하수 유동에 의한 역학적 거동의 변화를 동시에 고려하는 해석을 실시하였다. 하지만, 대부분의 암반은 거시적, 미시적인 불연속면들을 포함하며, 방사성 폐기물 처분장 부지의 모암으로 균열이 없는 신선암이 고려된다고 해도, 실제 안정성에 결정적인 영향을 미치는 요소는 불연속면을 통한 핵종의 누출 문제이다. 따라서 최근에는 암반을 불연속체로 고려한 상태에서, 불연속면에 대한 역학적 거동 및 수리적 거동에 대한 이해와 불연속면 거동의 열원에 대한 영향 등의 문제가 중요한 연구주제가 되고 있으며, 아직까지 전세계적으로 이 문제는 개념정립 차원의 수준에 머무르고 있다.

본 연구에서는 국내에서 T-H-M 상호작용에 대한 연구의 시작점으로서, 기존의 코드를 이용하여, 폐기물 처분장 주변에서의 불연속면을 고려한 상호작용을 모사하였으며, 연속체 암반에서 암반의 물성 변화를 고려한 열-수리-역학적 상호작용을 모사할 수 있는 코드를 개발하였다. 또한 불연속면의 거동에 대한 이해를 넓히고, 암반의 거동을 좌우하는 암반의 절리의 특성에 따른 불연속 암반의 변형 특성을 조사하기 위해, 인공 절리 모델을 이용한 이축압축시험(biaxial compression test)을 실시하여 불연속 암반의 변형계수의 변화양상을 규명하고자 하였다.

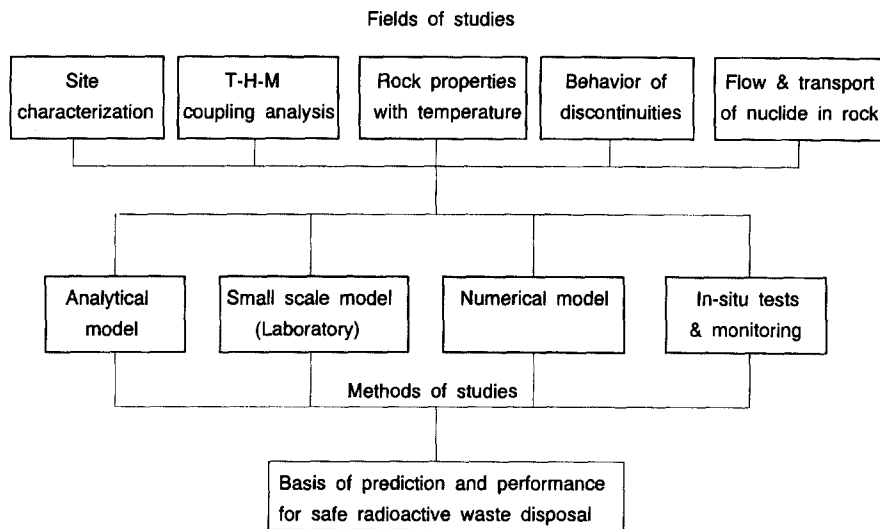
그리고 열응력에 의한 암반의 역학적, 수리적 거동 특성을 규명하기 위해, 예열 시험편 및 실제 가열 암석 시료에 대한 암석역학적 실험들을 실시하였다.

Fig. 1은 방사성 폐기물 지하 처분과 관련된 암반공학의 주요 연구 분야와 관련사항을 도해적으로 나타낸 것이다.

## 2. 암석의 역학적, 수리적 거동의 온도 의존성 시험

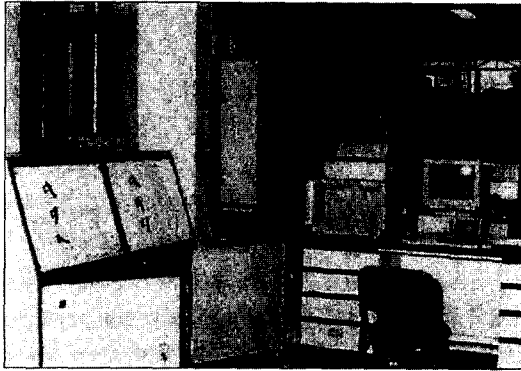
### 2.1 시료, 실험장치 및 실험방법

본 연구에서 수행한 암석 거동의 온도 의존성에 대한 연구는 한국자원연구소에서 보유하고 있는 Interlaken



Goal

Fig. 1. Fields of studies in rock mechanics related with concepts of radioactive waste disposal in rock mass



(a) Mechanical test (Interlaken rock mechanics testing system)



(b) Hydraulic test (Permeability tests with triaxial cell)

Fig. 2. Representative testing apparatus for rock tests under temperature variation

암석역학용 시험장치를 이용하여, 200°C 온도 범위에서의 암석의 역학적 특성의 거동 변화를 살펴보았다(이하 역학 시험). 또한 예열 시험편에 대한 투수계수 측정을 통해, 열응력이 암석의 수리적 특성에 미치는 영향을 분석하였다(이하 수리 시험).

역학 시험에서는 황등화강암과 경기편마암, 2종의 암석시료를, 수리시험에서는 포천화강암 시료를 사용하였다.

Fig. 2는 각 시험에 사용된 주요 시험장치의 모습을 나타내고 있다. Interlaken 암석역학 시험 시스템은 400°C 까지 가열이 가능한 고온 시험조와 200°C까지 시험 가능한 고온 삼축셀을 내장하고 있다. 시험 프레임은 450톤의 압축용량과 225톤의 인장 용량을 가지고 있다. 이 시험기는 암석역학 시험용으로 특별히 설계되었으며 매우 높은 강성을 가진다. 구동장치는 프레임의 뒷부분에 부착된 서보밸브를 거쳐 전기적으로 조절된다. 시험 프레임 오른쪽 면에 부착된 것은 두개의 온도

조절장치를 포함하는 상자이다. DDC 4000 컨트롤러는 모든 신호의 생성과 제어와 측정을 하는 디지털 신호처리기로서, 컨트롤러와 사용자와의 상호작용은 486 컴퓨터에 장착된 인터페이스 소프트웨어 UTP-4 프로그램(universal test program, 이하 UTP)으로 연결되어 일련의 시험을 수행한다. 이 컨트롤러는 4개의 제어 채널을 가지고 있고, 16개의 입력 채널에 시험에 필요한 모든 자료획득 기능을 포함하고 있다.

삼축시험을 위해, 시험편에 재하와 제하를 편하게 하기 위해 삼축셀이 몰리에 달려 있으며, 셀 몸체를 들어 올리기 위한 유압 승강기계가 포함되어 있다. 이 셀은 AX, BX, NX와 4 inch 직경 시험편을 시험할 수 있다. 유효 작용 압력은 138 MPa(20,000 psi)까지의 봉압과 간극수압을 가할 수 있다. 내부 히터는 200°C까지 온도를 올릴 수 있게 해준다. 삼축셀 안에 수압기(load cell)가 있고 구동 하중을 가할 수 있다. 몇 가지 익스텐소미터(extensometer)를 통해 축방향과 원주방향 변형률을 측정할 수 있다.

암석의 투수계수 측정을 하기 위하여 Kranz와 Walder 등이 제작한 시험장치를 참조한 후, Transient pulse method를 이용하는 투수시험장치를 새로이 제작하여 실험을 수행하였다.

투수시험장치는 시험편내에 공극수압을 가하기 위한 수압펌프와, 공극수의 방향 및 크기를 제어할 수 있는 각종 밸브, 그리고 시험편에 가해진 공극수압의 크기를 정확히 측정할 수 있는 압력변환기(Pressure Transducer) 등으로 구성된 수압장치부(Pore pressure loading system)와 삼축압축상태에서 투수계수 측정을 하기 위한 삼축압축셀로 이루어져 있다.

역학시험에서 황등화강암과 경기편마암 시료를 암석의 이방성을 고려하여 두가지 직교 방향으로 시추하여, 시료를 성형하였다. 본 시험에서는 측정기기인 익스텐소미터의 용량이 200°C까지 임을 고려하여, 각각 200°C와 100°C까지의 단축, 인장 및 삼축시험을 실시하여 열에 의한 암석의 기본 물성 변화를 관찰하였다.

수리시험에서는 결정질 암석의 투수계수 측정법인 순간중압법(Transient pulse method)을 이용하여 윤용균<sup>3)</sup>에 의해 제작된 암석 투수계수 측정장치를 사용하였다. 포천화강암 시료를 상온에서 600°C까지 가열한 후 상온으로 냉각시킨 예열 시험편에 대해, 암석의 투수계수 변화를 고찰하여, 열응력이 암석의 수리적 특성에 미치는 영향에 대하여 조사하였다.

Table 1. Average results of uniaxial compression tests for Whangdeung granite Gr<sub>p</sub>, Gr<sub>n</sub> and Gyounggyi gneiss G<sub>p</sub>, G<sub>n</sub>.

| Test samples                        | Temperature (°C) | Compressive strength (MPa) | Young's modulus (×10 <sup>4</sup> MPa) | Poisson's ratio | Bulk modulus (×10 <sup>4</sup> MPa) |
|-------------------------------------|------------------|----------------------------|--|-----------------|-------------------------------------|
| Whang-deung granite Gr <sub>p</sub> | 25               | 170±13                     | 5.73±0.04                              | 0.26±0.008      | 3.96±0.42                           |
|                                     | 100              | 163±6                      | 4.77±0.05                              | 0.22±0.01       | 2.79±0.39                           |
|                                     | 200              | 146±9                      | 3.89±0.03                              | 0.13±0.012      | 1.75±0.14                           |
| Whang-deung granite Gr <sub>n</sub> | 25               | 191±13                     | 5.14±0.06                              | 0.25±0.007      | 3.4±0.32                            |
|                                     | 100              | 169±5                      | 4.64±0.02                              | 0.21±0.015      | 2.64±0.36                           |
|                                     | 200              | 156±11                     | 4.42±0.09                              | 0.19±0.02       | 2.36±0.46                           |
| Gyounggyi gneiss G <sub>p</sub>     | 25               | 114±35                     | 7.21±0.32                              | 0.15±0.023      | 3.41±0.83                           |
|                                     | 100              | 84±20                      | 4.85±0.21                              | 0.1±0.03        | 2.00±0.55                           |
| Gyounggyi gneiss G <sub>n</sub>     | 25               | 122±31                     | 6.78±0.26                              | 0.2±0.021       | 3.76±0.88                           |
|                                     | 100              | 72±14                      | 5.23±0.13                              | 0.13±0.01       | 2.34±0.28                           |

2.2 역학 시험 결과 및 검토

Table 1은 각 암석에 대한 200°C까지의 단축압축시험 결과를 나타내고 있다. 표에서 기호 Gr<sub>p</sub>와 G<sub>p</sub>는 하중방향이 결(rift)의 방향에 평행한 경우를, Gr<sub>n</sub>과 G<sub>n</sub>은 수직인 경우를 각각 나타낸다. 황등화강암은 온도 상승에 따라 점진적으로 강도와 탄성계수가 작아졌으며, 파괴시의 총변형율은 지속적으로 증가하였다. 횡변형율은 대부분의 시험에서 온도 상승에 따라 감소하는 현상을 보였다. 황등화강암은 결의 방향에 따라 강도 값이 차이를 보였다. 경기편마암은 불균질성을 심하게 보여 분산적인 경향을 보였으며, 온도 상승에 따라 강도, 탄성계수의 변화 폭이 크게 나타났다. 포아송비와 체적팽창계수는 모든 암석에서 온도에 따라 지속적으로 감소하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이, 정규화된 형태의 200°C까지의 인장강도의 변화는 모든 시료에서 온도 상승에 따라 지속적으로 감소하였으며 전 구간에서 경기편마암이 황등화강암에 비하여 크게 나타났다. 또한 인장강도는 결과 엮리의 방향에 뚜렷하게 영향을 받아 하중 방향이 결에 평행할수록 상온에서의 인장강도 값이 작게 나타났다.

황등화강암은 온도, 압력 변화에 따라서 변형거동의 선형성을 뚜렷하게 유지하는데 비하여, 경기편마암의 변형거동은 상당한 분산을 보이며, 비선형성을 보였다. Fig. 4는 다양한 압력에서 결에 수직인 황등화강암의 100°C에서의 응력-변형률 선도를 보여주고 있다. 체적

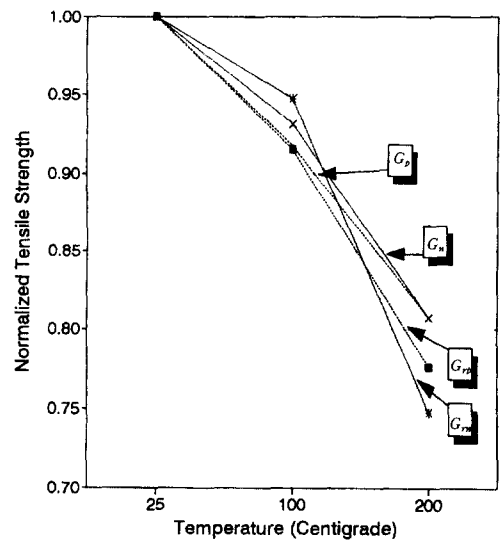
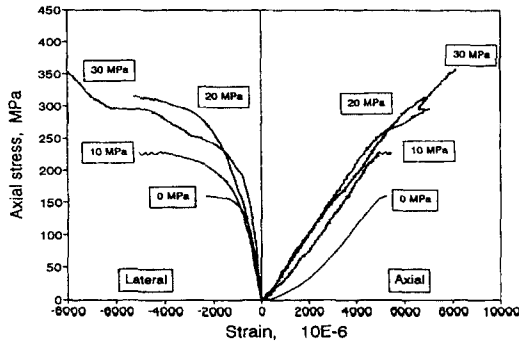


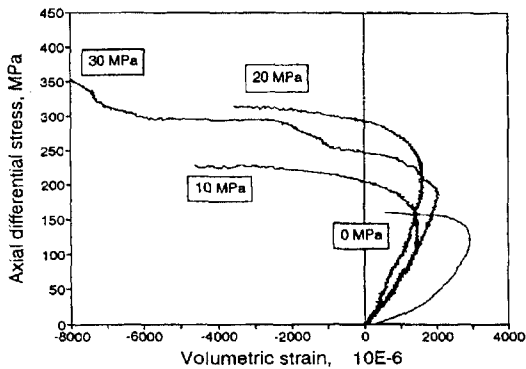
Fig. 3. Normalized tensile strength as a function of temperature in Brazilian tests

팽창을 선도에서 황등화강암은 전형적인 화성암의 체적 팽창 특성을 나타내었고, 온도변화에 따라 체적팽창이 일어나는 구간의 길이가 약간 감소하였다. 경기편마암은 체적팽창이 충분히 일어나지 않은 상태에서 파괴에 이르게 되어 항복점과 파괴점 사이의 구간이 매우 작게 나타났다.

2.3 수리 시험 결과 및 검토



(a) Axial and Lateral strain versus differential stress



(b) Volumetric strain versus differential stress

Fig. 4. Representative differential stress-strain curves of Whangdeung granite at 100°C and various pressure

Fig. 5는 공극수압이 8 MPa일 경우 예열 온도에 따른 투수계수의 변화양상을 봉압 단계별로 나타낸 것이다. 투수계수는 예열 온도가 증가함에 따라 전반적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 각 봉압단계마다 유사한 변화양상을 보여준다. 암석의 투수계수가 증가한다는 것은 시험편 내의 기존 균열이 확장되거나 새로운 균열이 형성되어 유체의 유동이 용이해졌다는 것을 뜻한다. 따라서, 200°C 시험편의 투수계수가 증가하였다는 것은 가열시에 발생한 열균열이 상온으로 냉각하여도 원래의 상태로 회복되지 않고, 잔류열팽창으로 남아 있다는 것을 의미한다. 투수계수는 500°C까지는 일정한 비율로 증가하다가 500°C 이후에서 급격히 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 석영의 상변화에 따른 열균열의 현저한 발생 및 기존 균열의 확장에 기인하는 것으로 생각된다.

또한 투수계수는 봉압이 증가함에 따라 예열 온도에 관계없이 일정하게 감소하는 것으로 나타났으며, 급격

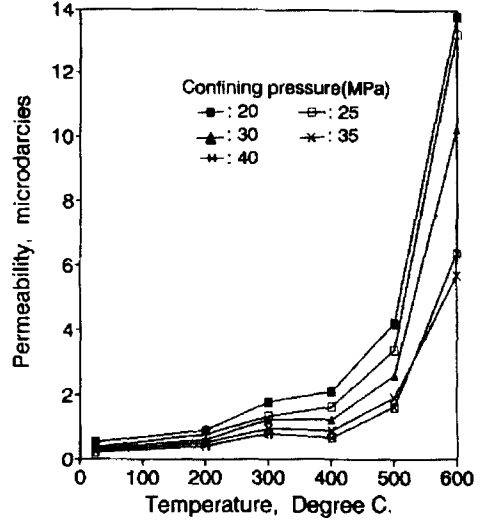


Fig. 5. Permeability as a function of maximum thermal cycle temperature (pore pressure is 8 MPa)

한 감소는 보이지 않았다. 이것은 봉압에 의한 균열 폐쇄 효과가 봉압이 상승하여도 예열 시험편에 균일하게 작용한다는 것을 의미한다.

### 3. 불연속 암석 모델 시험

#### 3.1 시료, 실험장치 및 실험 방법

절리의 특성에 따른 불연속암반의 변형특성을 조사하기 위하여 인공절리 발생장치를 제작하여 무결한 익산화강암으로 두개의 절리군을 포함한 불연속 암반모형을 인공적으로 제작하였다.<sup>11)</sup> 두개의 절리군(Joint set)을 포함한 불연속 암반모형은 이축압축실험을 실시하여 절리군의 경사, 절리군의 교차각, 절리군의 간격, 절리군의 형태에 따른 불연속암반의 변형계수의 변화양상을 규명하고자 하였다.

실험을 위한 모델로서 절리군의 경사에 따른 불연속 암반모델 BA, 절리군의 간격에 따른 불연속 암반모델 BS, 절리군의 교차각에 따른 불연속 암반모델 BC, 절리군의 형태에 따른 불연속 암반모델 BD를 제작하였다. Fig. 6은 제작된 불연속 암반모델들의 모습을 보여준다. 제작된 인공절리의 거친정도 및 그 특성을 알기 위하여 거칠기 Profile 게이지를 이용하여 각각의 절리면에 대한 거칠기를 측정하였다. 전형적인 거칠기 Profile(Typical roughness profile)과 비교해 보면 제작된 인공절리의 JRC 값은 약 16~18로 비교적 거친 절리면이었다. 또한

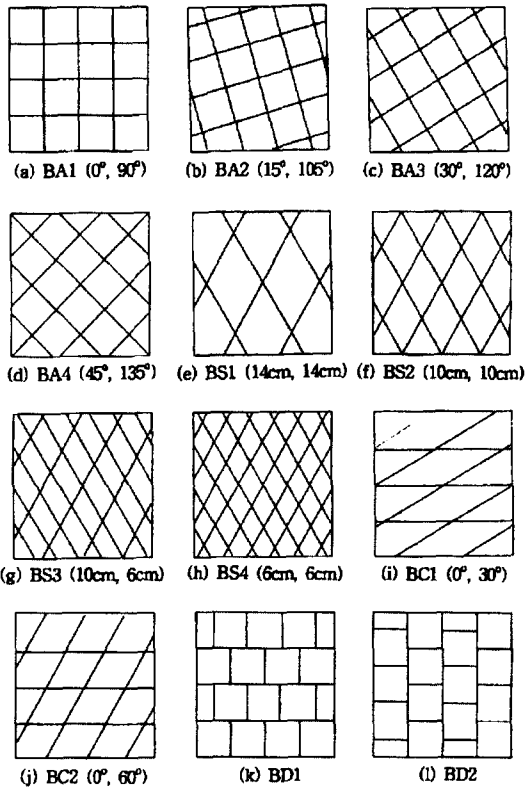


Fig. 6. Jointed rock mass models for biaxial compression test

제작된 절리는 풍화되지 않은 신선한 상태이므로 절리면의 벽면강도 JCS는 신선암의 압축강도와 같다.

본 실험에 사용된 시험장치는 유압식 이축압축장치로서 정사각형 시험 판위의 네 방향으로 10톤 용량의 동일한 가압 램(Ram)이 부착되어 있으며 각 램의 실린더의 직경은 12 cm로 균등하다. Fig. 7은 시험장치의 제원과 개략도를 보여주고 있으며, 다이얼 게이지의 설치 위치와 스트레인 게이지의 부착 위치를 설명해 주고 있다. 실험시료의 크기는 가로 150 cm, 세로 150 cm, 두께 20 cm의 압축모델 판을 실험할 수 있도록 제작되었다. 불연속 암반에 등분포 하중을 가하기 위하여 단면이 8 cm×10 cm이고 길이가 40 cm인 'c' 자형 가압 판을 제작하였다. 그리고 이 철판에는 직경 10 mm인 구멍을 총 25개 뚫어 불연속 암반 모델 위에 부착된 스트레인 게이지의 리드선이 나올 수 있도록 하였다. 불연속 암반모델 시험체에 가해지는 하중의 크기는 실험 장치에 부착되어 있는 압력계로부터 측정하였다. 불연속 암반모델 내부의 변형을 변화를 계속하기 위하여 스

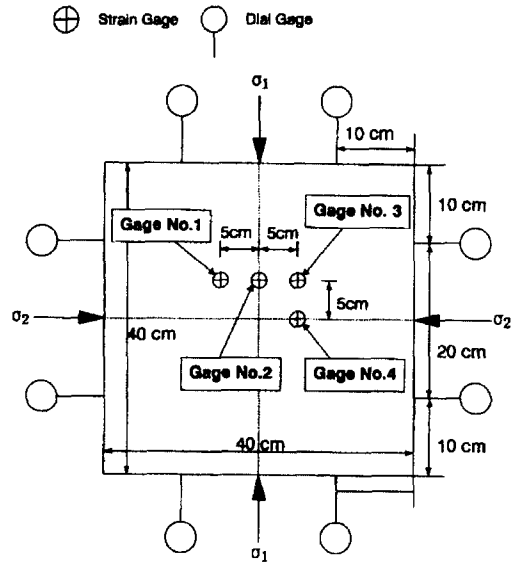


Fig. 7. Dial gages and strain gages for measuring at a jointed rock mass model

트레인 게이지를 사용하였다.

### 3.2 실험 결과 및 검토

불연속 암반의 변형특성을 조사하기 위하여 두개의 절리군을 포함한 24개의 불연속 암반모델과 절리군을 포함하지 않는, 즉 결합이 없는 암반모델을 제작하여 총 75개 모델 이축압축시험을 실시하였다. 불연속 암반 모델은 절리군의 경사, 절리군의 교차각, 절리군의 간격, 절리군의 연속성에 따라 제작하였으며 각각의 암반 모델에서 하중조건을 변화시키면서 이축압축시험을 수행하였다.

불연속 암반모델의 변형-하중곡선은 절리의 압착에 의하여 비선형거동을 보이다가 최대주응력 방향에 대한 절리의 경사가 증가할수록 절리에서의 전단변위에 의한 비선형거동을 더 많이 보였다. Fig. 8은 몇가지 대표적인 절리 경사, 절리군 간격, 절리교차각에 따른 모델 시험의 하중-변위 곡선 결과를 나타낸다.<sup>1)</sup> 변형계수는 절리군의 경사가 증가할수록 절리의 전단거동에 의해 접선변형계수가 할선변형계수보다 작아졌으며, 변형계수의 평균값도 작아져 절리군의 경사가 증가함에 따라 변형량이 증가하였다. 절리군의 간격에 따른 불연속암반의 변형거동은 비선형적인 증가곡선으로 절리의 간격에 따른 뚜렷한 특성변화는 나타나지 않았다. 또한 절리의 간격이 감소됨에 따라 즉 암반은 더욱 작은 크

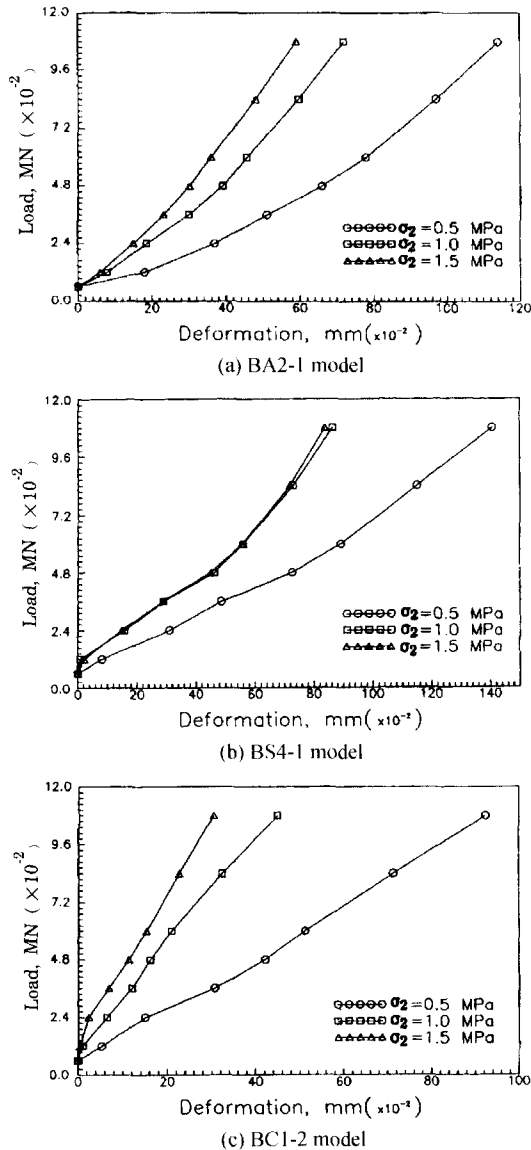


Fig. 8. Axial load-axial deformation curves for jointed rock mass models under three lateral stresses.

기의 블록으로 나누어지고 많은 절리를 포함하게 되어 암반의 변형성은 증가하여 변형계수는 감소하였다. 절리군의 교차각에 따른 불연속암반의 변형거동은 비선형적인 증가곡선으로 축하중이 증가함에 따라 아래로 오목한 형태의 변형곡선에서 위로 볼록한 형태의 변형곡선으로 전이되는 경향이 나타났다. 또한 교차각에 따른 변형계수의 변화양상은 교차각이 30°, 60°인 경우의 변형계수가 절리군의 교차각이 90°의 경우 보다 작게

나타났는데, 이는 절리의 방향이 최대 주응력 방향에 경사져 축응력의 증가에 따른 변형량이 증가하기 때문이라 생각된다. 절리군의 연속성에 따른 불연속암반의 변형거동 역시 비선형적인 증가곡선을 보였으며, 연속적인 절리만이 존재하는 불연속 암반 모델보다 불연속적인 절리가 존재하는 암반 모델의 변형계수가 작게 나타났다.

#### 4. 방사성 폐기물 처분장 주위의 열-수리-역학적 상호작용에 대한 수치해석

##### 4.1 프로그램의 구성

유한요소지배방정식을 이용하여 해석을 수행하기 위해 Lewis에 의해 공개된 Plascon 비선형 비등온 탄소성 압밀프로그램을 변형하여 사용하였다. Plascon은 Fortran으로 제작되었으며, 이차원 응력상태를 평면응력, 평면 변형률, 평면 선대칭상태로 해석할 수 있다. 이 프로그램을 암반공학에 적용하기 위해 매체의 물성의 온도의존성, 수리전도도의 변형률 및 온도의존성을 포함하여 해석을 수행할 수 있도록 보완하였다. 지배방정식은 역학적 평형방정식과 수리 연속 방정식, 그리고 열유동 방정식으로 구현되며 자세한 내용은 안형준<sup>2)</sup>의 논문을 참고하기 바란다. 유한요소해석을 수행하기 위해 지배방정식들을 변위, 수압, 온도에 대하여 이산화하여 단선해법(monolithic augmentation)을 사용하여 반복해법을 통해 비선형 관계를 해석하였다.

온도에 따른 탄성계수, 포아송비, 열팽창률, 열확산도 등의 변화관계식은 Wai가 제시한 경험식을 사용하였으며, 수리전도도의 변형률 및 온도의존성은 Wei, Borsetto가 각각 제안한 식을 함수화하여 사용하였다. Wai는 캐나다의 선캠브리아대의 Ontario 화강편마암에 대하여 탄성계수, 포아송비, 팽창계수, 열확산도 등의 암반 물성의 온도의존성을 단순한 형태의 선형회귀식으로 정리하였다.

암반의 수리유동이 주로 수많은 절리를 통해서 이루어진다고 하면 암반의 변형거동에 의한 투수계수의 변화는 절리와 하중과의 관계를 통해서 고찰할 수 있다. 그러나 현실적으로 절리의 양상과 성질을 완전히 파악하기는 힘들기 때문에 투수계수의 변화는 이론적으로 구해지는 것이 아니라 경험적으로 구해지게 된다. 다양한 깊이에서의 현장 투수계수의 실험을 통해서 수평방향의 투수계수 ( $k_h$ )와 변형률에 대한 다음의 경험식이

제시되었다.

$$k_h = k_{0h} \cdot e^{\beta \epsilon_v} \quad (1)$$

여기서,  $k_{0h}$ 는 수평방향의 초기 투수계수,  $\Delta \epsilon_v$ 는 수직방향으로의 변형률의 증분이며,  $\beta$ 는 무차원 매개변수이다.

다음으로 수리전도도는 온도에 의해서도 변화하는데 수리전도도의 변화원인은 암석을 가열하면 팽창에 의하여 내부의 간극이나 미세균열이 확장되고 연결되며 암석내부의 유체는 밀도와 점성도가 변화하기 때문이다.

암석의 열팽창에 의한 변형이 하중에 의한 변형과 동일한 양상을 가진다고 생각하면 암석의 열팽창은 앞에서의 변형률과의 관계식으로 표현할 수 있으며 유체의 성질변

화는 온도에 대한 함수가 된다. 일반적으로 물의 점성도  $\mu$ 의 절대 온도에 따른 변화는 다음 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{42.7}{(T-250)} & 273 \text{ K} \leq T \leq 333 \text{ K} \\ \mu &= \frac{27.9}{(T-278.8)} & 333 \text{ K} \leq T \end{aligned} \quad (2)$$

수리전도도  $K$ 는 투수계수의 항과 (2)식의 점성도 함수식, 밀도의 변화를 포함하여 결정된다. 해석에 사용된 모델은 방사성 폐기물 처분 대상공동인 심부에서의 수갱모델을 사용하였으며, 탄성해석을 수행하였다. 전체적인 프로그램의 순서도는 Fig. 9와 같다. 이 프로그램의 검증을 위해, 문헌에 나와 있는 선형 열탄성 압밀 모델을 통해 프로그램의 타당성을 검증하였으며, 문헌의 내용과 부합하였다.<sup>21</sup>

#### 4.2 해석 결과 및 검토

본 연구에서 개발된 프로그램을 이용하여, 2차원 수갱 모델에 대한 수리-역학 모델 및 열수리-역학 모델에 대하여 해석을 수행하였다. Fig. 10은 해석에 사용된 유한 요소망을 나타낸다. 모델에서 암반은 탄성적인 거동을 하며 수갱은 2m의 반경으로 5 MPa의 정수압 상태의 현지응력을 받고 있다. 이 수갱은 평면변형률상태에 있으며 밀폐된 투수층으로 가정한다. 암반의 물성은 다음과 같다. 탄성계수  $E$ : 7500 MPa, 포아송비  $\nu$ : 0.25, 투수율-변형률 계수  $\beta$ : 2000, 투수계수:  $3.11 \times 10^5$  m/day,

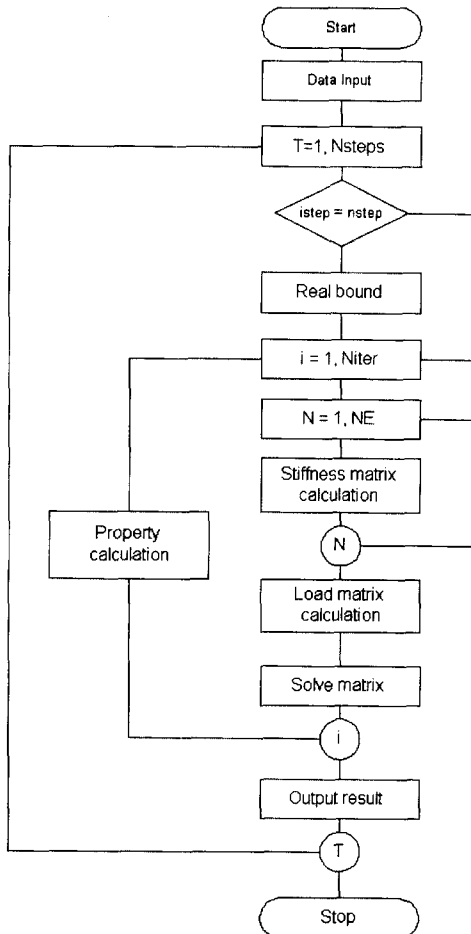


Fig. 9. Flow chart of fully coupled finite element analysis program

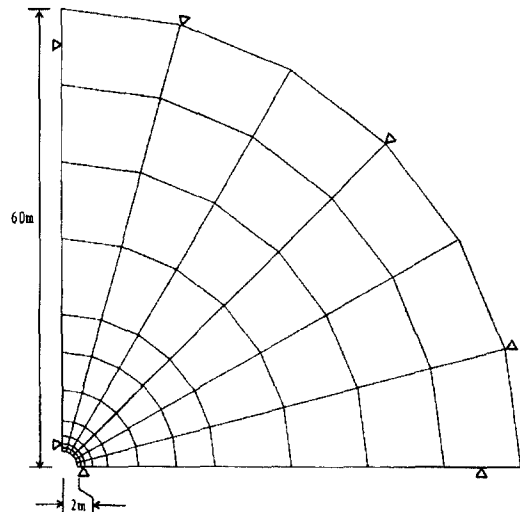


Fig. 10. Finite element mesh of shaft model for coupled analysis



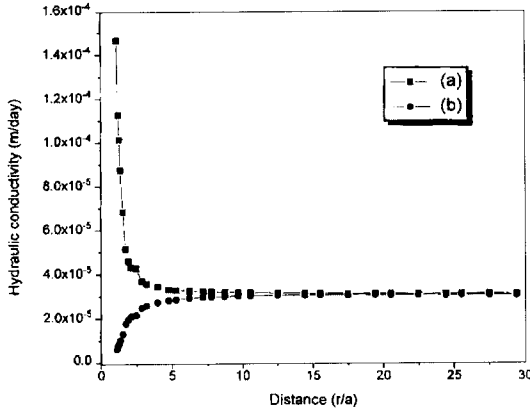


Fig. 11. Hydraulic conductivity distribution in Hydro-mechanical coupling analysis ; (a) tangential, (b) radial

암반의 체적압축률 :  $0.66 \times 10^{-5} / \text{MPa}$ , 물의 체적압축률 :  $0.23 \times 10^{-3} / \text{MPa}$ ,  $\beta_s$ (암석의 열팽창률) =  $0.6 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ,  $\beta_w$ (물의 열팽창률) =  $0.21 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$ ,  $(\rho c)_s$ (암석의 열용량) =  $2.25 \times 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$ ,  $(\rho c)_w$ (물의 열용량) =  $4.19 \times 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$ ,  $\lambda$ (포화암석의 열전도도) =  $3.2 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Fig. 11은 수리-역학적 모델에서의 수리전도도의 변화 양상을 나타낸다. 접선방향의 수리전도도는 크게 늘어나는 반면 반경방향의 수리전도도는 감소하게 되는데 이는 수갱의 공동 모델 조건에 의한 영향 때문에 반경방향으로는 변형률이 양의 값을 가지며 접선방향의 변형률은 음의 값을 갖기 때문이다. 접선방향의 수리전도도는 공동벽면에서 약  $1.9 \times 10^{-4} \text{ m/day}$  정도의 값을 보였으며 반경방향의 수리전도도는 약  $4.5 \times 10^{-6} \text{ m/day}$  정도의 값을 보였다.

수리역학적 모델이 안정화된 후, 공동 벽면에 열을 가하여 열-수리-역학 모델을 수행하였다. 해석은 탄성계수, 포아송비, 열팽창률 등의 물성이 온도의존성을 가지지 않는 경우(CASE 1)와 온도의존성을 갖는 경우(CASE 2)로 나누어 실시하였다.

CASE 1의 경우 수압분포양상은 온도증가에 따라 점차 공동주위의 수압이 감소하는 양상을 보였으며, 이는 온도상승의 효과에 의해 간극이 확대되고 지하수의 점성도가 감소하여 수리전도도의 변화가 발생하기 때문이라 생각된다. 온도증가에 의한 공동부근에서의 열팽창은 공동에서 경계방향으로 발생하며 공동벽면에서의 변위에는 별다른 영향을 미치지 않았다. 또한 열팽창의 효과는 공동의 법선방향으로 발생하여 법선방향의 변

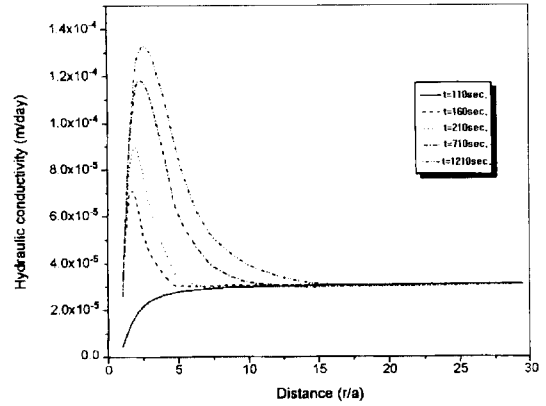


Fig. 12. Radial hydraulic conductivity distribution at several time in fully coupled analysis

위가 주로 변화하였다. Fig. 12는 공동에 온도를 구속하였을 때 시간에 따른 반경방향 수리전도도의 변화를 보여준다. 변형률 발생에 비해 수리전도도 증가율이 상당히 크다. 물의 점성도 변화에 따라 수리전도도가 증가하며, 접선방향의 압축응력의 감소의 영향으로 공동 중심에서 약 6~7 m 지점에서 최대값을 보였다. 물성이 온도의존함수로 주어지는 경우(CASE 2)에는 물성이 상수인 경우와 비교하여 열팽창률이 크게 증가하였다. 전체적으로 변위의 변화가 커졌으며, 이는 온도증가에 따라 열팽창률이 증가하기 때문이라 생각되었다. 응력 변화는 변위 증가에 비해 큰 변화가 없었는데, 이는 탄성계수가 감소해도, 응력의 변화가 발생하지 않기 때문이라 생각된다. 수리전도도 역시, 온도 증가에 따른 물성 변화로 인한 변위 변화가 크므로, 이에 영향을 받아 크게 증가하였다. 변형률에 영향을 받아 크게 증가하였다.

### 5. 결 론

방사성 폐기물의 지하처분을 위한 기초 연구로서 지하 암반 및 불연속면의 특성과 고온하에서의 암석 물성, 그리고 암반의 열-수리-역학적 상호작용에 대한 연구 결과들을 요약하면 다음과 같다.

1) 고온하의 역학 물성 시험의 결과로서, 황등화강암은 온도 상승에 따라 점진적으로 강도와 탄성계수가 작아졌으며, 파괴시의 총변형률은 지속적으로 증가하였다. 또한 황등화강암은 온도, 압력 변화에 따라서 변형 거동의 선형성을 뚜렷하게 유지하는데 비하여, 경기편

마암의 변형거동은 상당한 분산을 보이며, 비선형성을 보였다.

2) 예열 시험편에 대한, 수리 시험 결과로서, 예열 온도 증가에 따라 투수계수가 뚜렷이 증가하였으며, 봉압이 증가함에 따라 예열 온도에 관계없이 일정하게 감소하였다.

3) 불연속 암반모델은 절리군의 경사, 절리군의 교차각, 절리군의 간격, 절리군의 연속성에 따라 영향을 받으며, 불연속 암반모델의 변형-하중곡선은 절리의 압착에 의하여 비선형거동을 보이다가 최대주응력 방향에 대한 절리의 경사가 증가할수록 절리에서의 전단변위에 의한 비선형거동을 보였다.

4) 완전 연속체 상호작용 모델을 이용하여 발열에 의한 암반의 수리적, 역학적 상호작용 반응이 조사되었으며, 온도에 따른 역학적, 수리적, 열적 거동의 변화와 수리전도도의 증가현상이 확인되었다. 앞으로 불연속면을 고려한 상호작용 모델의 개발 및 적용이 필요하다.

## 사 사

본 연구는 한국과학재단이 지원한 '94 특정기초 과제 "방사성폐기물의 지하처분을 위한 암반공동의 부지 선정 및 안정성 평가를 위한 연구" 중 제 1 세부과제인 "방사성 폐기물 저장을 위한 불연속 암반의 특성 및 고온하에서의 암반의 수리 열역학적 상호작용에 관한 연구" 내용을 정리한 것이다. 이에 연구비를 지원해준 한국과학재단에 심심한 사의를 표하는 바이다.

## 참 고 문 헌

1. 김영근, 1993, 절리특성이 인공절리를 포함한 불연속 암반의 변형거동에 미치는 영향에 관한 연구, 서울대

학교 대학원 박사학위 논문.

2. 안형준, 1996, 암석의 온도의존성을 고려한 열-수리-역학적 상호작용의 수치해석적 연구, 서울대학교 대학원 석사학위 논문.
3. 윤용균, 1992, 하중조건과 절리의 거칠기가 암석의 투수성에 미치는 영향, 서울대학교 대학원 박사학위 논문.
4. 이희근 외, 1996, 암반내 축열시스템의 열-수리-역학적 상호작용에 대한 연구, 서울대학교 공과대학 부설 에너지·자원신기술연구소.
5. 이희석, 1995, 온도변화에 따른 화강암, 편마암의 역학적 수리적 특성에 관한 연구, 서울대학교 대학원 석사학위 논문.
6. Barton, N. Bandis, S. & Bakhtar, K., 1985, Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 22, No. 3, pp. 121-140.
7. Chan, T., Hood, M., and Witherspoon, P. A., 1980, Predicted and measured temperatures, displacements and stresses from the Stripa heater experiments, Rockstore'80, Stockholm, pp. 829-837.
8. Leichnetz, W., 1985, mechanical properties of rock joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 22, No. 5, pp. 313-321.
9. Lewis R.W., Schrefler B.A., 1987, The finite element method in the deformation and consolidation of porous media, John Wiley & Sons.
10. Stephansson, O., Jing, L., and Tsang, C-F. 1996, Coupled thermo-hydro-mechanical processes of fractured media, Elsevier.
11. Paquet, J. and François, P., 1980, Experimental deformation of partially melted granitic rocks at 600~900°C and 250 MPa confining pressure, Tectonophysics, Vol. 68, pp. 131-146.
12. Wai R.S.C., Lo K.Y., Rowe R.K., 1982, Thermal stress analysis in rocks with nonlinear properties, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 19, pp. 211-220.
13. Wei L., 1992, Numerical studies of the hydro-mechanical behaviour of jointed rocks, Doctorial thesis, Imperial College.