

고온 및 저온하에서의 암석의 변형, 파괴 특성

정재훈¹⁾, 김영근²⁾, 이형원³⁾, 이희근⁴⁾

Failure and Deformation Characteristics of Rock at High and Low Temperatures

Jae Hoon Chung, Young Geun Kim, Hyung Won Lee and Hi Keun Lee

ABSTRACT

It is very important to determine the thermo-mechanical characteristics of the rock mass surrounding the repository of radioactive waste and the LPG storage cavern. In this study, Hwasoon-Shist, Dado-Tuff and Chunan-Tonalite were the selected rock types. Temperature dependence of the mechanical properties such as uniaxial compressive strength, tensile strength, Young's modulus was investigated by measuring the behaviour of these properties due to the variation of temperature. Also, the characteristics of strength and deformation of these rocks were examined through high-temperature triaxial compression tests with varying temperatures and confining pressures.

Important results obtained are as follows: In high temperature tests, the uniaxial compressive strength and Young's modulus of Tonalite showed a slight increase at a temperature up to 300°C and a sharp decrease beyond 300°C, and the tensile strength showed a linear decrease with increasing heating-temperature. In high-temperature triaxial compression tests, both the failure stress and Young's modulus of Tonalite increased with the increase of confining pressure at constant heating-temperature, and the failure stress decreased at 100°C but increased at 200°C under a constant confining pressure. In low temperature tests, the uniaxial compressive and tensile strengths and Young's modulus of these rocks increased as the cooling-temperature is reduced. Also, the uniaxial compressive and tensile strengths of wet rock specimens are less than those of dry rock specimens.

*1992년 11월 접수

- 1) 정회원, 서울대학교 대학원 자원공학과 석사과정 졸업(공학석사)
- 2) 정회원, 서울대학교 대학원 자원공학과 박사과정
- 3) 정회원, 대한광업진흥공사 광물시험소
- 4) 정회원, 서울대학교 공과대학 자원공학과 교수

1. 서 론

암석의 역학적 거동에 영향을 미치는 주요 요인에는 구성 광물의 특성, 구조적 특성, 수문학적 특성, 온도, 수분, 응력, 시간등이 있다 (Homand, 1989). 최근 지하공간의 이용이 증가하고 있고, 그 이용 목적이 다양화되어 각종 물질의 저장 공간으로 사용되면서 온도의 변화에 따른 지하공동의 안정성이 주요한 관심사로 대두되었다.

실제로 지하원유저장소의 경우 저장압력과 입고 및 출고시 발생하는 온도변화에 의하여 열응력이 발생될수 있으며, 각종 산업 폐기물의 지하 처분시에도 폐기물로부터 방출되는 열에 의하여 공동의 안정성이 영향을 받게 된다 (Tsui, 1982). 특히 원자력 산업의 급속한 성장에 따라 이로 인해 만들어지는 각종 방사성 폐기물의 안전한 저장이 매우 중요한 문제인데, 핵연료나 고준위 방사성 폐기물과 같이 고열을 수십 년에서 수백년 이상 방출하는 폐기물의 지하 심층처분시 처분장 주변 암반의 열역학적 특성을 규명하는 것은 대단히 중요한 일이다. 또한 천연 액화가스(LNG)는 지금까지 -162°C 의 반지하 탱크에 저장되어 왔는데, 최근 LNG를 지하암반에 저장하는 방법이 연구되고 있다. 이러한 경우 저온하에서의 암반의 역학적 특성에 대한 연구는 LNG의 효과적인 저장과 지하저장소의 안정성 해석에 매우 필수적이라 할 수 있다.

현재 국내에서도 지하원유저장소, LNG·LPG 지하저장소 등 대상 암반의 열역학적 거동을 규명할 필요가 있는 지하공간 이용이 급증하는 추세이고, 또한 국내 원자력 발전소에서 폐기되는 방사성 폐기물의 지하심층저장 또는 폐기가 검토중임에 따라 대상 암반의 열적, 역학적 특성에 관한 연구가 시급히 요청되고

있다.

따라서 본 연구에서는 화순산 편암과 다도산 응회암 그리고 천안산 석영 섬록암을 대상으로 고온과 저온 변화에 따른 역학적 특성을 조사함으로써, 지하저장시설 설계와 안정성 해석의 기초자료를 제공하고자 하였다.

이를 위해서 고온 시험조 및 저온 시험조를 이용하여 상온에서 600°C 까지의 고온과 상온에서 -50°C 까지의 저온변화에 따른 이들 암석의 단축압축강도, 인장강도, 영률의 변화양상을 측정하여 이들 암석의 강도 및 변형 특성의 온도의존성을 조사하였다. 또한 다양한 봉압하에서 가열온도를 200°C 까지 변화시키며 고온 삼축 압축시험을 실시하여 온도와 압력의 영향에 따른 이들 암석의 파괴강도 및 변형특성 등의 역학적 특성을 규명하였다.

2. 고온 및 저온하의 암석의 역학적 특성

고온하에서 암석의 역학적 특성은 내부 및 외부 요인의 영향을 받는다. 그 중에서도 결정적인 요인들은 광물학적 성분, 조직결합의 성질, 성층상태 암석의 구조적 특성, 조암광물이나 소결물의 열안정성 등이다. 가열중의 암석강도가 광물 및 그 경계에서의 경화나 연화에 관해서 변화한다는 가정하에 전 가열영역을 Fig.1에서 보는 바와 같이 초기 온도가 각각 T_0 , T_1 , T_2 인 3영역으로 분류할 수 있다. 제 1 온도 영역(T_0-T_1)에서 암석강도와 온도의 관계는 광물입자 배열의 열안정성에 의해 결정되며, 제 2온도 영역(T_1-T_2)에서 암석강도와 온도의 관계는 광물간 경계의 상태에 의해 결정된다. 또한 제 3온도 영역($T_2-\infty$)에서 암석강도의 변화 양상은 광물입자의 강도변화에 의해 결정된다.

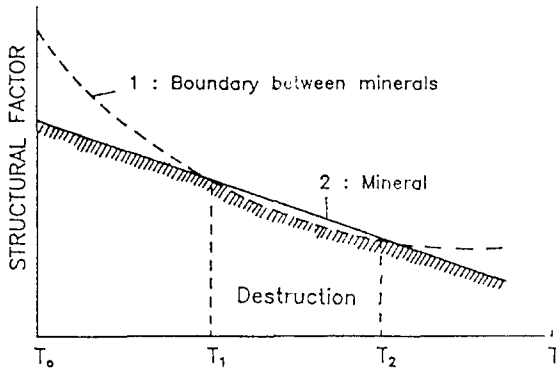


Fig. 1 Diagram of effect of different factors on rock strength during heating (After dmitriyev, Kuzyayev, Protasov and Yamschikov).

또한 온도가 증가하게 되면 Fig.2에 나타난 바와 같이 암석을 구성하는 광물들은 불균일한 선팽창계수를 갖는 열팽창이 일어난다. 이러한 조암광물의 체적 팽창에 따라 광물 경계면간의 거리는 감소하고 상호 인력이 증가한다. 이 경우 결합강도가 증가하며 이에 따라 암석의 강도는 어느 한계점까지 증가한다. 동시에 광물의 이방성에 의해 광물간 경계의 이완(Relaxation)현상이 점점 증가하게 된다. 온도가 증가함에 따라 이러한 현상은 불균질하게 증가하여 광물 내부 및 광물 경계에서 미소균열을 형성하고 계속적으로 온도가 증가함에 따라 생성된 미소 균열은 확대 전과되어 어느 단계에서 암석의 열파괴가 일어난다.

Mellor(1971)는 저온에서 암석의 역학적 성질의 온도 의존성을 연구했는데, 화강암에 대하여 -195°C 의 저온에서 강도와 변형계수를 측정하였다. 그는 온도가 낮아질수록 간극수(Interfacial water)의 두께, 연속성, 유동성이 감소함을 관찰하였고, 포화된 암석의 탄성계수, 압축강도 그리고 인장강도가 크게 증가하였음을 보고하였다. 이와 비슷한 결과들이 Inada와

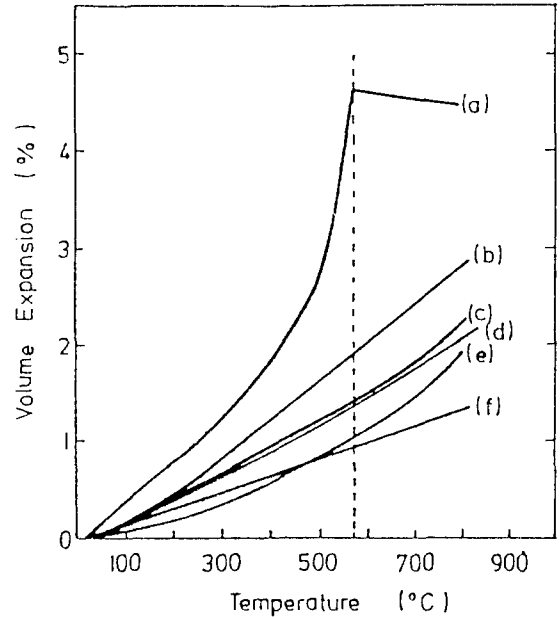


Fig 2 Volume expansion of common rock-forming minerals. (a) Quartz, (b) Olivine, (c) Hornblende, (d) Pyroxene, (e) Orthoclase, (f) Plagioclase (after Simmons, Heuze, Heuze, and Winkler)

Yokota(1984)에 의해 연구되었다. 다시 말하면 저온에서 물에 포화된 암석의 강도와 탄성계수는 증가하는 경향을 보이는데, 이는 암석의 기질(基質, Matrix)내의 공극이나 미소균열내의 유동수(Mobile water)가 온도가 낮아짐에 따라 응고되어 고착매질(Adhesive material)로써 작용하여 암석내 미소균열의 취약한 부분을 보강해주기 때문이다.

3. 시료의 특성 및 시험편 제작

3.1 시료의 암석학적 특성

연구대상시료는 전남 화순에 위치한 벽송광산에서 채취한 편암과 전남 다도에 위치한 다도광산에서 채취한 응회암, 그리고 천안에서 채취한 석영섬록암이다. 편암은 석영, 백운모,

홍주석과 탄질물등의 불투명광물 등이 주 구성 광물이며 부 구성광물로는 녹니석, 전기석, 저어콘, 클로리토이드 등과 2차 변질광물인 견운모 및 고령석 등이 산출되고 있다. 응회암은 심한 고령토화 작용을 받았으며 주 구성광물은 세립 내지 미립의 석영, 고령석 등이며, 기타 함유 광물로는 소량의 백운모, 저어콘, 금홍석, 중정석, 견운모 및 불투명 광물 등이 수반되고 있다. 또한 석영섬록암(Tonalite or quartz diorite)은 중립 내지 세립질에 입상 조적을 보여주는 암회색 석영섬록암으로서 사장석, 각섬석, 흑운모, 석영 등이 주 구성광물을 이루고 있다. 기타 정장석, 스펀, 녹염석, 녹니석, 인회석, 저어콘, 불투명광물, 방해석 및 2차변질광물인 견운모, 점토광물류 등이 수반된다.

Table 1은 이상의 관찰로부터 얻은 시료의 주요 광물 조성을 나타낸 것이다.

Table 1. Mineralogical compositions of test specimens.

Rock	Mineral compositions(% in Vol.)
Schist	Andalusite(38), Quartz(19), Muscovite(18), Opaques(12), Chlotitoid(5), Clay(5).
Tuff	Quartz(55), Clay(25), Crysto-crystalline(15), Barite(3), Chlorite(1)
Tonalite	Plagioclase(33), Hornblende(25), Biotite(17), Quartz(12), K-feldspar(5)

3.2 시험편의 물리적, 역학적 특성

시험편의 물리적, 역학적 성질을 Table 2에 나타내었다. 단축압축강도 및 인장강도는 5회 측정치의 평균값을 표시한 것이다. 영률은 다이얼 게이지로 시험편 전체의 축변형을 측정하여 구한 응력-변형률 선도에서 단축압축강도의 50% 수준에서 구한 접선 계수이며, 포아송비는 스트레인게이지로 측정한 횡변형률과 축변형률의 단축압축강도 50% 수준에서의 비이다.

Table 2. Physical and mechanical properties of test specimens.

Rock	Specific Gravity (g/cm ³)	Apparent Porosity (%)	Compressive Strength (kg/cm ²)	Young's Modulus (10kg/cm ²)	Wave Velocity P-wave S-wave (m/sec)	Poisson's Ratio
Schist	2.47	3.07	650	3.56	3910 2570	0.21
Tuff	2.52	1.14	690	0.95	4250 2600	0.20
Tonalite	2.74	0.56	1740	1.89	3700 2110	0.19

3.3 시험편 제작

압축시험용 시험편은 압괴시료에서 NX코아 (직경:53~54mm) 또는 35mm코아를 채취하여 0.75 마력 암석절단기를 이용하여 직경:길이의 비가 1:2.1~1:2.3의 크기로 절단한 후 편평도가 0.02mm 이하, 축에 대한 수직도는 0.05mm이하, 시험편 전체 길이에 대한 직선도가 0.3mm이내의 정밀도로 연마하여 제작하였다. 압열인장용 시험편은 위의 코아를 직경:길이의 비가 1:0.7의 크기로 절단하여 양단면을 200mesh의 카보런덤으로 연마하여 제작하였다.

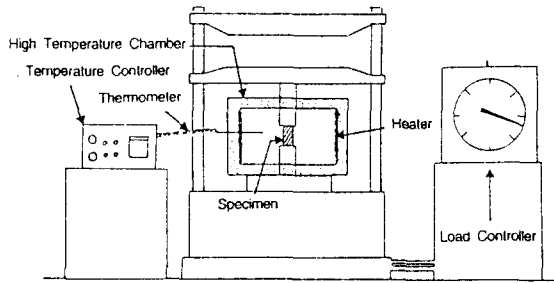
4. 실험장치 및 실험방법

4.1 실험장치

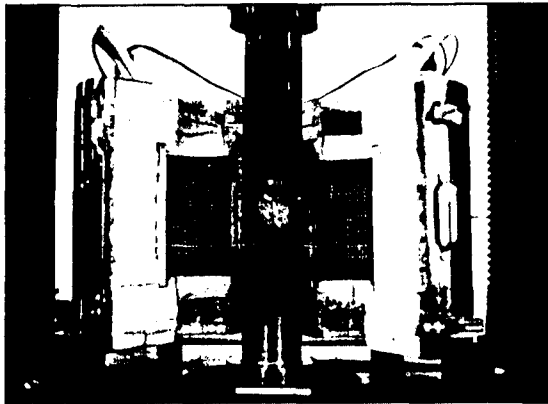
4.1.1 고온시험장치

온도변화에 따른 시험편의 단축압축강도, 영률, 인장강도의 변화를 측정하기 위하여 고온시험조 (High temperature testing chamber)를 이용하였으며, 고온 시험조가 설치된 고온시험의 구성도를 Fig.3(a)에 나타내었다. 이 시험조는 전면 개방식 으로서, 몸체를 좌우로 개방한 후 하부 플레이트를 압축기 가압관에 설치한 후 상부 가압 피스톤을 압축기 상부 가압 플레이트에 연결하여 장착한다. 피스톤 및 플레이트의 재질은 고온에서의 재료강도 및 내구성 향상을 위하여 고온용 특수강인

인코넬을 사용하여 제작하였다. 고온시험조내부에는 3kW 용량의 매물식 전기히터를 작동시켜 온도를 상승시키며, 이 히터를 프로그래머의 온도조절기에 연결하였다. 이 온도조절기는 열전대를 통하여 시험편의 표면온도를 감지하여 원하는 가열온도(Heating temperature)와 승온속도, 가열온도의 유지시간 등을 조정한다. Fig.3(b)는 시험편이 준비된 고온시험조의 모습이다.



(a) Schematic diagram of high temperature testing system



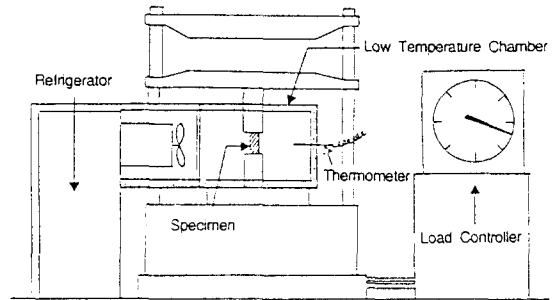
(b) High temperature chamber

Fig. 3 High temperature testing system

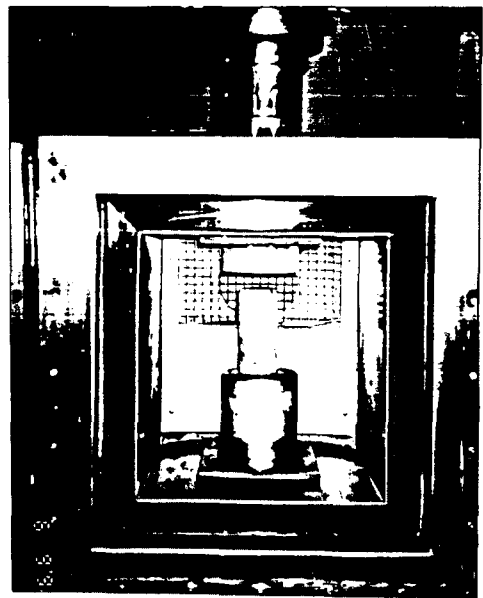
4.1.2 저온시험장치

0°C 이하의 저온 상태에서의 시험편의 단축압축 강도, 영률, 인장강도의 변화를 측정하기 위하여 -100°C 까지 냉각이 가능한 저온시험조(Low pemterature testing chamber)를 이용하였는데, 저온시험조가 설치된 저온시험의 구성도가 Fig.4(a)

에 나타나 있다. 이 시험조는 프레온 가스를 냉매제로 이용한 것으로, 몸체를 축변위 측정용 캔틸레버가 부착된 하부플레이트를 150톤 용량의 전동유압식 압축기 가압판에 설치한 후 구면좌가 포함된 상부 가압피스톤을 압축기 상부 가압플레이트에 연결하여 장착한다. 챔버 모체와 상부 가압피스톤 및 하부 플레이트가 관통하는 부분은 가축성 단열재로 밀봉처리하여 열손실을 최소화 하였다. 시험편을 상부피스톤과 하부플레이트 사이에



(a) Schematic diagram of low temperature testing system



(b) Low temperature cham

Fig. 4 Low twmperature testing system.

위치시킨 후 문을 닫고 일정온도까지 냉동시킨 다음 가압한다. 그리고 측면에 온도를 제어하는 온도 조절기가 설치되어 있어 원하는 냉동온도(Freezing temperature)까지 낮아지면 자동적으로 히터가 작동되고 온도가 높아지면 다시 냉동기가 작동하여, 원하는 온도를 일정하게 유지하게 된다. Fig.4(b)는 시험편이 준비된 저온시험조의 모습이다.

4.2 시험조건

4.2.1 고온시험조건

고온에서의 암석의 역학적 특성을 규명하는 실험방법으로는 시험편에 미리 열을 가한후 상온에서 냉각한 다음 시험하는 예열시험(Pre-heating test)과 열을 직접 가하면서 직접 시험하는 고온하의 시험이 있는데, 본 연구에서는 고온하의 시험을 실시하였다.

승온속도는 시험편의 열과괴(Thermal shock)를 방지하기 위하여 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 로 하였으며, 가열시에 고온시험조내의 가열온도가 시험편 내부까지 균일하게 전달되기 위해서는 가열시간을 충분히 주어야 한다. 가열온도의 유지시간은 시험편의 열전도율과 크기에 따라 달라지는데, 본 연구에서는 시험편내부까지 충분히 가열하기 위하여 가열온도를 5시간 동안 유지하였다.

4.2.2 저온시험조건

본 연구에서는 0°C 이하의 저온에서의 암석의 역학적 특성을 조사하기 위하여 시험편을 미리 냉동시킨 후 상온에서 녹힌 다음 시험하는 저온-상온시험과 저온시험조 안에서 냉동하면서 직접 시험하는 저온-냉동시험을 실시하였다.

이를 위해서 먼저 시험편을 105°C 로 유지시킨 진공건조오븐내에 48시간 동안 건조시킨다음, 데시케이터안에 일주일 동안 넣어 시험편을 완전 건조상태로 만들었다. 또한 시험편을 -76cmHg 의 진공상태를 유지하는 진공건조기에서 48시간 동

안 침수시킨 다음, 일주일 동안 물에 담가두어 시험편을 완전침수상태로 만들었다. 완전건조 및 침수된 시험편은 냉각중의 수분의 흡수를 방지하기 위하여 비닐랩으로 밀착하여 덮어 쓰워 저온시험조안에 넣고 냉동시켰다. 냉동온도에 도달한 다음 시험편 내부까지 균일하게 냉동시키기 위하여 고온시험에서와 마찬가지로 5시간 동안 유지하였다. 그리고 저온-상온시험을 위해서 저온시험조에서 냉동된 시험편을 꺼내어 상온에서 녹힌 다음, 위의 건조-침수과정을 반복하여 시험편을 준비하였다.

4.3 실험방법

4.3.1 고온 및 저온 단축압축시험

고온단축압축시험에서 시험편의 가열온도를 상온에서 100°C 간격으로 600°C 까지로 하였다. 600°C 까지 시험을 실시한 것은 본 연구대상인 시료들에서 열특성에 가장 큰 영향을 미치는 광물인 석영전이점(573°C)을 고려한 것이며, 또한 실제 공학적 환경에서 발생가능한 온도범위로 판단되어 결정하였다. 고온단축압축시 축압의 하중속도는 대체로 $1\text{kg}/\text{cm}^2/\text{sec}$ 정도로 하여 하중충격의 영향을 최소화하도록 하였다. 시험시 상하부 플레이트가 고온상태인 관계로 수압기를 사용하지 못하여 하중-변위선도를 연속적으로 자동 기록할 수 없기 때문에, 각 시험마다 변위 측정점을 20~30회로하여 가능한 조밀하게 변위를 측정하도록 하였다.

저온단축압축시험에서 시험편의 냉동온도는 -15°C 와 -50°C 로 하였으며, 위의 고온단축압축시험과 같은 방법으로 시험을 실시하였다.

4.3.2 고온 및 저온 인장시험

고온인장시험에서 디스크형의 시험편을 고온시험조에 설치하고, 지름방향으로 축하중을 증가시키며 파괴하중을 측정후 인장강도를 구하였다. 이때에도 하중증가속도를 약 $1\text{kg}/\text{cm}^2/\text{sec}$ 이하로 하여 충격하중이 가해지지 않도록 주의하였다. 가열

온도와 승온속도 그리고 가열온도에서의 유지시간도 고온단축압축시험에서와 동일하게 하여 시험을 실시하였다.

저온인장시험조건을 저온단축압축시험과 동일하며, 위의 고온 인장시험과 같은 방법으로 시험을 실시하였다.

4.3.3 고온 삼축압축시험

삼축압축챔버에 시험편을 설치하여 조립하고 주변장치를 모두 연결시킨 후 시험편과 코아자켓의 압착을 위하여 초기봉압을 가해준다. 봉압은 공기압축기에서 발생하는 5~7kg/cm²의 압축공기를 압력증폭조절램프에서 적당한 수준으로 1차 증폭시킨 후 유압으로 2차 증폭시키게 되는데, 초기 봉압은 약 14kg/cm²를 가해주었다. 초기봉압을 가한 상태에서 온도를 원하는 수준으로 상승시키게 된다. 원하는 가열온도에서 유지시간은 90분으로 하였으며, 가열온도는 100°C 및 200°C이며, 봉압은 50kg/cm², 100kg/cm², 150kg/cm²의 3가지로 하였다. 온도와 압력이 일정하게 유지된 상태에서 축압을 증가시키며 하중변환기로부터의 축하중과 변위변환기로부터의 축변형을 변형률증폭기에서 증폭시킨 후 X-Y기록계에 자동기록하였다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 고온시험에서 온도변화에 따른 시험편의 강도 및 변형특성

5.1.1 단축압축강도 및 영률의 변화

상온에서 100°C 간격으로 600°C까지 1°C/분의 가열속도로 시험편을 가열온도에서 5시간 유지시켜 준 후 각각의 가열온도의 단축압축하에서 측정 한 시험편의 대표적인 축응력-축변형률 선도를 Fig.5에 나타내었다. 석영섬록암은 온도가 상승할 경우 300°C까지는 뚜렷한 경향을 보이지 않지만 가열온도가 그 이상일 경우 단축압축강도의 강도 저하와 변형률의 증가가 나타났다. 특히 500°C 및

600°C에서 시험한 시험편은 상온에서와 비교하여 강도가 각각 68%, 58% 수준으로 감소되었음에도 파괴시까지의 총변형량은 크게 증가하였다.

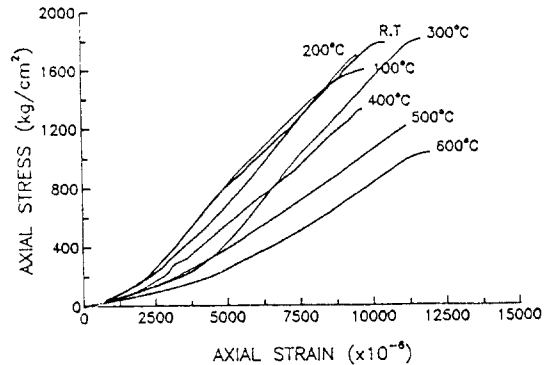


Fig. 5 Typical axial stress-axial strain curves of Tonalite at various heating temperatures.

온도 변화에 따른 단축압축강도의 변화양상은 Fig.6에 나타나 있다. 그림에는 상온에서 600°C까지 각각의 가열온도에서 2~5회 측정된 단축압축강도의 평균값과 표준편차가 표시되어 있다. 가열온도가 300°C까지 높아짐에 따라 석영 섬록암의 단축압축강도는 오히려 소폭 증가하는 경향이 나타났는데, 이러한 현상은 조암광물의 체적팽창에 따라 광물경계면간의 거리는 적어지고 상호인력이 증가하여 결합강도가 증대되기 때문으로 생각된다. 300°C 이후에서는 단축압축강도가 온도의 증가에 따라 크게 감소하였는데, 이는 350°C 부근에서 열파괴가 개시되어 400°C 이후 급격히 열파괴가 발생하는 현상과 잘 일치한다. 즉 400°C 이후에 시험편의 열파괴가 가속화됨에 따라 단축압축강도도 급격히 감소되었다. 이는 열파괴가 일어난 후 부터 입자간 결합력이 크게 약화되어 강도가 저하되는 것으로 생각된다.

석영 섬록암의 온도변화에 따른 영률의 변화양상이 Fig.7에 나타나 있다. 영률은 온도의 증가와 더불어 300°C까지는 소폭 증가하였다가 300°C 이후 급격히 감소하였는데, 이러한 변화양상은 단축

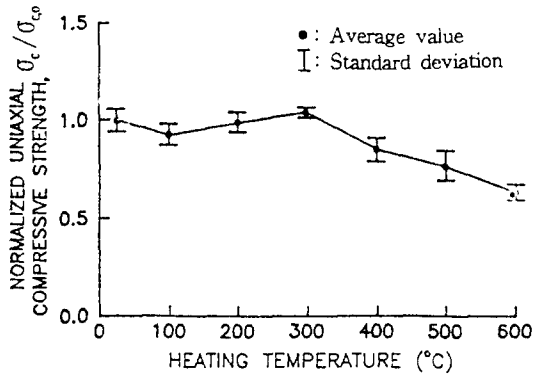


Fig. 6 Normalized uniaxial compressive strength of Tonalite with heating temperature.

압축강도의 변화양상과 잘 일치한다. 이는 온도가 증가함에 따라 암석내에 열파괴가 발생하기 시작하며 미소 균열이 생성, 확대, 전파되어 가압시 변형량의 증가로 나타나기 때문이다.

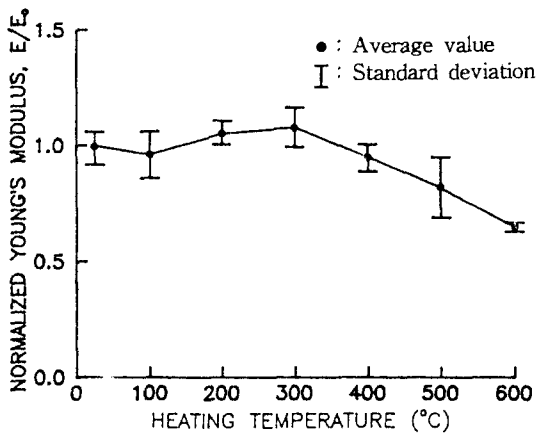


Fig. 7 Normalized Young's modulus of Tonalite with heating temperature.

5.1.2 인장강도의 변화

온도변화에 따른 인장강도의 변화양상이 Fig.8에 나타나 있다. 온도가 증가함에 따라 인장강도의 증가현상은 보이지 않고 지속적인 저하를 보여주고 있으며, 또한 그 변화폭도 대단히 크게 나타나 600°C에서의 인장강도는 상온에서의 강도에

비해 약 34%로 크게 감소하였다. 이러한 인장강도의 변화양상은 앞에서 고찰한 단축압축강도나 영률의 변화양상과는 상이한 특성이라 할 수 있다. 이는 인장강도 자체가 암석내 균열이나 입자간 결합력에 대단히 민감한 물성임에 따라 300°C 이후 열파괴가 진행되면서 균열이 생성 전파되면서 400°C에서 급격한 강도의 저하를 나타내고, 그 이후 석영의 전이점을 지나면서 급격한 강도저하를 보이고 있는 것으로 생각된다.

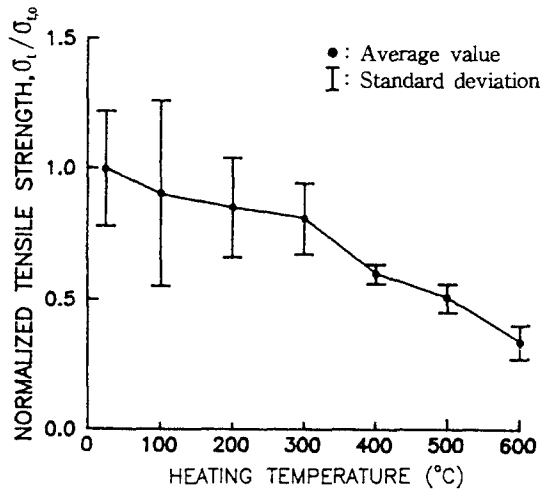


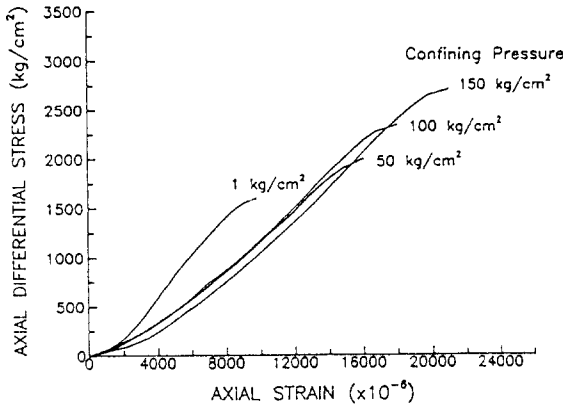
Fig. 8 Normalized tensile strength of Tonalite with heating temperature.

5.1.3 봉압하에서 역학적 특성

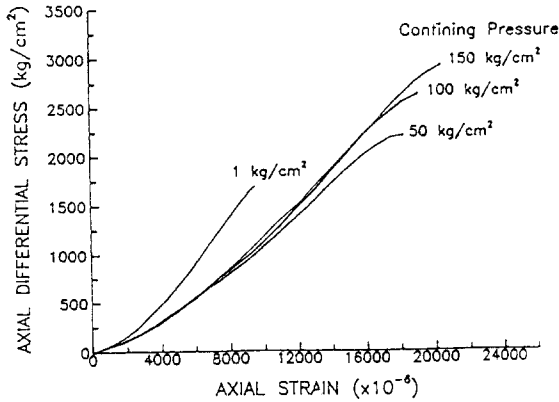
석영섬록암에 대한 고온삼축압축시험에서 온도가 100°C, 200°C 인 각각의 경우에 봉압을 50kg/cm², 100kg/cm², 150kg/cm²로 변화시키며 파괴강도와 변형률을 측정하였다. Fig.9에서 보는 바와 같이 각각의 온도에서 봉압이 증가함에 따라 파괴강도는 증가하였으며, 또한 파괴시까지의 변형률은 봉압증가와 더불어 증가되는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 이러한 시험결과를 이용하여 작도한 각 온도에서의 Mohr 응력원과 파괴포락선이 Fig.10에 나타나 있다. 또한 Fig.11에서 보는 바와 같이 봉압이 50kg/cm² 일때 가열온도가 100°C인 경우 상온

의 97% 수준으로 약간 증가하였는데, 이러한 경향은 봉압이 100kg/cm² 와 150kg/cm² 일 때도 마찬가지로 나타났으며 이는 단축압축강도 결과와 잘 일치한다.

이와같이 석영섬록암은 동일한 가열온도에서 봉압이 증가하면 파괴강도와 변형률은 증가하고, 동일압력에서 가열온도가 증가하면 파괴강도가 100°C에서 저하하였다가 200°C에서 다시 증가하는 경향이 나타났다. Fig.12에는 봉압(σ_3)와 최종 파괴강도($\sigma_1 - \sigma_3$)를 도시하여 주응력 평면에서 시험



(a) At heating temperature 100°C

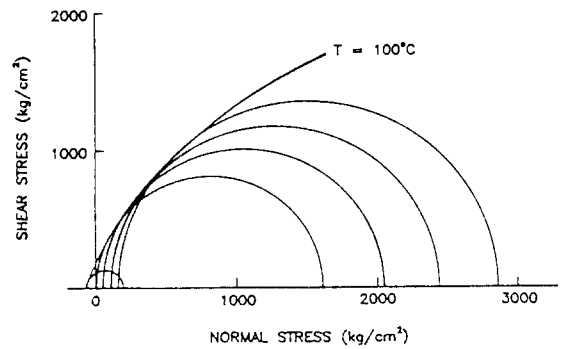


(b) At heating temperature 200°C

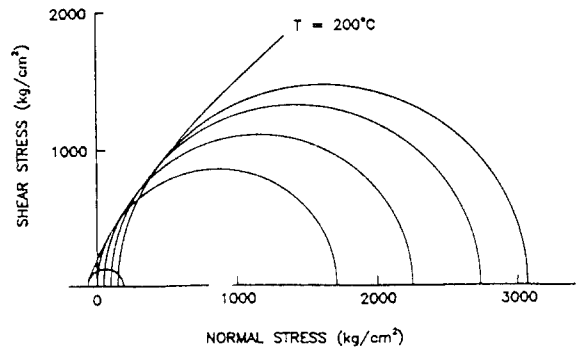
Fig. 9 Typical curves of axial differential stress versus axial strain of Tonalite under various confining pressure.

편의 파괴 포락선을 도시하였다. 온도가 증가하면 파괴포락선이 100°C에서 저하하였다가 200°C에서 다시 상승하는 경향을 보였다.

이는 가열온도가 100°C까지 높아짐에 따라 암석내부에서 국부적인 열응력의 발생으로 인하여 강도가 소폭 감소하였다가, 온도가 계속 증가함에 따라 암석내부의 기존균열의 닫힘으로 인한 광물 입자간의 상호인력이 증대되어 강도가 증가한 것으로 생각된다. 그리고 열파괴 이후에는 단축압축 강도와 마찬가지로 다시 강도가 감소할 것으로 예상된다.



(a) At heating temperature 100°C



(b) At heating temperature 200°C

Fig.10 Mohr's stress circles and failure envelope of Tonalite.

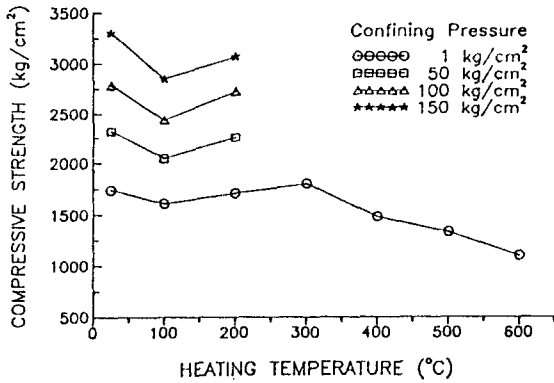


Fig. 11 Compressive strength of Tonalite versus heating temperature under various confining pressures.

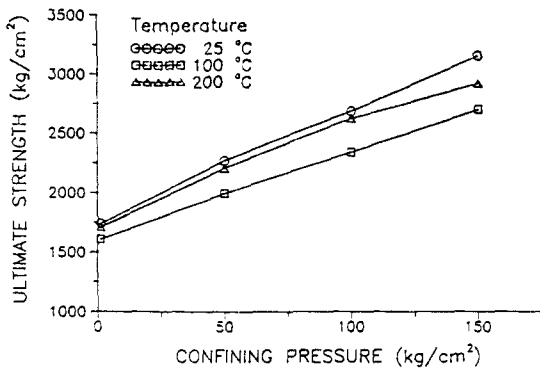


Fig. 12 Ultimate strength versus confining pressure of Tonalite at various heating temperatures.

5.2 저온시험에서 온도변화에 따른 시험편의 강도 및 변형 특성

5.2.1 단축압축강도 및 영률의 변화

저온-냉동시험에서 석영섬록암의 저온변화에 따른 단축압축시험의 변화양상은 Fig.13에 나타나 있다. 그림에는 측정치와 평균 그리고 측정치의 최고값과 최저값이 표시되어 있다. 온도가 낮아짐에 따라 단축압축강도는 계속적으로 증가하고 있는데, -15°C 에서는 약 1.05배로 약간 증가하였으며 -50°C 에서는 1.31배의 큰 증가경향을 보였

다. 이는 냉각중에 암석내부의 공극이나 미소균열 내에 존재하는 간극수나 유동수가 응고되어 균열과 같은 암석내부의 취약한 부분을 보강해 주기 때문이라 생각된다.

저온-냉동시험에서 석영섬록암의 저온변화에 따른 영률의 변화양상은 Fig.14에 나타나 있다. 온도가 낮아짐에 따라 영률은 증가하는 경향을 보여 주고 있다. 영률이 증가한다는 것은 하중증가에 따른 변형량이 감소하는 것을 의미하는데, 이는 냉각중에 암석내부의 공극이나 미소균열 내에 존재하는 간극수나 유동수가 응고되면서 미소균열의 틈을 채워주기 때문에 가압시 상대적으로 적은 변형량이 나타나기 때문이다.

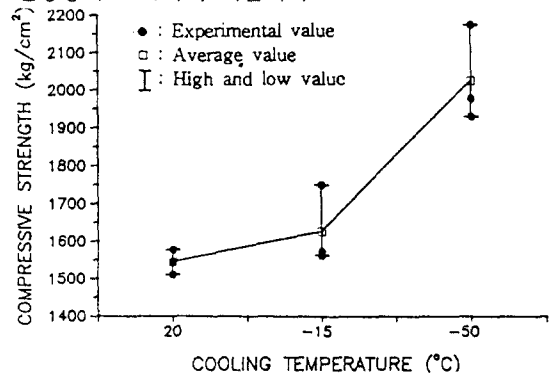


Fig. 13 The variation of uniaxial compressive strength of Tonalite with cooling temperature (tested at cooling temperature).

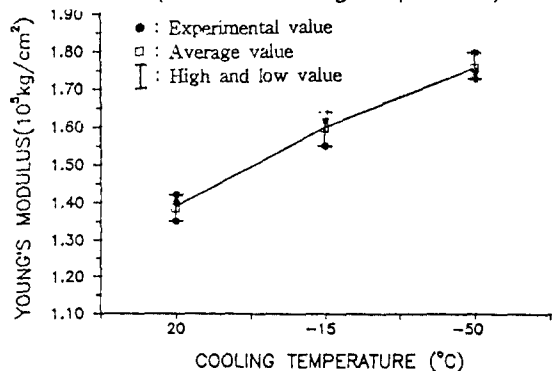
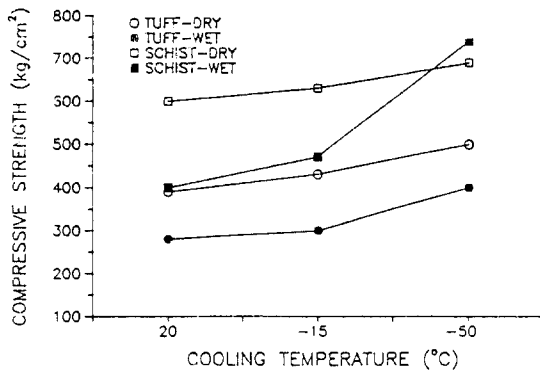
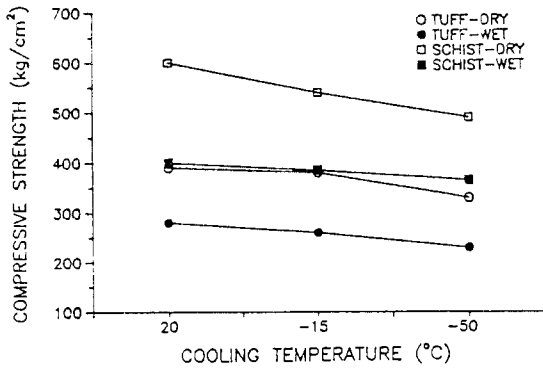


Fig. 14 The variation of Young's modulus of Tonalite with cooling temperature (tested at cooling temperature).

시험편의 저온하에서의 역학적 특성과 저온상태를 유지한 다음 상온에서의 역학적 특성의 차이를 비교하기 위하여, 편암과 응회암의 건조-침수된 시험편에 대하여 각각 저온-냉동시험과 저온-상온시험을 실시하였다. Fig.15에는 편암과 응회암에 대한 저온에 따른 단축압축강도의 변화양상이 나타나 있다. Fig.15(a)에서 보는 바와같이 저온-냉동시험에서 온도가 낮아질수록 단축압축강도가 증가하고 있으며 특히 -50°C 에서 큰 증가율을 보여주고 있다. 또한 건조된 시험편의 단축압축강도가 침수된 시험편보다 크게 나타났으며, 침수된 시험편의 강도 증가율이 건조된 시험편의 증가율



(a) Tested at cooling temperature



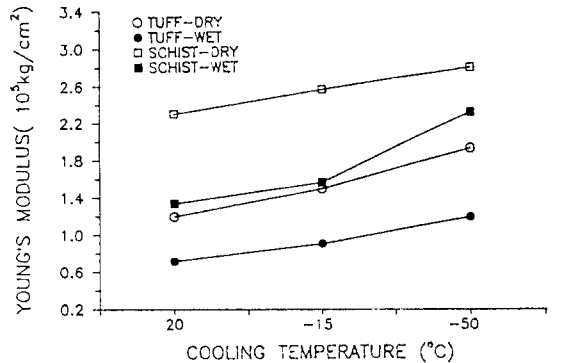
(b) Tested at room temperature

Fig. 15 The variation of uniaxial compressive strength of Schist and Tuff with cooling temperature.

보다 크게 나타났다. 또한 Fig.15(b)에서 보는 바와 같이 저온 상온 시험에서 온도가 낮아질수록 단축압축강도가 저하되고 있으며 10% 미만의 작은 저하율을 보여주고 있다.

Fig.16에는 편암과 응회암에 대한 저온에 따른 영률의 변화양상이 나타나 있다. Fig.16(a)에서 보는 바와같이 저온-냉동시험에서 온도가 낮아질수록 영률은 증가하는 경향이 나타났다. 또한 건조된 시험편의 영률이 침수된 시험편보다 크게 나타났으며 침수된 시험편의 영률 증가폭은 건조된 시험편의 증가폭보다 약간 크게 나타났다. 또한 Fig. 16(b)에서 보는 바와 같이 저온-상온시험에서는 온도가 낮아질수록 영률은 저하되는 경향을 보여주고 있다. 또한 저온-냉동시험에서와 같이 건조된 시험편의 영률이 침수된 시험편보다 크게 나타났다.

이와같이 저온-냉동시험에서 온도가 낮아짐에 따라 단축압축강도와 영률이 증가하였는데, 이의 원인은 석영섬록암에서 설명한 바와 같다. 그리고 저온-상온시험에서 온도가 낮아짐에 따라 단축압축강도와 영률이 감소하였는데, 이는 냉각중에 암석내부의 공극이나 미소균열내에 존재하는 간극수나 유동수의 부피팽창으로 인하여 미소균열이 생성 또는 확대되어 암석내부에 많은 취약한 부분을 형성시키기 때문으로 사료된다.



(a) Tested at cooling temperature

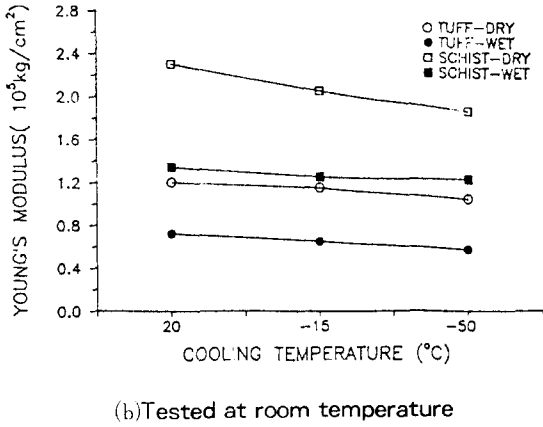


Fig. 16 The variation of Young's modulus of of Schist and Tuff with cooling temperature.

5.2.2 인장 강도의 변화

저온-냉동시험에서 석영섬록암의 저온변화에 따른 인장강도의 변화양상이 Fig.17에 나타나 있다. 단축압축강도와 같이 온도가 낮아짐에 따라 인장강도는 계속적으로 증가하고 있는데, -15°C에서는 약 1.25배로 증가하였으며 -50°C에서는 1.49배로 단축압축강도보다 큰 증가율을 보여주고 있다.

편암과 응회암에 대한 인장강도의 변화양상이 Fig.18에 나타나 있다. Fig.18(a)에서 보는 바와 같이 저온-냉동시험에서 온도가 낮아짐에 따라 인장강도가 증가하였으며, 또한 건조된 시험편의 인장강도는 침수된 시험편보다 크게 나타났으며 침수된 시험편의 강도 증가율은 건조된 시험편의 증가율보다 약간 크게 나타났다.

이는 단축압축강도의 변화양상과 같다. 또한 Fig.18(b)에서 보는 바와 같이 저온-상온시험에서 온도가 낮아질수록 인장강도가 저하되는 경향을 보여주고 있으며, 저온-냉동시험에서와 같이 건조된 시험편의 인장강도가 침수된 시험편보다 크게 나타났다. 이와같이 온도가 낮아짐에 따라 저온-냉동시험에서는 인장강도가 증가하고, 저온-상온

시험에서는 인장강도가 감소하였는데, 이는 위에서 설명했던 단축압축강도의 변화원인으로 설명될 수 있다.

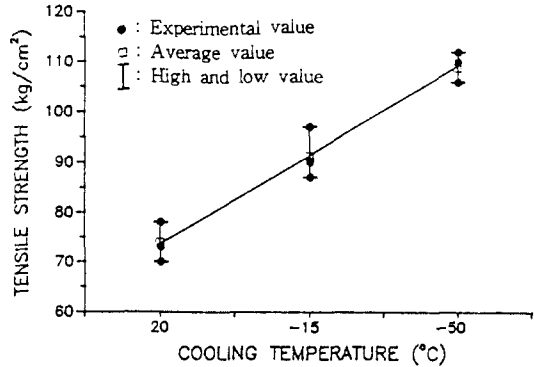
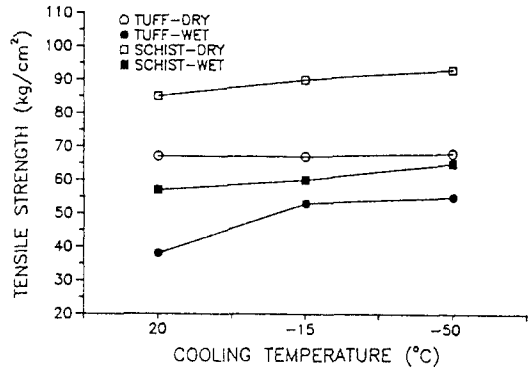
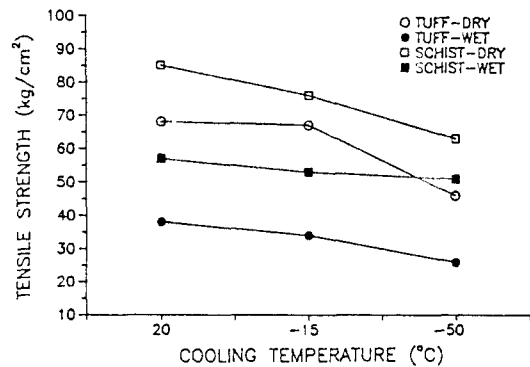


Fig. 17 The variation of tensile strength of Tonalite with cooling temperature (tested at cooling temperature).



(a) Tested at cooling temperature



(b) Tested at room temperature

Fig. 18 The variation of tensile strength of of Schist and Tuff with cooling temperature.

6. 결 론

본 연구에서는 화순산 편암, 다도산 응회암 그리고 천안산 석영섬록암을 대상으로 하여 고온과 저온변화에 따른 암석의 강도 및 변형특성을 연구하였다.

고온시험과 저온시험에서 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 석영섬록암은 가열온도 300°C까지는 단축압축강도와 영률이 약간 증가하다가, 300°C 이후에서는 계속적으로 감소하였다.
- 2) 석영섬록암은 가열온도가 높아짐에 따라 인장강도는 계속적으로 감소하였으며, 그 변화율도 크게 나타났다.
- 3) 석영섬록암은 동일한 가열온도에서 봉압이 증가함에 따라 파괴강도와 변형률이 증가하였으며, 동일한 봉압하에서 파괴강도는 가열온도 100°C에서 감소되었다가 200°C에서 다시 상승하였다.
- 4) 저온-냉동시험에서 석영섬록암, 편암 그리고 응회암은 냉동온도가 낮아짐에 따라 단축압축강도, 인장강도 그리고 영률이 증가하였고, 냉동온도 -50°C 에서 큰 증가율을 보였다. 또한 건조된 시험편의 단축압축강도 및 인장강도가 침수된 시험편보다 크게 나타났다.
- 5) 저온-상온시험에서 편암과 응회암은 냉동온도가 낮아짐에 따라 단축압축강도, 인장강도 그리고 영률이 감소하였다. 또한 침수된 시험편의 단축압축강도 및 인장 강도의 변화율이 건조된 시험편보다 크게 나타났다.

참 고 문 헌

- 1) Homand, F. and Houpert, R., 1989, "Thermally Induced Microcracking in Granites : Characterization and Analysis", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., Vol. 26, No.2, pp.125-134.
- 2) Heuze, F.E., 1983, "High-temperature Mechanical. Physical and Thermal Properties of Granitic Rocks - A Review", Int.J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., Vol. 20, pp 3-10.
- 3) Simmons, G. and Cooper, H.W., 1978, "Thermal Cycling Cracks in Three Igneous Rocks". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., Vol.15, pp. 145-148.
- 4) Homand, F. and Pierre, J., 1984, "Behavior of Granites and Limestones Subjected to Slow and Homogeneous Temperature Changes", Engineering Geology, Vol. 20, pp. 219-233.
- 5) Tsui, K.K. and Lee, C.F., 1980, "Thermo-mechanical Stability of Heated Rock Caverns", Proc. 21st U. S. Symp. Rock Mech., Rolla, Missouri, pp. 183-191.
- 6) Dmitriyev, A.P., Kuzyayev, L.S., Protasov, Yu. I., and Yamshchikov, V.S., 1969, Physical Properties of Rocks at High Temperatures, NASA, pp. 1-13.
- 7) Barbish, A. and Gardner, G.H.F., 1969, "The Effect of Heat on Some Mechanical Properties of Igneous Rocks", J.Soc.Petr.Eng., pp. 395-402.
- 8) Mellor, M., 1971, "Strength and Deformability of Rocks at Low Temperatures," Cold Regions Research and Engineering Lab. Research Report 294.
- 9) 이기형, 이형원, 신재섭, 1990, "화강암질 석재의 열파괴 특성 연구", 한국자원공학회지, 제 27권 제1호, pp.31-42.
- 10) 정재훈, 1992, 고온하에서 섬록암의 역학적 거동에 관한 연구, 서울대학교 대학원 자원공학과 석사학위논문.

- 1) Homand, F. and Houpert, R., 1989, "Thermally Induced Microcracking in Granites : Characterization and Analysis", Int. J. Rock Mech. Min.