터널과 지하공간, 한국암반공학회
Vol. 6, 1996, pp. 101~121

TUNNEL & UNDERGROUND Vol. 6, 1996, pp. 101-121
J. of Korean Society for Rock Mech.

암석의 강도 및 변형거동의 온도의존성에 관한 연구

이형원[1] · 이정인[2]

A Study on Temperature Dependency of Strength and Deformation Behavior of Rocks

Hyeong-Won Lee and Chung-In Lee

ABSTRACT The thermomechanical characteristics of rocks such as temperature dependency of strength and deformation were experimentally investigated using Iksan granite, Cheonan tonalite and Chung-ju dolomite for proper design and stability analysis of underground structures subjected to temperature changes.

For the temperature below critical threshold temperature T_c, the variation of uniaxial compressive strength, Young's modulus, Brazilian tensile strength and cohesion with temperature were slightly different for each rock type, but these mechanical properties decreased at the temperatures above T_c by the effect of thermal cracking. Tensile strength was most affected by T_c, and uniaxial compressive strength was least affected by T_c. To the temperature of 200°C with the confining pressure to 150 kg/cm^2, failure limit on principal stress plane and failure envelope on σ-τ plane of Iksan granite were continuously lowered with increasing temperature but those of Cheonan tonalite and Chung-ju dolomite showed different characteristics depending on minor principal stress on principal stress plane and normal stress on σ-τ plane. The reason for this appeared to be the effect of rock characteristics and confining pressure. Young's modulus was also temperature and pressure dependent, but the variation of Young's modulus was about 10%, which was small compared to the variation of compressive strength. In general, Young's modulus increased with increasing confining pressure and increased or decreased with increasing temperature to 200°C depending on the rock type.

1. 서 론

최근 지하공간의 개발이 활발해지고 그 이용목적이 다양화되어 각종 물질의 저장 또는 처분공간으로 활용됨에 따라 온도변화에 노출된 지하공동의 안정성이 중요한 문제로 대두되고 있으며, 특히 방사성 폐기물의 지하처분시, 온도변화에 따른 저장공동의 안정성문제 및 이에 따른 핵종 누출문제가 큰 쟁점이 되고 있다. 고열을 수십년에서 수백년 이상 방출하는 사용 후 핵연료(spent fuel)나 고준위 방사성 폐기물(HLW : High Level Radioactive Waste) 처분장의 경우에는 저장공동의 역학적 안정성 뿐 만 아니라 처분장 주변암반의 열적, 열역학적 거동을 정확히 파악하는 것이 안전한 처분장 설계의 매우 중요한 인자이다.[1-3] 이러한 고준위 방사성 폐기물 처분장의 설계온도는 약 200~250°C 정도이나 실제 대상 암반에 대한 원위치 가열 실험결과 처분장 주변 암반내 최고온도가 350~500°C에 달할 것으로 예측되고 있으며,[1,4,5] 이에 따라 암반역학 분야에서도 실제 공학적 환경에서 예상되는 온도, 압력 범위에서 암반의 열적, 열역학적 거동을 규명하기 위한 연구가 이루어지고 있다.

* 1996년 6월 13일 접수
1) 정회원, (주) 선경건설 지하비축팀 과장
2) 정회원, 서울대학교 자원공학과 교수

이러한 암반의 열역학적 특성규명을 위하여 Heard (1980), Heard & Page(1982) 등이 화강암의 열역학적 특성을 실험적으로 고찰한 결과, Young계수가 온도증가시 감소하고 압력증가시 증가하며, 압력증가는 온도의 영향을 감소시키게 되어 일부 압력 구간에서는 온도증가시에도 탄성계수가 오히려 증가하는 것으로 보고하였다.[6,7] 이러한 경향은 200°C와 55 MPa의 온도, 압력 범위에서 Stripa 화강암의 Young계수 변화를 조사한 Myer & Rachiele(1981)의 연구결과에서도 잘 나타나고 있다.[8] 또한 여러 연구자들에 따르면 온도상승시 강도는 저하하고 압력증가시 강도는 증가하며 높은 압력하에서도 온도상승시의 강도저하 경향은 변화하지 않을뿐 아니라, 100 MPa, 1000°C의 압력, 온도 조건하에서 암석의 파괴는 미세균열의 형성과 이들의 확대에 따른 거시균열의 형성에 의한 것으로서 취성영역에서의 파괴특성을 유지하는 것으로 보고하고 있다.[9,10] 인장강도의 경우, Bauer & Johnson(1979)이 여러 온도로 예열 후 상온에서 측정한 Westerly 화강암과 Charcoal 화강암의 압열인장강도가 예열 온도 증가시 지속적으로 감소하는 것으로 보고하고 있으나,[11] 실제 시험온도에 따른 변화경향을 보고된 예가 거의 없다.

이밖에 Heuze(1983)는 암석의 포아송(Poisson)비, 점착강도, 내부마찰각 등도 온도증가시 감소하는 것으로 보고하고 있으며,[12] 또 Dmitriyev *et al.*(1972)은 온도증가시 강도 등 역학적 특성이 오히려 증가하는 경우도 있는 것으로 밝히고, 이는 암석을 구성하는 광물의 열팽창에 의해 균열의 닫힘과 원자거리 감소에 의한 광물입자간 인력증가에 기인한다고 설명하고 있다.[13]

또한 Chan *et al.*(1980)은 처분장 주변 암반내 온도분포와 응력 및 변위에 대하여 수치해석을 통한 예측치와 원위치 가열 실험을 통한 실측치를 상호 비교하였으며, 그 결과 선형 열전도모델을 이용한 암반내 온도분포에 대한 예측치는 현지암반중 불연속 면의 존재에도 불구하고 현장의 실측치와 대단히 잘 일치하는 것으로 나타났다.[14,15]

현재까지 이러한 암석의 열역학적 거동에 대한 연구가 여러 연구자들에 의해 활발히 진행되고 있으나 이에 대한 체계적인 연구는 이루어지지 못하고 있는 실정이며, 여기에 부가하여 횡압이 크게 작용하는 초기 지압조건에서 건설된 암반구조물의 경우 측벽부에 지압과 열응력에 의한 대규모 인장영역 발달이 흔히 예견되고 있음에 따라, 인장강도를 포함하여 인장영역에서 암석 파괴한계의 온도에 따른 변화특성도 시급히 규명될 필요가 있을 것으로 보인다.

이에 따라 이 연구에서는 온도변화와 열파괴 특성을 고려한 단축압축강도, Young계수, 압열인장강도, 점착강도의 온도의존적 변화특성을 600°C까지의 온도범위에서 검토하였으며, 또 200°C, 150 kg/cm^{2}까지의 온도, 압력범위에서 고온삼축압축시험을 실시하여 암석의 강도 및 변형거동을 조사하므로써 이들의 온도의존성을 규명하였으며, 이로부터 주응력 평면과 σ-τ 평면상에서 암석 파괴한계의 온도의존성을 검토하였다.

2. 이론적 배경

2.1 열탄성 이론

(1) 열탄성론에 있어서의 구성방정식

모든 변형율을 구속하였을 때, 즉 변형률 $\varepsilon_k=0$일 때의 응력 σ_k는 열팽창에 의하여 발생한다. 이것은 온도변화 ΔT에 의한 것으로 생각하여 C_k^*가 ΔT에 비례한다는 가장 간단한 가정,

$$C_k^* = -\beta_k \Delta T \tag{1}$$

을 채택하면 변형율에너지함수 W의 식과 응력성분 σ_k의 식은 다음과 같다.

$$W = 1/2 C_{kM}^* \varepsilon_k \varepsilon_M - \beta_k \varepsilon k \Delta T \tag{2}$$

$$\sigma_k = C_{kM}^* \varepsilon_M - \beta_k \Delta T \tag{3}$$

$$C_{kM}^* = C_{Mk}^* \tag{4}$$

탄성론에서 C_{kM}^* 및 β_k를 일정하다고 가정하고 (3)식을 구성방정식으로 사용한다. 이 구성방정식을 일반화된 Hooke의 법칙이라 한다.

(2) 열팽창을 고려한 등방탄성체에서의 열탄성구성방정식

등방탄성체의 열탄성구성방정식은 일반화된 Hooke 법칙에 의한 구성방정식(3)로부터 유도될 수 있다. 식(3)에서 (4)식에 의한 대칭성때문에 독립적인 상수 C_{kM}^*의 숫자는 21개이다. 탄성적 성질에 대칭성이 있는 경우 독립적 탄성정수의 수는 감소하며, xy면, yz면, zx면에 탄성적 성질이 각각 대칭인 직교 이방성탄성체일 경우 독립적인 탄성정수는 9개로 감소된다. 등방성 탄성체일 경우 x, y, z축 둘레의 회전에 의한 좌표변환에 따라 탄성적 성질이 불변한다는 것을 이용하면 다음과

같이 최종적으로 2개의 독립적인 탄성정수를 지니게 된다.

등방성 탄성체의 열탄성구성방정식은 다음과 같다.

$$\sigma_{ij} = \delta_{ij}\lambda e + 2\mu\varepsilon_{ij} - \delta_{ij}(3\lambda + 2\mu)\alpha\,\Delta T \quad (i,j = x,y,z) \qquad (5)$$

(5) 식을 변형률 ij로 표시한 선형 열탄성구성방정식은 다음과 같다.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2\mu}(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\frac{\lambda}{3\lambda + 2\mu}) + \delta_{ij}\alpha\Delta T \quad (i,j = x,y,z) \qquad (6)$$

단, $\theta = \sigma_{kk}$, $k = x,y,z$

2.2 고온에서 암석의 강도특성

고온에서 암석의 강도가 변화하는 원인은 구조적 특성, 조암광물이나 소결물의 열안정성, 기타 온도증가에 따라 수반되는 조직내 여러요소의 변화들이 있을 수 있으며 대체로 이러한 여러요인들이 복합적으로 작용하므로 어느 결정적 요인만을 집어내는 일은 대부분 곤란한 일이다. 온도상승시 암석강도는 그 온도의존성의 경향에 따라 다음과 같이 2그룹으로 분류된다.

1) 온도상승과 더불어 강도가 어느 최고점까지 증가한 후 저하하는 암석

2) 온도의 상승과 더불어 강도가 급격히 감소하거나 어느온도까지 약간 감소한 후 급격히 감소하는 암석

이중 첫번째 그룹의 경우 보통 초기온도에서(100~160°C) 강도가 약간 감소하는 현상이 관측되기도 하며 이들 첫번째 그룹의 암석들은 강도가 최대치에 달하는 임계온도영역(critical temperature region)을 특징적으로 보여준다. 두번째 암석그룹의 경우 광물이나 소결물의 열저항성이 약한 암석에서 흔히 나타나며 화학적 변화를 수반하기도 한다. 이밖에 고온하에서 암석강도의 열의존 경향은 강도의 종류에 따라 조금씩 다른 경향을 보여주기도 한다.

Dmitriyev 등은 암석의 온도가 상승할 경우 암석의 강도가 광물 및 그 경계에서의 경화나 연화에 기인한다는 가정하에서 전 가열영역을 초기온도가 T_0, T_1, T_2인 3영역으로 분류할 수 있는 것으로 보고하였다.[13]

1) 제 1온도영역(T_0~T_1) : 암석강도와 온도의 관계는 광물입자와 배열의 열안정성에 의해 결정된다.

2) 제 2온도영역(T_1~T_2) : 암석강도와 온도의 관계는 광물간 경계의 상태에 의해 결정된다.

3) 제 3온도영역(T_2~∞) : 암석강도의 변화양상은 광물입자의 강도변화에 의해 결정된다.

2.3 고온에서의 광물의 탄성 특성

여러 연구자들의 연구결과 광물의 탄성계수는 상전이나 열분해, 용융 등이 발생하기 전까지는 온도상승과 더불어 대체로 직선적으로 감소하는 것으로 밝혀져 있으며 이는 광물 내부 원자구조의 진동운동 증가로 발생되는 열에너지나 광물의 열팽창에 의한 것으로 설명할 수 있다. 이러한 광물의 온도상승시의 탄성계수 변화는 다음과 같이 모식적 단열탄성계수 변화식으로 설명되며 여기서 A와 B는 온도상승에 비례할 것이다.[13]

$$E_T = E_0 + A + B \qquad (7)$$

단, E_T : 온도 T에서 광물의 탄성계수

E_0 : 상온에서 광물의 탄성계수

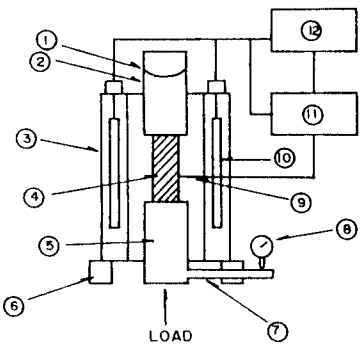
A : 열팽창에 의해 발생되는 탄성계수 변화

B : 열에너지의 간접적 영향

3. 시료와 실험장치 및 실험방법

3.1 시편제작

본 연구에 사용된 3종의 암석시료에 대하여 30×30×20 cm 크기의 신선한 암괴를 시료별로 2~3개씩 채취하였으며 이들 암괴로부터 시편제작시 이방성의 영향을 줄이기 위해 암추채취나 절단은 가능한 일정한 방향으로 실시하였다.[26] 압축시험용 시편은 암괴시료에서 NX 암추(직경 : 53~54 mm)를 채취하여 시료별로



(1) Spherical seat
(2) Upper loading piston
(3) Chamber body
(4) Specimen
(5) Lower plate
(6) Supporting leg
(7) Displacement measuring cantilever
(8) Dial gage
(9) Thermocouple
(10) Inserted electric heater
(11) Programmable temperature controller
(12) AC main

Fig. 1. Schemetic diagram of high temperature testing system.

50개씩 총 150개를 제작하였다. 압열인장시험용 시편은 시료별로 30개씩 총 90개를 제작하였다.

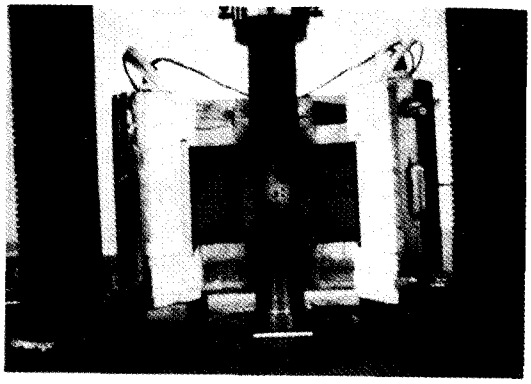
3.2 실험장치

3.2.1 고온실험조(High temperature chamber)

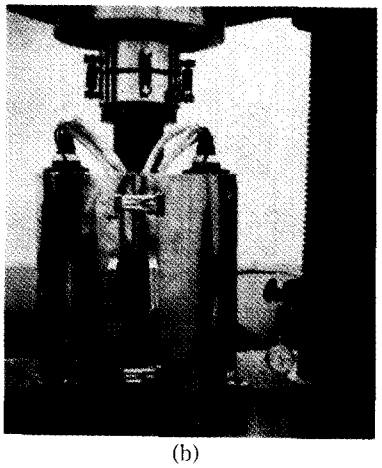
온도변화에 따른 시료의 단축압축강도, Young계수, 압열인장강도의 변화를 측정하기 위하여 고온실험조를 제작하였으며, 이 장치의 모식도를 Fig. 1에 나타내었고, 아울러 본 고온실험조의 내부사진과 외부사진이 Fig. 2의 (a)와 (b)에 각각 나타나 있다.

3.2.2 고온삼축압축시험장치(High temperature triaxial testing system)

본 연구에서 온도와 압력의 영향에 따른 암석의 강도 및 변형특성 규명을 위하여 사용된 고온삼축압축시험장치 및 고온삼축압축챔버의 모식도가 Fig. 3 및 Fig.

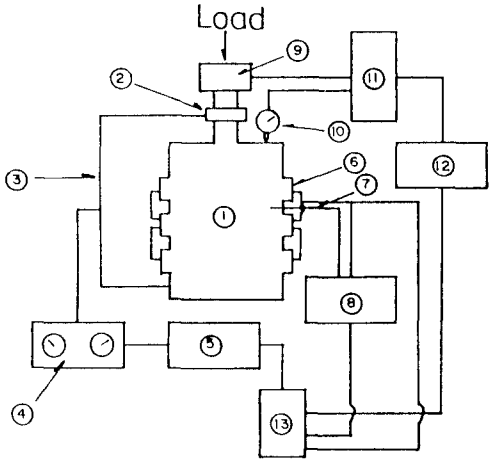


(a)



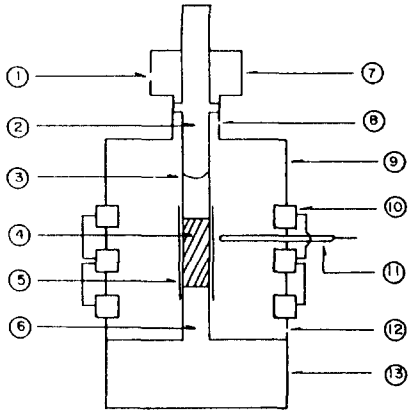
(b)

Fig. 2. Inside and Outside view of high temperature testing chamber.
(a) inside view (b) outside view



(1) Triaxial chamber (2) Hydraulic balance feature
(3) Pressure hose
(4) Pressure intensifing and regulating pump
(5) Air compressor (6) Band heater
(7) Thermocouple (8) Temperature controller
(9) NX load cell (10) Displacement transducer
(11) 4 - channel dynamic strain amplifier
(12) X - Y_1 Y_2 recorder (13) AC main

Fig. 3. Schemetic diagram of high temperature triaxial testing system.



(1) Quick coupling for hydraulic balance feature
(2) Upper piston (3) Spherical seat
(4) Specimen (5) Core Jacket
(6) Lower plate (7) Hydraulic balance feature
(8) Air bleeding hole (9) Chamber body
(10) Band heater (11) Thermocouple
(12) Quick coupling for confining pressure (13) Base body

Fig. 4. Schemetic diagram of high temperature triaxial cell.

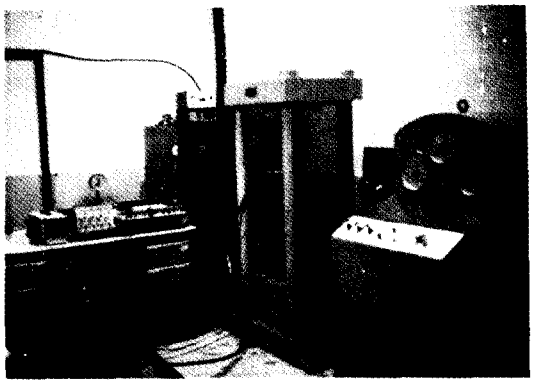


Fig. 5. General view of high temperature triaxial testing system.

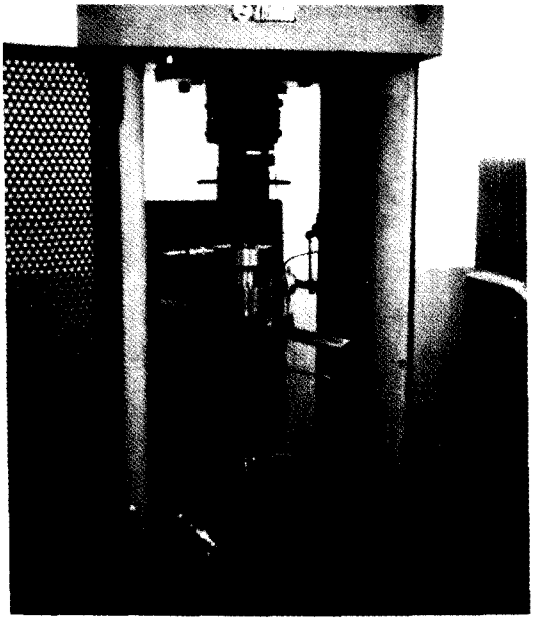


Fig. 6. General view of high temperature triaxial cell.

4에 각각 나타나 있다. Fig. 3에 나타나 있는 바와 같이 고온삼축압축시험장치는 상기한 고온삼축압축챔버와 봉압발생장치, 가열 및 온도제어부 및 하중-변위 계측기록장치로 구분할 수 있다. 봉압발생장치는 공기압축기와 압력증폭조절펌프로 구성되고, 가열 및 온도제어부는 밴드 히터 및 열전대와 온도조절기로 구성된다. 하중-변위측정 기록장치는 NX 수압기, 변위변환기, 동적 변형률증폭기와 X-Y 기록계로 구성되어 있다. 시험에 사용된 전동유압식 압축시험기(한국 경도정밀사 제작)는 300톤 용량의 압축기이다. 실험중인 고온삼축압축시험장치 전체의 모습과 조립된 고온삼축압축챔버의 모습을 Fig. 5과 Fig. 6에 각각 나타내었다.

3.3 실험방법

3.3.1 고온에서의 단축압축 및 압열인장시험

고온 시험장치를 이용한 고온단축압축시험 및 압열인장시험을 시료의 단축압축강도, Young계수, 점착강도 등의 온도에 대한 변화를 규명하기 위하여 실시하였으며, 적정 가열속도로 시편의 온도를 상승시킨 후 최고온도에서 적절한 유지시간을 주게 하였다. 시편내 온도구배를 제거하기 위한 이러한 유지시간은 연구자에 따라 30분~4시간 까지로 그 주장이 조금씩 다르나, 본 연구대상 시료와 비슷한 조직과 조성의 국내 화강암에 대한 열파괴 연구결과 1시간 이상에서 대체로 온도구배에 의한 영향이 무시될 수 있는 것으로 보고되고 있는 바[16], 본 연구에서는 90분의 유지시간을 주고 90~120분 사이에서 시험을 실시하였다.

시편의 가열온도는 상온에서 100°C 간격으로 600°C까지로 하였으며, 600°C까지 시험을 실시한 것은 열특성에 가장 큰 영향을 미치는 광물인 석영의 α-β전이점(573°C)을 고려한 것이며, 또한 실제 공학적 환경에서 발생가능한 온도범위로 판단되어 결정하였다. 또 하중속도는 대체로 1 kg/cm²/sec이하로 하여 하중충격의 영향을 최소화하였다. 단축압축강도는 파단하중을 시편의 단면적으로 나누어 구하였으며, Young계수는 단축압축강도의 50% 수준에서 구한 접선탄성계수로 구하였다. 압열인장강도는 디스크형의 시편을 실험조에 설치하고 원주방향으로 축하중을 증가시키며 파괴하중을 측정한 후 구하였다.

또 앞서 구한 시료의 고온단축압축강도와 고온 인장강도로부터 각 온도에서의 점착강도를 압열인장시험을 고려한 Mohr-Coulomb의 파괴이론에 의한 (8)식으로 산정하여 온도변화에 따른 점착강도의 변화를 알아보았다.

$$C = \frac{S_c \cdot S_t}{2\sqrt{S_t(S_c - 3S_t)}} \tag{8}$$

단, C : 점착강도(kg/cm²)

S_c : 단축압축강도(kg/cm²)

S_t : 압열인장강도(kg/cm²)

3.3.2 고온에서의 삼축압축시험

삼축압축챔버에 시료를 설치하여 조립하고 주변장치를 모두 연결시킨 후 시편과 코아쟈켓의 압착을 위하여

초기봉압을 가해준다. 봉압은 공기압축기에서 발생되는 5~7 kg/cm^{2}의 압축공기를 압력증폭조절펌프에서 적당한 수준으로 1차 증폭시킨 후 유압으로 2차 증폭시키게 되는데, 초기봉압은 200~300 psi(약 14~21 kg/cm^2)를 가해주었다. 초기봉압을 가한 상태에서 온도를 원하는 수준으로 상승시키게 되는데, 이때 고온 삼축챔버용 온도조절기에 가열속도를 프로그래밍하는 기능이 없고 원하는 최고온도만 조절할 수 있음에 따라 실제 가열속도는 저온에서 3°C/분을 조금 초과하고 고온으로 가면서 그 이하로 저하되었으나 가능한 3°C/분을 초과하지 않는 가열속도를 유지하도록 주의하였다. 원하는 최고온도에서 유지시간은 역시 90분으로 하였으며, 가열온도는 삼축압축셀과 열수축코아자켓의 사용한계를 고려하여 상온, 100°C, 200°C의 3가지로 하였다. 소정의 온도에서 90분간 유지한 후 봉압을 원하는 수준으로 증가시키는데, 여기서 봉압은 50, 100, 150 kg/cm^{2}의 3가지로 하였다. 이후 온도와 봉압이 일정하게 유지된 상태에서 축압을 증가시키며 하중변환기로부터의 축하중과 변위변환기로부터의 축변형을 변형률증폭기에서 증폭시킨 후 X-Y 기록계에 자동기록시켰다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 대기압하에서의 암석의 강도 및 변형거동에 대한 온도의 영향

4.1.1 단축압축강도 및 Young계수의 온도 의존성

상온(R.T.: Room Temperature)에서 100°C 간격으로 600°C까지 3°C/분의 가열속도로 시편을 가열하여 최고온도에서 90분 유지시켜준 후 단축압축하에서 측정된 온도별로 대표적인 축응력-변형율 선도를 각 시료별로 Fig. 7~Fig. 9에 나타내었다. 여기서 나타난 바와 같이 암석은 온도가 상승할 경우 강도저하와 변형율 증대가 나타나고 있으며 이러한 경향은 초기 가열온도 범

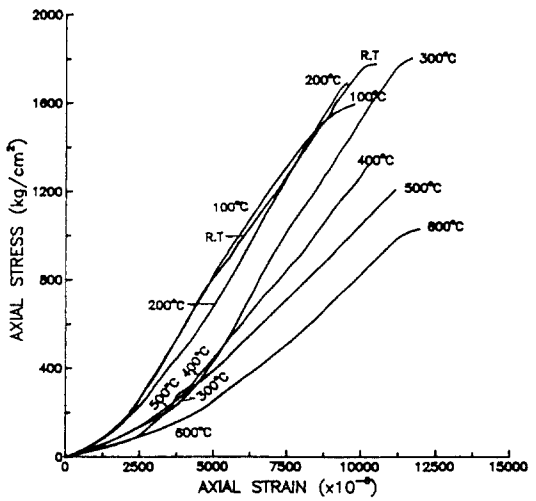


Fig. 8. Typical axial stress-strain curves of Cheonan tonalite under uniaxial compression at various testing temperatures.

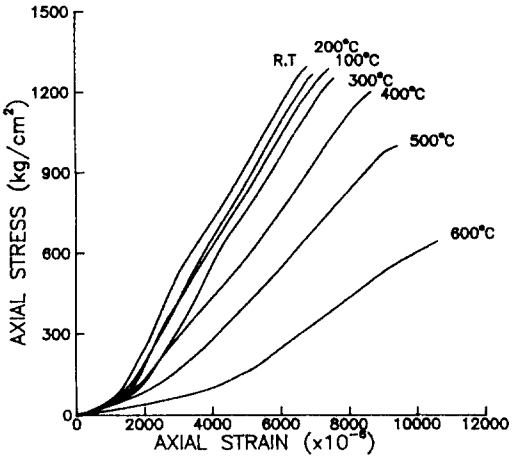


Fig. 7. Typical axial stress-strain curves of Iksan granite under uniaxial compression at various testing temperatures.

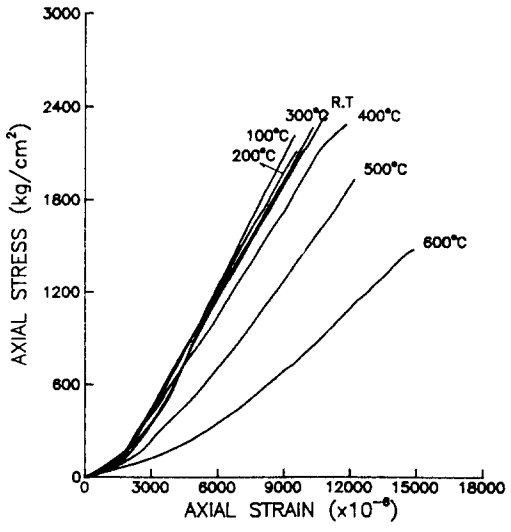


Fig. 9. Typical axial stress-strain curves of Chungju dolomite under uniaxial compression at various testing temperatures.

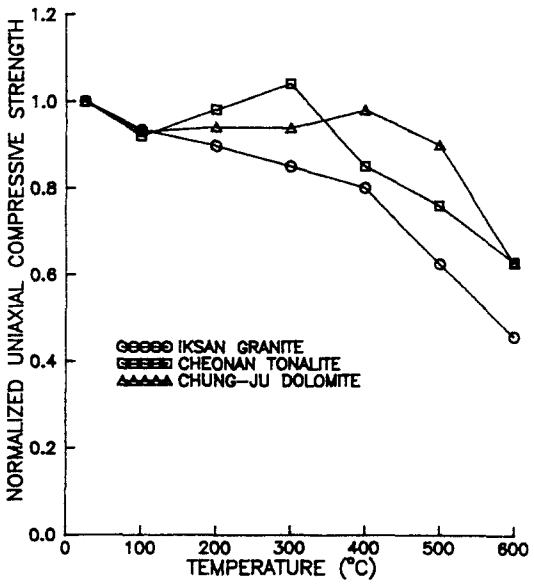


Fig. 10. Normalized uniaxial compressive strength versus temperature.

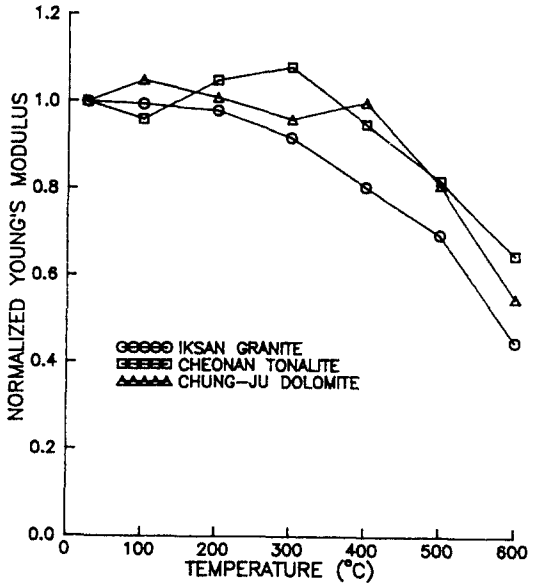


Fig. 11. Normalized Young's modulus versus temperature.

위에서는 분산을 보이나 온도가 높을수록 점차 뚜렷해지고 있다. 이러한 온도변화에 따른 강도 및 변형거동을 좀더 명확히 규명하기 위하여 각 시료별로 상온에서의 단축압축강도와 Young계수를 기준치로 하여 600°C까지 각 시험온도에서 2~5회 측정된 단축압축강도와 Young계수의 평균치를 정규화시켜 온도에 따른 변화경향을 Fig. 10와 Fig. 11에 각각 나타내었다. 또한 각 시험온도에서 측정된 단축압축강도와 Young계수의 평균치와 정규화된 값들을 각 시료별로 Table 1에 나타내었다.

Fig. 10에 나타난 바와같이 온도상승시 단축압축강도의 변화경향은 시료별로 조금씩 상이하게 나타났는데 익산화강암이 지속적 감소경향을 나타낸 반면 천안석영섬록암과 충주돌로마이트는 일정온도까지 강도가 소폭 저하하거나 증가되는 구간을 거쳐 그 이후 급격한 강도저하를 나타냈다. 이러한 강도의 변화양상은 암석의 광물조성과 조직, 광물입자간 인력의 증가 및 열파괴 거동 등과 밀접한 상관성을 지닌 것으로 사료된다.

익산화강암의 경우 대체로 400°C까지는 단축압축강도가 서서히 선형적으로 20% 가량 감소하였으나 400°C를 기점으로 급격한 강도저하를 보였고 600°C에서는 54%이상 감소하여 3종의 시료중 가장 큰 폭의 강도저하를 보여주었다.

천안석영섬록암의 경우 단축압축강도가 100°C에서 소폭 감소한 후 300°C까지는 오히려 소폭이나마 강도의 증가가 나타나고 있는데 이는 입자간 열응력의 발생뿐 아니라 기존 균열의 닫힘과 더불어 입자간격의 감소로 상호인력(attraction)의 증가가 발생하는데 따른 영향인 것으로 생각된다. 또 천안석영섬록암의 경우 Ca 사장석류와 각섬석 등 고온성 광물을 다량 함유하고 있을뿐 아니라 간극충진구조(interstitial structure)를 특징적으로 보여주고 있음에도 그 원인이 있을 것으로 생각된다. 그러나 임계온도 T_c이후 천안석영섬록암의 열파괴가 급속히 진행되고, 또 열균열은 먼저 입자경계부에서 발생되어 앞서 언급한 입자간 인력증대의 요인이 없어짐에 따라 급격한 강도저하를 나타내는 것으로 보인다.

충주돌로마이트의 경우 열파괴 개시온도인 T_c가 100°C로 본 연구대상시료중 가장 낮지만 T_c이후 열파괴의 진행이 안정적으로서, 돌로마이트의 열파괴 거동을 안정구간과 불안정구간으로 구분하는 새로운 임계온도 T_c'이전까지는 열균열의 형성이 거의 이루어지지 않고 안정열파괴 단계를 보임에 따라 단축압축강도에 있어서도 100°C에서 소폭의 강도저하를 나타내고 그 이후 400°C까지 거의 변화를 보이지 않았다.

Fig. 11에서 나타나 있는 시료별로 정규화된 Young

Table 1 Result of uniaxial compressive tests for Iksan granite, cheonan tonalite and

Sample	Test temperature (°C)	No. of tests	Average uniaxial compressive strength (kg/cm^2)	Normalized value*1	Average Young's ($\times 10^5$ kg/cm^2)	Normalized value*2
Iksan granite	R.T.	5	1470±130	1.000	1.96±0.06	1.000
	100	4	1380±100	0.934	1.95±0.06	0.995
	200	4	1320±90	0.897	1.92±0.13	0.980
	300	3	1250±60	0.850	1.80±0.04	0.918
	400	2	1180±20	0.800	1.58±0.02	0.806
	500	2	920±70	0.625	1.35±0.01	0.698
	600	2	670±30	0.458	0.88±0.05	0.449
Cheonan tonalite	R.T.	4	1740±280	1.000	1.89±0.13	1.000
	100	4	1610±270	0.924	1.82±0.16	0.963
	200	4	1720±240	0.983	1.99±0.12	1.053
	300	3	1810±70	1.036	2.05±0.21	1.085
	400	3	1480±190	0.849	1.79±0.05	0.947
	500	2	1330±120	0.765	1.55±0.12	0.820
	600	2	1100±70	0.632	1.23±0.02	0.651
Chung-ju dolomite	R.T.	5	2340±280	1.000	2.53±0.23	1.000
	100	3	2180±170	0.933	2.66±0.29	1.051
	200	3	2200±240	0.938	2.55±0.26	1.001
	300	3	2200±200	0.938	2.42±0.12	0.957
	400	2	2290±90	0.979	2.53±0.15	1.000
	500	3	2100±150	0.899	2.05±0.10	0.810
	600	2	1470±10	0.628	1.39±0.04	0.549

*1: Normalized by average uniaxial compressive strength at R.T.
*2: Normalized by average Young's modulus at R.T.

계수의 변화양상도 대체로 유사한 경향을 보이고 있으며, 결정질 화성암인 익산화강암과 천안석영섬록암의 Young계수는 T_c이전의 온도영역에서 익산화강암과 같이 T_c가 비교적 낮은 온도인 경우 거의 변화되지 않고, 천안석영섬록암과 같이 열파괴가 상당히 지연되어 비교적 높은 T_c를 지니는 경우 입자간 인력증대에 의해 Young계수의 증가를 보이며 T_c이후의 온도영역에 들어서면 열균열의 형성이 Young계수의 감소와 잘 일치하는 경향을 나타내었다. 반면에 미세립질 변성암인 충주돌로마이트의 경우 Young계수의 변화양상이 T_c를 명료하게 반영하지 못하고 있으며, 불안정한 열균열 전파구간이 개시되는 300°C의 T_c' 이후에서도 400°C까지는 거의 변화를 보이지 않았다.

4.1.2 압열인장강도 및 점착강도의 온도 의존성

600°C까지 100°C 간격으로 각 온도에서 2~4회 실시한 압열인장시험결과를 Table 2에 나타내었으며 시료별로 상온에서의 인장강도치에 표준화시킨 압열인장강도의 값을 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12에 나타난 바와같이 압열인장강도의 변화양상은 앞절에서 검토한 단축압축강도나 Young계수의 변화양상과 조금 상이하게 나타났으며 T_c이전의 온도영역에서 입자간 인력증가에 의한 강도증가 현상은 나타나지 않았다. 모든 시료에 있어서 온도가 상승될 경우 강도가 지속적으로 저하하였으며 그 감소경향에 있어서 익산화강암과 천안석영섬록암은 T_c이전과 T_c이후로 구분되고 충주돌로마이트의 경우는 T_c'이전과 T_c'이후로 구분되어 2단계의 선형감소 구간으로 구분되는 현상이 뚜렷이 나타났다. 이에따라 T_c 혹은 T_c'이전의 온도구간에서는 대체로 그 감소폭이 완만한 선형감소구간을 나타내었고 T_c 혹은 T_c'이후의 온도영역에서는 급격한 선형감소구간을 보여주어 암석의 인장강도는 T_c이전의 입자간 인력증대에 의한 영향은 거의 받지 않고 열파괴 거동에 의해 결정적인 영향을 받고 있음을 알 수 있었다. 이는 압축강도와 달리 인장강도는 취약한 균열의 함유빈도에 대단히 큰 영향을 받기 때문인 것으로 생각된다. 앞절의 단축압축강도와 본 절의 압열인장강도를 이용하여 3장에서 설명한 Mohr-Coulomb의 직선포락선에 의해 구한 점착강도와 앞서와 동일한 방법으로 상온치에 대해 정규화시킨 값을 Table 2에 나타냈으며 이의 변화양상을 Fig. 13에 도시하였다.

Table 2. Result of Brazilian tensile tests and calculated cohesion for Iksan granite,

Sample	Test temperature (°C)	No. of tests	Average Brazilian tensil strength (kg/cm²)	Normalized value*1	Cohesion*2 (kg/cm²)	Normalized value*3
Iksan granite	R.T.	4	71± 5	1.000	175	1.000
	100	2	68± 5	0.958	166	0.949
	200	2	64± 3	0.901	157	0.897
	300	4	45±13	0.634	126	0.720
	400	3	33±10	0.465	103	0.589
	500	2	28± 1	0.394	84	0.480
	600	2	18± 4	0.254	57	0.326
Cheonan tonalite	R.T.	2	73±28	1.000	191	1.000
	100	2	66±15	0.904	174	0.911
	200	2	62±20	0.849	173	0.906
	300	3	59± 6	0.808	172	0.901
	400	3	44± 5	0.603	134	0.702
	500	2	37± 7	0.507	116	0.607
	600	2	25± 2	0.342	86	0.450
Chung-ju dolomite	R.T.	3	77±18	1.000	224	1.000
	100	3	71±15	0.922	207	0.924
	200	2	65± 2	0.844	198	0.884
	300	2	63± 9	0.818	195	0.871
	400	2	54± 4	0.701	183	0.817
	500	2	45± 3	0.584	159	0.710

*1: Normalized by average Brazilian tensile strength at R.T.

*2: Calculated by the equation(3-4), $C = \frac{S_c \cdot S_t}{2\sqrt{S_t(S_c - 3S_t)}}$

*3: Normalized by cohesion at R.T.

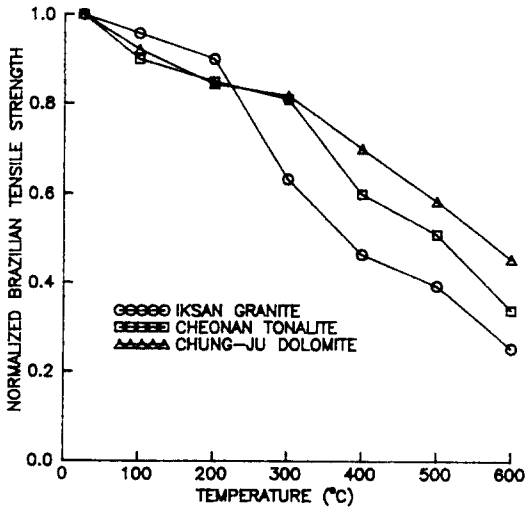


Fig. 12. Normalized Brazilian tensile strength versus temperature.

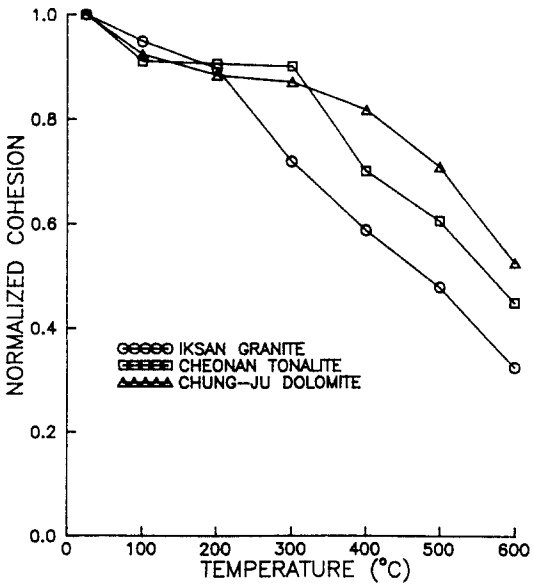


Fig. 13. Normalized cohesion versus temperature.

Fig. 13에 나타난 바와같이 온도에 따른 암석의 점착강도의 변화경향은 대체로 인장강도와 마찬가지로 암석의 T_c 혹은 T_c'과 밀접한 관계를 보여주고 있었다. 즉, 익산화강암과 천안석영섬록암의 경우 T_c이전까지 10% 가량의 소폭의 선형적 감소 혹은 감소 후 대체로 일정한 값을 유지하는 구간을 거친 후 T_c이후 열파괴 진행과 더불어 급격한 감소를 보여주고 있었다.

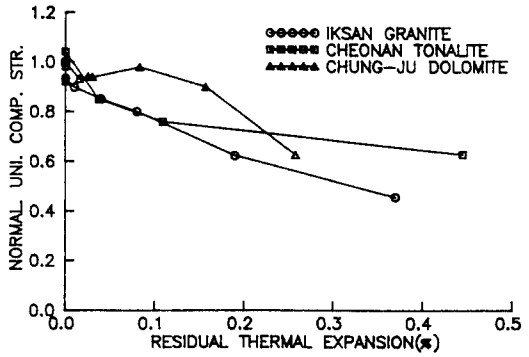


Fig. 14. The change of normalized uniaxial compressive strength of samples with

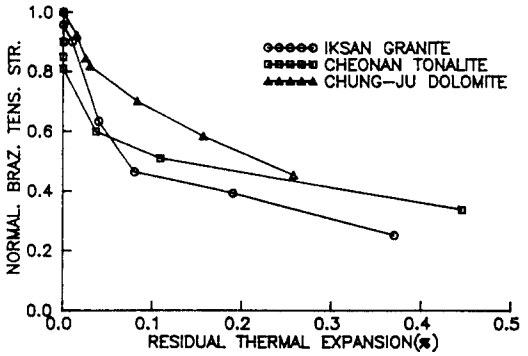


Fig. 16. The change of normalized Brazilian tensile strength of samples with

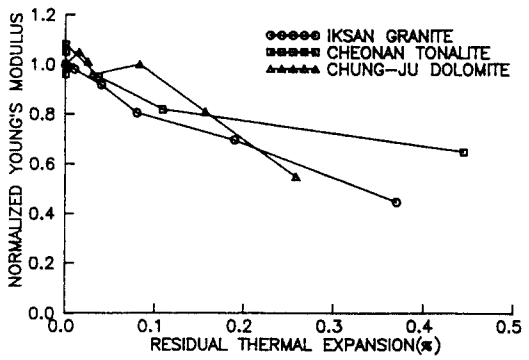


Fig. 15. The change of normalized Young's modulus of samples with residual thermal expansion.

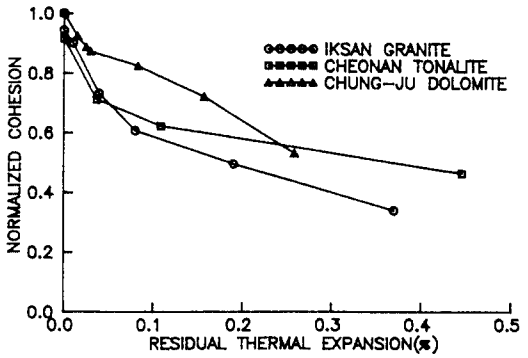


Fig. 17. The change of normalized cohesion of samples with residual thermal expansion.

4.2 대기압하에서의 암석의 강도 및 변형거동에 대한 열파괴의 영향

암석 열파괴의 최종지표인 가열-냉각후 잔류열팽창량과 이때 상온에서 물성치에 정규화시킨 시료별 단축압축강도, Young계수, 압열인장강도, 점착강도의 관계를 Fig. 14~Fig. 17까지 나타내었다. 암석의 열파괴가 진행됨에 따라 각종 물리적, 역학적 특성은 취약해지며 감소하고 있으며 그 감소경향은 물성별, 암석별로 조금씩 다르지만 대체로 잔류 열팽창 증가에 따라 선형성을 지니며 감소하고 있었고, 초기 열파괴의 영향이 다소 크게 나타났다.

Fig. 14에 나타난 바와같이 익산화강암과 천안석영섬록암과 같은 결정질 화성암의 단축압축강도는 잔류열팽창 증가시 거의 직선적으로 감소하는 거동을 나타내고 있으며, 반면에 충주돌로마이트는 약 0.08% 가량의 잔류열팽창 발생시 까지는 소폭 감소후 다소 증가하는 경향을 보였고 그후 직선적으로 감소하였다. 또, Fig. 15에는 잔류열팽창 증가에 따른 시료별로 정규화된 Young계수의 변화를 나타내었으며, 충주돌로마이트의 경우는 앞서 단축압축강도와 동일하게 약 0.08%의 잔류열팽창이 나타날 때까지는 소폭 감소후 다소 증가하는 경향을 보였고 그후 잔류열팽창 증가시 직선적으로 감소하였다. 그러나 익산화강암과 천안석영섬록암은 대체로 직선적 변화경향을 나타내고 있으며 대체로 초기 0.1% 미만의 잔류열팽창이 발생할 때까지 감소폭이 크게 나타나고 그후 다소 완만하게 직선적 감소경향을 보여주고 있다.

Fig. 16과 Fig. 17에는 잔류열팽창 증가에 따른 압열인장강도와 점착강도의 변화경향이 나타나 있으며 이들은 대체로 뚜렷이 구분되는 2개의 선형적 감소구간으로 구분되고 있다.

4.3 봉압하에서의 암석의 강도 및 변형거동에 대한 온도의 영향

4.3.1 강도 및 파괴한계의 온도 의존성

(1) 익산화강암

익산화강암 등 3개 암석시료에 대하여 150 kg/cm^{2}까지의 봉압과 200°C 까지의 온도범위에서 실시한 삼축압축 시험결과를 Table 3에 나타내었다. 익산화강암의 경우 상온에서 봉압을 50, 100, 150 kg/cm^{2}로 각각 증가시킬 경우 파괴강도는 증가하여 상온에서의 단축압축강도 1470 kg/cm^{2}에 비해 1.53배, 1.85배, 2.20배로 각각 증가하였다. 시험온도를 100°C와 200°C로 증가시킨 경우에 있어서도 봉압 증가시 파괴강도는 상온에서와 마찬가지로 뚜렷이 증가하는 경향을 나타내었다.

Fig. 18에는 등압하(isobaric)에서 온도변화에 따른 압축강도의 변화를 나타내었다. 대기압하에서와 마찬가지로 삼축압축하에서도 익산화강암의 파괴강도는 온도가 상승할수록 저하하는 경향을 뚜렷이 보이고 있다. 이를 종합하여 봉압 σ_3와 최종파괴강도 σ_{1max}-σ_3의 관계를 Fig. 19에 나타내었으며 이렇게 주응력 평면에 도시된 파괴한계도 역시 뚜렷한 온도 의존성을 보여주어 온도상승시 지속적으로 그 파괴한계가 저하되고 있음을 알 수 있었다. 이는 Friedman *et al.*(1979), Bauer *et al.*(1981), Friedman *et al.*(1982), Brodsky *et al.*(1985) 등이 보고한 바와 같이,[9-11] 동일 봉압하에서 온도상승시 암석강도는 저하하며 동일온도에서 봉압이 증가할 경우 강도가 증가한다는 점과 잘 일치하고 있다.

Fig. 20에는 익산화강암의 온도별 파괴포락선을 함께 도시하여 비교하였으며 역시 온도의존성을 잘 보여주고 있다. 즉 동일 수직응력하에서 전단저항의 한계는

Table 3. Result of triaxial compressive tests for Iksan granite, cheonan tonalite and chungju dolomite.

Sample	Test temperature (°C)	Confining pressure (kg/cm^2)	Compressive strength (kg/cm^2)	Normalized value*1	Normalized value*2	Young's modulus ($\times 10^5$ kg/cm^2)	Normalized value*3	Normalized value*4
Iksn granite	R.T.	50	2250	1.527	1.000	1.76	1.000	1.000
		100	2720	1.846	1.000	1.84	1.045	1.000
		150	3250	2.204	1.000	1.92	1.091	1.000
	100	50	2030	1.474	0.901	1.81	1.028	1.028
		100	2550	1.855	0.939	1.90	1.080	1.033
		150	3050	2.219	0.940	1.84	1.045	0.958
	200	50	1750	1750	0.776	1.88	1.068	1.068
		100	2190	2190	0.805	1.78	1.011	0.967
		150	2690	2690	0.830	1.81	1.028	0.943
Cheonan tonalite	R.T.	50	2320	1.330	1.000	1.68	1.000	1.000
		100	2790	1.598	1.000	1.72	1.024	1.000
		150	3310	1.895	1.000	1.78	1.060	1.000
	100	50	2050	1.270	0.883	1.51	0.900	0.900
		100	2440	1.514	0.876	1.58	0.940	0.919
		150	2850	1.770	0.863	1.64	0.976	0.921
	200	50	2260	1.315	0.972	1.55	0.923	0.923
		100	2730	1.590	0.978	1.64	0.976	0.953
		150	2920	1.703	0.884	1.79	1.065	1.006
Chungju dolomite	R.T.	50	2690	1.147	1.000	1.94	1.000	1.000
		100	2940	1.257	1.000	1.98	1.021	1.000
		150	3230	1.378	1.000	1.95	1.005	1.000
	100	50	2910	1.331	1.082	1.81	0.933	0.933
		100	3250	1.488	1.104	2.05	1.057	1.035
		150	3640	1.666	1.127	2.11	1.088	1.082
	200	50	2740	1.205	1.022	1.83	0.943	0.943
		100	3080	1.401	1.045	1.88	0.969	0.949
		150	3490	1.590	1.082	1.94	1.000	0.995

*1: Normalized by uniaxial compressive strength at the same temperature
*2: Normalized by compressive strength at R.T. under the same confining pressure
*3: Normalized by Yong's modulus at R.T. under the confining pressure of 50 kg/cm^2
*4: Normalized by Young's modulus at R.T. under the same confining pressure

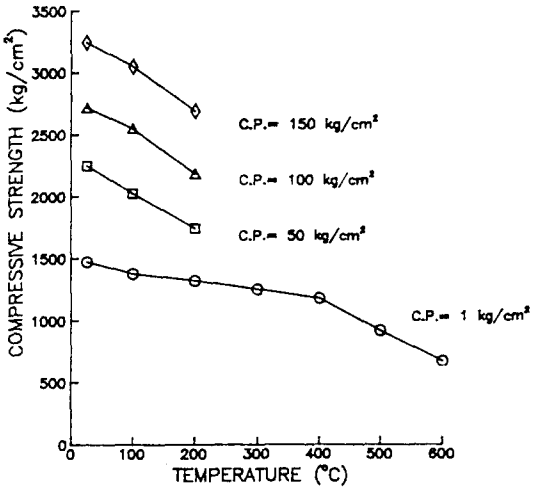


Fig. 18. Variation of compressive strength of Iksan granite with temperature under various confining pressures.

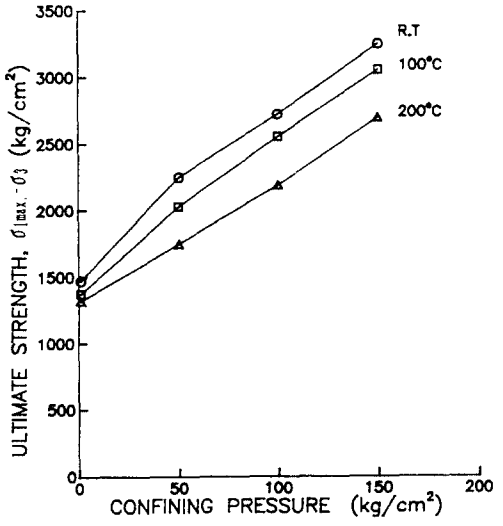


Fig. 19. Variation of ultimate strength of Iksan granite with confining pressure as a function of temperature.

온도가 상승할수록 감소하고 있으며 또 이러한 현상은 압축수직응력이 커질수록 더욱 뚜렷해지고 있었다.

(2) 천안석영섬록암

천안석영섬록암도 Table 3에 나타난 바와같이 동일한 온도에서 봉압이 증가하면 파괴강도가 증가하는 것을 알 수 있었다. 그리고 Fig. 21에 나타나 있는 바와같이 동일한 봉압하에서 온도변화시 강도는 대기압하에

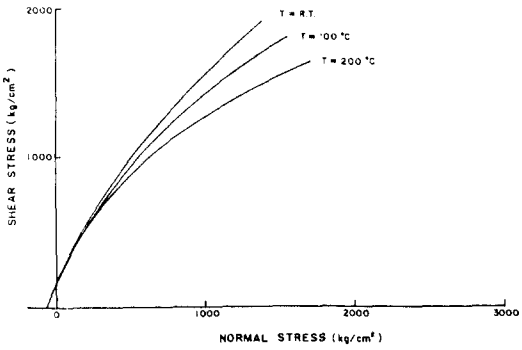


Fig. 20. Mohr's failure envelope of Iksan granite as a function of temperature.

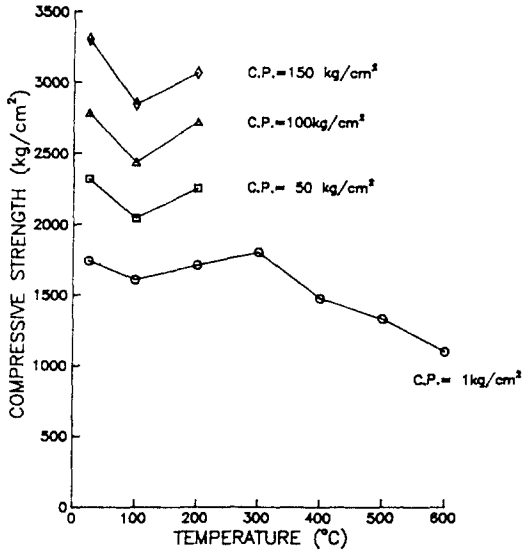


Fig. 21. Variation of compressive strength of Cheonan tonalite with temperature under various confining pressures.

서 단축압축강도의 변화경향과 대체로 잘 일치하는 변화경향을 보여주고 있으며, 동일봉압하의 상온에서의 강도에 비해 100°C에서는 86.3~88.3% 수준까지 감소하였다가 200°C 에서는 88.4~97.8% 수준으로 강도저하폭이 줄어들어 100°C의 경우보다 오히려 증가하는 경향을 특징적으로 잘 나타내고 있었다. 이는 앞서 고찰한 단축압축강도의 경우와 마찬가지로 온도상승시의 광물입자간 인력증대에 의한 현상으로 보인다.

Fig. 22에는 봉압 σ_3와 최종강도 σ_{1max}-σ_3의 관계를 도시하였는데 그림에 나타난 바와같이 주응력 평면상

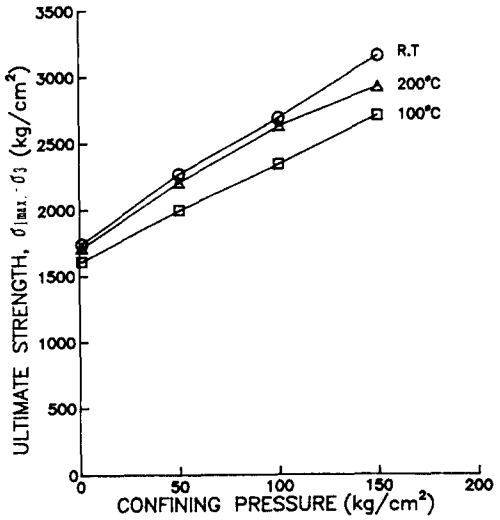


Fig. 22. Variation of ultimate strength of Cheonan tonalite with confining pressure as a function of temperature.

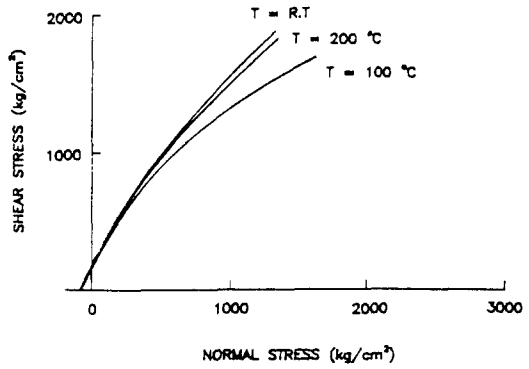


Fig. 23. Mohr's failure envelope of Cheonan tonalite as a function of temperature.

의 파괴한계선은 역시 명료한 온도의 함수임을 보여주고 있으며 즉, 온도증가시 100°C에서의 파괴한계는 저하하였다가 200°C에서는 다시 상승하는 경향을 보인다. 상온, 100°C, 200°C의 각 온도별 천안석영섬록암의 파괴포락선을 비교하여 Fig. 23에 함께 도시하였으며 여기서도 파괴포락선의 뚜렷한 온도의존성을 알 수 있었다. 그러나 단축압축강도의 온도에 따른 변화특성을 고려한다면 시험온도가 400°C 이상으로 증가될 경우 파괴한계나 파괴포락선의 급격한 저하가 예상된다.

(3) 충주돌로마이트

충주돌로마이트의 고온삼축압축시험결과 Table 3에

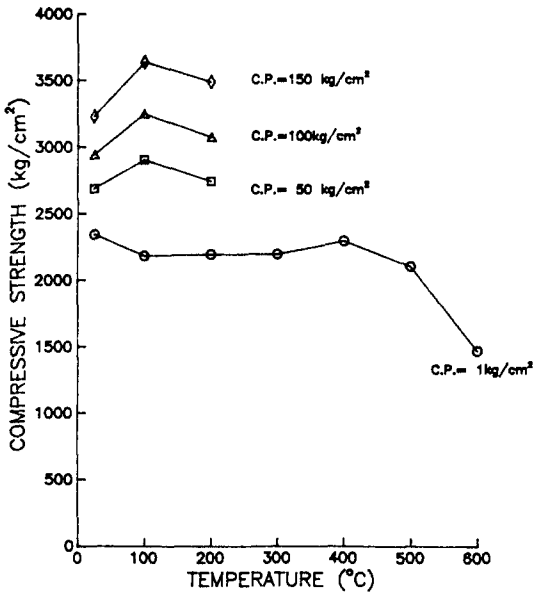


Fig. 24. Variation of compressive strength of Chungju dolomite with temperature under various confining pressure.

나타난 바와같이 앞서 익산화강암이나 천안석영섬록암과 마찬가지로 동일온도에서 봉압증가시 파괴강도가 증가하고 있다. Fig. 24에는 대기압하에서의 경우를 비롯하여 150 kg/cm²까지의 각 봉압하에서 온도변화에 따른 압축강도의 변화를 나타내었는데, 충주 돌로마이트는 온도변화시 봉압하에서의 강도변화가 단축압축강도의 변화양상과 다르게 나타났다. 시험온도가 100°C로 상승될 경우 각 봉압별로 상온에서의 강도에 비해 8.2~12.7%까지 오히려 강도가 증대되는 경향을 나타내고 있었으며 이러한 경향은 봉압이 높을수록 더욱 뚜렷해지고 있다. 또 200°C에서도 100°C의 강도보다는 상대적으로 저하하고 있으나 상온에서의 강도에 비해서는 봉압별로 2.2~8.2%까지 상승된 강도를 보여주고 있었으며 100°C의 경우와 마찬가지로 상승된 폭은 봉압이 높을수록 증가되는 경향을 보여주었다. 이러한 현상은 선형팽창 구간인 100°C까지 온도에서 봉압의 작용과 함께 광물입자간 거리감소에 의한 인력증가가 나타나 강도의 증가를 보여준 것으로 생각되고 이는 봉압이 높을수록 강도의 증가가 크게 나타나는 점으로부터도 확인될 수 있다. 그 후 200°C에서는 상온에서 보다는 증가된 수준이지만 100°C에 비해 강도가 감소하는 것을 볼 수 있으며 이로 미루어 대기압하에서는 100°C

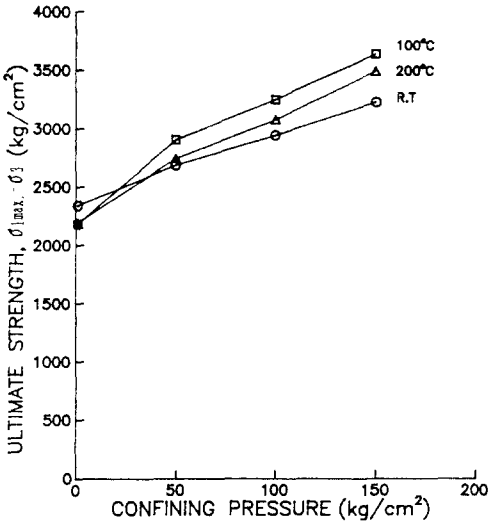


Fig. 25. Variation of ultimate strength of Chungju dolomite with confining pressure as a function of temperature.

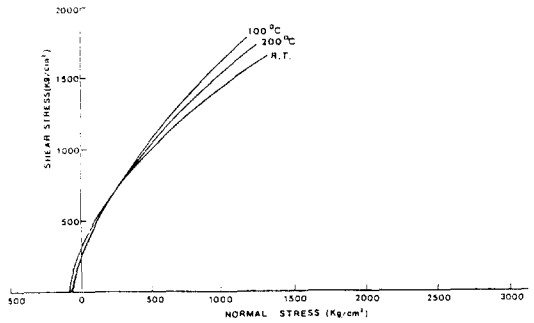


Fig. 26. Mohr's failure envelope of Chungju dolomite as a function of temperature.

인 T_c가 봉압을 가한 상태에서는 100°C와 200°C사이로 이동된 것으로 추측되며 봉압이 높을수록 강도저하가 적은 점은 봉압이 높을수록 T_c가 높은 온도로 이동된 것을 의미하는 현상이라고 생각된다.

Fig. 25에는 주응력 평면상의 파괴한계의 온도의존성을 알아보기 위하여 충주돌로마이트의 봉압 σ_3와 최종강도 σ_{1max}-σ_3의 관계를 도시하였으며 역시 뚜렷한 온도의존성을 나타내고 있었다. 여기서 나타난 바와 같이 약 20~30 kg/cm²이하의 낮은 최소주응력 범위에서 100°C와 200°C에서의 파괴한계는 상온에서의 파괴한계보다 낮지만 그이상으로 최소주응력이 증가될 경우 반전되어 오히려 높은 파괴한계를 지니게 된다. 또, 입

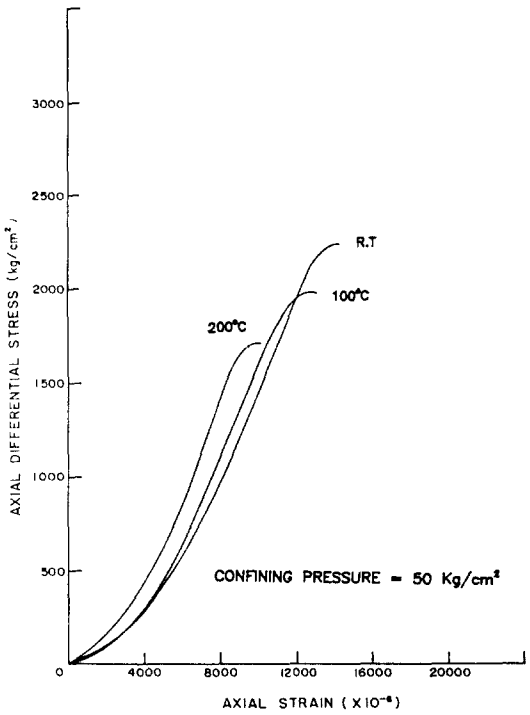


Fig. 27. Axial differential stress-axial strain curves of Iksan granite under confining pressure of 50 kg/cm2 at various testing temperature.

자간 인력증대가 발생되는 것으로 보이는 100°C의 경우가 200°C의 경우보다는 높은 수준의 파괴한계를 지니고 있었다.

Fig. 26에는 충주돌로마이트의 온도별 파괴포락선을 함께 도시하여 비교하였으며 역시 온도의존성을 잘 보여 주고 있다. Fig. 25과 Fig. 26에서와 같이 충주돌로마이트의 경우 비교적 높은 수준의 최소주응력이나 수직응력하에서 온도가 상승될수록 파괴한계나 파괴포락선이 상승되는 현상은 앞서의 익산화강암과는 대조적 현상으로서 이는 Fig. 24에서도 고찰한 바와 같이 봉압에 의한 T_c의 상승과 입자간 인력증대에 의한 것으로 보이며 이후 시험온도가 더욱 상승될 경우 파괴한계나 파괴포락선은 급격히 저하할 것으로 생각된다.

4.3.2 변형거동의 온도의존성

(1) 익산화강암

Fig. 27~Fig. 29에는 익산화강암에 대하여 50, 100, 150 kg/cm²의 봉압하에서 200°C까지의 온도범위에서 측정된 편차축응력-축변형률선도를 도시하였으며 여기에 나타난 바와같이 동일온도에서 봉압증가시 앞 절에

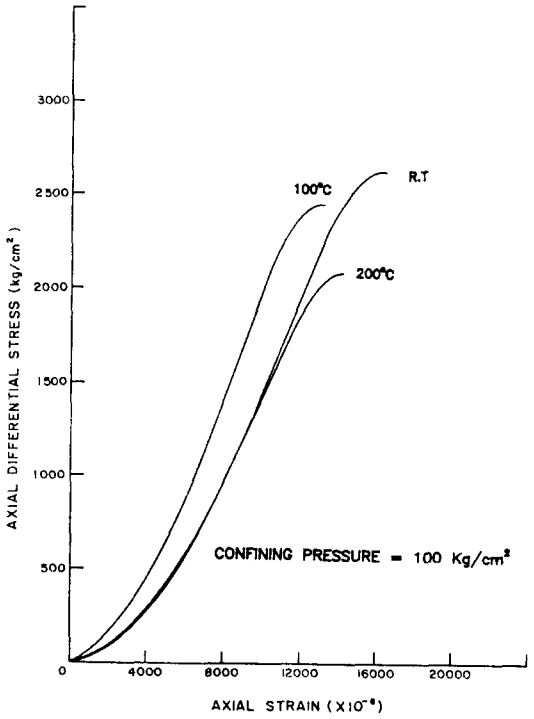


Fig. 28. Axial differential stress-axial strain curves of Iksan granite under confining pressure of 100 kg/cm^2 at various testing temperature.

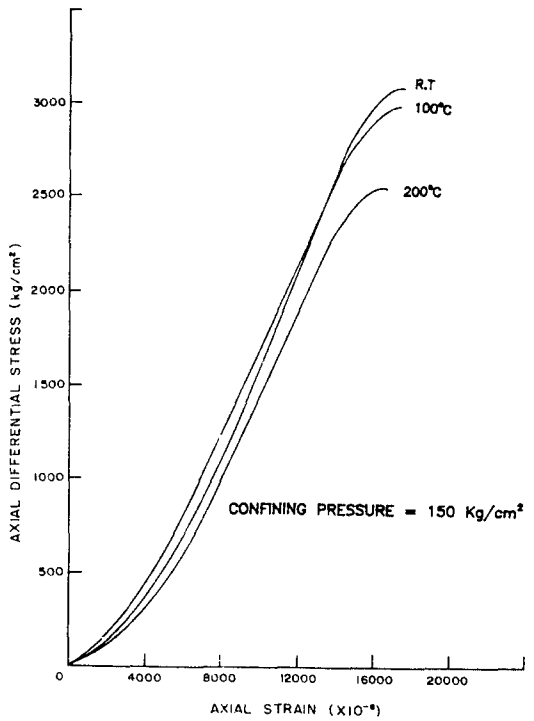


Fig. 29. Axial differential stress-axial strain curves of Iksan granite under confining pressure of 150 kg/cm^2 at various testing temperature.

서 고찰한 강도증가와 더불어 파괴시까지의 총변형률은 증대되었으며, 동일봉압하에서 온도를 200℃까지 증가시킬 경우에 있어서는 강도저하와 함께 파괴시까지 총변형률은 감소되는 경향을 나타내었다. 이러한 현상은 대기압하의 단축압축의 경우 200℃까지에서도 소량이나마 파괴시까지 총변형률 증대가 나타난 것과 대조적인 것으로서 봉압의 작용에 의한 것으로 생각된다. Fig. 27~Fig. 29에 나타난 다양한 온도, 압력조건에서 측정된 익산화강암의 편차축응력-축변형률선도상에서 최종강도의 50%수준에서 접선계수로 구한 Young계수가 Table 3에 나타나 있으며, 50 kg/cm^{2}의 가장 낮은 봉압하의 상온에서 측정된 Young계수를 기준치로 하여 삼축압축시험에서 얻어진 Young계수를 표준화시켰으며 이렇게 표준화된 값들을 이용하여 봉압의 변화와 온도의 변화에 따른 Young계수의 변화경향을 Fig. 30~Fig. 31에 도시하였다. 150℃Ckg/cm^{2}의 압력과 200℃의 온도범위에서 등온하 봉압변화에 의한 익산화강암의 Young계수는 대체로 10% 이내에서 변화하여 단축압축시 200℃까지 Young계수의 변화(2%)에 비해

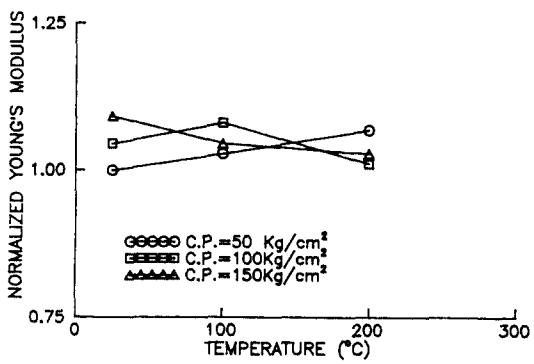


Fig. 30. Temparature dependency of nomalized young's modulus at different confining pressures (Iksan granite).

서 크게 나타났으나 강도에 비하여는 온도,압력의 영향이 다소 작게 나타났으며 그 변화경향이 상당한 분산을 보이고 있었다. Fig. 30에 나타난 바와같이 봉압을 증가시킬 경우 Young계수는 대체로 증가하는 경향을 보이고 있으나 온도가 상승될 경우 그 경향은 뚜렷하지

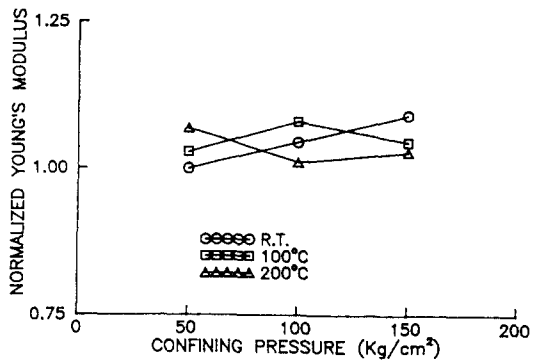


Fig. 31. Confining pressure dependency of nomalized young's modulus at different temperature (Iksan granite).

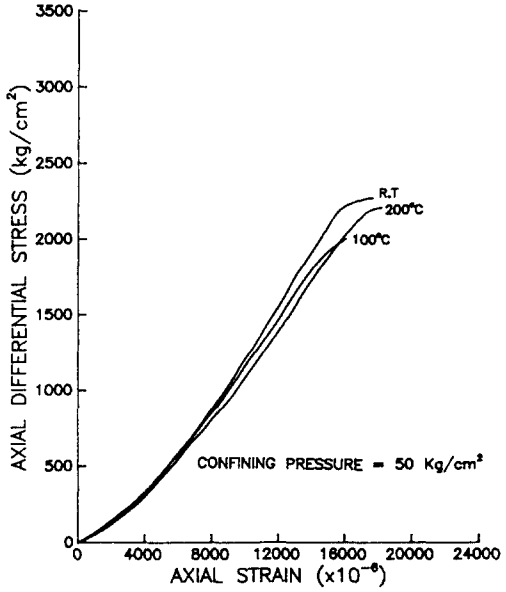


Fig. 32. Axial differential stress-axial strain curves of Cheonan tonalite under confining pressure of 50 kg/cm^2 at various testing temperature.

않았다. 또 Fig. 31에는 동일봉압하에서 온도가 변화할 경우 Young계수의 변화경향을 나타내고 있는데 역시 봉압수준에 따라 상당한 분산을 보이고 있었다. 익산화강암의 Young계수는 50 kg/cm^{2}의 봉압하에서는 온도상승시 증가하였고 100 kg/cm^{2}의 봉압하에서는 온도상승시 증가하다가 감소하였는데 이는 대기압하에서의 경우와는 다른 경향으로서 대체로 봉압의 작용에 의한 일시적 현상으로 보인다. 그러나 150 kg/cm^{2}의 봉압하에

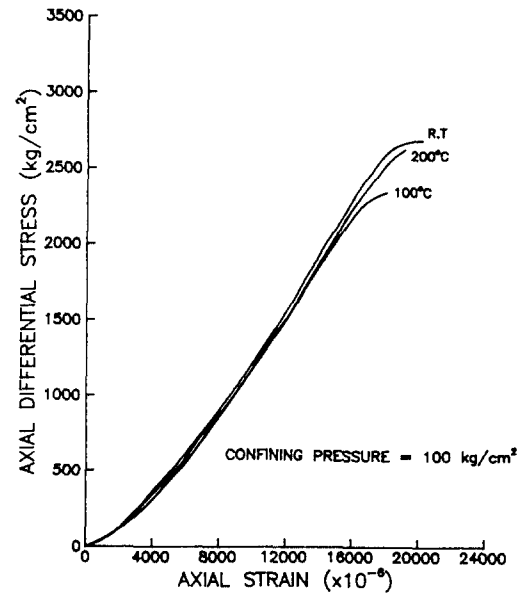


Fig. 33. Axial differential stress-axial strain curves of Cheonan tonalite under confining pressure of 100 kg/cm^2 at various testing temperature.

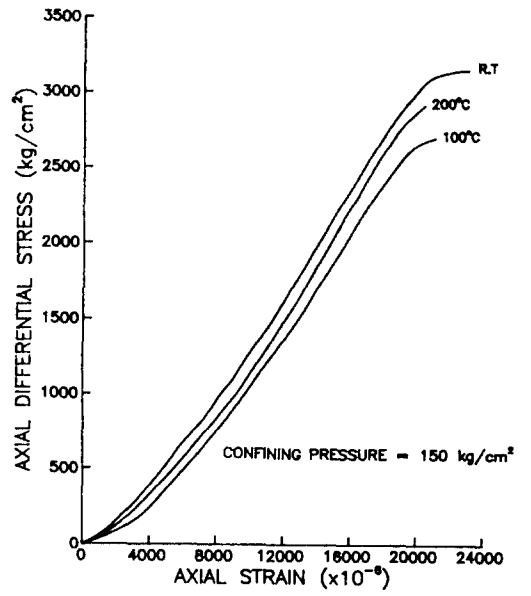


Fig. 34. Axial differential stress-axial strain curves of Cheonan tonalite under confining pressure of 150 kg/cm^2 at various testing temperature.

서는 온도상승시 감소하여 대체로 대기압하에서의 경우와 일치하는 경향을 보였다. 그러나 이러한 등압상태에서 온도변화에 따른 Young계수의 변화량은 7%이내의

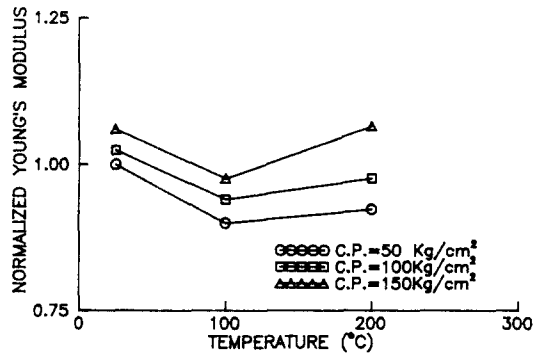


Fig. 35. Temparature dependency of nomalized young's modulus at different confining pressures (Cheonam tonalite).

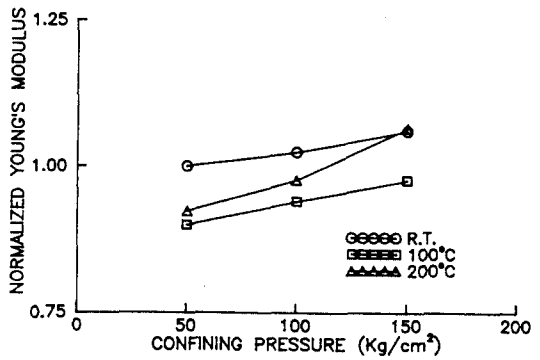


Fig. 36. Confining pressure dependency of nomalized young's modulus at different temperature (Cheonam tonalite).

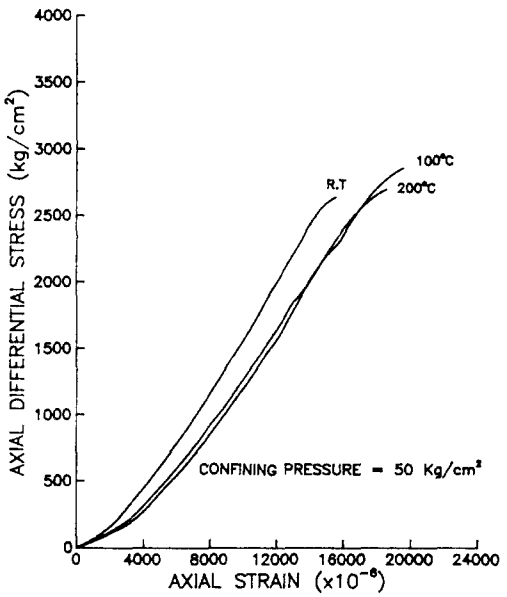


Fig. 37. Axial differential stress-axial strain curves of Chungju dolomite under confining pressure of 50 kg/cm^2 at various testing temperature.

소폭이었다. 그리고 시험온도가 더욱 상승될 경우 대기압하의 Young계수의 변화양상과 마찬가지로 봉압하의 Young계수도 지속적으로 급격한 감소가 예상된다.

(2) 천안석영섬록암

천안석영섬록암에 대하여 50, 100, 150 kg/cm^{2}의 봉압하에서 온도를 200°C까지 변화시키며 측정한 편차축응력-축변형률선도를 Fig. 32~Fig. 34에 나타내었다. 여기서 나타난 바와같이 천안석영섬록암의 경우도 동일한 봉압하에서 온도상승시 강도는 저하하였으나 파괴시까지 총변형률은 감소되어 나타났다. 그러나 동일온도에서 봉압을 증가시킬 경우는 앞서 고찰한 바와같이 강도의 증가와 더불어 파괴시까지 총변형율의 증가를 보여주었다. 최종강도의 50%수준의 접선계수로서 Young계수를 산정하였으며 이 결과를 Table 3에 나타내었다. 여기서도 익산화강암의 경우와 같이 봉압 50 kg/cm^{2}의 상온에서 측정된 Young계수를 기준치로 이들 Young계수를 표준화시켰으며 등온하 압력의 영향과 등압하 온도의 영향을 알아보기 위하여 표준화된 Young계수의 변화양상을 Fig. 35~Fig. 36에 각각 도시하였다.

Fig. 35에 나타난 바와같이 천안석영섬록암의 Young계수는 동일온도에서 봉압 증가시 대체로 2~15% 가량 증가하는 경향을 보였고 이러한 경향은 앞서 고찰한 바와같이 입자간 인력이 증가되는 높은 온도일수록 더욱 뚜렷이 나타났다. 이에따라 200°C의 경우 150 kg/cm^{2}으로 봉압이 증가될 경우 동일온도의 봉압 50 kg/cm^{2}의 경우보다 약 15%가량 증가된 Young계수를 나타내었다. Fig. 36에는 동일봉압하에서 온도를 증가시킬 경우 천안석영섬록암의 표준화된 Young계수의 변화양상이 나타나 있으며, 100°C에서 상온의 Young계수에 비해 봉압별로 8~10%가량 감소한 후 200°C에서는 100°C의 경우보다 상승하여 상온의 Young계수에 비해 봉압별로 1~6%가량 감소된 수준으로 나타났다. 그러나 시험온도가 더욱 상승할 경우 대기압하에서 Young계수의 변화 양상과 마찬가지로 봉압하에서의 Young계수도 급격한 저하가 예상된다.

(3) 충주돌로마이트

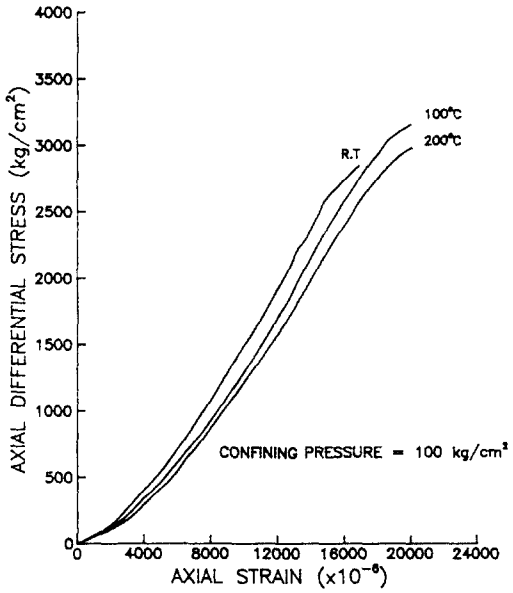


Fig. 38. Axial differential stress-axial strain curves of Chungju dolomite under confining pressure of 100 kg/cm^2 at various testing temperature.

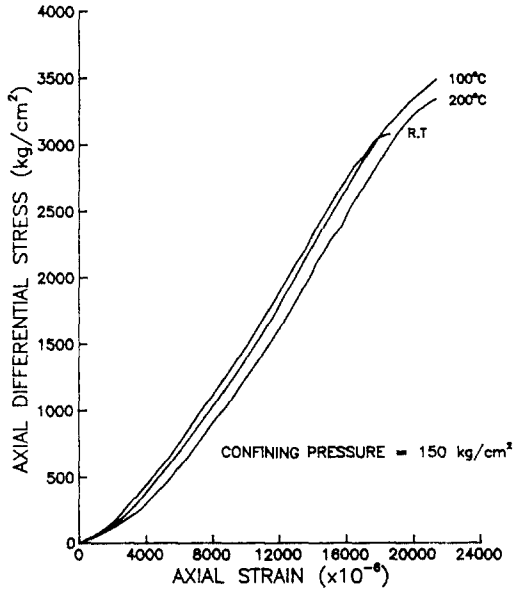


Fig. 39. Axial differential stress-axial strain curves of Chungju dolomite under confining pressure of 150 kg/cm^2 at various testing temperature.

Fig. 37~Fig. 39에는 50, 100, 150 kg/cm^{2}의 봉압하에서 온도를 200°C까지 변화시키면서 측정된 충주돌로마이트의 편차축응력-축변형률선도를 나타내었다. 온

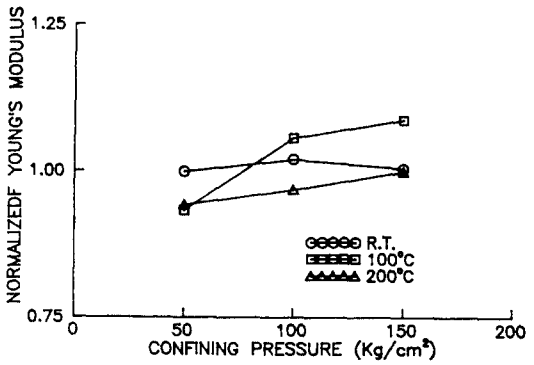


Fig. 40. Confining pressure dependency of nomalized young's modulus at different temperature (Chungju dolomite).

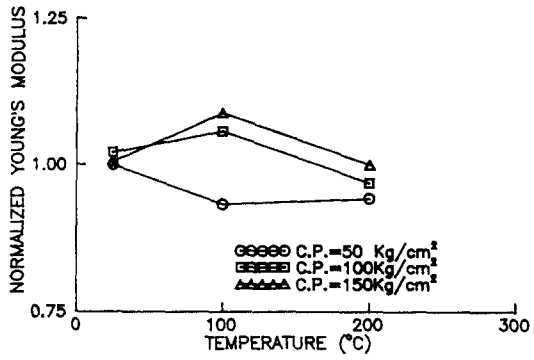


Fig. 41. Temparature dependency of nomalized young's modulus at different confining pressures (Chungju dolomite).

도변화시 파괴강도가 증가하면 파괴시까지의 총변형률은 증가하고 있으며 이에따라 각 봉압별로 가장 높은 강도를 보인 100°C에서 대체로 가장 큰 파괴시까지 총변형률이 발생하였고 200°C, 상온의 순으로 강도가 저하하면서 총변형률도 감소하였다. 최종강도의 50% 수준에서 접선계수로 구한 Young계수를 상온의 50 kg/cm^{2}의 봉압하에서 측정된 Young계수를 기준치로 표준화시켰다. Fig. 40에는 등온하에서 압력변화에 따른 Young계수의 변화경향을 표준화된 값을 이용하여 도시하였다. 상온에서 압력의 영향을 거의 받지 않던 Young계수는 봉압을 50 kg/cm^{2}에서 150 kg/cm^{2}으로 증가시킬 경우 100°C에서는 약 17%, 200°C에서는 약 6%가량 증가되고 있었다. 상온에서 충주돌로마이트의 Young계수가 봉압의 영향을 받지 않는 것은 충주돌로

마이트가 대체로 균열이 거의 없는 미립질의 단광물암석이기 때문이다. 100°C이후 200°C까지는 열파괴에 의한 돌로마이트의 소성이 발생되는 안정적 열파괴 구간으로서 봉압이 작용할 경우 Young계수의 증가가 발생되는 것으로 보인다. Fig. 41에는 동일압력하에서 온도변화시 표준화된 충주돌로마이트의 Young계수를 나타냈으며 이경우 Young계수의 변화양상은 50°C kg/cm^{2}의 가장 낮은 봉압하에서는 100°C, 200°C로 온도가 증가될 경우 6~7%가량 소폭의 감소를 나타내었다. 그러나 봉압이 100, 150 kg/cm^{2}으로 증가된 경우 100°C에서 약 4~8%가량 증가한 후 200°C에서 1~5% 가량 감소되는 경향을 나타내, 대기압하에서 Young계수나 봉압하에서 강도의 변화양상과 대체로 유사한 변화경향을 나타내었다. 봉압하에서 충주돌로마이트의 Young계수도 대기압하에서 온도상승에 따른 Young계수의 변화양상을 고려할 경우 시험온도가 더욱 상승될 경우 역시 급격한 감소가 예상된다.

5. 결 론

본 연구에서 얻어진 중요한 결론은 다음과 같다.

1. 온도상승시 익산화강암의 단축압축강도와 Young계수는 지속적으로 감소하였고 천안석영섬록암은 증가하다가 암석의 열파괴개시온도인 T_c이후 감소하였으며, 충주돌로마이트는 T_c이후 소폭 감소후 안정구간에서 큰 변화가 없다가, 안정구간과 불안정구간을 구분하는 새로운 임계온도 T_c'이후 급격히 감소하였다. 350°C의 높은 T_c를 지닌 천안석영섬록암은 T_c이전에 입자간 결합력 증가가 발생한 것으로 보이며 이는 암석조성 및 조직과도 밀접한 관계가 있는 것으로 보인다. 익산화강암이나 충주돌로마이트와 같이 T_c이후에도 일정온도까지 뚜렷한 강도변화를 나타내지 않는 것은 열균열의 전파양상과 크기, 상호연결성 등에 의한 영향으로 보인다.

2. 온도상승시 암석의 압열인장강도는 암석의 T_c에 의해 그 변화양상이 결정되며, T_c이전과 T_c이후의 2개 선형감소 구간으로 뚜렷이 구분되었다. T_c이전의 완만한 선형감소 구간은 입자간 열응력의 영향으로 보이고, T_c이후 급격한 선형감소 구간은 열균열의 영향이며 이러한 현상은 암석과 같은 취성재료의 인장파괴 특성에 기인하는 것으로 보인다. 충주돌로마이트는 T_c'이후 실제 열균열의 전파가 발생되므로 T_c'이전과 T_c'이후의 2개 구간으로 구분되어 동일한 양상의 변화를 나타내었다. 또, 점착강도는 압열인장강도와 대체로 유사한 감소경향을 나타내었다.

3. 암석의 열파괴량(잔류열팽창)은 암석의 물리적·역학적 특성을 취약하게 하며, 암종별, 물성별로 조금씩 차이가 있지만 대개 열파괴 초기에 그 영향이 크게 나타났고 그후 열파괴량이 증가함에 따라 따라 단축압축강도, Young계수, 압열인장강도, 점착강도는 대체로 선형적으로 감소하였다. 이 경우 인장강도는 열파괴에 가장 민감하게 영향을 받았고, 단축압축강도는 가장 적게 영향을 받았다.

4. 익산화강암은 동일온도에서 봉압증가시 강도가 증가하고 동일봉압하에서 온도상승시 강도는 저하하였다. 이에 따라 주응력 평면상의 파괴한계나 Mohr의 파괴포락선은 온도상승과 더불어 저하하였고, 이러한 현상은 온도가 높을수록, 수직응력이 클수록 더욱 뚜렷해졌다. 천안석영섬록암은 동일온도에서 봉압증가시 강도가 증가하였고, 동일봉압하에서 온도증가시 강도는 100°C에서 감소하였다가 200°C에서 증가하였다. 이에 따라 주응력 평면상의 파괴한계는 상온, 200°C, 100°C의 순으로 저하하였고, Mohr의 파괴포락선의 경우 인장영역에서는 온도상승에 따라 소폭 저하하지만 압축영역에서는 주응력 평면상의 파괴한계와 동일한 온도의존성을 보였다. 그러나 대기압하의 강도 변화 양상을 고려한다면 시험온도가 400°C이상으로 상승할 경우 천안석영섬록암의 파괴한계는 온도상승시 급격히 저하할 것으로 예상된다. 충주돌로마이트는 동일온도에서 봉압증가시 강도가 증가하였지만 동일봉압하에서 온도상승시 강도는 대기압하의 경우와 다른 경향을 보였다. 봉압하에서 강도는 100°C에서 상승한 후 200°C에서 저하하는 경향을 보였으며 이는 대기압하에서 100°C인 T_c가 봉압하에서 100~200°C 사이로 상승되기 때문으로 보인다. 이에 따라 낮은 σ_3하에서의 파괴한계나 인장영역을 포함한 낮은 수직응력하에서의 Mohr의 파괴포락선은 온도가 높을수록 저하되었지만, σ_3나 수직응력이 증가될 경우 100°C의 파괴한계가 가장 높고 상온의 파괴한계가 가장 낮게 나타났다.

5. 암석의 Young계수는 온도 및 압력 의존성을 지니고 있었으며 그 변화는 대체로 10% 내외로서 강도에 비해 변화가 적었다. 삼축압축상태에서 Young계수는 동일온도에서 봉압증가시 대체로 증가하는 경향을 보였고 동일봉압하에서 온도상승시는 암종별로 다른 변

화경향을 보였다. 동일 봉압하에서 천안석영섬록암의 Young계수는 100°C에서 감소 후 200°C에서 증가되는 경향을 나타내었고, 충주돌로마이트는 100°C에서 증가하였다가 200°C에서 감소하여 이들은 봉압하에서 강도의 변화양상과 유사한 변화를 보였다. 그러나 익산화강암의 Young계수는 분산된 결과를 나타내 뚜렷한 경향을 보이지 않았으며 이는 익산화강암의 광물조직상의 불균질성에 그 원인이 있을 것으로 보인다.

감사의 글

이 연구 및 본 학회지 5권 1호에 발표한 "고온하에서 암석의 열충격, 열팽창 및 열파괴에 관한 연구"는 한국과학재단 94년 특정연구과제 (과제번호 94-0703-06-01-3) "방사성폐기물의 지하처분을 위한 암반공동의 부지선정 및 안정성 평가를 위한 연구"의 제 2세부과제 중 일부이다. 연구비를 지원해주신 한국과학재단에 감사드린다.

참 고 문 헌

1. Cook,N.G.W., 1978, "An application of hard rock for potential underground re- positories of radioactive waste", Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7073, Part I, pp.15.
2. Cook, N.G.W. and Hood, M., 1978, "Full-scale and time-scale heating experiments at Stripa : Preliminary results", Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7072, pp.11.
3. Cook, N.G.W. and Witherspoon, P.A., 1978, "In situ heating experiments in hard rock : Their objectives and design", Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7073, Part II, pp.9.
4. Hocking, G., Williams, J.R. and Mustoe, G.G.W., 1990, "Post-test assessment of simulations for in-situ heater tests in basalt-PartI. Heater test description and rock mass properties", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 27, pp.143~159.
5. Hocking, G., Williams, J.R. and Mustoe, G.G.W., 1990, "Post-test assessment of simulations for in-situ heater tests in basalt-PartII. Comparison of predicted and measured response", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.27, pp.161~174.
6. Heard, H.C., 1980, "Thermal expansion and inferred permeability of Climax quartz monzonite to 300°C and 27.6 MPa", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.17, pp.289~296.
7. Heard, H.C. and Page, L., 1982, "Elastic moduli, thermal expansion, and inferred permeability of two granites to 350°C and 55 megapascals", J. Geophys. Res., Vol.87, pp.9340~9348.
8. Myer, L. and Rachiele, R., 1981, "Laboratory investigations of thermomechanical properties of Stripa granite", Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-13435, pp.192.
9. Friedman, M., Handin, J., Higgs, N.G. and Lantz, J.R., 1979, "Strength and ductility of four dry igneous rocks at low pressures and temperatures to partial melting", Proc. 20th US Symp. on Rock Mech., pp.35~50.
10. Bauer, S.J., Friedman, M. and Handin, J., 1981, "Effects of water-saturation on strength and ductility of three igneous rocks at effective pressure to 50 MPa and temperatures to partial melting", Proc. 22nd US Symp. on Rock Mech., pp.79~84.
11. Bauer, S.J. and Johnson, B., 1979, "Effects of slow uniform heating on the physical properties of the Westerly and Charcoal granites", Proc. 20th US Symp.on Rock Mech., pp.7~18.
12. 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.
13. Dmitriyev, A.P., Kuzyayev, L.S., Protasov, Y.I. and Yamshchikov, V.S., 1972, "Physical properties of rocks at high temperatures", NASA Technical Translation, N72-26286, pp.1~13.
14. Chan, T., Cook, N.G.W. and Tsang, C.F., 1978, "Theoretical temperature fields for the Stripa heater project" Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7082, Vol.1, pp.53.
15. Chan, T., Hood, M., and Witherspoon, P.A., 1980, "Predicted and measured temper atures, displacements and stresses from the Stripa heater experiments", Rockstore'80, Stockholm, pp.829~837.

16. 이기형, 이형원, 신재섭, 1990, "화강암질 석재의 열파괴 특성연구", 한국자원공학회지, Vol. 27, pp. 31~42.
17. 이정인, 이기형, 이형원, 이상돈, 1991, "고온하의 석재물성연구", 대한광업진흥공사, pp.1~92.
18. Advani, S.H. and Lee, K.Y., 1979, "Thermo-mechanical failure criteria for rock media", Proc. 20th US Symp.on Rock Mech., pp.19~25.
19. Bruner, W.M., 1979, "Crack growth and the thermoelastic behavior of rocks", J. Geophys. Res., Vol.84, pp.5578~5590.
20. Chan, T., Littlestone, N. and Wan, O., 1980, "Thermomechanical modelling and data analysis for heating experiments at Stripa, Sweden", Proc. 21st US Symp. on Rock Mech., pp.16~25.
21. Lama, R.D., and Vutukuri, V.S., 1978, "Handbook on mechanical properties of rocks" Trans Tech Publications, Vol. 2, pp.481.
22. Paquet, J. and Fran ois, P., 1980, "Experimental deformation of partially melted granitic rocks at 600~900°C and 250 MPa confining pressure", Tectonophysics, Vol 68, pp.131~146.
23. Swan, G., 1978, "The mechanical properties of Stripa granite", Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7074, pp.26.
24. Tsui, K.K. and Lee, C.F., 1980, "Thermomechanical stability of heated rock caverns", Proc. 21st US Symp. on Rock Mech., pp.183~191.
25. Wingquist, C.F., 1969, "Elastic moduli of rock at elevated temperatures", US Bureau of Mines, RI-7269, pp.18.
26. 이형원, 이정인, 1995, "고온하에서 암석의 열충격, 열팽창 및 열파괴에 관한 연구" 한국암반공학회지, Vol. 5, No. 1, pp. 22~40.