

고온하 화강암의 변형 및 파괴거동에 관한 연구

장명환¹⁾ · 양형식²⁾

A Study on the Mechanical Behavior of Two Granites at Elevated Temperatures

Myoung Hwan Jang and Hyung Sik Yang

ABSTRACT When crystalline rocks are heated, thermal stress is induced by the differences in thermal expansion of the mineral composition and its orientation. In this study, high temperature uniaxial compressive tests were carried out for Iksan and Hwangdeung granites to study the deformation and failure behavior due to thermal loading. Compressive and tensile strength of Hwangdeung granite for 200°C decreased to 80% and 82% of the room temperature strength, and those of Iksan granite decreased to 90% and 92% for 200°C, respectively. Elastic moduli of both granites were decreased sharply at the stress level of 80% of ultimate failure strength. Elastic moduli of both granites by variation of temperature at 50% of ultimate failure strength was decreased as almost linearly.

1. 서 론

암반 구조물의 설계를 위해서는 예상되는 모든 상황에서 구조물 주변의 열역학적 특성을 정확히 예측할 필요가 있다. 암석의 열역학적 거동이 가장 절실하게 적용될 수 있는 분야는 방사성폐기물 처분장이다. 방사성 폐기물의 온도는 초기 몇 년 동안은 전체적으로 증가하고 그후 시간이 흐르면서 점차적으로 감소한다.¹⁾

결정질 암석이 가열되면 광물입자의 방향성과 조성에 따른 입자간 열팽창차에 의하여 내부에서 열응력이 발생하게 된다. Bauer 등²⁾은 국부적인 열인장응력이 입자간 결합강도를 초과하는 지점에서 열균열로 암석의 공극비가 증가되고 역학적 성질이 영향을 받는 것으로 보고하고 있다.

Pratt 등³⁾은 화강암시편의 역학적 성질과 탄성과 전달에 대한 크기 효과를 연구하기 위하여 2축 블록실험을 수행하였는데 이 연구에서도 암반의 변형특성, 투수성, 전기비저항 및 탄성파속도를 포함한 지구물리학적 특성들은 측정하였으나 열역학적 특성은 측정되지 않았다. Lau 등⁴⁾은 캐나다 Lac du Bonnet 화강암의 역학적 특성에 대한 온도, 압력의 영향을 연구하였다.

본 연구에서는 고온실험을 통하여 암석의 파괴강도

감소현상과 하중증분에 따른 고온하 탄성정수의 변화를 고찰하고자 하였다.

2. 탄성계수 결정

본 연구에서는 하중증분에 따른 탄성계수의 변화를 고찰하고자, 암석의 전과정 응력-변형률곡선을 응력과 변형률의 최대값으로 일반화시켜 응력의 함수로 표시하고 이 함수를 응력에 대하여 미분함으로써 전과정-응력변형률 구간에서 접선탄성계수를 구하였다.

하중증분에 따른 탄성정수는 하중증분에 따른 응력-변형률선도로부터 고차식형태로 회귀분석하여 구할 수 있다. 회귀분석한 고차식 형태의 응력-변형률선도의 무차원화 함수는

$$\epsilon' = f(\sigma) = \sum_{i=0}^n c_i \sigma^i \quad (1)$$

과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 c_i 는 상수이고 ϵ' 과 σ' 는 무차원화한 종속변수와 독립변수이다. n 은 응력-

1) 정회원, 공학박사, 대한 광업진흥공사 기술연구소 선임연구원

2) 정회원, 전남대학교 자원공학과 교수

변형률선도를 이루고 있는 data 쌍의 수이다. 본 연구에서 응력치를 종속변수로 한 것은 압축실험에서 변형률보다 하중을 더 안정적으로 계측할 수 있기 때문이다. 일반화된 응력-변형률 곡선으로부터 변형률의 회귀분석함수는

$$\epsilon_a = \epsilon_{a,max} \left[\sum_{i=0}^n \frac{c_i \sigma_a^i}{(\sigma_{a,max})^i} \right] \quad (2)$$

과 같이 표시되므로 접선탄성계수는 ϵ_a 를 σ_a 로 미분하여 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\frac{1}{E_{aT}} = \frac{d\epsilon_a}{d\sigma_a} = \epsilon_{a,max} \left[\sum_{i=0}^n \frac{ic_i \sigma_a^{i-1}}{(\sigma_{a,max})^i} \right] \quad (3)$$

또 식 (1)로부터 할선법에 의한 탄성정수도 구할 수 있다.

3. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 고온실험장치와 모식도를 나타낸 것이다. 사진에서 하중 증분에 따른 변위를 측정하기 위하여 시편하부 캔틸레버에 LVDT를 장착하고 로드 셀은 유압 램 상단부에 설치하였다. 계측치는 동변형률 증폭기와 A/D 변환기를 통하여 PC에 자동 기록되도록 하였다. 고온 시험조는 전면 개방식으로 몸체상부에 3 kW 용량의 매물식 전기히터를 장치하였다. 고온조는 K-Type 열전대를 통하여 시편의 표면온도를 감지하여 프로그래머블 조절기(digital program controller)로 기입력된 가열속도와 설정온도로 조절한다. 프로그래머블 조절기는 PID방식에 의하여 가열속도, 유지시간 등이 자동 및 수동으로 조작될 수 있도록 제작하였다. 상부의 전원 플러그는 열에 의한 전선의 열전달을 막기 위하여 애자로 보호된 2개의 플러그로서 열전대와 함께 프로그래머블 온도조절기에 연결되어 있다. 100톤 용량의 압축시험기를 비롯하여 고온조 및 프로그래머블 조절기 등도 설계하여 주문 제작하였다.

고온 시험조를 이용한 고온단축압축실험 및 압열인장실험에서는 암석가열시 상승온도에 대한 열충격을 억제하기 위하여 적정가열속도로 시편의 온도를 상승시킨 후 암석내의 온도를 균등하게 하기 위하여 최고온도에서 적절한 유지시간을 두게 된다. 이러한 유지시간은 연구자에 따라 30분~4시간까지로 각각 다르다.^{5,6)}

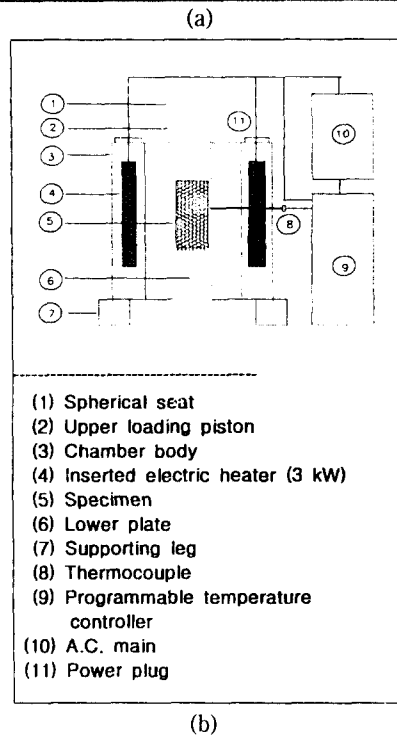


Fig. 1. Equipments for high temperature tests. (a) photograph (b) diagram.

본 연구에서 사용한 화강암과 비슷한 조직과 조성의 국내 화강암에 대한 열 파괴 연구 결과 설정온도에 대하여 1시간 이상에서 대체로 온도구배에 의한 영향이 무시될 수 있는 것으로 보고되었고,⁷⁾ 최근 국내의 화강암에 대한 고온하 강도실험에서는 90분의 유지시간을 주고 90~120 분 사이에 실험을 실시한 것으로 되어 있다.⁸⁾ 본 연구에서는 설정온도까지 가열속도를 2°C/min로 하여 120분의 유지시간을 두고 120~150분 사이에 시험을 실시하였다. 하중속도는 1 kg/cm²/s 이하

로 하여 하중속도에 의한 충격의 영향을 최소화 하고자 하였다. 암석시편을 고온시험조에 넣고 프로그래머블 자동승온장치로 상승온도를 1°C/min로 조정된 후 설정 온도에서 12시간 이상 유지시킨 후 실험하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 시료의 역학적 특성

대상시료의 기본적인 물리적 특성을 파악하기 위하여 각종 실내 물성실험을 통하여 단위중량, 겉보기 공극률, 탄성과 전파속도(P,S), 단축압축강도, 압열인장강도, 탄성계수, 포아송비 등을 구하였다. 각 물성치는 3~5회의 실험결과를 평균한 것이고, 이 중 접선탄성계수와 포아송비는 실온 25°C의 실험조건하에서 로드 셸과 변형률 게이지로부터 측정된 전과정 응력-변형률 선도로부터 단축압축강도의 50% 수준에서 3회 측정하여 평균한 값이다(Table 1).

4.2 고온강도특성

Table 2는 황등화강암의 고온단축압축실험 결과이다. 표에서 황등화강암은 실온 25°C와 비교하여 100°C에서는 96%, 200°C에 대해서는 80%로 파괴강

Table 1. Physical and mechanical properties of Hwangdeung and Iksan granites

Properties	Hwangdeung Iksan	
Unit weight (kN/m ³)	26.3	26.6
Absorption (%)	0.28	0.27
Apparent porosity (%)	0.75	0.72
P-wave velocity (m/s)	3710	3990
S-wave velocity (m/s)	2030	2100
Uniaxial compressive strength (MPa)	189	152
Brazilian tensile strength (MPa)	9.1	7.5
Young's modulus (GPa)	41.5	35.5
Poisson ratio	0.18	0.20

Table 2. Compressive strength at various temperatures for Hwangdeung granite

Temperature (°C)	Compressive strength			Ratios
	σ_c (MPa)	Nr.	SD	
25	189	5	±16	1.00
70	187	4	±13	0.99
100	181	3	±8	0.96
150	160	3	±7	0.85
200	152	3	±8	0.80

도가 저하되었다. 이희석⁹⁾에 의하면 황등화강암의 경우 실온 25°C에서 200°C로 온도가 상승함에 따라 결의 방향에 평행한 경우에는 86%, 수직인 방향인 경우에는 82% 정도의 파괴강도 저하현상이 나타난 것으로 보고하고 있는데, 본 연구에서는 80%정도의 강도감소현상을 보여주고 있다.

Table 3은 황등화강암의 고온하 압열인장강도 실험 결과이다. 실온 25°C에 대하여 100°C에서는 95%, 200°C에 대해서는 82%로 강도가 저하하나 단축압축강도보다는 그 저하율이 적었다. 이희석에 의하면 황등화강암의 경우 25°C에서 200°C로 온도가 상승함에 따라 결의 방향에 평행한 경우에는 약 78%, 수직인 방향인 경우에는 약 75%의 강도저하현상이 나타난 것으로 보고하였다. 본 연구에서는 약 82%정도의 강도 차이를 나타내고 있다.

Table 4는 익산화강암의 고온하 단축압축강도 실험 결과를 나타낸 것이다. 표에서 익산화강암은 실온 25°C에 대하여 100°C에서는 94%, 200°C에 대해서는 89%까지 강도가 감소하였다. 이형원에 의하면 실온 25°C와 비교하여 200°C의 파괴강도의 감소는 90%정도로 보고하였는데, 본 연구에서도 이와 거의 비슷한 89%로 감소하였다.

Table 5는 익산화강암의 고온하 압열인장강도 실험 결과이다. 익산화강암은 실온 25°C에 대하여 100°C에서는 96%, 200°C에서는 92%로 강도가 저하하였다.

그러나 황등화강암의 실온에 대한 200°C의 감소율

Table 3. Indirect tensile strength at various temperatures for Hwangdeung granite

Temperature (°C)	Tensile strength			Ratios
	σ_c (MPa)	Nr.	SD	
25	9.1	3	±0.6	1.00
70	8.9	3	±0.7	0.98
100	8.6	3	±0.5	0.95
150	7.7	3	±0.2	0.85
200	7.5	3	±0.4	0.82

Table 4. Uniaxial compressive strength at various temperatures for Iksan granite

Temperature (°C)	Compressive strength			Ratios
	σ_c (MPa)	Nr.	SD	
25	152	4	±15	1.00
100	143	3	±11	0.94
150	140	3	±9	0.92
200	135	3	±6	0.89

Table 5. Indirect tensile strength at various temperatures for Iksan granite

Temperature (°C)	Compressive strength			Ratios
	σ_c (MPa)	Nr.	SD	
25	7.5	4	± 0.3	1.00
100	7.2	3	± 0.2	0.96
150	7.1	3	± 0.8	0.95
200	6.9	3	± 0.3	0.92

보다는 다소 그 비율이 적게 나타났다. 이형원에 의하면 익산화강암의 경우 25°C에서 200°C로 온도가 상승함에 따라 인장강도의 감소율은 약 10% 정도로 나타났는데, 본 연구에서도 약 8% 정도의 파괴강도가 감소하였다.

4.3 응력증분에 따른 열탄성거동

본 연구에서는 고온단축압축실험에서 구해진 전과정 응력-변형률선도를 이용하여 응력수준에 따른 탄성계수의 변화를 계산하고, 파괴응력의 50% 수준에서 접선탄성계수를 제안방법에 따라 비교하였다.

Fig. 2는 황등화강암의 고온단축압축실험의 전과정 응력-변형률선도를 나타낸 것이다.

응력-변형률 곡선에서 25, 70°C의 파괴거동이 거의 유사함을 보여주고 있다. 그러나 100°C에서는 하중이 증가함에 따라 파괴강도가 감소하고 변형률이 증대하는 경향을 보였다. 또 100°C와 200°C의 중간 온도인 150°C에서 응력-변형률 거동은 파괴하중의 약 50%까지 거의 유사하나, 하중이 증가함에 따라 온도에 따른 파괴응력의 감소와 변형률의 증대현상이 뚜렷해지고 있음을 알 수 있다.

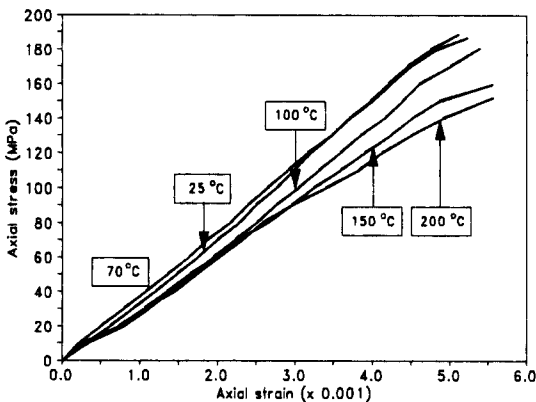


Fig. 2. Stress-strain curves for Hwangdeung granite at various temperatures.

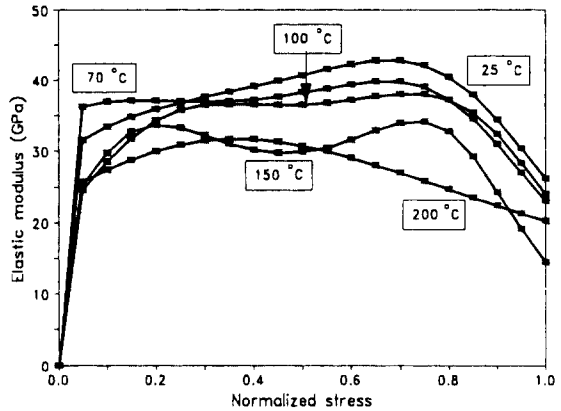


Fig. 3. Trace of elastic modulus for Hwangdeung granite at various temperatures.

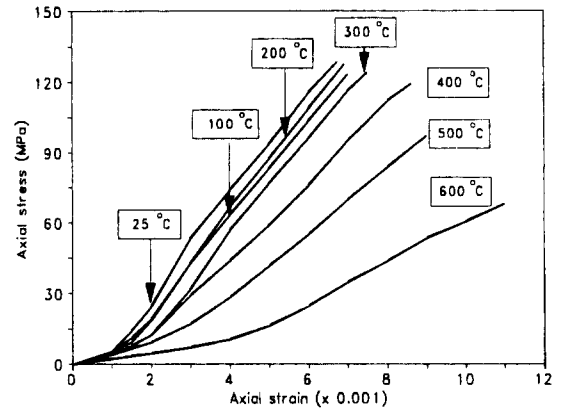


Fig. 4. Stress-strain curves for Iksan granite at various temperatures (after Lee, 1993).

Fig. 3은 Fig. 2의 응력-변형률곡선을 무차원화하여 응력수준별 고온하 탄성계수의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 응력수준의 변화에 따라 탄성계수가 변화하는 것을 볼 수 있다. 전반적으로 온도의 증가와 함께 탄성계수는 감소하는 경향을 보여주고 있다.

그림에서 최대응력의 약 10% 정도에서 탄성계수가 급격히 증가하고, 80% 응력수준 이상에서는 탄성계수가 현저히 감소하는 현상을 보이는데 이는 화강암 특유의 경화(hardening)현상으로 해석된다.

Fig. 4는 익산화강암의 응력-변형률 선도를 나타낸 것이다. 그림에서 온도가 상승할 경우 초기 재하 응력 부분에는 약간의 분산현상이 보이나 온도가 높아질수록 강도가 저하되고 최종 변형률은 증대되는 현상을 볼 수 있다.

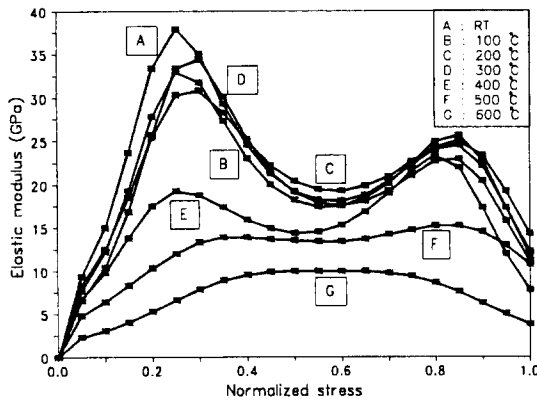


Fig. 5. Trace of elastic modulus for Hwangdeung granite at various temperatures.

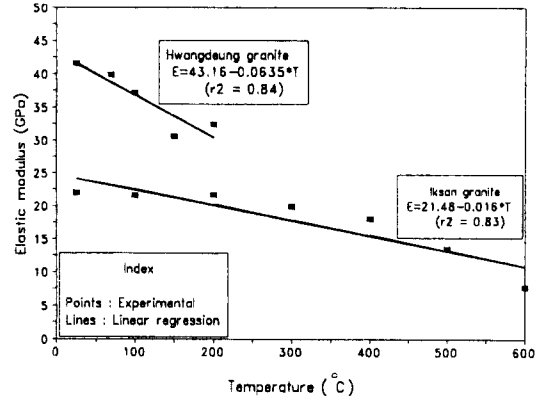


Fig. 6. Variation of elastic modulus of both granites at various temperatures.

Table 6. Elastic moduli of two granites according to variation of temperature

Classification		RT	75°C	100°C	150°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C
Hwangdeung granite	T	41.5	39.8	37.1	30.5	32.3				
	S	36.1	37.7	32.5	30.5	30.5				
Iksan granite	T	21.9		21.5		21.6	19.8	18.5	13.4	7.73
	S	18.2		15.8		16.5	14.5	11.9	8.67	4.70

※ T: Tangent modulus, S: Secant modulus.

Fig. 5는 Fig. 4의 응력-변형률선도를 응력의 최대값과 변형률의 최대값으로 무차원화하여 진과정 응력-변형률 구간에서 응력수준별 탄성계수의 계산결과를 나타낸 것이다. 익산화강암은 황등화강암에 비하여 파괴강도의 30% 수준에서 최대값을 보이고, 50% 수준에서는 최소값을 보이고 있다. 두 화강암 모두 온도가 높을수록 응력수준별 탄성계수의 변화는 적었다. 일반적으로 50% 응력수준에서의 접선탄성계수를 대표적인 탄성계수로 취급하고 있는데 고온 뿐만 아니라 실온에서도 값의 변동이 심하여 탄성계수의 채택에 재고의 여지가 있음을 보여준다.

Fig. 6은 황등화강암 및 익산화강암에 대하여 온도변화에 따른 탄성계수의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 200°C까지는 두 화강암 모두 온도의 증가에 따라 탄성계수가 선형적으로 감소하는 경향을 보여주고 있는데 그 기울기는 황등화강암이 익산화강암 보다 훨씬 컸다.

$$E=43.16-0.0635T \text{ (GPa)} \quad (4)$$

$$E=21.48-0.016T \text{ (GPa)} \quad (5)$$

식 (4), (5)는 두 화강암의 온도에 따른 탄성계수의 회귀분석 결과이다. 회귀분석 상관계수는 두 화강암 모두 0.80 정도이다.

Table 6은 황등 및 익산화강암의 접선탄성계수와 할선탄성계수를 나타낸 것이다. 두 방법에 의한 탄성계수의 차이는 온도변화에 따라 익산화강암이 황등화강암보다 더 컸다. 이는 익산화강암이 황등화강암의 파괴거동보다 더 비선형적임을 의미한다

5. 결 론

익산 및 황등화강암의 고온하 강도 특성과 온도와 하중증분에 따른 탄성계수의 변화를 실험으로 구한 결과는 다음과 같다.

1) 황등 및 익산화강암은 정도의 차이는 있으나 온도 증가에 따라 파괴강도가 감소하였다.

2) 황등 및 익산화강암의 온도 및 하중증가에 따른 탄성계수변화는 응력수준의 변화에 따라 탄성계수가 일정한 패턴없이 변화하였다. 일반적으로 50% 응력수준에서 접선탄성계수를 대표적인 탄성계수로 취급하고 있는데 고온 뿐만 아니라 실온에서도 값의 변동이 심하여 탄성계수의 채택에 재고의 여지가 있는 것으로 판단된다.

3) 두 화강암 모두 80% 응력수준 이상에서는 탄성계수가 현저히 감소하여 화강암 특유의 경화(hardening)

현상을 보인다.

4) 온도에 의한 탄성계수의 변화를 조사하기 위하여 회귀분석한 결과 두 화강암 모두 선형적으로 감소하는 경향을 보여주고 있으며, 온도의존성은 황등화강암이 익산화강암 보다 컸다.

참 고 문 헌

1. Kunsoo K., 1993, Design, execution and analysis of a large-scale in situ thermomechanical test for siting high level nuclear waste repository, in Hudson J. A. ed, Comprehensive Rock Engineering, Principles, Practice and Projects 3, 881-913.
2. Bauer. S. J. and Handin, 1983, Thermal expansion and cracking of three confined, water-saturated igneous rocks to 800°C, Rock Mech. and Rock Eng. 16, 181-198.
3. Pratt H. R., A. D. Black, W. S. Brown and W. F. Brace, 1972, The effect of specimen size on the mechanical properties of unjointed diorite, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. 9, 513-529.
4. Lau, J.S.O., R. Jackson and B. Gorski, 1991, The effect of temperature and pressure on the mechanical properties of Lac du Bonnet grey granite, Proc. 32nd U.S. Sympo., 313-323.
5. Dmitriyev, A. P., L. S. Kuzyayev, Y. I. Protasov and V. S. Yamshchikov, 1972, Physical properties of rocks at high temperatures, NASA Technical Translation, N72-26286, 1-13.
6. Homand, F. and J. P. Troalen, 1984, Behavior of granites and limestones subjected to slow and homogeneous temperature changes, Eng. Geology 20, 219-233.
7. 이기형, 이형원, 신재섭, 1990, 화강암질 석재의 열과 피 특성연구, 한국자원공학회지 27, 31-42.
8. 이형원, 1993, 암석의 열과피강도 및 변형거동의 온도의존성에 관한 연구, 서울대학교 대학원 박사학위논문, p196.
9. 이희석, 1995, 온도 변화에 따른 화강암, 편마암의 역학적, 수리적특성에 관한 연구, 서울대학교 대학원 석사학위논문, p136.