

열응력이 암석의 역학적 거동과 투수성에 미치는 영향 - I. 역학적 거동

윤용균¹⁾ · 이희근²⁾

The Effect of the Thermal Stress on the Mechanical Behaviour and Permeability of Rocks - I. Mechanical Behaviour

Yong-Kyun Yoon and Hi-Keun Lee

ABSTRACT Pocheon granite specimens were thermally treated with cycles of predetermined temperatures ranging 20°C to 600°C. Characterization of thermally-induced microcracks were carried out using optical microscopy and their effect on the various physical & mechanical properties were studied. Generally, uniaxial compressive strength, Young's modulus, Poisson's ratio, elastic wave velocity and specific gravity were found to decrease with increasing temperature. From 300°C upwards, negative lateral strains were observed, which resulted in negative Poisson's ratio. Dynamic Young's modulus and Poisson's ratio were found to be generally most sensitive indicators to thermal cracking.

1. 서 론

장기간에 걸쳐 고열을 발생하는 열원이 존재하는 경우 주위 암반은 온도장에 노출되어 열응력에 의한 새로운 열균열이 발생하거나 기존균열의 확장이 일어난다. 열응력은 인접한 결정입자의 서로 다른 열팽창도에 의해 발생하며, 열응력이 결정입자의 국부적인 파괴강도를 넘어서면 입자경계 균열(Grain boundary crack)이나 입자내 균열(Intracrystalline crack)이 형성되게 된다.¹⁾ 국내외의 연구결과에 따르면 열균열은 암석의 역학적, 물리적 특성에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 암석의 역학적 거동에 영향을 미치는 주요 인자로 인정되고 있다.¹⁻¹⁰⁾ 지열에너지 회수나 고준위 방사성 폐기물의 심부저장 등에 대한 기술개발에 있어서도 열균열 발생 기구에 대한 이해나 열균열이 암석의 역학적 특성에 미치는 영향을 평가하는 것이 필수적이다.

본 연구에서는 포천화강암에 대한 예열시험편을 제작하여 비중, 유효공극율, 탄성과속도, 단축압축강도, 탄성계수(Young's modulus), 포아송비(Poisson's ratio), 축변형률, 횡변형률 등을 측정하고 열균열의 특성

을 가장 잘 반영하는 물성이 무엇인지를 규명하고자 하였다. 또한, 예열시험편에 대한 현미경관찰을 통하여 온도에 따른 열균열의 발생양상을 정성적으로 평가하고 역학적 특성 변화와의 상관성을 검토하였다.

2. 암석시험편

2.1 암석시료 기재

본 연구에 사용된 포천화강암은 석영, 알칼리 장석, 사장석 등이 주요 광물로 나타나고 흑운모, 견운모 등이 부수광물로 존재하며, 각 구성광물입자는 등립상조직을 보인다. 모드분석(Modal analysis)결과 각 구성광물의 분포는 석영 43.1%, 알칼리 장석 30.4%, 사장석 17.3%, 견운모 4.3%, 흑운모 3.5% 등으로 나타났다. 석영입자의 크기는 일반적으로 2-3 mm로서 타형이고, 입자내 균열과 공극을 가지고 있는 결정도 관찰된다. 또한, 알칼리 장석은 약 2 mm, 사장석은 1-1.5 mm, 흑운

* 1996년 3월 15일 접수

1) 정희원, 세명대학교 자원공학과 조교수

2) 정희원, 서울대학교 공과대학 자원공학과 교수

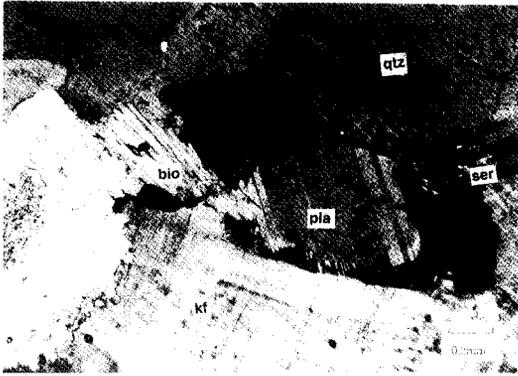


Fig. 1. Microphotograph of Pocheon granite (crossed Nicols). (qtz:Quartz, pla:Plagioclase, bio: Biotite kf:K-feldspar, ser:Sericite)

Table 1. Physical properties of Pocheon granite

Physical properties	Value
Specific gravity	2.61
Effective porosity (%)	0.62
Longitudinal velocity (m/sec)	2990
Shear velocity (m/sec)	1890
Uniaxial compressive strength (MPa)	189
Brazilian tensile strength (MPa)	7.7
Young's modulus (GPa)	50
Poisson's ratio	0.05

모는 0.5-1 mm 크기로 나타난다(Fig. 1 참조).

2.2 시험편 성형

원주형 시험편은 경계석용의 단일 압괴에서 절취한 6개의 암석블럭으로부터 암심채취기(Coring machine)를 사용하여 채취하였다. 암심(Core)의 크기는 BX 로 하였으며, 절에 의한 영향이 같은 방향으로만 나타나게 하기 위하여 암심채취는 각 블럭에서 동일한 방향으로 실시하였다. 단축압축시험편을 제작하기 위하여 암심을 길이가 직경의 2배가 되도록 절단한후, 자동연마기를 사용하여 시험편 양끝의 정형 정밀도가 0.05 mm 이 내가 되도록 성형하였다. 압열인장시험편은 두께와 직경의 비가 1:2가 되도록 절단한후 단축압축시험편과 동일한 방법으로 성형하였다. 신선한 포천화강암의 물성을 얻기위하여 비중, 유효공극율, 단축압축강도, 압열인장강도, 탄성계수, 포아송비 등을 측정하였다. 탄성계수는 단축압축강도의 50% 수준에서 접선 탄성계수로 구하였으며, 포아송비도 단축압축강도의 50% 수준에서 결정하였다. 물성을 측정하기 위하여 6개의 시험편을

사용하였으며, Table 1에는 포천화강암의 물성이 표시되어 있다.

3. 실험방법

3.1 예열처리

성형이 끝난 단축압축시험용 시험편을 전기로(Muffle furnace)에 투입하여 예열시험편(Pre-heated specimen)을 제작하였다. 시험편의 예열은 상온에서 600°C까지 100°C간격으로 하여 각 최고예열온도가 100, 200, 300, 400, 500, 600 (°C)가 되도록 하였다. 각 단계의 최고온도까지 가열된 시험편은 공기중에 바로 노출시키지 않고 전기로내에 그대로 방치하여 상온으로 자연냉각시킨후 사용하였다. 모든 예열시험편에 대한 최고예열온도까지의 가열반복회수(Heating cycle)는 1회로 하였다.¹¹⁾ 시험편의 예열처리시 열충격(Thermal shocking)을 방지하기 위하여 가열속도는 3°C/min 이 되게 하였다.⁹⁾ 또한, 최고예열온도가 시험편내에 균일하게 분포되어 시험편 표면과 내부사이에 온도구배(Temperature gradient)가 형성되지 않도록 하기 위하여 최고온도의 유지시간을 120분으로 하였다.⁶⁾ 예열시험편은 최고예열온도별로 각기 6개씩 제작하였다.

3.2 연마편 제작 및 현미경 관찰

예열온도에 따른 미세균열의 발생양상을 조사하기 위하여 반사현미경을 사용하였다. 현미경관찰에 이용된 연마편(Polished specimen)의 크기는 직경 20 mm, 두께 2 mm의 원판형으로서 예열시험편의 중앙부분에서 절취한 판상압편을 Diamond paste로 연마하여 제작하였다. 연마편은 상온 및 최고예열온도별로 각기 1개씩 제작하였다.

반사현미경을 사용하여 균열길이나 균열두께의 확장정도를 정량적으로 측정하는 것은 매우 어렵지만 예열온도에 따른 균열의 생성정도를 정성적으로 파악할 수 있는 관계로 현미경관찰 결과를 열응력이 암석에 미치는 영향을 특성화하는데 이용할 수 있다.

연마편을 연마하는 경우 각 구성광물은 경도(Hardness)차이로 인해 연마제에 의해 마손되는 정도가 조금씩 달라지게 된다. 이종광물간의 연마도 차이는 반사현미경 관찰시 이종광물간의 고저차(Relief)로 나타나 석영, 장석, 운모류간의 구별을 가능하게 한다. 그

러나, 동종광물간에는 고저차가 아주 미약한 관계로 현미경상에 나타나는 구분선이 결정입자간의 경계인지 아니면 입자내 균열인가를 판별하는 것이 매우 어렵게 된다. 박편시험편의 관찰결과에 따르면 소수의 석영입자를 제외하고는 입자내 균열이 거의 존재하지 않는 것으로 나타난 관계로 상온시험편에 대한 반사현미경 관찰시 동종 결정입자간에 나타나는 구분선은 결정입자간 경계로 판단하였다. 조사배율은 100배로 하였다.

3.3 탄성파속도 측정

탄성파속도는 암석내부에 발생하는 미세균열의 존재에 민감한 변화를 나타낸다. 따라서, 예열시험편에 대한 탄성파속도를 측정함으로써 열응력이 암석의 미세구조에 미치는 영향을 정성적으로 나타낼 수가 있다.¹⁾ 탄성파속도 측정은 초음파펄스법(Ultrasonic pulse method)을 사용하여 종파(P-wave)와 횡파(S-wave)의 속도를 측정하였다. 측정은 단축압축시험에 사용된 상온 및 예열시험편에 대하여 실시하였다. 건조시험편에 대한 측정인 경우 수분이 탄성파속도에 미치는 영향을 제거하기 위하여 각 예열시험편을 전기로에서 상온으로 냉각한후에 곧바로 회수하여 측정을 수행하였다. 또한, 수분이 탄성파속도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 상온 및 예열시험편을 진공상태에서 48시간 물에 침수시켜 완전포화시킨후 탄성파속도 측정을 실시하였다. 탄성파속도 측정에 앞서 건조시험편과 포화시험편에 대한 중량을 측정하여 비중과 유효공극율을 계산하였다.

3.4 단축압축시험

단축압축시험에 사용된 실험장치는 Interlaken 사의 폐회로 자동제어 실험기(Closed-loop servo-controlled machine)로서 압축용량은 4.5 MN이다. 시험편에 작용하는 축하중은 프레임의 상부가압판에 부착된 50 KN 용량의 수압기(Load cell)를 이용해 측정하며, 상부가압판의 이동에 따른 시험편의 축변위 측정은 구동장치에 달린 교류형 LVDT를 이용한다. 시험편의 종변형률은 축방향 신장계(Axial extensometer)를 사용하여 측정하였으며, 횡변형률은 원주방향 신장계(Circumferential extensometer)를 이용하였다. 축방향 신장계는 시험편의 종변형률을 암석표면의 일정 기준길이에 대한 축변위 변화량의 백분율로 표시하며, 원주방향 신장계는 롤러체인의 신장변위로 횡변형률을 나

타낸다. 시험편에 가해지는 하중은 축변위를 피드백신호로 하여 제어하였으며, 축변위를 1.76-1.91 ($\mu\text{m/s}$)범위내에서 조절하여 각 시험편을 기준으로 $20 \times 10^{-6}/\text{s}$ 의 일정 변형률 증가속도(Constant strain rate)가 달성되도록 하였다. 출력신호에 대한 Sampling time은 약 0.47초로 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 반사현미경 관찰

열응력에 의한 열균열의 발생양상을 정성적으로 해석하기 위하여 예열시험편에 대한 반사현미경 관찰을 수행하였다. Fig. 2는 상온 및 200, 400, 600($^{\circ}\text{C}$) 시험편에 대한 사진이다. 상온시험편에 대한 관찰 결과 입자간 경계(Intercrystalline boundary)는 서로 완전히 맞물려 있는 것으로 나타났으며, 입자내 균열은 거의 관찰되지 않았다. 200 $^{\circ}\text{C}$ 시험편의 경우에는 입자간 경계에 부분적으로 입자경계 균열이 발생한 것을 관찰할 수 있으나, 입자내 균열의 발생은 아주 미약한 것으로 나타났다. 400 $^{\circ}\text{C}$ 시험편에서는 대부분의 입자 경계에 균열이 발생되었으며, 기존균열은 확장된 것으로 나타났다. 또한, 입자내 균열의 발생도 빈번한 것으로 나타났다. 600 $^{\circ}\text{C}$ 시험편의 경우에는 경계균열 확장이 400 $^{\circ}\text{C}$ 시험편에 비해 상당히 증가한 것을 알 수 있으며, 입자내 균열의 발생도 아주 현저한 것으로 나타났다.

4.2 역학적 특성

예열온도에 따른 비중 및 유효공극률의 변화양상이 Fig. 3에 표시되어 있다. 그림을 보면 예열온도의 증가에 따라 시험편의 비중은 전반적으로 감소하는 것으로 나타났다. 특히, 400 $^{\circ}\text{C}$ 이후에서는 비중의 감소가 현저한 것으로 나타났으며, 500-600($^{\circ}\text{C}$)에서는 감소추세가 더욱 가속화되었다. 예열온도에 따른 비중감소는 결장입자의 팽창 및 미세균열의 확장, 발달에 의한 잔류열 팽창이 시험편의 체적 증가로 나타나고, 암석내에 포함된 휘발성물질이 고온상태에서 증발함에 따라 중량이 감소하는 것에 의해 발생하는 것으로 생각된다.

유효공극률의 경우에는 200 $^{\circ}\text{C}$ 까지는 공극률이 감소하는 것으로 나타났으나, 예열온도가 300 $^{\circ}\text{C}$ 이상이 되면 증가하는 것으로 나타났다. 특히 500 $^{\circ}\text{C}$ 이후에서의 증가속도는 대단히 현저하여 500 $^{\circ}\text{C}$ 에서의 공극률 증가

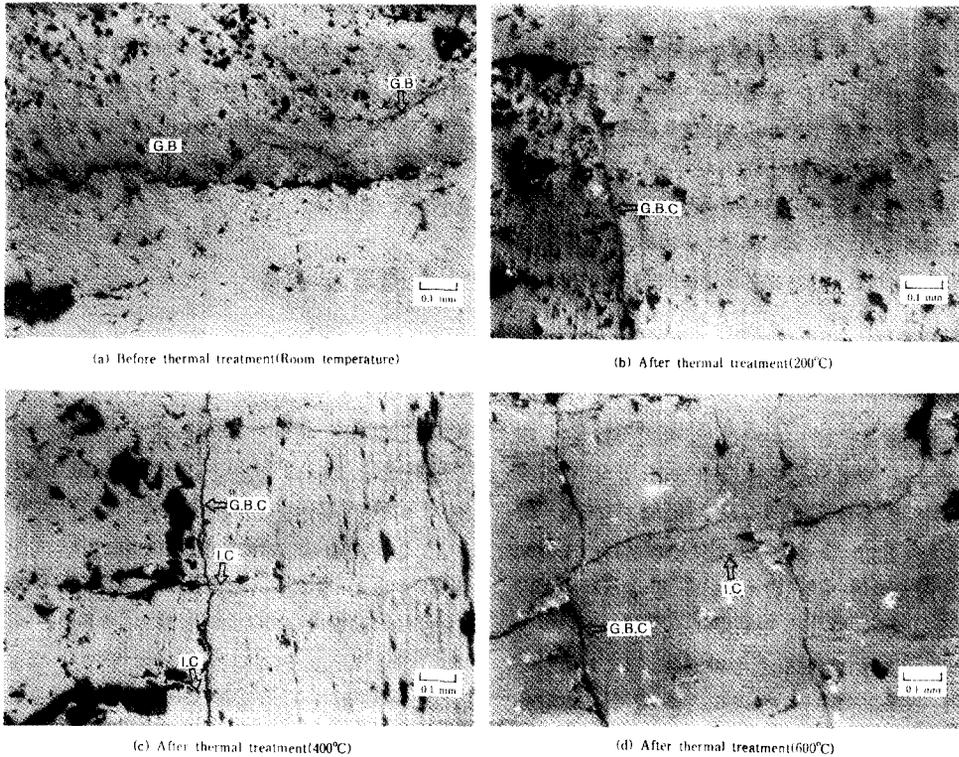


Fig. 2. Microphotographs of Pocheon granite before and after thermal treatment. (G.B: Grain boundary, G.B.C: Grain boundary crack, I.C: Intracrystalline crack)

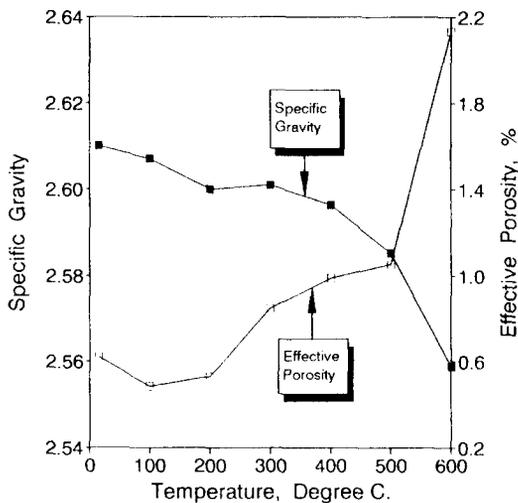


Fig. 3. Specific gravity and effective porosity as a function of maximum thermal cycle temperature.

량이 상온의 1.7배인 것에 비해 600°C에서는 3.4배가 증가하였다. 낮은 예열기간(200°C 이하)에서 유효공극

률이 감소하는 것은 구성광물의 열팽창으로 인해 기존 균열이 폐쇄되어 발생하는 것으로 생각할 수 있다. 200°C 이후에서의 유효공극률 증가는 열파괴에 따른 기존균열의 확장 및 새로운 균열의 형성이 시험편이 상온으로 냉각된후에도 잔류열팽창으로 나타나는 것의 의해 발생된 것으로 생각된다.

Fig. 4에는 예열시험편의 종파속도와 횡파속도가 표시되어 있다. 종파의 변화양상을 보면 100-500(°C)에서는 종파속도가 선형적으로 감소하는 것을 볼 수 있으며, 특히 500°C 이후에서는 감소율이 더욱 증가하는 것으로 나타났다. 500°C 이후에서 종파속도의 감소율이 현저하게 되는 것은 석영의 α - β 상변화(대기압하에서 573°C)에 따른 급격한 열팽창에 의해 미세균열의 발생이 급증하기 때문인 것으로 생각되며 이는 유효공극률이 급격히 증가하는 현상과 일치됨을 알 수 있다. 완전 포화시킨 예열시험편의 종파속도 변화는 건조상태일 경우와 거의 유사한 양상을 보인다. 상온에서 포화시험편과 건조시험편의 종파속도 차는 약 20%가 되지만 600°C에서는 약 50%로 증가하는 것으로 나타났다. 이

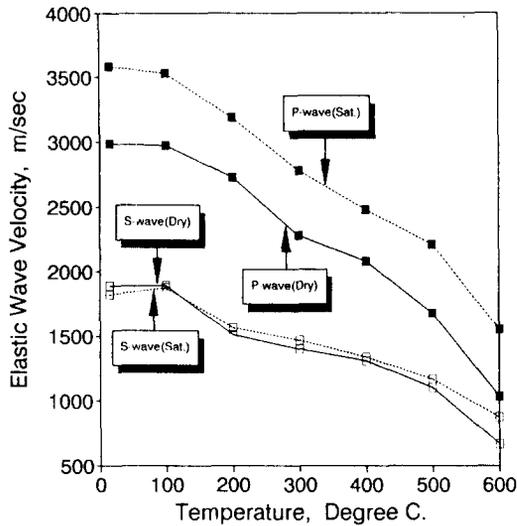


Fig. 4. Variation of elastic wave velocity of oven dried & water-saturated specimens as a function of maximum thermal cycle temperature.

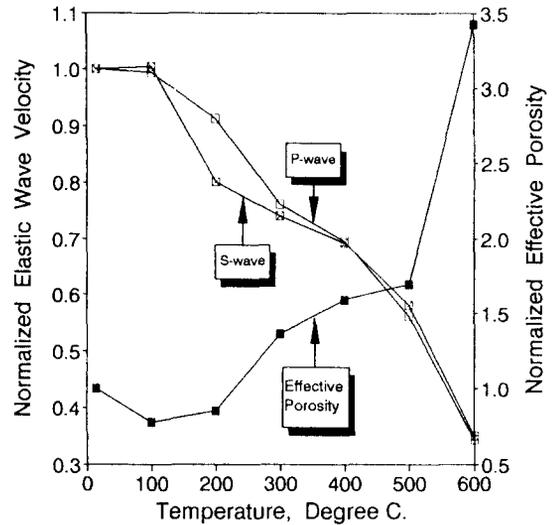


Fig. 5. Normalized elastic wave velocity and effective porosity vs maximum temperature attained during a thermal cycle.

는 상온시험편인 경우 시험편내에 존재하는 미세균열의 수가 미소하여 수분의 영향이 크지 않은 반면에 예열시험편인 경우 온도가 증가함에 따라 미세균열의 밀도가 증가하게 되고 미세균열에 포화된 수분이 종파가 통과하기 위한 매질로서의 역할을 상대적으로 많이하기 때문인 것으로 생각된다.

온도에 따른 횡파의 변화양상은 종파의 경우와 거의 유사하였으나, 포화시험편과 건조시험편의 속도차이는 종파만큼 크지 않은 것으로 나타났다. 횡파는 고체매질을 통해서만 전파하고 액체에서는 반사하기 때문에 포화시험편인 경우 건조시험편 보다 횡파속도가 낮아지거나 일정할 것으로 예상되지만 본 실험에서의 측정결과 수분의 존재가 횡파속도를 증가시키는 것으로 나타났다. 암석의 탄성파속도에 영향을 미치는 요인으로는 광물결정의 구조적특성뿐만 아니라 암석의 체적탄성률(Bulk modulus)도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.¹²⁾ 포화된 암석내에 낮은 응력수준의 초음파펄스를 가하면 공극이나 미세균열내에 포화된 상태로 존재하는 수분은 탄성적인 거동을 보여 암석의 체적탄성율을 증가시키게 되고, 이에따라 포화시험편의 횡파속도가 증가한 것으로 생각된다.

Fig. 5)에는 온도에 따른 탄성파속도와 유효공극률간의 상호연관성을 조사하기 위하여 건조시험편에 대한 탄성파속도와 유효공극률을 정규화시켜 표시하였다.

정규화는 상온에서의 물성치를 기준치로 하여 예열온도별 물성치를 표현하였다(예를 들면, V/V_0 ; V =예열시험편의 탄성파 속도, V_0 =상온시험편의 탄성파속도). 그림을 보면 종파와 횡파의 감소양상은 거의 일치하는 것으로 나타나 열응력에 의한 암석구조의 변화가 종파와 횡파에 동일하게 작용하는 것을 알 수 있다. 탄성파속도와 유효공극률은 각 온도구간별로 유사한 경향을 보여주고 있으나, 유효공극률이 온도변화에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 암석을 일정온도 이상으로 가열시킨후 상온으로 냉각시키면 열균열 발생에 따른 잔류열팽창으로 인해 암석에 영구변형이 존재하게 된다. 탄성파속도 및 유효공극률이 열균열의 발달에 민감하게 변한다는 점을 고려하면 잔류열팽창이 발생하는 임계열과 괴온도(Critical threshold temperature)가 포천화강암의 경우에는 200°C 부근인 것으로 예상할 수 있다.

최고예열온도에 따른 하중-축변형률, 횡변형률, 체적변형률(Volumetric strain)곡선이 Fig. 6-8에 표시되어 있다. 그림에 표시된 그래프는 각 예열온도에서 수행한 단축압축시험 결과중에서 1개씩을 택하여 표시한 것이며 그래프에 표기된 숫자는 상온(25°C) 및 각 예열온도를 나타낸다. 포천화강암은 신선암의 취성도가 상당히 높은 암석으로서 축하중-축변형률 곡선을 보면 400°C 이하에서는 Class I 거동을 보이나, 500°C 이상에서는 Class II 거동으로의 전이를 보인다.¹³⁾ 초기하중단계에

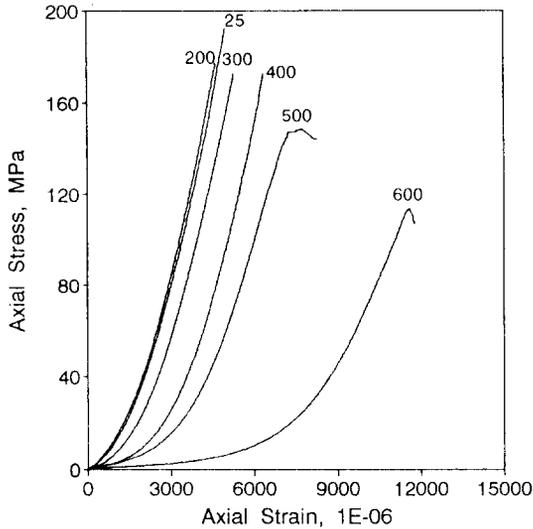


Fig. 6. Axial stress-axial strain curves at different maximum thermal cycle temperature.

시의 축변형률은 암석내에 존재하는 미세균열이나 공극이 폐쇄됨으로 인해 발생한다는 점을 고려하면 예열 온도 증가에 따라 초기 축변형률이 증가하는 것은 열응력에 의한 미세균열 발생 밀도가 증가한다는 것을 뜻한다. 200°C의 축변형률이 상온의 경우보다 작게 나온 것은 200°C에서의 유효공극률이 상온의 경우보다 작은 것과 연관이 있는 것으로 생각된다. 600°C에서 초기축변형률의 증가가 현저한 것은 석영의 상변화에 따른 미세균열의 집중적인 발생에 기인하는 것으로 생각할 수 있다.

축응력-횡변형률 곡선을 보면 상온 및 200°C 시험편을 제외한 나머지 예열시험편들은 비탄성적인 거동을 보임을 알 수 있다. 200°C 시험편의 횡변형률은 상온시험편의 경우보다 작은 것으로 나타났으나 변형거동은 동일한 형태를 나타내었다. Fig. 7에서 특기할 사항은 300°C 이상의 예열시험편에 대한 변형거동으로서 초기 하중단계에서 음의 횡변형률(즉, 축하중이 가해짐에 따라 시험편의 직경이 감소함)을 보이다 일정한 응력수준을 넘어서면 양의 횡변형률을 나타내었다. 음의 횡변형률에서 양의 횡변형률로 전이되는 응력수준은 각 예열 시험편에 대한 파괴강도를 기준으로 300°C 시험편은 26%, 400°C 시험편은 29%, 500°C 시험편은 49%, 600°C 시험편은 88%로 예열온도가 증가함에 따라 음의 횡변형률 발생 비율이 증가하는 것으로 나타났다. 음의 횡변형률은 예열온도의 증가에 따라 증가하는 것

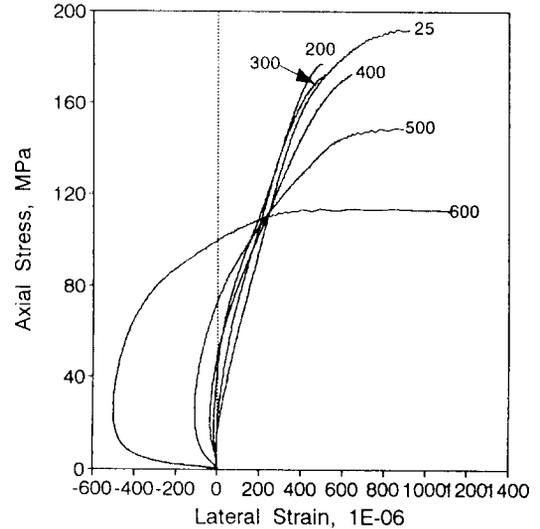


Fig. 7. Axial stress-lateral strain curves at different maximum thermal cycle temperature.

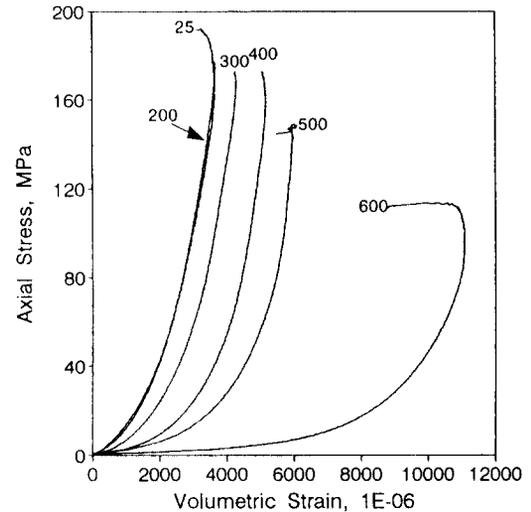


Fig. 8. Axial stress-volumetric strain curves at different maximum thermal cycle temperature.

으로 나타났기 때문에 시험편의 성형잘못이나 측정 오류는 아닐 것으로 생각되며, 음의 횡변형률이 발생하는 원인은 열응력에 의한 열균열의 생성 및 기존균열의 확장에 있다고 생각된다. 예열시험편의 현미경 관찰에 의하면 200°C에서 경계균열이 발생하기 시작하여 500-600(°C)에서는 대부분의 입자경계에 균열이 발생한 것으로 나타났다. 열균열이 발생한 시험편을 상온으로 냉각시키면 열팽창된 입자들은 원래상태로 수축하려는

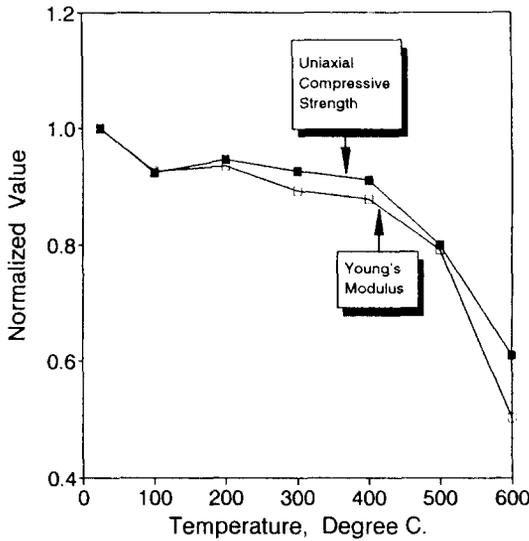


Fig. 9. Normalized uniaxial compressive strength and Young's modulus vs maximum thermal cycle temperature.

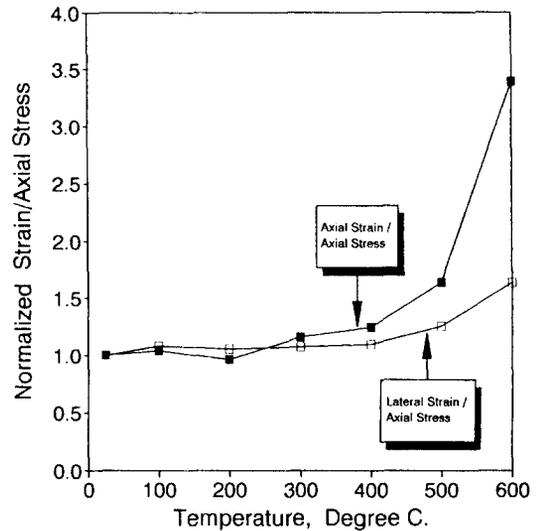


Fig. 10. Normalized axial strain/axial stress and lateral strain/axial stress vs maximum thermal cycle temperature.

경향을 나타낼 것이다. 이때 입자경계 전체에 걸쳐 균열이 발생한 경우에는 원래상태로의 회복이 자유롭게 일어날 수 있는 반면에 경계의 일부분이 다른 입자와 연결되어 있는 경우에는 회복에 방해가 받게 되어 잔류압축응력(Residual compressive stress)이 형성될 것으로 생각된다.³⁾ 열균열이 많이 형성된 시험편일수록 잔류응력의 크기가 증대하여 음의 횡변형률의 발생량이 커질 것으로 예상되며 이는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 600°C 시험편에서 가장 큰 음의 횡변형률이 나타난 것으로 확인할 수 있다.

Fig. 8의 체적변형률 곡선은 축변형률 및 횡변형률 곡선과 유사한 경향을 보이나 초기하중 단계에서 시험편내부의 미세균열이 폐쇄됨으로 인해 발생하는 비선형구간이 예열온도에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 비선형성이 증가함에 따라 체적팽창 개시점을 구분하는 것이 어려워지는 것으로 나타났다.

Fig. 9에는 예열온도별 단축압축강도와 탄성계수가 정규화 형태로 표시되어 있다. 단축압축강도의 경우에 100-400(°C) 구간에서는 강도의 변화가 크지 않은 반면에 400°C 이후에서는 상당한 감소가 발생하였다. 탄성계수는 400°C에 이르기까지 점진적으로 감소하다가 400-600(°C) 구간에서는 급격히 감소하였다. 400-600(°C) 구간에서 강도 및 탄성계수의 감소가 현저한 것은 400°C 이후부터 열균열의 생성 및 기존균열의 확

대가 활발히 일어난 것과 일치한다. 탄성계수는 단축압축강도보다 열균열에 좀더 민감한 것으로 나타났다.

Fig. 10은 파괴응력에서의 축변형률과 횡변형률을 파괴강도로 나눈후 정규화시킨 것이다. 축변형률의 경우에는 400°C까지 점진적으로 증가하다가 400°C 이후에서 급격히 증가하는 것으로 나타나 단축압축강도 및 탄성계수의 변화와 유사한 양상을 나타내었다. 횡변형률의 경우에는 400°C까지 거의 변화가 없다 400°C 이후에서 증가하는 것으로 나타났으나 축변형률에 비하면 변화량이 상당히 작은 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 예열온도에 따른 종파속도, 정탄성계수(Static Young's modulus), 동탄성계수(Dynamic Young's modulus), 포아송비를 정규화시켜 표시한 것이다. 동탄성계수는 탄성파속도를 이용하여 구하기 때문에 종파의 변화양상과 동일한 거동을 보이지만 예열온도에 따른 감소는 종파의 경우보다 매우 큰 것으로 나타났다. 이러한 차이는 예열온도가 증가함에 따라 종파와 횡파 속도차의 절대치가 감소하고 단위중량이 작아지는데 기인한다. 동탄성계수는 정탄성계수에 비해 예열에 따른 감소율이 상당히 큰 것으로 나타났다. 따라서, 열균열이 발생한 암반구조물은 초기지압과 같은 정적인 하중에 비해 지진과 같은 동하중에 상당한 취약성을 보일 것으로 예상할 수 있다. 포아송비의 감소가 가장 크게 나타난 것은 음의 횡변형률 발생과 관련이

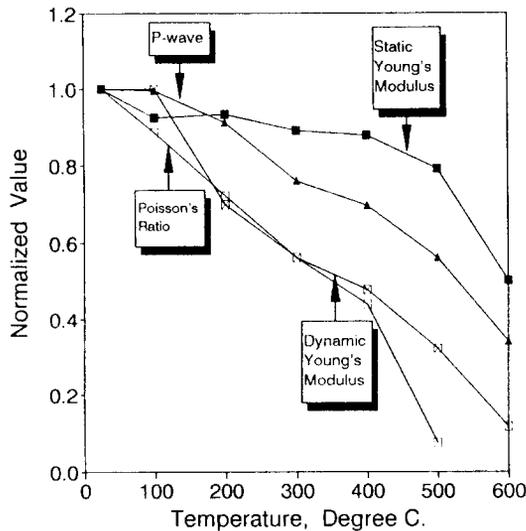


Fig. 11. Normalized P-wave velocity, static Young's modulus, Poisson's ratio and dynamic Young's modulus vs maximum thermal cycle temperature.

있다. 이상의 결과로 볼때 열균열의 발생에 가장 민감한 반응을 보이는 물성은 포아송비와 동탄성계수임을 알 수 있다.

5. 결 론

암석에 열을 가하면 결정입자의 열팽창이 발생한다. 열팽창은 열응력을 유도하여 암석내부에 존재하는 기존균열을 확장시키고 새로운 열균열의 발달을 촉진시켜, 암석을 상온으로 냉각시켜도 잔류열팽창은 존재하게 된다. 잔류열팽창량은 예열온도에 따라 달라지며, 암석의 역학적 성질도 잔류열팽창량에 따라 변화하게 된다.

본실험으로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 예열시험편에 대한 현미경관찰결과 400-600(°C)에서는 대부분의 입자경계에 균열이 발생하였으며 입자내 균열의 발생도 관찰되었다.
- 2) 예열온도가 증가함에 따라 전반적으로 비중은 감소하고 유효공극률은 증가하는 것으로 나타났다. 특히 400°C 이후에서는 변화가 현저하였고, 500-600(°C)에서는 변화정도가 가속화되었다.
- 3) 탄성과속도(종파 및 횡파) 변화는 100°C 이하에서는 미미하지만 100°C 이후부터는 예열온도의 증가에

따라 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다. 특히, 500-600(°C)구간에서의 감소가 큰 것으로 나타났다. 또한, 포화시험편의 종파 및 횡파속도는 건조시험편에 비해 큰 것으로 나타났으며, 예열온도가 증가함에 따라 수분의 영향도 더욱 증가하였다.

4) 유효공극률과 탄성과속도는 온도의 증가에 따라 비례적인 역관계를 보였지만 유효공극률이 열균열에 더욱 민감하게 영향을 받는 것으로 나타났다. 유효공극률과 탄성과속도의 변화양상으로부터 잔류열팽창이 발생하는 입체열과피온도가 포천화강암의 경우에는 200°C 부근인 것으로 예상된다.

5) 예열온도에 따른 횡변형률의 변화는 일반적인 암석의 거동과는 다른 양상을 보여주었다. 200°C까지는 탄성적인 거동을 나타냈지만 300°C 이후에서는 초기하중단계에서 음의 횡변형률이 발생하는 비탄성적인 거동을 보여주었다. 음의 횡변형률은 예열온도가 증가함에 따라 커지는 것으로 나타났으며, 특히 500°C 이후에서 현저한 것으로 나타났다. 음의 횡변형률의 존재는 입자경계 균열의 발생과 관련이 있는 것으로 생각된다.

6) 예열온도가 증가함에 따라 단축압축강도와 정탄성계수는 비슷한 양상으로 감소하였지만 정탄성계수가 좀더 민감하게 영향을 받는 것으로 나타났다.

7) 동탄성계수는 정탄성계수에 비해 예열에 따른 감소가 현저한 것으로 나타나 암반구조물에 열균열이 발생할 경우 동하중에 취약할 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구된 것입니다. 연구비를 지원해 주신 재단에 감사를 드립니다. 또한, 실험장비의 사용을 허락해주신 한국자원연구소 자원개발부 암반공학연구 그룹에 심심한 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

1. Bauer, S.J and Johnson, B., 1979, "Effects of slow uniform heating on the physical properties of the Westerly and Charcoal granites", Proc. 20th Symp. on Rock Mechanics, pp. 7-16.
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., V. 20, No. 1, pp. 3-10.
3. Homand-Etienne, F. and Houpert, R., 1989, "Thermally induced microcracking in granites : characterization and analysis", Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr., V. 26, No. 2, pp. 125-134.
 4. Page, L. and Heard, H.C., 1981, "Elastic moduli, thermal expansion, and inferred permeability of Climax quartz monzonite and Sudbury gabbro to 550°C and 55MPa", Proc. 22nd Symp. on Rock Mechanics, pp. 103-110.
 5. Hughes, D.S. and Maurette, C., 1956, "Variation of elastic wave velocities in granites with pressure and temperature", Geophysics, V. 21, No.2, pp. 277-284.
 6. 이기형, 이형원, 신재섭, 1990, "화강암질 석재의 열 파괴 특성 연구", 한국자원공학회지, V.27, No.1, pp. 31-42.
 7. 여인옥, 전용원, 1992, "화강암의 열팽창 특성에 관한 연구", 한국자원공학회지, V.29, No.5, pp. 263-275.
 8. 정재훈, 1992, "고온하에서의 섬록암의 역학적 거동에 관한 연구", 서울대학교 공학석사논문.
 9. 이형원, 1993, "암석의 열파괴와 강도 및 변형거동의 온도 의존성에 관한 연구", 서울대학교 공학박사 학위논문.
 10. 이희석, 1995, "온도 변화에 따른 화강암, 편마암의 역학적, 수리적 특성에 관한 연구", 서울대학교 공학 석사논문.
 11. Richter, D. and Simmons, G., 1974, "Thermal expansion behaviour of igneous rocks", Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr., V. 11, p. 403-411
 12. 신희순, 1985, "암석의 탄성파전파속도 및 동적특성에 관한 연구", 서울대학교 공학박사 학위논문.
 13. Okubo, S., Nishimatsu, Y. and He, C., 1990, "Loading rate dependence of Class II rock behaviour in uniaxial and triaxial compression tests-An application of a proposed new control method", Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr., V. 27, No. 6, p. 559-562