

## 열균열이 화강암의 변형거동에 미치는 영향

윤 용 균<sup>1)</sup>

### Effects of the Thermal Cracking on the Deformation Behaviour of Granites

Yong-Kyun Yoon

**ABSTRACT** Pocheon, Keochang and Sangju granite samples of different granularity and mineralogical composition were thermally treated at pre-determined temperature of 600°C. Thermally-induced microcracks were characterized using an optical microscopy and their effects on the deformation behavior of thermally cycled samples were studied performing compressive mechanical tests. Optical observations shows that by 600°C nearly all crystal boundaries open and the new intracrystalline cracks form in the more grains. The intracrystalline cracks are most pronounced at thermally treated Pocheon and Keochang granite samples. Results from mechanical tests represents negative lateral strains, which give negative Poisson's ratios. It is the most probable that negative lateral strains are produced by residual stresses induced during cooling.

**Key words :** thermally-induced microcracks, thermally cycled samples, intracrystalline cracks, negative Poisson's ratios

**초 록** 결정입자 크기와 광물구성 분포가 큰 포천화강암, 거창화강암, 상주화강암을 실험 대상으로 선택하여 600°C 까지 예열처리하였다. 예열에 따른 열균열의 발생 정도를 조사하기 위하여 연마편에 대한 반사현미경 관찰을 실시하였으며, 예열시험편의 변형거동에 열균열이 미치는 영향을 평가하기 위하여 단축압축시험을 수행하였다. 현미경 관찰 결과에 의하면 암종에 관계없이 600°C 예열시험편의 결정 경계부에서는 대부분 경계균열이 발생하였으며, 많은 결정입자에서 입자 내 균열도 관찰되었다. 특히, 입자 내 균열은 거창화강암과 포천화강암에서 현저히 많은 것으로 나타났다. 예열시험편에 대한 단축압축시험 결과 일정한 응력수준까지 음의 횡변형율이 발생하는 비정상적인 변형거동이 나타났으며 이로 인해 음의 포아송비가 발생하였다. 음의 횡변형율은 예열시험편의 냉각과정동안 결정입자에 유발된 잔류응력에 의해 발생하는 것으로 생각된다.

**핵심어 :** 열균열, 예열시험편, 입자내 균열, 음의 포아송비

### 1. 서 론

암석에 열을 가하는 경우 구성 광물 입자의 열팽창에 따른 열응력에 의해 결정 입자 경계나 결정 입자내에 열균열이 발생하게 된다.<sup>1-5)</sup> 기존 연구<sup>6-12)</sup>에 따르면 열균열은 기존 균열과 더불어 암석의 강도, 탄성정수, 수리적 특성 뿐만 아니라 변형거동에도 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있기 때문에, 방사성 폐기물 처분장이나 지열회수시설과 같이 인위적인 온도변화를 받는 구조물을 설계하는 경우 열균열이 암석의 변형거동에 미치는 영향을 평가하는 것이 중요하다.

이형원 등<sup>6)</sup>과 장명환 등<sup>13)</sup>은 고온 하의 단축압축시험

을 통하여 온도가 증가함에 따라 암석의 비탄성 영역이 증가함을 보였다. 또한, 윤용균 등<sup>7)</sup>과 Homand-Etienne 등<sup>11)</sup>은 300°C 이상으로 예열처리된 화강암 시험편에 대한 단축압축시험을 통하여 일정한 응력수준까지 음의 횡변형율이 발생하는 비정상적인 변형거동을 관찰하였으나, 한 종류의 화강암에 대해 실험을 실시한 관계로 어떠한 요인이 음의 횡변형율을 발생에 지배적인 영향을 미치는가를 규명하지 못하였다.

본 연구에서는 광물 구성 분포와 입자 크기가 다른 포천화강암, 상주화강암, 거창화강암을 실험대상으로

1) 정희원, 세명대학교 자원환경공학과

선택하였으며, 열균열이 암석의 변형거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 각 암석을 600°C 까지 예열처리한 후 반사현미경 관찰과 단축압축시험을 수행하였다.

## 2. 암석 시험편

### 2.1 암종

포천화강암은 세립 또는 중립질로서 주요 구성 광물은 석영, K-장석, 사장석 등이고, 흑운모가 소량으로 관찰된다. 흑운모에는 저어콘, 불투명 광물 등이 포획되어 있기도 하며, 일부 K-장석류는 미약한 고령토화 작용을 받은 것으로 관찰된다. 석영입자의 크기는 0.35~1.1(mm) 이고, K-장석은 0.45~1.35(mm), 사장석은 0.25~1.0(mm) 크기로 나타난다.

상주화강암은 중립 내지 조립질로서 석영, K-장석, 사장석 등이 주요 구성 광물이고, 흑운모, 불투명 광물 등이 소량 수반된다. 일부 K-장석내에는 석영이 타형 충전된 것이 보이며, 흑운모 내에는 불투명 광물이 포획되어 있기도 하다. 석영입자의 크기는 0.9~4.7(mm) 이고, 사장석은 0.6~3.5(mm), K-장석은 0.35~4(mm) 크기로 나타난다.

거창화강암은 중립 내지 조립질로서 석영, K-장석, 사장석 등이 주요 구성 광물이고, 흑운모, 백운모, 녹립석 등이 부분 광물로서 소량 존재한다. 석영입자 내에는 미세균열이 존재하고, K-장석과 사장석 중에는 고령토화된 것이 관찰된다. 석영입자의 크기는 1.4~4(mm) 이고, 사장석은 2.3 mm, K-장석은 1.6 mm, 흑운모는 1 mm 크기로 나타난다. Table 1에는 각 암석시료에 대한 모드분석 결과가 표시되어 있다.

### 2.2 시험편 제작

Table 1. Mineralogical composition of rock samples

Minerals	Mineralogical composition (Vol. %)		
	Pocheon granite	Sangju granite	Keochang granite
Quartz	28	34	28
K-feldspar	42	45	30
Plagioclase	26	17	34
Biotite	4	3	4
Muscovite	-	-	2
Epidote	-	-	2
Opaque mineral	-	1	-

Table 2. Physical & mechanical properties of samples

Properties	Pocheon granite	Sangju granite	Keochang granite
Specific gravity	2.60±0.00	2.55±0.00	2.63±0.00
Effective porosity(%)	0.69±0.02	1.96±0.23	0.68±0.03
P-wave velocity (m/s)	3010±60	3490±90	4010±90
S-wave elocity(m/s)	1820±10	2110±70	2260±240
Uniaxial compressive strength(MPa)	173±5	155±10	155±14
Young's modulus(GPa)	48.1±4.2	59.2±11.4	62.2±7.29
Poisson's ratio	0.202±0.11	0.144±0.06	0.167±0.07

본 연구에 사용된 3종의 시험편을 각 암종에 따른 암석블럭으로부터 NX 암심채취기를 사용하여 채취하였다. 시험편 제작시 이방성이 미치는 영향을 동일하게 하기 위하여 암심 채취는 각 암석블럭으로부터 같은 방향으로 실시하였다. 단축압축시험편을 제작하기 위하여 길이가 직경의 2배가 되도록 암심을 절단한 후, 시험편 연마기를 사용하여 시험편 양끝의 정형 정밀도가 ±0.05 mm 이내가 되도록 성형하였다.

본 연구에 사용된 3종의 무결암에 대한 비중, 유효공극율, 탄성파속도, 단축압축강도, 영율, 포아송비 등을 결정하였다. 영율은 단축압축강도의 50% 수준에서 접선 탄성계수로 결정하였고, 탄성파속도는 탄성과 펄스법(Ultrasonic pulse method)을 사용하여 측정하였다. Table 2에는 각 암종에 대한 물성이 표시되어 있다. 각 물성치는 4~7회 실험한 결과를 평균한 것이다.

반사현미경 관찰을 하기 위하여 각 암종에 따라 직경 25 mm, 두께 6 mm의 연마편 2개씩을 제작하였다. 연마편은 시험편의 중앙 부분에서 절취한 판상 암편을 원판형으로 성형한 후 다이아몬드 연마제(Diamond paste)로 연마하여 제작하였다.

## 3. 실험 절차

기존의 연구 결과<sup>2,11)</sup>에 의하면 화강암을 600°C 까지 가열하는 경우 거의 모든 결정 입자의 경계에서 경계균열이 발생하는 것으로 나타났기 때문에, 본 연구에서는 암석에 열균열을 발생시키기 위한 최고 예열 온도를 600°C로 하였다. 예열 시 시험편에 열충격이 발생하는 것을 방지하기 위하여 승온 속도는 2°C/min이 되도록

하였으며, 최고 예열 온도가 시험편내에 일정하게 분포 되도록 하기 위하여 최고 예열 온도에서의 유지 시간을 180분으로 하였다.<sup>4,5)</sup> 시험편의 냉각은 400°C까지는 4°C/min의 냉각 속도를 유지하였고, 400°C 이하에서는 전기로의 전원을 끈 후 시험편을 전기로에 그대로 방치하여 상온으로 냉각되도록 하였다. 단축압축시험용 예열시험편은 각 압중별로 4~7개를 예열처리 하였으며, 연마편은 압중별로 1개씩을 예열처리 하였다.

상온 및 예열시험편에 대한 단축압축시험은 일본 Shimadzu 사의 200톤 만능재료시험기를 이용하여 실시하였다. 변형율은 게이지 길이(Gauge length)가 5 mm 인 십자형 스트레인 게이지를 시험편 중앙에 부착하여 측정하였으며, 스트레인 게이지로부터 나온 신호는 A/D 컨버터가 내장된 미국 Instrument Division 사의 System 5000 변형율 측정장치를 통하여 디지털 신호로 전환한 후 컴퓨터에 저장하였다. 출력신호에 대한 Sampling time은 0.5초로 하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 반사현미경 관찰

열균열의 발생 정도를 조사하기 위하여 예열시험편에 대한 반사현미경 관찰을 수행하였으며, 비교를 위하여 상온시험편에 대한 관찰도 병행하였다. Fig. 1은 포천화강암의 상온시험편과 600°C 예열시험편에 대한 관찰 사진이고, Fig. 2와 Fig. 3은 각기 상주화강암과 거창화강암에 대한 관찰 사진이다. 조사 배율은 100배로 하였다.

포천화강암의 상온시험편에 대한 관찰 결과 결정 경계부에는 Reaction rim (광물과 광물경계에 떠상으로 존재하는 주변대로서 다른 광물로 구성되어 있다)이 많이 발달되어 있는 것으로 나타났다. 결정내와 Reaction rim에서는 다수의 공극이 관찰되었으며, 입자내 균열도 존재한다. 예열시험편의 경우에는 대부분의 경계에 새로운 열균열이 발생된 것이 관찰되었으며, Reaction rim이 존재하는 경계에서는 균열의 폭도 상당히 큰 것으로 나타났다. 입자내 균열이 발생함으로 인해 결정입자가 다수의 소부분으로 분리된 것으로 관찰되었으며, 결정입자내 공극의 발생도 증가하였다.

상주화강암의 상온시험편에 대한 관찰 결과 결정과 결정간의 경계는 서로 맞물려 있으나 경계균열도 관찰되며, 경계부와 결정입자 내에는 공극이 소량 존재하는



(a) Before thermal treatment(Room temperature)

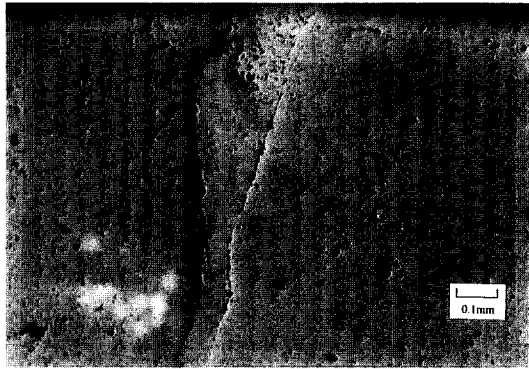


(b) After thermal treatment(600°C)

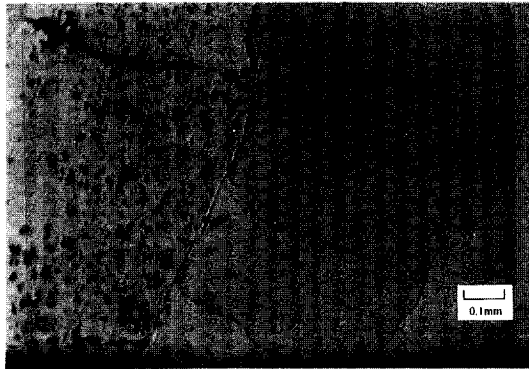
Fig. 1. Microphotographs of Pocheon granite before and after thermal treatment

것으로 나타났다. 육안 관찰에 의하면 상온시험편의 여러 곳에 다양한 크기의 기공이 존재하는 것으로 나타났는데, 상주화강암의 광물조직이 치밀함에도 불구하고 유효공극율이 큰 이유는 이러한 기공 때문인 것으로 생각된다. 예열시험편에 대한 관찰 결과 대부분의 경계에서는 경계균열이 발생한 것으로 나타났으나, 균열의 폭은 작은 것으로 관찰되었다. 또한, 입자내 균열도 발생한 것으로 조사되었으나, 주로 장식류에 집중되어 나타났다.

거창화강암의 상온시험편에 대한 관찰 결과 결정 경계에서 Reaction rim이 존재하는 것으로 나타났으나, 포천화강암에 비해서는 발생 정도가 작은 편이었다. 예열시험편의 경우에는 다른 암석과 마찬가지로 대부분의 경계에 열균열이 발생한 것으로 나타났으며, Reaction rim이 존재하는 경계에서는 포천화강암에서와 같이 균열의 폭이 큰 것으로 관찰되었다. 입자내 균열은 다른 암석에 비해 많이 발생하였으나 포천화강암에서와 같이



(a) Before thermal treatment(Room temperature)



(b) After thermal treatment(600°C)

Fig. 2. Microphotographs of Sangju granite before and after thermal treatment

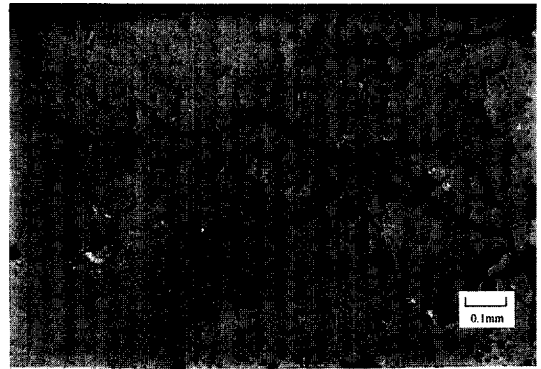
입자 내 균열에 의해 결정입자가 완전히 분리된 상태는 아닌 것으로 조사되었으며, 대부분의 결정입자 내에 공극 발생이 증가한 것으로 나타났다.

4.2 온도에 따른 물성 변화

600°C 까지 예열처리한 각 암석에 대한 물성치가 Table 3에 표시되어 있으며, 열균열이 각 암석의 물성 변화에 미치는 영향을 알아보기 위하여 상온 시험편의



(a) Before thermal treatment(Room temperature)



(b) After thermal treatment(600°C)

Fig. 3. Microphotographs of Keochang granite before and after thermal treatment

물성치를 기준으로하여 600°C 시험편의 물성치를 정규화시켜 나타내었다. 포천화강암과 거창화강암의 600°C 예열시험편에 대한 포아송비는 음의 값이 나왔지만 정규화 값은 절대값으로 표시하였다.

4.1 절의 반사현미경 관찰과 화강암에 대한 다른 연구 결과<sup>2,11)</sup>에서 보는 바와 같이 예열온도가 α-석영에서 β-석영으로 전이하는 573°C를 넘어서면 모든 결정입자의 경계에 단속적인 경계균열이 발생하고 결정입

Table 3. Physical & mechanical properties of samples thermally cycled to 600°C

Properties	Pocheon granite	Normalized value	Sangju granite	Normalized value	Keochang granite	Normalized value
Specific gravity	2.55±0.01	0.981	2.48±0.00	0.973	2.58±0.00	0.981
Effective porosity(%)	2.29±0.02	3.319	3.68±0.14	1.878	2.55±0.02	3.750
P-wave velocity(m/s)	1090±20	0.362	850±30	0.244	1190±10	0.297
S-wave velocity(m/s)	770±20	0.423	630±20	0.299	910±20	0.403
Uniaxial compressive strength(MPa)	64±6	0.370	65±12	0.419	71±4	0.458
Young's modulus(GPa)	19.7±1.4	0.410	15.6±4.8	0.264	20.5±7.6	0.330
Poisson's ratio	-0.118±0.06	0.584	0.059±0.03	0.410	-0.100±0.07	0.599

자내 균열의 발생도 증가하게 된다. 따라서, 열균열 발생 정도를 정량적으로 나타내주는 유효공극율의 변화를 조사하면 예열에 따른 열팽창이 어떤 암석에 가장 많은 영향을 미치는가를 추정할 수 있다. 포천화강암의 경우 상온시험편에 비해 600°C 예열시험편의 유효공극율은 약 3.3배 증가한 것으로 나타났으며, 거창화강암의 경우에는 약 3.8배, 상주화강암의 경우에는 약 1.9배 증가한 것으로 측정되었다. 상주화강암의 경우에는 구성 광물입자의 크기가 다른 암석에 비해 크고 석영의 함유량이 많음에도 불구하고 예열시험편에 대한 유효공극율의 증가량은 거창화강암과 포천화강암에 비해 작은 것으로 나타났는데, 이는 상온시험편의 유효공극율 크기와 관계가 있는 것으로 생각된다. 공극율이 큰 경우 암석의 선열팽창계수는 감소하기 때문에 상주화강암의 경우에도 상온시험편의 공극율이 다른 암석에 비해 상당히 큰 관계로 예열에 따른 열팽창 효과가 작게 나타난 것으로 생각할 수 있다.

탄성파속도는 암석내부에 존재하는 미세균열의 발달 정도에 따라 변하기 때문에, 예열시험편에 대한 탄성파속도를 측정함으로써 열응력에 의한 기존균열의 확장 및 새로운 열균열의 발생 정도를 간접적으로 조사할 수 있다. 포천화강암의 경우 예열시험편의 종파속도가 상온시험편의 36% 수준으로 감소하였으며, 상주화강암의 경우에는 24%, 거창화강암의 경우에는 30%로 감소하였다. 상주화강암의 종파속도 변화량이 큰 이유는 유효공극율이 절대적으로 크다는 것에 기인한다. 포천화강암, 상주화강암, 거창화강암 상온시험편에 대한 종파속도/횡파속도의 비율은 각기 1.654, 1.654, 1.774가 되고, 예열시험편의 경우에는 1.416, 1.349, 1.308로 감소하는 것으로 나타나 종파속도/횡파속도 비율도 열균열의 영향을 반영하는 것으로 나타났다. 포천화강암 예열시험편의 종파속도/횡파속도 비율은 상온시험편의 0.856배, 상주화강암의 경우에는 0.816배, 거창화강암의 경우에는 0.737배로 나타나 거창화강암의 경우가 감소폭이 제일 큰 것으로 측정되었다. 이러한 사실로부터 각 암석의 탄성파속도 변화량도 유효공극율의 변화량과 유사한 경향을 나타내어 열균열의 발생 정도가 거창화강암에서 가장 크다고 생각할 수 있다.

### 4.3 변형 거동

상온시험편의 변형율을 측정하기 위하여 시험편의 중앙에 1개의 십자형 스트레인게이지를 부착하여 실험

을 실시하였으며, 예열시험편의 경우에는 재하 과정 중에 편심을 받는 것을 보정하기 위하여 3개의 십자형 스트레인 게이지를 120° 간격으로 부착하여 실험을 수행하였다.

Fig. 4에는 상온시험편의 응력-축변형을 곡선이 표시되어 있으며, Fig. 5에는 응력-횡변형을 곡선이, Fig. 6에는 응력-체적변형을 곡선이 나타나 있다. 응력-축변형을 곡선과 응력-횡변형을 곡선을 보면 상주화강암은 전반적으로 탄성적 거동을 보이는 반면에, 포천화강암과 거창화강암은 전체적으로 비선형적인 변형 상태를 나타낸다. 응력-체적변형을 곡선을 보면 포천화강암, 거창화강암, 상주화강암의 체적팽창 개시점은 각기 파

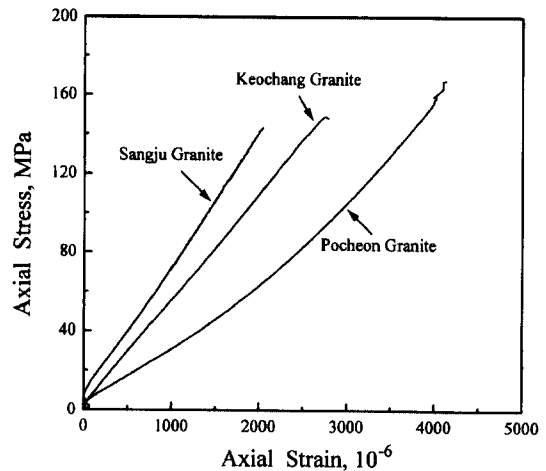


Fig. 4. Axial stress-axial strain curves of intact samples

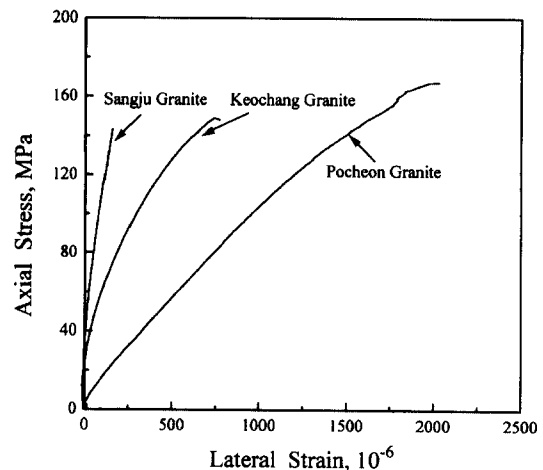


Fig. 5. Axial stress-lateral strain curves of intact samples

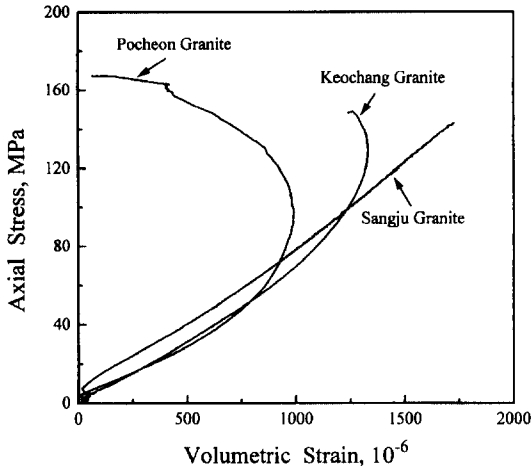


Fig. 6. Axial stress-volumetric strain curves of intact samples

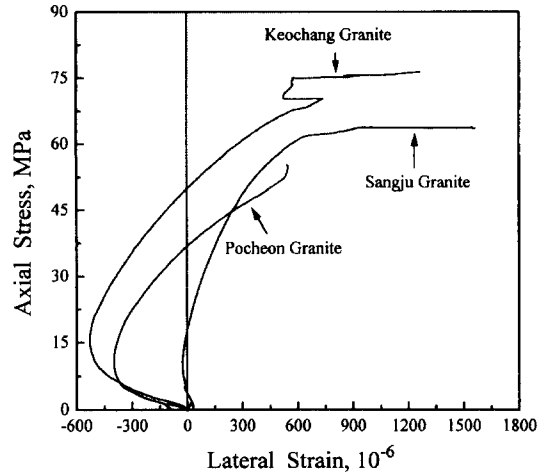


Fig. 8. Axial stress-lateral strain curves of samples thermally cycled to 600°C

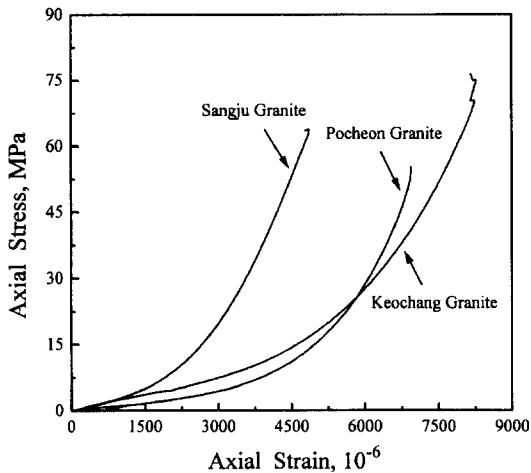


Fig. 7. Axial stress-axial strain of samples thermally cycled to 600°C

괴강도의 약 28%, 37%, 52%에서 발생하여 상주화강암의 경우가 응력에 따른 미세균열의 발생 및 전파가 가장 늦게 발생함을 알 수 있다.

Fig. 7에는 600°C 예열시험편의 응력-축변형을 곡선이, Fig. 8에는 응력-횡변형을 곡선이 표시되어 있다. 축변형을 곡선을 보면 열균열로 인해 모든 예열시험편의 변형거동이 비선형적인 거동을 나타내고 그 정도가 심화되었음을 알 수 있으며, 파괴시의 최종 변형율도 상온시험편에 비해 상당히 증가하는 것으로 나타났다. 암석내에 존재하는 기존균열 및 열균열이 닫히는 초기재하단계에서의 변형상태를 보면 포천화강암과 거창화강암의 변

형율이 상주화강암에 비해 큰 것으로 나타났으며, 이로부터 예열에 따른 열팽창이 상주화강암에서 가장 작게 발생하였다는 것을 알 수 있다. 응력-횡변형을 곡선을 보면 횡변형을 변형거동이 축변형율의 변형거동보다 더욱 비선형성을 나타내고 있으며, 이로부터 횡변형율이 축변형율에 비해 열균열에 더욱 민감하다는 것을 알 수 있다. 횡변형을 곡선에서 주목할 점은 일정한 응력수준까지 횡변형율의 크기가 음의 값을 나타낸다는 점이다. 음의 횡변형율은 예열시험편의 재하시 횡방향으로 팽창하는 것이 아니라 반대로 축소된다는 것을 뜻한다. 이러한 비정상적인 변형거동은 시험편의 성형 잘못이나 실험 절차상의 오류보다는 예열에 의해 생성된 열균열에 의해 발생하는 것으로 생각된다. 포천화강암, 거창화강암, 상주화강암의 최대 음의 횡변형율은 각기 파괴강도의 19%, 21%, 17%에서 발생하였으며 그 크기는 각기  $400 \times 10^{-6}$ ,  $530 \times 10^{-6}$ ,  $26 \times 10^{-6}$  인 것으로 나타났다. 음의 횡변형율에서 양의 횡변형율로 전이하는 응력수준은 포천화강암의 경우 파괴강도의 67%, 거창화강암의 경우에는 65%, 상주화강암의 경우에는 28% 인 것으로 나타났다. 음의 횡변형율에 의한 변형에너지 밀도는 거창화강암이 가장 크고 포천화강암, 상주화강암 순으로 작아진다. 이러한 사실은 거창화강암의 열균열 발생이 가장 크고, 상주화강암이 가장 작다는 현미경 관찰과 유효공극률 및 탄성파속도의 측정 결과와 일치한다.

음의 횡변형율이 발생한다는 것은 예열시험편의 포아송비가 음의 값이 된다는 것을 뜻한다. 탄성론에 따

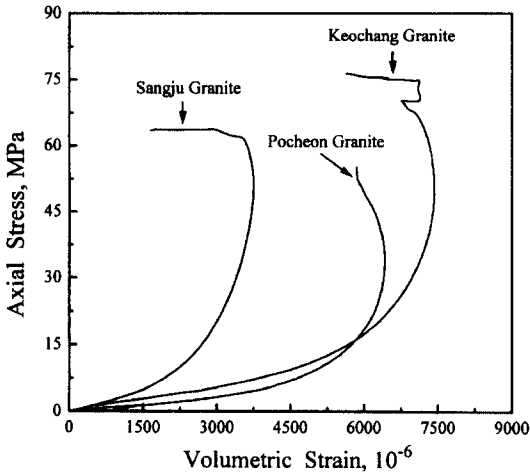


Fig. 9. Axial stress-volumetric strain curves of samples thermally cycled to 600°C

르면 영율, 포아송비, 체적탄성계수, 강성계수의 상호 관계로부터 영율이 0 보다 큰 경우 포아송비( $\nu$ )는  $-1.0 < \nu < 0.5$  사이의 값을 갖게 된다. 그러나, 실제 물체에서는 음의 포아송비가 나타나지 않는다. 거창화강암과 포천화강암의 예열시험편에서 음의 횡변형을 발생이 크게 나타난 것은 입자내 균열에 의해 결정입자가 소부분으로 분리되었다는 점을 들 수 있다. 예열시험편이 상온으로 냉각되면 열팽창된 결정입자나 결정입자의 소부분들이 원래 상태로 수축하려는 경향을 보이게 된다. 그러나, 경계의 일부분이 다른 입자와 연결되어 있는 경우에는 수축에 방해를 받아 결정입자에 잔류압축응력이 형성되고 이로 인해 음의 횡변형율이 발생한다고 생각할 수 있다.<sup>7,11)</sup>

Fig. 9에는 예열시험편의 응력-체적변형을 곡선이 표시되어 있다. 그림을 보면 초기 재하단계에서부터 비선형적인 거동을 보임을 알 수 있으며, 상온시험편에 비해 체적변형율의 크기가 상당히 증가한 것으로 나타난다. 체적팽창 개시점은 포천화강암의 경우 파괴강도의 7%, 거창화강암과 상주화강암의 경우에는 공히 8%인 것으로 나타났다. 상온시험편과 비교하면 체적팽창 개시점이 상당히 낮음을 알 수 있으며, 특히 상주화강암의 경우가 감소폭이 제일 큰 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 동종의 암석인 경우 어떠한 요인이 암

석의 열팽창 및 열역학적 거동에 많은 영향을 미치는가를 조사하기 위하여 결정입자 크기 및 광물구성 분포가 다른 포천화강암, 거창화강암, 상주화강암을 600°C 까지 예열처리하였다.

현미경 관찰 결과에 따르면 모든 예열시험편의 결정 경계부에서는 경계균열이 발생하였으며, 상온시험편에 Reaction rim이 다수 존재하는 포천화강암의 경우에는 경계균열의 발생 정도가 현저하였다. 입자내 균열도 발생하였으며 특히, 포천화강암의 경우에는 입자내 균열에 의해 결정입자가 소부분으로 분리된 경우가 많이 발견되었다. 거창화강암의 경우에는 포천화강암에서와 같이 결정입자가 소부분으로 완전히 분리된 경우는 많지 않았으나 입자내 균열의 발생 빈도는 높은 것으로 나타났다.

예열이 유효공극율 및 탄성파속도에 미치는 영향은 거창화강암에서 가장 큰 것으로 나타났다. 유효공극율 및 탄성파속도가 암석내에 발생한 열균열에 아주 민감하다는 점을 감안하면 거창화강암의 열균열 발생이 가장 크다는 것을 알 수 있다. 상주화강암의 석영 함유량이 다른 두 암석에 비해 많은 데도 불구하고 열균열의 발생이 상대적으로 작은 것은 상주화강암 상온시험편의 유효공극율이 다른 암석에 비해 크기 때문인 것으로 생각된다.

예열시험편에 대한 단축압축시험 결과 상온시험편에 비해 비선형적인 거동이 크게 증가한 것으로 나타났으며, 이는 암석 내부에 발생한 열균열에 의한 것으로 생각된다. 예열처리된 포천화강암과 거창화강암의 포아송비는 음의 값으로 나타났는데 이는 재하응력의 50% 이상까지 음의 횡변형율이 발생하였다는 것을 뜻한다. 음의 횡변형율은 예열처리된 시험편이 냉각되는 동안 결정입자에 축적된 잔류압축응력에 의해 발생하는 것으로 추정되며, 포천화강암이나 거창화강암에서와 같이 경계균열이 많이 발달하고 입자내 균열에 의해 결정입자가 소부분으로 많이 분리된 경우에 음의 횡변형율은 증가하는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 '97 세명대학교 교내 학술연구비 지원과제 연구비에 의해 연구된 것입니다. 연구비를 지원해 준 학교 당국에 감사를 드립니다. 또한, 박편 관찰에 도움을 준 대한광업진흥공사 장명환 박사와, 실험에 협조해

준 서울대학교 자원공학과 이희석 군에게도 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. Richter, D. and G. Simmons, 1974, Thermal expansion behaviour of igneous rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 11, pp. 403-411.
2. Bauer, S.J. and B. Johnson, 1979, Effects of slow uniform heating on the physical properties of the Westerly and Charcoal granites, *Proc. 20th U.S. Symp. Rock Mech.*, Austin, pp. 7-18.
3. Kranz, R., 1983, Microcracks in rocks: A review, *Tectonophysics* 100, pp. 449-480.
4. 이기형, 이형원, 신재섭, 1990, 화강암질 석재의 열 파괴 특성 연구, *한국자원공학회지* 27.1, pp. 31-42.
5. 이형원, 이정인, 1995, 고온하에서 암석의 열충격, 열 팽창 및 열파괴에 관한 연구, *터널과 지하공간(한국암반공학회지)* 5.1, pp. 22-40.
6. 이형원, 이정인, 1996, 암석의 강도 및 변형거동의 온도존성에 관한 연구, *터널과 지하공간(한국암반공학회지)* 6.2, pp. 101-121.
7. 윤용균, 이희근, 1996, 열응력이 암석의 역학적 거동과 투수성에 미치는 영향-I. 역학적 거동, *터널과 지하공간(한국암반공학회지)* 6.1, pp. 1-9.
8. 윤용균, 1997, 열응력이 포천화강암의 투수성에 미치는 영향, *터널과 지하공간(한국암반공학회지)* 7.3, pp. 238-245.
9. Heard, H.C. and L. Page, 1982, Elastic moduli, thermal expansion, and inferred permeability of two granites to 350°C and 55 Megapascals, *J. Geophys. Res.* 87.B11, pp. 9340-9348.
10. Heuze, F.E., 1983, High-temperature mechanical, physical and thermal properties of granitic rocks-A review, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 20. 1, pp. 3-10.
11. Homand-Etienne, F. and R. Houpert, 1989, Thermally induced microcracking in granites: characterization and analysis, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 26.2, pp. 125-134.
12. Gèraud, Y., 1994, Variations of connected porosity and inferred permeability in a thermally cracked granite, *Geophys. Res. Lett.* 21.11, pp. 979-982.
13. 장명환, 양형식, 1997, 고온하 화강암의 변형 및 파괴 거동에 관한 연구, *터널과 지하공간(한국암반공학회지)* 7.2, pp. 130-135.