

## 고온하에서 암석의 열충격, 열팽창 및 열파괴에 관한 연구

이형원 · 이정인

### A Study on Thermal Shock, Thermal Expansion and Thermal Cracking of Rocks under High Temperature

Hyeong-Won Lee<sup>1)</sup> · Chung-In Lee<sup>2)</sup>

#### ABSTRACT

Thermomechanical characteristics of rocks such as thermal shock, thermal expansion, thermal cracking were experimentally investigated using Iksan granite, Cheonan tonalite and Chung-ju dolomite to obtain the basic data for proper design and stability analysis of underground structures subjected to temperature changes.

The effect of thermal shock did not appear when the heating speed was under 3°C/min. and there existed little difference between multi-staged cyclic heating and single-cycled heating. Thermal expansion of rocks was affected by mineral composition, crack porosity and the degree of thermal cracking. In quartz-bearing multimineralic rocks such as Iksan granite and Cheonan tonalite, the thermal expansion coefficient increased continuously with temperature rise, but that of Chung-ju dolomite which was a monomineralic rock showed a constant value for the temperature above 250°C. Chung-ju dolomite yielded the lowest critical threshold temperature( $T_c$ ) of 100°C and unstable thermal cracking was initiated above the new threshold temperature( $T_c'$ ) of 300°C. Above  $T_c'$  thermal cracks grew but they were not interconnected. Iksan granite showed closing of microcracks to the temperature of 100°C, then expanded linearly to  $T_c$  of 200°C. Above  $T_c$ , thermal cracking was initiated and progressed rapidly and almost all the grain boundaries were cracked at 600°C. Cheonan tonalite also showed similar behavior to Iksan granite except that  $T_c$  was 350°C and that thermal cracks propagated more rapidly. Thermal expansions calculated by Turner's equation were found to be valid in predicting the thermal expansion and cracking behavior of rocks.

#### 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, 이에 따라 암반역학 분야에서 실제 공학적 환경에서 예상되는 온도, 압력 범위에서 암반의 열적 거동을 규명하기 위한 연구가 시작된

것은 비교적 최근의 일이다. 특히 원자력산업의 급속한 발전에 따라 최근 세계적 문제점으로 대두된 방사성 폐기물의 경우 지층처분이 적극 추진되고 있는데, 고열을 수십년에서 수백년 이상 방출하는 사용 후 핵연료나 고준위 방사성 폐기물(HLW: High Level Radioactive Waste) 처분장의 경우 처분장 주변암반의 열적 거동을 정확히 파악하는 것은 안전한 처분장 설계의 관건이 되고 있다.

\* 1995년 2월 15일 접수

1) 정회원, 선경건설(주) 지하비축팀 과장

2) 정회원, 서울대학교 교수

온도증가시 암석의 역학적 특성이 변화하는 주된 원인은 암석을 구성하는 광물의 열팽창과 이에 따른 열과괴에 기인하는 것으로 알려져 있다. 온도상승시 발생하는 암석의 열과괴는 암석내 열응력에 의한 것이며, 이러한 열응력은 발생원인에 따라 온도구배에 의한 열응력과 광물간 열팽창 차나 이방성에 의한 열응력으로 구분된다. 이러한 열과괴거동을 규명하기 위하여 Friedman & Johnson(1978)은 Sioux 규암을 685℃까지 가열-냉각 후 형성된 열균열을 광학현미경과 주사전자 현미경을 통하여 관찰하였고, 그 결과 암석은 고유한 임계열과괴온도( $T_c$ : critical threshold temperature)에서 열과괴가 개시되고 그 후 온도증가시 열과괴가 진행된다고 보고하였다<sup>1)</sup>. 또 Yong & Wang(1980)은 Westerly 화강암을 가열하며 A.E. 방출률을 측정하므로써 임계열과괴온도를 결정하였는데, 이러한 암석의 임계열과괴온도는 가열조건에 무관할뿐 아니라 임계온도 이후 재가열시 이전의 최고가열온도까지는 A.E. 방출이 없다는 열카이저효과(thermal Kaiser effect)를 발표하였다<sup>2)</sup>. 또, Bruner(1979)는 열과괴시 입자내 균열은 인접광물간 열팽창차에 의해 그 방향과 크기가 결정된다고 보고하였고,<sup>3)</sup> Van Der Mollen(1981)은 봉암하에서는 열과괴 개시온도인  $T_c$ 가 대기압하에서 보다 다소 증가된다고 보고하였다<sup>4)</sup>. Homand & Troalen(1984)은 2종의 화강암과 2종의 석회암에 대하여 700℃까지 가열-냉각 후 각 온도단계별로 형성된 열균열을 주사전자현미경으로 관찰하였으며, 그 결과 초기의 열균열은 대부분 입자경계에서 형성되고 700℃에서는 대부분의 입자경계에 열균열이 형성되었으며, 입자내 균열은 벽개면 등 기존의 광물내 연약면을 따라 500℃ 이후 부터 형성된다고 보고하였다<sup>5)</sup>.

이러한 열과괴를 역학적 모델로서 표시하고자하는 연구도 이루어졌으며, 요업재료 분야에서 Kingery *et al.*(1976)이 온도변화시 입자경계의 열응력의 크기를 단순화한 역학적 모델로부터 결정한 이래, Johnson *et al.*(1978)은 이 결과를 암석에 적용하여 광물간 열팽창차와 열팽창 이방성에 의한 입자간 열응력을 몇가지 역학적 모델로부터 제안하였다. 그후 Davidge(1981)는 암석과 같은 취성복합물체에서 입자경계 크기를 정규분포로 가정한 경우에, 에너지 평형을 이용하여 열과괴 정도를 정량적으로 계산하고, 이로부터 균열밀도 증가에 따른 Young계수의 변화를 추정하였다. 또 파괴역학의 진보는 입자단위의 미세열응력과 이에 의한 열과괴

의 진행을 좀더 정량적으로 예측할 수 있도록 해주었으며, 요업재료 분야에서 Evans(1978), Clarke(1980) 등이 선형 파괴역학을 이용한 취성재료의 열과괴모델을 검토한 이래 Fredrich & Wong(1986)은 암석의 열과괴를 예측하기 위하여 4가지 결정형태를 이용한 파괴역학적 모델을 제시하였으며, 그 결과 상당히 실험적 결과에 근접한 결과를 나타내고 있다.

현재 국내에서도 화강암 채석장에서 제트버너가 널리 사용되고 있을 뿐 아니라 국내 원자력발전소에서 폐기되어 매년 누적되고 있는 방사성 폐기물의 지층처분이 구체화되고 있음에 따라 암석의 열특성에 관한 체계적 연구가 시급히 요청되고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 석재의 열채석 및 열가공기술 분야는 물론 암석의 열적특성을 고려할 필요가 있는 각종 지하구조물의 설계와 안정성 해석에 필수적인 기초자료를 얻기 위하여 익산화강암, 천안석영섬록암, 충주돌로마이트 등 3종의 국내 암석에 대하여 상온에서 600℃까지의 온도범위에서 가열속도에 의한 열충격 효과와 반복가열에 의한 영향을 파악하고, 온도구배가 무시될 수 있는 조건에서 열팽창 및 열과괴 거동을 정성적, 정량적으로 규명하였다.

## 2. 암석의 열과괴에 관한 이론적 배경

### 2.1 복합물체의 이론적 열팽창

Turner(1946)는 암석과 같은 다결정 복합물체의 이론적 열팽창계수  $\alpha_m$ 을 다음과 같은 가정하에서 산정하였다<sup>6)</sup>.

- 1) 여러종류의 결정들이 불규칙하게 분포한다.
- 2) 모든 열팽창은 등방적이다.
- 3) 물체는 균열을 함유하지 않는다.
- 4) 물체는 가열시 파괴되지 않는다.
- 5) 열팽창계수는 압력과 무관하다.
- 6) 입자경계 열응력의 총합은 0이다(정적 평형상태).

$$\alpha = \frac{\sum \alpha_i K_i V_i}{\sum K_i V_i} \quad (1)$$

$\alpha$  : 복합물체 전체의 평균체적 열팽창계수

$\alpha_i$  :  $i$  번째 입자의 체적 열팽창계수

$K_i$  :  $i$  번째 입자의 체적 탄성계수

$V_i$  :  $i$  번째 입자의 체적

2.2. 열파괴 (Thermal Cracking)이론과 모델

2.2.1 개요

열에 의한 암석의 파괴는 열응력에 의해 발생하게 되며 이러한 열응력의 발생원인에 의해 2종류로 나눌 수 있다. 첫째는 암석내 공간적 온도구배(temperature gradient)에 의해 발생하는 열응력에 의한 열충격(thermal shock)파괴로서 이를 열파쇄(thermal spalling)라 하고, 실제로 이러한 종류의 파괴에 있어서 그 파괴양상이 점이적 쪼개짐의 형태로 나타난다. 둘째로는 암석내 온도구배가 전혀 없거나 온도구배가 있더라도 이에 의한 열응력이 작아 암석의 파괴에 큰 영향을 미치지 못하는 경우에 평형상태의 온도, 즉 상온에서부터 온도가 상승함에 따라 암석을 구성하는 광물 상호간의 열팽창차(thermal expansion difference)나 광물자체의 이방적 열팽창(thermal expansion anisotropy)에 의해 광물간 열응력이 발생하여 파괴되어 가는 것으로서 이를 열파괴(thermal cracking)라 한다.

2.2.2. 에너지 평형과 열파괴이론

다결정 취성물체가 온도변화를 받아서 입자간 열팽창차에 의한 열응력에 의해 입자경계가 파괴되기 위해서는 경계주변 입자의 탄성변형을 에너지(elastic strain energy)가 입자경계를 파괴시킬 수 있는 에너지보다 같거나 커야 하고 입자경계에 균열발생 및 전파를 위해 충분한 응력집중을 유발시킬 수 있는 잠재적 미세 균열이 존재해야 한다. 임의의  $\Delta T$ 에서 입자간 열팽창차가  $\Delta\alpha_{max}$ 인 경우 파괴가능한 최소 입자경계의 크기 즉 임계크기  $l_c$ 는 다음과 같다<sup>8)</sup>.

$$l_c = \frac{\gamma_{gb}}{E\epsilon_{max}^2} = K \frac{\gamma_{gb}}{E(\Delta\alpha_{max} \cdot \Delta T)^2} \quad (3)$$

- 단,  $\alpha_{max}$  : 입자간 최대 열팽창차
- $\Delta T$  : 온도변화량
- E : Young계수
- $\gamma_{gb}$  : 입자경계 균열의 표면에너지
- K : 입자의 형태등에 따라 결정되는 상수

2.2.3. 열파괴의 역학적 모델

(1) 2 결정모델(bicrystal model)

Fig.1에 나타난 바와같이 탄성정수와 열팽창계수가 서로 다른 2개의 등방성 결정이 평면경계를 공유하며 결합된 경우를 가정하자. 이 모델이  $\Delta T$ 의 온도변화가 발생된 후에도 공통의 경계면을 유지하고 있다면 이때

입자경계에서 두결정의 열팽창차를 구속하는 열응력이 발생될 것이다. 이때 발생하는 열응력은 다음식으로 주어진다<sup>7)</sup>. 이때  $\alpha_1, \alpha_2$  라 하면 결정2의 경계에서 발생된 인장열응력이 인장강도를 초과한 경우 경계면과 수직 방향으로 결정2의 내부로 인장균열이 전파하며 이는 입자내 균열 (intercrystalline crack)의 전파를 잘 설명할 수 있다.

$$\sigma = (\alpha_2 + \alpha_1) \Delta T \frac{E_1 \cdot E_2}{(1-\nu_1) \cdot E_1 + (1-\nu_2) \cdot E_2} \quad (3)$$

- 단,  $\alpha_1, \alpha_2$  : 결정 1,2의 Young계수
- $E_1, E_2$  : 결정 1, 2의 Young 계수
- $\nu_1, \nu_2$  : 결정 1,2의 Poisson비

(2) 구형결정함유모델(spherical inclusion model)

Fig.2 에 나타난 3차원 무한 등방성 매질내에 함유된 구형결정 모델을 가정하자. 이 경우 온도상승시 입자경계에 발생하는 전단응력은 비교적 작으므로 무시하고 수직응력이 중요한 요소가 되며 따라서 구형결정은 정수압  $\sigma$ 를 받게 된다<sup>6)</sup>.

$$\sigma = \frac{2(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T \cdot E_1 \cdot E_2}{(1+\nu_2) \cdot E_1 + 2(1-2\nu_1) \cdot E_2} \quad (4)$$

- 단,  $\alpha_1, \alpha_2$  : 구형결정과 무한매질의 열팽창계수
- $\Delta T$  : 온도변화

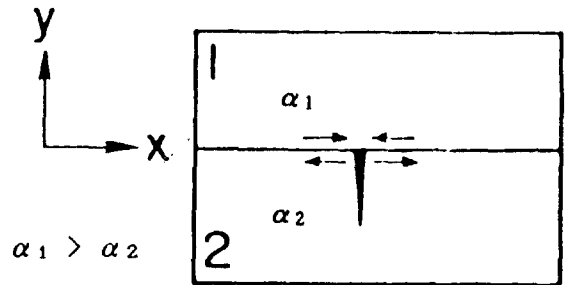


Fig. 1. Bicrystal model.

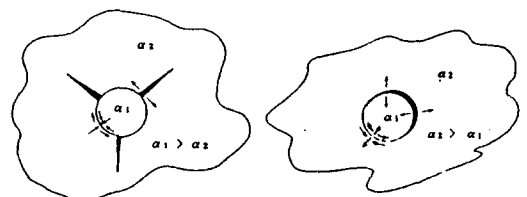


Fig. 2. Spherical inclusion model.

$E_1, E_2$  : 구형결정과 무한매질의 Young계수

$\nu_1, \nu_2$  : 구형결정과 무한매질의 Poisson비

여기서  $\alpha_1 > \alpha_2$  인 경우 즉, 구형결정의 열팽창계수가 매질의 열팽창계수 보다 큰 경우 매질내에 인장균열이 전파하게 되며 균열의 전파방향은 경계면과 거의 수직방향이 된다. 무한매질이 여러개의 결정으로 이루어져 있다면 이러한 매질내 인장균열은 매질내 결정간 경계균열이 될 것이다. 반대로  $\alpha_1 < \alpha_2$ , 즉 매질의 열팽창계수가 더 큰 경우 경계부에서 균열이 발생하게 된다. 이 모델은 입자경계 균열의 전파를 잘 설명해 준다.

(3) 다결정모델(polycrystalline aggregate model) Fig.3에 나타난 바와 같은 이상적인 단광물 다결정 모델을 가정해 보자. Fig.3의 우측에는 편의상 1개 광물을 중심으로 인접한 광물들간의 관계를 나타내었으며 이때 이 광물과 주변광물간의 열팽창 이방성은 상호 반대인 경우로 가정한다. 이 경우 광물경계에서는 상호 열팽창차에 의해 겹쳐지는 부분(overlap)과 틈새(gaps) 부분이 발생하게 되며 겹쳐지는 부분에는 압축응력이, 틈새 부분에서는 인장응력이 발생한다. 이에따라 Fig.3의 우측 그림에서 1과 2로 표시된 입자경계 균열과 3으로 표시된 입자내 균열이 발생하게 된다. 광물의 C축과 C축에 수직축의 선열팽창계수  $\alpha_c$ 와  $\alpha_a$ 가 이방성을 보일 경우 입자경계에서 발생가능한 최대 인장응력은 다음식으로 개략적으로 표시할 수 있다<sup>7)</sup>.

$$\sigma_{max} = (\alpha_c - \alpha_a) \Delta \frac{E_a \cdot E_c}{E_a + E_c} \quad (5)$$

단,  $E_a, E_c$  ; C축과 C축에 수직축의 Young계수  
이러한 다결정모델은 단광물암석에서 열파괴를 잘 설명할수 있다.

암석의 열파괴가 개시되는 온도변화  $\Delta T$ 는 광물의 열팽창차나 그 이방성에 의해 결정되며 광물의 탄성정수도 이에 영향을 미친다. 그러나 실제 암석의 열파괴는

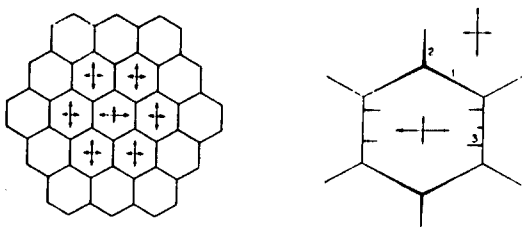


Fig. 3. Polycrystalline aggregate model.

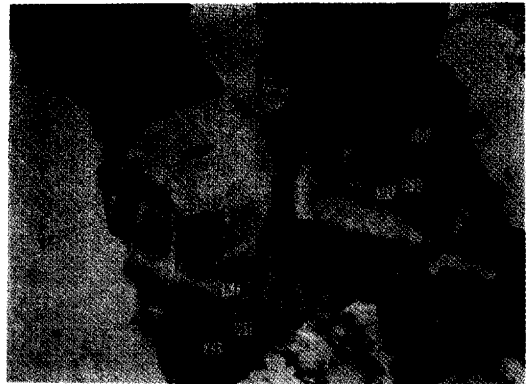
구성광물의 형태, 크기, 배열 등과 암석의 균열밀도 등 여러가지 요소에 의해 영향을 받으며 이는 실험적으로 결정되어야 할 것이다. 상온에서 암석이 평형을 이루고 있다고 가정한다면 열파괴가 개시되는  $\Delta T$ 는 상온에서 부터의 온도변화를 의미하고 이 온도를 임계온도 ( $T_c$  : critical threshold temperature)라 하며 여러가지 실험적 방법으로 결정할 수 있다.

### 3. 암석시료와 실험장치 및 실험방법

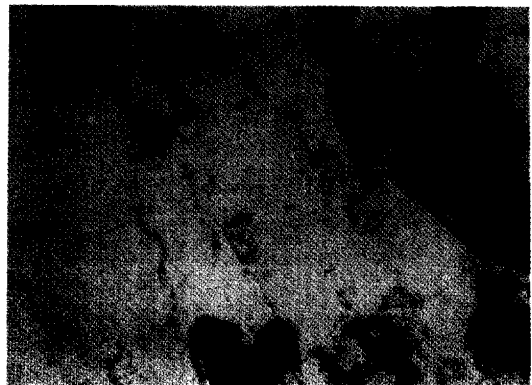
#### 3.1. 암석시료 및 시편제작

##### 3.1.1. 시료의 암석학적, 물리·역학적 특성

본 연구에서는 중조립질의 익산화강암과 중세립질



(a) 50x, crossed nicols, 0 0.2 0.4mm



(b) 50x, open nicol 0 0.2 0.4mm

Fig. 4. Microphotographs of Iksan granite :  
(Q<sub>2</sub> : Quartz, Pl : Plagioclase, Kf : K-feldspar (Microcline),  
Bt : Biotite, Hb : Hornblende, Zr : Zircon, Sp : Sphene).

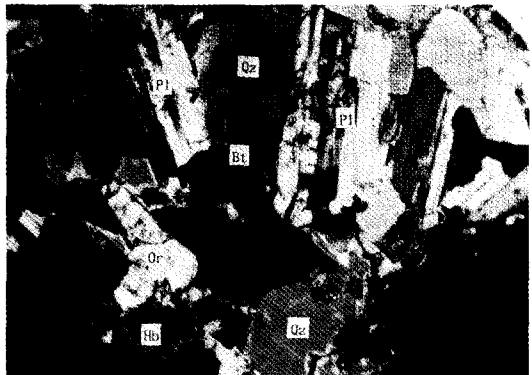
천안석영섬록암 및 미세립질 충주돌로마이트를 대상으로 하였으며 Fig. 4~Fig. 6은 각 시료의 박편현미경 사진으로서 시료의 암석학적 특성은 다음과 같다.

(1) 익산화강암

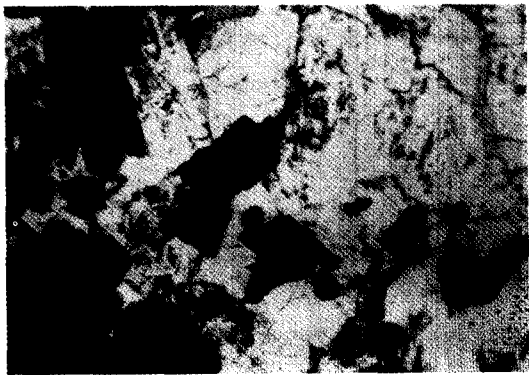
전북 익산화강암은 중립 내지 조립질의 중생대 유라기의 흑운모 화강암으로서, 석영, 장석, 흑운모를 주조암 광물로 하는 회색 화강암이다. 석영은 중립내지 조립질의 타형이며, 백색을 띠는 장석은 중립 내지 조립질로 산출되나 조립질이 비교적 우세하고 때때로 직경 1~2 cm 가량의 반정을 보여준다. 흑운모는 대부분 중립질로서 간혹 직경 1 mm 이하의 세립질 흑운모도 관찰된다.

(2) 천안석영섬록암

천안석영섬록암은 중립 내지 세립질 입상조직을 보여주는 암회색 석영섬록암(tonalite or quartz diorite)으로서 사장석, 각섬석, 흑운모, 석영 등이 주조암 광물을 이루고 있으며 기타, K-장석, 스펀, 녹염석, 녹니



(a) 50×, crossed nicols, 0 0.2 0.4mm



(b) 50×, open nicol 0 0.2 0.4mm

Fig. 5. Microphotographs of Cheonan tonalite : (Qz : Quartz, Pl : plagioclase, or : Orthoclase, Bt : Biotite, Hb : Hornblende).

석, 인회석, 저콘, 불투명광물, 방해석 및 2차 변질광물인 견운모 및 점토광물 등이 소량 또는 미량 수반된다.

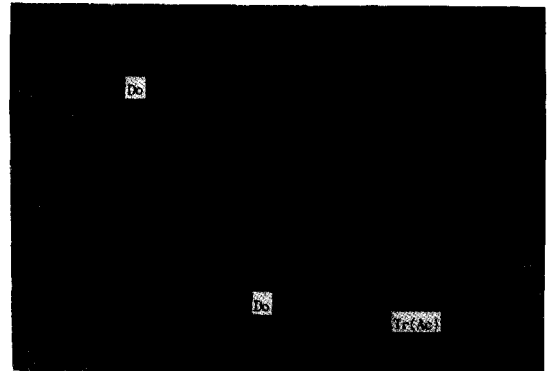
(3) 충주돌로마이트

충주돌로마이트는 치밀한 조직의 백색 돌로마이트의 단광물 암석으로서 대체로 미세립질의 돌로마이트와 양기석(陽起石) 혹은 투각섬석(透角閃石)이 서로 호상 구조를 이루며 밀접하게 공존하며 산출되고 있다.

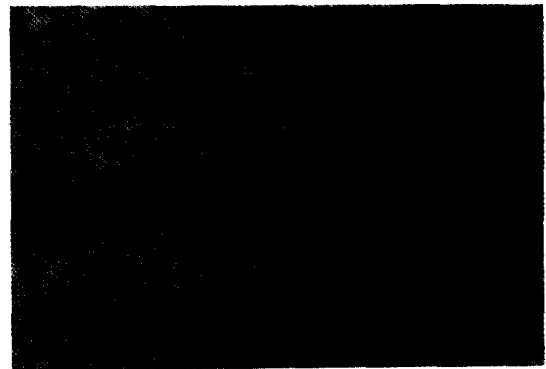
본 암석시료의 모드분석결과를 Table 1에 나타내었다. 또한, 대상시료의 기본적인 물리·역학적 특성을 파악하기 위하여 각종 실내 물성시험을 통해 체적비중, 길보기공극율, P파진파속도, 단축압축강도, 압열인장강도, Young계수, Poisson비 등을 구하였으며 이 결과는 Table 2에 나타내었다.

3.1.2. 시편

본 연구에 사용된 3종의 암석시료에 대하여 30×30×20 cm 크기의 신선한 암괴를 시료별로 2~3개씩 채취하였으며 이들 암괴로부터 시편 제작시 이방성의



(a) 50×, crossed nicols, 0 0.2 0.4mm



(b) 50×, open nicol 0 0.2 0.4mm

Fig. 6. Microphotographs of Chung-ju dolomite : (Do : Dolomite, Tr(Ac) : Tremolite (or actinolite)).

영향을 줄이기 위해 압축채취나 절단은 가능한 일정한 방향으로 실시하였다. 열팽창시험용 시편은 시료를 5×5×20 mm 크기의 장방형으로 제작하였으며, 제작된 시편의 갯수는 시료별로 30개씩 총 90개였다. 전자현미경관찰용 시편은 직경 25 mm, 두께 5 mm의 원판 형태로 각 시료별로 3개씩 총 9개를 제작하였다.

### 3.2. 실험장치

본 연구에서 암석시료의 열팽창-수축특성 및 잔류열팽창 측정에 사용된 열기계 분석기(Thermo-mechanical analyzer)는 일본 Rigaku사제 Model 8140 및 TAS-100으로서 이 장치의 모식도가 Fig. 7에 나타나 있다. 여기서 시료고정대(sample holder)에는 열팽창량을 정확히 알고 있는 표준시료(reference sample)와 측정하

고자 하는 암석시료가 각각 고정된다. 시료를 에워싸고 있는 소형 전기로는 1500℃까지 가열할 수 있으며, 암석시편 상단에 밀착된 Pt-Rh 열전대에서 측정되는 시편의 표면온도가 프로그램식 온도조절기(program system temperature controller)에 의해 자동조절되어 가열 및 냉각속도와 최고가열온도 등을 미리 입력된 값으로 자동제어하게 된다. 시편의 열팽창은 표준시료와 측정시료 하단에 장치된 측정봉(detecting rod)이 각각 계측부의 LVDT의 차등변환기와 코아에 연결되어 1μm의 정밀도로 표준시료와 측정시료의 열팽창차(differential thermal expansion)가 측정되며, LVDT에서 전기신호로 바뀐 열팽창차는 TMA 회로를 거쳐 증폭 조정되어 차트기록제(2-pen chart recorder)에 온도와 열팽창차가 자동기록된다.

Table 1. Modal composition of samples.

Minerals	Composition (Vol. %)		
	Iksan granite	Cheonan tonalite	Chungju dolomite
Quartz	25.5	12	-
plagioclase	22.6	38	-
Ortoclase	-	5	-
Microcline	25.2	-	-
Biotite	14.5	17	-
Hornblend	3	25	-
Dolomite	-	-	74.5
Actinolite	-	-	20.5
Others	9.2	3	5
Total	100	100	100

Table 2. Physical and mechanical properties of samples.

Properties	Iksan granite	Cheonan tonalite	Chungju dolomite
Bulk specific gravity	2.70	2.74	2.88
apparent porosity(%)	0.523	0.564	0.113
P-wave velocity(m/sec)	3930	3700	6050
Uniaxial compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )	1470	1740	2340
Brazilian tensile strength (kg/cm <sup>2</sup> )	71	73	77
Young's modulus	1.96	1.89	2.53

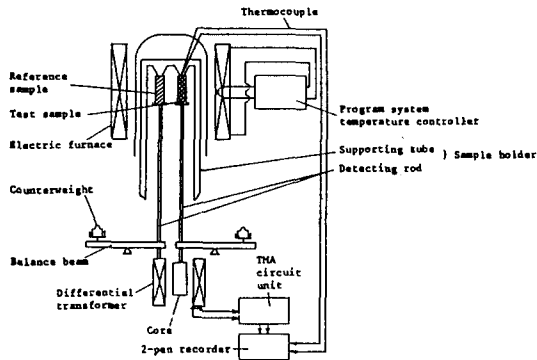


Fig. 7. Schematic diagram of thermomechanical analyzer.

### 3.3. 실험방법

TMA 장치로 측정기록된 열팽창선도는 다음식을 이용하여 암석시료의 열팽창량으로 보정, 환산된다.

$$a = b + (c - d)$$

- 단, a : 보정된 암석시료의 열팽창량
- b : TMA 장치로 측정된 열팽창량
- c : 표준시료의 열팽창량
- d : blank test 에서 얻은 열팽창량

본 연구에서는 보정된 암석시료의 선열팽창량을 이용하여 상온에서 600℃까지 100℃ 간격의 온도구간을 설정하여 각 온도구간에서의 평균 선열팽창계수를 구하였다<sup>12)</sup>.

시료의 열충격 특성은 1~10℃/분의 가열속도 범위에서 상온에서 600℃ 까지 시료를 가열하며 시료의 선열팽창 선도를 구하고 아울러 상온으로 냉각시키면서 수축선도를 구하여 팽창-수축선도를 비교하므로써 시료에 가해지는 열충격 효과를 규명하였다.

암석의 열파괴 거동을 규명하는 실험적 방법에 있어서 시료를 가열하며 A.E.를 측정하는 방법, 가열-냉각 후 시료를 편광현미경이나 전자현미경으로 관찰하는 방법, 이론적 열팽창치와 측정치를 비교하는 방법, 가열-냉각 후 잔류열팽창량을 측정하는 방법 등이 주로 사용되고 있으며 이밖에 열히스테리시스 관찰, 투수도나 총공극을 변화 등을 이용하는 방법 등이 있다<sup>13)</sup>.

A.E.를 이용하여 열파괴를 측정하는 방법은 가열중 연속적으로 A.E.방출율을 측정하므로써 열파괴가 개시되는 임계온도( $T_c$ : critical threshold temperature)를 정확히 결정할 수 있다는 장점이 있으며 이에따라 Bauer & Johnson(1979), Yong & Wang(1980),

Johnson et al.(1978) 등에 의하여 화강암(70~75℃) 및 규암(200℃)의  $T_c$ 값들이 보고되어 있다. 그러나 이 방법은 열파괴 정도를 정량적으로 나타낼 수 없다는 단점이 있음에 따라 주로  $T_c$ 의 결정과 기타 정성적 연구에 사용된다.

가열-냉각 후 시료에 대한 현미경적 관찰은 직관적 관찰이 가능하다는 장점이 있으나 연속적으로 동일부분의 변화를 관찰하지 못했고 전체적 열파괴 정도를 정량화시키기가 어렵다는 단점이 있다<sup>9, 11, 14)</sup>. 이론적 열팽창치와 측정치를 비교하는 방법은 이론치를 구하기 위한 입력자료의 부족, 계산방법의 문제점 등에 의해 과거 정량적 접근에 있어서 큰 효과를 나타내지 못하였다. 가열-냉각 후 영구변형으로 남게되는 잔류열팽창량을 측정하는 방법은 측정이 연속적이지 못하여  $T_c$ 를 정확히 결정하기 힘들다는 단점이 있으나 잔류팽창이 열파괴의 가장 직접적 최종지표가 될 수 있으며 따라서 열파괴 정도를 정량적으로 표현할 수 있다는 장점이 있음에 따라 흔히 사용되는 방법이다.

잔류팽창 측정법에 의한 임계온도( $T_c$ )의 결정은 다양한 최고온도( $T_{max}$ )까지 가열 후 냉각시킨 시료의 잔류팽창이 일정수준 이상일 경우로 결정할 수 있으며, 본 연구에서는 사용된 TMA 장치의 측정정밀도( $50 \times 10^{-6}$  strain)를 고려하여 최초로  $100 \times 10^{-6}$  strain이 발생되는 가열온도를  $T_c$ 로 정하였다.  $T_c$ 의 결정을 위한 반복 가열시 가열온도는 최초 100℃에서 부터  $T_c$ 까지는 50℃ 간격으로  $T_{max}$ 를 증가시켰고  $T_c$  이후는 100℃ 간격으로 600℃까지  $T_{max}$ 를 증가시키며 냉각 후 잔류열팽창을 측정하므로써 시료의 열파괴 거동을 조사하고자 하였다. 또, 본 연구에서는 잔류팽창 측정법과 병행하여 이론적 열팽창치와 실측치의 비교, 주사전자현미경(SEM)관찰 등을 병행하므로써 시료의 열파괴 거동을 정성적, 정량적으로 규명 하였다.

## 4. 암석의 열충격, 열팽창 및 열파괴 거동에 관한 실험결과 및 고찰

### 4.1. 가열속도에 따른 열충격 효과

암석의 정확한 열적거동 규명을 위하여는 열충격효과를 우선 규명하고 이에 따라 실험조건을 결정할 필요가 있다. 본 연구에서는 암석의 열충격특성에 관하여

상호상충되는 Todd의 연구결과와 Yong & Wang의 연구결과를 검토하고,<sup>15)</sup> 국내 암석시료의 열충격효과를 규명하기 위하여 익산 화강암을 1, 3, 5, 10℃/분의 가열속도로 각각 600℃까지 가열하며 선팽창량을 측정하고 그후 동일한 속도로 상온까지 냉각시키며 수축량을 측정하였다. (Fig. 8)

Fig. 8에 나타난 바와같이 가열속도가 1, 3℃/분의 경우 팽창 및 수축 전과정에 거쳐 그 경향이 대체로 유사하여 가열속도의 변화에 따른 추가적 열과피가 나타나지 않았고 이는 열충격의 효과가 없음을 의미한다. 가열속도가 5℃/분인 경우 팽창선도는 큰 변화를 보이지 않으나 수축선도의 경향이 조금 변화하였고 가열속도가 10℃/분으로 증가된 경우는 팽창선도와 수축선도의 경향이 모두 크게 변화하였으며 1℃/분의 가열속도에 비해 600℃에서의 선팽창량은 20% 가량 증가하였고 냉각후의 잔류팽창도 60% 가량 증가하여 비교적 뚜렷한 열충격효과를 보여주었다. 각 가열속도별 열팽창-수축선도간 차등변위 즉 열 히스테리시스를 나타낸 Fig. 9에서는 열충격효과를 좀 더 명확히 파악할 수 있었으며 1℃/분과 3℃/분의 가열속도하에서 열히스테리시스 거의 일치하고 있어 열충격효과를 볼 수 없었다. 그러나 가열속도가 5℃/분으로 증가되면 열히스테리시스가 증가하기 시작하여 열충격효과가 발생하기 시작하고 10℃/분의 가열속도에서는 뚜렷한 열충격효과를 나타내었다. Fig. 10에서는 열과피 효과의 최종지표가 될 수 있는 상온의

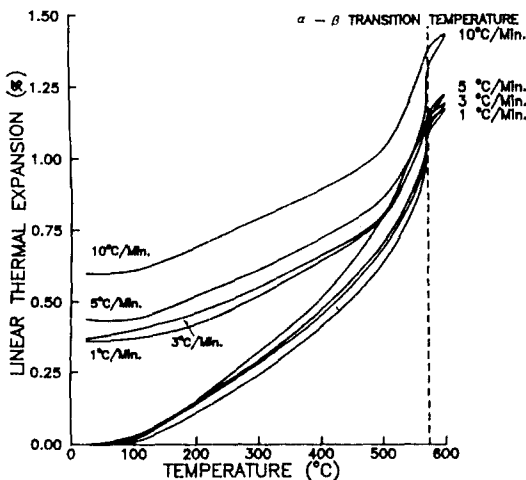


Fig. 8. Linear thermal expansion of Iksan granite measured at both heating and cooling stage as a function of heating speed.

로 냉각 후 회복되지 않는 잔류열팽창의 가열속도에 따른 변화경향을 나타냈으며 역시 1℃와 3℃/분의 가열속도까지는 잔류팽창이 각각 0.36%와 0.37%로 나타나 추가적 열과피를 거의 나타내지 않아 열충격 효과는 볼 수 없었고 그 후 가열속도가 5℃/분과 10℃/분으로 증가되면서 잔류팽창이 0.44%, 0.60%로 선형적으로 증대되어

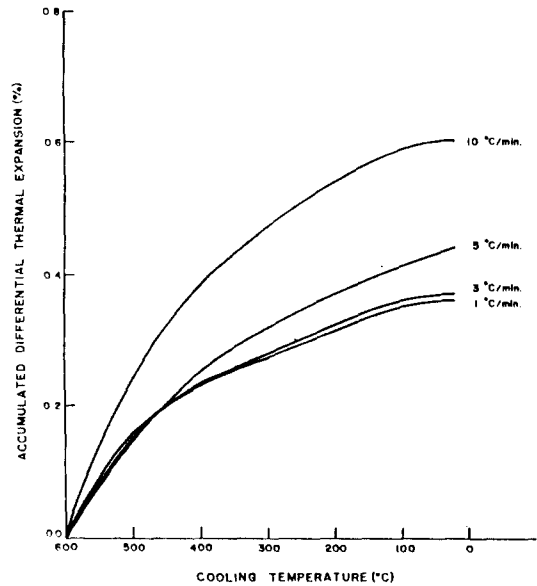


Fig. 9. Accumulated differential thermal expansion amount of Iksan granite between heating and cooling stage as a function of heating speed.

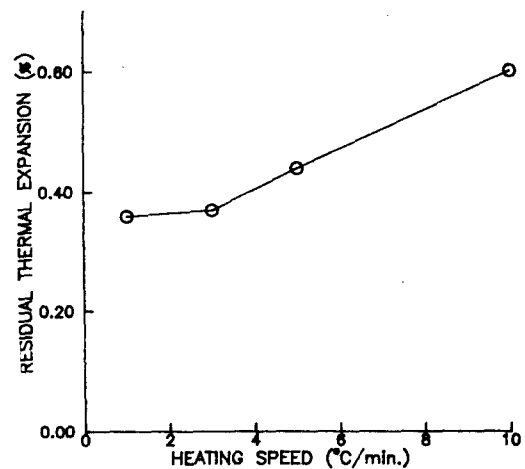


Fig. 10. Residual thermal expansion of Iksan granite heated to 600℃ with various heating speeds.



뚜렷한 열충격효과를 확인할 수 있었다.

### 4.2. 열팽창 거동

#### 4.2.1. 시료의 열팽창 거동

3종의 암석시료에 대하여 열충격 효과를 배제할 수 있는 3°C/분의 속도로 600°C까지 가열하며 암석의 선 열팽창거동을 측정하였다. (Fig. 11)

Fig.11에 나타난 바와같이 충주돌로마이트는 600°C까지 전 가열구간에 걸쳐 대체로 선형적인 열팽창거동을 보이는 반면 익산화강암과 천안석영섬록암은 온도가 상승될수록 열팽창량이 더욱 증가하는 것으로 나타났고, 석영전이점부근인 573°C를 전후하여 매우 급격한 팽창 거동을 보였다. 익산화강암은 상대적으로 석영함량이 적은 천안석영섬록암에 비해 전 가열온도 구간에서 열팽창량이 크게 나타났으며 따라서 암석의 열팽창은 구성광물의 종류에 의해서 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

Fig. 12에는 상온에서 100°C 간격으로 600°C까지의 각 온도구간별 평균 선열팽창계수를 구간의 중심온도에 암석시료별로 나타내었다. 암석의 선열팽창계수는 뚜렷한 온도의존성을 보여주고 있으며 특히 석영을 함유한 익산화강암과 천안석영섬록암의 선열팽창계수는 온도 증가시 지속적으로 증가하고 있었으며 500°C 이후 대단히 큰폭의 증가를 나타내었다. 두 암석의 선열팽창계수 차이는 이후 열과거 거동연구에서 확인된 바와같이 암석의 열팽창계수가 구성광물의 열팽창 특성이외에 열과거거동에도 큰 영향을 받는데 기인하는 것으로 보인다. 그러나 충주돌로마이트의 선열팽창계수는 250°C 부근

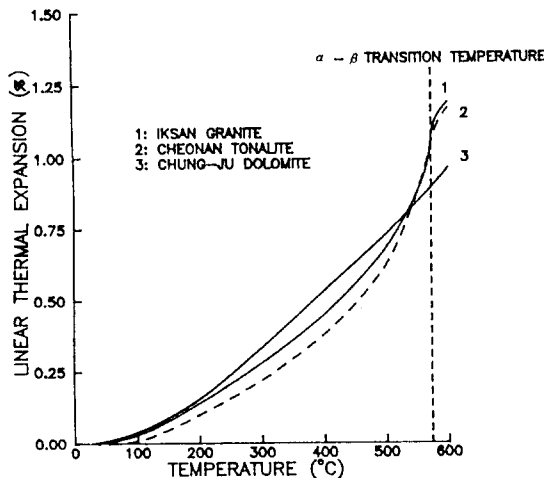


Fig. 11. Linear thermal expansion behavior of samples.

까지 증가 구간을 거쳐 그 이후 대체로 일정한 값을 유지하고 있어 대조를 보이고 있으며 이는 단광물암석의 특징인 선형적 열팽창거동에 기인한 것으로 보인다.

#### 4.2.2. 시료의 이론적 열팽창

본 연구에서는 각 광물의 온도구간별 열팽창량을 직접 사용하기 위하여 (1)식을 다음 식으로 변환하여 각 온도별로 암석의 열팽창량을 우선 계산한 후 이를 이용하여 암석의 이론적 열팽창선도를 구하므로 오차의 발생을 최소화하고자 하였다.

$$\Delta(TE)_m = \frac{\Delta(TE)_i K_i V_i}{\sum K_i V_i} \quad (7)$$

충주돌로마이트의 경우 돌로마이트에 대한 열팽창자료가 전무하여 이론치를 구하지 못하였으며 익산화강암과 천안석영섬록암의 경우 흑운모에 대한 열팽창자료가 거의 없고 사용가능한 자료의 신뢰도가 낮아 흑운모와 기타 소량 수반되는 부구성광물의 체적비에 균등분배하였다. 여기서 각 광물의 체적비는 편광현미경상에서 박편시료를 모드분석한 결과를 적용하였다. 익산화강암과 천안석영섬록암에 대해 Turner의 식을 이용하여 이론치를 구하기 위해 사용된 주구성광물의 체적비, 체적열팽창량, 체적탄성계수 등의 입력자료

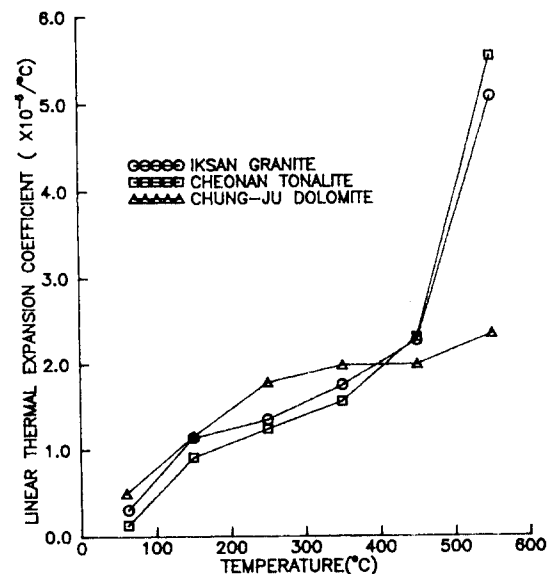


Fig. 12. Average linear thermal expansion coefficients of samples at various temperatures.

를 Table 3과 Table 4에 각각 나타내었다. Table 3과 Table 4의 값을 이용하여 각 온도별로 계산된 시료의 체적 열팽창량의 1/3로서 선열팽창량으로 구한뒤 이를 3차의 내삽최적화로 연속적 선열팽창 선도를 구하였다. (Fig.13) Fig.13 에 나타난 바와같이 상온에서 600℃ 까지 전 가열영역에서 익산화강암의 열팽창량이 천안 석영섬록암보다 크게 나타났으며 이는 열팽창이 대단히 큰 광물인 석영의 함량차에 기인 하는 것으로 보인다. 또한, 익산화강암과 천안석영섬록암 모두 상온에서 500℃ 부근까지는 선열팽창이 온도에 대해 대체로 선형성을 나타내고 있으나 그후 점차 열팽창의 증가폭이 커지면서 석영의 전이점인 573℃를 전후하여 급격한 열팽창을 보인후 다시 급격히 둔화되는 특징을 보였다.

4.3. 반복가열의 영향

본 연구에서는 동일 시편에 대하여  $T_{max}$ 를 증가시키며 가열-냉각을 반복하면서 잔열팽창을 측정하고 전자현미경 관찰에 있어서도 동일열균열에 대한 지속적

관찰을 수행하므로써 실험결과와 일관성과 신뢰성을 높이고자 하였으며, 이를 위하여  $T_{max}$ 를 증가시키며 반복가열하면서 반복가열이 열팽창 및 열과피에 미치는

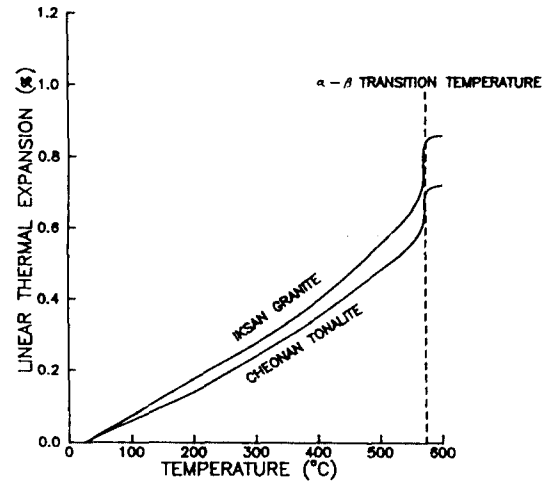


Fig. 13. Theoretically calculated linear thermal expansion behavior of Iksan granite and Cheonan tonalite.

Table 3. Parameters for calculating the theoretical thermal expansion of Iksan granite by Turner's equation.

Mineral	Vol. (%)	K* <sup>1</sup>	Volumetric thermal expansion from 20°C (%) <sup>*2</sup>							
			100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	570°C	580°C	600°C
Quartz	31.4	2.71	0.36	0.78	1.27	1.89	2.70	3.76	4.55	4.54
Plagioclase	28.5	1.45	0.09	0.23	0.41	0.59	0.795	0.939	0.958	1.00
Microcline	31.1	1.92	0.128	0.398	0.521	0.644	0.837	0.971	0.991	1.029
Hornbland	9.0	1.15	0.16	0.42	0.695	0.97	1.275	1.489	1.519	1.58

\*<sup>1</sup> : Data from Bauer & Handin (1983)

\*<sup>2</sup> : Data from Skinner (1983)

Table 4. parameters for calculating the theoretical thermal expansion of Cheonan tonalite by Turner's equation.

Mineral	Vol. (%)	K* <sup>1</sup>	Volumetric thermal expansion from 20°C (%) <sup>*2</sup>							
			100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	570°C	580°C	600°C
Quartz	17	2.71	0.36	0.78	1.27	1.89	2.70	3.76	4.55	4.54
Plagioclase	43	1.45	0.09	0.23	0.41	0.59	0.795	0.939	0.958	1.00
Orthoclase	10	1.92	0.049	0.155	0.370	0.585	0.840	1.005	1.125	1.185
Hornbland	30	1.15	0.16	0.42	0.695	0.97	1.275	1.489	1.519	1.58

\*<sup>1</sup> : Data from Bauer & Handin (1983)

\*<sup>2</sup> : Data from Skinner (1983)

영향에 대하여 규명하고자 하였다.

Fig.14과 Fig.15에는 천안석영섬록암과 충주돌로마이트에 대하여 3℃/분의 가열속도로  $T_{max}$ 를 600℃까지 증가시키며 반복가열한 경우의 팽창-수축선도를 각각 도시하였으며 아울러 600℃까지 1회 가열-냉각한 각 시료의 팽창-수축선도를 함께 도시하였다. Fig.15에 나타난 천안석영섬록암의 경우 300℃의  $T_{max}$ 까지 반복가열선도는 이 온도까지 1회 가열선도와 거의 일치하고 있을뿐 아니라, 팽창선도와 수축선도간의 열히스테리시스도 거의 관찰되지 않아 이 온도까지는 반복가열의 영향이 발생치 않는 것으로 판단된다.  $T_{max}$ 가 350℃를 초과할 경우 반복가열시 열히스테리시스가 나타나기 시작하며 그후  $T_{max}$ 를 증가시키며 반복가열할 경우 대체로 이전 사이클의  $T_{max}$ 까지 팽창선도의 구배는 이전 cycle의 수축선도와 유사하여 1회 가열선도의 구배보다 완만해지며 그후 새로운  $T_{max}$ 까지의 가열구간에서는 1회 가열시의 팽창선도와 대체로 일치하는 경향을 보였다. 열팽창이 급증하고 아울러 열과피 효과가 증대될 것으로 보이는 500℃~600℃ 구간에 있어서 반복가열선도는 1회 가열선도에 비해 열팽창량이 조금 증가되어 나타나고 있으며 600℃에서 최종 선열팽창량은 1.22%로서 1회 가열시 1.17%에 비해 약 4%가량 증가되었다. 또 600℃로부터 상온으로의 수축선도에 있어서 반복가열과 1회 가열의 경우 모두 유사한 경향을 나타내었고 최종 잔류열팽창에 있어서는 반복가열시 0.445%로 나타나 1회 가열시의 0.41%에 비해 약 8% 가량 증가되어

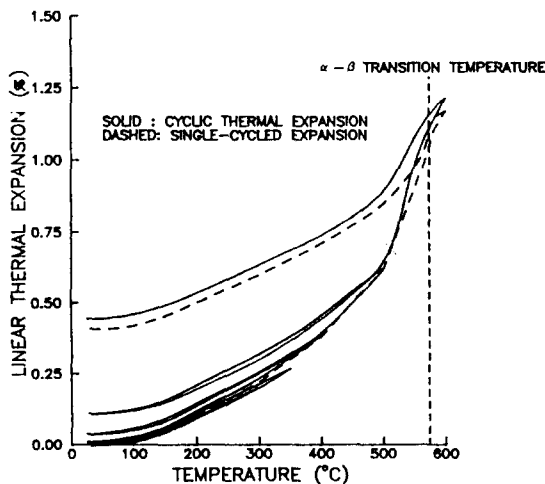


Fig. 14. Linear thermal expansion of Cheonan tonalite cyclically heated to 600°C.

나타났다. 또 충주돌로마이트의 경우도 Fig. 15에 나타난 바와같이 전체  $T_{max}$  구간에 걸쳐 반복가열시 팽창선도의 하부접선은 1회 가열선도와 대체로 유사한 경향을 보였으며, 600℃에서 최종 선열팽창량은 1회 가열시와 거의 일치하고 있었다. 또한 600℃로부터의 냉각선도에 있어서도 반복가열시와 1회 가열시가 대체로 유사한 경향을 보이고 있고 상온에서의 최종 잔류열팽창량에 있어서는 반복가열시 0.258%로서 1회 가열시의 0.237%에 비해 약 9% 가량 증가되어 나타났다.

이상의 결과를 종합해 볼 때 반복가열법의 경우 1회 가열시에 비해 추가적 열팽창 및 열과피 효과가 어느정도 발생하지만 그 차이가 대체로 10% 미만의 소폭이고 또한 이 경우 암석시료의 불균질성에 의한 영향과 측정 오차를 줄일 수 있을뿐 아니라 시험이 간편하다는 장점이 있을 것으로 보이며 특히 전자현미경을 이용한 열과피 거동의 미시적 관찰시  $T_{max}$ 를 증가시키며 동일부위를 계속 관찰하므로써 열균열의 발생 및 전파를 확인할 수 있다는 점에서 유용한 방법이 될 것으로 보인다.

#### 4.4. 잔류열팽창을 이용한 열과피 거동 고찰

열과피 효과의 최종지표가 될 수 있는 가열-냉각 후 영구변형, 즉 잔류열팽창을 이용하여 시료의 열과피 거동을 정량적으로 규명하고자 하였다. Fig. 16에는 익산화강암, 천안석영섬록암 및 충주돌로마이트의 각  $T_{max}$

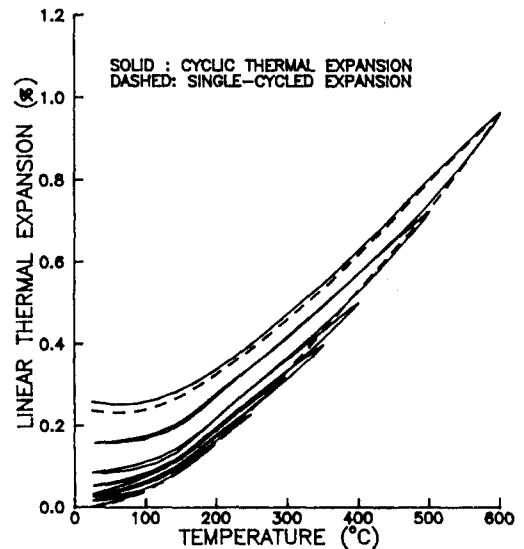


Fig. 15. Linear thermal expansion of Chung-ju dolomite cyclically heated to 600°C.

별 잔류열팽창의 변화를 나타내었으며, 충주돌로마이트는 100℃의  $T_{max}$ 에서 0.01%의 잔류열팽창을 나타내어 100℃의 가장 낮은  $T_c$ 를 나타냈으며 익산화강암의  $T_c$ 는 200℃였고, 천안석영섬록암은 350℃의 가장 높은  $T_c$ 를 보였다. 충주돌로마이트의 경우 100℃의 가장 낮은  $T_c$ 를 보였음에도  $T_c$  이후 약 300℃의  $T_{max}$ 까지 열과괴 진행이 안정상태를 유지하고 있었으며 그후  $T_{max}$ 의 증가와 더불어 선형적인 열과괴 증가를 나타내  $T_{max}$ 가 600℃인 경우 0.258%의 잔류열팽창을 보였다. 이는 소성특징을 지닌 단광물암석의 열과괴특징을 나타내는 것으로 보이며  $T_c$  이후 열과괴의 진행이 가속화되는 취성특성은 익산화강암이나 천안석영섬록암의 경우와 좋은 대조를 이룬다.

충주돌로마이트의 열과괴기구가 단일광물내 열팽창 이방성에 근거하는 반면 익산화강암이나 천안석영섬록암의 경우 인접광물간 열팽창차에 의해 주로 열과괴가 발생하게 된다. 익산화강암이나 천안석영섬록암과 같이 입자간 열팽창차에 의한 열과괴 기구는 2-4-2절의 구형 결정 모델로서 잘 설명될 수 있으며 본 연구결과 익산화강암과 천안석영섬록암의  $T_c$  이후 열과괴의 진행은  $T_{max}$ 가 증가할수록 더욱 급격히 발생하는 경향을 보여주었고 이는 상기한 이론적 배경과 잘 일치하고 있다.

이러한 결정질 화성암의 열과괴 경향은 석영의 전이

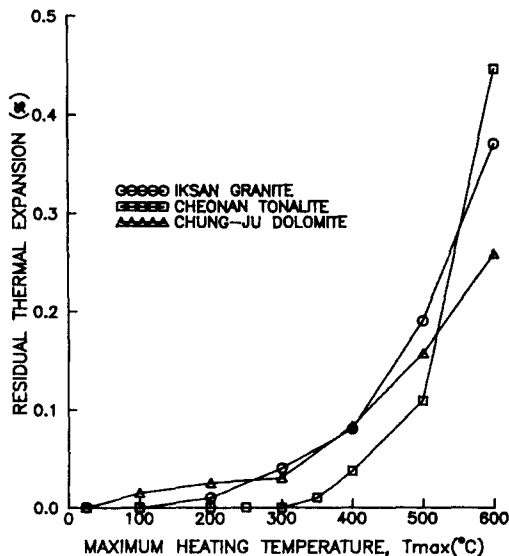


Fig. 16. Residual thermal expansion of samples after cooling from various maximum heating temperatures,  $T_{max}$ .

온도를 포함한 500℃~600℃ 구간에서 더욱 뚜렷이 나타나 잔류열팽창의 급증을 볼 수 있다. 입자가 커서 경계균열이 상대적으로 크고, 석영함량이 높은 익산화강암은 천안석영섬록암보다 낮은  $T_c$ 를 지닐뿐 아니라  $T_{max}$ 가 500℃까지는 더 큰 열과괴 효과를 보여주고 있다. 그러나  $T_{max}$ 가 600℃에서는 천안석영섬록암의 잔류열팽창이 0.445%로 급증하면서 익산화강암의 0.37%보다 오히려 크게 나타나 열과괴 효과가 더 크게 발생하였다. 이는 입자크기나 석영함량 등의 조건을 고려할 경우 익산화강암의 열과괴 효과가 천안석영섬록암보다 클 것이라는 예상과는 다른 결과로서, 이는 이후 전자현미경 관찰결과 확인된 바와같이 가열초기에는 입자경계의 크기가 큰 익산화강암이 열과괴에 대한 저항이 낮지만  $T_{max}$ 가 600℃인 경우 익산화강암은 물론 천안석영섬록암도 입자경계 대부분에 균열이 발달하게 되고 이 경우 오히려 입자크기가 작아서 단위입자경계의 크기는 작지만 시료전체의 입자경계는 더 많이 포함된 천안석영섬록암의 열과괴효과가 더 크게 나타나는 것으로 보인다.

#### 4.5. 열팽창 실측치와 이론치의 비교에 의한 열과괴 거동 고찰

열팽창의 실측치와 이론치를 비교하여 암석의 열팽창과 열과괴과정을 정성적, 정량적으로 규명하기 위하여, Fig. 11에 나타난 시료의 실측 선열팽창선도와 Fig. 13에 나타나 있는 이론적 열팽창선도를 익산화강암과 천안석영섬록암에 대하여 Fig. 17과 Fig. 18에 각각 비교 도시하였다. 익산화강암의 경우 약 300℃, 천안석영섬록암의 경우 약 350℃에서 실측치가 이론치를 초과하게 되는데 상기한 실측치와 이론치간의 차이와 함께 앞 절에서 고찰한 잔류 열팽창을 이용하여 시료의 열팽창 및 열과괴 거동을 정성적, 정량적으로 해석하고자 하였다.

Fig.19에 나타난 것처럼 익산화강암의 경우 점선으로 표시된 실측치와 이론치간 차이를 이용하여 600℃까지의 전 가열영역을  $T_0$ 와  $T_c$ 에 의해 3 구간으로 분류할 수 있었다. 즉, 초기 100℃의  $T_0$ 까지는 무균열 암석을 가정한 이론치가 균열을 함유한 실제암석의 실측치보다 커지는 구간이며, 이후 100℃에서  $T_c$ 인 200℃까지는 실측치와 이론치가 대체로 동일한 열팽창거동을 나타내게 되어 이 차이를 나타내는 점선의 구배가 거의 없는 구간이 된다. 그후  $T_c$ 를 초과하여 가열할 경우 측

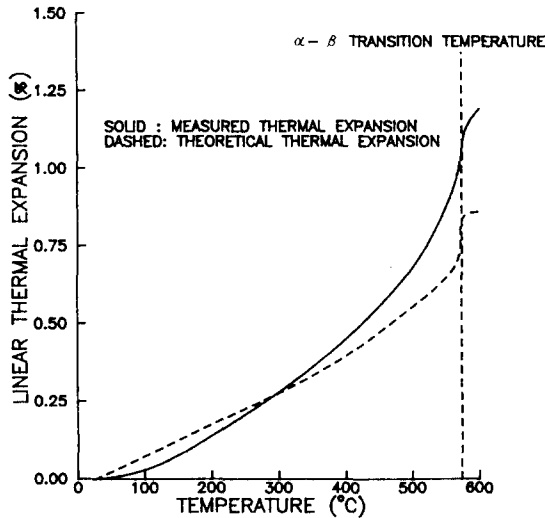


Fig. 17. comparison of measured and theoretical thermal expansion behavior for Iksan granite.

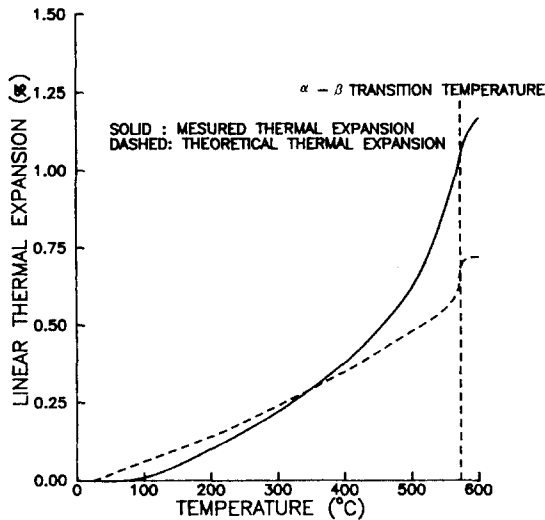


Fig. 18. Comparison of measured and theoretical thermal expansion behavior of Cheonan tonalite.

정치가 열파괴가 발생치 않는다는 가정하에서 얻어진 이론치의 열팽창량을 초과하여 급증하는 구간이 나타난다. 초기의  $T_0$ 까지 음의 기울기를 지니는 구간은 암석의 열팽창량이 이론치보다 작게 나타나게 되는 구간으로서 이는 구성광물의 열팽창에 의해 암석내 기존 균열의 닫힘(closing of microcracks)이 발생되는 구간으로 정의될 수있을 것으로 사료된다. 초기의 균열닫힘과정을 거친 시료는 열파괴 개시 온도인  $T_c$  이전까지 무균열 암석을 가정하여 얻어진 이론적 열팽창과 거의 동

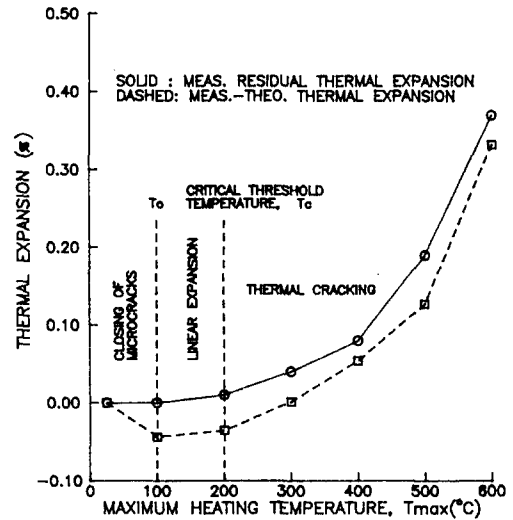


Fig. 19. Thermal cracking behavior of Iksan granite.

일한 열팽창거동을 보이게 되며 이 구간을 선형팽창(linear expansion)구간으로 정의하였다. 익산화강암에서 100°C에서  $T_c$ 인 200°C까지의 이러한 선형열팽창 구간은 실측치와 이론치간 열팽창량차의 기울기가 거의 없게 나타나며, 이후  $T_c$ 를 초과하여 가열될 경우 양의 기울기로 전환하게 된다. 이 현상은 실측열팽창이 이론열팽창을 초과하였음을 의미하게 되며 이는 열파괴에 따른 열균열 형성에 의한 결과에 기인한다. 따라서 이 구간에서는 실측치와 이론치간의 차이가 잔류열팽창 즉 열파괴량의 변화경향과 거의 일정한 차이를 지닌 매우 유사한 경향을 나타내며 이 일정한 차이는 초기가열시의 균열닫힘현상을 반영하는 것으로 보인다.

Fig. 20 에는 천안석영섬록암의 경우에 있어서 이론치와 실측치간 차이를 도시하고 잔류열팽창과 비교하였으며 역시 앞서 고찰한 익산화강암의 경우와 대체로 유사한 경향을 나타내고 있다. 100°C의  $T_0$ 에서 열파괴 개시온도인 350°C의  $T_c$ 까지는 Fig. 21의 실측치와 이론치간의 차이를 나타낸 점선의 구배가 거의 없거나 대단히 완만하여 대체로 선형팽창 구간으로 볼 수 있을 것으로 생각된다 또, 350°C의  $T_c$  이후 열균열의 전파와 더불어 실측치와 이론치간 차이의 구배가 급격한 증가를 보이고 있으며, 그 경향은 역시 열파괴량을 의미하는 실선으로 표시된 잔류 열팽창량의 변화경향과 거의 일치하여 시료의 열파괴 거동을 잘 나타내고 있었다. 단 천안석영섬록암의 경우 열팽창의 실측치와 이론치

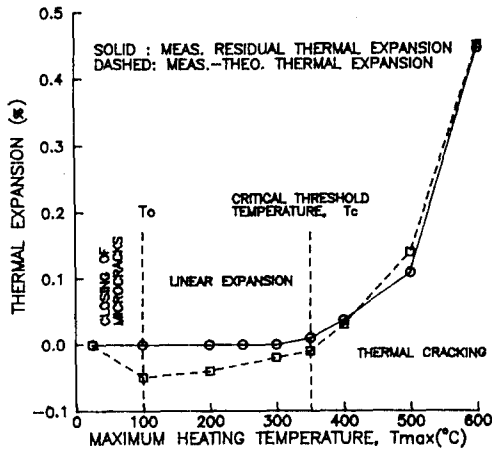


Fig. 20. Thermal cracking behavior of Cheonan tonalite.

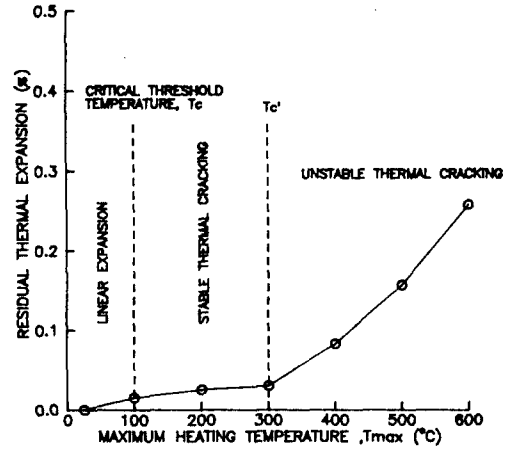


Fig. 21. Thermal cracking behavior of Chung-ju dolomite.

간의 차이가 초기의 균열단합량을 제대로 반영하고 있지 못하지만 전체 열파괴량 0.45%에 비해 초기의 균열단합량이 상대적으로 매우 작고, 이론치가 암석의 전체 열팽창 거동을 완벽하게 반영하지 못하고 있는데 그 원인이 있는 것으로 사료된다.

Fig.21에는 충주돌로마이트의 경우로서 충주돌로마이트는 이론치를 구하지 못하였으므로 잔류열팽창의 변화경향만으로서 열팽창과 열파괴 거동을 구분하고자 하였다. 여기에서 충주돌로마이트는 전체 공극율이 0.11%로서 대단히 작은 값이고 또 이중에서 균열공극율은 더욱 낮은 값일 것이므로 대체로 무균열 암석으로 보아도 무방할 것으로 사료되며, 이는 이후 시료의 전자 현미경 관찰에서도 확인되었다. 따라서 충주돌로마이트의 경우 초기의 열팽창에 의한 균열단합과정은 나타나지 않을 것으로 생각되며 이에 따라 상온에서  $T_c$ 인 100°C까지 가열구간은 선형팽창 구간으로 볼 수 있을 것으로 생각된다. 100°C의  $T_c$  이후 충주돌로마이트의 열파괴 진행양상은 서로 다른 양상의 2개 구간으로 뚜렷이 구분되었으며 즉, 100°C에서 열파괴 개시 후 약 300°C 까지의 구간은 잔류열팽창의 증가가 대단히 완만하여 이 구간은 앞서 4-4절에서 고찰한 바와같이 안정 열파괴(stable thermal cracking) 구간으로 생각되고, 300°C를 초과하여 가열시 잔류열팽창 변화에 있어서 기울기가 급증하여 대체로 선형적으로 증가되는 구간을 보이게 되는데 이 구간은 불안정열파괴(unstable thermal cracking) 구간으로 볼 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 300°C는 충주돌로마이트의 열파괴거동을 안정구간과 불안정구간으로 구분할 수 있는 새로운 임

계온도  $T_c'$ 으로 나타낼 수 있을 것으로 생각되며 이러한 현상은 미세립의 연결 광물인 돌로마이트의 소성거동에 의한 현상으로 판단된다.

#### 4.6. 주사전자현미경 관찰에 의한 열파괴 거동 고찰

본 연구에서는 앞서 검토한 반복가열법을 이용하여 전자현미경 관찰용의 동일시편을 200, 400, 600°C의 다양한  $T_{max}$ 까지 순차적으로 반복가열하며 동일 부위 균열들의 성장 확대 전과 등을 관찰하며 암석의 열파괴 단계에 따른 열균열 형성과정을 검토하였다.

##### 4.6.1. 익산화강암

익산화강암을 600°C까지 여러단계로 가열하며 관찰한 전자현미경 사진이 Fig. 22~Fig. 23에 나타나 있다. Fig. 22의 (b)는 (a)에 나타난 원래시료를 200°C까지 가열-냉각 후의 사진으로서 국부적으로 열균열의 형성이 관찰되기 시작하고 있으며 이는 앞서 고찰한 바와 같이 익산화강암의  $T_c$ 가 200°C라는 것과 잘 일치되는 결과이다.  $T_c$ 부근에서 관찰되는 이러한 열균열은 폭 1  $\mu m$  이내로서 대체로 직선적인 입자경계를 따라 발생하는 경계균열(grain boundary crack)이고 균열주변의 소성영역 형성은 광물 상호간 열팽창차에 의한 경계 전단응력을 상당수준 받았음을 의미한다. Fig. 22의 (c)는 400°C로 가열된 시편으로서 경계균열의 폭이 약 5  $\mu m$ 까지 확대되고 2 결정 모델에 의한 입자내 균열도 관찰된다. Fig. 23의 (b)는 원래 시료 (a)를 400°C로 가열한 모습으로서 역시 입자경계 균열의 형성을 확인할 수 없었으며 소성영역의 형성은 뚜렷하지 않았다. Fig. 23의 (c)는 600°C까지 가열한 모습으로서 사진의 좌측하단부

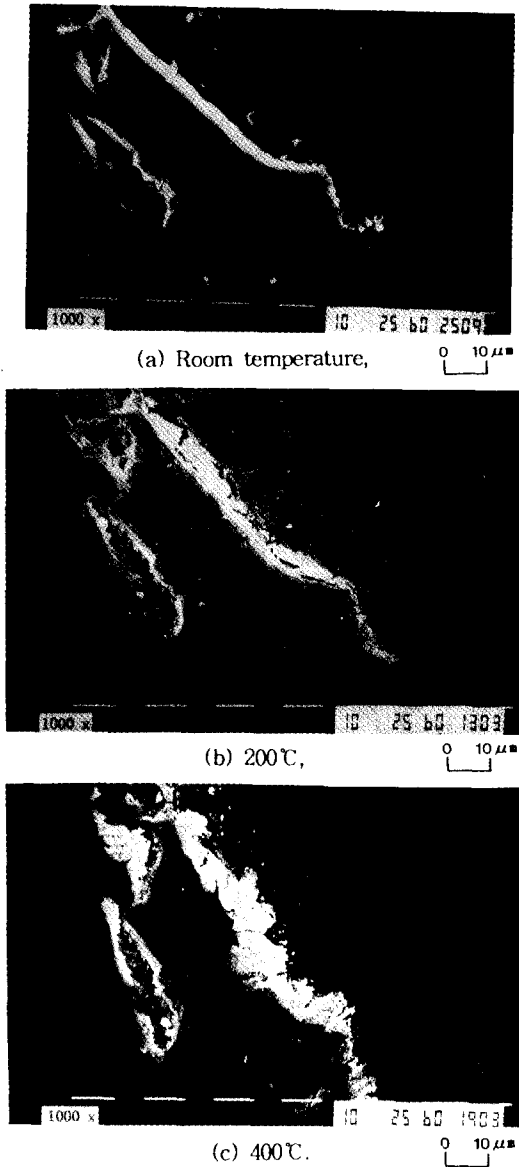


Fig. 22. Scanning electron microphotographs of Iksan granite heated to various  $T_{max}$  :

에 나타나 있는 경계균열은 폭이 5 μm 이상으로 확대되어 나타나고 있다. 600°C에서 익산화강암의 광물간 경계는 대부분 폭 4~8 μm 가량의 열균열이 형성되어 있었으며 이러한 경계균열은 대부분 서로 연결되어 있었다.

4.6.2. 천안석영섬록암

Fig. 24와 Fig. 25는 천안석영섬록암을 상온에서부터 600°C까지 가열한 후 관찰한 전자현미경 사진이다.

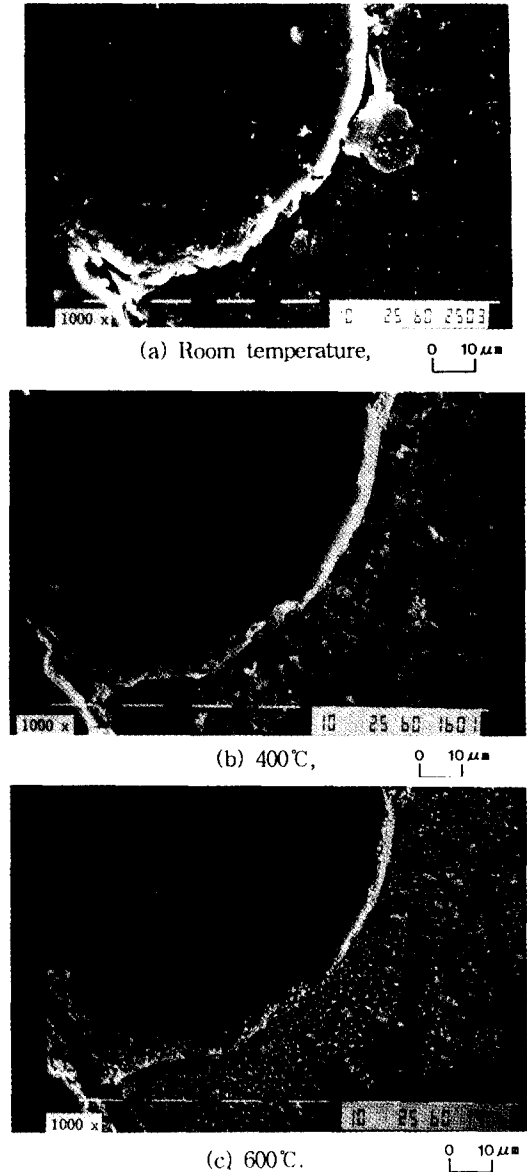


Fig. 23. Scanning electron microphotographs of Iksan granite heated to various  $T_{max}$  :

Fig. 24의 (a)는 상온에서 관찰된 모습으로서 중앙에 한 방향으로 벽개면을 잘 보여주는 흑운모가 있다. Fig. 24의 (b)는 200°C까지 가열 후 관찰한 모습으로서 상온에서와 비교하여 거의 변화가 없으며, 다만 흑운모가 연질 광물임에 따라 그 주변부에 약간의 소성영역이 관찰된다. Fig. 24의 (c)는 400°C까지 가열한 시료의 모습으로서 여기서는 뚜렷한 열균열의 형성을 확인할 수 있었으며 시료의 우측상부에 형성된 입자경계 균열과

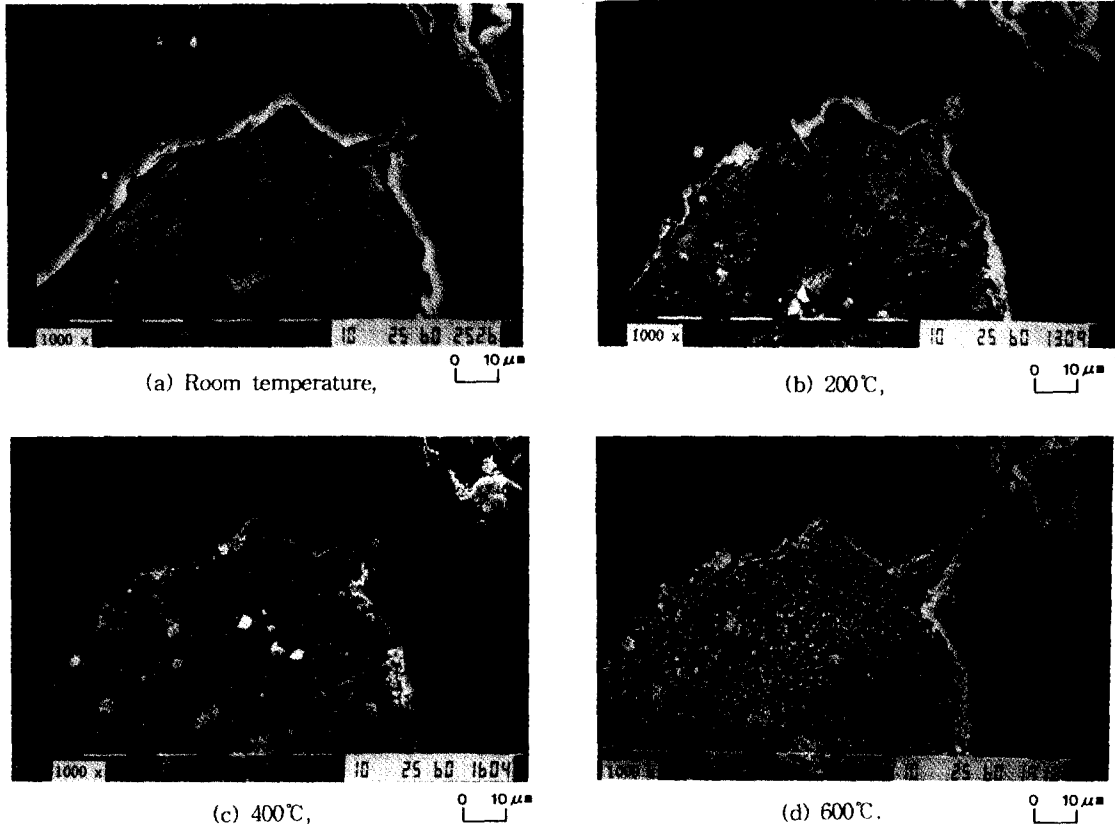


Fig. 24. Scanning electron microphotographs of Cheonan toelite heated to various  $T_{max}$  :

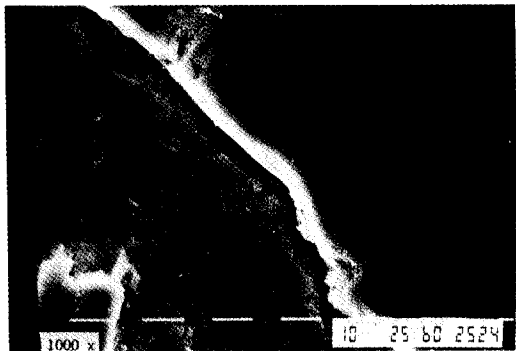
더불어 미세하지만 흑운모내 벽개면의 확장도 관찰할 수 있다. 또, Fig. 24의 (d)는 600°C까지 가열한 경우로서 사진 우상부 입자경계 균열의 급격한 확장을 관찰할 수 있으며 경계면에서 수직으로 입자내 균열의 형성도 관찰된다. Fig. 25의 (b)는 원시료 (a)를 400°C 까지 가열한 경우로서 역시 경계균열형성이 관찰되고 600°C 까지 가열한 (c)의 경우 경계균열의 폭이 약 3 μm까지 확대 되고 입자내 균열이 관찰된다. 천안석영섬록암은 350°C의 가장 높은  $T_c$ 에도 불구하고 600°C에서 익산화강암보다 열과괴가 크게 나타났으며, 이는 열과괴 주요 요인인 경계균열에 있어서의 그 폭은 익산화강암 보다 조금 작았으나 입자크기가 상대적으로 작은 천안석영섬록암의 경계균열이 더 많이 발생되는 데에 그 원인이 있는 것으로 나타났다.

#### 4.6.3. 충주돌로마이트

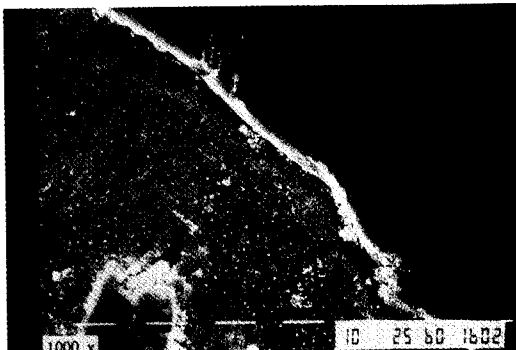
충주돌로마이트는 연질광물인 돌로마이트로 구성된 단광물 암석으로서 균열을 거의 함유하지 않은 암석이

며  $T_c$ 인 100°C를 초과하여 200°C까지 가열된 경우에도 국부적 소성영역만이 확인될뿐 뚜렷한 열균열의 형성이 관찰되지 않았다. 이는 충주돌로마이트의 입자크기가 대단히 작고 연질광물인 돌로마이트의 소성특성에 그 원인이 있는 것으로 보인다. 그러나 불안정한 열과괴구간인 300°C의  $T_c$ 를 초과할 경우 400°C까지 가열한 시료의 사진인 Fig. 26의 (b)에 나타난 바와같이 소성영역의 확대와 더불어 미세한 경계균열이 형성되었고 이후 가열온도가 600°C인 경우 Fig. 26의 (c)와 같이 경계균열의 형성이 뚜렷해질뿐 아니라 그 발생빈도가 크게 높아졌다. 폭 1 μm이하의 경계균열은 광물의 소성특성을 뚜렷하게 보여주고 있으며 균열의 상호 연결성은 적었다. 단광물 암석인 충주돌로마이트는 동일광물의 열팽창 이방성에 의해 열균열이 전파되는데, 이러한 종류의 열균열은 익산화강암이나 천안석영섬록암의 경계균열의 형성과정, 즉 취약한 경계면을 일시에 파괴시킨 후 균열폭의 확장상호연결이 이루어지는 것과 달

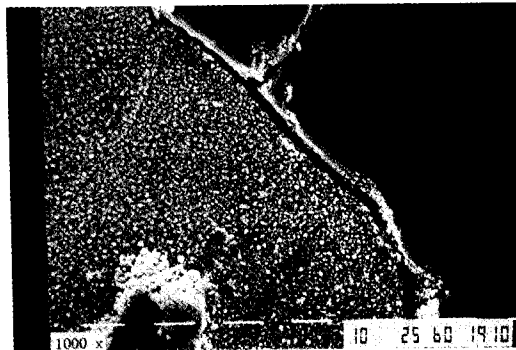




(a) Room temperature, 0 10 μm



(b) 400°C, 0 10 μm



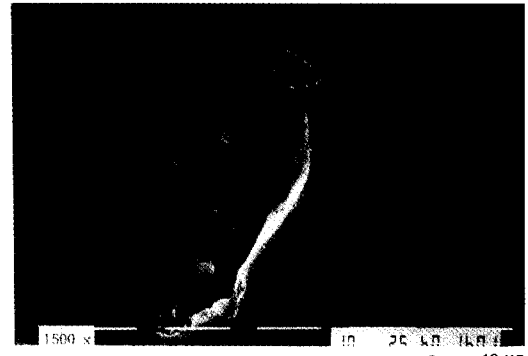
(c) 600°C, 0 10 μm

Fig. 25. Scanning electron microphotographs of Cheon tonalite heated to various  $T_{max}$  :

리 온도상승에 따라 비교적 느린 속도로 점진적으로 진행되어 나간다는 것을 알 수 있었다.

### 5. 결 론

1. 1~10°C/분의 가열속도 범위에서 가열속도에 따른 열충격은, 3°C/분 이하의 가열속도에 미치는 방지되고,



(a) Room temperature, 0 10 μm



(b) 400°C, 0 10 μm



(c) 600°C, 0 10 μm

Fig. 26 Scanning electron microphotographs of Chung-ju dolomite heated to various  $T_{max}$  :

5°C/분 이상의 가열속도에서 그 효과가 발생되어 가열속도가 증가할수록 선형적으로 증가하는 것으로 밝혀졌다.

2. 암석의 열팽창기동에 영향을 미치는 주요요소는 구상광물, 균열공극물, 열파괴, 열충격등으로서 특히 석영은 큰 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다. 석영을 함유한 화강암질의 복광암인 이산화강암이나 천안석영섬록암

의 선열팽창계수는 온도상승시 지속적으로 증가하였고 특히 석영의 전이온도 구간인 500~600℃ 구간에서 급격한 증가를 보인 반면, 석영을 함유치않은 단광암인 충주돌로마이트의 선열팽창계수는 250℃까지 증가한 후 그 이상의 온도에서는 대체로 일정한 값을 나타내었다.

3. 최고가열온도 ( $T_{max}$ )를 증가시키는 반복가열은 암석고유의 임계열과괴온도 ( $T_c$ )에 영향을 주지않았고  $T_c$  이후 반복가열시에도 이전 가열온도 구간에서 이미 발생된 이상의 추가적인 열과괴는 소량이거나 거의 발생치 않는것으로 밝혀졌다.

4. 암종별 임계 열과괴온도 ( $T_c$ )는 돌로마이트 100℃, 화강암 200℃, 석영섬록암 350℃로 각각 밝혀졌으며 이는 열과괴기구, 석영의 함량, 광물입자 및 경계균열의 크기 등에 주된 영향을 받는 것으로 밝혀졌다. 임계 열과괴온도 이후, 석영을 함유하고 취성적 열과괴 특성을 보이는 화강암과 석영섬록암은 가속적으로 열과괴가 크게 발생하였으며, 임계온도 ( $T_c$ )는 높지만 경계균열의 빈도가 큰 석영섬록암의 열과괴가 600℃에서는 다소 크게 발생하였다. 소성적 열과괴거동을 보인 돌로마이트는 300℃의 새로운 임계온도( $T_c$ )까지 안정적인 구간을 보이고 그후 실질적인 열균열이 형성되었으나 열과괴량은 상대적으로 적었다.

5. 무균열 복합물체이고 열과괴가 발생하지 않는다는 가정하에서 Turner의 식을 이용하여 구한 암석의 이론적 열팽창과 실측된 열팽창과의 차이는 암석의 열팽창과 열과괴거동을 예측하고 정성적, 정량적으로 판단할 수있는 유용한 지표가 되었으며, 각 암석별로 전체열팽창거동을 암석내 기준균열의 단침구간 (상온~ $T_c$ ), 그후 임계열과괴온도까지의 이론치와 동일한거동을 보이는 선형적 팽창구간 ( $T_0$ ~ $T_c$ ), 임계 열과괴온도 이후의 열과괴 구간등 3 단계거동으로 분류할수 있었다.

6. 주사전자현미경 관찰결과 화강암과 석영섬록암은 임계열과괴온도 ( $T_c$ ) 이후 구형결정모델에 따른 폭 1  $\mu\text{m}$  내외의 취성적 입자경계균열의 형성이 먼저 관찰되었고 600℃ 까지 온도증가에 따라 그 폭이 3~8  $\mu\text{m}$  까지 확대되고 상호 연결되었으며, 2 결정모델에 의한 입자내 균열은 400℃~600℃ 에서 발생하기 시작하였으나 상호연결성은 크지 않았다. 돌로마이트는 소성적 열과괴특징과 다결정모델에 의한 점진적 열과괴 특성을 나타내어 400℃ 이후 열균열의 형성이 관찰되었고 600℃ 에서도 경계균열폭이 1-2  $\mu\text{m}$  정도였고 발생된 열균열간의 상호연결성도 크지 않았다.

## 참 고 문 헌

- 1) Friedman, M. and Johnson, B., 1978, "Thermal cracks in unconfined Sioux quartzite", Proc. 19th US Symp. on Rock Mech., pp.423~430.
- 2) Yong, C. and Wang, C., 1980, "Thermally induced acoustic emission in Westerly granite", Geophys. Res. Lett., Vol.7, pp.1089~1092.
- 3) Bauer, S.J. and Handin, J., 1983, "Thermal expansion and cracking of three confined, water-saturated igneous rocks to 800℃", Rock Mech. and Rock Eng., Vol.16, pp.181~198.
- 4) Van Der Mollen, I., 1981, "The shift of the  $\alpha$ - $\beta$  transition temperature of quartz associated with the thermal expansion of granite at high pressure", Tectonophysics, Vol.73, pp.323~342.
- 5) Homand, F. and Troalen, J.P., 1984, "Behavior of granites and limestones subjected to slow and homogeneous temperature changes", Eng. Geology, Vol.20, pp.219~233.
- 6) Kingery, W.D., Bowen, H.K. and Uhlmann, D.R., 1976, "Introduction to ceramics", John Wiley & Sons, 2nd Edit., 1032p.
- 7) Johnson, B., Gangi, A.F. and Handin, J., 1978, "Thermal cracking of rock subjected to slow uniform temperature changes", Proc. 19th US Symp. on Rock Mech., pp.259~267.
- 8) Davidge, R.W., 1981, "Cracking at grain boundaries in polycrystalline brittle materials", Acta Metal., Vol.29, pp.1696~1702.
- 9) Evans, A.G., 1978, "Microfracture from thermal expansion anisotropy-I, Single phase systems", Acta Metal., Vol.26, pp.1845~1853.
- 10) Clarke, D.R., 1980, "Microfracture in brittle solids resulting from anisotropic shape changes", Acta Metal., Vol.28, pp.913~924.
- 11) Fredrich, J.T. and Wong, T.F., 1986, "Micromechanics of thermally induced cracking in three crustal rocks", J. Geophys. Res., Vol.91, pp. 12743~12764.
- 12) 이정인, 이기형, 이형원, 이상돈, 1991, "고온하의 석재물성연구", 대한광업진흥공사, pp.1~92. 이기형, 이형원, 신재섭, 1990, "화강암질 석재의 열과괴 특성연구", 한국자원공학회지, Vol.27, pp.31~42.
- 13) Homand, F. and Houpert, R., 1989, "Thermally

- induced microcracking in granites : Characterization and analysis", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.26, pp.125~134.
- 14) 이형원, 1993, "암석의 열파괴와 강도 및 변형거동의 온도의존성에 관한 연구", 서울대학교 대학원 박사학위 논문
- 15) 정재훈, 1992, "고온하에서 섭록암의 역학적 거동에 관한 연구", 서울대학교 대학원 석사학위 논문, 91p.
- 16) Chen, C.N., 1991, "Microcrack characterization and the fracture mechanism of damaged rock", Ph.D. Thesis, University of Minnesota, 134p.
- 17) Clark, V.A., Spencer, T.W. and Trittman, B.R., 1981, "The effect of thermal cycling on the seismic quality factor  $Q$  of some sedimentary rocks", *J. Geophys. Res.*, Vol.86, pp.7087~7094.
- 18) Cooper, H.W. and Simmons, G., 1977, "The effect of cracks on thermal expansion of rocks", *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol.36, pp.404~412.
- 19) Durham, W.B. and Abey, A.E., 1981, "The effect of pressure and temperature on thermal properties of a salt and a quartz monzonite", *Proc. 22nd US Symp. on Rock Mech.*, pp.85~90.
- 20) Gangi, A.F., 1980, "Thermal cracking of nonuniformly heated, thick-walled hollow cylinders of Westerly granite", *Proc. 21st US Symp. on Rock Mech.*, pp.197~206.
- 21) Goetze, C., 1971, "High temperature rheology of Westerly granite", *J. Geophys. Res.*, Vol.76, pp. 1223~1230.
- 22) Handin, J., Friedman, M. and Johnson, B., 1977, "Study, evaluate, measure and calculate the thermal cracking of rocks", *US Air Force Geophys. Laboratory, AFGL-TR-77-0122*, 77p.
- 23) Heard, H.C., 1980, "Thermal expansion and inferred permeability of Climax quartz monzonite to 300°C and 27.6MPa", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.17, pp. 289~296.
- 24) Kranz, R.L. 1983, "Microcracks in rocks : A review", *Tectonophysics*, Vol.100, pp.449~480.
- 25) Lehnhoff, T.F. and Scheller, J.D., 1975, "The influence of temperature dependent properties on thermal rock fragmentation", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.12, pp. 255~260.
- 26) Myer, L. and Rachiele, R., 1981, "Laboratory investigations of thermomechanical properties of Stripa granite", *Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-13435*, 192p.
- 27) Siegfried, R. and Simmons, G., 1978, "Characterization of oriented cracks with differential strain analysis", *J. Geophys. Res.*, Vol.83, pp. 1269~1278.
- 28) Skinner, B.J., 1966, "Thermal expansion", *Handbook of physical constants, Geological Society of America, Memoir.97*, pp.75~96.