

암석의 물리적 특성 변화에 대한 온도의 영향

김재환* · 이명성 · 이미혜 · 이재만 · 박성미

국립문화재연구소 보존과학연구실

A Study on Effects of Temperature for Physical Properties Change of rocks

Jae Hwan Kim*, Myeong Seong Lee, Mi Hye Lee, Jae Man Lee and Sung Mi Park

Conservation Science Division, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 305-380, Korea

요약: 암석의 물리적 특성 변화에 대해 온도의 영향을 연구하기 위해 2종의 화강암류와 대리암, 사암을 전기로에서 400°C와 600°C로 가열하였다. 모든 시료에서 가열 후 물리적 특성(비중, 공극률, 흡수율, 초음파속도)과 색상 변화는 보이나, 편광현미경을 이용한 광물학적 변화는 뚜렷하지 않다. 특히 물리적 특성 변화에서 공극률과 흡수율은 증가하고, 비중과 초음파 속도는 감소하는 경향을 보이며, 온도가 증가할수록 변화폭은 크게 나타난다. 여기서 측정된 공극률은 암석의 전체 공극률을 반영하지 못하고 있으나 온도에 의한 암석의 표면 상태 변화를 반영한다. 반면 초음파 속도는 암석의 전체적인 손상 정도를 파악하는데 유용하다. 그러므로 온도에 의한 암석의 물리적 특성 변화를 설명하기 위해 공극률과 초음파 속도는 상호 비교해야 한다.

핵심어: 온도, 물리적 특성, 공극률, 전체 공극률, 초음파 속도

Abstract: Samples (two granites, marble, sandstone) were heated in an electric furnace at temperature 400°C and 600°C in order to investigate the change of physical properties of rocks depending on the heating temperature. Changes of Color and physical properties such as specific gravity, porosity, absorption, p-wave velocity are visible while mineralogical changes by using polarizing microscope are not pronounced. In addition, porosity and absorption increased while specific gravity and p-wave velocity decreased at a more higher temperature (600°C). Although the open porosity does not indicate total porosity of the rock, but p-wave velocity can be used to evaluate the degree of damage Therefore, porosity and p-wave velocity should be compared in order to investigate the change of physical properties of rocks depending on the heating temperature.

Key words: temperature, physical properties, porosity, total porosity, p-wave velocity

서 론

미세균열과 공극은 암석 내부에 분포하고 있으며, 양 및 분포특성은 암석의 물리적 특성에 영향을 미치고 있다. 새로운 균열의 생성 및 기존에 있던 균열들의 발달과 같은 암석 미세구조(micro-structure)의 변화는 공극의 부피를 증가시킨다. 미세균열과 공극이 계속적으로 발달하게 되면 암석이 파괴에 도달한다. 이러한 암석의 파괴는 흔히 역학적, 열적, 화학적 응

력(Stresses)하에서 발생하게 된다. 따라서 다양한 응력하에서 손상 과정을 이해하고, 미세균열의 발달을 예측하기 위해서 암석들의 미세구조와 물리적, 역학적 특성에 관한 연구는 중요하다(S. Chaki, M. Takarli, W.P. Agbodjan, 2008; H. Yavuz, S. Demirdag, S. Caran, 2010). 암석의 미세구조 변화에 미치는 다양한 응력 중에서 온도변화는 광물학적으로 암석을 구성하는 광물의 다양성 및 상전이 때문에 암석 내에서 미세균열이 발생하게 된다고 보고되었으며, 이러한 암석의 열적 손상을 분석하기 위해 많은 연구가 진행되어 왔다(Darot M, Reuschle T, 2000; Chaki S, Takarli M, 2008; Lion M, Skoczylas F, Ledesert

*Corresponding author
Tel: 042-860-9484
E-mail: kjh00@gnu.ac.kr

B, 2005; Fredrich JT, Wong T, 1986; Ferrero AM, Maarini P, 2001; David C, Menendez B, 1999). 이 연구에서는 암석의 물리적 특성 변화에 대한 온도의 영향에 대해 알아보기 위해 400°C와 600°C로 가열처리한 후 물리적 특성 변화를 비교하였다.

암석 기재

이번 연구에 사용된 시료는 2종의 화강암류와 대리암, 사암이다. 2종의 화강암류는 남산화강암과 익산화강암이며, 대리암은 정선대리암, 사암은 영양사암이다 (Fig 1). 육안과 편광현미경분석을 통해 각 암석을 구성하고 있는 광물의 종류를 파악하였다. 남산화강암은 알칼리장석화강암이며 우백질의 중·조립질 암석으로서 구성광물은 알칼리장석, 석영, 사장석, 흑운모, 불투명광물로 이루어져 있다(Fig. 1A). 익산화강암은 흑운모화강암이며 회백색의 중·조립질 화강암으로서 구성광물은 석영, 알칼리장석, 사장석, 흑운모, 불투명광로 이루어져 있다(Fig. 1B). 정선대리암은 등립질의 방해석이 주구성광물이며 방해석 입자 사이에 세립질의 석영 입자가 관찰된다(Fig. 1C). 영양사암은 석영과 장석류가 주구성광물로 이루어져 있다(Fig. 1D).

물리적 특성

2종의 화강암류, 대리암, 사암 시료를 코어 시추기를 이용하여 원주형 코어시료로 제작하였다. 원주형

코어시료는 절단기를 사용하여 상하의 절단면이 시편 축에 직각이 되도록 절단하였으며 각각의 암석시료는 직경과 길이의 비가 약 1:2가 되도록 54 mm×108 mm (직경×길이)로 제작하였다. 제작된 시료수는 암종별 56개로 총 224개이다. 기본적인 물성은 ASTM C97/C97JM과 ISRM에서 제시하고 있는 방법으로 측정하였으며, 초음파 속도는 CNS Famell에서 제조된 pundit plus를 이용하였다.

화강암의 물리적 특성 중에서 P파속도와 공극률 사이에서 가장 좋은 상관관계가 나타나며, 현미경과 육안관찰에 의한 풍화도에도 가장 좋은 상관도를 보여 암석강도 측정치 이상으로 효과적인 풍화기준이 될 수 있는 것으로 보고하였다(김영하, 장보안, 1992). 따라서 전체시료에 대한 공극률과 초음파 속도를 측정하였다(Fig. 2). 공극률과 초음파 속도는 동일한 암석일지라도 풍화 정도 및 암석 내부에 존재하는 균열의 발달정도에 따라 변하기 때문에 값의 차이를 보이고 있다(Fig. 2). 이에 온도에 의한 암석의 물리적 특성 변화를 살펴보기 위해 암석별로 상대적으로 공극률이 낮고, 초음파 속도가 높은 A그룹과 공극률이 높고, 초음파 속도가 낮은 B그룹으로 세분하였다(Table 1).

암석에 대한 가열처리

암석에 대한 가열처리는 가열과 냉각 과정을 통해 이루어졌으며, 가열조건을 설정하는데 있어 가열속도, 온도, 유지시간, 반복횟수, 냉각방식 등이 고려되었다

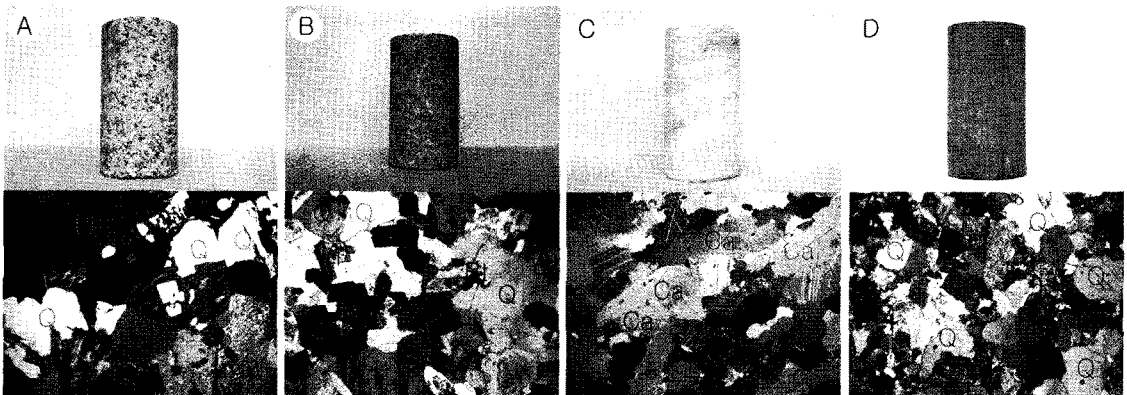


Fig. 1. Photographs of rock surface and thin section of the samples. (A) Namsan Alkali-feldspar granite, (B) Igsan Biotite granite, (C) Jeongseon Marble, (D) Youngyang Sandstone. Q: Quartz; Pl, Plagioclase; Af, Alkali-feldspar; Bt, Biotite; Mu, Muscovite; Ca, Calcite.

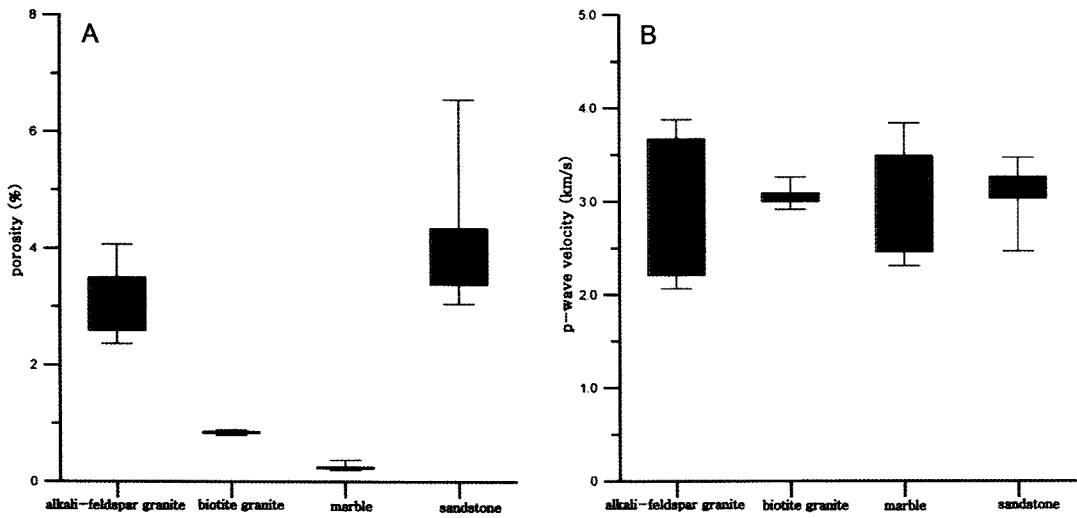


Fig. 2. porosity(%) and p-wave velocity(km/s) of rocks before heating treatment. A, porosity(%); B, p-wave velocity(km/s).

Table 1. Physical properties of rock samples before heating treatment

Rock Class	Sample	Group	Specific Gravity	Open Porosity (%)	P-wave velocity (m/s)
Igneous	Alkali-feldspar granite	A	2.57	2.59	3654
		B	2.53	3.47	2430
Igneous	Biotite granite	A	2.66	0.83	3096
		B	2.66	0.85	2999
Metamorphic	Marble	A	2.73	0.23	3647
		B	2.73	0.26	3463
Sedimentary	Sandstone	A	2.48	3.46	3254
		B	2.39	5.04	2923

(Fig. 3). 가열과정에서 가열온도는 400°C, 600°C로 하였으며, 이는 열특성에 가장 큰 영향을 미치는 광물, 석영의 α - β 전이점(573°C)을 고려하였다. 가열속도는 열적 효과가 뚜렷하다고 보고된 10°C/min(이형원, 이정인, 1995), 가열유지시간은 120분으로 동일하게 적용하였다. 가열유지시간은 연구자에 따라 30분에서 4시간까지 주장이 조금씩 차이를 보이고 있으나 국내 화강암에 대한 열과괴 연구결과 1시간 이상에서 대체로 온도구배에 의한 영향이 무시될 수 있는 것으로 보고되고 있다(윤용균, 2004). 냉각과정은 가열이 끝난 시험편을 전기로의 전원을 끈 후 전기로에 그대로 방치하여 자연적으로 냉각이 되도록 하였다. 이러한 예열조건을 충족하기 위해서 예열속도, 온도, 유지시간, 반복회수 등을 자동적으로 조절할 수 있는 프로그램 입력식 자동조절 전기로를 이용하였다.

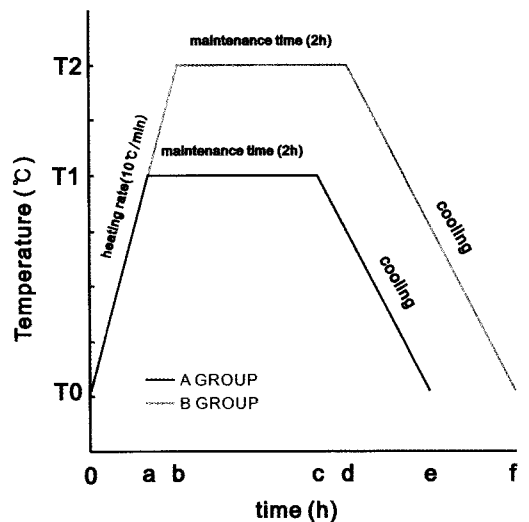


Fig. 3. Condition of heating treatment test. T₀, Beginning Temperature; T₁, 400°C; T₂, 600°C.

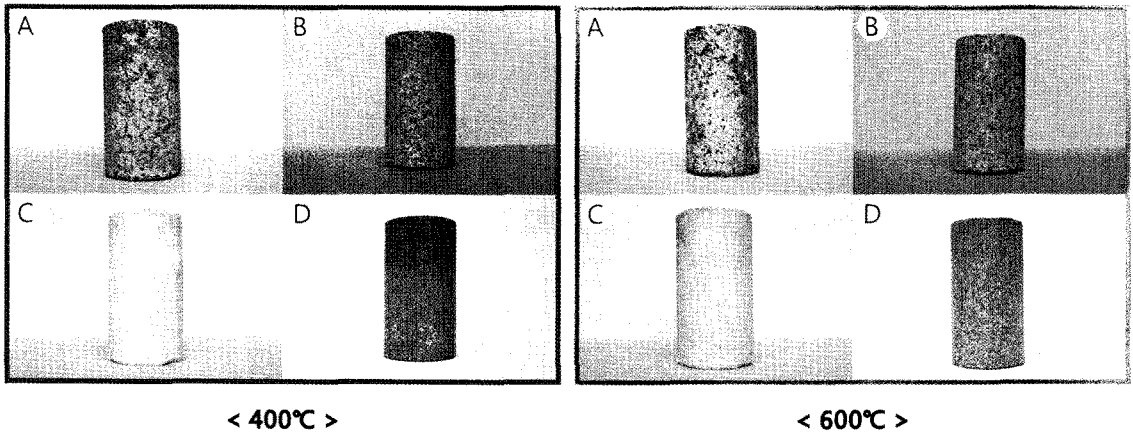


Fig. 4. Color change according to rocks and temperature. (A) Namsan Alkali-feldspar granite, (B) Igsan Biotite granite, (C) Jeongseon Marble, (D) Youngyang Sandstone.

Table 2. Color measurement of before and after heating treatment

Rock	Temperature	L_1^*	a_1^*	b_1^*	L_2^*	a_2^*	b_2^*	ΔE
Alkali-feldspar granite	400	70.45	2.30	8.39	67.68	6.17	9.29	5.58
	600	72.31	2.21	9.27	70.89	6.73	9.97	5.90
Biotite granite	400	71.97	-0.47	0.23	73.81	0.19	2.28	3.09
	600	72.17	-0.43	0.31	75.49	1.07	4.06	3.09
Marble	400	81.6	-0.40	1.42	83.64	0.52	3.22	3.47
	600	82.05	-0.72	1.12	82.10	1.50	6.62	6.51
Sandstone	400	66.02	3.37	4.02	65.89	7.80	8.33	7.19
	600	61.26	4.08	5.29	62.62	9.36	9.85	7.65

연구 결과

색상 변화

색차(color difference)란 두 색의 차이를 시각적 개념에서 수치적 개념으로 표현한 것으로 색 공간 좌표에서 두 색의 기하학적인 거리를 수치로 표현하는 방법이다. 각 암석에 대하여 가열 처리한 후 육안으로 먼저 암석 표면의 색상 변화를 관찰하였다(Fig. 4). 색은 정성적인 요소이므로 객관적 평가를 위해 BYK-Gardner에서 제작된 spectro-guide를 이용하여 가열처리 전·후 색도(L_1^* , a_1^* , b_1^* , L_2^* , a_2^* , b_2^*)를 측정하고 색차(ΔE)를 산출하였다(Table 2). 여기서 L^* 값은 Munsell 명도와 관련하여 100에 가까울수록 백색을 0에 가까울수록 흑색을 띠며, a^* (+적색, -녹색)와 b^* (+황색, -청색)값은 채도를 표현하는 것이다. 가열 처리 후 명도(L^*)값의 증감은 크지 않으나, 채도(a^* , b^*)에서 차이가 발생되었다. 암석 및 가열 온도에 따른 색차(ΔE)를 살펴보면 모든 암석에서 3.0이상의 값

을 가지며 사암에서 색차(ΔE)가 크게 나타난다. 특히 대리암은 가열온도가 400°C에 비해 600°C에서 색차가 급격히 증가 하였다.

광물학적 변화

2종의 화강암류(알칼리장석화강암, 흑운모화강암), 대리암 그리고 사암에 대해 가열처리한 후 광물학적 변화를 살펴보기 위해 편광현미경 분석을 실시하였다. 편광현미경 관찰에 있어서 동일한 암석 표면을 관찰 하기에 제약이 따르지만, 가열 처리에 따른 주 구성 광물의 변화는 나타나지 않는다(Fig. 5).

암석 물성 변화

가열처리에 의한 암석의 물리적 특성을 온도(400°C, 600°C)에 따라 비교 하였으며, 이용된 물리적 특성은 비중, 공극률, 흡수율, 초음파 속도이다(Fig. 6). 가열 온도가 400°C에서는 비중의 변화가 거의 없으며, 600°C에서 비중의 감소가 보이거나 변화량은 미비하게

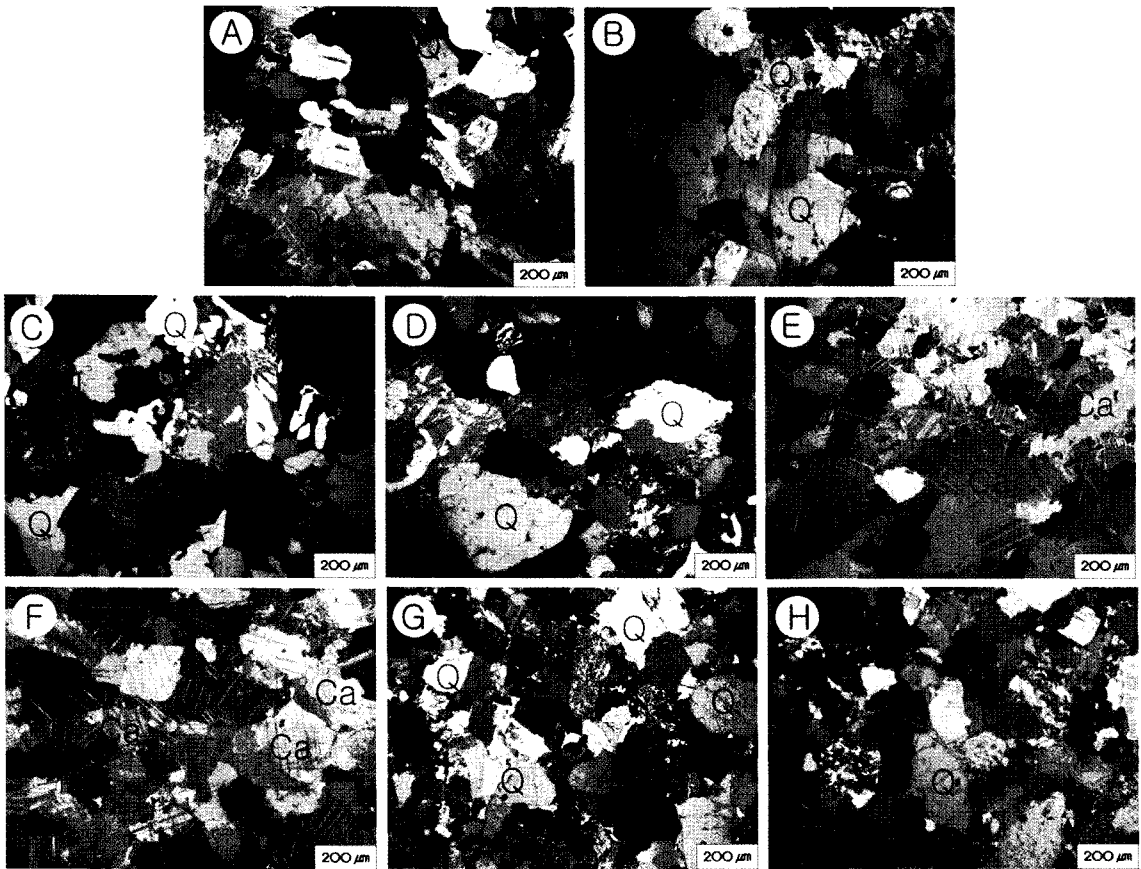


Fig. 5. Photographs of thin section after heating treatment. (A, B) Namsan Alkali-feldspar granite, (C, D) Igsan Biotite granite, (E, F) Jeongseon Marble, (G, H) Youngyang Sandstone. Q, Quartz; Pl, Plagioclase; Mu, Muscovite; Ca, Calcite.

나타난다(Fig. 6A). 공극률과 흡수율의 변화를 살펴보면 2종의 화강암류(알칼리장석화강암, 흑운모화강암)는 400°C에서 변화가 거의 없으나, 600°C에서 현저하게 나타난다. 다른 암석에 비해 대리암은 400°C에서 공극률과 흡수율의 변화가 보이며, 600°C에서 계속적으로 증가하였다. 그러나 사암의 경우 400°C에서 가열된 시험편의 공극률은 미비하게 감소하였으며, 600°C에서는 공극률이 증가하였으나, 화강암류 및 대리암에 비해 증가폭이 작게 나타난다(Fig. 6B & 6C). 초음파 속도는 암석 내부에 존재하는 균열의 발달 정도에 따라 변하기 때문에 초음파 속도를 측정함으로써 가열온도에 따른 열에 의한 균열의 발생 정도를 추정할 수가 있다. 초음파 속도는 400°C와 600°C로 가열처리한 후 감소하였으며, 400°C에 비해 600°C에서 더 낮은 초음파 속도를 가진다(Fig. 6D).

S. Chaki *et. al*(2008)은 화강암류, 윤용균(2004)은 대리암 및 사암을 대상으로 가열 처리에 따른 암석의 물성 변화를 연구하였다. S. Chaki *et. al*(2008)에 따르면 가열 온도가 증가할수록 초음파 속도는 감소하며, 600°C에서 급격히 감소하였다. 500°C와 600°C사이에서 초음파 속도의 급격한 감소는 573°C에서 석영의 상전이와 같은 비등방성 팽창 때문인 것으로 해석하였다. 또한 윤용균(2004)에 따르면 대리암은 온도가 증가할수록 공극률은 계속적으로 증가하고, 초음파 속도는 계속적으로 감소하였다. 반면 사암은 400°C이하에서 변화가 거의 없으며, 400°C이상에서 공극률은 증가하고, 초음파 속도는 감소하여 사암의 열에 대한 저항력이 대리암보다 큰 것으로 해석하였다. 이번 연구에서 400°C이하에서 변화 양상은 살펴볼 수 없으나, 400°C와 600°C에서 암석의 공극률과

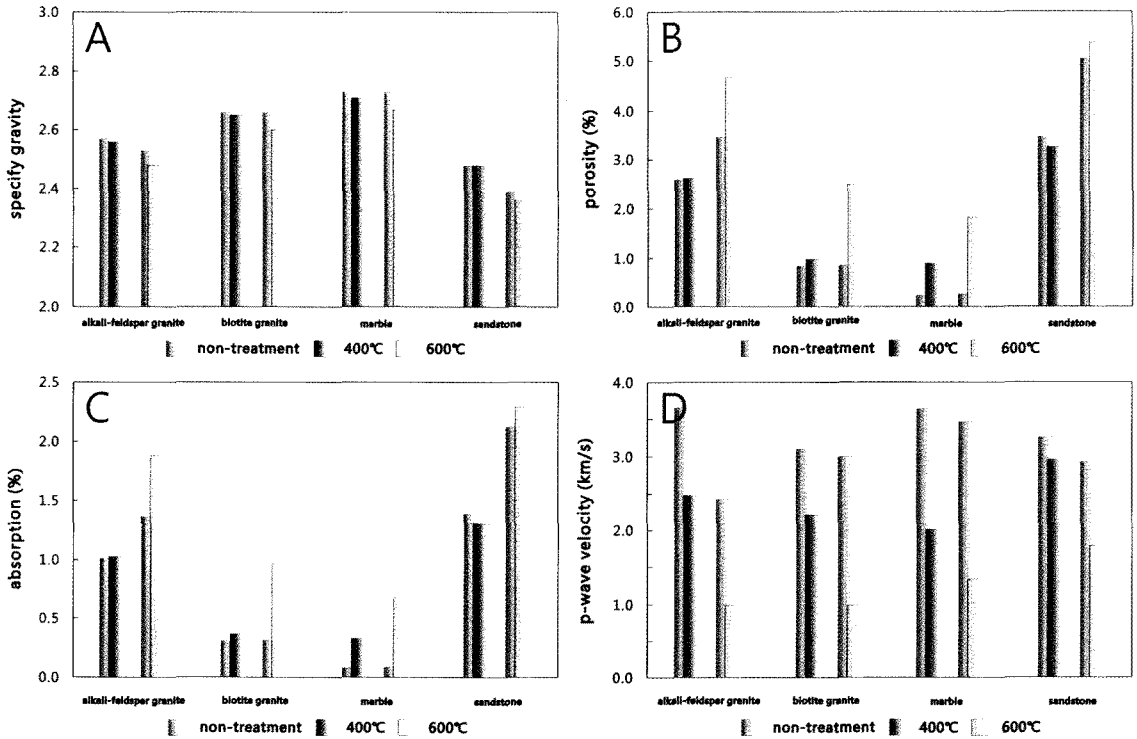


Fig. 6. Changes of physical properties after heating treatment. (A) specify gravity, (B) porosity, (C) absorption, (D) p-wave velocity.

초음파 속도의 변화 경향은 기존 연구 결과와 잘 일치하고 있다.

고찰

공극률은 암석의 기본적인 물리적인 특성이며 이는 total porosity, open porosity, effective porosity로 나눌 수 있다. total porosity는 다공질 물질내의 총 공극의 부피비로 정의 된다. open porosity는 시료의

외부와 연결된 공극(a)의 부피비이며, effective porosity는 양끝으로 연결되어 유체가 통과 할 수 있는 공극(b)의 부피비로 정의할 수 있다. 특히 effective porosity는 투수력과 밀접한 관련이 있다(S.Chaki et. al, 2008). 이번 연구에서 측정된 공극률은 격리된 공극(c)을 반영하지 못하지만 온도에 의한 암석 표면 변화를 간접적으로 나타낼 수 있다. 반면 초음파 속도는 암석 입자 자체의 성질과 내부의 불연속면 분포 및 입자 결합상태를 간접적으로 반영하여, 물질의 변

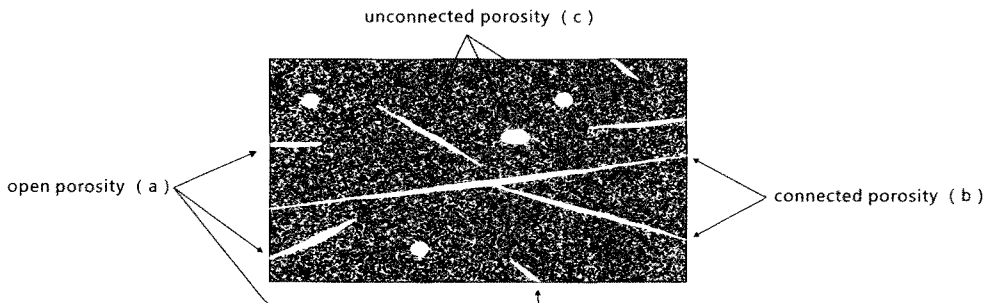


Fig. 7. Porosity model for granitic rocks.

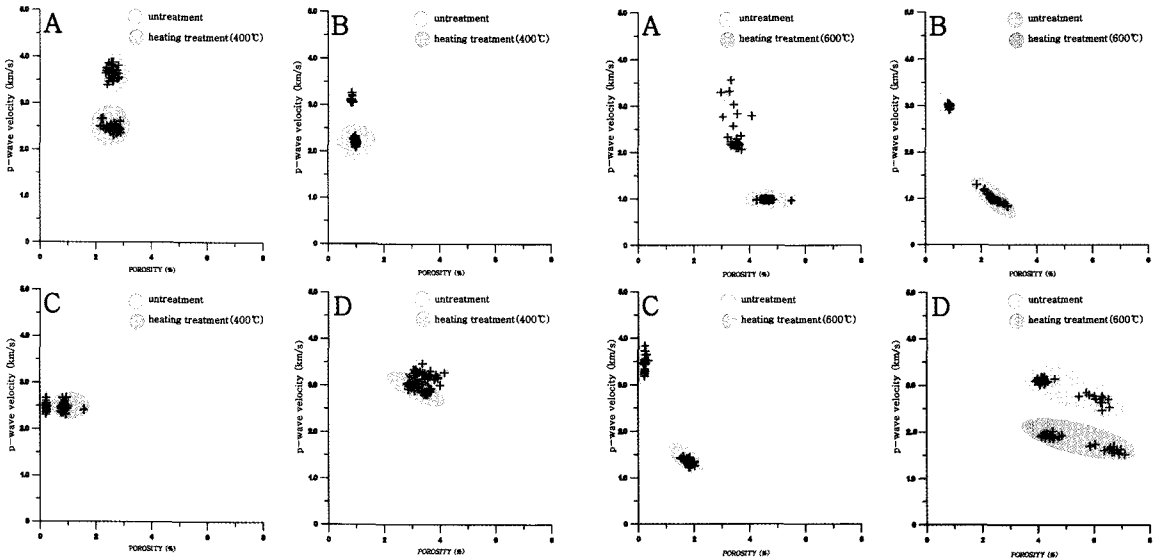


Fig. 8. Relation p-wave velocity and porosity at 400°C(left) and 600°C(Right). (A) Namsan Alkali-feldspar granite, (B) Igson Biotite granite, (C) Jeongseon Marble, (D) Youngyang Sandstone.

형특성이 물질 내부로의 초음파 전파 속도에 의해 결정되기 때문에 (c)타입 뿐만 아니라 (a), (b)의 영향을 받게 된다. 따라서 초음파 속도는 암석의 전체적인 손상을 평가하는데 유용하다고 판단된다(Fig. 7). 여기에서 공극률과 초음파 속도의 변화 양상을 상대적으로 살펴보기 위해 공극률과 초음파 속도의 상관관계를 도시하였다(Fig. 8). 400°C에서 알칼리장석화강

암과 흑운모화강암은 공극률의 변화가 크지 않으나 초음파 속도는 감소하였다. 대리암은 공극률이 증가하는 경향을 보이나 변화는 크지 않고 초음파 속도 역시 변화가 거의 없다. 사암의 경우 공극률의 변화는 거의 없고, 초음파 속도는 감소하는 경향을 보이거나 변화는 크지 않다. 반면 600°C에서는 모든 암석에서 공극률은 증가하고 초음파 속도는 감소하는 경향을 잘 보여주고 있다. 400°C와 600°C에서 공극률과 초음파 속도의 상관관계가 서로 상이하게 나타나는데 이는 온도의 정도가 공극률과 초음파 속도에 미치는 영향이 다르다고 할 수 있다. 특히 2종의 화강암류는 400°C에서 공극률의 변화가 거의 없는데 반해 초음파 속도는 감소하였다. 이는 암석 내부 상태에 의한 영향으로 보이며, 암석 속에 내재된 joint나 microcrack의 존재 및 공극의 형태에 기인한 판단된다. 따라서 온도에 의한 공극률과 초음파 속도의 변화 양상으로 미루어 볼 때 고온하에서 온도의 영향은 암석 표면보다는 암석 내부에서 연결된 공극(b) 및 격리된 공극(c)의 발달을 야기시키고, 고온으로 갈수록 표면에 미치는 영향을 클 것으로 판단된다. 가열온도에 따른 평균 초음파 속도의 감소를 살펴보면 400°C에서 대리암 > 알칼리장석화강암 > 흑운모화강암 > 사암 순으로 감소하였으며, 600°C에서는 흑운모화강암 > 대리암 > 알칼리장석화강암 > 사암 순으로 감소하였다. 가열온도가 400°C에서 600°C로 증가할 때 초음파 속

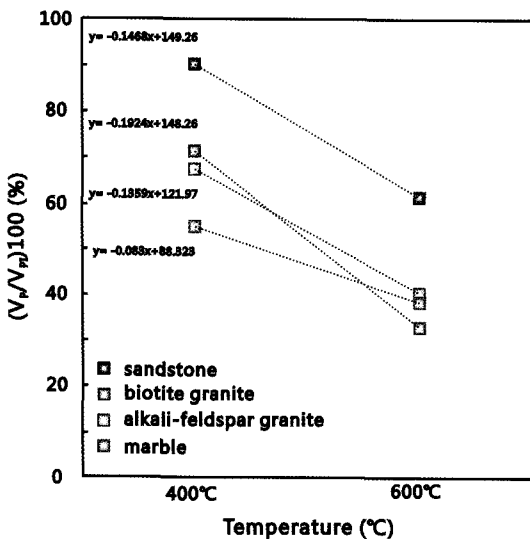


Fig. 9. Change in p-wave velocity (V_p) relative to initial value (V_{p0}) depending on temperature.

도의 감소율은 증가하며 압중에 따라 다양한 패턴으로 감소할 것으로 판단된다. 여기에서는 400°C와 600°C에서 나타나는 초음파 속도의 감소율을 선형으로 도시하고, 기울기를 산출하였다(Fig. 9). 2종의 화강암류 및 사암은 대리암에 비해 기울기가 크게 나타난다. 기울기가 클수록 초음파 속도의 변화가 심함을 의미한다. 이것으로 보아 사암이 온도에 의한 손상이 가장 적으며, 대리암은 400°C와 600°C사이에 암석 물성 변화가 적다고 판단된다.

결 론

1. 2종의 화강암류, 대리암, 사암을 동일한 온도(400°C, 600°C)로 가열처리한 후 색상변화, 광물학적 변화, 물리적인 특성을 측정하여 비교하였다. 모든 암석에서 온도에 따른 색상변화와 물리적 특성(비중, 유효공극률, 흡수율, 초음파 속도)의 변화는 보이나, 광물학적 변화는 보이지 않았다.

2. 온도에 따른 물성 변화를 살펴보면 400°C에서 비중, 공극률, 흡수율의 변화는 거의 없으나, 600°C에서 비중은 감소하고 공극률과 흡수율은 증가하는 경향을 보인다. 가열온도에 따른 평균 초음파 속도의 감소율을 살펴보면 400°C에서 대리암 > 알칼리장석화강암 > 흑운모화강암 > 사암 순으로 감소하였으며, 600°C에서는 흑운모화강암 > 대리암 > 알칼리장석화강암 > 사암 순으로 감소하였다. 가열온도가 400°C에서 600°C로 증가할 때 초음파 속도의 감소율은 증가하며 압중에 따라 다양한 패턴으로 감소할 것으로 판단된다.

3. 공극률과 초음파 속도의 상관관계에서 400°C에서 유효공극률의 변화는 거의 없으나, 초음파 속도는 현저하게 감소하였다. 여기서 측정한 공극률은 격리된 공극을 100% 반영하지 못하지만 400°C와 600°C에서 표면 상태의 변화는 간접적으로 반영한다고 판단된다. 반면 공극률과 달리 초음파속도는 암석의 전체적인 손상 정도를 파악하는데 유용하다. 공극률과 초음파 속도 변화로부터 온도에 대한 저항성은 사암이 가장 크며, 온도 차이(400°C, 600°C)에 의한 물성 변화의 차이는 대리암에서 작게 나타난다.

4. 400°C와 600°C에서 공극률과 초음파 속도의 상관관계에서 암석에 따라 서로 상이하게 나타나는데 이는 온도의 정도가 공극률과 초음파 속도에 미치는 영향이 다르다고 할 수 있다. 특히 400°C에서 2종의

화강암류는 공극률의 변화는 거의 없지만 초음파 속도의 감소가 나타난다. 이는 암석 내부 상태에 의한 영향으로 보이며, 암석 속에 내재된 joint나 microcrack의 존재 및 공극의 형태에 기인한 것으로 판단된다.

5. 온도에 의한 공극률과 초음파 속도의 변화 양상으로 미루어 볼 때 고온하에서 온도의 영향은 암석 표면 보다는 암석 내부에서 연결된 공극(b) 및 격리된 공극(c)의 발달을 야기시키고, 고온으로 갈수록 표면에 미치는 영향이 커질 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 문화재청 국립문화재연구소의 지원을 받아 문화유산 융복합연구(R&D) 사업의 일환으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 김영화, 장보안, 1992, 화강암의 풍화현상에 수반되는 물성 변화의 특성, *The Journal of Engineering*, 2(1), 36-46p.
- 이형원, 이정인, 1996, 암석의 강도 및 변형거동의 온도의존성에 관한 연구, *한국암반공학회*, 6, 101-121p.
- 이형원, 이정인, 1995, 고온하에서 암석의 열충격, 열팽창 및 열파괴에 관한 연구, *한국암반공학회*, 5, 22-40p.
- 윤용균, 2004, 보령사암과 여산대리암의 물리적특성에 대한 온도의 영향, *대한 화약발파공학회*, 22(4), 17-22p.
- Chaki, S. and Takarli, M., 2008, Influence of thermal damage on physical properties of a granite rock: porosity, permeability and ultrasonic wave evolutions, *Constr Build Mater*, 22, 1456-1461p.
- David, C. and Menendez, B., 1999, Influence of stress-induced and thermal cracking on physical properties and microstructure of La Peyratte granite, *Int J Rock Mech Min Sci*, 36, 433-448p.
- Darot, M. and Reuschle, T., 2000, Acoustic wave velocity and permeability evolution during pressure cycles on a thermally cracked granite, *Int J Rock Mech Min Sci*, 37, 1019-1026p.
- Ferrero, A.M. and Maarini, P., 2001, Experimental studies on the mechanical behaviour of two thermal cracked marbles, *Rock Mech Rock Eng*, 34, 57-66p.
- Fredrich, J.T. and Wong, T., 1986, Micromechanics of thermally induced cracking in three crustal rocks, *J Geophys Res*, 91, 12743-12746p.
- Geraud, Y., Mazerolle, F. and Raynaud, S., 1992, Comparison between connected and overall porosity of thermal stressed granites, *J Struct Geol*, 14(8/9), 981-990p.
- Glover, P.W.J. and Baud, P. et. al., 1995, α/β Phase transition in quartz monitored using acoustic emissions, *Geo-*

- phys J Int, 120, 775-782p.
- Yavuz, H., Demirdag, S. and Caran, S., 2010, Thermal effect on the physical properties of carbonate rocks, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 47, 94-103p.
- Jason, D.P. and Carlson, S.R. et. al., 1993, Ultrasonic imaging and acoustic emission monitoring of thermally induced microcracks in Lac du Bonnet Granite, J Geophys Res, 98(B12), 22231-22243p.
- Lion, M., Skoczylas, F. and Ledesert, B., 2005, Effects of heating on the hydraulic and poroelastic properties of bourgogne limestone, Int J Rock Mech Min Sci, 42, 508-520p.
- Chaki, S., Takarli, M. and Agbodjan, W.P., 2008, Influence of thermal damage on physical properties of a granite rock: Porosity, permeability and ultrasonic wave evolutions. Construction and Building Materials, 22, 1456-1461.
-
- 2011년 5월 12일 접수
2011년 5월 18일 심사개시
2011년 7월 24일 채택