

## 보령사암과 여산대리암의 물리적특성에 대한 온도의 영향

윤용균<sup>1)</sup>

### Temperature Effects on the Physical Properties of Boryung Sandstone and Yeosan Marble

Yong-Kyun Yoon

**ABSTRACT.** Boryung sandstone and Yeosan marble were thermally cracked at predetermined temperatures ranging 200°C to 600°C. Optical microscopy was utilized to observe thermally induced cracks and physical properties such as specific gravity, effective porosity & elastic wave velocity were measured. Optical observations show that all crystal boundaries of Yeosan marble heated to 600°C open and new intracrystalline cracks seem to be occurred in all crystals, but developments of thermal cracks in Boryung sandstone heated to 600°C are not pronounced. From 200°C upwards, effective porosity and elastic wave velocity of Yeosan marble are sharply increased, whereas effective porosity and elastic wave velocity of Boryung sandstone are weakly increased.

**Key words :** thermally induced cracks, effective porosity, elastic wave velocity

**초 록.** 보령사암과 여산대리암을 200°C에서 600°C까지 100°C 간격으로 예열처리하였다. 열균열의 발생 정도를 살펴보기 위하여 반사현미경 관찰을 수행하였으며, 예열온도가 암석의 물리적특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 비중, 유효공극률, 탄성파속도 등을 측정하였다. 600°C로 예열된 여산대리암에 대한 현미경 관찰 결과 모든 결정경계에 열균열이 발생한 것으로 나타났으며, 결정 내부에도 열균열의 발생이 심한 것으로 관찰되었다. 보령사암의 경우에는 열균열의 발생 정도가 미약한 것으로 나타났다. 예열시험편에 대한 물리적특성을 조사한 결과 여산대리암의 경우에는 200°C부터 유효공극률과 탄성파속도의 변화가 심하게 나타난 반면에, 보령사암의 경우에는 변화 정도가 완만한 것으로 측정되었다.

**핵심어 :** 열균열, 유효공극률, 탄성파속도

## 1. 서 론

방사성 폐기물 처분장, 열수에너지 저장시설, 지열에너지 회수시설 등과 같이 열원이 암반 내에 존재하는 경우 열원 주변의 암반은 온도장의 변화를 받게 된다. 광물들 간의 열팽창 정도는 광물의 종류에 따라 모두 다르고, 동일 광물일지라도 방향에 따른 이방적인 열팽창 특성이 존재하기 때문에 암석에 열이 가해지는 경우 열팽창에 따른 열파괴가 발생하게 된다.<sup>1-3)</sup> 암석에 가해지는 온도가 크지 않은 경우에는 일반적으로 입자 경계에서 열파괴에 의한 열균열이 먼저 발생하지만, 온도가 증가함에

따라 입자 내에서도 열균열이 발생하게 된다. 열균열은 암석의 물리적 및 역학적특성에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있기 때문에 암중에 따라 열균열이 미치는 영향 정도를 파악하는 것이 필요하다.<sup>4,9)</sup>

본 연구에서는 보령사암과 여산대리암을 대상으로 예열에 의해 발생한 열균열을 관찰하고, 온도에 따른 열균열의 발생 정도가 암석의 물리적특성에 미치는 영향을 조사하였다. 시험편에 가해지는 예열온도는 200, 300, 400, 500, 600(°C)로 하였으며, 발생된 열균열을 관찰하기 위하여 반사현미경 관찰을 수행하였다. 또한, 열균열이 암석의 물리적특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 비중, 유효공극률, 탄성파속도 등을 측정하였다.

1) 세명대학교 자원환경공학과

접수일 : 2004년 12월 26일

## 2. 암석 시험편

### 2.1 암석시험편 기재

보령사암은 세립질로서 주요 구성광물은 석영과 장석류이고 흑운모, 불투명 광물, 견운모, 백운모, 석류석, 저어콘, 점토광물이 부성분 광물로 존재한다. 일부 석영은 다결정성 석영으로 존재하고, 석영과 장석류의 경계에서는 흑운모와 견운모가 결합된 형태로 관찰된다. 석영입자의 크기는 0.2~1.2(mm)의 입도를 보이고 평균 0.7mm 정도가 된다.

여산대리암은 방해석이 주요 구성광물로 나타나고, 부성분 광물로는 석영, K-장석, 백운모, 불투명 광물이 소량 또는 미량 수반된다. 방해석에는 벽개(cleavage)가 특징적으로 관찰되며, 일부 입자에서는 열개(parting)가 존재한다. 방해석 입자의 크기는 0.25~1.1(mm) 이고 평균 크기는 0.5mm 내외이다. 석영의 크기는 0.3mm 보다 작은 것으로 나타난다. Table 1 에는 각 암석시료에 대한 모드분석 결과가 표시되어 있다.

Table 1. Mineralogical composition of rock samples

Minerals	Mineralogical composition (Vol. %)	
	Boryung sandstone	Yeosan marble
Quartz	70	1
K-feldspar	18	-
Plagioclase		-
Biotite	4	-
Sericite	1	-
Calcite	-	99
Opaque mineral	7	-

### 2.2 시험편 제작

보령사암과 여산대리암 암석블럭으로부터 이방성의 영향을 제거하기 위하여 동일한 방향으로 코

아를 채취하였다. 채취된 코아의 직경은 53~54(mm)가 되었다. 시험편의 길이는 직경의 2배가 되도록 하였으며, 암종 당 18개를 제작하였다. Table 2에는 보령사암과 여산대리암의 무결암 시험편에 대한 물성이 표시되어 있다. 보령사암의 경우 변성작용을 받은 관계로 사암의 일반적인 특성과 다르게 강도 및 탄성과속도가 큰 것으로 나타난다.

균열의 발생 정도를 현미경을 통해 관찰하기 위하여 직경 25mm, 두께 6mm의 연마편을 제작하였으며, 표면의 성형도를 높이기 위하여 Diamond paste를 사용하였다. 연마편의 개수는 암종당 2개로 하였다.

Table 2. Material properties of samples

Properties	Boryung sandstone	Yeosan marble
Specific gravity	2.64	2.68
Effective porosity(%)	0.44	0.14
Longitudinal wave velocity(m/s)	5,000	3,060
Shear wave velocity(m/s)	2,990	1,970
Uniaxial compressive strength(MPa)	190	78
Young's modulus(GPa)	66	48
Poisson's ratio	0.27	0.27

## 3. 실험방법

### 3.1 예열처리

본 연구에서는 시험편에 예열을 하여 열균열을 발생시킨 다음 시험편을 상온으로 냉각시킨 후 예열온도에 따른 암석의 물성 변화를 조사하고자 하였다. 예열시 가열 속도가 일정 수준 이상으로 빠르게 되면 온도구배가 급격하게 증가하여 열충격이 발생할 수가 있다. 열충격에 의한 열파쇄(thermal

spalling)는 완만한 가열속도에 의해 발생하는 열균열과는 다른 열역학적 특성을 보이기 때문에 열충격이 발생하지 않는 범위 내에서 가열 속도를 결정하는 것이 필요하다.

승온속도 및 최고온도 유지시간을 자동적으로 조절할 수 있는 프로그램입력식 자동조절 전기로를 사용하여 예열시험편을 제작하였다. 시험편에 대한 최고예열온도는 200, 300, 400, 500, 600(°C)로 하였으며, 각 최고예열온도에 따라 3개씩의 예열시험편을 제작하였다. 열충격을 회피하기 위하여 시험편에 가하는 가열속도를 2°C/min로 하였으며, 최고예열온도가 시험편 내에 균일하게 분포되도록 하기 위하여 최고온도 유지시간을 180분으로 하였다.<sup>2,3)</sup> 예열이 끝난 시험편을 전기로의 전원을 끈 후 전기로에 그대로 방치하여 자연적으로 냉각이 되도록 하였다. 가열반복회수(heating cycle)는 암석의 열역학적 특성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있기 때문에 1회로 하였다.<sup>1)</sup>

### 3.2 현미경 관찰

각 암종에 따라 2개씩을 제작하여 1개는 상온 상태에서 암석 내에 존재하는 균열의 발생 양태를 관찰하기 위해 사용하였으며, 나머지 1개는 600°C 까지 예열처리하여 열균열의 발생 정도를 관찰하였다. 열균열의 발생 정도를 넓은 범위에 걸쳐 파악하기 위해서는 고배율의 전자현미경보다는 저배율의 반사현미경 관찰이 효과적이라는 판단 하에 반사현미경 관찰을 수행하였다. 조사배율은 100배로 하였다.

### 3.3 물성 조사

예열시험편에 대한 비중, 유효공극률, 탄성파속도를 측정하였다. 유효공극률과 탄성파속도는 예열 온도에 따른 열균열의 발생 정도를 파악하는데 아주 효과적인 지표로 사용될 수 있다. 예열시험편의 포화중량을 측정하기 위하여 진공상태에서 3일간 시험편을 침수시켜 완전 포화시킨 후 측정을 수행하였다. 탄성파속도 측정에는 초음파펄스법(ultrasonic pulse method)을 사용하였으며, 종파

(longitudinal wave)와 횡파(shear wave)속도를 측정하였다.

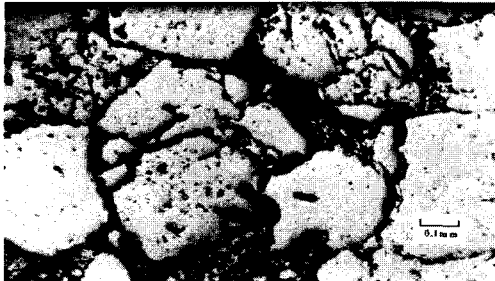
## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 현미경 관찰

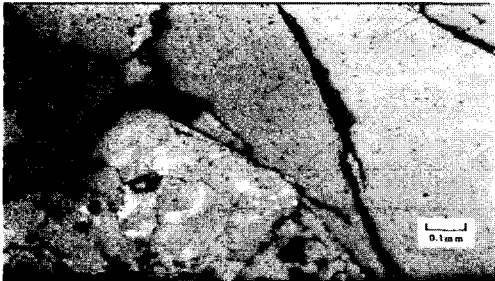
600°C 예열시험편에 발생한 열균열을 조사하기 위하여 반사현미경 관찰을 실시하였으며, 비교를 위하여 무결암 시험편에 대한 관찰도 수행하였다. Fig. 1에는 보령사암에 대한 현미경관찰 사진이 나와 있으며, Fig. 2는 여산대리암에 대한 관찰 사진이다.

보령사암의 상온시험편에 대한 관찰 결과 대부분의 결정들은 결정 경계에 존재하는 흑운모와 건운모에 의해 강하게 결합된 형태를 보여주고 있다. 600°C 예열시험편의 경우에는 입자 경계에 경계간 열균열이 발생한 것으로 나타나지만, 모든 경계에 나타난 것은 아니며 일부 경계에 한정된 것으로 관찰되었다. 결정 내에 발생하는 입자내 열균열의 경우에도 일부 결정 내에 발생한 것으로 나타났지만, 발생 정도가 미약한 것으로 관찰되었다. 이러한 예열시험편에 대한 관찰 결과는 보령사암의 경우에는 600°C의 예열에도 암석의 물리적특성이 다른 암석들과는 다르게 크게 저하되지 않을 것이라는 예상을 가능하게 한다.

여산대리암의 상온시험편에 대한 관찰 결과 거의 모든 결정 입자는 서로 맞물려 있는 것으로 조사되어 생래적인 균열이 거의 없는 것으로 나타났다. 예열시험편의 경우에는 모든 결정 경계에 열균열이 발생한 것을 알 수 있으며, 균열의 폭도 상당히 커서 입자 간의 결합이 매우 느슨해진 것으로 나타났다. 또한, 입자 내 균열도 상당히 많이 발생한 것으로 관찰되었으며, 입자 내 균열이 상호 연결되어 또 다른 입자를 형성하는 것처럼 보인다. 따라서, 여산대리암의 경우에는 온도에 따른 열균열 발생에 의해 물리적특성이 상당히 변할 것으로 예측된다.



(a) Before thermal treatment



(b) After thermal treatment(600°C)

Fig. 1. Microphotographs of Boryung sandstone



(a) Before thermal treatment



(b) After thermal treatment(600°C)

Fig. 2. Microphotographs of Yeosan marble

#### 4.2 물리적특성 변화

Fig. 3에는 보령사암과 여산대리암의 예열온도에 따른 비중의 변화가 표시되어 있다. 그림을 보면 여산대리암의 경우 예열온도가 300°C에 이를 때까지는 비중의 변화가 없다가 400°C이후부터 비중의 감소가 나타나고, 500°C이후에서는 변화량이 상당히 증가하는 것으로 나타난다. 보령사암의 경우에는 400°C까지 비중의 변화가 없다가 500°C이후에서 비중의 감소가 나타나나, 여산대리암에 비해 감소 정도가 약한 것으로 조사되었다. 예열온도에 따른 비중의 감소는 열균열의 발달에 따른 열팽창이 암석의 체적 증가로 나타나고, 고온 하에서 암석을 구성하는 일부 물질이 증발함에 따라 암석의 중량이 감소하였기 때문인 것으로 생각된다. 특히, 대리암의 경우에는 주성분인 탄산칼슘이 이산화탄소로 유리되어 중량이 감소됨으로 인해 비중이 낮은 것으로 추정된다.

Fig. 4에는 예열온도에 따른 유효공극률의 변화가 표시되어 있다. 보령사암의 경우 200°C까지 예열된 시험편의 유효공극률이 상온시험편의 유효공극률보다 작아진 것으로 나타났는데, 이는 온도가 증가함에 따라 구성광물입자가 팽창하면서 암석 내에 존재하는 균열과 공극이 폐쇄됨으로 인해 발생한 것으로 생각된다. 300°C이후부터 완만하게 유효공극률이 증가하는 것으로 나타났지만 여산대리암에 비해서는 증가율이 매우 낮음을 알 수 있다. 온도에 따른 유효공극률의 증가가 낮게 나타난 것은 보령사암의 주요 구성광물이 석영이고, 또한 결정입자들이 매우 공고히 결합되어 있어 열균열의 발생이 다른 암석에 비해 적다는 것을 알려준다. 여산대리암의 경우에는 200°C부터 유효공극률의 증가가 현저한 것으로 나타나나, 200°C에서 대부분의 입자 경계에 열균열이 발생된 것으로 추정되며 200°C이후부터는 기존 균열과 새로이 생성된 열균열이 계속적으로 확장된 것으로 판단된다.

Fig. 5, 6에는 예열온도에 따른 종파와 횡파의 속도가 표시되어 있다. 탄성파속도는 암석 내부에 존재하는 균열의 발달 정도에 따라 변하기 때문에 탄성파속도를 측정함으로써 예열온도에 따른 열균열

의 발생 정도를 추정할 수가 있다. 보령사암의 경우 종파의 속도는 예열온도에 따라 완만하게 감소하는 것으로 나타났으며, 감소 정도도 여산대리암에 비해 작은 것으로 조사되었다. 보령사암 200°C 예열시험편의 종파속도가 상온시험편에 비해 증가한 것은 유효공극률이 200°C에서 감소한 현상과 일치되는 결과를 보여준다. 보령사암의 횡파속도는 종파속도와는 다르게 200°C부터 감소하는 것으로 나타났으며, 감소율도 종파보다는 큰 것으로 조사되었다. 이러한 결과로부터 횡파속도가 종파속도보다 암석 내부의 균열 발생 정도를 좀 더 민감하게 반영함을 알 수 있다. 여산대리암의 종파속도와 횡파속도는 200°C의 예열온도에서부터 지속적으로 감소되는 것을 알 수 있으며, 감소율도 보령사암에 비해 큰 것으로 나타났다. 유효공극률과 탄성파속도 측정 결과로부터 여산대리암의 경우에는 200°C부터 열균열의 발생이 활발하였음을 알 수가 있다.

Fig. 7에는 상온시험편의 탄성파속도에 대한 예열시험편의 탄성파속도 비가 표시되어 있다. 암종에 관계없이 종파속도와 횡파속도의 예열온도에 따른 감소비율은 일정한 패턴을 보이는 것으로 나타난다. 보령사암의 경우 여산대리암에 비해 예열온도에 따른 감소율이 낮은 것으로 나타났으며, 이로부터 변성작용을 받은 보령사암의 열에 대한 저항력이 여산대리암보다 크다는 것을 알 수 있다.

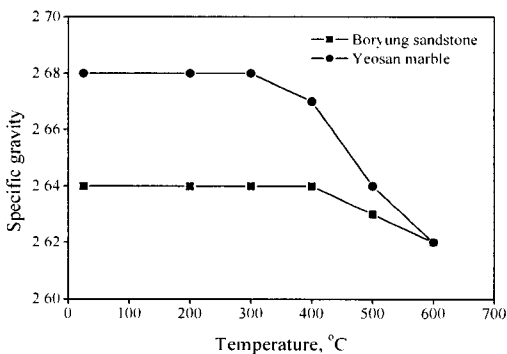


Fig. 3. Variations of specific gravity as a function of maximum thermal cycle temperature

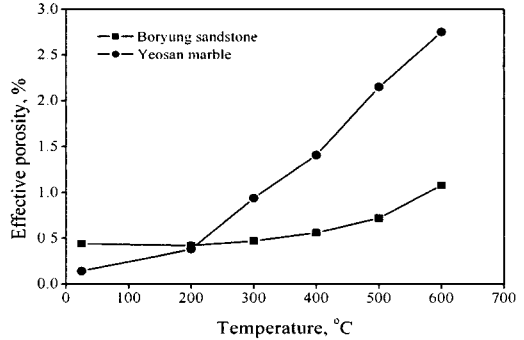


Fig. 4. Changes of effective porosity with maximum thermal cycle temperature

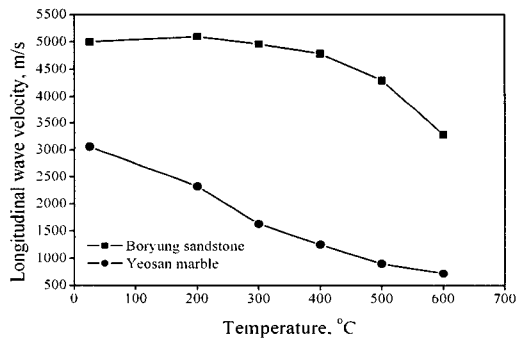


Fig. 5. Variations of longitudinal wave velocity with maximum thermal cycle temperature

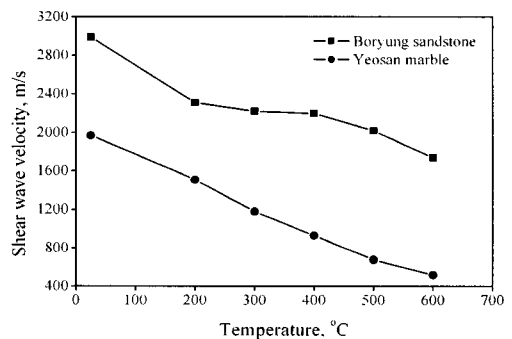


Fig. 6. Variations of shear wave velocity with maximum thermal cycle temperature

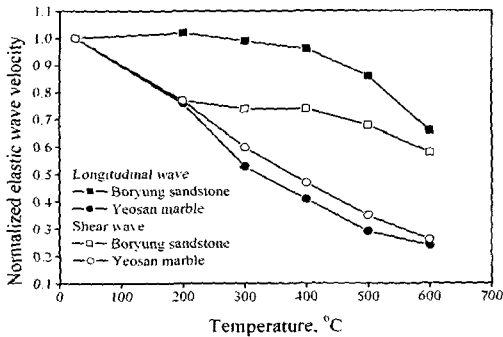


Fig. 7. Normalized elastic wave velocity vs. maximum thermal cycle temperature

## 5. 결론

본 연구에서는 보령사암과 여산대리암을 대상으로 예열에 따른 암석의 물리적특성 변화를 조사하였으며, 반사현미경을 이용한 열균열 발생 정도도 관찰하였다. 시험편에 가해진 예열온도는 200, 300, 400, 500, 600(°C)로 하였으며, 현미경관찰을 위한 예열면만은 600°C 시험편만 제작하였다.

현미경관찰 결과 여산대리암의 경우 모든 결정 경계에 열균열이 발생하였으며, 결정 내부에도 다수의 열균열이 발생되어 상호 연결된 모습을 보여주었다. 보령사암의 경우에는 모든 결정 경계에 열균열이 발생되지 않았으며, 발생된 결정균열도 연속적인 발달 상태를 보여주지는 않았다. 또한, 결정 내부에 발생한 열균열도 일부에 한정되었으며, 열균열의 연결성도 미약한 것으로 나타났다.

예열온도에 따른 유효공극률의 변화를 보면 여산대리암의 경우에는 200°C부터 현격하게 유효공극률이 증가하는 것으로 나타났으나, 보령사암의 경우에는 증가율이 완만하였으며 200°C에서는 오히려 상온시험편보다 유효공극률이 감소하는 것으로 나타났다. 탄성파속도 측정결과도 유효공극률의 변화 양상과 유사한 결과를 보여주었다. 여산대리암의 경우 200°C부터 탄성파속도의 감소가 심한 것으로 나타났으며, 보령사암의 경우에는 변화량이 완만한 것으로 측정되었다. 유효공극률과 탄성파속도 측정 결과로부터 여산대리암의 경우에는 200°C

부터 열균열이 활발하게 발생한 것을 알 수 있으며, 보령사암의 경우에는 그 발생정도가 상대적으로 미약한 것으로 판단된다.

## 참고 문헌

- Richter, D. and G. Simmons, 1974, Thermal expansion behavior of igneous rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 11, pp. 403-411.
- 이기형, 이형원, 신재섭, 1990, 화강암질 석재의 열과파 특성 연구, *한국자원공학회지*, Vol. 27, No. 1, pp. 31-42.
- 이형원, 이정인, 1995, 고온하에서 암석의 열충격, 열팽창 및 열과파에 관한 연구, 터널과 지하공간(*한국암반공학회지*), Vol. 5, No. 1, pp. 22-40.
- 윤용균, 이희근, 1996, 열응력이 암석의 역학적 거동과 투수성에 미치는 영향 - I.역학적 거동, 터널과 지하공간(*한국암반공학회지*), Vol. 6, No. 1, pp. 1-9.
- 윤용균, 1997, 열응력이 포천화강암의 투수성에 미치는 영향, 터널과 지하공간(*한국암반공학회지*), Vol. 7, No. 3, pp. 238-245.
- 윤용균, 1998, 열균열이 화강암의 변형거동에 미치는 영향, 터널과 지하공간(*한국암반공학회지*), Vol. 8, No. 3, pp. 249-256.
- 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. 449-480.
- Heuze, F. E., 1983, High-temperature mechanical, physical and thermal properties of granitic rocks-A review, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 20, No. 1, pp. 3-10.
- Homand-Etienne, F. and R. Houper, 1989, Thermally induced microcracking in granites : characterization and analysis, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 26, No. 2, pp. 125-134.