

## 온도와 수압이 가곡광산 화강암과 석회암의 물성에 미치는 영향

윤용균<sup>1)\*</sup>, 백영준<sup>2)</sup>, 조영도<sup>3)</sup>

### Effects of Temperature and Water Pressure on the Material Properties of Granite & Limestone from Gagok Mine

Yongkyun Yoon, Youngjun Baek, Youngdo Jo

**Abstract** This study focuses on having a temperature and water pressure effects on the change of material properties of rocks. Granite and limestone specimens from Gagok Mine were thermally treated with predetermined temperatures of 200, 300, 400, 500, 600 and 700°C (excepting 700°C for limestone) to estimate the reduction of material properties of rocks caused by heat. Specific gravity, effective porosity, elastic wave velocity, uniaxial compressive strength, Young's modulus and Poisson's ratio for pre-heated specimens were measured. With increasing temperature, material properties of both rock specimens change sequentially. Significant changes of specific gravity, effective porosity and elastic wave porosity occur above 400°C for granite and 300°C for limestone. Changes of uniaxial compressive strength, Young's modulus and Poisson's ratio seem to be similar to those of physical properties. GSI of 500, 600 and 700°C specimens inferred by using uniaxial compressive strength and Young's modulus of preheated granite specimens is found to be 81, 66 and 58 each. In case of pre-heated limestone specimens of 400, 500 and 600°C, the corresponding GSI is 76, 71 and 65 each. 500, 600 and 700°C granite specimens and 400, 500 and 600°C limestone specimens were pressurized to 7.5 MPa and their effective porosity, elastic wave velocity, uniaxial compressive strength and Young's modulus were measured. The average value of material properties (mentioned above) of 500, 600 and 700°C granite specimens under water pressure compared with material properties of non-pressurized pre-heated specimens exhibits the reduction of 7.6, 11.3 and 14.9%, respectively. In case of 400, 500 and 600°C limestone specimens under water pressure, the average value of material properties decreases by 8.2, 13.8 and 21.9%, respectively.

**Key words** Gagok Mine, Predetermined temperature, Preheated specimen, GSI, Water pressure

**초 록** 본 연구에서는 온도와 수압이 암석의 물성 변화에 미치는 영향을 평가하였다. 온도가 암석의 물성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 가곡광산에서 채취한 화강암과 석회암 시험편에 200, 300, 400, 500, 600, 700°C(석회암의 경우 700°C는 제외하였음)의 열을 가하여 예열시험편을 제작하였다. 예열시험편에 대한 실내실험을 통해 비중, 유효공극률, 탄성파속도, 일축압축강도, 탄성계수, 포아송비를 측정된 결과 온도가 증가함에 따라 화강암과 석회암 예열시험편의 물성이 변하는 것으로 나타났다. 비중, 유효공극률, 탄성파속도의 급격한 변화는 화강암의 경우 400°C 이상에서 발생하였으며, 석회암의 경우에는 300°C 이상에서 나타났다. 온도에 따른 일축압축강도, 탄성계수, 포아송비의 변화도 물리적 특성의 변화와 유사한 것으로 나타났다. 예열시험편의 일축압축강도와 탄성계수로부터 유추한 500, 600, 700°C 화강암 예열시험편의 GSI는 각기 81, 66, 58로 나타났으며, 400, 500, 600°C 석회암 예열시험편의 GSI는 각각 76, 71, 65로 나타났다. 500, 600, 700°C 화강암 예열시험편과 400, 500, 600°C 석회암 예열시험편에 7.5 MPa의 수압을 가하였다. 수압을 적용한 예열시험편의 유효공극률, 탄성파속도, 일축압축강도, 탄성계수를 측정하여 평균한 결과 수압을 가하기 전 예열시험편에 비해 평균 감소량이 화강암 500, 600, 700°C 예열시험편 각각에 대해서 7.6, 11.3, 14.9%로 나타났고, 석회암 400, 500, 600°C 예열시험편에 대해서는 각기 8.2, 13.8, 21.9%로 평가되었다.

**핵심어** 가곡광산, 예열온도, 예열시험편, GSI, 수압

<sup>1)</sup> 세명대학교 소방방재학과 교수

<sup>2)</sup> 세명대학교 대학원 환경안전시스템공학과

<sup>3)</sup> 한국지질자원연구원 책임연구원

\* 교신저자 : yoon63@semyung.ac.kr

접수일 : 2011년 1월 3일

심사 완료일 : 2011년 1월 14일

게재 확정일 : 2011년 1월 14일

## 1. 서 론

휴·폐 광산의 경우 갱도 유지 관리를 하지 않음에 따라 지하수면 하부에 존재하는 갱도들은 지하수로 포화되어 있을 것으로 예상된다. 갱도가 지하수로 포화되어

있는 경우 지하수가 일종의 지보 역할을 하여 갱도의 안정성이 강화되나 갈수기에 배수가 되면 갱도 주변 암반 내 불량한 지점에서 붕락이 발생하는 경우가 생긴다. 포화되기 전에는 안정한 상태로 유지되다가 일정 기간 동안 포화상태로 있다 배수된 후 붕락이 발생하는 것은 수압에 의해 갱도 주변 암반의 물성이 변했기 때문인 것으로 판단된다. 갱도에 작용하는 지하수압이 크지 않기 때문에 수압에 의해 갱도 주변 암반이 파괴되어 새로운 불연속면을 형성하지는 않겠지만 기존 불연속면이 확장되거나 간극이 커지고 충전물이 씻겨나가 불연속면의 전단강도가 감소됨으로 인해 갱도의 붕락이 발생한다고 생각할 수 있다. 수치해석을 이용하여 지하수로 포화되었다 배수된 갱도의 안정성을 평가하는 경우 수압으로 인해 갱도 주변 암반의 역학적 특성이 어느 정도 감소되었는가를 아는 것이 필요하다.

본 연구에서는 수압이 암석의 물성 변화에 미치는 영향을 평가하기 위하여 가곡광산(과거 제2연화광업소)에서 채취한 화강암과 석회암을 대상으로 예열시험과 수압시험을 실시하였다. 현지암반과 유사한 역학적 특성을 갖는 시험편을 제작하기 위하여 화강암과 석회암 시험편에 200, 300, 400, 500, 600, 700°C(석회암의 경우 700°C를 제외하였음)의 열을 가한 후 예열시험편의 물성을 측정하여 온도가 암석의 물성 변화에 미치는 영향을 평가하였다. 또한 현지암반과 유사한 GSI를 나타내는 예열시험편을 선정하여 7.5 MPa의 수압을 가한 후 물성을 측정하여 수압이 물성의 변화에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. GSI를 이용한 현지암반의 일축압축강도와 탄성계수의 추정

갱도에 포화된 지하수가 갱도 주변 암반에 수압을 작용하는 경우 절리 간극 증가나 절리 충전물 세출, 풍화된 암석 블록 내의 균열 확장 등에 따른 역학적 특성의 감소가 발생할 것으로 예상된다. 지하수압이 갱도 주변 암반의 역학적 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 현지암반과 유사한 특성을 갖는 실내시험편을 제작하는 것이 필요하나 현지암반의 모든 물리적·역학적 특성을 모사하는 것은 어렵기 때문에 본 연구에서는 일축압축강도와 탄성계수를 기준으로 하여 현지암반을 모사할 수 있는 실내시험편을 제작하였다. 갱도 주변 암반의 일축압축강도와 무결암의 일축압축강도 간의 관계를 파악하기 위하여 일반화된 Hoek-Brown 파괴기준식을 사용하였다. 파괴기준식에 따르면 현지암반의 일축압축강도와 무결암의 일축압축강도는 다음 식 (1)과 같은 관계가 있다(Hoek et al., 2002).

$$\sigma_c = \sigma_{ci} s^a \quad (1)$$

여기서  $\sigma_c$ 은 현지암반의 일축압축강도,  $\sigma_{ci}$ 는 무결암의 일축압축강도,  $s$ ,  $a$ 는 암반조건에 따른 상수로 다음 식에 의해 구해진다.

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad (2)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (3)$$

여기서  $D$ 는 교란계수(Disturbance factor)로 발파나 응력이완에 따라 암반이 받는 교란 정도를 나타내며 불교란된 경우에는 0, 심하게 교란된 경우에는 1의 값을 갖는다.

Hoek & Diederichs(2006)는 GSI를 이용하여 무결암의 탄성계수로부터 현지암반의 변형계수를 추정할 수 있는 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$E_{rm} = E_i \left( 0.02 + \frac{1-D/2}{1 + e^{(60+15D-GSI)/11}} \right) \quad (4)$$

여기서,  $E_{rm}$ 은 현지암반의 변형계수,  $E_i$ 는 무결암의 탄성계수이다.

갱도 주변 암반에 대한 GSI만 측정하면 식 (1), (4)를 이용하여 무결암의 역학적 특성에 대한 현지암반의 역학적 특성의 비를 알 수 있으며, 예열시험을 통해 현지암반의 역학적 특성에 해당하는 예열시험편을 획득할 수 있다.

## 3. 지질조건과 시험방법

### 3.1 지질조건

본 연구에서는 강원도 삼척시에 위치한 가곡광산에서 채취한 화강암과 석회암을 암석시험편으로 사용하였다. 가곡광산의 지질구조를 보면 선캄브리아기의 화강편마암을 기저로 하여 상부에 양덕통의 장산규암층과 묘봉슬레이트층, 대석회암통의 풍촌석회암층, 화절층, 동점규암층, 두무동층 등이 분포하고 이들을 화강반암 및 석영반암이 관입한 형태이다(대한광업진흥공사, 1986). 가곡광산 광체는 선곡광체, 금곡광체, 월곡광체로 구분하며 주로 풍촌석회암층과 묘봉슬레이트층에 부존한다. 화강암 암석시험편은 금곡 400갱 내의 탐사용 시추공 내 156~170 m에서 채취하였고, 석회암 시험편은 선곡 400갱 내의 탐사용 시추공 내 320~440 m에서 채취한 풍촌석회암층 코어를 대상으로 하여 제작하였다. 화강암 및 석회암 시험편의 직경은 각기 47 mm와 50 mm 이다. Table 1에는 신선한 화강암과 석회암 시험편에 대한 물성이 표

**Table 1.** Material properties of intact granite and limestone specimens

Properties	Value	
	Granite	Limestone
Specific gravity	2.64	2.71
Effective porosity (%)	0.27	0.42
Elastic wave velocity (m/sec)	P-wave	4,820
	S-wave	3,150
Uniaxial compressive strength (MPa)	232	111
Brazilian tensile strength (MPa)	23	8
Young's modulus (GPa)	53	47
Poisson's ratio	0.24	0.26

시되어 있다. 가곡광산 화강암의 일축압축강도가 다른 지역의 화강암 보다 좀 더 크게 나타난 것은 가곡광산의 광체가 스카른광체인 것과 관련이 있는 것으로 판단된다.

**3.2 시험방법**

**예열시험**

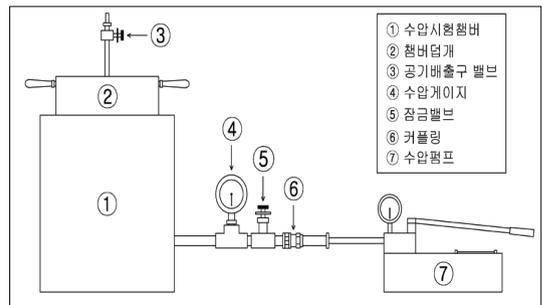
본 연구에서는 갱도 주변 암반의 지질공학적 특성과 유사한 역학적 특성을 갖는 시험편을 제작하기 위하여 전기로를 이용한 예열시험을 실시하였다. 사용된 전기로는 자동으로 승온 속도를 조절할 수 있는 자동제어장치를 가지고 있다. 암석 시험편에 열을 가하는 경우 열균열의 발생에 의해 물성이 변화하게 되는데 온도에 따른 물성의 변화 양상을 분석하기 위하여 최고예열온도가 200, 300, 400, 500, 600, 700℃가 되는 예열시험편을 제작하였다.

승온 속도를 빠르게 하는 경우 열충격에 따른 열파쇄가 발생할 수 있기 때문에 승온 속도는  $\leq 1^\circ\text{C}/\text{min}$ 가 되게 하였으며, 시험편에 가해진 최고예열온도에서 열균열이 충분히 발생할 수 있도록 최고 온도 유지시간은 24시간으로 하였다(이형원과 이정인, 1995, 윤용균과 이희근, 1996). 열균열의 대부분은 1차 가열단계에서 발생하기 때문에 최고온도의 반복 가열은 1회로 하였다(Bauer & Johnson, 1979). 시험편의 냉각은 전기로의 전원을 차단한 후 예열시험편이 상온에 도달할 때까지 자연냉각이 되도록 하였다.

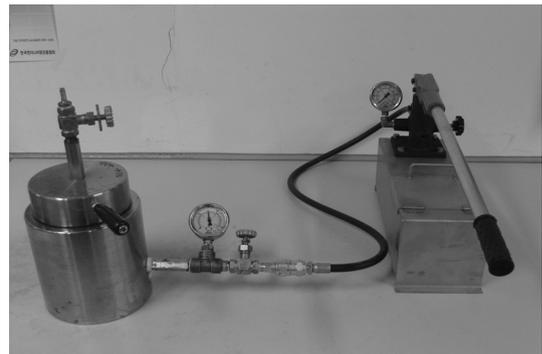
예열시험편에 대한 실내시험을 통해 비중, 유효공극률, 탄성파속도, 일축압축강도, 탄성계수, 포아송비를 측정하였다.

**수압시험**

갱도가 지하수로 포화되어 있고 지하수압이 갱도 주변 암반에 작용함으로 인해 암반의 역학적 특성이 저하되는 조건을 예열시험편에 모사하기 위하여 수압시험



(a) A schematic diagram



(b) A photograph

**Fig. 1.** An apparatus for applying water pressure to pre-heated specimens

장치를 제작하여 예열시험편에 수압을 가하였다(Fig. 1 참조). 수압시험장치는 시험편을 수압하는 챔버와 16 MPa 까지 수압을 가할 수 있는 수동식 수압펌프로 구성되어 있다. 챔버 내부에 남아있는 공기를 배출하기 위하여 챔버 덮개에는 공기배출구가 있다.

예열시험편 중 현지암반과 유사한 GSI를 갖는 것으

로 평가된 400, 500, 600, 700°C 예열시험편에 대해 수압을 가하였으며, 시험편에 가한 수압은 7.5 MPa 였다. 수압 7.5 MPa은 대략 지표 하부 750 m에 작용하는 수압으로 생각할 수 있다. 가곡광산의 기존 갱도 중 가장 깊은 곳에 위치한 갱도의 심도가 700 m 이상인 관계로 7.5 MPa을 시험편에 적용할 수압으로 선정하였다. 갱도가 호우기에 포화되어 갈수기에 배수되는 상황을 고려하면 갱도가 포화되어 있는 기간은 3개월 이상이 될 것으로 예상된다. 이러한 현장 상황을 고려하면 예열시험편에도 3개월 이상 수압을 가하는 것이 필요하지만 예비실험 결과 시험편에 1주일 이상 수압을 가하는 경우 물성의 변화가 별로 없는 것으로 나타났기 때문에 수압을 가하는 시간은 1주일로 하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 예열온도에 따른 암석의 물성 변화

Table 2, 3에는 각기 화강암과 석회암 시험편에 대한 예열온도에 따른 비중, 유효공극률, 탄성파속도, 일축압축강도, 탄성계수, 포아송비의 변화가 표시되어 있다. 석회암 시험편을 700°C로 예열한 경우 부서져버린 시

험편 표면이 껍질이 벗겨지는 것처럼 암석으로부터 떨어져나가 물성시험이 불가능한 관계로 석회암에 대해서는 200, 300, 400, 500, 600°C 예열시험편에 대해서만 물성 결과를 표시하였다. 표에 나타난 바와 같이 예열온도가 증가함에 따라 비중, 탄성파속도, 일축압축강도, 탄성계수, 포아송비는 감소하고 유효공극률은 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 예열시험편에 대한 현미경 관찰을 하지는 않았지만 이러한 결과는 예열온도가 증가함에 따라 광물 결정 입자의 경계와 내부에 발생하는 열균열이 증가함을 현미경 관찰을 통해 규명한 기존 연구와도 부합한다(윤용균과 이희근, 1996).

예열온도에 따른 열균열의 발생 정도를 파악하기 위하여 비중, 유효공극률, 탄성파속도를 정규화시켜 표시한 것이 Fig. 2에 나타나 있다. 정규화는 상온시험편의 물성을 기준으로 하여 각 예열온도별 물성의 비로 표시하였다.

Fig. 2(a)에 제시된 화강암의 경우를 보면 400°C까지는 비중, 유효공극률, 탄성파속도의 변화가 별로 없다가 400°C 이후부터 탄성파속도는 급격하게 감소하고 유효공극률은 급격하게 증가하는 것으로 나타난다. 이러한 변화 경향은 열균열의 발생 정도와 밀접하게 연관되어 있으며 400°C 이상의 온도에 노출된 시험편의 경우 대

**Table 2.** Material properties of pre-heated granite specimens

Temperature (°C)	Specific gravity	Effective porosity (%)	Elastic wave velocity (m/sec)		Uniaxial compressive strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
			P-wave	S-wave			
25	2.643	0.27	4820	3150	232	53	0.24
200	2.637	0.22	4730	3170	246	47	0.23
300	2.634	0.33	4640	3050	216	43	0.21
400	2.629	0.47	4530	2960	205	35	0.20
500	2.605	1.34	3870	2530	185	33	0.19
600	2.574	3.17	2420	1560	128	10	0.09
700	2.556	3.44	2070	1350	79	6	0.08

**Table 3.** Material properties of pre-heated limestone specimens

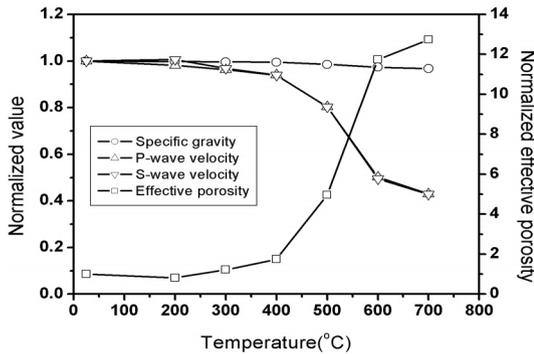
Temperature (°C)	Specific gravity	Effective porosity (%)	Elastic wave velocity (m/sec)		Uniaxial compressive strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
			P-wave	S-wave			
25	2.711	0.42	4340	2830	111	47	0.26
200	2.707	0.51	3870	2460	104	38	0.22
300	2.703	0.64	3520	2280	93	29	0.20
400	2.694	1.27	3110	2030	83	21	0.17
500	2.678	1.80	2920	1910	74	13	0.15
600	2.627	3.51	2370	1450	62	7	0.10

부분의 입자 경계에 균열이 발생하고 입자 내부에도 열 균열이 발생하여 탄성파속도와 유효공극률의 변화가 급격히 발생한다는 기존의 연구 결과와도 일치한다(윤용근과 이희근, 1996). 유효공극률의 증가 양상을 보면 상온에서 400°C까지 1.74배 증가한 것으로 나타나지만 400°C 이후부터 700°C까지는 7.32배로 급격한 증가를 나타냈으며 특히 500~600°C사이에서 변화가 현저하게 나타났다. 200°C에서 유효공극률이 상온시험편에 비해 감소하는 것은 열에 의한 입자의 팽창에 의해 기존 균열이 닫혀 발생한 것으로 생각할 수 있다. 탄성파속도의 경우에도 유효공극률과 유사하게 500~600°C 사이에서 급격한 감소가 있는 것으로 나타났다. 500~600°C 구간에서 열균열의 발생 정도와 관련된 유효공극률이나 탄성파속도의 변화가 심하다는 사실은 화강암의 주 성분 광물인 석영이 저온석영( $\alpha$ -석영)에서 고온석영( $\beta$ -석영)으로 전이하는 573°C에서 급격한 팽창을 하여 열 균열 발생이 가속화되는 것과 관련이 있는 것으로 생각된다(이형원, 1993). 비중의 경우에도 예열온도에 따른

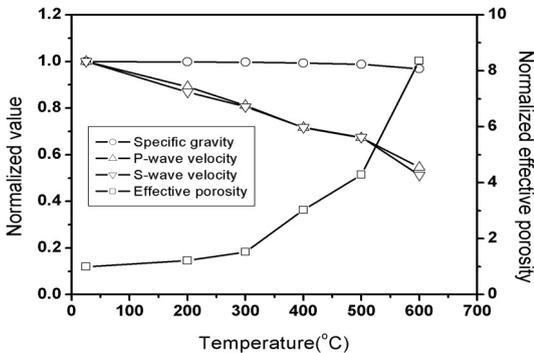
절대적인 변화 정도가 크지 않아 그림 상에서 변화가 없는 것처럼 보이지만 예열온도가 상온에서 400°C까지의 비중 감소율은 0.53%인 반면 400°C에서 700°C까지의 비중감소율은 2.28%로 400°C이후부터 비중의 감소율은 현저한 것으로 나타났으며, 500°C에서 600°C 사이에서는 1.19%로 가장 현저한 감소를 보였다.

Fig. 2(b)를 보면 석회암의 경우에도 예열온도에 따라 물성의 변화가 화강암과 유사하게 발생하는 것으로 나타났다. 300°C 이상에서 물성의 변화가 큰 것으로 나타났으며 특히 500~600°C 구간에서 변화가 두드러졌다. 온도가 화강암과 석회암의 탄성파속도와 유효공극률에 미치는 영향 정도를 파악하기 위하여 600°C 시험편에 대해서 비교한 결과 화강암의 탄성파속도(P파)와 유효공극률은 무결암의 0.43배와 12.7배로 변했음에 반해 석회암의 경우에는 무결암의 0.55배와 8.9배로 변하여 온도가 화강암에 미치는 영향이 더 큰 것으로 나타났다.

Fig. 3에는 화강암과 석회암 시험편에 대한 예열온도에 따른 일축압축강도, 탄성계수, 포아송비의 변화가 표시되어 있다. 그림을 보면 화강암의 경우 500°C 이상에서 급

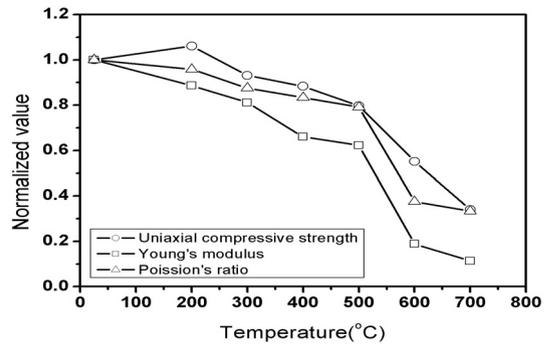


(a) Granite

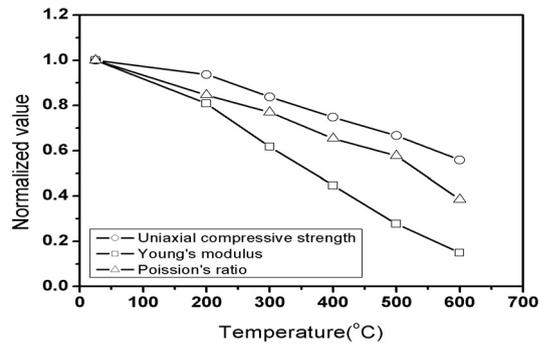


(b) Limestone

Fig. 2. Variation of normalized specific gravity, elastic wave velocity & effective porosity as a function of maximum thermal cycle temperature



(a) Granite



(b) Limestone

Fig. 3. Variation of mechanical properties as a function of maximum thermal cycle temperature

격한 감소를 나타내고 있고, 석회암의 경우에는 200℃ 이상에서부터 일정하게 감소하는 경향을 보인다. 상기의 3가지 역학적 특성 중 예열온도에 따른 물성의 변화가 가장 큰 것은 탄성계수인 것으로 나타났다.

본 연구에서는 갯도 주변의 현지암반과 유사한 GSI 값을 갖는 실내 시험편을 제작하기 위하여 무결암에 열을 가했기 때문에 예열시험편을 현지암반으로 가정하였다. 각 예열시험편의 일축압축강도와 탄성계수를 입력 자료로 하여 식 (1), (4)를 이용해 GSI를 구한 결과가 Table 4에 표시되어 있다. Table 4에서  $GSI_{UCS}$ 와  $GSI_{DM}$ 은 각기 예열시험편의 일축압축강도와 탄성계수를 이용하여 구한 GSI이고, Average는  $GSI_{UCS}$ 와  $GSI_{DM}$ 의 평균을 말한다. 식 (1), (4)를 적용함에 있어  $a=0.5$ ,  $D=0$ 으로 가정하였다. 가곡광산 선곡 400갱에서 측정된 GSI 값이 70~80이기 때문에(한국지질자원연구원, 2009) Table 4에 표시된 예열시험편의 평균 GSI로부터 화강암의 경우 500℃ 이상, 석회암의 경우 400℃ 이상의 예열시험편이 현지암반과 유사한 GSI를 나타낸다고 판단할 수 있다.

**4.2 수압이 물성에 미치는 영향**

가곡광산 갯도 주변의 현지암반과 유사한 GSI를 갖

는 것으로 분석된 500~700℃ 화강암 시험편과 400~600℃ 석회암 시험편에 대해서 1주일간 7.5 MPa의 수압을 가한 후 건조시켜 실내 물성 시험을 실시하였다. 수압을 가하는 경우 예열시험편 내에 발달된 열균열이 확장되거나 간극이 커질 것으로 예상되며 이러한 경향을 잘 나타낼 것으로 생각되는 유효공극률, 탄성과속도, 일축압축강도, 탄성계수를 측정한 결과가 Table 5에 표시되어 있다. 수압을 가한 후 물성이 수압을 가하기 전보다 어느 정도 변화가 있는 지를 파악하기 위하여 수압 가하기 전 물성을 기준으로 수압 가한 후 물성의 비를 정규화 시킨 결과가 Fig. 4에 표시되어 있다. 그림을 보면 화강암의 경우 온도가 증가함에 따라 탄성과속도, 일축압축강도, 탄성계수는 감소하고 유효공극률은 증가하는 것으로 나타났으며 각 물질들의 변화 기울기도 유사하였다. 석회암의 경우도 화강암과 유사한 경향을 보이지만 탄성계수의 변화가 다른 물성에 비해 온도에 따라 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 고려한 물성 중에서 수압에 의한 영향 정도가 가장 큰 것은 탄성계수인 것으로 나타났다. Table 6에는 수압을 가하기 전 시험편의 물성을 기준으로 수압을 가한 시험편의 물성이 얼마나 변했는지를 백분율로 표시한 자료가 나타나

**Table 4.** GSI of pre-heated specimens estimated by equation (1) and (4)

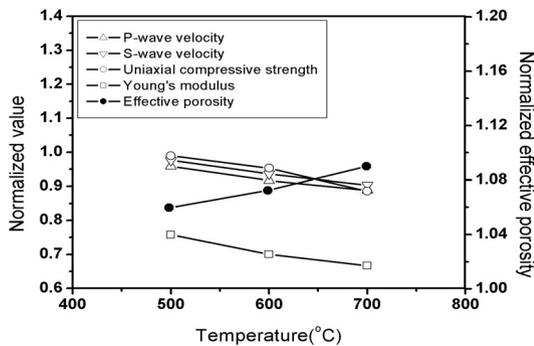
Temperature (°C)	Rock type					
	Granite			Limestone		
	$GSI_{UCS}$	$GSI_{DM}$	Average	$GSI_{UCS}$	$GSI_{DM}$	Average
25	100	100	100	100	100	100
200	101	81	91	99	74	87
300	99	75	87	97	64	81
400	98	66	82	95	57	76
500	96	65	81	93	48	71
600	89	42	66	90	39	65
700	81	35	58	.	.	.

**Table 5.** Material properties of pre-heated granite and limestone specimens under water pressure of 7.5 MPa

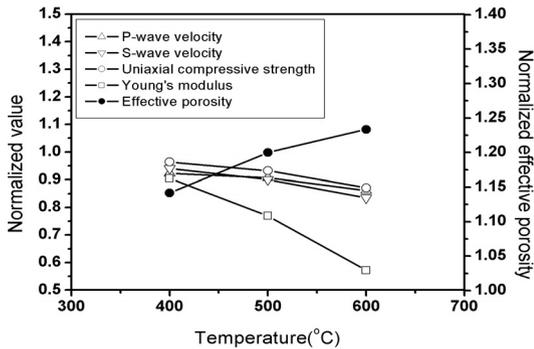
Properties	Temperature (°C)						
	Granite			Limestone			
	500	600	700	400	500	600	
Effective porosity (%)	1.42	3.40	3.75	1.45	2.16	4.33	
Elastic wave velocity (m/s)	P-wave	3710	2220	1840	2870	2650	2040
	S-wave	2470	1460	1220	1910	1720	1210
Uniaxial compressive strength (MPa)	183	122	70	80	69	54	
Young's modulus (GPa)	25	7	4	19	10	4	

**Table 6.** Reduction of material properties of pre-heated specimens under water pressure

Properties		Temperature (°C)					
		Granite			Limestone		
		500	600	700	400	500	600
Effective porosity (%)		6.0	7.3	9.0	14.2	20.0	23.4
Elastic wave velocity (%)	P-wave	4.1	8.3	11.1	7.7	9.3	13.9
	S-wave	2.4	6.4	9.6	5.9	10.0	16.6
Uniaxial compressive strength (%)		1.1	4.7	9.6	3.6	6.8	12.9
Young's modulus (%)		24.2	30	33.3	9.5	23.1	42.9
Average (%)		7.6	11.3	14.9	8.2	13.8	21.9



(a) Granite



(b) Limestone

**Fig. 4.** Change of normalized elastic wave velocity, uniaxial compressive strength, Young's modulus and effective porosity at selected pre-heated temperatures

있다. 이 경우 유효공극률은 음으로 나타나지만 편의상 양의 값으로 표시하였다. Table 4에 표시된 500, 600, 700°C 화강암 예열시험편의 환산 GSI가 각기 81, 66, 58인 것에 대응하여 수압에 의한 물성의 변화량도 각기 7.6, 11.3, 14.9%로 나타나 열화된 암석일수록 수압의 영향을 크게 받는다는 것을 알 수 있다. 석회암의 경우

에도 400, 500, 600°C 예열시험편의 GSI가 각기 76, 71, 65인 것에 대응하여 수압에 의한 물성의 평균 변화량도 8.2, 13.8, 21.9%로 나타났다. 상기의 결과로부터 수압에 의한 영향은 암석의 열화 정도뿐만 아니라 암종에 따라 서로 달라짐을 알 수 있다. 갯도가 지하수로 일정기간 포화되어 갯도 주변 암반이 수압을 받는 경우 수압에 의해 기존 절리가 확장되거나 간극이 벌어져 물성이 저하됨으로 인해 갯도의 안정성에 문제가 발생할 수 있다. 지하수 배수 후의 갯도 안정성을 수치모델링 하기 위해서는 갯도 주변 암반의 물성이 수압에 의해 어느 정도 감소하는 가를 정량적으로 고려할 수 있어야 하며 이때 상기에 기술된 결과가 사용될 수 있다고 생각된다.

지하수로 완전 포화되어 수압을 받았던 갯도의 안정성을 적절하게 수치모델링하기 위해서는 수압에 의해 열화된 갯도 주변 암반의 물성을 결정하는 것이 중요하다. 본 연구에서 수행된 결과를 이용하면 수압에 의해 어느 정도의 물성 감소가 발생하는 지에 대한 정량적인 평가를 수행할 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 본 연구에서는 수압을 7.5 MPa 한가지로 하여 실험을 수행한 관계로 수압의 크기에 따른 일반적인 영향 정도를 파악하지 못했기 때문에 차후 수압의 크기를 달리한 추가적인 연구를 수행할 필요가 있다고 생각된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 일정 기간 동안 갯도가 지하수로 포화되어 있는 경우 수압이 갯도 주변 암반에 영향을 미쳐 물성의 저하를 유발하는 것을 무결압 시험편을 통해 조사하고자 하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 예열온도가 증가함에 따라 비중, 유효공극률, 탄성파 속도의 변화가 발생하였다. 화강암의 경우 400°C 이상에서 변화 정도가 심해지고 특히 500~600°C 구간

에서 변화가 현저하였다. 석회암의 경우에는 300°C 이상에서부터 변화가 커졌으며 500~600°C 구간에서 가장 큰 변화를 보이는 것으로 나타났다.

2. 예열온도에 따른 일축압축강도, 탄성계수, 포아송비의 변화도 물리적 특성의 변화와 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났으나 화강암의 경우 500°C 이상에서 급격한 감소를 나타내고 석회암의 경우에는 200°C 이상에서 일정한 감소 경향을 보였다. 예열온도에 따라 가장 큰 변화를 보이는 물성은 탄성계수로 나타났다.
3. 예열시험편의 일축압축강도와 탄성계수의 평균을 이용하여 구한 화강암 500, 600, 700°C 예열시험편의 GSI는 각기 81, 66, 58로 나타났고, 석회암 400, 500, 600°C 예열시험편의 GSI는 각기 76, 71, 65로 평가되었다.
4. 수압을 적용한 예열시험편의 유효공극률, 탄성파속도, 일축압축강도, 탄성계수를 측정하여 평균한 결과 수압을 가하기 전 예열시험편에 비해 평균 감소량이 화강암 500, 600, 700°C 예열시험편 각각에 대해서 7.6, 11.3, 14.9%로 나타났고, 석회암 400, 500, 600°C 예열시험편에 대해서는 각기 8.2, 13.8, 21.9%로 평가되었다.

## 감사의 글

본 연구는 2008년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(과제번호 : 2008RRD11P0330202009)로서 지원

에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 대한광업진흥공사, 1986, 제2연화 광산 매장량 조사 보고서, 대한광업진흥공사, pp. 2-3.
2. 윤용균, 이희근, 1996, 열응력이 암석의 역학적 거동과 투수성에 미치는 영향 - I. 역학적 영향, 터널과 지하공간(한국암반공학회지) 6.1, pp. 1-9.
3. 이형원, 1993, 암석의 열파괴와 강도 및 변형거동의 온도 의존성에 관한 연구, 서울대학교 공학박사 학위논문, pp. 12-13.
4. 이형원, 이정인, 1995, 고온하에서 암석의 열충격, 열팽창 및 열파괴에 관한 연구, 터널과 지하공간(한국암반공학회지) 5.1, pp. 22-40.
5. 한국지질자원연구원, 2009, 스킨/반암형 광상의 최적설계법 및 친환경 자원개발 기술 개발, 1차년도 보고서, pp. 4.
6. 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 Mechanics, pp. 7-18.
7. Hoek, E., C. Carranza-Torres and B. Corkum, 2002, Hoek-Brown failure criterion-2002 Edition, Proceedings of 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, pp. 267-273.
8. Hoek, E. and M.S. Diederichs, 2006, Empirical estimation of rock mass modulus, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 43, pp. 203-215.

### 윤용균



1985년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1987년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
1992년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 043-649-1318  
E-mail: yoon63@semyung.ac.kr  
현재 세명대학교 소방방재학과 교수

### 백영준



2009년 세명대학교 자원환경공학과 공학사  
2011년 세명대학교 대학원 환경안전시스템공학과 공학석사

Tel: 010-4316-2510  
E-mail: junni0@naver.com  
현재 세명대학교 대학원 환경안전시스템공학과

### 조영도



1977년 인하대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1982년 인하대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
2007년 광운대학교 화학공학과 공학박사

Tel: 042-868-3223  
E-mail: jyd@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 자원탐사개발연구실 책임연구원