

열응력과 수압이 화강암의 변형 거동에 미치는 영향

윤용균^{1)*}

Effects of the Thermal Stress and Water Pressure on the Deformation Behavior of Granite

Yong-Kyun Yoon

Abstract In this study, effects that thermal stress and water pressure have on the deformation behaviour of granite specimens recovered in Gagok Mine are estimated. To analyze effects of the thermal stress and water pressure on the deformation behaviour, granite specimens were preheated with cycles of predetermined temperatures ranging 200°C to 700°C and 500, 600, 700°C specimens were pressurized to 7.5 MPa. The deformation behaviour of the specimens had been studied by performing uniaxial compressive tests. Axial and lateral strains of specimens were found to increase with increasing temperature, and above 600°C, the increase of strains were more pronounced. The reduction trends of uniaxial compressive strength and Young's modulus with temperature appeared to follow an exponential decay function. Specimens under water pressure showed the more inelastic deformation characteristics, which means that water pressure has an effect on the widening and extending of micro-cracks existed in preheated specimens.

Key words Thermal stress, Water pressure, Deformation behaviour, Predetermined temperature

초 록 본 연구에서는 가곡광산 화강암의 변형거동에 열응력과 수압이 미치는 영향을 평가하였다. 열응력과 수압이 미치는 영향을 해석하기 위하여 화강암 시험편에 열을 가하여 200, 300, 400, 500, 600, 700°C 예열시험편을 제작하였고, 500, 600, 700°C 예열시험편에 7.5MPa의 수압을 가하였다. 예열시험편에 대한 일축압축시험 결과 예열온도가 증가함에 따라 시험편의 축변형률 및 횡변형률이 증가하는 것으로 나타났으며 특히 600°C 이상 시험편에서 변형률의 증가가 현저한 것으로 나타났다. 온도에 따라 시험편의 일축압축강도와 탄성계수는 지수적으로 감소하는 것으로 측정되었다. 수압을 받은 시험편은 그렇지 않은 시험편에 비해 비탄성적인 변형거동이 큰 것으로 나타났으며 이는 수압이 예열시험편 내에 존재하는 균열의 확장과 개구에 영향을 미친다는 것을 뜻한다.

핵심어 열응력, 수압, 변형거동, 예열온도

1. 서론

암석에 열을 가하는 경우 암석 내 발생한 온도구배나 구성 광물 입자의 이방적인 열팽창에 따라 열응력이 발생하게 된다. 열응력은 입자 경계나 입자 내에

있는 기존 균열을 확장시키고 새로운 열균열을 생성한다. 열균열은 암석의 물성 변화를 초래할 뿐만 아니라 변형거동에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(이형원과 이정인, 1995; 윤용균, 1998; Heuze, 1983; Homand-Etienne and Houpert, 1989). 방사성폐기물 처분장 주변의 암석이나 화재에 노출되는 암석에서와 같이 열균열이 발생할 가능성이 높은 암반 구조물의 경우 구조물의 안정성을 해석하기 위해서는 열균열이 변형거동에 미치는 영향을 평가하는 것이 필요하다. 암석 내에 존재하는 물은 암석의 물성과 변형거동

¹⁾ 세명대학교 소방방재학과 교수
* 교신저자 : yoon63@semyung.ac.kr
접수일 : 2011년 6월 16일
심사 완료일 : 2011년 6월 21일
게재 승인일 : 2011년 6월 25일

에 영향을 미치게 된다. 포화도가 증가함에 따라 일축압축강도는 감소하며, 연약한 암석일수록 포화의 영향을 많이 받아 경암에 비해 일축압축강도의 감소가 큰 것으로 나타난다(Romana and Vásárhelyi, 2007). 암석 내에 작용하는 공극수압은 유효응력법칙에 따라 암석의 강도를 저하시키며 암석의 변형거동에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(김동현과 이정인, 1985; 최해문, 1992). 공극수압은 암석 내부에 존재하는 균열을 확장시켜 공극수압이 제거된 이후에도 암석의 강도가 저하되는 원인으로 작용하게 된다. 지하수로 포화되어 있던 폐광산 갱도가 배수되는 경우 천반 붕락이 발생하기도 하는데 이는 지하수압에 의해 갱도 주변 암반 내 존재하는 불연속면이 확장되거나 충전물이 세출되어 전단저항력이 감소함으로 인해 발생하는 것으로 생각할 수 있다.

본 연구에서는 열응력과 수압이 암석의 변형 거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 가곡광산에서 채취한 화강암 시험편에 대해 예열시험을 실시하였다. 화강암 시험편의 예열온도는 200, 300, 400, 500, 600, 700℃로 하였으며, 예열시험편에 대해 일축압축시험을 실시하여 예열온도에 따른 변형거동을 측정하였다. 수압이 변형거동에 미치는 영향을 해석하기 위하여 500, 600, 700℃ 화강암 예열시험편에 대해 7.5MPa의 수압을 가한 후 건조상태에서 일축압축시험을 실시하였다.

2. 암석 시험편

가곡광산 금곡 400갱 내의 탐사용 시추공 156~



Fig. 1. Photograph of shaped granite specimens.

170m에서 채취한 코어를 성형하여 본 연구에서 사용된 화강암 시험편을 제작하였다. 화강암 시험편의 직경은 $\phi 47.40\text{-}47.60\text{mm}$ 이고, 직경 대 길이의 비는 1 : 2.2~2.5가 되도록 하였다. 신선한 화강암의 물성을 파악하기 위하여 단위중량, 유효공극률, 탄성파속도, 일축압축강도, 압열인장강도, 탄성계수, 포아송비를 측정하였다. 사용된 무결암 시험편은 3개이다. Fig. 1에는 성형된 시험편 모습이 나타나 있고, Table 1에는 신선한 화강암 시험편의 물성이 표시되어 있다(백영준, 2011).

3. 실험 방법

예열시험편을 제작하기 위하여 승온 속도 조절기능이 있는 전기로를 사용하였다. 암석에 가해지는 열

Table 1. Material properties of granite acquired in Gagok Mine

Material properties		Value
Unit weight (kN/m^3)		25.9±0.1
Effective porosity (%)		0.27±0.01
Elastic wave velocity (m/sec)	P-wave	4820±120
	S-wave	3150±150
Uniaxial compressive strength (MPa)		232±12
Brazilian tensile strength (MPa)		23±2
Young's modulus (GPa)		53±6
Poisson's ratio		0.24±0.04

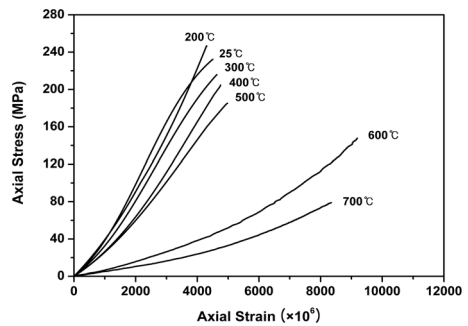
에너지를 급격하게 증가시키는 경우 암석 내 온도구배가 발생하여 열파쇄가 발생할 가능성이 있기 때문에 승온 속도는 1°C/min 이하가 되게 하였으며, 최고 예열온도에 도달 후 해당 온도에서 발생할 수 있는 열균열이 충분히 생성될 수 있도록 최고 온도 유지 시간은 1일로 하였다(이형원과 이정인, 1996; 윤용균 외, 2011). 최고 예열온도로 가열된 시험편을 냉각하기 위하여 전기로의 전원을 끄고 자연냉각이 되도록 하였다. 화강암 시험편의 최고 예열온도는 200, 300, 400, 500, 600, 700°C로 하였다.

수압이 암석 내 존재하는 균열의 확장 정도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 화강암 500, 600, 700°C 예열시험편에 대해서 수압시험을 실시하였다. 수압 시험을 실시하기 위하여 원통형 챔버를 제작하고 가압 용량 16 MPa의 수압펌프를 연결하였다. 예열 시험에서 열균열이 충분히 발생할 수 있도록 최고 예열 온도의 유지를 일정 시간 이상 했듯이 수압에 의해 암석 내부에 있는 기존 균열의 확장하는 정도가 수압 유지시간에 따라 달라질 수 있기 때문에 예비시험 결과에 따라 수압 유지시간을 1주일로 하였다(윤용균 외, 2011). 예열시험편에 가한 수압의 크기는 7.5 MPa로 하였으며 수압 적용이 끝난 예열시험편을 건조시켜 물성을 측정하였다.

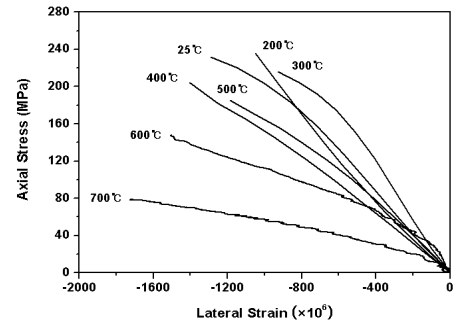
4. 결과 및 고찰

Fig. 2에는 무결암(25°C) 및 예열시험편(200, 300, 400, 500, 600, 700°C)의 변형거동이 나타나 있다. 각 최고예열온도 당 3개의 예열시험편을 제작하였다. 초기 하중 단계에서 축변형률 그래프가 아래로 볼록한 형태의 비선형적인 변형 특성을 보이는 것은 암석 내에 존재하는 균열이 폐합되기 때문이다. Fig. 2(a)를 보면 예열온도가 증가할수록 초기 단계에서의 비선형적인 구간이 증가하는 것을 알 수 있는데 이는 예열온도가 증가할수록 암석 내부에 열균열 발생이 증가했다는 사실을 나타낸다. 600°C와 700°C 예열 시험편의 축변형률이 현저하게 증가한 것으로 나타나는 것은 화강암의 주성분 광물인 석영이 573°C 부근에서 α-석영에서 β-석영으로 전이하면서 급격한 팽창이 발생하고 이로 인하여 열균열 발생 정도가 심화되었기 때문인 것으로 생각된다. 경암 일수록 축변

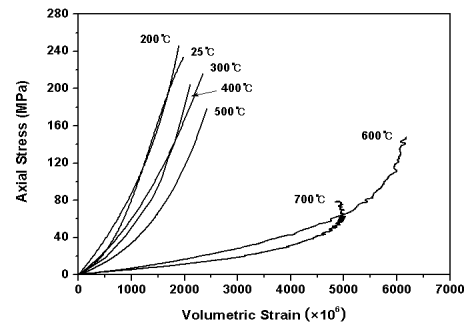
형률은 탄성적인 거동을 보이고 연암에서는 비탄성적인 거동을 보인다는 점을 고려하면 600°C와 700°C 예열시험편은 연암의 변형특성을 나타낸다고 생각할 수 있다. 횡변형률 그래프는 축변형률 그래프와 다르게 일정한 경향성을 보이지는 않지만 전반적으로 비탄성적인 거동을 나타내고 있다. 체적변형률은 암석의 변형거동을 이해하는데 있어 중요한 요소이다. 초기 하중 단계에서 체적변형률 그래프가 비선형적인 특성을 보이는 것은 축변형률 변형거동에서와 마찬



(a) Axial stress vs. axial strain



(b) Axial stress vs. lateral strain



(c) Axial stress vs. volumetric strain

Fig. 2. Deformation characteristics of intact & preheated granite specimens.

가지로 암석 내 존재하는 균열의 폐쇄와 연관이 있다. 체적변형을 그래프가 선형적인 탄성구간을 지나 비선형적인 거동을 보이는 지점을 팽창 개시점이라 하는데 팽창은 암석 내 균열 생성 및 전파와 관련이 있다. 일반적으로 팽창은 최대 강도의 40% 수준에서 시작되는 것으로 알려져 있지만(Farmer, 1983), Fig. 2(c)를 보면 예열온도가 높을수록 팽창 개시 응력이 낮아지는 경향이 나타난다.

Fig. 3에는 예열온도에 따른 화강암 예열시험편의 일축압축강도 변화가 표시되어 있다. 그림을 보면 일축압축강도가 500°C까지는 점진적으로 감소하다 500°C 이후에 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 200°C 예열시험편의 일축압축강도가 무결암 시험편의 일축압축강도보다 큰 것은 예열온도가 낮은 경우 광물 입자의 팽창에 의해 기존 균열이 폐합되었기 때문인 것으로 판단된다. 일축압축강도의 온도 의존성을 파악하기 위하여 측정된 일축압축강도 자료에 감쇠 지수

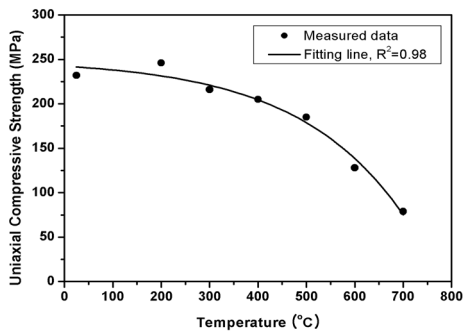


Fig. 3. Uniaxial compressive strength vs. maximum thermal cycle temperature.

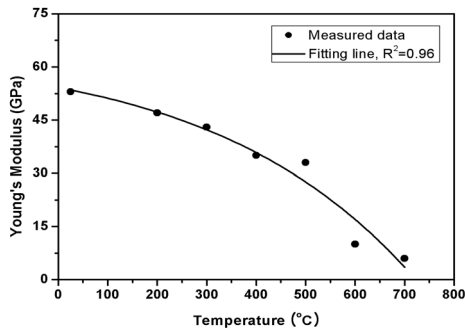


Fig. 4. Young's modulus vs. maximum thermal cycle temperature.

함수를 이용한 회귀분석을 실시한 결과 (1)식과 같은 회귀식을 얻었다. 일반적으로 예열온도가 증가함에 따라 암석의 일축압축강도는 감소하는 것으로 나타나기 때문에 회귀함수로 감쇠 지수함수를 적용한 것은 타당한 것으로 생각된다(Heuze, 1983).

$$UCS = -7.5 \times \exp\left(\frac{T_p}{222.5}\right) + 249.9 \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

여기서 UCS는 예열시험편의 일축압축강도, T_p 는 예열온도를 나타낸다. Fig. 4에는 예열온도에 따른 탄성계수의 변화가 나타나 있다. 일축압축강도와 유사한 변화 양상을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 탄성계수 자료에 대한 감쇠 지수함수 회귀식은 (2)식과 같이 표시된다.

$$E = -10.8 \times \exp\left(\frac{T_p}{403.0}\right) + 65.1 \quad (\text{GPa}) \quad (2)$$

여기서 E는 예열시험편의 탄성계수를 나타낸다. (1), (2)식을 이용하는 경우 가곡광산 화강암과 유사한 특성을 보이는 화강암에 대해서 실험을 하지 않고도 예열온도에 따른 일축압축강도 및 탄성계수를 추정하는 것이 가능하다.

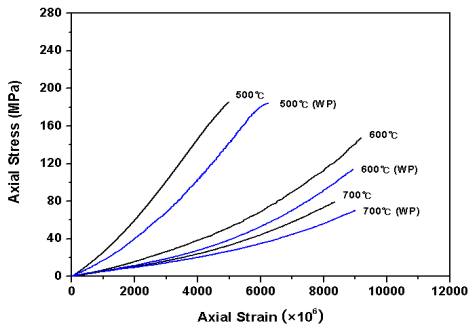
Fig. 5에는 500, 600, 700°C 예열시험편과 500, 600, 700°C 예열시험편에 7.5MPa의 수압을 가한 후 건조시킨 시험편의 변형거동이 표시되어 있다. 그림에서 WP는 수압을 가한 시험편을 뜻한다. 수압시험편을 제작하는데 각 시험편 당 1주일의 시간이 걸리기 때문에 각 예열온도 당 1개씩만 수압시험편을 제작하였다. 시험편이 1개인 경우 암석의 불균질·이방적인 특징에 의한 물성의 변화와 수압에 의한 물성의 변화를 구분하는 것이 어려울 수 있다. 500, 600, 700°C 예열시험편에 대한 공극률과 동일한 시험편에 대해 수압을 가한 후 측정된 공극률을 비교한 결과 500, 600, 700°C 수압시험편의 공극률이 각기 5.6, 6.7, 8.3% 증가하는 것으로 나타났기 때문에 수압이 예열시험편 내 균열의 확장에 영향을 미쳤다고 판단할 수 있다. 수압을 받은 시험편의 축변형을 변형거동은 수압을 받지 않은 시험편의 변형거동과 유사한 경향을 나타내고 있지만 변형률이 증가하고 있음을

알 수 있다. 축변형률 변형거동과는 다르게 수압을 받은 시험편의 횡변형률 변형거동은 수압을 받지 않은 시험편에 비해 상당히 비탄성적인 것으로 나타나고 있다. 횡변형률은 암석 내 균열 발생에 의한 체적 팽창에 민감한 영향을 받기 때문에 수압을 받은 시험편의 비탄성적인 거동이 심화되었다는 것은 수압이 예열시험편 내 새로운 균열의 발생이나 기존 균열의

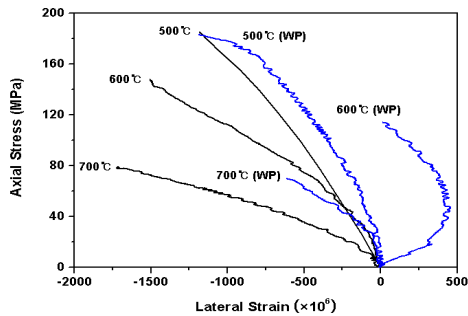
확장에 영향을 미쳤다는 것을 뜻한다.

Fig. 6에는 수압을 받은 시험편과 받지 않은 시험편 간의 예열온도에 따른 일축압축강도와 탄성계수의 변화가 나타나 있다. 수압을 받은 500, 600, 700°C 시험편의 일축압축강도의 감소율은 각기 1.1, 4.7, 9.6% 이고, 탄성계수의 경우에는 각기 24.2, 30.0, 33.3%로 나타나 예열온도가 증가함에 따라 수압을 받은 시험편의 일축압축강도 및 탄성계수의 감소 정도가 증가하는 것으로 나타났다.

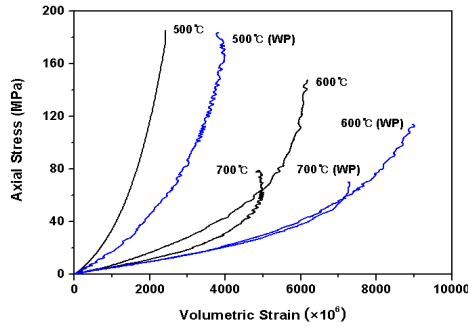
일축압축강도와 탄성계수를 이용하여 무결암을 분류하는 Deere & Miller의 계수비(modulus ratio) 분류법(Farmer, 1983)을 이용하여 예열시험편 및 수압을 받은 예열시험편을 분류한 것이 Fig. 7에 표시되어 있다. 계수비는 탄성계수/일축압축강도의 비로서 계수비가 500보다 큰 경우에는 ‘높은 계수비’, 100~500인 경우에는 ‘중간 계수비’, 100보다 작은 경우에는 ‘낮은 계수비’라 한다. 계수비는 취성도와 연관이



(a) Axial stress vs. axial strain

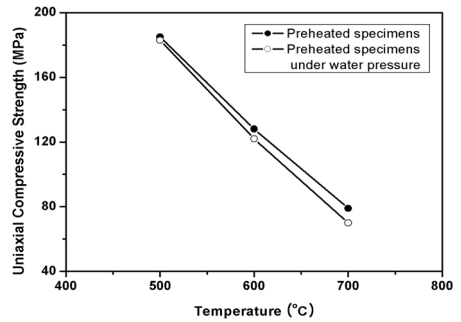


(b) Axial stress vs. lateral strain

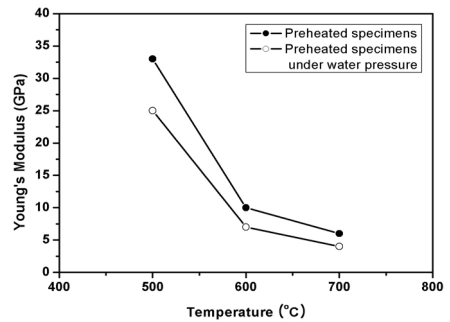


(c) Axial stress vs. volumetric strain

Fig. 5. Comparison of deformation characteristics between preheated specimens and preheated specimens under water pressure.



(a) Uniaxial compressive strength



(b) Young's modulus

Fig. 6. Comparison of uniaxial compressive strength & Young's modulus between preheated specimens under non-water pressure and under water pressure.

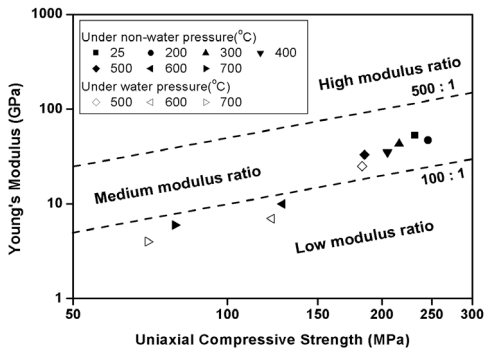


Fig. 7. Modulus ratio ranges for preheated specimens under non-water pressure and under water pressure.

있기 때문에 예열온도와 수압이 암석의 취성도 변화에 미치는 영향 정도를 Fig. 7로부터 알 수 있다. 그림을 보면 상온시험편, 200, 300, 400, 500°C 예열시험편은 ‘중간 계수비’에 속하고 600, 700°C 예열시험편은 ‘낮은 계수비’범위에 들어가 예열온도가 화강암의 취성 변화에 영향을 미치기는 하지만 예열온도가 600°C 이상이 되어야만 분류 등급 변화에 영향을 미침을 알 수 있다. 수압을 받은 예열시험편의 계수비가 낮아지는 것으로 나타나 수압이 암석의 취성 변화에 영향을 미치기는 하지만 분류 등급 변화에 영향을 줄 정도는 아닌 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 가곡광산 화강암에 열을 가하여 제작한 200, 300, 400, 500, 600, 700°C 예열시험편과 500, 600, 700°C 예열시험편에 7.5MPa의 수압을 가하여 제작한 수압시험편에 대해 일축압축시험을 실시하여 열응력과 수압이 암석의 변형거동에 미치는 영향을 평가하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 예열온도가 증가함에 따라 예열시험편의 축변형률과 횡변형률은 증가하는 것으로 나타났으며 특히 600°C 이후에서 변형률의 증가가 매우 현저한 것으로 나타났다.
- 2) 예열온도가 증가함에 따라 시험편의 일축압축강도와 탄성계수가 감소하는 것으로 나타났으며 감

소 경향은 감쇠 지수함수를 따르는 것으로 평가되었다.

- 3) 수압을 받은 시험편의 변형거동은 그렇지 않은 시험편에 비해 비탄성적인 거동을 더 많이 보이는 것으로 나타났다.
- 4) 500, 600, 700°C 수압시험편의 일축압축강도 감소는 각기 1.1, 4.7, 9.6%이고, 탄성계수의 감소는 각기 24.2, 30.0, 33.3%로 나타났다.
- 5) 무결암 시험편, 200, 300, 400, 500, 600, 700°C 예열시험편의 계수비를 계산한 결과 무결암 시험편, 200, 300, 400, 500°C 예열시험편은 ‘중간 계수비’에 속하고 600, 700°C 예열시험편은 ‘낮은 계수비’에 속하는 것으로 나타났다. 계수비는 암석의 취성도와 연관이 있기 때문에 600, 700°C 예열시험편은 연암화가 되었다고 추정할 수 있다. 수압은 계수비를 저하시키기는 하지만 계수비 분류 등급을 변화시킬 만큼의 영향을 미치지는 않는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 김동현, 이정인, 1985, 삼축압축하에서 공극수압이 암석의 파괴강도에 미치는 영향, 대한광산학회지, Vol. 22, No. 4, pp. 266-271.
2. 백영준, 2011, 지하수가 경도의 안정성에 미치는 영향에 관한 수치해석적 연구, 세명대학교 석사학위논문, 74p.
3. 윤용균, 1998, 열균열이 화강암의 변형거동에 미치는 영향, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), Vol. 8, No. 3, pp. 249-256.
4. 윤용균, 백영준, 조영도, 2011, 온도와 수압이 가곡광산 화강암과 석회암의 물성에 미치는 영향, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), Vol. 21, No. 1, pp. 33-40.
5. 이형원, 이정인, 1996, 암석의 강도 및 변형거동의 온도 의존성에 관한 연구, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), Vol. 6, No. 2, pp. 101-121.
6. 최해문, 1992, 삼축압축하에서 공극수압이 인공절리면을 가진 암석의 변형파괴에 미치는 영향, 서울대학교 공학석사학위논문, 65p.
7. Farmer, I., 1983, Engineering behaviour of rocks, Chapman & Hall, London, pp. 11-14, 65-66.
8. Heuze, F.F., 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.

9. Homand-Etienne, F. and R. Houpert, 1989, Thermally induced microcracking in granites : characterization and analysis, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 26, No. 2, pp. 125-134.
10. Romana, M. and B. Vásárhelyi, 2007, A discussion on the decrease of unconfined compressive strength between saturated and dry rock samples, 11th ISRM Congress on Rock Mechanics, pp. 139-142.



윤용관

세명대학교 소방방재학과 교수

Tel: 043-649-1318

E-mail: yoon63@semyung.ac.kr