TUNNEL & UNDERGROUND SPACE Vol. 23, No. 3, 2013, pp. 212-218
http://dx.doi.org/10.7474/TUS.2013.23.3.212
ISSN: 1225-1275(Print)
ISSN: 2287-1748(Online)

예열처리된 응회암 시험편의 물성 변화

윤용균*, 김사현

Changes of Material Properties of Pre-heated Tuff Specimens

Yong-Kyun Yoon*, Sa-Hyun Kim

Abstract Tuff specimens were thermally treated with predetermined temperatures of 200, 400 and 600℃ to construct specimens simulating weathered tuff rocks. Specific gravity, absorption ratio, elastic wave velocity, uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength, Young's modulus, Poisson's ratio and slake-durability index were measured for pre-heated specimens. Heating of rock specimens entailed the degradation of material properties except for slake-durability index. It was found that correlations among P-wave velocity, uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength, Young's modulus and absorption ratio are high. Regression equations which use the P-wave velocity as an independent variable were presented to evaluate uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength, Young's modulus and absorption ratio.

Key words Pre-heated specimens, Degradation of material properties, Slake-durability index, Regression equations

초 록 풍화된 응회암 시험편을 모사하기 위하여 최고 예열온도를 200, 400, 600(℃)로 한 예열시험편을 제작하였다. 각 예열시험편에 대한 실내시험을 통해 비중, 흡수율, 탄성파속도, 일축압축강도, 압열인장강도, 탄성계수, 포아송비, 슬레이크 내구성 지수를 측정하였다. 암석에 열을 가하는 경우 물성의 열화가 발생하는 것으로 나타났으나 예외적으로 슬레이크 내구성 지수는 별로 영향을 받지 않는 것으로 평가되었다. P-파 속도와 일축압축강도, 압열인장강도, 탄성계수, 흡수율 간에는 상당한 상관성이 있는 것으로 해석되었으며, P-파 속도를 알면 일축압축강도, 압열인장강도, 탄성계수, 흡수율을 추정할 수 있는 회귀식을 도출하였다.

핵심어 예열시험편, 물성의 열화, 슬레이크 내구성 지수, 회귀식

1. 서 론

현지암반은 다양한 풍화 상태를 보이기 때문에 암석의 공학적 특성을 평가하기 위해서는 풍화 정도에 따른 물성 변화를 평가하는 것이 필요하다. 무결암~심한 풍화까지의 풍화 전 범위를 포함하는 시료를 한꺼번에 현장에서 얻기는 매우 어렵다. 풍화 암석의 기본적인 특징은 구성 광물 입자의 경계에 균열이 존재하여 입자간 결합이 느슨하게 되어 있으며 광물 자체가 변질되어 있다는 것이다. 신선한 암석의 구성 광물 입자 경계와 입자 내에 인위적인 균열을 발생시킨 열화시험편을 제작하면 어느 정도는 풍화 암석과 유사한 물리적·역학적특성을 나타내어 풍화 암석을 모사할 수 있을 것으로 예상할 수 있다. 암석에 열을 가하면 암석을 구성하는 결정 입자가 열팽창을 하게 된다. 열팽창은 열응력을 유도하여 결정 경계와 결정 내부에 열균열을 발생시키고 기존 균열이 확장되도록 한다. 한 번 발생한 열균열은 암석을 상온으로 냉각시켜도 원래대로 회복되지 않고 그대로 남게 된다(Richter and Simmons, 1974, Bauer and Johnson, 1979, Yoon and Lee, 1996, Yoon, 1998). 암석의 잔류열팽창 정도는 예열온도에 따라 달라지며 암석의 물리적·역학적 특성도 예열온도에 따라 변하게 된다.

본 연구에서는 경상계 응회암에 200, 400, 600(℃)의 열을 가하여 열화시험편을 제작하였다. 각 열화시험편

Received: May. 2, 2013
Revised: May. 20, 2013
Accepted: May. 22, 2013
***Corresponding Author:** Yong-Kyun Yoon
Tel) +82436491318, Fax) +82436491787
E-Mail) yoon63@semyung.ac.kr
Department of Fire Disaster and Prevention, Semyung University, Jecheon, Korea

에 대한 실내실험을 통해 비중, 흡수율, 탄성파속도, 일축압축강도, 압열인장강도, 탄성계수, 포아송비, 슬레이크 내구성 지수의 변화를 측정하였다. 탄성파속도는 암석의 조직과 구조에 영향을 받기 때문에 예열 처리를 통해 제작한 열화시험편의 탄성파속도를 측정함으로써 여러 물성을 추정하는 것이 가능하다(Yasar and Erdogan, 2004, Ozkahraman et al., 2004). 각 예열시험편의 탄성파속도와 일축압축강도, 압열인장강도, 탄성계수, 흡수율 간의 상관성 분석을 회귀식을 도출함으로써 탄성파속도만 측정하면 일축압축강도, 압열인장강도, 탄성계수, 흡수율을 추정할 수 있도록 하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 암석은 응회암으로 NX 크기로 시추한 코아 시험편을 실내 시험에 사용하였다. 열화시험편을 제작하기 위하여 전기로에서 무결암 시험편을 예열처리 하였다. 예열 온도에 따라 열균열 발생 정도가 달라지기 때문에 열화 정도를 모사한 다른 종류의 열화시험편을 제작하기 위하여 최고 예열온도는 200, 400, 600(℃)가 되도록 하였다. 시험편의 예열처리 시 열균열의 대부분은 1차 가열단계에서 발생하는 관계로 시험편의 반복가열은 1회로 하였다(Bauer and Johnson, 1979). 암석 시험편을 급속 가열하는 경우 열파쇄가 발생할 수 있기 때문에 시험편에 열충격이 발생하는 것을 방지하기 위하여 승온 온도구배를 1℃/분 으로 하였다(Richter and Simmons, 1974). 또한 온도가 시험편 내에 균일하게 분포되도록 하기 위하여 최고온도의 유지시간은 24시간으로 하였다. 최고 온도까지 가열된 시험편을 갑자기 상온에 노출하는 경우 수축에 따른 추가적인 균열이 발생할 수 있기 때문에 전기로의 전원을 내린 후 시험편이 상온으로 자연 냉각되도록 하였다.

국제암반역학회(ISRM)에서 제안한 표준시험법에 따라 일축압축시험, 압열인장시험(Brazilian tensile test), 비중 및 흡수율 측정시험, 탄성파속도 측정시험, 슬레이크 내구성 시험(Slake durability index test)을 실시하였다. 일축압축시험 결과를 이용해 일축압축강도, 탄성계수, 포아송비를 구하였다. 탄성계수와 포아송비는 50% 응력수준에서 결정하였으며 탄성계수는 접선탄성계수를 구하였다.

탄성파속도는 암석 시험편 내에 존재하는 균열의 발생 빈도에 따라 달라지기 때문에 예열시험편에 대한 탄성파속도를 측정하는 경우 예열온도에 따른 균열의 발생 정도를 간접적으로 추정하는 것이 가능하다. 탄성파속도를 측정하기 위하여 초음파펄스법(Ultrasonic pulse method)을 사용하였으며, 종파와 횡파 속도를 측정하였다.

Table 1. Material properties of tuff specimens

Properties		Value
Specific gravity		2.68
Absorption ratio (%)		0.28
Elastic wave velocity (m/s)	P-wave	5,170
	S-wave	3,350
Uniaxial compressive strength (MPa)		110
Brazilian tensile strength (MPa)		9.0
Young's modulus (GPa)		35.8
Poisson's ratio		0.16
Slake durability index (Id_2, %)		99.5

암석 시험편의 장기적인 풍화 저항성을 평가하기 위하여 슬레이크 내구성 시험을 실시하였다. 실험을 수행하기 위하여 암석 덩어리 1개의 질량이 40~60(g)이 되도록 코어 시험편을 거의 구형에 가깝게 성형하였다. 성형한 암석 시험편 덩어리 10개를 표준체(체 구멍 크기 : 2mm)로 이루어진 드럼에 넣은 후 드럼의 하부가 물통에 잠긴 상태에서 10분간 회전시킨 후 시험편 덩어리를 꺼내어 건조로에서 건조시켰다. 슬레이크 내구성 지수(Id_2)는 건·습 과정(슬레이크 싸이클)을 2회 반복한 후 시험 전 암석 덩어리의 건조 질량에 대한 시험 후 암석 덩어리의 건조 질량의 백분율로 구하게 된다(Brown, 1981, KSRM, 2010). 본 연구에서는 암석 덩어리의 형상이 슬레이크 내구성 지수에 미치는 영향을 평가하기 위하여 암괴의 형상을 각형, 반각형, 구형의 3가지로 하여 암석 덩어리 시험편을 제작하였으며, 슬레이크 싸이클은 10회로 하였다.

Table 1에는 응회암 무결암 시험편에 대한 물성이 표시되어 있다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1에는 각 예열온도에서의 탄성파속도와 흡수율의 변화가 표시되어 있다. 예열온도가 증가함에 따라 흡수율도 증가하는 것으로 나타났는데 이는 암석 내부에 존재하던 균열이 확장되고 새로운 열균열이 발생했음을 나타낸다. 탄성파속도는 종파와 횡파속도가 공히 예열온도가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타나는데 흡수율 증가에서 예상한 바와 같이 예열온도가 높을수록 시험편 내부에 열균열이 많이 생성되었음을 반

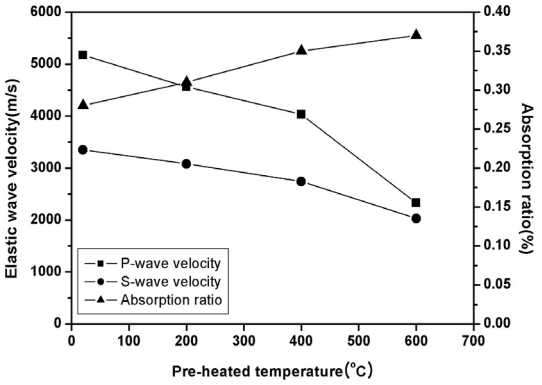


Fig. 1. Changes of elastic wave velocity and absorption ratio at different maximum thermal cycle temperature

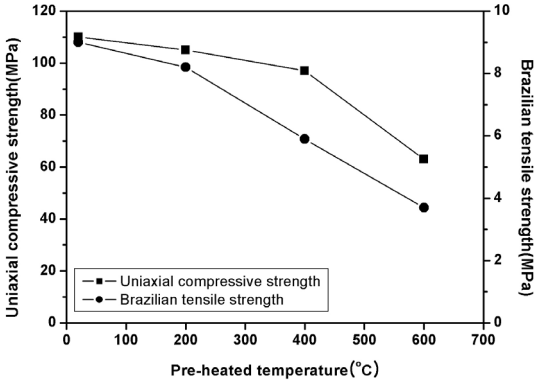


Fig. 2. Changes of uniaxial compressive strength and Brazilian tensile strength at different maximum thermal cycle temperature

영한 결과라 생각된다. 상온, 200, 400, 600(℃) 예열시험편에 대한 종파속도/횡파속도 비는 각기 1.54, 1.48, 1.47, 1.15로 나타나 예열온도가 증가할수록 종파속도와 횡파속도의 차가 감소함을 알 수 있다. 이러한 결과는 기존 연구 결과와도 부합하며(Yoon and Lee, 1996), 열화 정도가 심할수록 종파속도와 횡파속도의 차가 감소한다고 추정할 수 있다.

Fig. 2에는 예열온도에 따른 일축압축강도와 압열인장강도의 변화가 표시되어 있다. 예열온도에 따른 일축압축강도와 압열인장강도의 감쇠정도를 평가하기 위하여 상온 시험편을 기준으로 200, 400, 600(℃) 예열시험편의 일축압축강도와 압열인장강도를 정규화하면 일축압축강도의 경우 각기 0.95, 0.88, 0.57이 되고, 압열인장강도의 경우 각기 0.91, 0.66, 0.41이 된다. 이러한 결과로부터 예열에 따른 영향을 압열인장강도가 일축

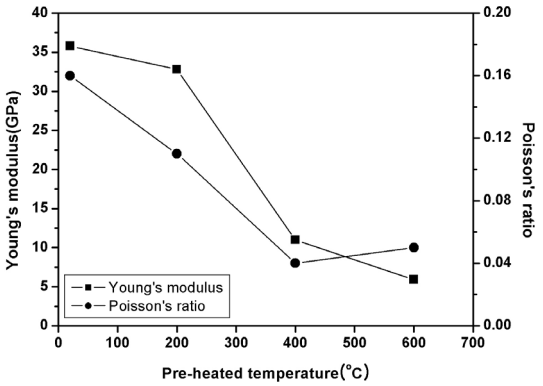


Fig. 3. Changes of Young's modulus and Poisson's ratio at different maximum thermal cycle temperature

압축강도보다 더 많이 받음을 알 수 있다. 상온, 200, 400, 600(℃) 시험편에 대한 취성도(일축압축강도/압열인장강도)는 각기 12.2, 12.8, 16.4, 17.0로 나타나 예열온도가 증가할수록 취성도가 증가하는 것으로 나타났다. 암석이 열을 받는 경우 열균열 발생으로 인해 연성적인 거동을 보일 것으로 예상할 수 있다. 하지만 초기 응력단계에서는 발생된 열균열이 폐합됨으로 인해 비선형적인 변형량이 증가하고, 초기응력단계 이상에서의 하중에서는 무결암 시험편과 유사한 변형거동을 보이며 파괴도 취성파괴를 나타낸다(Yoon and Lee, 1996, Yoon, 1998).

Fig. 3에는 예열온도의 증가에 따른 탄성계수와 포아송비의 변화가 나타나 있다. 탄성계수의 변화를 보면 400℃ 이상에서 탄성계수의 감소가 급격하게 발생하는 것으로 나타났다. 포아송비의 경우에는 600℃ 예열시험편의 값이 400℃ 예열시험편의 값보다 작은 것으로 나타나지만 두 경우 모두 값이 아주 작기 때문에 큰 의미는 없다고 판단된다.

Fig. 4에는 슬레이크 싸이클을 10회로 하여 각 싸이클에서 예열시험편의 슬레이크 내구성 지수를 구한 결과가 표시되어 있다. 슬레이크 싸이클이 증가함에 따라 슬레이크 내구성 지수는 감소하는 것으로 나타났다. 상온, 200, 400, 600(℃) 예열시험편에 대한 슬레이크 내구성 지수(Id_2)는 각기 99.5, 99.8, 99.9, 99.4(%)로 나타나 예열이 시험편의 슬레이크 내구성 변화에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 평가되었다. 오히려 상온 시험편의 슬레이크 내구성 지수가 200℃나 400℃ 예열시험편의 경우 보다 작게 측정된 것은 시험편 암석의 불균질성에 기인한 것으로 생각된다.

Fig. 5에는 Deere & Miller(1966)가 제안한 일축압축

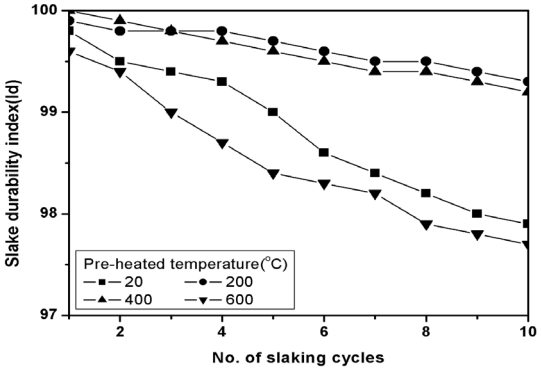


Fig. 4. Changes of slake-durability index at different maximum thermal cycle temperature

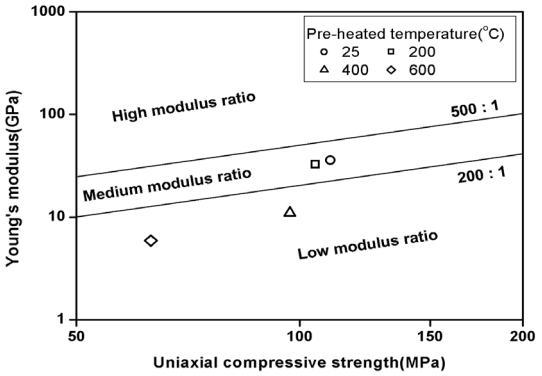
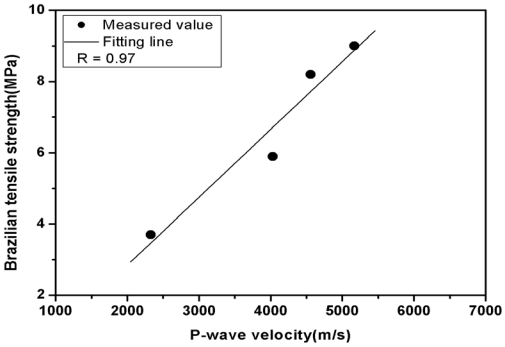
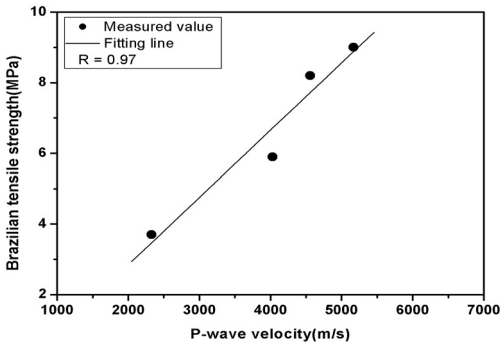


Fig. 5. Classification for pre-heated specimens

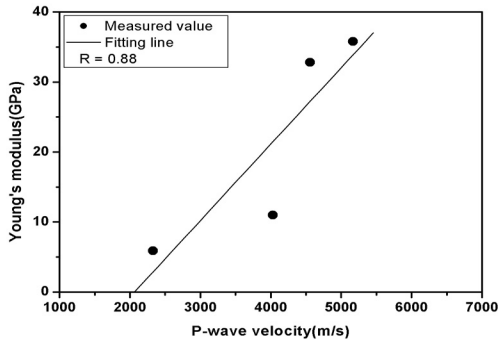
강도(σ_c)-탄성계수(E_t) 분류법을 이용하여 예열시험편을 분류한 결과가 표시되어 있다. E_t/σ_c가 500보다 큰 경우는 높은 계수비(H), 500~200인 경우는 중간 계수비(M), 200 보다 작은 경우는 낮은 계수비(L)라 한다. 화성암 계통의 암석은 주로 중간 계수비에 속하고, 퇴적암에 속하는 암석은 중간~낮은 계수비에 포함되는 경우가 많다. 무결암에 대한 일축압축강도 분류에 따르면 일축압축강도가 각기 >200, 100-200, 50-100, 25-50, <25(MPa)인 경우 각각에 대한 분류기호는 A(매우 높은 강도), B(높은 강도), C(중간 강도), D(낮은 강도), E(매우 낮은 강도)가 된다(Lama and Vutukuri, 1978). 그림을 보면 상온시험편과 200℃ 예열시험편은 BM(높은 강도- 중간 계수비)에 속하고, 400℃와 600℃ 예열시험편은 CL(중간 강도 - 낮은 계수비)에 속한다. 분류결과에 따르면 응회암에 400℃ 이상의 열을 가하는 경우 분류 등급이 한 단계 낮아질 정도의 열화가 진행됨을 알 수 있다.



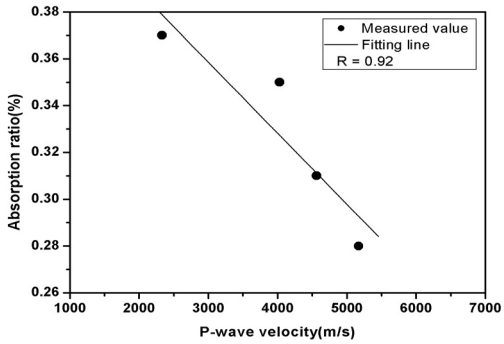
(a) P-wave velocity vs. uniaxial compressive strength



(b) P-wave velocity vs. Brazilian tensile strength



(c) P-wave velocity vs. Young's modulus



(d) P-wave velocity vs. absorption ratio

Fig. 6. Relationships between P-wave velocity and other properties

상기에서 본 바와 같이 암석 시험편에 열 부하를 가하는 경우 열균열이 발생하여 시험편의 강도, 탄성계수, 탄성파속도가 감소하고 흡수율이 증가함을 알 수 있다. 탄성파속도는 암석 내부의 균열 발생 정도에 민감하기 때문에 탄성파속도를 이용하여 강도, 탄성계수, 흡수율을 추정하는 것이 가능할 것으로 예상된다. Fig. 6에는 상온, 200, 400, 600(℃) 예열시험편의 탄성파속도-일축압축강도, 탄성파속도-압열인장강도, 탄성파속도-탄성계수, 탄성파속도-흡수율 자료에 최소자승법을 적용하여 회귀시킨 결과가 표시되어 있다. 그림에서 R은 상관계수를 나타낸다. 각 경우의 회귀식은 다음과 같다.

탄성파속도(V_p)-일축압축강도(σ_c);

$$\sigma_c = 24.7 + 0.017V_p \quad \text{(MPa), R=0.99} \quad (1)$$

탄성파속도(V_p)-압열인장강도(σ_t);

$$\sigma_t = -0.96 + 0.0019V_p \quad \text{(MPa), R=0.97} \quad (2)$$

탄성파속도(V_p)-탄성계수(E);

$$E = -22.5 + 0.011V_p \quad \text{(GPa), R=0.88} \quad (3)$$

탄성파속도(V_p)-흡수율(Ab);

$$Ab = 0.45 - 3.04 \times 10^{-5}V_p \quad (\%), \text{ R=0.92} \quad (4)$$

각 회귀식들에 대한 상관계수를 비교하면 탄성파속도와 강도간의 관계가 상관성이 가장 높게 나타난다. 탄성파속도가 열균열 발생량에 민감하듯이 암석에 응력을 가하는 경우 암석 내에 존재하는 균열 선단에 응력이 집중하여 균열 확장이 발생하고 확장된 균열들이 뭉쳐 파괴가 발생하기 때문에 열균열 발생량과 강도 감소와는 상당한 상관성이 있을 것으로 예상할 수 있다.

4. 토 론

국제암반역학회(ISRM)와 한국암반공학회(KSRM)에서 제안한 슬레이크 내구성 시험법에 따르면 슬레이크 내구성 시험에 사용되는 암석 덩어리 시험편은 뾰족한 모서리가 제거된 대체로 구형의 형상으로 성형을 하되 각 암석 덩어리의 질량이 40~60(g)이 되도록 시험편을 제작하도록 되어있다(Brown, 1981, KSRM, 2010). 암석 덩어리를 구형으로 성형하는 것은 많은 시간이 필요하기도 하지만, 실험자의 숙련도에 따라 성형된 각 암석 덩어리의 형상이 달라지기도 한다. 또한 풍화가 심한 암석이나 매우 연약한 암석인 경우 성형 중에 암석

Fig. 7. Shape of rock lump used in slake durability test (From left; Hexagonal, Hexagonal with rounded corner, Spherical)

덩어리가 파손되는 경우가 많아 시험편을 성형하는 것이 불가능한 경우도 발생하게 된다.

본 연구에서는 슬레이크 내구성 시험에 사용되는 시험편을 구형 이외의 절단 작업이 용이한 다른 형상으로 성형하여도 구형 시험편과 유사한 슬레이크 내구성 지수를 보이는 가를 평가하였다. 암석 덩어리 시험편의 형상을 구형(Spherical), 둥근 각형(Hexagonal with rounded corner), 각형(Hexagonal)의 3종류로 하여 시험편을 제작하였으며, Fig. 7은 성형된 시험편의 형상을 보여준다. Table 2에는 10회 건·습 반복을 실시한 슬레이크 내구성 지수가 표시되어 있다. 표를 보면 상온 시험편의 경우 슬레이크 내구성 지수의 값은 각형 > 구형 > 둥근 각형의 순으로 나타났다. 각 시험편 형상에 따른 지수 값의 차이가 1% 이내이기 때문에 시험편의 형상 차이에 의해 지수 값이 달라졌다기 보다는 각 시험편의 광물, 암석학적인 특징이 다름으로 인해 지수 값의 차이가 발생했다고 생각 할 수가 있다. 200, 400, 600(℃)로 예열된 암석 덩어리들에 대한 슬레이크 내구성 지수도 형상에 따른 값의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

시험편 덩어리가 각형인 경우 덩어리들 간의 마찰 마멸이 아닌 모서리 부분의 충돌 파쇄에 의해 슬레이크 내구성 지수가 낮아질 것으로 예상되지만, 실제 실험 과정을 관찰한 결과 각 덩어리의 면과 면이 접촉한 상태로 회전을 하여 오히려 풍화 효과가 떨어지는 것으로 나타났다. 구형과 둥근 각형은 유사한 슬레이크 내구성 지수를 나타내기 때문에 슬레이크 내구성 시험을 위한 시험편 성형 시 각형을 제외한 둥근 각형 ~ 구형으로 성형을 해도 문제가 없을 것으로 판단된다.

Table 2. Slake-durability index with shape of rock lump and pre-heated temperature

Pre-heated temperature (℃)	Shape of rock lumps	Slake-durability index (%)									
		I_{d1}	I_{d2}	I_{d3}	I_{d4}	I_{d5}	I_{d6}	I_{d7}	I_{d8}	I_{d9}	I_{d10}
20	Spherical	99.8	99.5	99.4	99.3	99.0	98.6	98.4	98.2	98.0	97.9
	Hexagonal with rounded corner	99.6	99.0	98.7	98.0	97.6	97.2	96.9	96.6	96.3	96.0
	Hexagonal	99.8	99.7	99.6	99.5	99.4	99.4	99.3	99.2	99.1	99.0
200	Spherical	99.9	99.8	99.8	99.8	99.7	99.6	99.5	99.5	99.4	99.3
	Hexagonal with rounded corner	99.9	99.8	99.8	99.7	99.6	99.5	99.4	99.3	99.2	99.2
	Hexagonal	99.7	99.5	99.3	99.1	98.9	98.7	98.5	98.4	98.1	97.9
400	Spherical	100	99.9	99.8	99.7	99.6	99.5	99.4	99.4	99.3	99.2
	Hexagonal with rounded corner	100	99.9	99.9	99.8	99.8	99.7	99.7	99.6	99.6	99.5
	Hexagonal	99.9	99.9	99.6	99.5	99.5	99.4	99.3	99.2	99.1	99.1
600	Spherical	99.6	99.4	99.0	98.7	98.4	98.3	98.2	97.9	97.8	97.7
	Hexagonal with rounded corner	99.6	98.9	98.3	97.8	97.3	96.8	96.2	95.8	95.3	94.9
	Hexagonal	100	99.9	99.8	99.7	99.6	99.4	99.4	99.3	99.2	99.2

5. 결 론

응회암 시험편에 200, 400, 600(℃)의 열을 가하여 열화시험편을 제작한 후 비중, 흡수율, 탄성파속도, 일축압축강도, 압열인장강도, 탄성계수, 포아송비, 슬레이크 내구성 지수를 측정하였다. 실험을 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 예열 온도가 암석의 강도 저하에 미치는 영향을 평가한 결과 일축압축강도보다 압열인장강도의 감소 정도가 더 큰 것으로 나타났다.
2. 상온, 200, 400, 600(℃) 열화시험편에 대한 취성도는 각기 12.2, 12.8, 16.4, 17.0으로 나타나 예열 온도가 증가할수록 취성도가 증가하는 것으로 평가되었다.
3. 슬레이크 내구성 지수의 경우 다른 물성들과는 다르게 예열이 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 암석에 열을 가함에 따라 광물 입자 경계와 입자 내부에 열균열이 발생하지만 열균열 간의 연결성이 떨어지기 때문인 것으로 생각된다.
4. Deere & Miller(1966)의 일축압축강도-탄성계수 분류법을 이용하여 열화시험편을 분류한 결과 상온 시험편과 200℃ 열화시험편은 BM에 속하고, 400℃와 600℃ 시험편은 CL에 속하는 것으로 나타났다.
5. 슬레이크 내구성 시험에 사용된 시험편 덩어리의 형상을 각형, 둥근 각형, 구형으로 하여 10회 슬레이크 싸이클로 실험을 한 결과 시험편 형상에 따른 슬레이크 내구성 지수의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 시험편을 구형으로 성형하는 것은 매우 어렵기 때문에 둥근 각형~구형의 범위로 성형하여도 적절한 슬레이크 내구성 지수를 얻는 데는 문제가 없을 것으로 예상된다.
6. 탄성파속도와 일축압축강도, 압열인장강도, 탄성계수, 흡수율 간에는 상당한 상관성이 있는 것으로 나타났으며 이들 간에 얻어진 회귀식은 다음과 같다.

$$\sigma_c = 24.7 + 0.017V_p \quad \text{(MPa)}, \ R=0.99$$
$$\sigma_t = -0.96 + 0.0019V_p \quad \text{(MPa)}, \ R=0.97$$
$$E = -22.5 + 0.011V_p \quad \text{(GPa)}, \ R=0.88$$
$$Ab = 0.45 - 3.04\times10^{-5}V_p \quad (\%), \ R=0.92$$

Reference

1. Bauers, S.J. and B. Johnson, 1979, Effects of slow uniform heating on the physical peoperties of the Westerly and Charcoal granites, Proc. 20th U.S. Symp. Rock Mech., Austin, pp. 7-18.
2. Brown, E.T.(ed), 1981, Rock characterization testing & monitoring; ISRM suggested methods, Pergamon Press, pp. 92-94.
3. Deere, D.U. and R.P. Miller, 1966, Engineering classification and index properties for intact rock, Technical Report No. AFWL-TR-65-116, Air Force Weapons Laboratory, pp. 136-160.

4. KSRM, 2010, Standard test methods of rock, CIR, pp. 69-71.
5. Lama, R.D. and V.S. Vutukuri, 1978, Handbook on mechanical properties of rocks, Volume. IV, Trans Tech Publications, pp. 278-281.
6. Ozkahraman, H.T., R. Selver and E.C. Isik, 2004, Determination of the thermal conductivity of rock from P-wave velocity, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 41, pp. 703-708.
7. Richter, D. and G. Simmons, 1974, Thermal expansion behaviour of igneous rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 11, pp. 403-411.
8. Yasar, E. and Y. Erdogan, 2004, Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 41, pp. 871-875.
9. Yoon, Y.K. and H.K. Lee, 1996, The effect of the thermal stress on the mechanical behaviour and permeability of rocks - I. Mechanical behaviour, Tunnel and Underground Space(J. of KSRM) 6.1, pp. 1-9.
10. Yoon, Y.K., 1998, Effects of the thermal cracking on the deformation behaviour of granite, Tunnel and Underground Space(J. of KSRM) 8.3, pp. 249-256.

윤 용 균

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

김 사 현

2004 연세대학교 학사
2006 연세대학교 석사
2012 연세대학교 박사

Tel: 043-649-1624
E-mail: science4us@semyung.ac.kr
현재 세명대학교 임상병리학과 교수