

다공질암의 동결융해 현상에 대한 이상물체 모델의 적용성 연구

한희수¹, 백 용²

Ideal Body Modeling of Porous Rock by Frost-thawing

Heui-Soo Han, Yong Baek

Abstract The accumulated displacements and fatigues of rock are increased by the stress-hysteresis, induced from repeated frost-thawing. Also the shear strength is decreased by them continuously. The stress-hysteresis is affected by the atmospheric temperature changes, whose behavior is visco-elasticity, usually. Therefore, to do ideal body analysis, Kelvin model could be used to analyze the frost-thawing behavior in winter. In general, rock slope failure occurs by the deterioration of rocks, which is caused by the repetition of freezing-thawing process. In order to keep the safety of such rock mass structures the deterioration process of rock needs to be described quantitatively using some meaningful parameters. In this work, the deterioration process in freezing-thawing cycle of tuff, which is a famous soft porous rock, is investigated through laboratory tests and successfully described as a differential equation for the change of porosity. And then, the deterioration of the mechanical properties of rock, such as Young's modulus and uniaxial compressive strength, are quantitatively described as a function of the porosity.

Keywords: Kelvin model, Frost heave, Thawing, Porous Rock, Hysteresis

요 지 동결융해과정이 지속적으로 반복되면서 발생하는 응력이력현상으로 인해 암반내의 피로현상이 누적되면서 암반 내 누적 변위가 증가할 뿐 아니라 강도 역시 지속적으로 감소된다. 동결융해로 인한 응력의 hysteresis 현상은 대기온도의 영향에 의한 것으로, 일반적으로 점탄성 거동을 하게 된다. 그러므로, 이상물체를 이용한 암반해석을 위해, 일반적으로 점탄성 거동해석에 사용되는 Kelvin 모델을 적용할 수 있다. 또한 다공질암의 동결융해에 따른 열화 과정을 정량적으로 파악하기 위한 새로운 지표를 설정하고자 동결-융해 실험을 실시하였다. 본 연구에서는 다공성 응회암을 이용 동결-융해 실험을 실시 암석의 열화과정의 분석을 시도하였다. 실내실험 결과, 공극률의 변화를 정량화하여 열화특성을 설명하였다. 탄성계수 및 일축압축강도 등 암석의 물성변화를 공극률을 이용 열화 특성 함수로써 표현하였다.

주요어: 켈빈모델, 동결, 융해, 다공질암, 응력이력현상

1. 서 론

동결융해현상에 의한 이력현상(hysteresis)으로 암반 내의 강도가 지속적으로 감소하는 피로현상이 발생한다. 동결융해현상은 대기온도변화에 따라 암반을 동결시켜 부피를 팽창시킨 후, 융해에 의해 부피 감소가 일어나게 한다. 이러한 계절 변화에 따른 하중요소가 암반의 변위를 지속적으로 증가 시킨다.

암석내 공극수의 영향에 대하여는 1960년대 토질역학에서의 유효응력 이론을 시작으로 암반에 적용하려는 연구가 많이 수행되었다(Paterson, 1981). 반면, 암석내의 공극수에 대한 동결-융해작용의 연구는 물리적인 관점에서 실험이 실시되었다(Fukuda, 1971; 1972). 암석

에서 정량적인 값을 얻을 수 있다면 동결-융해과정동안 암석의 열화 과정을 추측할 수 있다는 것이며 안전한 암반 구조물을 유지할 수 있는데 효과적이라 할 수 있다.

본 연구에서는 응회암을 이용하여 동결-융해작용동안 열화과정의 변화를 실험하였다. 온도변화는 영상 20도에서 영하 15도까지의 범위로 설정을 하였다. 열화과정 중 수분의 영향을 살펴보기 위하여 시료의 수분상태를 다양하게 변화하면서 실험을 실시하였다. 건조시료와 포화시료를 준비하고, 시료의 물리적 특성 변화를 살펴보기 위하여 공극률의 변화 및 탄성과 속도, 영률, 일축압축강도실험을 매 사이클 마다 실시하였다. 물리적 특성 변화를 지시할 수 있는 새로운 인자로서 공극률을 제안하였으며 공극률의 변화로 물성 변화를 정량적으로 기술할 수 있었다. 또한 이 논문은 동결융해에 따른 암반의 거동을 해석하기 위한 것으로, 이상물체의 점탄성 모

¹국립금오공과대학교 토목공학과 교수

²한국건설기술연구원 지반연구실 연구위원

*교신저자: 백 용 (E-mail: baek44@kict.re.kr)

델을 적용하여 응회암의 동결융해 거동을 해석하였다.

2. 본 론

2.1 동결융해에 의한 암반의 응력이력현상

암반 사면의 거동에 관한 종래의 해석 기법은 사면거동을 크리프로 해석하는 것이었다. 사면의 크리프해석은 강우에 의한 암반의 응력 및 강도의 변화를 무시하고 장기간에 걸친 암반의 진행성 파괴 거동을 시간과 관련하여 해석한 것이다. 이러한 해석 기법은 응력변화를 고려하지 못하므로 암반의 거동 및 붕괴를 설명하기 어려운 단점이 있다(한희수 외, 2010).

동결융해로 인한 암반내의 응력변화에 의하여 변형률이 증가하며, 이로 인한 암반 파괴면의 강도는 지속적인 에너지 손실(Energy Loss)이 발생한다. 이는 파괴면 강도의 시간 열화현상으로 파괴면 내부의 전단저항력이 지속적으로 감소하는 현상이며, 동결융해에 의한 이력현상으로 인해 파괴면내의 에너지가 점차적으로 감소하여 파괴면이 감당할 수 있는 외부 에너지의 값이 감소하게 되는 것을 의미한다. Fig. 1은 암반의 동결융해로 인하여 암반의 수축팽창에 따라 발생한 응력의 이력현상으로서 암반의 변형률 에너지가 감소되어 파괴에 이르는 과정을 나타내고 있다. Fig. 1에서 보면 동결융해 현상에 의해 지속적으로 Energy Loss가 발생한다. 이 Energy Loss는 시간열화현상의 한 형태이며, 이 시간열화현상으로 인해 암반의 강도가 감소하게 된다(한희수 외, 2010).

종래에 해오던 2차원 크리프해석의 경우, 응력변화에 관한 항이 없으므로, 응력변화와 변위발생에 따른 암반의 전단저항력감소, 즉 암반의 저항 에너지손실에 관한

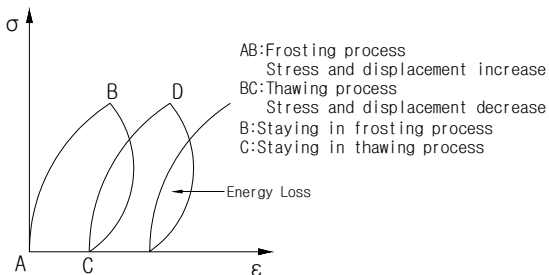


Fig. 1. Shear strength decrease of rock slope by hysteresis

개념을 도시할 수 없다.(한희수 외, 2010).

그러나 동결융해에 의한 hysteresis로 야기되는 암반의 변위를 시간과 함께 도시하면, 이력현상에 의한 에너지손실을 설명할 수 있다. Fig. 2에 보인 바와 같이, 초기의 동결과정에서는 부피증가로 인한 변위가 점차 증가하며 완전히 동결된 후에는 더 이상의 부피변화가 없으므로 일정한 변위를 유지하게 된다. 융해과정에서는 점차적으로 부피가 감소하며 완전히 융해된 후에는 더 이상의 부피변화가 없어 일정한 변위를 유지하게 되나, 동결융해과정에 따른 잔류변위를 가지게 될 것이다. 이 잔류변위들이 점차 누적되어 동결융해로 인한 누적변위를 가지게 된다.

2.2 실내시험조건

응회암으로 구성된 두 가지 시료를 준비하였다. 하나는 직경 5 cm, 높이 12 cm의 원주형 시료이며, 다른 하나는 직경 3 cm, 높이 5 cm의 원주형 시료를 준비하였다. 직경 3 cm의 시료는 단순한 공극률의 변화를 측정하기 위하여 사용된 것이다. 이들의 시료는 Fig. 3에서

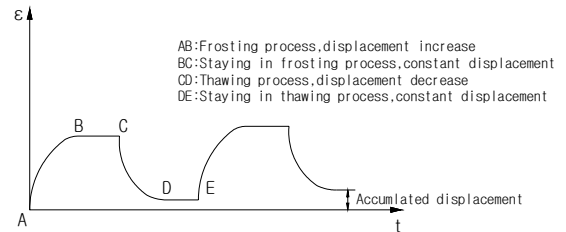


Fig. 2. Slope behavior of frost-thawing

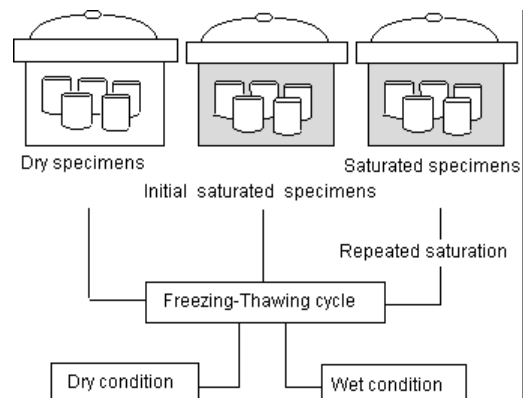


Fig. 3. Specimens types

보는 바와 같이 세 가지의 그룹으로 구분하였다. 그리고 동결-융해 과정 동안에 수분의 공급을 달리하면서 실험을 실시하였다.

① 건조시료: 2주 동안 대기중에서 자연 건조시킨 후, 48시간 동안 110도의 건조기에서 건조시킨다. 동결-융해작용 동안은 시료의 건조 상태를 보존하기 위하여 폴리에틸렌 필름으로 래핑한다.

② 초기포화시료: 진공펌프를 이용하여 48시간 동안 데시케이트에 증류수를 넣고 포화시킨다. 동결-융해과정 전에 한번 포화를 시킨다. 동결-융해과정 동안 폴리에틸렌 필름으로 래핑을 한다. 래핑의 이유는 동결-융해동안 공극수의 양을 유지하기 위함이다. 초기포화시료는 물리적인 시험을 실시하기 전 48시간 동안 110도의 건조기에서 건조시킨다.

③ 포화시료: 초기포화시료와 동일한 방법으로 준비를 하나 동결-융해 실험전에 재차 포화시키는 것이 다른 점이다. 이것은 동결-융해실험동안 매번 포화도를 100%로 유지하므로 공극수 양의 변화를 관찰하기 위함이다. 이 시료 이외에도 2가지의 시료를 준비하여 실험을 실시하였다. 하나는 물리적인 실험을 실시하기 전에 48시간 동안 110도의 건조기에 건조시킨 시료이며, 다른 하나는 실험 전에 2시간 동안 재차 포화를 시키는 형태이다. 건조상태와 포화상태의 물리적인 성질을 관찰하고 공극상태의 변화에 따른 결과를 조사하기 위하여 준비하였다.

동결-융해과정 동안의 상태는 다음과 같다.

- (1) 온도는 +20도에서 -15도의 범위에서 실시한다. 이 온도 범위는 일반 기온의 변화상태를 이용한 것이다.
- (2) 온도 변화율은 분당 2도로 설정을 하였다. 매 동결-융해과정동안 최대 온도 +20도와 최저온도 -15도에서는 특히 24시간 동안 유지하였다. 매 동결융해과정은 48시간이 소요되며 1사이클로 설정하였다.
- (3) 동결-융해과정 반복은 초기포화 시료의 경우 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10회 반복을 실시하였으며 포화 시료의 경우는 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8회, 건조시료의 경우 0, 10회 실시하였다.

동결-융해실험 반복 과정 후에 체적, 중량, 탄성파속도, 일축압축강도, 영률을 각각 측정하였다. 그리고 직경 3 cm의 원주형 시료를 이용하여 동결-융해과정 동안 각 사이클이 끝나는 시점에서 공극의 변화를 측정하였다.

각각의 동결-융해 실험 실시 후 건조시료 중량과 포화시료 중량을 이용하여 공극률(n)을 산출하였다. 산출식은 다음의 식 (1)을 이용하여 공극률이 변화를 계산하였다.

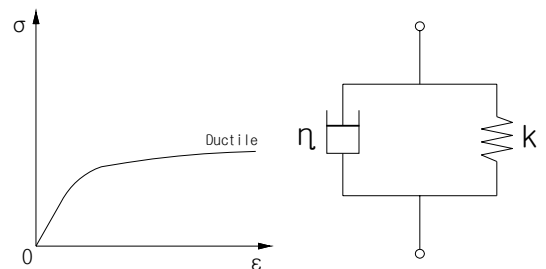
$$n(\%) = \frac{\text{Saturated weight} - \text{Dry weight}}{\text{Unit volumetric weight of water}} \times \frac{100}{\text{Volume of specimen}} \quad (1)$$

각각 실험은 5개의 시료에 대해 실시되었으며, 5개 시료에 대한 공극률들의 평균치를 이용하였다.

2.3 동결융해에 따른 다공질암의 Modeling

암반의 상태변화로 인한 응력의 hysteresis 현상은 대기의 온도의 영향에 의한 것으로, 온도변화가 급격한 경우 응력변화 및 암반 변위 역시 급격하게 변하는 탄성거동을 생각할 수 있고, 온도변화가 완만한 경우 응력변화 및 암반 변위 역시 완만하게 변하는 점탄성거동을 고려할 수 있으나, 일반적으로 대기의 변화가 암반내에 영향을 끼치는 경우는 많은 시간이 걸리므로 점탄성을 고려하는 것이 일반적이다(한희수 외, 2010).

동결융해현상이 완만하게 진행되는 경우, 이에 의한 이력현상 역시 완만하게 진행된다. 이 경우 암반의 응력변화와 변형률은 점탄성거동을 보일 것이다. 그러므로 응력과 변위에 대해 거동을 나타내면 Fig. 4와 같다. 이



(a) Visco-elastic behavior of rock joint (b) Connection of ideal bodies

Fig. 4. Visco-elastic model of frost-thawing (Kelvin model)

러한 거동을 나타내기 위한 모델로 Kelvin 모델을 사용할 수 있으며, 이 모델은 rheology에 관한 모델 중 creep를 표현할 수 있는 가장 간단한 모델이며, 탄성계수 k 를 갖는 스프링과 점성계수 η 를 갖는 댐퍼가 병렬로 연결되어 있다.

Kelvin 모델의 스프링과 댐퍼의 변형은 같으며, 모델 전체의 힘 F 는 2개의 요소에 배분된다. 전체 힘 F 는 스프링에 가해지는 힘 F_1 과 댐퍼에 가해지는 힘 F_2 의 합력으로 작용한다.

$$F_1 = ky \quad (2)$$

$$F_2 = \eta \frac{dy}{dt} \quad (3)$$

$$F = F_1 + F_2 \quad (4)$$

모델의 힘 F 와 변형의 관계는 식 (5)로 표현된다.

$$F = ky + \eta \frac{dy}{dt} \quad (5)$$

이 모델의 특성을 나타내기 위해, $t=0$ 일 때 일정한 힘 F_0 에 해당되는 경우의 변형인 초기조건 $y(0)=0$ 을 고려한다. $F=F_0$ 로 치환한 후 초기조건을 해석하면 식 (6)이 얻어진다.

$$y(t) = \frac{F_0}{k} [1 - \exp(-t_1/\tau)] \cdot \exp\left(-\frac{1}{\tau} \cdot t\right) \quad (6)$$

식 (6)에 해당되는 Kelvin 모델의 거동은 Fig. 5와 같다. Fig. 5는 전형적인 지연탄성거동을 보여주며, 시간

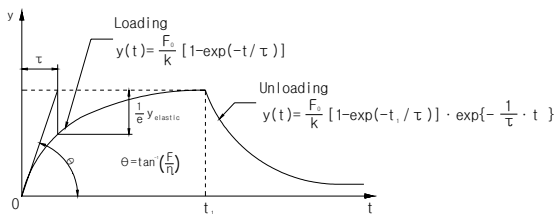


Fig. 5. Visco-elastic behavior of Kelvin model

의 차원을 가지는 τ 를 치환시간이라 한다. 치환시간은 순간탄성변형량의 $[1 - (1/e)] = 0.632$ 가 될 때까지의 시간이 된다.

3. 실험 결과 및 토의

3.1 동결융해에 따른 응회암의 물리적 성질변화

Table 1은 동결-융해 과정 전에 실시한 물리적 성질을 나타내는 것이다. 이 초기값들로 부터 연속적인 열화의 상태를 표현하기 위하여 공극률을 선택한 후, 다른 물성치의 변화는 공극률의 변화함수로서 정량적으로 기술되어야 한다. Fig. 6은 실험에 의한 공극의 변화를 나타낸 것이다. 동결-융해동안 공극수가 존재하는 시료의 경우, 공극률이 증대가 되는 것을 보여준다.

공극률의 변화에 의한 탄성계수의 변화와 일축압축강도의 변화는 Fig. 7과 Fig. 8에서 유도된 추세선들로 부터 식 (7)과 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{E}{E_0} = \alpha_E \exp(-\beta_E \frac{n}{n_0}) \quad (7)$$

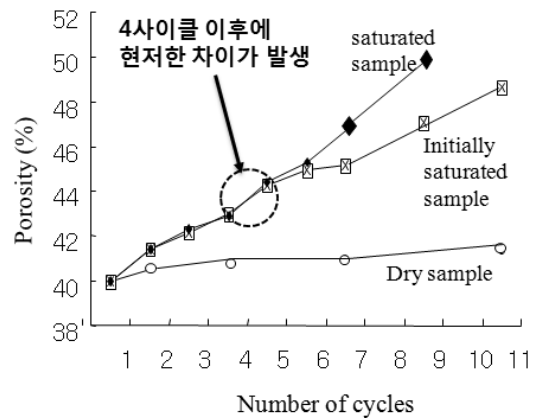


Fig. 6. The variation of the porosity in lab tests

Table 1. The material properties of the tuff

Density (g/cm^3)	Porosity (%)	Uniaxial strength (MPa)	Elastic wave velocity (km/sec)	Young's modulus (MPa)
1.36	40.47	7.43	2.06	1.35

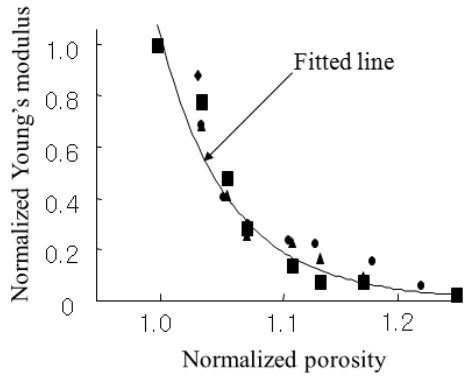


Fig. 7. The variation of the Young's modulus by the variation of porosity

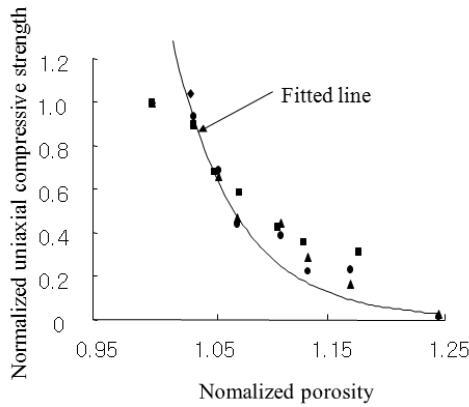


Fig. 8. The variation of the uniaxial compressive strength by the variation of porosity

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \alpha_{\sigma} \exp\left(-\beta_{\sigma} \frac{n}{n_0}\right) \quad (8)$$

E 와 E_0 는 영률의 값과 초기치를 나타내는 것이며 σ 와 σ_0 는 일축압축강도 값과 초기치를 나타내는 것이다. α 와 β 는 물질의 상수이다. Fig. 7과 Fig. 8에서 식 (7)과 (8)의 상수를 결정할 수 있다. 탄성계수에 대하여 각각 $\alpha_E = 3.19 \times 10^6$ 와 $\beta_E = 14.12$ 를 구할 수 있으며, 일축 압축강도 값은 $\alpha_{\sigma} = 7.30 \times 10^4$ 와 $\beta_{\sigma} = 10.33$ 이다.

3.2 계산된 추세식에 따른 Kelvin 모델의 거동 변화

식 (6)에 해당되는 Kelvin 모델의 거동은 F_0 및 k 값을

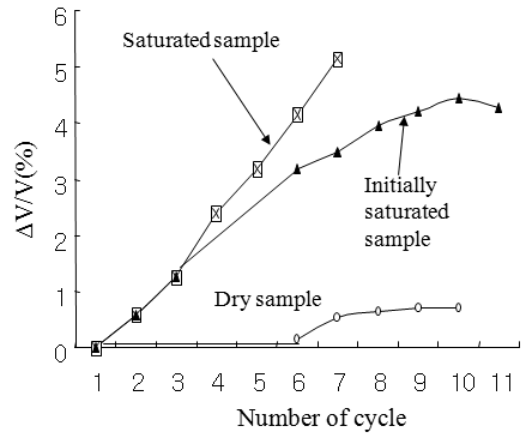


Fig. 9. The variation of the volume of the specimens in freezing-thawing process

상수로 하고 있으나, 동결융해과정에 의한 암반의 연속적인 열화의 상태로 인하여 공극률이 지속적으로 변하며, 이 공극률의 변화에 의한 탄성계수의 변화와 일축압축강도의 변화가 유발된다. 즉, 식 (6)의 하중값과 탄성계수를 상수가 아닌 동결융해에 따른 변수값을 사용하여야 함을 알 수 있다. 따라서 식 (7)과 식 (8)을 식 (6)에 대입하여 식 (9)를 얻을 수 있다.

$$y(t) = \frac{\sigma_0 \alpha_{\sigma} \exp\left(-\beta_{\sigma} \frac{n}{n_0}\right)}{E_0 \alpha_E \exp\left(-\beta_E \frac{n}{n_0}\right)} \left[1 - \exp\left(-t_1/\tau\right)\right] \times \exp\left(-\frac{1}{\tau} \cdot t\right) \quad (9)$$

Fig. 9는 동결-융해 과정 동안 시료의 체적변화를 나타낸 것이다. 실험 결과, 포화시료에서 4사이클 이상에서 급격한 증가를 보여주고 있다. 이는 동결-융해과정 동안 포화 공극수의 존재는 암석의 열화과정에서 중요한 변수로 사용될 수 있음을 나타내고 있다.

상기에 언급된 식 (9)에 따라 응회암의 동결융해에 따른 변위를 계산하기 위한 입력요소들은 Table 2에 보인 바와 같다. Table 2는 실험에서 구한 값들이며, 치환시간 τ 은 1로 가정하였다.

이 입력요소들을 이용하여 실험에 사용된 응회암의 변형률을 식 (9)를 이용하여 계산한 결과는 Fig. 10에

Table 2. Input data

$E_0(MPa)$	1.35
α_E	3190000
β_E	14
$\sigma_0(MPa)$	7.35
α_σ	73000
β_σ	10.33
n_0	0.41
τ	1

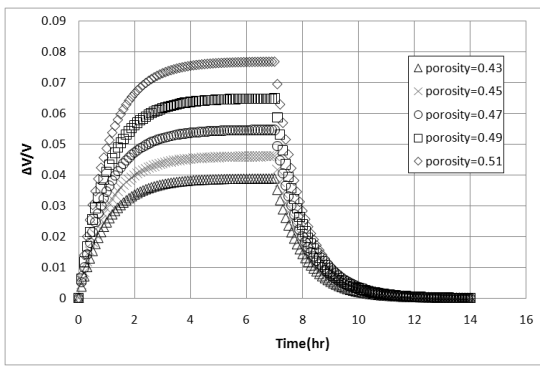


Fig. 10. The strain of the tuff obtained from Kelvin model

나타내었다. Fig. 10에 나타난 변위증가분은 동결에 의한 것이고, 변위감소분은 융해에 의한 것이다. 실험에 사용된 응회암의 경우, 공극률이 증가할수록 변위량이 증가하는 것을 볼 수 있으며, 약 3시간 정도에 모든 값들이 최대 동결변위량에 수렴함을 알 수 있다. 또한 약 3시간에 걸친 융해과정에 따라 동결변위가 소멸될 수 있음을 보여준다.

Fig. 9의 공극률의 변화에 따른 체적변화량의 비는 약 0%~5.3% 정도임을 알 수 있다. 그러나, 계산값에 의해 구해진 Fig. 10에 의하면 변위량은 약 0%~7.7% 정도다.

4. 결 론

본 연구에서는 응회암을 이용하여 동결-융해 작용 동안 암석의 열화과정에 대하여 정량적으로 기술하기 위하여 실내 실험을 실시하였다. 열화과정에 대한 새로운 인자로서 공극률을 선정하였으며, 연속적인 변화를

Kelvin 모델을 이용한 미분 방정식을 이용하여 기술하였다. 열화의 변수로서 공극률을 사용함으로써 물성치의 열화과정을 정량적으로 기술할 수 있었다.

1. 동결 및 융해로 인한 부피변화는 암반의 응력 증가 및 응력완화로 작용한다. 암반의 상태변화로 인한 부피 증가 및 감소율은 일정하므로 탄성거동으로 해석하여야하나, 동결융해에 시간이 걸리므로 점탄성거동으로 해석하여야 할 것이다. 그러므로, 일반적으로 점탄성 거동해석에 사용되는 Kelvin 모델을 적용하여 다공성응회암의 공극률 변화 및 동결융해시간에 따른 암반의 거동을 해석할 수 있었다.
2. 공극률의 변화에 의해 탄성계수 및 일축압축강도의 변화가 유발되며, 이에 따른 계수값은 실험에 사용된 응회암의 경우 탄성계수에 대하여 각각 $\alpha_E = 3.19 \times 10^6$ 와 $\beta_E = 14.12$ 를 구할 수 있으며, 일축압축강도 값은 $\alpha_\sigma = 7.30 \times 10^4$ 와 $\beta_\sigma = 10.33$ 이다.
3. 응회암의 동결융해현상에 의한 변위를 계산한 결과, 공극률이 증가할수록 동결융해에 의한 변위량이 증가하며, 약 3시간 정도에 최대 동결변위량에 수렴하였다. 또한 약 3시간의 융해과정에 따라 동결변위가 소멸하였다.
4. 실험에 의한 응회암의 동결융해 시, 공극률의 변화에 따른 체적변화량의 비는 약 0%~5.3% 이었으나, 계산값에 의해 구해진 변위량은 약 0%~7.7% 이었다. 이 차이는 계산값의 경우 strain 값($\Delta I/I$)으로 구해진 것이고, 실험의 경우 부피변화량($\Delta V/V$)로 구해진 값으로 약간의 차이가 유발되었다.

감사의 글

본 연구는 국립금오공과대학교의 학술연구 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 대해 감사드립니다.

참고문헌

1. 한희수, 백용, 조재호, 황찬규(2010), 안전계수변화를 고려한 사면거동의 3차원 분석기법 연구, 지반환경공학회, 제11권 4호, pp. 19~24.

2. Fukuda, M(1971), Freezing-Thawing Process of Water in Pore Space of Rock, *Low Temperature Science*, Ser. A, Physical Sciences 29, pp. 225~229.
3. Fukuda, M(1972), Freezing-Thawing Process of Water in Pore Space of Rock II, *Low Temperature Science*, Ser. A, Physical Sciences 30, pp. 185~189.
4. Paterson, M. S., Wong, T. F.(2005), *Experimental Rock Deformation-The brittle Field*, 2nd Ed, Springer, pp. 59~111.

접수일(2010.9.5), 수정일(2010.9.15), 게재확정일(2010.9.27)