

동결-융해 풍화에 의한 암석 물성 변화 양상과 추정에 관한 연구

류성훈, 송재준*

Weathering of Rock Specimens Exposed to Recurrent Freezing and Thawing Cycles

Sunghoon Ryu, Jae-Joon Song*

Abstract Changes in rock properties due to freezing and thawing cycles ranging from -20°C to 10°C were checked for the typical Korean rocks: granite (weathered), limestone, sandstone, tuff, shale and basalt. The porosity, seismic velocity, shore hardness and specific gravity were measured every 10 cycles for each type of rock up to 40 cycles. The specific gravity was rarely changed. Granite (w), shale and basalt decreased gradually in their shore hardness and seismic velocity values, these values for limestone, sandstone and tuff changed only a very little. The porosity increased in the granite (w), shale and basalt, whereas in the others it did not change. Due to the low tensile strength with high porosity, granite (w), shale and basalt were susceptible to the F-T cycles. A linear regression equation was calculated based on the experiment results according to properties and types of rock. The relationship between the freeze-thaw sensitivity (= initial porosity / initial tensile strength) and the coefficients of the regression equation was examined. With additional experimental data, the coefficients of the regression equation can be estimated using the F-T sensitivity. This makes it possible to predict the properties of rock as affected by freeze-thaw weathering by only measuring the initial properties without knowledge of the regression equation coefficients for each type of rock.

Key words Freeze-Thaw, Weathering, Water, Cold region, Porous rock

초 록 화강암(풍화), 석회암, 사암, 응회암, 셰일, 현무암 등 6가지 국내 암석을 대상으로 동결-융해에 의한 암석의 풍화과정을 실험하였다. 동결-융해 시 온도범위는 -20°C ~ 10°C 로 최대 40회까지 동결-융해를 반복하면서 비중, 공극률, 탄성과 속도, 쇼어경도를 측정하였다. 동결-융해 횟수가 증가함에 따라 공극률이 큰 화강암(w), 셰일, 현무암의 경우 기존의 균열이 성장하는 것이 뚜렷이 관찰되었고 시험편이 상하부로 분리되기도 하였다. 비중의 변화는 뚜렷이 관찰되지 않았다. 화강암(w), 셰일, 현무암의 탄성과 속도와 쇼어경도 값은 동결-융해에 의해 크게 감소하였고 석회암, 사암, 응회암의 경우 그 변화폭이 작았다. 공극률의 경우 인장강도가 작은 화강암(w), 셰일, 현무암이 크게 증가하였고 나머지 암종은 거의 변화하지 않았다. 실험 결과를 이용하여 선형 회귀식을 도출하였고, 각 회귀식의 계수와 동결-융해 풍화 민감도(= 초기 공극률 / 초기 인장강도)와의 상관관계를 살펴보았다. 이를 이용하여 암석의 초기 물성 값만으로도 동결-융해에 의한 풍화를 예측 가능할 것으로 판단된다.

핵심어 동결-융해, 풍화현상, 물, 극지, 다공성 암반

Received: Aug. 20, 2012

Revised: Aug. 23, 2012

Accepted: Aug. 24, 2012

***Corresponding Author:** Jae-Joon Song

Tel) +8228809043, Fax) +8228718938

E-Mail) songjj@snu.ac.kr

Seoul National University, 599 Gwanak-ro Gwanak-gu, Seoul, Korea

1. 서 론

남극은 혹한의 기후와 거리상의 제약으로 인해 아직 개발이 진행되지 않은 미지의 대륙이다. 남극에 위치한 소수 국가의 과학기지에서 연중 지속되는 영하의 기온을 이용한 연구들이 지속되었을 뿐이다. 하지만 최근 연구적 목적뿐만 아니라 무궁한 자원이 매장되어 있는

대륙으로 알려짐에 따라 남극 대륙 개발에 많은 관심이 쏠리고 있는 현실이다.

남극대륙개발은 혹한의 기후로 인해 접근성, 공사의 용이성, 설계반영요소 등에서 기존과는 다른 점이 있다. 암반공학적 측면에서도 새로운 시각으로 접근해야 할 필요가 있다. 일반적인 자연 상태의 암석은 시간이 지남에 따라 물, 바람, 화학반응, 온도변화 등 다양한 원인에 의하여 풍화가 진행된다. 그 중 물은 암석의 균열에 침투하여 직접적인 강도저하를 유발하고, 남극 같은 혹한지역의 경우 균열 사이에 침투한 물이 동결과 용해를 반복하면서 수반되는 부피변화에 의해 균열이 확장되어 암석에 손상을 가져오기도 한다. 이러한 동결-용해에 의한 암석의 물리적 풍화 현상은 남극뿐만 아니라 한국과 같이 계절 변화가 뚜렷한 지방에서도 상대적으로 많이 나타난다(Jang et al., 2004).

암석의 동결-용해에 따른 풍화현상 연구는 세 가지로 분류할 수 있다. 첫째, 동결-용해 시 균열 성장 특성을 시각적 분석을 통해 연구하였다. 균열의 성장은 단일 균열이 풍화 현상에 영향을 미치는 것이 아니라 기존 균열의 복합적인 성장과 더불어 암석의 강도 등이 함께 어우러져 풍화 현상을 유발한다고 알려져 있다(Nicholson and Nicholson, 2000). 이러한 미세균열 트레이스의 변동성은 박스프랙탈 차원을 적용할 경우 효과적으로 정량화 할 수 있다(Um and Shi, 2009). 둘째, 동결-용해를 반복함에 따라 암석의 물성(비중, 공극률, 흡수율, 탄성파 속도, 단축압축강도, 쇼어경도, 슈미트 반발경도 등) 변화양상을 분석하였다. 대부분의 연구에서 동결-용해 풍화 과정이 진행됨에 따라 공극률, 흡수율 등은 증가하고 강도, 경도, 탄성파 속도 등은 감소하는 경향을 나타냈다(Yavuz et al., 2006; Yavuz, 2011; Jang et al., 2004; Mutlutürk et al., 2004; Takarli et al., 2008; Liu et al., 2008; Altindag et al., 2004; Um and Shin, 2009; Tan et al., 2011; Yang, 2011; Park et al., 2003; Kang et al., 2011). 이러한 동결-용해에 의한 손상이 발생하기 위해서는 시료의 수분 포화도가 70%가 넘어야 하고, 동결 시 시료내부의 수분이 이동함에 따라 포화

도가 높은 부분부터 파괴가 발생한다고 밝혀졌다(Chen et al., 2004). 셋째, 실험을 통해 물성변화 양상을 연구하고 실험 결과를 이용하여 회귀식을 제안하였다(Mutlutürk et al., 2004; Yavuz, 2011; Xianjun et al., 2011; Altindag et al., 2004; Yavuz et al., 2006; Liu et al., 2008). 대부분 음지수형태의 모델을 제안하였고, 실험결과를 잘 묘사하는 것으로 나타났다. 하지만 이러한 연구 결과들이 제안하는 회귀식은 암종에 따른 특정한 계수를 지정하여 사용하고 있기 때문에 해당 암종의 계수가 없을 경우 사용이 불가능하다는 한계가 존재한다.

남극세종과학기지 인근의 암석 샘플을 채취하여 동결-용해 풍화실험을 하고자 하였으나 현실적으로 어려움이 있었다. 따라서 본 연구에서는 국내 암석을 대상으로 동결-용해에 의한 물리적 풍화특성을 분석하고, 초기 물성만을 이용하여 회귀식의 계수를 추정하는 방향으로 연구를 진행하였다.

2. 실내시험

2.1 시험편 선정

실험에 사용한 시험편은 국내에서 쉽게 접할 수 있는 암종으로 화강암, 석회암, 사암, 응회암, 셰일, 현무암 이상 총 6가지이다. 화강암, 석회암, 사암, 응회암, 셰일은 현장 시추코어에서 채취하였고, 현무암은 강원도 철원 석산에서 채취한 것을 사용하였다. 각 암종별로 4개의 원기둥 형태의 시험편을 만들었고 시험편 사이즈는 50mm(D) × 50mm(L)이다. 시험에 사용된 화강암의 경우 풍화가 많이 진행된 상태였으므로 특별히 화강암(w)로 표기하였다. 실험에 선택된 6가지 국내 암종 중 응회암, 현무암은 남극 세종기지 주변의 암종과 같다(Kim et al., 2000; Lee et al., 2004; Yeo et al., 2004). 따라서 현무암, 응회암의 실험 결과는 추후 남극 암석과 국내 암석의 동결-용해 특성을 비교하는 목적으로 사용할 수 있을 것이다. 각 암종별 시험편의 초기 물성값은 Table 1과 같다.

Table 1. Initial properties of six different rock samples

	Specific gravity	Porosity (%)	P-wave velocity (m/sec)	Shore hardness	Tensile strength (MPa)
Granite (weathered)	2.745	2.791	4330	36	2.53
Limestone	2.831	0.372	5150	52	9.19
Sandstone	2.643	0.408	5000	68	15.03
Tuff	2.667	1.181	5345	74	15.43
Shale	2.702	1.564	4285	34	9.05
Basalt	2.173	15.840	4640	45	6.79

2.2 동결-융해 주기 설정

동결-융해 시 사용한 온도변화 범위는 -20°C ~ 10°C 로 선정하였다. 이는 남극 세종과학기지 기온 측정 극값의 범위(극지보고서, 2007)로 위에 언급한 바와 같이 남극 암석과의 비교 연구를 위하여 선택하였다. 동결-융해 풍화과정의 사이클 1회는 다음과 같이 구성되었다(Fig. 1).

- (1) 포화된 시험편을 항온습습기(Table 2)에 위치시킨 후 10°C 에서 2시간 유지한다.
- (2) $0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 속도로 10°C 에서 -20°C 로 동결시킨다.
- (3) -20°C 에서 2시간동안 유지한다.
- (4) $0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 속도로 -20°C 에서 10°C 로 융해시킨다.

동결-융해 시 온도 변화 속도를 $0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 으로 한 이유는 온도구배(thermal gradient)가 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 보다 클 경우 발생하는 열충격(thermal shock)(Hall, 1999)을 제거하고 순수하게 동결-융해에 의한 효과만을 실험하기 위함이다. 시료내부까지 온도가 완벽히 전파되게 하기 위하여 최대·최소온도에서 2시간동안 유지시켰다(TSE, 1987; C. Park et al., 2004).

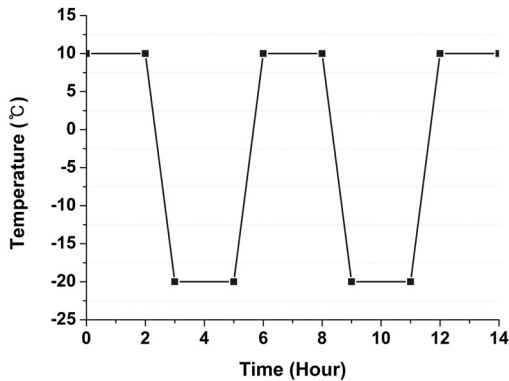



Fig. 1. Freezing-thawing cycles ranging from -20°C to 10°C

Table 2. Specifications of the thermo-hygrostat

	Cubage	100L
	Operating temperature range	-20°C ~ 150°C
	Humidity controlling scope	55-95% RH (15°C), 40-95% RH (30°C), 30-95% RH (70°C), 30-95% RH ($70-85^{\circ}\text{C}$)
	Heating time	55 min (-15°C → 120°C)
	Cooling time	60 min (20°C → -15°C)
	Cooler	Plate fin cooler

2.3 시험 과정

단축압축시험과 같은 파괴시험의 경우 동일한 시험편에 대하여 동결-융해 사이클 전후의 물성을 비교할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 비파괴시험으로 측정할 수 있는 공극률, 탄성과 속도, 쇼어경도, 비중을 이용하여 동결-융해 전후의 물성값을 비교하였다. 한편 인장강도는 동결-융해 사이클을 반복하기 전에 시험편의 초기상태에서 측정하였고, 결과 분석 시 사용하였다. 시험 과정은 다음과 같다.

- (1) 공극률, 탄성과 속도, 쇼어경도, 비중을 측정할 후 진공챔버에서 시험편을 침수시켜 24시간 이상 포화시킨다.
- (2) Plastic wrap을 이용하여 시료를 밀봉하고 항온습습기에서 동결-융해 사이클을 반복한다.
- (3) 목표 횟수만큼 동결-융해 사이클의 반복이 끝나면 시험편을 다시 건조시켜 공극률, 탄성과 속도, 쇼어경도, 비중을 측정한다.

각 시험편은 최대 40회까지 동결-융해 사이클을 반복하였으며 10회마다 공극률, 탄성과 속도, 쇼어경도, 비중을 측정하여 비교 분석하였다.

3. 결과분석

상대적으로 공극률이 작은 (2%미만) 석회암, 사암, 대리암의 경우 동결-융해를 40회까지 진행해도 육안으로 관찰되는 균열의 성장 혹은 파편의 탈락 등은 보이지 않았다. 하지만 화강암(w), 세일, 현무암의 경우 변화가 뚜렷이 관찰되었다(Fig. 2). 세일의 경우(공극률 4%) 20회가 지난 후 층리면을 따라 균열이 성장하여 시료가 상하로 분리되었고, 화강암(w)(공극률 3.7%)의 경우 측정시마다 표면의 탈락이 육안으로 관찰되어 마지막 40회에는 초기모습과는 확연한 차이를 보였다. 현무암(공극률 16%)의 경우, 원래 존재하는 기공을 따

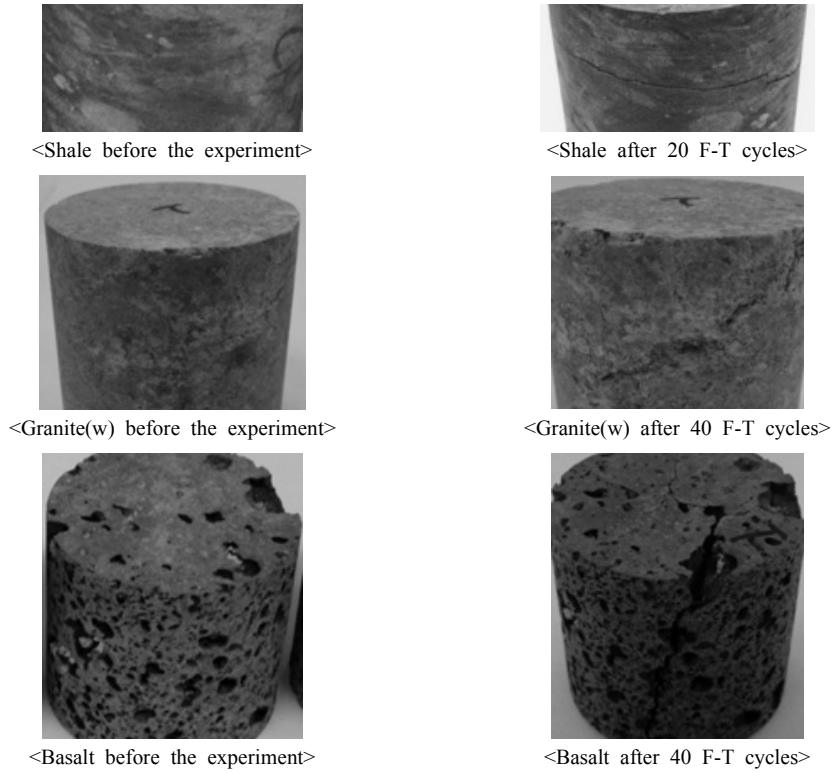


Fig. 2. Crack growth due to freeze-thaw cycles

라 균열의 성장하면서 40회에 이르러서는 시험편의 상단에서 하단까지 균열이 연결되었다. 육안으로 균열이 성장하는 모습을 관찰한 결과, 공극률 2% 미만에서는 시험편내의 공극이 적어서 동결-융해에 의한 풍화가 영향을 미치기 어려운 것으로 판단된다. 한편 균열의 성장은 기존에 존재하는 연약면 혹은 취약부분을 따라서 성장하는 것을 알 수 있다.

시험 진행 중에 시험편의 외부에서 파편이 떨어지는 것이 관찰되기는 하였으나 그 절대량이 크지 않아 비중의 변화가 그래프 상에서는 뚜렷이 나타나지 않는다 (Fig. 3). 하지만 공극의 분포가 비교적 큰 현무암, 화강암에서는 비중이 감소한 것을 미세하게나마 확인할 수 있다. 쇼어경도는 화강암 48%, 석회암 13%, 사암 4%, 응회암 4%, 세일 29%, 현무암 45% 가 감소하였다. 화강암, 현무암이 크게 감소한 것은 미세 균열이 동결-융해 작용에 의해 성장함에 따라 40회에 이르러서 표면의 경도를 크게 감소시킨 것으로 판단된다. 탄성과 속도는 화강암 24%, 석회암 8%, 사암 1%, 응회암 3%, 세일 18%, 현무암 21% 가 감소하였다. 공극이 발달하고 인장강도 값이 작은 화강암, 현무암, 세일의 탄성과 속도

감소율이 큰 것으로 나타났다. 이는 동결-융해 작용에 따라 내부 균열이 성장하여 탄성과 속도의 감소를 일으킨 것으로 판단된다. 공극률은 화강암 2.6%, 석회암 0.1%, 사암 0.3%, 응회암 0.25%, 세일 0.4%, 현무암 1.2% 가 증가하였다. 화강암, 현무암의 공극률 증가가 눈에 띄는 이유는 상대적으로 작은 인장강도로 인해 동결-융해로 인해 야기되는 공극의 팽창을 억제하지 못했기 때문으로 생각된다.

4. 선형회귀모델

실내실험결과를 이용하여 동결-융해 풍화작용에 의한 물리적 물성변화를 예측할 수 있는 회귀식을 도출하였다. 회귀식은 1차식 형태로 식 (1)과 같이 가정하였고, 상용 프로그램인 NCSS/GESS 2007을 이용하여 구했다. Table 3은 공극률, 탄성과 속도, 쇼어경도, 비중의 각 압종별 1차항의 계수(A)와 회귀식의 상관계수(r^2)값을 나타난 표이다.

$$F_N = F_0 + A \times N \tag{1}$$

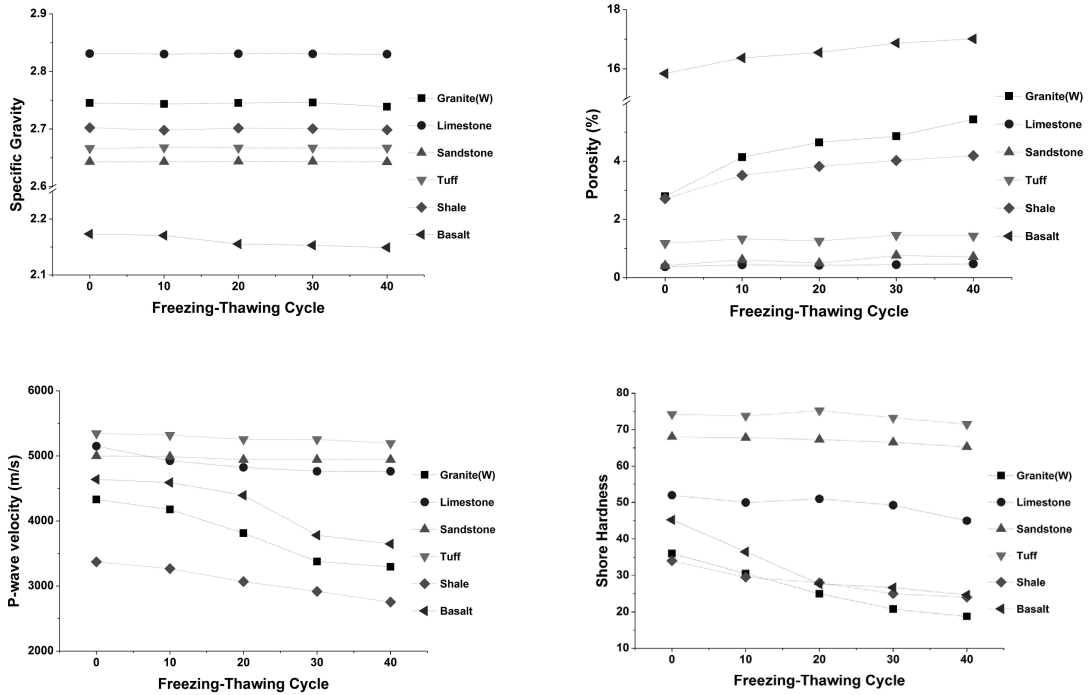


Fig. 3. Degradation of properties under recurrent freeze-thaw condition

Table 3. The coefficient (A) and its coefficient of determination (r^2)

Rock Type	Property	Coefficient (A)	R^2	Property	Coefficient (A)	R^2
Granite (w)	Specific gravity	-0.00011	0.3184	Shore hardness	-0.44250	0.9733
Limestone		-0.00002	0.4900		-0.14750	0.7489
Sandstone		0.00000	0.0000		-0.06750	0.9251
Tuff		0.00001	0.1250		-0.06000	0.4675
Shale		-0.00005	0.1825		-0.24500	0.9498
Basalt		-0.00066	0.9125		-0.51000	0.8766
Granite (w)	P-wave velocity	-28.68250	0.9607	Porosity	0.06016	0.9035
Limestone		-9.34000	0.7908		0.00199	0.7503
Sandstone		-1.61500	0.7908		0.00751	0.6519
Tuff		-3.65250	0.9441		0.00627	0.7353
Shale		-15.86000	0.9935		0.03462	0.8834
Basalt		-27.92000	0.9030		0.02842	0.9515

N은 동결-융해 횟수, F_0 는 Table 1에 나타나 있는 초기 물성값을 의미하고, F_N 은 동결-융해 사이클에 N번 노출된 이후의 변화된 물성값을 나타낸다.

비중의 경우 동결-융해 사이클에 의한 변화가 거의 없어 A가 0에 가깝게 나타났고, 이로 인해 r^2 값은 무의미하다고 할 수 있다. 그 이외의 결과를 살펴보면 대부

분 $r^2=0.64$ ($r=0.8$) 보다 높으므로, 동결-융해 풍화작용에 의한 암석의 물성변화양상을 예측함에 있어 본 연구에서 제안한 회귀식의 적용이 타당하다고 할 수 있다. 하지만 실제 사용함에 있어 각 암종마다 계수가 달라 위 실험을 통해 구하지 않은 기타 암종에는 적용이 불가능한 상황이다. 이는 지금까지 발표된 동결-융해 풍화

Table 4. Freeze-thaw sensitivity (= initial porosity / initial tensile strength) of the specimens

Rock Type	Initial porosity (%)	Initial tensile strength (MPa)	F-T sensibility (porosity/tensile strength)
Granite (w)	2.791	2.53	1.10296
Limestone	0.372	9.19	0.04051
Sandstone	0.408	15.03	0.02713
Tuff	1.181	15.43	0.07651
Shale	1.564	9.05	0.29967
Basalt	15.840	6.79	2.33279

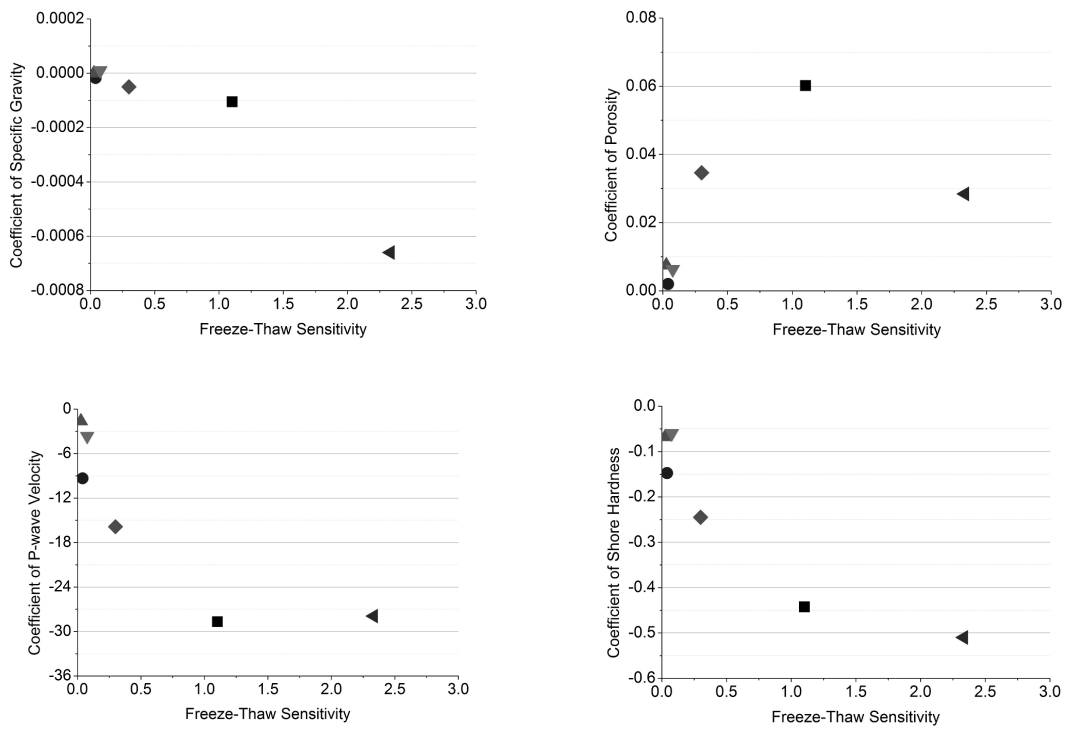


Fig. 4. Relationship between the freeze-thaw sensitivity and the regression coefficients
 (■ : Granite(w), ● : Limestone, ▲ : Sandstone, ▼ : Tuff, ◆ : Shale, ◀ : Basalt)

작용에 의한 암석의 물성변화를 예측하는 모델들이 가지고 있는 공통적인 한계점이다. 따라서 본 연구에서는 암종의 구분 없이 암석의 초기 물성만을 이용해 회귀식의 계수를 추정할 수 있도록 동결-융해 풍화 민감도(= 초기공극률 / 초기 인장강도)를 도입하였다. Table 4는 각 암종별 동결-융해 풍화 민감도를 나타낸다. Fig. 4를 살펴보면 동결-융해 풍화 민감도와 회귀식의 계수들은 지수형태 혹은 선형 상관관계를 가진 것으로 추정된다.

즉 암종의 구분 없이 동결-융해 풍화 민감도만을 이용해 회귀식 계수(A)를 구할 수 있다. 하지만 현재 연구 단계에서는 공극률의 경우와 같이 경향에서 벗어나는 실험 결과가 존재한다. 따라서 추후 연구를 통해 부족한 실험 데이터를 보완한다면 동결-융해 풍화 민감도와 회귀식 계수(A)와의 정확한 상관성을 밝혀낼 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

국내에서 쉽게 접할 수 있는 화강암(w), 석회암, 사암, 응회암, 세일, 현무암 등 6개 암종에 대하여 $-20^{\circ}\text{C}\sim 10^{\circ}\text{C}$ 의 온도범위에서 동결-융해 풍화실험을 수행하였다. 공극률이 큰 화강암(w), 세일, 현무암은 표면의 박탈이 눈으로 관찰되었고 동결-융해 사이클을 반복함에 따라 탄성과 속도, 쇼어경도, 비중은 증가하고 공극률은 감소하는 경향을 뚜렷이 나타냈다. 반면, 석회암, 사암, 응회암은 변화가 미미하게 나타났다. 이는 공극률과 인장강도의 상호작용에 의해, 공극수가 동결되면서 발생하는 팽창압이 인장강도보다 클 경우 공극에 균열이 발생하고, 동결-융해 사이클이 반복됨에 따라 균열이 누적되어 전체적인 물성변화를 야기한 것으로 판단된다. 동결-융해 풍화 민감도(=초기 공극률/ 초기 인장강도)를 도입하여 본 연구에서 도출한 회귀식의 계수(A)와의 상관관계를 살펴본 결과 음지수 혹은 선형 관계를 가진 것으로 분석된다. 하지만 본 연구는 동결-융해 횟수(40회)와 실험에 사용한 암종(6종)이 충분치 못했던 관계로 회귀식을 선형으로 가정했고 동결-융해 민감도와 회귀식의 계수(A)와의 상관관계를 명확히 밝히지 못한 한계를 가지고 있다. 따라서 추가 실험을 통해 이를 보완하는 연구가 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0027520).

참고문헌

- C. Park, J.H. Synn, H.S. Shin, D.S. Cheon, H.D. Lim, S.W. Jeon, 2004, Experimental study on the thermal characteristics of rock at low temperatures, Proceedings of the ISRM SICNOROCK 2004 Symposium, 1A, 14.
- Dawn T. Nicholson and Frank H. Nicholson, 2000, Physical deterioration of sedimentary rocks subjected to experimental freeze-thaw weathering, Earth Surface Processes and Landforms, 25, 1295-1307.
- H. Yavuz, R. Altindag, S. Sarac, I. Ugur, N. Sengun, 2006, Estimating the index properties of deteriorated carbonate rocks due to freeze-thaw and thermal shock weathering, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 43, 767-775.
- Hall, K., 1999, The role of thermal stress and fatigue in the breakdown of rock in cold regions, Geomorphology, 31, 47-63.
- Huseyin Yavuz, 2011, Effect of freeze-thaw and thermal shock weathering on the physical and mechanical properties of an andesite stone, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 70, 187-192.
- Hyun-Shic Jang, Bo-An Jang, Jun-Sung Lee, 2004, Variations of engineering geological characteristics of the cretaceous shale from the pungam sedimentary basin in kangwon-do due to freezing-thawing, The Journal of Engineering Geology, 14, 401-416.
- Kim, H., Lee, J.I., Choe, M.Y., Cho, M., Zheng, X., Sang, H. and Qiu, J., 2000, Geochronologic evidence for early cretaceous volcanic activity on Barton Peninsula, King George Island, Antarctica, Polar Research, 19, 251-260.
- Korea Polar Research Institute, 2007, Weather Annual Report of Antarctic King Sejong Station (2005~2006), 178.
- Lee, Y.I., Lim, H.S. and Yoon, H.I., 2004, Geochemistry of soils of King George Island, South Shetland Islands, West Antarctica: Implications for pedogenesis in cold polar regions, Geochimica et Cosmochimica Acta, 68, 4319-4333.
- M. Mutlutürk, R. Altindag, G. Türk, 2004, A decay function model for the integrity loss of rock when subjected to recurrent cycles of freezing-thawing and heating-cooling, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 41, 237-244.
- Mokhfi Takarli, William Prince, Rafat Siddique, 2008, Damage in granite under heating/cooling cycles and water freeze-thaw condition, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 45, 1164-1175.
- Quansheng LIU, Guangmiao Xu, Xiaoyan Liu, 2008, Experimental and theoretical study on freeze-thawing damage propagation of saturated rocks, International Journal of Modern Physics B, 22, 1853-1858.
- R. Altindag, I.S. Alyildiz, T. Onargan, 2004, Mechanical property degradation of ignimbrite subjected to recurrent freeze-thaw cycles, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 41, 1023-1028.
- Seong-Seong Kang, Jong-In Kim, Yuza Obara, Atsuo Hirata, 2011, Estimation of weathering characteristics of sandstone and andesite by freeze-thaw test, Tunnel & Underground Space (Journal of Korean Society for Rock Mechanics), 21, 145-150.
- T.C. Chen, M.R. Yeung, N. Mori, 2004, Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action, Cold Regions Science and Technology, 38, 127-136.
- TSE, 1987, Methods of testing for natural buildings stones (TS 699), Institute of Turkish Standards, 82.
- Um Jeong-Gi and Shin Mikyoung, 2009, Variations of physico-mechanical properties of the cretaceous mudstone in Haman, Gyeongnam due to freeze-thaw weathering, Tunnel & Underground Space (Journal of Korean Society for Rock Mechanics), 19, 146-157.
- Xianjun Tan, Weizhong Chen, Jianping Yang, Junjie Cao, 2011, Laboratory investigations on the mechanical properties degradation of granite under freeze-thaw cycles, Cold Regions Science and Technology, 68, 130-138.

19. Yang, Jae-Hyuk, 2011, The effect of a freeze-thaw cycle on rock weathering: laboratory experiments, Journal of the Korean Geomorphological Association, 18, 21-36.
20. Yeo, J.P., Lee, J.I., Hur, S.D. and Choi, B.G., 2004, Geochemistry of volcanic rocks in Barton and Weaver peninsulas, King George Island, Antarctica: Implications for arc maturity and correlation with fossilized volcanic centers, Geosciences Journal, 8, 11-25.
21. Yeon-Jun Park, Kwang-Ho You, Kwang-Yong Yang, Ik Woo, Chan Park and Won-Kyung Song, 2003, Weathering characteristics of granite by freeze-thaw cyclic test, Tunnel & Underground Space (Journal of Korean Society for Rock Mechanics), 13, 215-224.

류 성 훈

2008년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부 공학사



Tel: 02-880-8703

E-mail: shryu@snu.ac.kr

현재 서울대학교 에너지시스템공학부
석사박사통합과정 재학중

송 재 준

1993년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1995년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2000년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사



Tel: 02-880-9043

E-mail: songjj@snu.ac.kr

현재 서울대학교 에너지자원공학과 부
교수
