자원환경지질, 제42권, 제3호, 261-272, 2009
Econ. Environ. Geol., 42(3), 261-272, 2009

동결-융해 풍화에 의한 원주지역 쥬라기 화강암의 지질공학적 특성변화

엄정기[1] · 우 익[2] · 박혁진[3]*

[1]부경대학교 에너지자원공학과, [2]군산대학교 해양건설공학과, [3]세종대학교 지구정보공학과

Variation of Engineering Geological Characteristics of Jurassic Granite in Wonju Due to Freeze-Thaw Weathering

Jeong-Gi Um[1], Ik Woo[2] and Hyuck Jin Park[3]*

[1]Dept. of Energy Resources Engineering, Pukyong National University
[2]Dept. of Coastal Construction Engineering, Kunsan National University
[3]Dept. of Geoinformation Engineering, Sejong University

An experimental study of the accelerated weathering was performed to investigate the variations of physico-mechanical properties of deteriorated rocks due to freeze-thaw weathering for the Jurassic granite specimens from Wonju, Gangwon-do. Each complete cycle of freeze and thaw was lasted 24 hours, comprising 2 hours saturating in vacuum chamber, 8 hours freezing at -20±1°C and 14 hours thawing at room temperature. Freeze-thaw cycles were implemented with measuring the index physical properties as well as geometries of microfractures. The seismic velocity was found to decrease with increasing freeze-thaw cycles. On the other hand, absorption tends to increase with freeze-thaw cycles. In the end, it was concluded that variations of the index properties of deteriorated specimen depend on its initial properties and flaws in rock. The size and density of the traces of the microfracture on slab specimen were changed continuously with increasing freeze-thaw weathering. The results obtained in this study show that the box fractal dimension(D_B) has the strong capability of quantifying the combined effect of size and density of the microfractures.

Key words : weathered rocks, freeze-thaw, granite, microfracture, fractal dimension

이 연구는 강원도 원주시 일대에 분포하는 쥬라기 화강암에 대하여 동결-융해 시험을 수행하고 동결-융해 반복 횟수의 증가에 따른 암석의 물리 역학적 특성변화를 고찰하였다. 동결-융해의 한 사이클은 24시간이며 진공챔버에서 2시간동안 포화시킨 시료를 -20±1°C로 8시간 동결하고 상온에서 14시간 동안 융해하였다. 동결-융해 시험 중에 물리적인 특성을 측정한 결과 탄성파 속도는 지속적으로 감소하였으며 흡수율은 증가하는 양상을 보였다. 시험 전 풍화등급이 높은 암석일수록 동결-융해에 따른 물성의 변화가 크며 풍화에 취약한 것으로 나타났다. 슬랩(slab) 시편에서 취득한 미세균열 트레이스의 길이 및 면적밀도는 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 지속적으로 감소하는 탄성파 속도의 특성과도 부합하며 암석 내부에 미세균열이 급격히 발현 · 확장하고 특히 광물 결정의 결합력이 약화되는 암석 풍화에 기인한 것으로 판단된다. 미세균열의 밀집도와 크기를 동시에 고려할 수 있는 박스 프랙탈 차원(D_B)은 미세균열 트레이스의 변동성을 효과적으로 반영하며 중·장기적인 풍화 예측을 위한 새로운 풍화지수로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 풍화암, 동결-융해, 화강암, 미세균열, 프랙털 차원

1. 서 론

풍화는 대기권, 수권 및 생물권과 접하는 암석권에서 평형을 이루기 위한 물질의 반응이다(Rieche, 1950). 물과 대기에 의한 작용에 따라 암석은 변화하고 붕괴되어 풍화물질을 생성한다. Price(1995) 는 이러한 풍

*Corresponding author: hjpark@sejong.ac.kr

화를 공학적 관점에서 지표 근처의 지형적 또는 공학적 환경에 노출되어 있는 토양, 암석, 암반의 순방향적 반응으로 정의하였다.

암석의 풍화과정은 기본적으로 역학적인 분해와 화학적 성분 변화로 구분되는데, 전자에 해당하는 물리적 풍화는 광물 성분의 변화 없이 암석과 광물입자를 작은 결정으로 깨트려 암석을 해체하며, 후자의 화학적 풍화는 광물의 성분적 특성을 변화시킨다. 대부분의 풍화는 상기 두 과정이 복합적으로 진행되는 과정이지만 물리적 풍화는 지표면 근처에서 주로 발생하며 화학적 풍화는 지표면에서 수십 혹은 수백 미터 아래까지도 발생하는 것으로 알려져 있다(Chorley, 1969). 이와 같은 풍화과정이 어느 위치에서 활발하게 작용할 것인가는 기후에 의해 결정된다(Price, 1995). 우리나라에서는 지표 근처의 물리적, 화학적 과정이 풍화를 제어하는 것이 특징적이며 물리적 풍화가 선행적으로 작용하여 후의 화학적 풍화에 필요조건이 되는 경우가 많다.

우리나라는 계절의 변화가 뚜렷하여 동결 융해과정에 따른 암반의 물리적 풍화가 상대적으로 많이 나타나는 편으로(Jang *et al.*, 2004), 심한 온도조건 하에서 암석의 내구성은 암반 구조의 안정성을 결정하는 요인이 될 수 있다. 자연 상에서 주기적인 동결-융해가 반복될 때, 암석의 풍화는 공극에 축적된 물과 암석 내의 균열과 같은 결함에 의해 일어난다. 결빙한 물은 부피가 9% 팽창되며 이로 인한 응력이 암석의 인장강도에 도달할 때 새로운 미세균열이 발달하고 기존의 균열은 확장된다. 융해 후에 새로이 발달된 미세균열은 물의 통로 역할을 하며 주기적인 동결-융해 사이클은 암석물질을 약화시킨다(Chen *et al.*, 2004). 따라서 동결-융해과정에 따른 암석의 풍화 메커니즘과 풍화양상을 예측하는 것은 지질공학적으로 매우 중요하다. 특히 도로나 철도 등 사회기반시설 건설과 관련된 절취사면에서 노출암반의 풍화는 암반의 공학적 특성과 안정성에 주된 영향을 미친다. 이와 같은 암반구조물의 연령은 통상 수십 년의 시간이 고려되는데, 이때 문제가 되는 것은 국내의 극한 기후조건 - 여름의 아열대성 기후와 겨울의 대륙성 기후 - 에 의한 암반 풍화가 암반의 물리 역학적 특성 또는 수리지질학적 특성을 변화시킬 수 있다는 것이다. 그동안 암석의 풍화에 대한 연구는 주로 화강암의 풍화정도를 등급화하고 분류하여 지질공학적 특성과의 연관성을 규명하는 데에 주안점을 두었다(Ruxton and Berry, 1957; Dearman, 1974; Fookes *et al.*, 1988; Lee and De Freitas, 1989; Kim and Hong, 1990; Woo and Park, 2004; Lee and Cho, 2005).

이 연구는 강원도 원주시 일대에 분포하는 쥬라기 화강암에 대하여 동결-융해 시험을 수행하고 동결-융해 반복 횟수의 증가에 따른 암석의 지질공학적 특성변화를 파악하였다. 또한 연구 결과는 기존에 수행된 타 암종의 동결-융해에 따른 지질공학적 특성 변화(Um and Shin, 2009)와 비교하여 중 · 장기적 풍화 예측의 가능성을 고찰하였다.

2. 동결-융해 시험

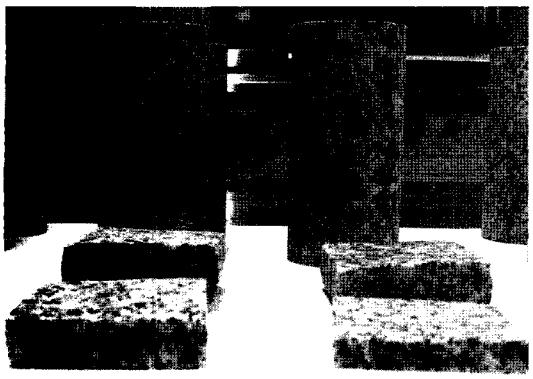
2.1. 연구지역 및 시료채취

본 연구지역은 강원도 원주시 일대로 쥬라기 화강암(대보화강암)이 분포하는 지역이다. 연구지역에서 최근 5년간 동절기(12월~3월)에 동결-융해가 일어날 수 있는 일교차(-5°C이하에서 5°C이상)를 보이는 날은 평균 13일 정도로 확인된다.

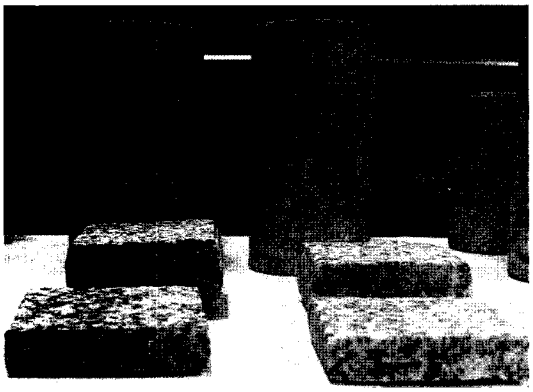
동결-융해 시험을 위한 화강암 시료는 현장에서 시추공으로부터 회수된 코어시료를 암상 및 풍화상태에 따라 세 그룹으로 분류하였다. 동결-융해 사이클에 따른 물성측정용 시료는 크기와 모양의 변화에 의해 생기는 효과를 제거하기 위해 지름 50 mm, 길이 100 mm의 기본 원주형 모양으로 그룹 당 3~4개를 제작하였다. 시료의 풍화등급은 기존에 발표된 분류기준(Dearman, 1974; IAEG, 1979; ISRM, 1981)을 적용하였다. 세 그룹으로 분류된 G-F, G-M, G-H는 각각 I등급(F: Fresh), III등급(MW: Moderately Weathered), IV등급(HW: Highly Weathered) 이다(Fig. 1).

2.2. 시험방법

동결-융해 시험은 암석 내부에서 얼음 결정이 형성될 때 발생하는 응력을 재현하기 위한 것이다. 일반적으로 이러한 효과는 물을 함유한 암석 시료에서 0°C 아래 위로의 온도 변화에 의해 얻을 수 있다. 콘크리트에 대한 동결-융해 시험법은 ASTM(American Society for Testing and Materials) 규정을 적용하고 있으나 암석에 대해서는 아직 규격화된 동결-융해 시험법이 제정되지 못한 실정이며, 이는 지역마다 기후조건이 다른 것에 기인되기도 한다. Nicholson and Nicholson(2000)은 동결-융해 사이클을 24시간으로 정하여 -18±2°C로 18시간 동안 동결하고 18±2°C로 6시간 동안 융해하였다. Yavuz *et al.*(2006)는 터키표준 시험법에 따라 시편을 증류수에 침수하여 포화시킨 후



(a)



(b)

(c)

Fig. 1. Photographs of selected specimens; (a) F group, (b) MW group and (c) HW group.

-20°C로 2시간 동안 동결, 20°C의 물에 2시간 동안 융해하는 과정을 한 사이클로 정하였다. 이 연구에서는 기존에 국내에서 수행된 동결-융해 시험(Jang *et al.*, 2004; Um and Shin, 2009)을 고려하여 연구지역에 적합한 동결-융해의 온도 범위와 반복 주기를 설정하였다.

Table 1. Pre-test sample index properties

S.N	A(%)	Gs	Seismic Velocity(m/s)		Weathering Grade
			Vp	Vs	
G-F-1	0.10	2.70	4061	3827	F
G-F-2	0.10	2.70	4274	3390	
G-F-3	0.10	2.69	4391	3607	
G-M-1	1.18	2.58	2282	1761	MW
G-M-2	1.15	2.59	2490	1795	
G-M-3	0.95	2.58	2476	2030	
G-M-4	0.99	2.59	2098	1543	
G-H-1	2.15	2.47	1102	816	HW
G-H-2	2.08	2.48	1128	932	
G-H-3	2.15	2.46	1041	841	
G-H-4	2.19	2.46	1046	798	

note; A=absorption ratio, Gs=specific gravity

동결-융해 시험은 암석의 균열이나 공극 내에 물이 충분히 침투되어 있어야 효과적이다. 따라서 이 연구에서는 시료가 충분히 포화된 상태에서 동결-융해에 의한 암석의 풍화를 고찰하기 위해 진공챔버를 이용한 수침을 실시하여 시료가 충분히 포화된 상태에서 동결-융해 과정을 수행하였다. 포화액은 증류수에 이산화탄소를 주입하여 pH≒5.5가 되도록 유지하여 자연상의 환경을 유지하도록 하였고 동결 온도는 연구지역의 최근 10년간 동절기 평균기온의 약 3배에 해당하는 -20°C±1°C로 설정하여 풍화가 가속될 수 있는 조건을 부여하였다. 진공챔버에서 2시간동안 약산성의 증류수에 포화된 시료는 플라스틱 랩으로 밀봉하여 8시간동안 냉동기에서 동결시킨 후 상온에서 14시간동안 융해하였다. 이와 같이 포화-동결-융해 순서로 정해진 사이클은 24시간동안 연속적으로 수행되어 한 사이클을 이룬다. 실험실시 후 사이클을 반복하면서 주기적으로 비중, 흡수율, 탄성파 속도 등의 비파괴 물성을 측정하는 방식으로 최대 100 사이클 이상의 동결-융해 시험이 수행되었다. 다만 실험초기 HW로 분류된 G-H 그룹의 시료는 40 사이클 이후 발현·확장된 미세균열에 의하여 시료가 해체되어 물성 측정이 불가능하였다. 각각의 시료 그룹에 대한 시험 전 비파괴 물성은 Table 1과 같다.

3. 물성변화

물리적 풍화는 물리적 특성의 변화와 암석 물질의 해체를 수반한다. 따라서 동결-융해 풍화의 진전에 상

응하는 물리적 특성은 무결암의 물리적 특성과 비교하여 암석의 풍화 정도를 정량화하는데 이용될 수 있다. 이 연구에서는 동결-융해가 연구지역 화강암의 물리적 특성 변화에 미치는 영향을 파악하기 위하여 실내에서 동결-융해 풍화과정을 가속시키면서 비중, 흡수율, 탄성파 속도 등의 물리적 특성을 측정하였다. 각각의 물리적 특성에 대한 측정법은 한국암반공학회 표준암석시험법(Korean Society for Rock Mechanics, 2005; 2006a; 2006b)을 사용하였다. 비중 및 흡수율을 측정하기위한 시험법은 아르키메데스의 원리에 기초한 부력이용 방법을 사용하였는데, 이는 측정 과정이 간편하며 비교적 정확한 결과를 제공하는 장점이 있다(Um and Shin, 2009). Figs. 2~4는 동결-융해 풍화의 진행에 따른 비중, 흡수율 그리고 P파 및 S파 속도 등과 같은 물리적 특성 변화를 보여준다.

동결-융해 사이클에 따른 비중의 변화가 Fig. 2에 나타나 있다. 연구지역의 화강암에서 측정된 비중은 동결-융해 사이클이 진행함에 따라 감소하는 양상을 보이지만 암석 시료의 초기 풍화 등급에 따라 시험 전과 100 사이클 이후의 변화가 F 등급의 시료 그룹에서 비중의 값이 약 0.006, MW 등급의 시료 그룹에서 비중 값이 약 0.005~0.011의 작은 감소로 고려할만한 변화를 보이지 않는다. 초기 풍화도가 높아 비중이 상대적으로 낮은 HW 시료 그룹은 40 사이클에서 비중 값이 0.01~0.04의 비교적 큰 감소폭을 나타냈다. 이와 같은 비중의 변화는 경상분지 백악기 이암에 대한 동결-융해 시험(Um and Shin, 2009)에서 논의한 바와 같이 초기 풍화 등급이 높은 암석일수록 비중의 감소가 더욱 크게 일어나는 결과와 일치한다. 그러나 연구지역의 화강암은 비중의 감소폭이 현저히 낮으며 물리적 풍화작용이 비중 변화에 미치는 영향이 상대적으로 작다는 것을 유추할 수 있다.

흡수율은 광물 입자간의 공극 및 미세균열 등에 의해 흡수되는 모든 수분의 함량을 측정하여 산정된다. 이는 암석의 공학적 특성과 밀접한 관계를 갖기 때문에 풍화 정도의 지표로 사용된다. Fig. 3은 동결-융해 사이클과 흡수율의 관계를 보여준다. 흡수율은 동결-융해가 반복됨에 따라 전체적으로 증가하는 양상을 보이며 특히 HW 그룹 시료에서는 대체로 선형적인 증가를 뚜렷하게 관찰할 수 있다. F 그룹은 초기값 0.10%에서 100 사이클 이후 0.13~0.15%로, MW 그룹은 초기값 0.94~1.18%에서 100 사이클 이후 1.04~1.25%로 증가하여 비중의 변화에서와 같이 변화폭이 미약함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 풍화 등급이 F~MW인 연구지역의 화강암의 경우 흡수율을 물리적 풍화의 중·장기적인 지표로 사용하기 어려울 수 있음을 지시한다. HW 그룹의 경우에는 초기값 2.08~2.19%에서 시료의 붕괴가 일어난 40 사이클 이후 2.56~3.46%로

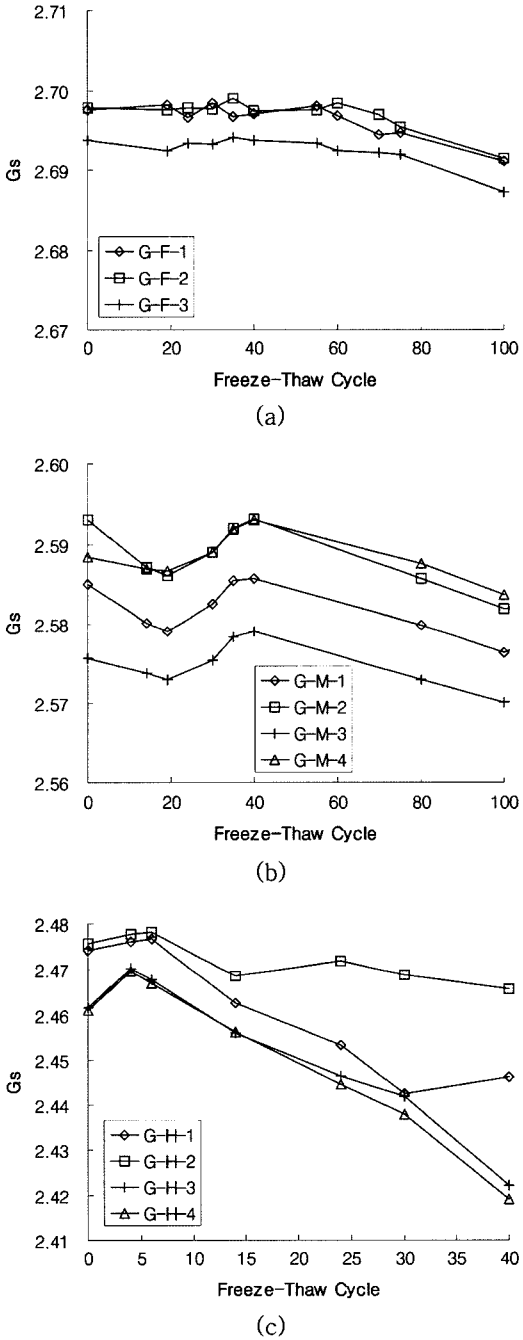
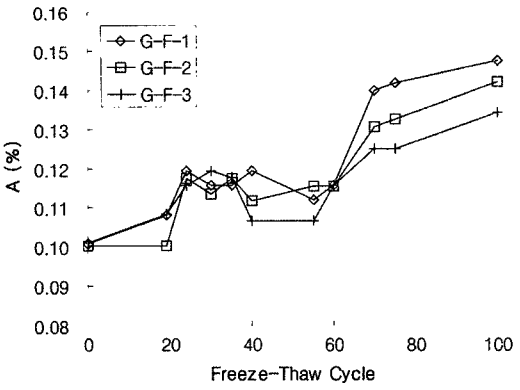
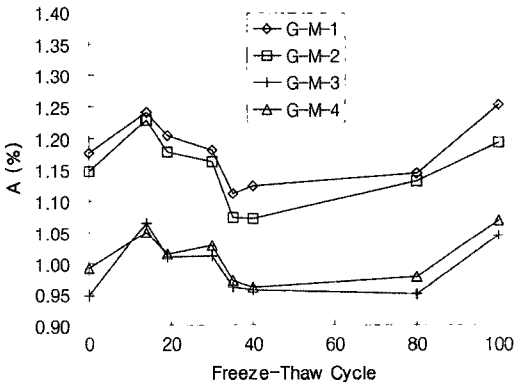


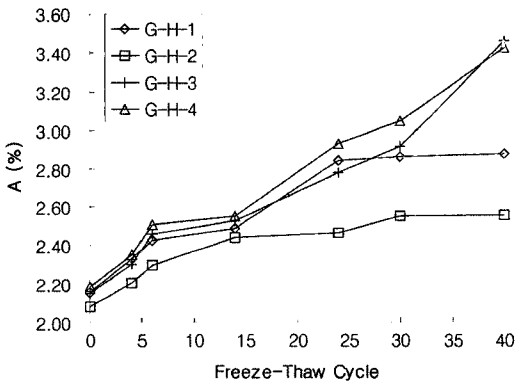
Fig. 2. Specific gravity with respect to freeze-thaw cycles; (a) F group, (b) MW group and (c) HW group.



(a)

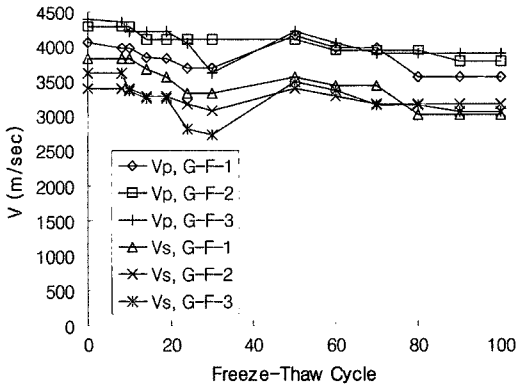


(b)

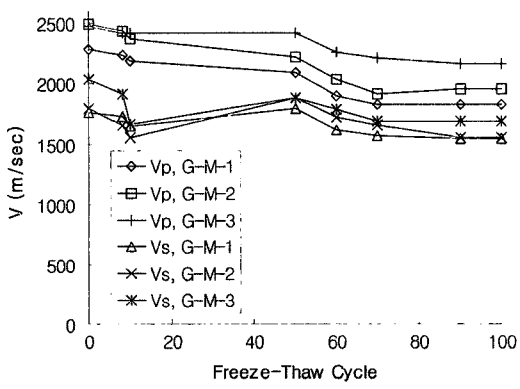


(c)

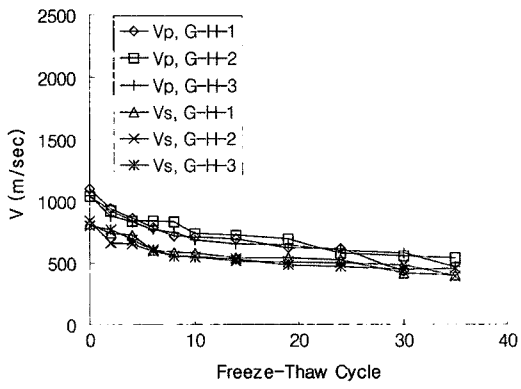
Fig. 3. Absorption with respect to freeze-thaw cycles; (a) F group, (b) MW group and (c) HW group.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. Seismic velocity with respect to freeze-thaw cycles; (a) F group, (b) MW group and (c) HW group.

비교적 높은 증가를 나타내는데, 이는 연구지역의 화강암에서 초기 풍화 등급이 높은 암석이 지표에 노출될 경우 동결-융해 작용이 풍화를 촉진 시킬 수 있다는 것을 시사한다.

한편 암석의 탄성파 속도는 암석내부의 결함이나 공학적 강도 특성의 저하와 관련된 정보를 제공한다. 따라서 탄성파 속도는 암석의 공학적 풍화지수로서 보편적으로 이용되고 있으며 일반적으로 암석이 치밀 · 견

고하고 신선할수록 탄성파 속도가 빠른 것으로 알려져 있다. 연구지역의 화강암에 대한 동결-융해 풍화 진행에 따른 P파 및 S파 속도의 변화가 Fig. 4에 도시되어있다. 동결-융해 과정 중에 시료가 붕괴되어 탄성파 속도 측정이 불가한 시료는 측정 가능한 사이클까지의 속도 값만을 고려하였다. F 그룹의 시료에서 측정된 P파 속도는 시험 전 평균 4,242 m/s에서 100 사이클 이후 평균 3,740 m/s로 12% 정도 감소하였다. 또한 MW 그룹의 시료에서는 평균 2,337 m/s에서 1,930 m/s로 17% 정도 감소하였다. HW 암석의 경우에는 시험 전 평균 1,063 m/s에서 40 사이클 이후 평균 478 m/s로 약 55%의 현저한 감소를 나타냈다. S파 속도의 경우에도 F, MW 시료에서는 100 사이클 이후 약 14%의 완만한 감소로, HW 시료에서는 30 사이클 이후 49%의 급격한 감소를 나타내어 P파와 매우 유사한 비율의 속도 감소가 측정되었다. 이와 같은 결과는 기존에 수행된 백악기 이암의 동결-융해 시험 결과(Um and Shin, 2009)에서 지적된 바와 같이 탄성파 속도의 변화가 동결-융해에 따른 미세균열의 발달과 밀접한 연관성이 있을 것으로 생각된다. 특히 현저한 탄성파 속도 저감을 보이는 HW 등급의 화강암은 동결-융해에 의하여 시료 내부에 미세균열이 급격히 확장하고 광물 결정의 결합력이 약화되는 암석 풍화에 기인한 것으로 판단된다. 또한, 탄성파 속도는 앞에서 언급한 비중 및 흡수율 등과는 달리 F~MW 등급의 암석에 있어서도 동결-융해에 따른 뚜렷한 변화를 나타내므로 연구지역 화강암이 지표에 노출된 경우 이에 대한 중 · 장기적 풍화 예측을 위한 풍화지수로 유용하게 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 미세균열 발현특성

미세균열 스케일에서 파괴에 미치는 암석 결함의 영향은 전통적인 파괴역학이론(Griffith, 1920)으로 오랫동안 인지되어 왔다. 기본적으로 암석의 취성파괴는 암석 내부의 결함에 집중되는 인장응력에 좌우된다. 암석 내부의 결함은 미세 전단변형 구조, 공극, 암상 변화, 광물의 용탈로 인한 미세 공동, 미세균열 등을 들 수 있다(Um and Shin, 2009). 이러한 결함은 암석 균열의 확장을 유발하고 강도를 저하시키는 요인으로 작용할 수 있다. McGreevy and Whalley(1985)는 무결암에 비하여 수분함량이 상대적으로 집중된 미세균열 부근에서 동결에 의한 손상이 크다고 논의하였다. 더불어 미세균열의 확장이 이론적인 파괴압보다 낮은

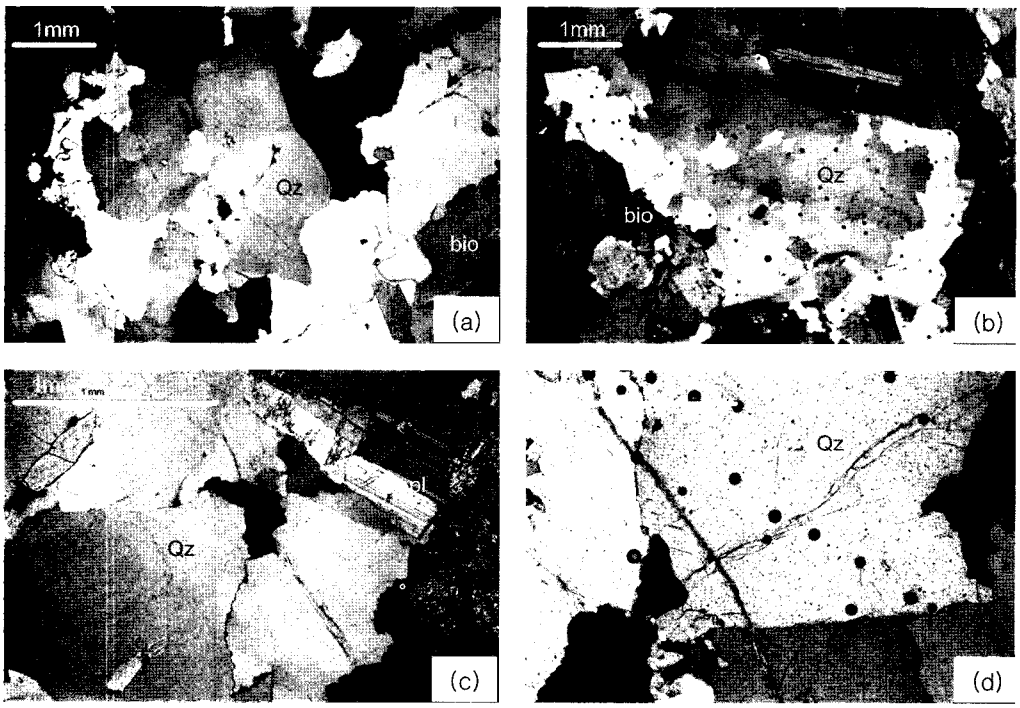


Fig. 5. Photographs, in cross-polarized light, showing minerals in a F grade granite; (a, c) before and (b, d) after freeze-thaw weathering.

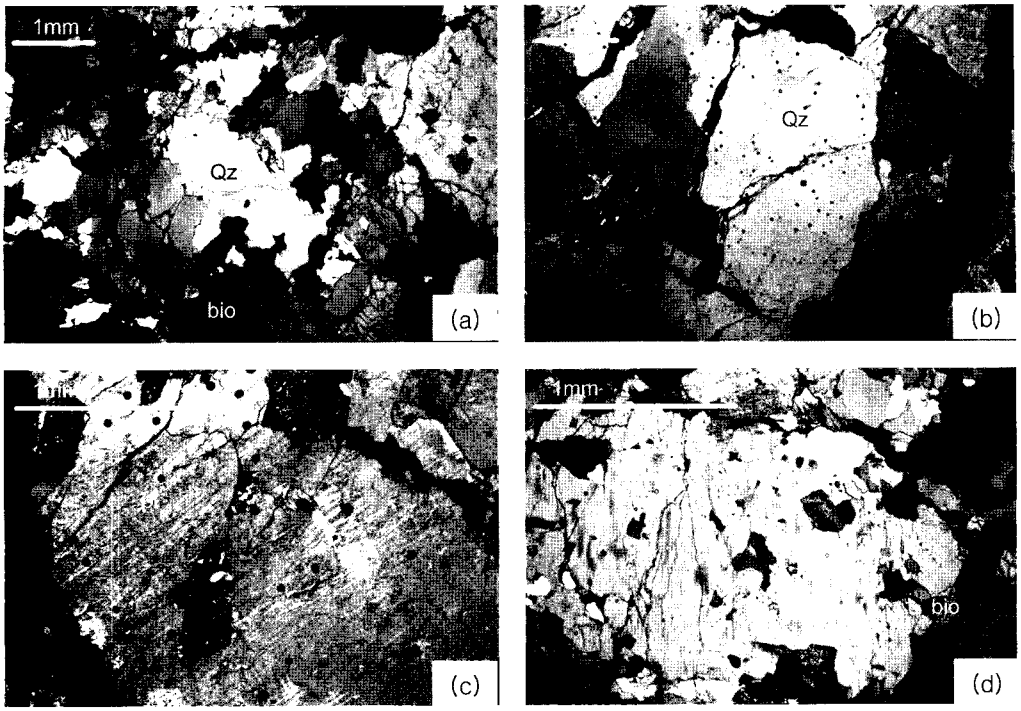


Fig. 6. Photographs, in cross-polarized light, showing minerals in a MW grade granite; (a, c) before and (b, d) after freeze-thaw weathering.

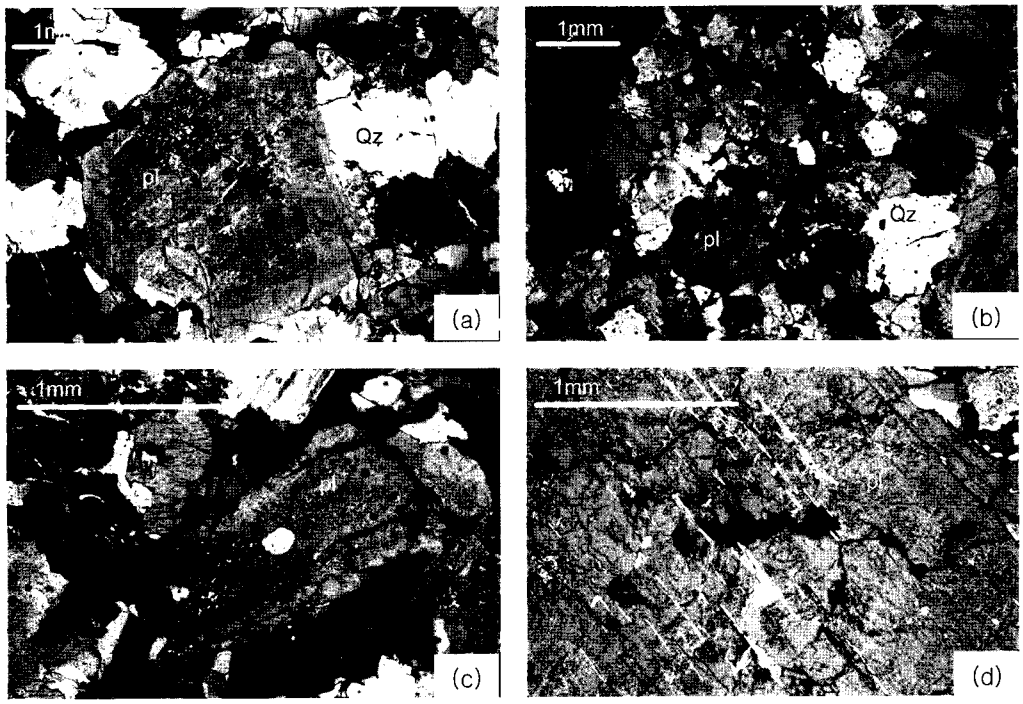


Fig. 7. Photographs, in cross-polarized light, showing minerals in a HW grade granite; (a, c) before and (b, d) after freeze-thaw weathering.

응력에서 나타난다는 것을 인지하였다. 따라서 미세균열의 발현과 확장에 대한 확고한 이해와 요소 이론의 개발은 암석의 풍화와 더불어 강도특성을 연구함에 있어서 매우 중요한 부분이라 할 수 있다.

연구지역의 화강암은 주로 석영, 사장석, 각섬석, 흑운모 등으로 구성되어 있는데, 동결-융해실험 전후의 시료에 대한 박편을 관찰하였을 때 암석 내부의 결함이 동결-융해에 의해 더욱 발달되어 있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5는 F 등급의 화강암에 대한 동결-융해 전후의 박편 사진이다. Fig. 5(a)와 (c)에 나타난 동결-융해 전의 광물 결정은 입자 경계가 뚜렷하고 신선한 외관을 보이는 것에 반하여 Fig. 5(b)와 (d)에 나타난 동결-융해 100 사이클 후의 박편에서는 미세균열과 같은 결함이 발달한 것을 볼 수 있다. 특히 사장석은 동결-융해 이전에도 이미 화학적 풍화흔적을 발견할 수 있고 미세균열이 부분적으로 발달되어 있지만, 동결-융해 후에 미세균열이 뚜렷하게 증가하였음을 알 수 있다. MW 등급의 시료에서는 암석의 동결-융해에 의한 영향을 좀 더 명확히 관찰할 수 있다. Fig. 6(a)와 (b)에서 각각 동결-융해 전과 100 사이클 후의 석영은 동결-융해에 의해서 입자 경계의 긴밀함이 결여되며 결정에 발달한 미세균열의 폭이 증가된 상태를 확인할 수 있다. Fig. 6(c)와 (d)에 나타난 사장석에서는 100 사이클의 동결-융해 후 미세균열의 확장과 균열의 크기 및 빈도수의 증가를 볼 수 있다. Fig. 7에 나타난 HW 등급의 암석은 동결-융해 전에 이미 자연 상의 심한 풍화작용에 따라 입자 간의 간격이 벌어져 있고 광물 입자의 분리가 관찰되는데, 40 사이클의 동결-융해 후에는 입자 경계가 더욱 느슨해지며 광물 입자가 더욱 작은 결정으로 해체되었음을 알 수 있다. 이와 같이 현미경 스케일에서 동결-융해에 따라 발달하는 미세균열과 같은 결함은 정성적으로 확인할 수 있으나 정량적으로 해석하기에는 치수효과로 인한 어려움 있다.

이 연구에서는 연구지역 화강암의 동결-융해 풍화에 의한 미세균열의 발현양상을 관찰하기 위하여 각각의 시료 그룹에서 4×4×1 cm 의 제원을 갖는 슬랩 형태로 시편을 제작하고 이를 미세균열의 정량적 해석을 위한 대표체적요소로 가정하였다. 제작된 슬랩 시편은 표면을 연마한 후 3×3 cm의 프레임을 표시하여 동결-융해 풍화에 의한 미세균열 발현 및 분포 양상을 고해상도로 촬영하기 위한 기준으로 설정하였다. 슬랩 시편에 대한 동결-융해 시험은 물성 측정을 위해 제작된 원주형 시료와 동시에 수행하였으며 미세균열의 발현 및 분포 양상을 파악하기 위하여 동결-융해 과정 중 F, MW 등급의 시편은 150 사이클 까지 매 20 사이클 주기로, HW 등급의 시편은 40 사이클까지 매 10 사이클 주기로 슬랩 시편 표면에 대한 고해상도 디지털 화상을 획득하였다. 또한 미세균열의 발현 및 분포 특성을 분석하기 위해서는 디지털 화상으로부터 미세균열 좌표를 취득하였다. 특히 HW 시편은 30 사이클 이후 미세균열 및 광물 결정의 경계를 따라 시편이 해체되고 부스러진 파편이 이탈하였으며 이후 40 사이클까지는 미세균열 관찰이 가능한 부분에 대해서만 동결-융해 시험을 수행하였다. Fig. 8은 동결-융해 풍화에 따른 HW 시편의 변화를 보여준다. 사진에서 시험 전의 슬랩 시편은 동결-융해 풍화에 의하여 기존의 균열, 결함 또는 광물결정의 경계를 따라 미세균열이 발현·확장하여 해체되었음을 인지할 수 있다.

Fig. 9는 슬랩 시편의 동결-융해 반복에 따른 미세균열의 변화 양상을 보여주고 있다. 전반적으로 동결-융

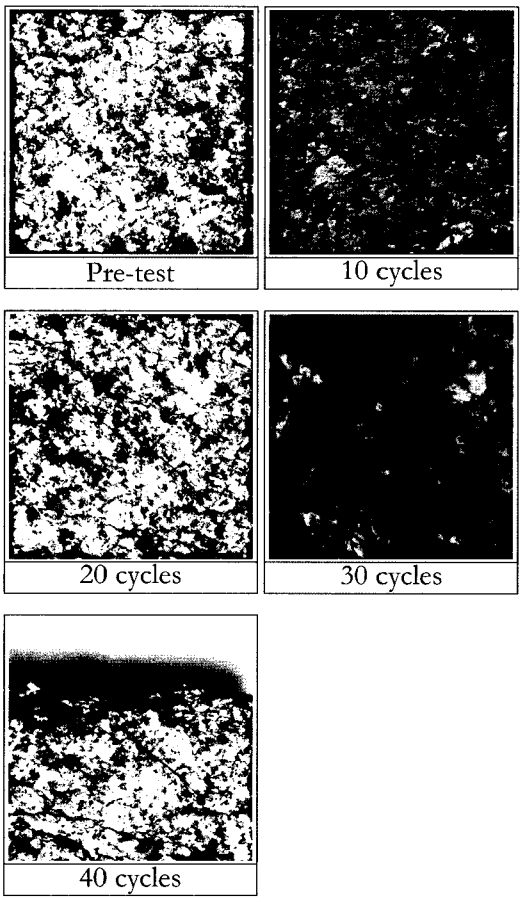


Fig. 8. Deterioration of the HW slap specimen due to freeze-thaw weathering.

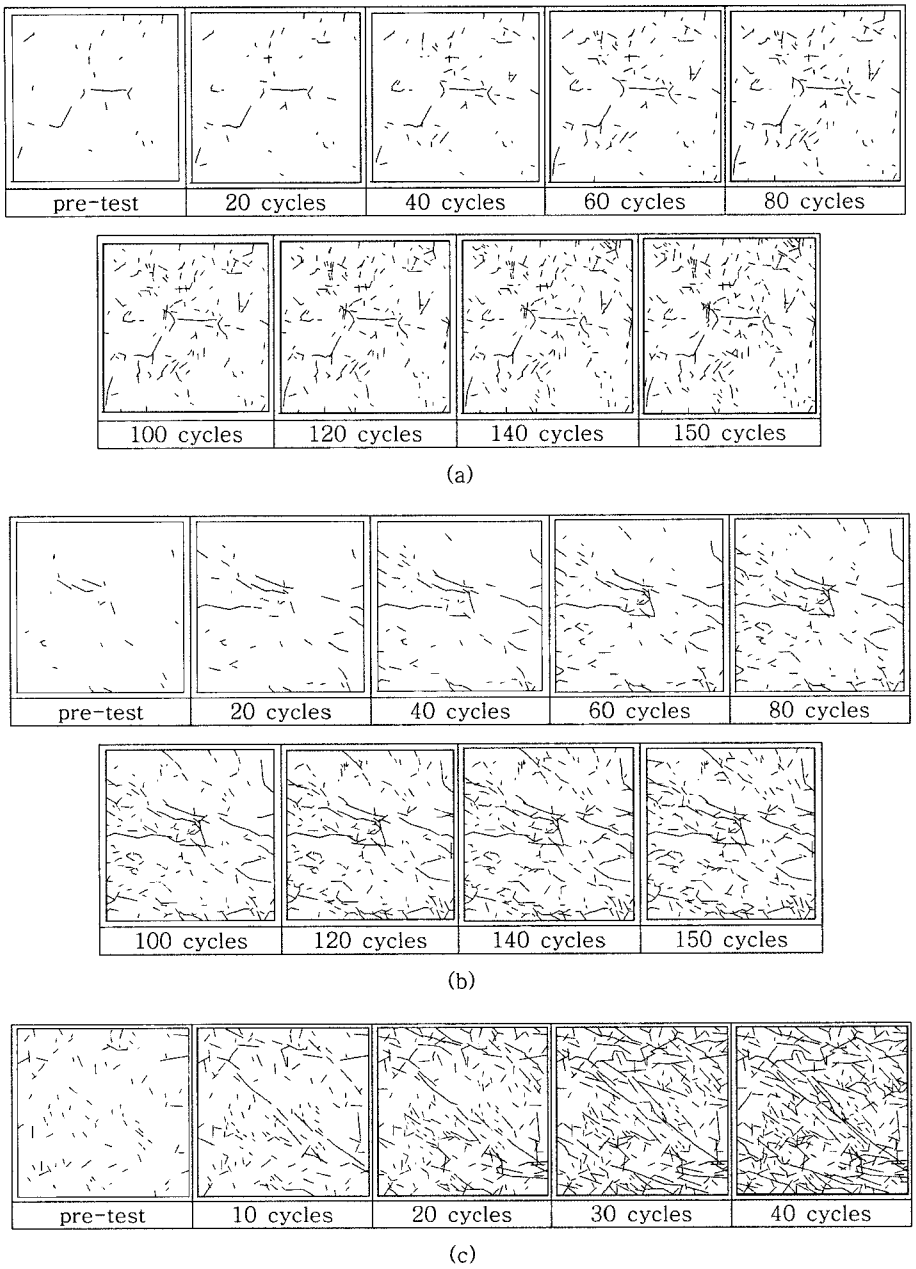


Fig. 9. Microfracture growth on 3×3 cm slab specimens due to freeze-thaw weathering; (a) F group, (b) MW group and (c) HW group.

해 풍화가 증가함에 따라 미세균열 트레이스의 크기 및 면적밀도가 증가함을 정성적으로도 인지할 수 있다. 미세균열은 주로 광물 입자의 경계나 시편의 자유면으로부터 발현되고 성장한다. Fig. 9(a)는 F 등급 시편의 변화 양상을 보여주는데, 동결-융해 사이클이 증가함에 따라 산발적으로 미세균열이 발현하여 면적밀도가 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 그림에서는 발현된 미세균열이 확장하여 트레이스 크기가 증가하는 것은 관찰하기 어려우며 특히 시편 중앙 부분에 위치한 상대적으로 긴 균열 역시 크기의 변화가 거의 없음을 확인할 수 있다. 즉, F 등급의 시편에서는 미세균열의 빈도수가 증가하지만 확장성이 결여되어 이에 따른 균열의

연결성(fracture connectivity)도 낮다고 볼 수 있다.

Fig. 9(b)에 나타난 MW 등급의 시편은 동결-융해 사이클 증가함에 따라 미세균열 트레이스의 면적밀도가 증가하며 동시에 기 발현된 미세균열을 중심으로 확장하여 연속성 및 연결성도 높아짐을 알 수 있다. Fig. 9(c)의 HW 시편은 동결-융해 사이클 증가에 따라 미세균열 트레이스의 빈도수 및 크기가 급격히 증가하는데, 10 사이클 정도에서의 트레이스 분포가 MW 시편의 100 사이클 정도에서 나타난 트레이스 분포양상과 유사함을 정성적으로 인지할 수 있다. 이에는 초기 풍화 등급이 상대적으로 높은 암석일수록 동결-융해에 의한 미세균열의 발현 및 확장이 뚜렷해짐을 의미하며 앞에서 언급하였듯이 이와 같은 미세균열의 발달과 탄성파 속도는 밀접한 연관성이 있는 것으로 판단된다. 따라서 탄성파 속도는 풍화에 대한 정량적 지표로 유용하게 사용될 수 있으나 측정 오차와 관련하여 일관된 측정 결과를 제공하기 어려우며 자료의 품질 관리(quality control)에 세심한 주의가 요구된다는 단점이 있다.

이 연구에서는 디지털화상으로부터 얻어진 미세균열의 패턴에 대한 기하학적 특성(면적밀도, 크기)의 통계적 모수와 물리적 풍화 사이클 간의 상관성을 고찰하기 위해서 미세균열의 밀집도와 크기를 동시에 고려할 수 있는 박스 프랙탈 차원(D_B; Um *et al.*, 2006)을 적용하여 동결-융해 과정의 반복에 따른 미세균열의 발현특성에 대한 정량화를 시도하였다. 미세균열의 밀집도와 길이분포에 따라 다르게 나타날 수 있는 프랙탈 차원을 산정하기 위한 기법으로 박스집계법(Feder, 1988; Um and Shin, 2009)이 유용하게 사용될 수 있다. Fig. 10 에서와 같이 미세균열 트레이스를 포함하는 정사각 면적을 분할하는 박스크기가 r이며, 이때 미세균열의 트레이스를 포함하는 박스 개수가 N(r)이라면, 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$N(r) \propto r^{D_B} = Br^{D_B} \tag{1}$$

여기서 B는 비례상수이며 식(1)로부터 ln(N(r)) vs. ln(r) 관계를 X-Y 그래프에 도시한 후 선형회귀분석을 통하여 선형성을 확인하고 D_B를 결정할 수 있다. 각각의 슬랩에서 D_B를 산정하기 위한 초기 단계의 박스 크기는 30 mm×30 mm를 1/4로 분할한 4개의 15 mm×15 mm 박스이며, 다음 두 번째 단계에서는 각각의 박스를 다시 1/4로 분할하여 16개의 7.5 mm×7.5 mm 박스 크기를 고려하였다. 이와 같이 박스의 크기를 기하급수적으로 줄이는 방법으로 최종 7단계까지 단계별로 미세균열 트레이스를 포함하는 박스 개수를 집계한 후 ln(N(r)) vs. ln(1/r)의 선형성을 확인하고 D_B를 산정하였다. 산정된 D_B의 신뢰도는 ln(N(r)) vs. ln(1/r)의 선형성에 의해 결정되는데, 일반적으로 결정계수 R^2 값이 0.81 이상일 때 산정된 D_B의 신뢰가 높다고 볼 수 있다. 이와 같이 산정된 D_B는 이론적으로 트레이스의 평면밀도와 길이분포에 따라 최소 1에서 최대 2사이의 값을 갖는다(Um *et al.*, 2006). 이 연구에서는 MW, HW 시편의 경우 20 사이클 이상에서 산정된 D_B 값에서 높은 신뢰도를 나타냈다. 20 사이클 미만인 경우에는 미세균열의 발달이 미약하여 산정된 D_B가 1 미만의 값을 나타내는데, 이는 미세균열의 발달이 박스 프랙털 차원을 적용하기 위한 조건인 자체유사성

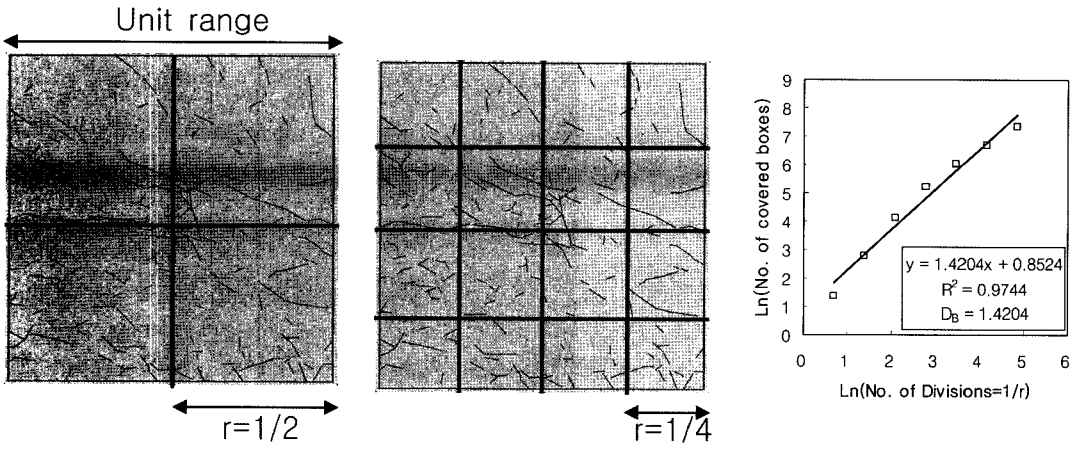


Fig. 10. Illustration of the procedure of the box-counting method using the MW slab specimen after 100 cycles.

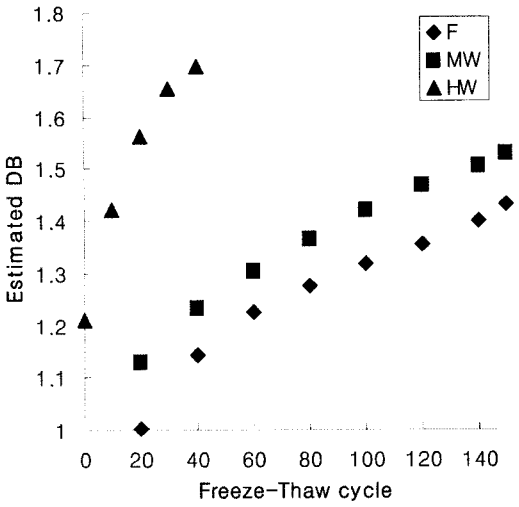


Fig. 11. Plots between estimated D_B and freeze-thaw cycles.

(self-similar)을 만족하지 못하기 때문인 것으로 사료된다. HW 시편은 시험 초기부터 자체유사성을 만족할 정도로 미세균열의 발달이 우세하게 나타났다.

Fig. 11은 동결-융해 풍화가 진전됨에 따라 시편의 표면에 발달한 미세균열 트레이스에서 산정된 D_B의 변화를 도시한 것이다. F 등급의 시편에서의 D_B는 동결-융해 반복 횟수가 20에서 150회 까지 증가함에 따라 D_B=1.00에서 D_B=1.43까지 지속적인 증가를 나타냈다. MW 시편에서 D_B는 동결-융해 20회 반복에서 D_B=1.13, 150회 반복에서 D_B=1.53까지 선형적인 증가를 보인다. HW 시편은 시험 초기에 D_B=1.21로 산정되었으며 40회 반복에서는 D_B=1.70의 비교적 높은 값을 나타내며 급격한 D_B의 증가를 나타냈다. 특히 HW 시편의 경우 동결-융해 사이클이 30회 부근에서는 미세균열의 확장에 의한 시편의 해체가 일어났다.

미세균열의 빈도 및 크기를 동시에 고려하는 D_B의 증가는 풍화에 따른 지질공학적 특성에 대한 정량적인 정보를 제공할 수 있으며 연구지역의 화강암이 지표에 노출되어 동결-융해가 반복되면 중·장기적으로 암석의 물성 변화와 더불어 강도 저하가 초래될 수 있음을 의미한다. 특히 풍화가 상당히 진정된 암석의 경우에는 해체와 분리를 수반하는 물리적 풍화가 진행될 수 있다. 실제 자연상에서는 물리적 풍화 이외에도 화학적 풍화가 병행하여 작용하므로 암석에서 풍화 속도는 더욱 가속화 될 수 있다.

기존의 백악기 이암을 이용한 연구에서도 동결-융해가 반복함에 따라 암석시료 내부에서 미세균열이 급격히 발현·확장하여 물리적 풍화작용이 암석풍화의 주된 기작이 될 수 있다는 것을 확인한 바 있다(Um and Shin, 2009). 또한 박스프랙털 차원 해석이 미세균열 트레이스의 변동성을 효과적으로 정량화할 수 있으며 경남 함안지역 이암의 경우 D_B=1.40 전후에서 미세균열의 확장에 의한 암석 시편의 해체가 일어날 수 있음을 보고하였다. 본 연구지역의 화강암은 D_B=1.65 전후의 비교적 높은 값의 D_B에서 암석 시편의 해체 및 분리가 일어날 수 있다고 여겨지는데, 이는 이방성의 층리, 미세전단변형 구조 등의 암석 결함을 중심으로 결합력이 약화되는 이암과 달리 등방성의 결정질 암석에서는 광물 결정의 경계, 공극, 광물의 용탈로 인한 미세공동 등의 암석 결함이 미세균열의 발현 및 확장에 주된 역할을 하기 때문인 것으로 판단된다.

동결-융해 사이클의 증가에 따른 D_B의 특성은 전절의 물리적 특성 결과와도 부합하며 D_B는 암석내 미세균열의 발현 및 발달 양상을 정량화할 수 있는 파라미터로 유용하게 사용될 수 있다고 사료된다. 또한 D_B는 중·장기적인 풍화 예측을 위한 새로운 풍화지수로 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 이를 위해서는 다양한 암종에 대하여 물리적 풍화와 더불어 화학적 풍화가 병행된 조건에서의 고찰 필요하며 앞으로도 지속적인 후속 연구가 요구된다.

5. 결 론

자연계에서 발생하는 풍화에 의한 암석의 특성변화를 예측하는 것은 시간적, 공간적 한계가 있기 때문에 매우 어려운 일이다. 풍화 시험의 목적은 극단적인 자연 환경을 인공적으로 조성하고 풍화를 가속화시켜, 이에 의한 암석의 물리·역학적 특성을 정량적으로 확인하고, 자연계에서 발생하는 풍화에 따른 암석의 특성 변화를 예측하기 위함이다. 이 연구는 강원도 원주시 일대에 분포하는 쥬라기 화강암에 대한 동결-융해 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 동결-융해 과정이 반복됨에 따라 비중, 탄성파 속도는 감소하며 흡수율은 증가한다. HW 암석은 물리적 특성의 변화가 크며 동결-융해 풍화에 취약하지만 F~MW 암석은 동결-융해 작용이 풍화에 미치는 영향이 상대적으로 적은 것으로 판단된다.

2. 미세균열 트레이스의 크기 및 빈도수는 동결-융해에 의해 지속적으로 증가한다. 이는 지속적으로 감소하는 탄성파 속도의 특성과도 부합하며 탄성파 속도는 풍화에 대한 정량적 지표로 유용하게 사용될 수 있다.

3. 미세균열의 빈도수와 크기를 동시에 고려할 수 있

는 박스프랙탈 차원을 적용한 결과 산정된 박스프랙털 차원은 동결-융해 풍화에 따른 미세균열 트레이스의 변동성을 효과적으로 정량화할 수 있으며 연구지역의 화강암은 D_B=1.65 전후에서 미세균열의 확장에 의한 슬랩 시편의 해체가 일어날 수 있다.

4. 박스프랙털 차원은 중·장기적인 풍화 예측을 위한 새로운 풍화지수로 유용하게 활용될 수 있다고 사료되며 이를 위해서는 암종의 다양화와 화학적 풍화가 병행된 조건에 대한 연구가 지속적으로 수행되어야 한다.

감사의 글

이 논문은 2006년 정부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2006-312-C00693)을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

Chen, T.C., Yeung, M.R. and Mori, N. (2004) Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action, Cold Region Sci Technol, v. 38, p.127-136.

Chorley, R.J. (1969) The role of water in rock disintegration, Introduction to Fluvial Processes, Methuen, p. 53-73.

Dearman, W.R. (1974) Weathering classification in the characterization of rock for engineering purposes in British practice. Bulltin of the International Association of Engineering Geology, v. 9, p. 33-42.

Feder, J. (1988) Fractals, Plenum Press, New York, 283p.

Fookes, P.G., Gourley, C.S. and Ohikerec (1988) Rock weathering in engineering time. Quarterly Journal of Engineering Geology, v. 21, p. 33-58.

Griffith, A.A. (1920) The phenomenon of rupture and flow in solids, Philosophical Transactions Royal Society London Series A, v. 221, p. 163-198.

IAEG(International Association of Engineering Geology) (1979) Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. Part 1: Rock and soil materials, Bulltin of the International Association of Engineering Geology, v. 19, p. 364-371.

ISRM(International Society for Rock Mechanics) (1981) Basic geotechnical description of rock masses, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, v. 22, p. 51-60.

Jang, H.S., Jang, B.A. and Lee, J.S. (2004) Variations of geological characteristics of the Cretaceous shale from the Pungam sedimentary basin in Kangwon-do due to freezing-thawing, The Journal of Engineering Geology, v. 14, p. 401-416.

Kim, Y.H. and Hong, S.H. (1990) A quantitative study on the variational features of rock properties followed by weathered in granites, Journal of Korean Institute of Mining and Geology, v. 23, p. 332-232.

Korean Society for Rock Mechanics, (2005) Standard test method for determination of elastic wave velocity of rock, Tunnel and Underground Space, v. 15, p. 239-242.

Korean Society for Rock Mechanics, (2006a) Standard test method for porosity and density of rock, Tunnel and Underground Space, v. 16, p. 95-98.

Korean Society for Rock Mechanics, (2006b) Standard test method for absorption and bulk specific gravity of rock, Tunnel and Underground Space, v. 16, p. 99-101.

Lee, C.S. and Cho, T. (2005) Effect of rock weathering on the degradation of engineering properties, Tunnel and Underground Space, v. 15, p. 411-424.

Lee, S.G. and De Freitas, M.H. (1989) A revision of the description and classification of weathered granite and its application to granites in Korea, Quarterly Journal of Engineering Geology, v. 22, p. 31-48.

McGreevy, J.P. and Whalley, W.B. (1985) Rock moisture content and frost weathering under natural and experimental conditions: a comparative discussion, Artic and Alpine Research, v. 17, p. 337-346.

Nicholson, D.T. and Nicholson, F.H. (2000) Physical deterioration of sedimentary rocks subjected to experimental freeze-thaw weathering, Earth Surface Processes and Landforms, v. 25, p. 1295-1307.

Price, D.G. (1995) Weathering and weathering processes, Quarterly Journal of Engineering Geology, v. 28, p. 243-252.

Reiche, P. (1950) A survey of weathering process and products, University of New Mexico Publications in Geology, v. 3, University of New Mexico Press.

Ruxton, B.P. and Berry, L. (1957) Weathering of granite and associated erosional features in Hong Kong, Bulletin of the Geological Society of America, v. 68, p. 1263-1291.

Um, J.G. and Shin, M. (2009) Variations of physico-mechanical properties of the Cretaceous mudstone in Haman, Gyeongnam due to freeze-thaw weathering, Tunnel and Underground Space, v. 19, p. 146-157.

Um, J.G., Cho, T. and Kwon, S.J. (2006) A study on the quantified criteria in determining the structural domain of fractured rock mass, Tunnel and Underground Space, v. 16, p. 26-37.

Woo, I. and Park, H.J. (2004) Classification of weathering for the granite and granite gneiss in Okcheon belt, Jecheon, Geumsan, Gimcheon in Korea, Economic and Environmantal Geology, v. 37, p. 355-364.

Yavuz, H., Altindang, R., Sarac, S., Ugur, I. and Gengun, N. (2006) Estimating the index properties of deteriorated carbonate rocks due to freeze-thaw and thermal shock weathering, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 43, p. 767-775.

2009년 5월 25일 원고접수, 2009년 6월 24일 게재승인