경남 함인군 백악기 이암의 동결-융해에 따른 물성변화 및 미세균열 발현특성

엄정기^{1)*}, 신미경²⁾

Variations of Physico-Mechanical Properties of the Cretaceous Mudstone in Haman, Gyeongnam due to Freeze-Thaw Weathering

Um Jeong-Gi, Shin Mikyoung

Abstract An experimental study of accelerated weathering on mudstone sample specimens from Haman, Gyeongnam was performed to investigate the variations of physico-mechanical properties of deteriorated rocks due to freeze-thaw weathering. Each complete cycle of freeze and thaw lasted 24 hours, comprising 2 hours of saturating in vacuum chamber, 8 hours of freezing at $-16\pm1^{\circ}$ C and 14 hours of thawing at room temperature. Total of 55 cycles of freeze-thaw were completed with measuring the index properties as well as geometries of microfractures. The measured specific gravity and P-wave velocity found to decrease with increasing freeze-thaw cycles. On the other hand, absorption ratio and effective porosity were continuously increased with increasing freeze-thaw cycles. It was found that the index properties of deteriorated sample specimen depend on its initial properties and flaws in rock. The size and density of the traces of the microfracture on slab specimen exhibited abrupt changes after 30 cycles of freeze-thaw weathering. The results obtained in this study show that the box fractal dimension (D_B) given in this paper has the strong capability of quantifying the size and density of the microfracture.

Key words Weathered rocks, Freeze-thaw, Mudstone, Microfracture, Fractal dimension

초 록 이 연구는 경상남도 함안군 일대에 분포하는 백악기 이암에 대하여 동결-융해 시험을 수행하고 동결-융해 반복 횟수의 증가에 따른 암석의 물리·역학적 특성변화를 고찰하였다. 동결-융해의 한 사이클은 24시간이며 진공 챔버에서 2시간 동안 포화시킨 시료를 -16±1℃로 8시간 동결하고 상온에서 14시간 동안 융해하였다. 총 55 사이클의 동결-융해 시험 중에 물리적인 특성을 측정한 결과 비중, P파 속도는 지속적으로 감소하였으며 흡수율, 공극률은 지속적으로 증가하였다. 시험 전 풍화를 많이 받은 암석일수록 동결-융해에 따른 물성의 변화가 크며 풍화에 취약한 것으로 나타났다. 슬랩 시편에서 취득한 미세균열 트레이스의 크기 및 면적밀도는 30사이클 이후부터 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 이는 30사이클 이후 급격히 감소하는 P파 속도의 특성과도 부합하며 암석 내부에 미세균열이 급격히 발현·확장하고 특히 층리면의 결합력이 약화되는 암석 풍화에 기인한 것으로 사료된다. 미세균열의 밀집도와 크기를 동시에 고려할 수 있는 박스 프랙탈 차원(D₈)은 미세균열 트레이스의 변동성을 효과적으로 반영하며 중·장기적인 풍화 예측을 위한 새로운 풍화지수로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심어 풍화암, 동결-융해, 이암, 미세균열, 프랙털 차원

1. 서 론

1) 부경대학교 에너지자원공학과 교수 2) (주)지오제니컨설턴트 자원사업부

* 교신저자 : jum@pknu.ac.kr 접수일 : 2009년 4월 2일 심사 완료일 : 2009년 4월 7일 게재 확정일 : 2009년 4월 13일 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 풍화를 공학적 관점에서 지표 근처의 지형적 또는 공학적 환경에 노출되어 있는 토양, 암석, 암반의 순방향적 반응으

로 정의하였다.

암석의 풍화과정은 기본적으로 역학적인 분해와 화학 적 성분 변화로 구분되는데, 전자에 해당하는 물리적 풍화는 광물 성분의 변화 없이 암석과 광물입자를 작은 결정으로 깨트려 암석을 해체하며, 후자의 화학적 풍화 는 광물의 성분적 특성을 변화시킨다. 대부분의 풍화는 상기 두 과정이 복합적으로 진행되는 과정이지만 물리 적 풍화는 지표면 근처에서 주로 발생하며 화학적 풍화 는 지표면에서 수십 혹은 수백 미터 아래까지도 발생하 는 것으로 알려져 있다(Chorley, 1969). 이와 같은 풍화 과정이 어느 위치에서 활발하게 작용할 것인가는 기후 에 의해 결정된다(Price, 1995). 특히 퇴적암은 온도, 습 도의 변화에 노출된 경우 풍화가 야기된다. 이암의 경 우에는 지표 근처의 물리적, 화학적 과정이 풍화를 제어 하지만 물리적 풍화가 선행적으로 작용하여 후의 화학 적 풍화에 필요조건이 된다. 그동안 이암의 풍화는 석탄 산업, 도로 및 댐 건설, 폐기물처분 등과 관련하여 연구 되었다(Badger et al., 1956, Taylor and Spears, 1981, Lempp, 1981, Einsele et al., 1985).

우리나라는 계절의 변화가 뚜렷하여 동결·융해과정 에 따른 암반의 물리적 풍화가 상대적으로 많이 나타난 다(장현식 외, 2004). 심한 온도조건 하에서 암석의 내 구성은 암석 구조의 안정성을 결정하는 요인이 될 수 있다. 자연 상에서 주기적인 동결-융해가 반복할 때, 암 석의 풍화는 공극에 축적된 물과 암석 물질의 균열과 같은 결함에 의해 일어난다. 결빙한 물은 부피가 9% 팽 창되며 이로 인한 응력이 암석의 인장강도에 도달할 때 새로운 미세균열이 발달하고 기존의 균열은 확장한다. 융해 후에 새로이 발달된 미세균열은 물의 통로 역할을 하며 주기적인 동결-융해 사이클은 암석물질을 약화시 킨다(Chen et al., 2004). 따라서 동결-융해과정에 따른 암석의 풍화 메커니즘과 풍화양상을 예측하는 것은 암 반공학적으로 매우 중요하다. 도로나 철도 등 사회기반 시설 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 기후 조건 - 여름의 아열대성 기후와 겨울의 대륙성 기후 -에 의한 암반 풍화가 암반의 물리 역학적 특성 또는 수 리지질학적 특성을 변화시킬 수 있다는 것이다.

이 연구는 최근 많은 암반공학적 결함이 제기되었던 경상남도 함안군 일대에 분포하는 백악기 퇴적암류 중 물리적 풍화과정에 민감한 이암에 대하여 동결-융해 시험을수행하고 동결-융해 반복 횟수의 증가에 따른 암석의 물리·역학적 특성변화를 파악하는데 연구목적을 두었다.

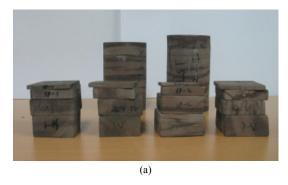
2. 동결-융해 시험

2.1 연구지역 및 시료채취

본 연구지역은 경상남도 함안군 일대로 백악기 육성퇴적층인 함안층이 분포하는 지역이다. 함안층은 1:50,000 지질도 마산도폭(김과 김, 1963), 진동도폭(박과 지, 1963), 의령도폭(최와 김, 1963) 등에서 설정되었으며, 경남 사천에서 대구에 이르기 까지 북동-남서 방향으로 분포되어 있다. 함안층의 하한은 신라역암의 조립내지 중립역질 사암이 끝나고 적색의 이암과 얇은 층의 판상 사암 내지 실트스톤이 협재하기 시작하는 층준이며 상한은 진동층의 암회색 내지 흑색 이암이 나타나기 시작하는 층준이다(소윤환 외, 2007). 함안층의 층후는 진주지역에서 1,300 m, 남지 지역에서 1,400 m 내외 정도에 이르는 것으로 기재되어 있다(엄상호 외, 1983).

연구지역의 퇴적양상은 판상의 사암 내지 미사암이 퇴적된 후 그 위에 적색의 이암이 얇게 덮여 있으며 판상의 사암 내지 미사암에서 평행층리, 사층리, 연흔 등의 퇴적구조가 관찰되고 적색이암에서 연흔, 생흔, 건열등이 관찰된다. 연구지역 인근의 진주지역에서 최근 5년간 동절기(12월~3월) 동안에 동결-융해가 일어날 수있는 일교차(-5℃이하에서 5℃이상)를 보이는 날은 매년 평균 31일 정도로 확인된다.

동결-융해 시험을 위한 암석시료는 적색이암(Fig. 1(a)) 및 회색이암(Fig. 1(b))이며, 층리가 잘 발달되어 있다. 현장에서 채취된 괴상의 암석 및 코어시료를 암상 및 풍화상태에 따라 적색이암 두 그룹(R-1, R-2), 회색이 암 세 그룹(G-1, G-2, G-3)의 총 5개 그룹으로 분류하 고 괴상의 암석은 실내시추기를 이용하여 코어시료를 획득하였다. 동결-융해 사이클에 따른 물성측정용 시료 는 크기와 모양의 변화에 의해 생기는 가능한 효과를 제 거하기 위해 지름 50 mm, 길이 100 mm의 기본 원주형 모양으로 그룹 당 6개 이상씩 제작하였다. 시료의 풍화 등급은 기존에 발표된 분류기준(Dearman, 1974, IAEG, 1979, ISRM, 1981)을 적용하였다. 적색이암 그룹인 R-1, R-2는 둘 다 풍화등급 중 I등급(F)에 해당하며 회 색이암 그룹인 G-1, G-2, G-3은 각각 I등급(F), II등급 (SW), III등급(MW) 이다. 여기서 R-1 및 G-1은 물과 산 침수에 의한 동결-융해 특성을 파악하기 위하여 각 각 R-1-1(물), R-1-2(산) 및 G-1-1(물), G-1-2(산)로 구 분하였다. R-1과 G-1은 각각 물과 산에 의한 동결-융해 시험을 실시하여 물과 산에 따른 물성 변화를 고찰하였 으며 나머지 R-2, G-2, G-3 시료에 대해서는 산을 이용 한 동결-융해 시험을 수행하였다.



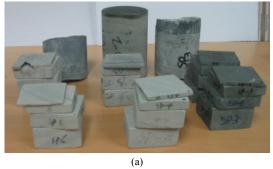


Fig. 1. Photographs of selected sample specimens; (a) red mudstone and (b) gray mudstone

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℃ 아래 위 로의 온도 변화에 의해 얻을 수 있다. 콘크리트에 대한 동결-융해 시험법은 ASTM 규정을 적용하고 있으나 암석에 대해서는 아직 규격화된 동결-융해 시험법이 제정되지 못한 실정이다. 이는 지역마다 기후 조건이 다른 것에 기인하기도 한다. 예로서 영국의 Nicholson 과 Nicholson(2000)은 동결-융해 사이클을 24시간으로 정하여 -18±2℃로 18시간 동안 동결하고 18±2℃로 6시 간 동안 융해하였다. 터키의 Yavuz 외(2006)는 터키표 준시험법에 따라 시편을 증류수에 침수하여 포화시킨 후 -20℃로 2시간 동안 동결, 20℃의 물에 2시간 동안 융해하는 과정을 한 사이클로 정하였다. 본 연구에서는 기존에 국내에서 수행된 강원도 횡성일대 셰일에 대한 동결-융해 시험(장현식 외, 2004)을 참고하여 연구지역 에 적합한 온도 범위와 동결-융해 반복 주기를 설정하 였다.

동결-융해 시험은 암석의 균열이나 공극 내에 물이 충분히 침투되어 있어야 효과적이다. 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. 포화 액으로는 증류수 또는 pH≒2로 희석한 황산용액을 사용하였는데, 황산용액은 산 중에서 풍화에 가장 영향을 많이 미치는 것으로 알려져 있다(장현식 외, 2004). 동결 온도는 연구지역의 최근 10년간동절기 평균기온의 약 3배에 해당하는 -16℃±1℃로 설정하여 풍화가 가속될 수 있는 조건을 부여하였다. 이연구의 동결-융해 사이클은 포화-동결-융해 순서로 이루어져 있다. 진공챔버에서 2시간동안 증류수 또는 묽은 황산용액에 포화된 시료는 플라스틱 랩으로 밀봉된

Table 1. Pre-test sample index properties

Specimen ID	Gs	A (%)	n (%)	Vp (m/sec)
R-1-1	2.72	0.03	0.08	4607
R-1-2	2.71	0.09	0.24	4874
R-2	2.73	0.06	0.15	5100
G-1-1	2.71	0.11	0.29	4527
G-1-2	2.70	0.07	0.20	4776
G-2	2.70	0.12	0.31	4469
G-3	2.69	0.27	0.72	5165

R: red mudstone, G: gray mudstone, Gs: specific gravity, A: absorption ratio, n: effective porosity, Vp: P-wave velocity

후 8시간 동안 냉동기에 보관한 후 상온에서 14시간 동안 융해하였다. 이러한 포화·동결-융해의 한 사이클은 24시간 동안 수행되었다. 시험 시작 후 10사이클 까지는 매 2 사이클마다 비중, 흡수율, 유효공극률, P파속도등의 비파괴 물성을 측정하였으며, 10사이클 이후에는 매 5사이클 마다 측정하는 방식으로 총 55 사이클의 동결-융해 시험이 수행하였다. 각각의 시료 그룹에 대한 시험 전 비파괴 물성이 Table 1에 수록되어 있다.

3. 동결-융해에 따른 물리적 특성 변화

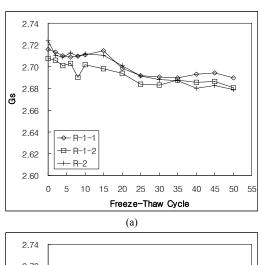
물리적 풍화는 암석의 해체와 물리적 특성의 변화를 수반한다. 따라서 동결-용해 후의 물리적 특성은 무결 암의 물리적 특성과 비교하여 암석의 풍화 정도를 정량 화하는데 이용될 수 있다. 이 연구에서는 동결-용해가 암석의 물리적 특성 변화에 미치는 영향을 파악하기 위하여 실내에서 동결-융해 과정을 반복하면서 비중, 흡수율, 유효공극률, P파속도 등의 물리적 특성을 측정하였다. 각각의 물리적 특성에 대한 측정법은 한국암반공

학회 표준암석시험법(2005, 2006a, 2006b)을 사용하였다. 비중, 흡수율, 공극률의 측정은 아르키메데스의 원리에 기초한 부력 이용 방법을 사용하였는데, 이는 측정 과정이 간편하며 비교적 정확한 결과를 제공하는 장점이 있다. Fig. 2~5는 증류수 또는 산을 이용한 동결융해 시험 결과를 나타낸 것이다.

동결-융해 사이클에 따른 비중의 변화가 Fig. 2에 나타나 있다. 측정된 비중은 적색이암, 회색이암 공히 동결-융해 사이클이 진행함에 따라 지속적으로 감소하는 양상을 보이지만 암석 시료의 초기 상태에 따라 시험 전과 50사이클 이후의 변화가 G-1-2 시료에서 최소 0.02, G-3에서 최대 0.08의 감소로 나타났다. 초기 풍화 등급이 F인 적색이암(R-1-1, R-1-2, R-2)과 회색이암(G-1-1, G-1-2)은 0.02~0.05의 비교적 낮은 감소를 보인다. 반면에 초기 비중이 상대적으로 낮은 회색이암의 G-2(SW)와 G-3(MW)은 각각 0.07, 0.08의 비교적 큰 감소폭을

나타냈다. 이는 동결-융해 과정이 반복됨에 따라 초기 풍화 등급이 높은 암석일수록 비중의 감소가 크게 일어 날 수 있다는 점을 시사한다. 증류수 및 산을 이용하여 동결-융해 시험을 수행한 시료에서는 비중의 감소가 뚜 렷한 차이 없는 양상으로 나타났다. 이는 연구지역의 이암에서 동결-융해의 반복 시 나타나는 비중 변화에 산의 영향이 거의 없음을 지시한다.

흡수율은 광물 입자간의 공극 및 미세균열 등에 의해 흡수되는 모든 수분의 함량을 측정하여 산정된다. 이는 암석의 공학적 특성과 밀접한 관계를 갖기 때문에 풍화정도의 지표로 사용된다. Fig. 3은 동결-융해 사이클과흡수율의 관계를 보여준다. 흡수율은 모든 시료에서 동결-융해가 반복됨에 따라 전체적으로 증가하는 양상을보인다. 특히 15 사이클 이후의 흡수율은 15 사이클 이전에 비하여 급격히 증가함을 관찰할 수 있다. 50 사이클 이후의 흡수율은 초기값보다 F등급의 시료(R-1, R-2,



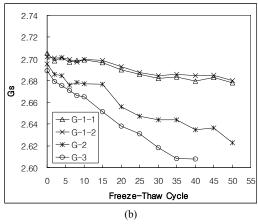
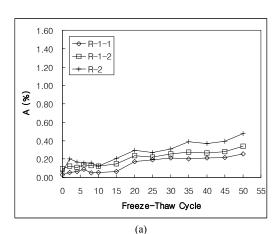


Fig. 2. Specific gravity with respect to freeze-thaw cycles; (a) red mudstone and (b) gray mudstone



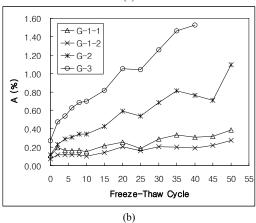


Fig. 3. Absorption with respect to freeze-thaw cycles; (a) red mudstone and (b) gray mudstone

G-1)에서 0.23~0.48%, SW 등급의 시료(G-2)에서 0.98%, MW 등급의 시료(G-3)에서 1.25% 증가한 것으로 측정 되었다. 이에는 초기 풍화 등급이 높은 암석일수록 동 결-융해에 의해 흡수율의 증가가 크게 나타남을 지시한 다. 이와 같은 흡수율의 변화는 동결-융해 과정이 반복 됨에 따라 암석 시료 내의 미세균열 증가 및 입자 경계 의 열림 등에 기인하는 것으로 설명될 수 있다. 또한 시 험 초기 암석 시료의 풍화상태 및 물성에 따라 동결-융 해에 의해 반응하는 정도가 다르게 나타난 것으로 사료 된다. 비중의 변화 양상과 같이 산과 물에 의한 흡수율 의 증가 양상은 고려할 정도의 차이를 보이지 않음을 알 수 있으며 연구지역의 이암에서는 흡수율의 변화에 미치는 산에 영향이 미약하다는 것을 유추할 수 있다. 공극률은 시료 전체의 체적에 대한 공극의 비로 정의 되며 흡수율과 더불어 풍화와 밀접하게 연관되는 물리 적 특성이다. Fig. 4는 연구지역의 이암에 대하여 동결- 용해에 따른 공극률의 변화를 도시한 것이다. 공극률은 흡수율과 비슷한 양상으로 동결-용해가 반복됨에 따라 증가하는 양상을 보인다. 흡수율과 마찬가지로 공극률역시 산에 의한 영향은 관찰되지 않으며 상대적으로 초기 풍화 정도가 높은 G-2와 G-3 시료에서 초기 값보다 각각 2.6%, 3.2%의 비교적으로 높은 공극률 증가가 관찰되었다. 이는 동결-융해의 반복에 의하여 쇄설성 물질 간의 결합력이 약화되고 결빙에 의한 쐐기효과에 의해서 미세균열의 개수 및 크기가 증가하기 때문인 것으로 해석되다.

암석의 P파 속도(탄성파 속도)는 암석내부의 결함이나 공학적 성질의 약화와 관련된 정보를 제공한다. 따라서 P파 속도는 암석의 공학적 풍화지수로서 이용되고 있으며 일반적으로 암석이 치밀·견고하고 신선할수록 P파 속도가 빠른 것으로 알려져 있다. Fig. 5는 동결-융해에 따른 P파 속도의 변화이다. 동결-융해 과정 중에

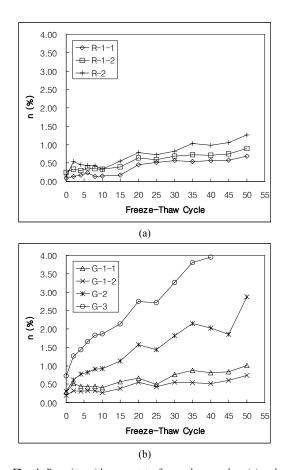
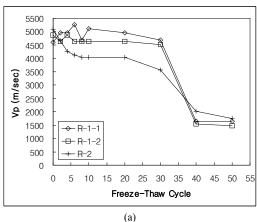


Fig. 4. Porosity with respect to freeze-thaw cycles; (a) red mudstone and (b) gray mudstone



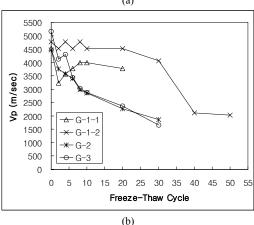


Fig. 5. P-wave velocity with respect to freeze-thaw cycles; (a) red mudstone and (b) gray mudstone

이암의 특성상 층리면을 따라 시료가 여러 조각으로 파 괴되어 측정이 불가한 시료는 측정이 가능한 사이클까 지의 속도값만을 고려하였다. 전체적으로 P파 속도는 동결-융해 사이클이 진행됨에 따라 현저히 감소하는 것 으로 나타났다. 다른 물리적 특성과 비슷하게 P파 속도 에서도 적색이암, 회색이암 공히 산의 영향은 관찰되지 않았다. R-1, R-2, G-1 등의 F등급의 시료는 30사이클 까지 초기 값보다 약 500-1000 m/sec 정도의 비교적 완 만한 감소를 나타내나 이 후 급격히 감소하는 양상을 보 인다. 초기 풍화 정도가 높은 G-2와 G-3의 경우에는 30 사이클 동안 초기 값에서 각각 2600 m/sec, 3500 m/sec 정도의 큰 감소폭을 나타내며 이 후의 동결-융해 사이 클에서는 층리면을 따라 시료가 해체되어 속도측정이 불가하였다. 이와 같은 결과는 P파 속도의 변화가 미세 균열의 급격한 발달과 밀접한 연관성이 있다는 것을 시 사하며 30 사이클 이후 연구지역의 이암 시료 내부에 미세균열이 급격히 확장하고 특히 층리면의 결합력이 약화되는 암석 풍화에 기인한 것으로 판단된다.

4. 미세균열 발현특성

미세균열 스케일에서 파괴에 미치는 암석 결함의 영향은 전통적인 파괴역학이론(Griffith, 1920)으로 오랫동안 논의되어 왔다. 기본적으로 암석의 취성파괴는 암석 내부의 결함에 집중되는 인장응력에 좌우된다. 이암에 있어서 암석 결함은 충리(엽층), 미세 전단변형 구조, 공극, 암상 변화, 광물의 용탈로 인한 미세 공동, 미세균열등을 예로 들 수 있다. 이러한 결함은 암석의 강도를 약화시키며 균열의 확장을 초래한다. McGreevy와 Whalley (1985)는 무결암에 비하여 수분함량이 상대적으로 집중된 미세균열 부근에서 동결에 의한 손상이 크다고 논의하였다. 더불어 미세균열의 확장이 이론적인 파괴압보다 낮은 응력에서 나타난다는 것을 인지하였다.

연구지역 이암의 동결-융해에 따른 미세균열의 발현 양상을 관찰하기 위한 시험편은 각각의 시료 그룹에서 층리면에 평행한 수평 및 층리면을 가로지르는 수직으로 5, 10, 15, 20 mm의 두께 및 4×4 cm 면적의 제원을 갖는 슬랩 형태로 총 48개가 제작되었다. 이와 같은 슬랩 시편의 조합은 이암의 특성 상 초기 결함으로 작용할 수 있는 층리면의 효과와 시편 두께에 의한 치수효과를 고려하기 위함이다. 제작된 슬랩 시편은 표면을 연마한 후 3×3 cm의 프레임을 표시하여 동결-융해 시험에 따른 미세균열 발현양상을 고해상도로 촬영하기 위한 기준으로 설정하였다. 슬랩 시편에 대한 동결-융해 시험은 물성 측정을 위해 제작된 시료와 동시에 수행되

었으며 미세균열의 분포 및 발현 특성을 파악하기 위하여 동결-융해 과정 중 매 10사이클마다 슬랩 시편 표면에 대한 고해상도 디지털화상을 획득하였다. 또한 미세균열의 분포 특성을 분석하기 위해서는 디지털 화상으로부터 미세균열 좌표를 취득하였다. Fig. 6은 G-3 시료로부터 층리면을 가로지르는 수직 방향으로 제작된 두께 15 mm의 슬랩 시편에 대한 동결-융해 전(Fig. 6(a))과 50사이클 후(Fig. 6(b))의 사진이다. 시험 전의 신선한 슬랩 시편은 동결-융해 과정이 반복됨에 따라 기존의균열이나 층리를 중심으로 미세균열이 발현·확장한다. 50사이클 이후에는 미세균열을 따라 부스러진 파편이이탈하거나 모서리 부분이 손상된 것도 관찰할 수 있다.

Fig. 7은 전체 슬랩 시편 중 대표적인 슬랩 시편의 동 결-융해 과정의 반복에 따른 미세균열의 변화 양상이다. 전반적으로 30사이클 이후부터 미세균열 트레이스의 크 기 및 면적밀도가 급격히 증가함을 인지할 수 있다. 이 와 같은 변화는 P파 속도의 변화양상과도 부합하며 P파 속도 변화가 미세균열의 급격한 발달과 밀접한 연관성 이 있다는 것을 시사한다. 미세균열은 주로 층리나 시 편의 자유면(모서리 및 가장 자리)으로부터 발현되고 성장한다. Fig. 7(a), (b)는 시편의 두께만 각각 10 mm, 20 mm로 다를 뿐 나머지 조건, 즉, 암종, 풍화도, 시편 방향 및 포화용액은 일치한다. Fig. 7(b)에 나타난 시편 은 Fig. 7(a)에 나타난 시편에 비하여 두께가 두 배로 증가하였지만 육안으로는 미세균열 분포의 별다른 차 이점을 인지하기 어렵다. 미세균열의 면적밀도와 크기 에서 약간의 차이를 확인할 수도 있지만 이는 시편 두 께에 의한 효과라기보다는 시료 자체의 초기 결함 특성 에 따라 미세균열의 변화양상이 결정되는 것으로 판단 된다. Fig. 7(a), (c)는 각각 물과 산에 의한 시험 결과를 보여준다. 이 역시 고려할만한 정도의 차이를 보이지 않는다고 사료된다. Fig. 7(d), (e)는 초기 풍화도가 상 대적으로 높은 R-3에서 층리에 대한 시편의 방향을 각 각 다르게 제작한 것으로 의미 있는 결과를 나타낸다.

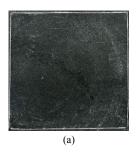




Fig. 6. Photographs of a slap specimen of G-3; (a) pre-test and (b) after 50 cycles of freeze-thaw weathering

여기서는 층리에 수직인 시편에서 미세균열의 크기와 면 적밀도가 우세함을 육안으로도 뚜렷하게 인지할 수 있다. 이 연구에서는 디지털화상으로부터 얻어진 미세균열의 패턴에 대한 기하학적 특성(면적빈도, 크기)의 통계적 모수와 풍화 사이클 간의 상관성을 고찰하기 위해서 미세균열의 밀집도와 크기를 동시에 고려할 수 있는 박스 프랙탈 차원(D_B ; 엄정기 외, 2006)을 적용하여 동결융해 과정의 반복에 따른 미세균열의 발현특성에 대한

정량회를 시도하였다. 미세균열의 밀집도와 길이분포에 따라 다르게 나타날 수 있는 프랙탈 차원을 산정하기 위한 기법으로 박스집계법(box-counting method; Feder, 1988)이 유용하게 사용될 수 있다. Fig. 8에서와 같이 미세균열 트레이스를 포함하는 정사각 면적을 분할하는 박스크기가 r이며, 이때 미세균열의 트레이스를 포함하는 박스 개수가 N(r)이라면, 다음과 같은 관계식이 성립한다.

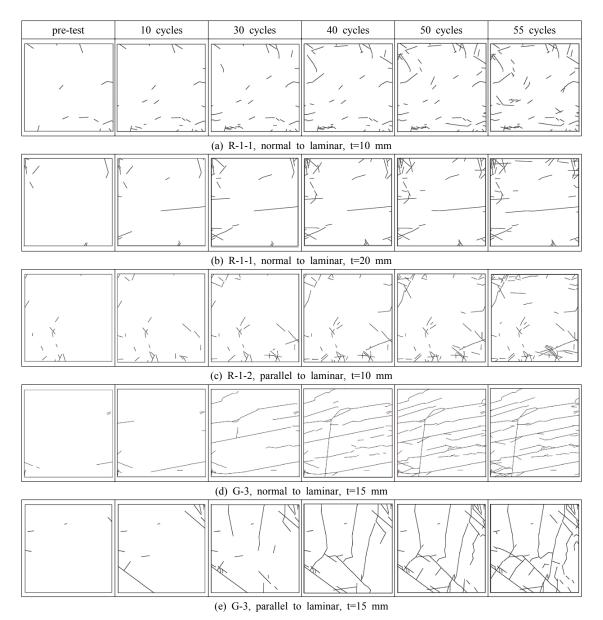


Fig. 7. Selected examples of microfracture distribution on 3×3 cm slab specimens due to freeze-thaw weathering

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

여기서 B는 비례상수이다. 식(1)로부터 ln(N(r)) vs. ln(1/r) 관계를 X-Y 그래프에 도시한 후 선형회귀분석 을 통하여 선형성을 확인하고 D_B를 결정할 수 있다. 각 각의 슬랩에서 D_B 를 산정하기 위한 초기 단계의 박스 크기는 30 × 30 mm를 1/4로 분할한 4개의 15 × 15 mm 박스이며, 다음 두 번째 단계에서는 각각의 박스를 다시 1/4로 분할하여 16개의 7.5 × 7.5 mm 박스 크기 를 고려하였다. 이와 같은 방법으로 최종 7단계까지 단 계별로 미세균열 트레이스를 포함하는 박스 개수를 집 계한 후 ln(N(r)) vs. ln(1/r)의 선형성을 확인하고 D_B 를 산정하였다. 산정된 D_B 의 신뢰도는 ln(N(r)) vs. ln(1/r)의 선형성에 의해 결정되는데, 일반적으로 결정계수 \mathbb{R}^2 값이 0.81 이상일 때 산정된 D_8 의 신뢰가 높다고 볼 수 있다. 이와 같이 산정된 D_B 는 이론적으로 트레이스의 평면밀도와 길이분포에 따라 1에서 2사이의 값을 갖는 다(엄정기 외, 2006). 이 연구에서는 30사이클 이상에 서 산정된 D_B 값에서 높은 신뢰도를 나타냈다. 30 사이 클 미만인 경우에는 미세균열의 발달이 미약한 슬랩 시 편(G-1-1, G-1-2)에서 산정된 DB가 1 미만의 값을 나타 내기도 하는데, 이는 미세균열의 발달이 미약하여 박스 프랙털 차원을 적용하기 위한 조건인 자체유사성 (self-similar)을 만족하지 못하기 때문인 것으로 사료된 다.

Fig. 9는 30사이클 이후 동결-융해 과정에 따라 산정 된 D_B 값을 보여준다. D_B 는 전체적으로 동결-융해 과정 의 반복에 따라 증가한다. 이에는 동결-융해 풍화가 진 행됨에 따라 미세균열의 밀집도 및 크기 등이 증가함을 지시한다. Fig. 9(a)에 도시된 R-1-1의 층리에 평행(H) 으로 제작한 시편에서 산정된 D_B 값은 시편의 두께에

따라 30 사이클에서 $1.0436 \sim 1.1104$, 55 사이클에서 $1.2121 \sim 1.2903$ 범위로 나타났다. 같은 시료의 충리에 수직(V)으로 제작한 시편에서 산정된 D_B 값 (Fig. 9(b)) 은 시편의 두께에 따라 30 사이클에서 $1.0549 \sim 1.1945$, 55 사이클에서 $1.2503 \sim 1.4025$ 범위로 선형적인 증가 양상을 나타냈다. 이와 같이 산정된 D_B 값은 시편 두께에 따라 차이를 보이지만 불규칙한 양상으로 시편의 두께 증가에 따른 D_B 값의 증감 경향을 보이지 않는데, 이는 D_B 값이 시편의 두께보다는 초기 결함에 더 큰 영향을 받기 때문인 것으로 사료된다. 또한, 전체적으로 층리에 수직으로 제작한 시편에서 산정된 D_B 값 보다 높음을 확인할 수 있다. 연구지역의 이암에 발달한 층리는 동결-용해 풍화에 중요한 요소로 작용할 것으로 판단된다.

Fig. 9(c)는 물과 산을 각각 사용한 R-1-1, R-1-2에서 층리면에 수직 또는 평행하게 제작된 시료에서 두께별 로 산정된 D_B 의 평균값을 도시한 것이다. 각각의 시료 그룹에서의 평균 D_B 는 동결-융해 사이클이 증가함에 따 라 선형적인 증가를 보이며 산과 물에 의한 차이는 나 타나지 않는 것으로 판단된다. 또한 층리에 수직으로 제작한 시편의 평균 D_B 는 층리에 평행하게 제작한 시편 의 평균 D_B 보다 크게 나타났다. 이와 같은 D_B 의 변화 양상은 Fig. 9(d)의 회색이암에서도 관찰할 수 있다. 특 히 초기 풍화도가 상대적으로 높은 G-2, G-3은 40 ~ 50 사이클 부근에서 시편이 확장된 균열을 따라 분리되었 으며 이때의 D_B 는 약 1.4 정도로 확인되었다. Fig. 10은 초기 풍화도가 상대적으로 높은 회색이암 시편에서 동 결-융해 사이클의 증가에 따른 미세균열의 발달 양상과 이에 상응하는 산정된 D_B 를 보여준다. 그림에서와 같이 연구지역의 이암에서는 미세균열의 확장에 의한 시편 의 해체가 $D_B = 1.4$ 전후에서 일어남을 알 수 있다. 이는

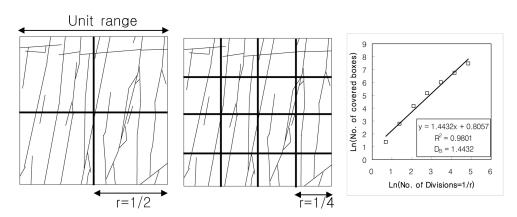


Fig. 8. Illustration of the procedure of the box-counting method using the slab specimen of G-3 after 50 cycles

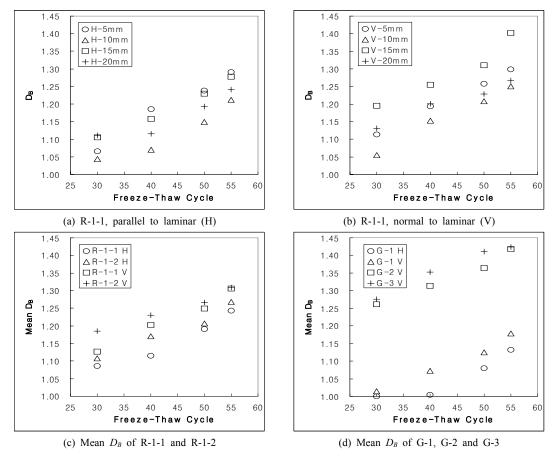


Fig. 9. Plots between estimated D_B and freeze-thaw cycles

연구지역의 이암이 지표에 노출되어 동결-융해가 일정 횟수 이상 반복되면 암석 표면에서 슬레이킹 등의 문제 가 야기될 수 있다는 것을 의미한다.

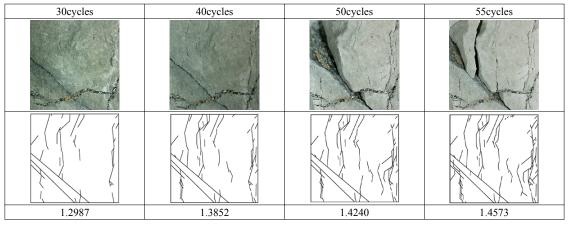
동결-융해 사이클의 증가에 따른 D_B 의 특성은 전절의물리적 특성 결과와도 부합하며 D_B 는 암석내 미세균열의 발현 및 발달 양상을 정량화할 수 있는 파라미터로 유용하게 사용될 수 있다고 사료된다. 또한 D_B 는 이암과 같은 퇴적암에 있어서 중·장기적인 풍화 예측을 위한 새로운 풍화지수로 유용하게 활용될 수 있을 것으로기대된다. 이를 위해서는 표준화된 시험법의 제정이 필요하며 앞으로도 지속적인 후속 연구가 요구된다.

5. 결 론

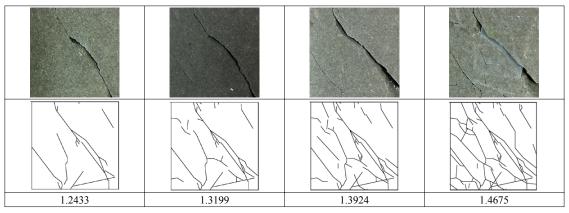
자연계에서 발생하는 풍화에 의한 암석의 특성변화를 예측하는 것은 시간적, 공간적 한계가 있기 때문에 매우 어려운 일이다. 풍화 시험의 목적은 극단적인 자연

환경을 인공적으로 조성하고 풍화를 가속화시켜, 이에 의한 암석의 물리·역학적 특성을 정량적으로 확인하고, 자연계에서 발생하는 풍화에 따른 암석의 특성변화를 예측하기 위함이다. 이 연구는 경상남도 함안군 일대에 분포하는 백악기 퇴적암류 중 물리적 풍화과정에 민감한 이암에 대하여 동결-융해 시험을 수행하고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

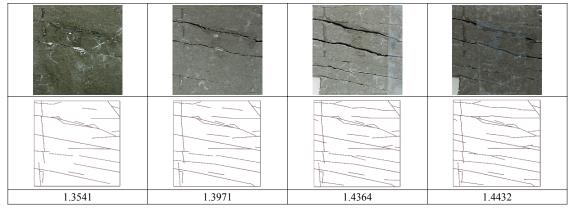
- 1) 동결-융해 과정이 반복됨에 따라 비중, P파 속도는 감소하며 흡수율, 공극률은 증가한다. 시험 전 풍화 가 진전된 암석일수록 물리적 특성의 변화가 크며 동결-융해 풍화에 취약하다.
- 2) 동결-융해에 따른 미세균열 트레이스의 크기 및 면 적밀도는 30사이클 이후부터 급격히 증가한다. 이는 30사이클 이후 급격히 감소한 P파 속도의 특성과도 부합하며 연구지역의 이암 시료 내부에 미세균열이 급격히 밝혔·화장하고 특히 증리면의 결합력이 약



(a) G-2, parallel to laminar, t=15 mm



(b) G-3, parallel to laminar, t=20 mm



(c) G-3, normal to laminar, t=10 mm

Fig. 10. Estimated D_B on selected slab specimens at different freeze-thaw cycles

화되는 암석 풍화에 기인한 것으로 사료된다. 3) 미세균열의 밀집도와 크기를 동시에 고려할 수 있는

박스프랙탈 차원을 적용한 결과 산정된 박스프랙털 는 차원은 동결-융해 풍화에 따른 미세균열 트레이스의

- 변동성을 효과적으로 정량화할 수 있으며 연구지역의 이암은 $D_B = 1.4$ 전후에서 미세균열의 확장에 의한 슬랩 시편의 해체가 일어난다.
- 4) 박스프랙털 차원은 중·장기적인 풍화 예측을 위한 새로운 풍화지수로 유용하게 활용될 수 있다고 판단 되며 이를 위해서는 표준화된 시험법의 제정이 선행 되어야한다.

감사의 글

이 논문은 2006학년도 부경대학교 기성회 학술연구 비에 의하여 연구되었음(PK-2006-075).

참고문헌

- 장현식, 장보안, 이준성, 2004, 강원도 횡성군 풍암분지 백악기 셰일의 동결-융해에 따른 지질공학적 특성 변화, 지질공학회지, 14.4, 401-416.
- 김종환, 김정택, 1963, 한국지질도(1:50,000), 마산도폭 및 설명서, 국립지질조사소, 26p.
- 박노영, 지정만, 1963, 한국지질도(1:50,000), 진동리도 폭 및 설명서, 국립지질조사소, 21p.
- 최유구, 김태열, 1963, 한국지질도(1:50,000), 의령도폭 및 설명서, 국립지질조사소, 7p.
- 5. 소윤환, 백인성, 김현주, 김숙주, 2007, 경남 사천시 신수 도의 함안층(백악기)에 발달된 윤회퇴적층: 산상 및 기원, 지질학회지 14.1, 1-19.
- 6. 엄상호, 최현일, 손진담, 오재호, 곽영훈, 신성천, 윤현수, 1983, 경상분지의 경상누층군에 대한 지질 및 지화학적 연구, 한국동력자원연구소, 126p.
- 한국암반공학회, 2005, 암석의 탄성파속도 측정 표준시 험법, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 15.4, 239-242.
- 한국암반공학회, 2006a, 암석의 공극률 및 밀도 측정 표준시험법, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 16.2, 95-08
- 한국암반공학회, 2006b, 암석의 흡수율 및 비중 측정 표준시험법, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 16.2, 99-101.
- 10. 엄정기, 조태진, 권순진, 2006, 절리암반내 지구조구 설정을 위한 정량적 기준에 대한 연구, 터널과 지하공간(한국 암반공학회지), 16.1, 26-37.
- Reiche, P., 1950, A survey of weathering process and products, University of New Mexico Publications in Geology, 3, University of New Mexica Press.
- Price, D.G., 1995, Weathering and weathering processes, Quarterly Journal of Engineering Geology, 28, 243-252.

- Chorley, R.J., 1969, The role of water in rock disintegration, Introduction to Fluvial Processes, Methuen, 53-73.
- Badger, C.W., A.D. Cummings and R.L. Whitmore, 1956, The desintegration of shales in water, Jour. Inst. Fuel, 29, 417-423.
- Einsele G., K.-H. Heitfeld, C. Lempp and K. Schetelig, 1985, Auflockerung und Verwitterung in der Ingenieurgeologie: Übersicht, Feldansprache, Klassifikation (Verwitterungsprofile) - Einleitender Beitrag. In: Heitfeld, K. -H. (Editor), Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgestein, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, Tokio, 2-23.
- Lempp, C., 1981, Weatherability of overconsolidated pelitic rocks of the Keuper and Jurassic in Southwest Germany, Int. Ass. Eng. Geol. Bull., 23, 101-108.
- Taylor, R.K. and D.A. Spears, 1981, Laboratory investigation of mudrocks, Quarterly Journal of Engineering Geology, 14, 291-309.
- Chen, T.C., M.R. Yeung and N. Mori, 2004, Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action, Cold Region Sci Technol, 38, 127 -136.
- Dearman, W.R., 1974, Weathering classification in the characterization of rock for engineering purposes in British practice, Int. Ass. Eng. Geol. Bull., 9, 33-42.
- IAEG (International Association of Engineering Geology), 1979, Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. Part 1: Rock and soil materials, Int. Ass. Eng. Geol. Bull., 19, 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, 22, 51-60.
- Nicholson, D.T. and F.H. Nicholson, 2000, Physical deterioration of sedimentary rocks subjected to experimental freeze-thaw weathering, Earth Surface Processes and Landforms, 25, 1295-1307.
- Yavuz, H., R. Altindang, S. Sarac, I. Ugur and N. Gengun, 2000, Estimating the index properties of deteriorated carbonate rocks due to freeze-thaw and thermal shock weathering, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43, 767-775.
- Griffith, A.A., 1920, The phenomenon of rupture and flow in solids, Philosophical Transactions Royal Society London Series A, 221, 163-198.
- McGreevy, J.P. and W.B. Whalley, 1985, Rock moisture content and frost weathering under natural and experimental conditions: a comparative discussion, Artic and Alpine Research, 17.3, 337-346.
- 26. Feder, J., 1988, Fractals, Plenum Press, New York, 283p.



엄 정 기

1988년 연세대학교 이과대학 지질학과 이학사

1990년 연세대학교 대학원 지질학과 이학석사

1997년 University of Arizona 자원지질 공학과 공학박사

Tel: 051-629-6559

E-mail: jum@pknu.ac.kr

현재 부경대학교 에너지자원공학과 교수



신 미 경

2007년 부경대학교 환경해양대학 환경 탐사공학과 공학사 2009년 부경대학교 환경해양대학 환경 탐사공학과 공학석사

Tel: 02-3472-2261 E-mail: shinmi@geogeny.biz 현재 (주)지오제니컨설턴트 자원사업부