

## 강원도 횡성군 풍암분지 백악기 셰일의 동결-융해에 따른 지질공학적인 특성 변화

장현식<sup>1)</sup> · 장보안<sup>\*1)</sup> · 이준성<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>강원대학교 지구물리학과

### Variations of Engineering Geological Characteristics of the Cretaceous Shale from the Pungam Sedimentary Basin in Kangwon-do due to Freezing-Thawing.

Hyun-Shic Jang<sup>1)</sup> · Bo-An Jang<sup>\*1)</sup> · Jun-Sung Lee<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Geophysics, Kangwon National University

이 연구에서는 물과 산성용액을 이용한 동결-융해실험을 통하여 강원도 횡성군에서 채취된 셰일의 물리적 특성변화를 측정하였다. 실험에 적용된 동결-융해 온도 범위는  $-20 \pm 2^\circ\text{C} \sim 15 \pm 2^\circ\text{C}$  이고 시료는 12시간 동안 동결한 후 물속에서 8시간 동안 융해시켰다. 이 후 시료를 진공 챔버에서 4시간동안 수침하여 완전히 포화시켰으며, 이러한 일련의 과정을 1 cycle로 설정하였다. 본 연구에서는 매 5 cycle마다 시료의 흡수율, 탄성과 속도, 쇼어 정도, 슬레이크 내구성시험, 일축압축시험 등을 실시하였다.

동결-융해 실험의 반복횟수가 증가될수록 시료의 물성은 변화하였다. 일축압축강도는 물을 이용한 실험에서는 매 cycle마다 0.40MPa정도 감소하였고 산성용액을 이용한 실험에서는 0.48MPa정도 감소하였으며, 탄성계수 역시 물에서 0.21GPa, 산성용액에서 0.30GPa 감소하였다. 흡수율의 경우는 물에서 0.29%, 산성용액에서 0.37% 증가되었다. 이러한 결과는 산성용액에서의 풍화속도가 물에서의 풍화속도보다 빠름을 지시한다. 그러나 탄성과속도, 쇼어경도와 슬레이크 내구성 시험에서는 물과 산성용액에 따른 차이가 거의 나타나지 않았다. 동결-융해 실험 결과와 연구지역의 동절기 기간의 기온분포를 고려해 볼 때 실제 1년이 동결-융해 실험 약 6~12 cycle에 해당될 것으로 추정된다.

**주요어 :** 동결-융해, 셰일, 물리적 특성변화, 물, 산성용액

We have collected shale specimens from the Pungam Basin in Kangwon province and investigated change of physical properties by freezing and thawing in water as well as in acidic fluid. The temperature range was  $-20 \pm 2^\circ\text{C} \sim 15 \pm 2^\circ\text{C}$ . Specimens were frozen for 12 hours and thawed in water for 8 hours. Then, they were saturated in the vacuum chamber for 4 hours to make specimens fully saturated. This procedure was 1 cycle. We have measured absorption, ultrasonic velocity, shore hardness, slake durability and uniaxial compressive strength at every 5th cycles.

The physical properties increased or decreased as freezing and thawing cycles increased. Uniaxial compressive strength decreased by 0.40MPa per cycle in water and by 0.48MPa in acidic fluid. Elastic constant also decreased by 0.21GPa per cycle in water and by 0.30GPa in acidic fluid. Absorption increased by 0.29% and 0.37% per cycle in water and acidic fluid, respectively. These results indicate that decrease in uniaxial compressive strength, elastic constant and absorption by freezing and thawing in acidic fluid is more rapid than in water. Ultrasonic velocities, shore hardness and slake durability show no differences in water and acidic fluid. When we compared our results with the temperatures in the Hongchon during the winter season, 6 ~ 12 cycles may be equivalent to 1 year.

\* Corresponding author : bajang@kangwon.ac.kr

Key word : freezing and thawing, shale, change of physical properties, water, acidic fluid

## 서 론

풍화는 주변 환경의 영향에 의하여 물리·화학적인 변화과정을 거치는 현상으로서 암석이 갖는 독특한 특성중의 하나이다. 암석의 풍화작용을 지배하는 요소로는 기후조건, 지질구조, 암석의 광물조성과 조직, 그리고 시간 등이 있으며, 풍화가 진행됨에 따라 암석은 물리적, 역학적 특성이 변화되어 지질공학적 안정성이 저하된다. Table 1은 암석의 풍화를 유발시키는 여러 가지 요소들을 나타낸 것이며, 이 중에서 풍화의 주된 요소로는 대기의 영향, 물의 영향, 온도의 영향 등을 들 수 있다. 대기 중 암석풍화에 주된 영향을 주는 성분은 이산화탄소, 질소, 산소, 황산염 등이 있으며 이들은 산성비의 원인이 된다. 특히 황산염은 대부분의 암석에 가장 강력한 부식제로 작용한다. 또한 대부분의 암석은 물의 영향으로 침수와 건조과정을 반복할 경우 점진적으로 광물입자간의 결합력이 약화되어 부스러지거나 균열이 발생되고, 이 균열에 물이 침투하여 결빙되면 부피팽창으로 인한 균열 내 인장력에 의해 균열이 더욱 더 크게 확장되거나 새로운 균열이 발생하게 되어 풍화가 더욱 더 진행되게 된다. 특히 우리나라는 계절의 변화가 뚜렷하여 동결·융해과정에 따른 암반의 풍화가 상대적으로 많이 나타나고 있으며 환경오염에 따른 산성물질의 영향도 점점 커지고 있는 실정이다. 따라서 동결·융해과정에 따른 암석의 풍화 메커니즘과 풍화양상을 예측하는 것은 지질공학적으로 매우 중요하다. 그러나 실제 자연환경에서 발생하는 풍화는 오랜 시간에 걸쳐 서서히 발생되므로 암석의 특성 변화를 쉽게 알아낼 수 없고 자연상태의 풍화작용을 측정하기 위해서는 공간적이나 시간적인 제약이 많으므로, 암석의 풍화 메커니즘을 분석하기 위해서는 극단적인 환경의 조성과 속도를 조절하여 풍화를 진행시키는 인공풍화실험이 필요하다.

동결·융해를 통한 인공풍화실험에서 온도의 범위 설정, 지속시간 및 암석의 포화상태 유무 등이 중요한 요소이다. 암석에 대한 동결·융해의 온도범위 및 주기는 시험의 목적에 따라 각기 다르게 나타나고 있으나, 온도의 범위와 시간은 암석 내에 존재하는 물이 충분히 동결과 융해가 일어나고 지속될 수 있도록 설정되어야 한다. 또한 동결될 때에는 팽창하는 물의 부피

의 의해 암석에 압력을 가하게 되어 미세균열이 생성되고, 그로 인해 파괴가 일어나기 때문에 암석의 함수비가 중요한 요소 중의 하나이다. 일본토질공학회(1989)는 시료 내부에서 확실히 동결·융해가 발생해야 하고 실험이 반복될 때 온도조건이 일정하게 되도록 해야 한다고 하였다. Bortz et al.(1993)은 자연상태에서 풍화를 받은 암석과 실내에서 인공적인 풍화를 받은 암석(석회암, 화강암, 대리암)과의 상관관계를 제시하였으며, 대리암의 경우는 12~16번 정도의 Cycle이 대체로 자연풍화의 1년과 동등하다고 보고 하였으며, 화강암의 구성물질의 변화는 300회, 대리암은 500회, 석회암은 200회 이후에 나타난다고 발표하였다. Bortz and Wonneberger(1995)는 얇은 석판의 내구성을 결정하기 위해서 인공적인 풍화실험을 하여 석회암, 화강암, 대리암의 수명을 결정하였다. Park(1996)은 바닷가에 위치한 풍화암 시료의 인장강도 변화를 실험을 통해 살펴본 결과 강도의 저하가 있음을 발표하였다. Hale and Shakoор(1998)은 여섯 종류의 사암들에 대해 가열과 냉각, 수침 및 건조, 동결 및 융해 실험을 통해서, 4~6% 사이의 공극률 값을 갖고 있는 사암에서 특히 일축압축강도의 저하가 심하고, 높은 공극률과 큰 공극을 가진 사암들은 동결·융해의 영향이 미약하다고 발표하였다. 김성수와 박형동(1999)은 석재의 풍화에 대한 영향을 실험하고자 동결·융해 반복 실험, 산성용액 침수실험, 염분의 결정화 실험을 통한 물성의 변화 연구를 실시하여, 상대적으로 동결·융해 반복실험과 산성용액 침수실험보다 염분의 결정화 실험에서 더 큰 석재 물성의 변화가 관찰되었음을 발표하였다. 광진철과 백환조(2000)는 편마암의 풍화현상에 관한 연구로 풍화등급별로 채취한 시료들에 대하여 광물암석학적 및 공학적인 특성의 변화를 조사하였으며, 인공풍화실험을 통하여 편마암 물성의 변화를 조사하고, 화학분석 결과로부터 풍화지수를 구하였다. 또한, 신선한 암괴시료에 대한 인공풍화실험 결과에 의하면, 편마암은 특히 산침수의 영향에 의한 물성의 변화를 뚜렷하게 보여주며, 동결·융해나 염에 의한 풍화에는 비교적 저항성이 크다는 것을 보였다. 京谷孝史 et al.(2000)는 일본의 동북부 지역에 존재하는 다공질연암으로 동결·융해실험을 하였고 수분의 증발을 막기 위해 랩(wrap)을 싸서 실험을 하였다. Nicholson and Nicholson(2000)는 10종류의 퇴적암에

Table 3. Various weathering agents of stone.

Classification	Weathering Agents	Effects
atmosphere	carbon dioxide carbon monoxide ozone, sulfates SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> chloride, nitrate	chemical weathering by acid rain
solar radiation	ultraviolet radiation visible spectrum infrared	greenhouse effect disintegration of organic consolidants and sealers
temperature	repeated fluctuation fire	cracking
water	relative humidity groundwater rainwater, sea water	cracking
salt	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O (gypsum) Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , MgSO <sub>4</sub> NaCl, K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> et al.	efflorescence cracking
biological	plant animal	mechanical action chemical action

대한 동결융해실험을 하여 강도 저하가 나타남을 제시하였다. 그러나 기존의 연구에서는 동결·융해 시 물의 증발을 고려하지 않고 단순히 시료를 침수만 시켰으므로 시료 내에 포화 상태를 파악할 수 없었다.

본 연구에서는 암석시료가 물과 산성용액에 항상 포화되도록 하여 동결·융해를 반복적으로 실시하고 일정 간격의 반복 횟수마다 강도시험 및 비파괴 시험을 실시하여 암석시료의 물리적, 역학적 특성의 변화 양상을 파악하고 자연현상과의 상관성을 유추하는데 연구의 목적을 두었다.

## 연구지역 및 시료채취

### 연구지역

풍암분지는 강원도 홍천군과 횡성군 일부에 걸쳐 분포하는 백악기 육성 퇴적 분지로서 한반도 남부에 넓게 분포하는 여러 개의 크고 작은 백악기 퇴적분지와 대비되는 비교적 작은 규모의 분지이다(Fig. 1). 현재의 퇴적분지 규모는 전체적으로는 북동-남서 방향의 면적 7×20km<sup>2</sup>, 두께 약 300~500m이나 중간에 화산암에 의해 크게 관입된 양상이어서 실제 퇴적암의 분포면적은 이보다 훨씬 작은 편이다. 풍암분지의 백악기 퇴

적암층은 북서쪽에서 단층 접촉에 의해 선캠브리아기의 흑운모 편마암, 호상 편마암과 접하고 기반암인 주라기 화강암을 피복하고 있다. 퇴적암층의 암상은 장석 사암, 자색의 사암과 이암 또는 실트스톤, 역암이 주를 이루며 퇴적 동시와 후기에 안산암에 의해 넓게 관입당한 양상을 보인다.

### 시료채취 및 시험편 제작

인공풍화실험을 위한 암석시료는 풍암분지내에 있는 강원도 횡성군 공근면 청곡리 1번지에서 채취한 적갈색 세일이며, 세일은 층리가 잘 발달되어서 성층면을 따라 쪼개지는 성질이 있고 풍화에 취약하므로 실험 대상으로 적합하여 선택되었다. 대부분의 시료는 Lee and de Freitas (1989) 등이 제시한 풍화등급 중 II 등급(Slightly weathered)과 III등급(Moderately weathered)에서 채취하였으나, III 등급의 암괴에서는 시료 성형이 불가능하여 II 등급의 암괴에서 성형된 시료만이 실험에 사용되었다.

인공풍화실험을 위해 채취된 괴상 암석으로부터 실내 시추기를 사용하여 원주형 시험편을 획득한 후, 일축압축시험용 시편 52개, 슬레이크 내구성(Slake durability) 시험용 시편 100개, 탄성파속도 측정용으로

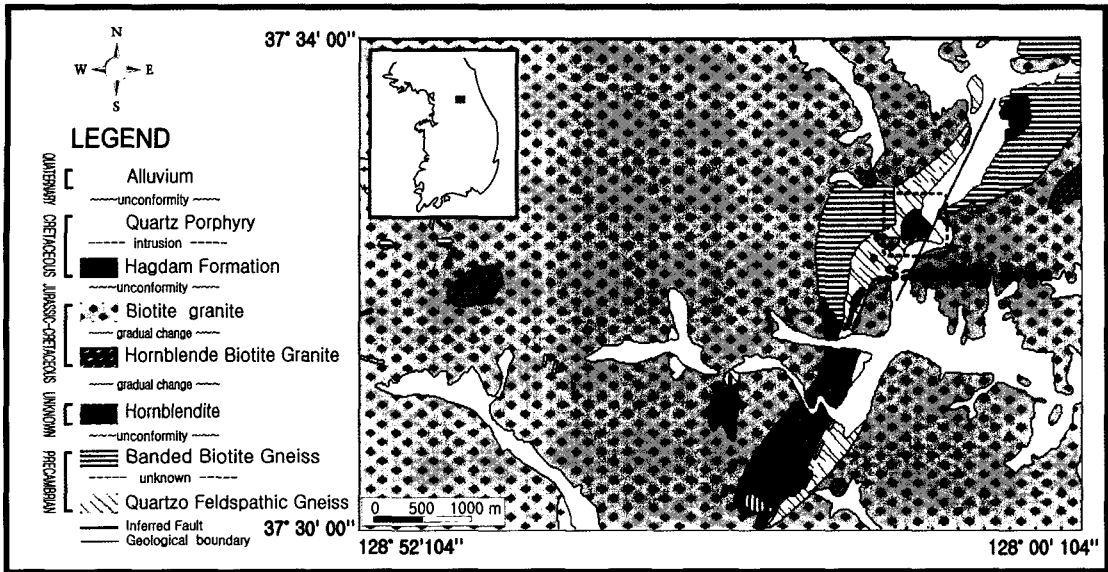


Fig. 1. Geologic and index maps of the study area

직경 55mm, 높이 110, 90, 70, 50mm의 시편 각각 4개씩을 제작하였다. 일축압축강도시험용 시료와 탄성과 속도 측정 시료는 표면 연삭기(KSA500-HA, 유압반자동식)를 이용하여 편평도의 오차가 0.02mm 이하가 되도록 성형하였다(ISRM, 1981).

물을 이용한 동결-융해 시험에 사용되는 시험편은 일축압축시험편 26개, 슬라이크 내구성 시험편 50개, 탄성과속도 측정 시험편은 길이에 따라 2개씩이며, 황산수용액을 이용한 동결-융해 시험에서도 동일한 개수로 실험을 실시하였다.

### 인공풍화실험

자연계에 존재하는 암석은 여러 가지 요인들에 의해 풍화작용을 받게 되어 신선한 암석에 비교하여 물리적, 역학적 특성이 저하된다. 자연계에서 발생하는 풍화에 따른 암석의 특성 변화를 측정하는 것은 공간적이나 시간적인 한계가 있기 때문에, 암석을 인공적으로 풍화시켜 풍화에 따른 암석의 물리적, 역학적 특성 변화를 추적하는 실험이 이루어지고 있으며, 이러한 실험을 인공풍화실험이라 한다. 인공풍화실험에는 극단적인 환경을 인공적으로 조성하여 풍화를 가속화시켜, 풍화에 따른 암석의 물리적, 역학적 특성을 정량적으로 확인하고, 자연계에서 발생하는 풍화에 따른 암석의 특성 변화를 예측한다. 실제 자연환경

에서 발생하는 풍화는 여러 가지 요인이 복합적으로 작용하고 있으나, 인공풍화실험에서는 모든 요인을 고려하기는 매우 어려운 것이 현실이다. 그러므로 인공풍화 실험에서는 풍화에 가장 큰 영향을 미치는 몇 가지의 요인을 선택하여 실시하게 되며, 각각의 요인에 대하여 자연계에서 발생하는 현상보다 극단적인 환경을 조성하여 풍화를 진행시키는 것이 일반적이다. 자연계에서 암석에 풍화를 발생시키는 요인으로는 공극이나 균열 내에서 물의 동결-융해, 산성비, 염의 결정화 작용, 온도의 상승 및 냉각에 따른 암석 구성 물질의 팽창률 차이, 바람, 침수와 건조 등이 있으나, 우리나라에서는 물의 동결-융해와 산성비에 의한 풍화가 가장 큰 요인이므로 이 연구에서는 포화된 암석의 동결-융해에 의한 풍화와 산성 용액에 의한 풍화를 대상으로 하여 인공풍화실험을 실시하였다.

### 동결-융해 실험(Freezing-thawing Test)

콘크리트에 대한 동결-융해에 대한 시험법은 ASTM C-666, JIS A 6204등에 나와 있으며 ASTM에서 제안된 시험방법의 최저, 최고 온도는  $-17.8 \pm 1.7^{\circ}\text{C} \sim 4.4 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$ 로 규정하고 있다. 그러나 암석에 대해서는 아직 규격화된 시험법은 없으나 일본토질공학회(1989), Nicholson and Nicholson(2000), 김성수와 박형동(1999), 박진철과 백환조(2000) 등에서  $-20^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ 의

온도 범위에서 동결-융해 실험을 실시하였다. 그러나 Bortz et al(1993), Bortz and Wonneberger (1995) 등의 시험법에서는  $-22^{\circ}\text{C} \sim 77^{\circ}\text{C}$  범위에서, Park(1996)은  $-10^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$  범위에서, 京谷孝史 et al.(2000)은  $-15^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$  범위에서 동결-융해 실험을 실시하였다. 이 연구에서는 연구지역(홍천)의 최근 10년간의 동결기(12~2월) 기온을 분석한 결과 최저기온은  $-20.5^{\circ}\text{C}$ , 최고기온은  $14.7^{\circ}\text{C}$ 이었으며, 이를 감안하여 동결-융해 실험의 온도 범위를  $-20 \pm 2^{\circ}\text{C} \sim 15 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 로 설정하였다.

동결-융해 실험에서 암석의 포화도는 중요한 요소로, 암석의 균열이나 공극속의 물이 동결될 때 부피 팽창으로 인하여 균열이 확장되고 미세균열이 추가로 발생하는 등의 풍화현상이 발생되기 때문에 포화도가 높을수록 풍화발생정도가 크다. 따라서 동결-융해에 의한 인공풍화실험에서는 암석의 균열이나 공극 내에 물이 충분히 침투되어 있어야 효과적인 실험을 실시할 수 있다. 위의 실험 중에서 일본토질공학회(1989), 김성수와 박형동(1999), 곽진철과 백환조(2000), Nicholson and Nicholson(2000) 등은 동결 후 융해 시 물을 보충하지 않았으므로, 몇 번의 동결-융해 실험을 실시하면 공극이나 균열이 확장되고, 또한 물이 증발하기 때문에 공극이나 균열은 포화되지 않는다. 또한 Bortz et al.(1993), Bortz and Wonneberger (1995), Park(1996), 京谷孝史 et al.(2000)의 실험에서는 단순히 시료를 침수만 시켰으므로, 시료가 포화되었다고 볼 수 없다. 따라서 이 연구에서는 시료가 항상 포화된 상태에서 동결 및 융해에 의한 암석의 풍화를 측정하고자 융해 후 진공 챔버(vacuum chamber)를 이용한 수침을 실시하여 시료를 완전포화 시켰다. 시료의 포화정도를 측정하기 위하여 예비실험을 실시한 결과, 시료는 완전 건조상태에서 4시간 정도 포화를 시키면 약 80% 정도 포화되었다. 그러므로 동결을 거친 모든 시료에 대하여 융해 시 진공 챔버를 이용한 수침을 약 4시간 정도 실시하였고 동결 시에도 물이 증발되므로 수침 후 모든 시료에 대하여 랩(wrap)을 이용하여 밀봉한 후 동결시켰다.

김성수와 박형동(1999) 및 일본토질공학회(1989)의 실험에서는 동결시간을 3시간으로 설정하였으나, 이 연구에서 사용된 냉동고에서 예비 실험을 실시한 결과, 시료의 온도는 9시간 후에  $-20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 의 온도를 유지하였으며, 융해 시에도 9시간 후에  $15 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 의 온도를 유지하였다. 그러므로 이 연구에서는 약 12시간을 동결 및 융해 시간으로 설정하였다.

실험의 과정은 다음과 같다. 먼저 24시간 동안 완전

침수를 시킨 시료를 랩으로 밀봉한 다음  $-20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 에서 12시간 동안 동결시켰다. 동결된 시료는  $15 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 의 물속에 8시간 동안 융해되며, 융해된 시료를 진공 챔버를 이용하여 4시간 동안 포화시켰다. 이 과정이 동결-융해의 1 cycle이다. 또한 5 cycle마다 포화 중량을 측정정한 후,  $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 에서 12시간 동안 완전건조 시켜 비파괴 시험인 흡수율, 탄성파 속도, Shore 경도, 슬레이크 내구성 시험과 파괴 시험인 일축압축시험을 통해 시료의 물리-역학적 특성 변화를 분석하였다(Fig. 2). 이러한 과정은 50 cycle까지는 5 cycle마다 실시를 하였으며, 51 cycle부터 80 cycle까지는 10 cycle마다 실시하였다. 50 cycle 이후에서 10 cycle로 시험을 실시한 이유는 30~50 cycle 이후에는 변화가 매우 적기 때문이다(Bortz and Wonneberger, 1995).

## 산 침수 동결-융해 실험

산(acid) 침수 동결-융해 실험에는 산 중에서 풍화에 가장 영향을 많이 미치는 황산을 사용하였다. 산의 농도는 실제 빗물보다 다소 강한 산을 사용하는 것이 일반적이고(Jefferson, 1993; Shoichi et al., 1994), 이는 짧은 시간에 충분한 풍화가 발생하도록 하기 위함이다. 본 연구에서는 황산용액(95%  $\text{H}_2\text{SO}_4$ )을 약 1000배 희석하여 pH=1.9로 하여 실험을 하였으며, 실험 방법은 물을 이용한 실험방법과 같다.

## 실험 결과

### 물성 및 일축압축강도

동결-융해 실험에 사용된 시료는 동일한 지역의 암석블럭에서 채취된 코아 시료이고 균열이 많거나 다른 광물이 포함되어 있는 시료는 시험에서 배제하였다. 또한 불확실 요소의 개입을 최소화하기 위하여 한 번의 파괴 시험을 할 때 2개의 시료로 실험을 하여 평균값을 취했다. Table 2와 Fig. 3~5는 물과 산을 이용한 동결-융해 실험 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 3은 물과 산에 의한 동결-융해 횟수와 일축압축강도의 관계를 보여준다. 물을 이용한 실험에서 일축압축강도는 20 cycle 시료에서 최대  $74.2\text{MPa}$ 이고 45 cycle 시료에서 최소  $30.3\text{MPa}$ 을 보여주고 있으며, 동결-융해가 진행됨에 따라 일축압축강도는 전반적으로

감소하는 경향을 보이거나 상당히 분산된 형태를 보인다. 선형회기분석 결과, 동결·융해 횟수에 따른 일축압축강도는(UCS)  $UCS = 65.2 - 0.40 \times \text{cycle}$ (상관도 56.1%)의 관계를 보여 동결·융해 1 cycle마다 0.40MPa 줄어드는 경향을 보이고 있다. 산을 이용한 실험에서 일축압축강도는 15 cycle 시료에서 최대 76.6MPa이고 45 cycle 시료에서 최소 33.7MPa를 보여주며, 동결·융해가 진행됨에 따라 일축압축강도는 전반적으로 감소하는 경향을 보이거나 분산된 형태를 보인다. 동결·융해 cycle과 일축압축강도의 관계는  $UCS = 68.3 - 0.43 \times \text{cycle}$ (상관도 64.8%)을 보여 동결·융해 1 cycle마다 0.43MPa 줄어드는 경향을 보이고 있다.

Fig. 4는 물과 산에 의한 동결·융해 cycle과 탄성계수의 관계를 보여준다. 탄성계수는 물의 경우 5 cycle 시료에서 최대 45.2GPa이고 35 cycle 시료에서 최소 12.6GPa를 보여준다. 전반적으로 분산된 형태를 가지나 cycle이 진행됨에 따라 탄성계수(E)는 감소하는 경향을 보이며, 선형회기분석 결과 동결·융해 cycle과 탄성계수는  $E = 39.3 - 0.21 \times \text{cycle}$ (상관도 53.5%)의 관계를 보여 동결·융해 1 cycle마다 0.21GPa 줄어드는 경향을 보이고 있다. 산의 경우는 10 cycle 시료에서 최대 39.1GPa이고 30 cycle 시료에서 최소 20.9GPa를 보여준다. 산의 경우도 탄성계수의 분포가 분산된 형태를 가지나 cycle이 진행됨에 따라 감소하는 경향을 보이

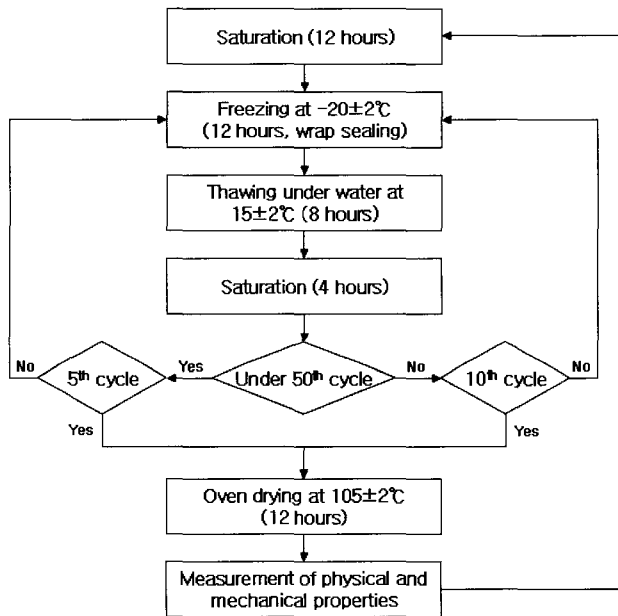


Fig. 2. Procedure of freezing and thawing test.

Table 4. Variation of rock strength and physical properties due to Freezing-Thawing test

Test type		variation per cycle	R (%)
Uniaxial compressive strength (UCS)	water	- 0.40 MPa	56.1
	acidic fluid	- 0.43 MPa	64.8
Young's Modulus (E)	water	- 0.21 GPa	53.5
	acidic fluid	- 0.22 GPa	48.1
Absorption (Abs.)	water	+ 0.29 %	75.6
	acidic fluid	+ 0.37 %	87.2

고 있다. 산에 의한 동결-융해 cycle과 탄성계수의 관계를 선형회기 분석한 결과,  $E = 36.3 - 0.22 \times \text{cycle}$ (상관도 48.1%)의 관계를 보여 동결-융해 1 cycle마다 0.22GPa 줄어드는 경향을 보이고 있다.

Fig. 5는 물과 산에 의한 동결-융해 cycle과 흡수율(Abs) 변화량의 관계를 나타낸 것이다. 물을 이용한 동결-융해 시험에서는 동결-융해 cycle과 흡수율 변화량이  $Abs = V_0 + 0.29 \times \text{cycle}$ (상관도 75.6%)의 관계를 보여, 동결-융해 1 cycle마다 0.29% 늘어나는 경향을 보이고 있다. 또한 가장 변화가 없는 시료의 경우 동결-융해 cycle과 흡수율 변화량이  $Abs = V_0 + 0.13 \times \text{cycle}$ (상관도 92.7%)의 관계를 보였고, 가장 변화가 큰 시료는  $Abs = V_0 + 0.40 \times \text{cycle}$ (상관도 94.6%)의 관계를 보였다. 산을 이용한 동결-융해 시험에서는 동결-융해 cycle과 흡수율 변화량이  $Abs = V_0 + 0.37 \times \text{cycle}$ (상관도 87.2%)의 관계를 보여, 동결-융해 1 cycle마다 0.37% 늘어나는 경향을 보이고 있다. 또한 가장 변화가 없는 시료의 경우 동결-융해 cycle과 흡수율 변화량이  $Abs = V_0 + 0.23 \times \text{cycle}$ (상관도 94.1%)의 관계를 보였고, 가장 변화가 큰 시료는  $Abs = V_0 + 0.60 \times \text{cycle}$ (상관도 97.8%)의 관계를 보였다. 동결-융해 실험에서 동결-융해 횟수에 따른 흡수율의 변화양상을 살펴보면, 흡수율의 변화가 거의 없다가 특정 cycle에서 갑자기 증가하는 양상을 볼 수 있다. 즉, 흡수율은 선형적이 아닌 계단식의 증가 양상을 보이며, 이는 특정 cycle에서 갑자기 균열이 발생되었기 때문인 것으로 판단된다. 또한 이러한 결과를 통해 불 대 동결-융해 과정이 진행됨에 따라 시료내부에서 발생하는 균열은 점진적으로 발생하기 보다는 특정 cycle에서 갑자기 많은 량, 또는 큰 규모의 균열이 발생하는 것으로 판단된다.

위에 나타난 여러 가지 관계식과 상관도를 살펴보면 일축압축강도와 탄성계수는 전반적으로 분산된 형태를 보이거나 흡수율의 경우는 동결-융해 cycle과 75% 이상의 비교적 높은 상관관계를 보임을 알 수 있다. 이 같이 파괴시험을 통해 얻어진 일축압축강도와 탄성계수가 전반적으로 분산된 형태를 보이는 이유는 파괴시험에 사용된 시료가 각 동결-융해 cycle 마다 다르기 때문이다. 즉, 각 시료 내에 발달한 미세균열이나 절리 분포양상 등의 시료의 초기 역학적 특성에 차이가 있기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 동결-융해 실험을 통해 풍화정도를 분석하기 위해서는 동결-융해 cycle 마다 다른 시료를 사용해야하는 파괴시험보다는 동일한 시료를 이용할 수 있는 비파괴 시험을 이용하는 것이 효과적인 것으로 판단된다.

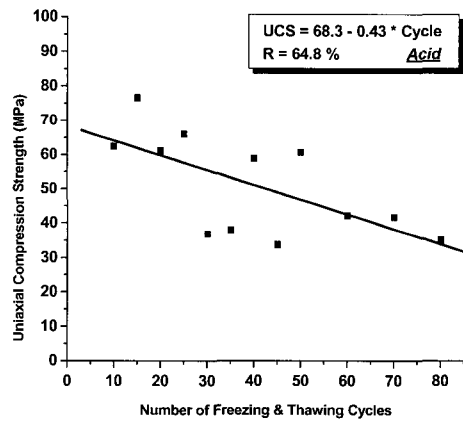
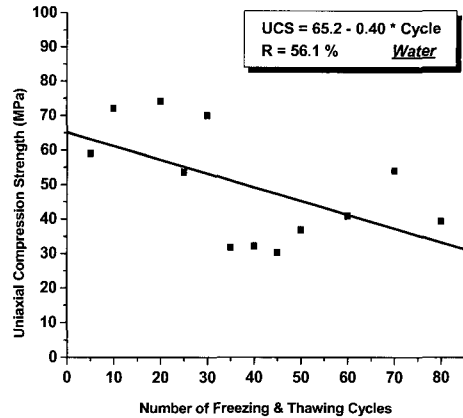


Fig. 3. Uniaxial compressive strength with freezing-thawing cycles

탄성파 속도 (P-wave)

암석의 물성에 관한 정보로서 탄성파속도는 중요한 요소 중 하나이다. 탄성파속도는 암석 입자 자체의 성질과 내부의 불연속면 분포 및 입자 결합상태를 간접적으로 반영하므로, 물질의 변형특성은 물질 내부로 전파되는 초음파 속도에 의해 결정될 수 있다(Kolsky H., 1953).

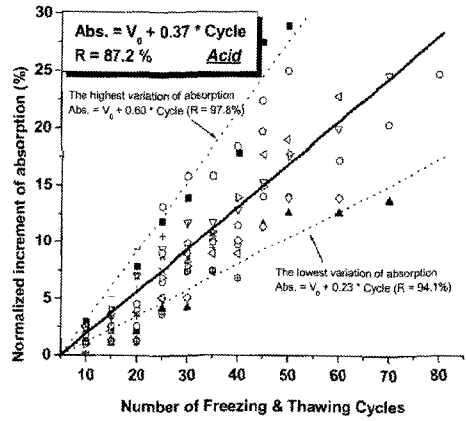
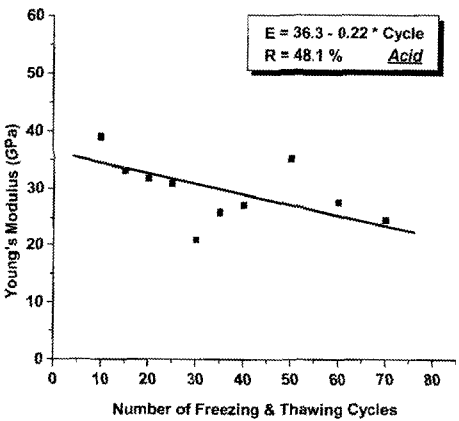
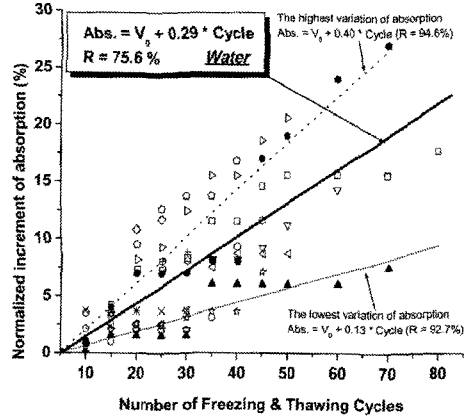
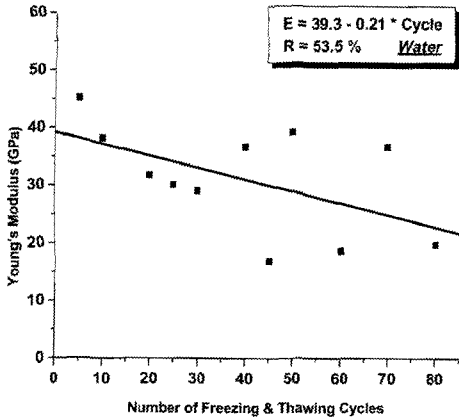


Fig. 4. Young's Modulus with freezing-thawing cycles.

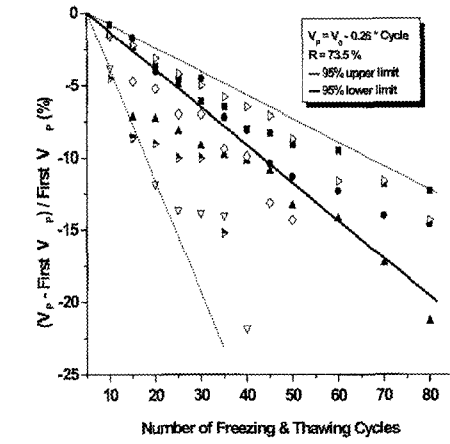
Fig. 5. Absorption with freezing-thawing cycles. The same symbols represent absorptions measured from the same specimen.

탄성과 속도 분석은 기존의 아날로그 방식이 아닌 디지털 방식을 통해 수행되었다. 일련의 자료 처리 과정을 거친 디지털 방식 자료는 초음파 전파 속도를 정밀하게 분석하는데 결정적인 역할을 할 수 있음이 확인되었고, 복수 시료를 이용한 거리 변화에 따른 파의 지연 시간 변화를 이용한 속도 산정 방식이 단일 시료 길이와 전파 시간을 이용한 기존 속도 산정 방식보다 더욱 정밀한 값을 보여주는 것으로 판명되었다(오선환 외, 2000). 따라서 이 실험에서 실시된 탄성과 속도 측정 역시 여러 개의 시료를 이용해 거리 변화에 따른

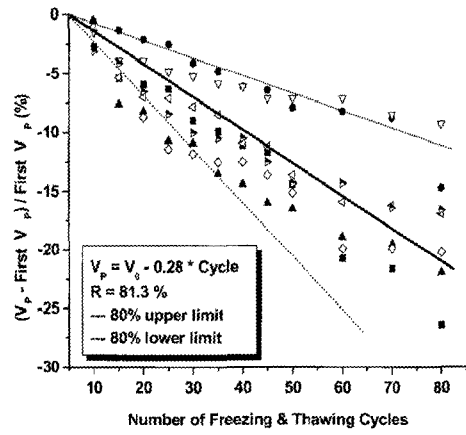
탄성과의 지연시간 변화를 분석하여 속도를 산정하는 방식으로 측정하였다. 속도측정에 사용된 시료는 길이가 50, 70, 90, 110mm인 시료로 각 2개씩 성형하였으며, 동결-융해 5 cycle마다 포화 및 건조상태에서 속도를 측정하였고 50 cycle 이후에는 10 cycle 간격으로 80 cycle까지 측정하였다. 속도 측정은 매번 동일한 시료를 대상으로 실시하였으며, 암석의 불균질성이 의한 영향을 최소화 하기 위하여 2개의 시료에서 측정한 값의 평균을 사용하였다.

Fig. 6과 Table 3, 4, 5는 물을 이용한 동결-융해 후 측정된 탄성과속도의 변화량을 나타내

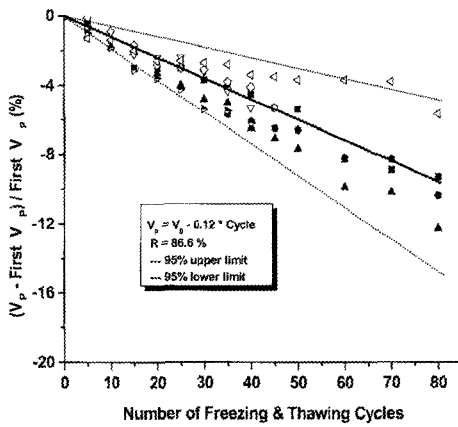




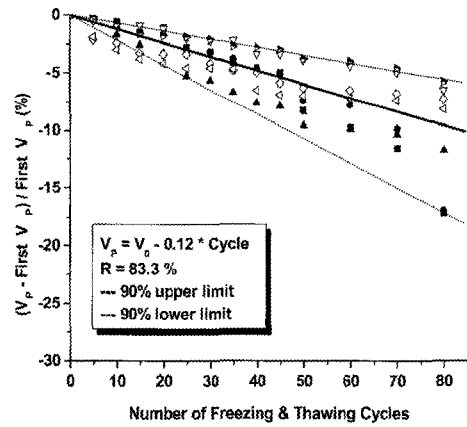
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 6. P-wave velocities with freezing-thawing cycles in fresh water (a) dry samples. (b) saturated samples. The same symbols represent P-wave velocity measured from the same specimen.

Fig. 7. P-wave velocities with freezing-thawing cycles in acid (a) dry samples. (b) saturated samples. The same symbols represent P-wave velocity measured from the same specimen.

이다. (a)는 건조상태의 탄성파속도의 변화량 곡선으로서, 탄성파 속도는 최대 4532m/sec에서 최소 3398m/sec의 범위를 보여주고 있다. 전반적으로 동결-융해가 진행됨에 따라 탄성파 속도는 지속적인 감소 경향을 보이며, 동결-융해 cycle에 따른 탄성파 속도의 변화율은  $V_{p-dry(water)} = V_0 - 0.26 \times \text{cycle}$  (상관도 73.5%)의 관계를 보여 동결-융해 1 cycle 마다 최초 측정된 속도에서 0.26% 줄어들고 있음을 알 수 있다. (b)

는 포화상태의 탄성파속도의 변화량을 나타낸 그림으로서 탄성파 속도는 최대 4993m/sec에서 최소 4110m/sec의 범위를 보여주고 있다. 포화상태에서도 동결-융해가 진행됨에 따라 탄성파 속도는 지속적인 감소 경향을 보이며, 선형회기분석 결과, 동결-융해 cycle과 탄성파 속도의 변화율은  $V_{p-sat(water)} = V_0 - 0.12 \times \text{cycle}$  (상관도 86.6%)의 관계를 보여 동결-융해 1 cycle 마다 최초 측정된 속도에서 0.12% 줄어들고 있음을 알

**Table 3.** P-wave velocities per freezing-thawing cycles in water.

(unit : m/s)

Cycle \ Sample ID	water-1		water-2		water-3		water-4		water-5		water-6	
	dry	sat.	dry	sat.	dry	sat.	dry	sat.	dry	sat.	dry	sat.
0	4169	4762	4378	4587	4318	4934	4352	4854	4395	4759	4532	4619
5	4169	4748	4378	-	4318	4899	4352	4820	4395	4754	4532	4559
10	4136	-	4312	-	-	4845	4187	4805	4325	4716	4464	4554
15	4073	4619	4304	-	4007	4830	3978	4747	4188	4678	4432	4527
20	4015	4619	4203	-	4003	4771	3838	4738	4166	4626	4392	4499
25	3965	4619	4181	-	3964	4737	3760	4738	4087	4616	4342	4499
30	3915	4586	4181	-	3921	4697	3751	4699	4087	4611	4305	4494
35	3898	4576	4063	4326	3895	4687	3743	4645	3982	4578	4269	4490
40	3835	4548	4023	4307	3878	4613	3403	4597	3960	4564	4237	4462
45	3823	4510	3923	4289	3847	4584	-	-	3819	4507	4210	4457
50	3790	4505	3883	4284	3744	4554	-	-	3767	-	4138	4448
60	3773	4367	3840	4211	3705	4446	-	-	-	-	4006	4448
70	3677	4338	3765	4206	3571	4431	-	-	-	-	4006	4443
80	3656	4319	3739	4110	3398	4327	-	-	-	-	3884	4356

**Table 4.** P-wave velocities per freezing-thawing cycles in acid.

(unit : m/s)

Cycle \ Sample ID	acid-1		acid-2		acid-3		acid-4		acid-5		acid-6	
	dry	sat.	dry	sat.	dry	sat.	dry	sat.	dry	sat.	dry	sat.
0	4766	5067	4758	5047	4026	4908	4664	4906	4637	4835	4609	4981
5	4766	5067	4758	5047	4026	4893	4664	4881	4637	4733	4609	4886
10	4637	5037	4734	4997	4006	4825	4594	4867	-	4719	4563	4832
15	4509	4991	4696	4971	3720	4780	4482	4862	-	4675	4365	4792
20	4485	5011	4658	4961	3696	4746	4482	4847	4234	4671	4286	4772
25	4466	4925	4639	4891	3595	4648	4440	4808	4108	4671	4282	4752
30	4337	4905	4563	4885	3587	4628	4421	4798	4090	4632	4249	4752
35	4294	4859	4530	4855	3482	4579	4393	4798	4057	4603	4217	4747
40	4237	4834	4468	4810	3446	4535	4379	4739	4057	4593	4107	4657
45	4208	4814	4453	4790	3382	4520	4333	4739	4006	4550	4093	4637
50	4080	4646	4382	4674	3362	4437	4333	4715	3937	4530	3982	4632
60	3779	4570	4368	4653	3265	4422	4333	4690	3714	4521	3876	4622
70	3737	4479	4339	4547	3241	4398	4268	4661	3714	4506	3862	4612
80	3508	4195	4059	4189	3144	4329	4230	4587	3700	4482	3830	4573

Table 5. Variation of P-wave velocities due to freezing-thawing

Test type		variation per cycle	R (%)
Water	dry	-0.26 %	73.5
	saturated	-0.12 %	86.6
Acidic fluid	dry	-0.28 %	81.3
	saturated	-0.12 %	83.3

수 있다.

Fig. 7은 산을 이용한 동결-융해과정을 거친 후 탄성과 속도의 변화량을 나타낸 것이다. (a)는 건조상태의 탄성과속도의 변화량 곡선으로서, 탄성과 속도는 최대 4776m/sec에서 최소 3144 m/sec의 범위를 보여주고 있다. 전반적으로 동결-융해가 진행됨에 따라 지속적인 감소 경향을 보이며 동결-융해 cycle과 탄성과 속도는  $V_{p-dry(acid)} = V_0 - 0.28 \times \text{cycle}$ (상관도 81.3%)의 관계를 보여, 동결-융해 1 cycle마다 최초 측정된 속도에서 0.28% 줄어들고 있음을 알 수 있다. (b)는 포화상태의 탄성과속도의 변화량 곡선으로서 탄성과 속도는 최대 5067m/sec에서 최소 4189m/sec의 범위를 보여주고 있고, 전반적으로 동결-융해가 진행됨에 따라 지속적인 감소 경향을 보인다. 선형회기분석 결과, 동결-융해 cycle과 탄성과 속도는  $V_{p-sat(acid)} = V_0 - 0.12 \times \text{Cycle}$ (상관도 83.3%)의 관계를 보여 동결-융해 1 cycle마다 최초 측정된 속도에서 0.12% 줄어들고 있고 상관계수는 83.3%를 보여준다.

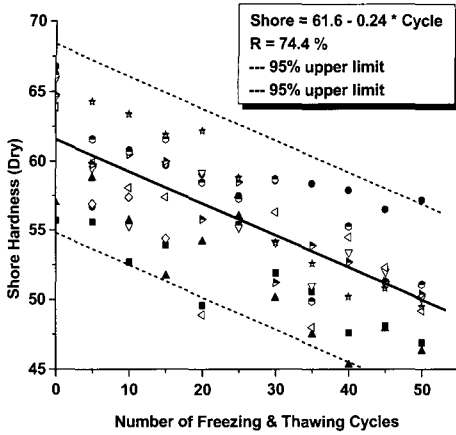
동결-융해 과정 동안 건조상태와 포화상태일 때 시료의 탄성과속도 변화량을 보면, 모든 시료의 속도가 지속적으로 감소하는 경향을 보이고 있으나, 건조상태보다 포화상태일 때의 탄성과 속도가 높게 측정되었다. 이는 반복적인 동결-융해과정에서 시료 내부에 미세한 균열들이 발생되어 탄성과 속도를 저하시키는 것으로 판단되며, 포화상태에서는 물이 균열이나 기타 공극을 매워 비교적 균질한 상태가 되므로 건조상태보다 탄성과의 속도가 빠르고 풍화에 대한 탄성과 속도 감소량의 폭도 작아지는 것을 알 수 있다. Fig 6, 7은 실험 초기와 50~60 cycle 전후로 많은 탄성과 속도의 감소가 일어났음을 지시하고 있으며, 건조상태일 때의 속도 변화량이 15~20% 정도에서 7개의 시료에서 파괴가 일어난 점으로 미루어 볼 때 탄성과속도에 급격한 변화가 있거나 변화량이 20%가 넘으면 파괴의 위험이 있으므로 면밀한 관찰이 필요하다.

### Shore 경도

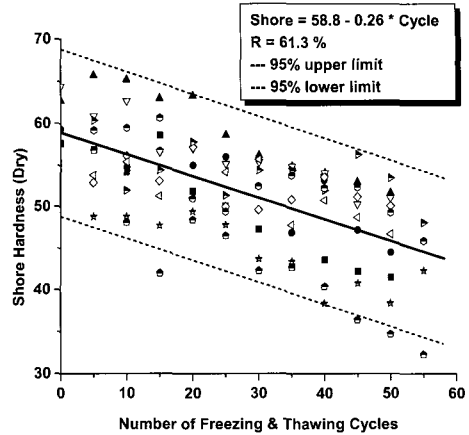
동결-융해 과정에서 암석의 강도변화를 예측할 때 일축압축강도 시험과 같은 파괴시험에서는 서로 다른 시료를 대상으로 실험하게 되므로 정확한 비교가 어렵다. 따라서 비파괴시험인 Shore 경도 실험을 통하여 동일한 시료를 대상으로 동결-융해에 따른 암석의 강도변화를 측정하였다.

Shore 경도는 각각의 시료 블록에서 채취한 9개의 시료에 대하여 동결-융해 5 cycle 마다 건조상태와 포화상태에서 측정되었다.

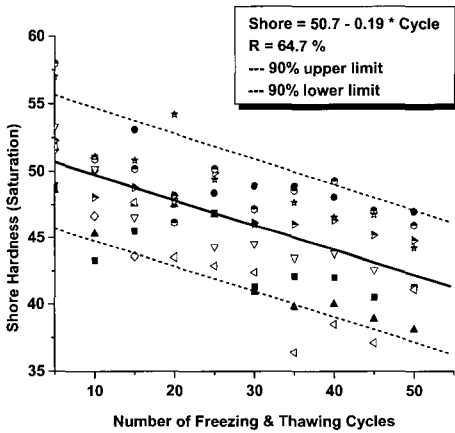
Fig. 8, 9와 Table 6은 물과 산을 이용한 동결-융해 cycle과 Shore 경도의 관계를 보여준다. 물을 이용한 동결-융해 실험에서 Shore 경도는 건조상태일 때 최대 66.8에서 최소 45.3의 분포를 보이고, 포화상태일 때는 최대 58에서 최소 36.4의 분포를 보인다. 선형회기분석 결과, 동결-융해 cycle과 건조상태에서의 Shore 경도는  $\text{Shore}_{dry(water)} = 61.6 - 0.24 \times \text{cycle}$  (상관도 74.4%)의 관계를 보이고 포화상태에서는  $\text{Shore}_{sat(water)} = 50.7 - 0.19 \times \text{cycle}$  (상관도 64.7%)의 관계를 보인다. 산을 이용한 동결-융해 실험에서 Shore 경도는 건조상태일 때 최대 64.4에서 최소 32.3까지이고, 포화상태일 때는 최대 58.2에서 최소 25.4의 분포를 보인다. 선형회기분석 결과, 동결-융해 cycle과 건조상태에서의 Shore 경도는  $\text{Shore}_{dry(acid)} = 58.8 - 0.26 \times \text{cycle}$  (상관도 61.3%)의 관계를 보이고, 포화상태에서는  $\text{Shore}_{sat(acid)} = 47.1 - 0.22 \times \text{cycle}$  (상관도 57.2%)의 관계를 보인다. 위의 동결-융해 cycle과 shore 경도의 관계식들을 통해 볼 때 동결-융해실험 1 cycle 마다 Shore 경도는 물의 경우 건조 시에는 0.24, 포화 시에는 0.19 감소하였으며, 산의 경우는 건조 시 0.26, 포화 시 0.22 감소함을 알 수 있다. 이때 건조상태에서의 감소폭이 포화상태에서의 감소폭보다 크게 나온 것은 포화상태의 경우는 시료에 분포하는 미세한 균열에 물이 채워져서 Shore 경도 변화



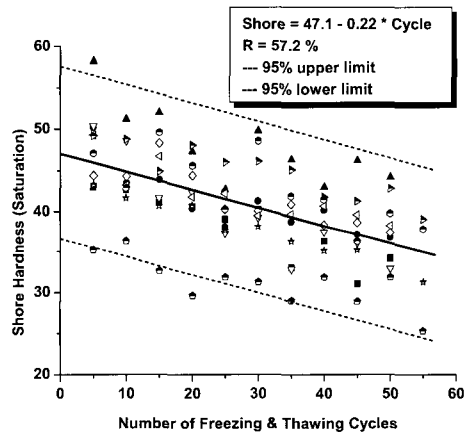
(a)



(a)



(b)



(b)

**Fig. 8.** Shore hardness with freezing-thawing cycles in fresh water (a) dry samples, (b) saturated samples. The same symbols represent shore hardness measured from the same specimen.

**Fig. 9.** Shore Hardness with freezing-thawing cycles in acid (a) dry samples, (b) saturated samples. The same symbols represent shore hardness measured from the same specimen.

폭을 감소시킨 것으로 판단되며, 물을 이용한 실험과 산을 이용한 실험에서 시료의 경도 차이는 미약함을 알 수 있다.

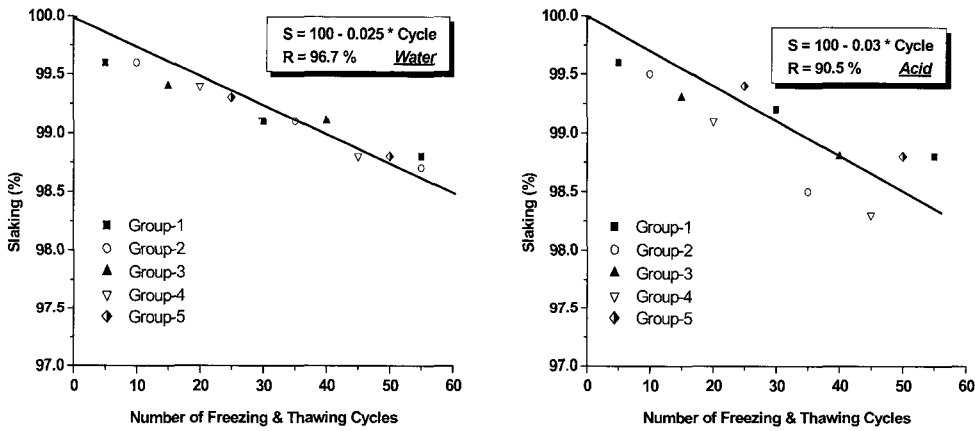
**슬레이크 내구성(Slake durability)**

풍화도를 나타내는 여러 물성 중에서 암석시료가 건습에 의해 암석이 분해되는 비율을 통해 내구성을

측정하는 슬레이크 내구성 실험은 모암으로부터 입자가 분해되는 과정이 기계적 풍화의 의미와 잘 부합된다. 슬레이크 내구성 실험은 길이 5cm, 지름 2.5cm의 코어시료 45개를 9개씩 Group-1부터 Group-5 까지 5개의 실험군으로 나누어서 실시되었다. 각 실험군에 대하여 시료의 초기 건조중량을 측정후 55 cycle까지 동결-융해 실험을 실시하였으며, 시험 시작 후 5 cycle 마다 Group-1부터 번갈아가며 시료의 건조중량을

**Table 6.** Variation of Shore hardness by Freezing-Thawing .

Test type		variation per cycle	R (%)
Water	dry	- 0.24	74.4
	saturated	- 0.19	64.7
Acidic fluid	dry	- 0.26	61.3
	saturated	- 0.22	57.2



**Fig. 10.** Slake durability with freezing-thawing cycles.

**Table 7.** Variation of Slake durability due to Freezing-Thawing

Test type	variation per cycle	R (%)
Water	- 0.025 %	96.7
Acidic fluid	- 0.03 %	90.5

측정하였다.

Fig. 10과 Table 7은 동결-융해 cycle과 슬레이크 내구성(S)과의 관계를 나타낸 것이다. 물과 산을 이용한 동결-융해 실험이 진행됨에 따라 슬레이크 내구성은 전반적으로 감소하는 경향을 보이니 감소량은 매우 작음을 알 수 있다. 실험 결과에 대한 선형회기분석 결과, 물을 이용한 동결-융해 실험에서 동결-융해 cycle과 슬레이크 내구성은  $S_{water} = 100 - 0.025 \times cycle$  (상

관도 96.7%)의 관계를 보였고, 산을 이용한 실험에서는  $S_{acid} = 100 - 0.03 \times cycle$  (상관도 90.5%)의 관계를 보였다. 모든 시료에서 동결-융해 55 cycle까지 슬레이크 내구성이 98%를 넘어 매우 높은 내구성을 갖고 있는 것으로 분석되었고, 동결-융해 1 cycle 마다 시료의 슬레이크 내구성의 감소율은 물의 경우 0.025%, 산의 경우는 0.03% 감소하는 것으로 나타나 동결-융해 cycle이 진행됨에 따라 내구성이 크게 저하되지 않는 것

로 나타났다. 이는 인공풍화 시험에 사용된 풍암분지 세일이 퇴적 동시와 후기에 안산암에 의해 넓게 관입 당한 양상을 보이므로 다소의 열변성작용을 받아 암석의 내구성이 높아졌을 가능성이 있기 때문인 것으로 판단된다.

## 토 론

### 동결·융해에 따른 암석 시료의 물리·역학적 특성 변화

동결·융해가 진행됨에 따라 암석시료의 일축압축강도는 1 cycle 당 물의 경우는 0.40MPa, 산의 경우는 0.43MPa의 강도 저하가 나타나고 있다. 탄성계수는 일축압축강도와 함께 측정되었으며 동결·융해가 진행됨에 따라 1 cycle 당 물의 경우는 0.21GPa, 산의 경우는 0.22GPa의 탄성계수의 저하가 나타나서 산을 이용한 경우가 좀 더 풍화가 빨리 진행되고, 따라서 산성비가 시료 풍화에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 그러나 일축압축강도와 탄성계수는 파괴 시험이므로, 각 cycle에서 서로 다른 시료를 사용하여 측정하였고, 이에 따라 심한 분산을 보여주는 것으로 판단된다. 흡수율은 동결·융해가 진행됨에 따라 1 cycle 당 물의 경우는 0.29%, 산의 경우는 0.37%가 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 산을 이용한 경우가 풍화에 더 취약한 결

과를 보여준다. 흡수율 변화 역시 물과 산의 경우 모두에서 비교적 분산된 형태를 보이고 있다. 이는 서로 다른 여러 개의 시료가 실험에 사용되었기 때문에, 동결·융해 과정에 따른 풍화양상의 변화뿐만 아니라 각 시료의 고유 특성까지 반영되었기 때문에 분산된 형태의 결과를 나타낸 것으로 판단된다.

동결·융해가 진행됨에 따라서 탄성과속도는 건조된 시료의 경우 1 cycle 당 물은 0.26%, 산은 0.28%의 속도 저하가 나타나고 있고, 포화된 시료의 경우는 1 cycle 당 물은 0.12%, 산은 0.12%의 속도 저하가 나타나고 있다. 물과 산을 이용한 동결·융해 실험에서 거의 비슷한 속도 저하가 나타나고 있어서, 탄성과속도의 경우는 산의 영향을 거의 받지 않고 있음을 지시한다. 건조상태보다 포화상태일 때 속도가 높게 나오고 속도 변화량이 적은 이유는 물이 공극을 메워 좀 더 균질한 상태에서 측정이 되었기 때문으로 사료된다.

Shore 경도는 건조한 경우는 1 cycle 당 물의 경우는 0.24, 산의 경우는 0.26의 정도 저하가 나타나고 있으며, 포화된 경우는 1 cycle 당 물의 경우는 0.19, 산의 경우는 0.22의 정도 저하가 나타나고 있어서, 약간의 차이는 있지만 물과 산을 이용한 동결·융해에 따른 풍화의 정도는 큰 차이가 없는 것으로 사료된다. 슬레이크 내구성은 동결·융해가 진행됨에 따라서 1 cycle 당 물의 경우는 0.025, 산의 경우는 0.03의 저하가 나타나고 있어서 물과 산에서 거의 비슷한 경향을 보이며, 산의 영향을 거의 받지 않는 것으로 판단된다.

Table 8. The half-life after each test.

Test Type		Initial Value	Variation per cycle	Half life (cycle)
Uniaxial Compression Strength	water	66.8 MPa	-0.40 MPa	83.5
	acid		-0.43 MPa	77.7
Young's Modulus	water	37.8 MPa	-0.21 GPa	90.0
	acid		-0.22 GPa	85.9
Absorption	water	100 %	+ 0.29 %	344.8*
	acid		+ 0.37 %	270.3*
Ultrasonic Wave Velocity	water	100 %	- 0.26 %	192.3
	acid		- 0.28 %	178.6
Shore	water	60.2	- 0.24	125.4
	acid		- 0.26	115.8
Slake durability	water	100 %	- 0.025%	2,000.0
	acid		- 0.03 %	1,666.7

\* double life

위의 결과를 종합하면 동결-융해가 진행됨에 따라 일축압축강도와 흡수율은 산의 영향을 받고 있으나, 탄성계수, 탄성과속도, Shore 경도, 슬레이크 내구성은 산의 영향을 크게 받지 않는 것으로 사료된다.

최초의 실험에서 측정된 암석시료의 일축압축강도, 탄성계수, 흡수율, 탄성과 속도, shore 경도, 슬레이크 내구성을 초기 값이라 하고, 이 값들이 절반으로 줄어드는 기간(cycle)을 반감기라고 하면 본 연구에서의 반감기는 Table 8과 같이 나타낼 수 있다. 예를 들어, 물을 이용한 동결-융해 실험 중에서 일축압축강도는 동결-융해 1cycle 마다 0.40MPa 줄어들고 세일의 초기 일축압축강도의 평균이 66.8MPa이며 약 83.5 cycle 후에 일축압축강도가 33.4MPa되므로, 일축압축강도의 반감기는 83.5 cycle이 된다. 이 반감기의 값이 작다는 것은 물리-역학적 특성이 풍화에 취약함을 나타내며 값이 크다는 것은 강함을 나타낸다. 시료의 동결-융해가 진행됨에 따라 일축압축강도와 탄성계수는 풍화에 취약하고 탄성과속도와 Shore 경도는 중간정도의 취약성을 흡수율은 강하고 슬레이크 내구성은 별 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. 전반적으로 반감기의 값이 물보다는 산을 이용한 동결-융해 실험에서 적게 나타나는 양상을 보이는데, 이는 자연상태에서 산성비의 영향을 받은 경우에는 그렇지 않은 경우보다 풍화에 취약함을 지시한다.

### 인공풍화와 자연풍화사이의 상관관계

실험실에서 풍화에 가장 큰 영향을 미치는 몇 가지의 요인을 선택, 제어하여 풍화를 진행시키는 인공풍화실험과 자연환경에서 일어나는 풍화와의 관계를 찾는 일은 매우 중요한 문제이다. 자연환경에서 최저기온이  $-5^{\circ}\text{C}$  이하인 날 중에서 그날의 최고기온이  $5^{\circ}\text{C}$  이상인 경우에만 동결-융해가 일어날 수 있다고 가정하면, 본 연구지역과 가까운 홍천군의 10년간의 동절기(12월~2월) 기온 통계를 통해 볼 때 1년 중 24일만이 순수하게 동결-융해가 발생하는 날이라고 말할 수 있다. 그러나 암석은 자연환경에서 포화상태를 유지하기 어렵고 그로 인해 물이 동결될 때 팽창정도는 실험실에서 보다 작을 것이므로 자연상태에서의 암석이 인공풍화실험보다는 풍화를 적게 받을 것으로 예상된다. 따라서 본 연구의 1 cycle은 24시간이므로 자연상태의 1년은 최하 24 cycle 보다 작다고 판단된다. 그러나 인공풍화실험은 실제 자연환경보다 더욱 극한 환경을 조성한 것이므로 보수적인 관점에서 볼 때 인공풍화

실험 24 cycle의 50% 이하인 6~12 cycle이 자연의 1년에 해당될 것으로 판단된다.

## 결론

강원도 횡성지역의 풍암분지에 분포하는 백악기 세일에 대하여 항상 포화상태를 유지하며 물과 산성용액에 의한 동결-융해 실험을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 동결-융해가 진행됨에 따라 일축압축강도, 탄성계수, 탄성과속도, Shore 경도는 감소하는 경향을 보이고 흡수율은 증가하는 경향을 보인다.
2. 일축압축강도, 탄성계수와 흡수율은 산성 용액에 의한 동결-융해의 영향이 물에 의한 동결-융해보다 큰 것으로 나타났으며, 탄성과속도, shore 경도와 슬레이크 내구성은 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.
3. 일축압축강도와 탄성계수는 동결-융해가 진행됨에 따라 비교적 큰 폭으로 감소하여 풍화에 취약한 것으로 나타났으며, 탄성과 속도와 shore 경도는 중간정도로 취약하고 흡수율의 경우는 동결-융해에 의한 풍화에 강한 것으로 나타났다.
4. 탄성과 속도 변화량이 급격한 변화하거나, 20%를 넘어가면 파괴의 위험이 있으므로 면밀한 관찰이 필요하며, 파괴가 일어난 시료의 속도 변화량의 기울기가 좀 더 크게 나타난다.
5. 인공풍화시험에서의 6~12 cycle은 자연상태의 1년에 해당될 것으로 판단된다.

## 사 사

이 연구는 강원대학교 부설 자원개발연구소의 일부 지원으로 시행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김성수, 박형동, 1999, 인공풍화 실험을 이용한 석재 물성의 변화 연구, 한국자원공학회지, 36, 141-149.
- 곽진철, 2000, 풍화에 의한 편마암의 물성변화에 대한 연구, 강원대학교 석사논문, 91 p.
- 곽진철, 백환조, 2000, 풍화에 의한 국내 편마암체의 지질공학적 물성의 변화, 한국자원공학회지, 37,

- 262-271.
- 오선환, 김형수, 장보안, 서만철, 2000, 시멘트 모르타르 재료의 동탄성계수와 정탄성계수 비교 연구, 지구물리, 3, 127-138.
- 일본토질공학회, 1989, 암석 암반의 조사와 시험, 671 p.
- 京谷孝史, 白 庸, 恩田千早, 2000, 多孔質軟岩(大谷石)の凍結融解による力學特性劣化の定量的把握について, 日本土木學會論文集, 652, 103-114.
- Bortz, S., Stecih, J., Wonneberger, B. and Chin I., 1993, Accelerated weathering in building stone, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 30, 1559-1562.
- Bortz, S. and Wonneberger, B., 1995, Durability testing of thin stone, Proc. of 35th U.S. Symposium, 373-378.
- Hale, P., and Shakoob, A., 1998, A laboratory investigation of the effects of climatic changes on unconfined compressive strength of selected sandstones, Proc. of 8th Congress of the International Association for Engineering geology and the Environment, 4, 2859-2867
- ISRM, 1981, Rock characterization testing & monitoring (ISRM suggested method), E. T. Brown ed., Pergamon Press, 211 p.
- Jefferson, D. P., 1993, Building stone : the geological dimension, Quarterly Journal of Engineering Geology, 26, 305-319.
- Kolsky H., 1953, Stress waves in solids, Clarendon Press, Oxford, 211 p.
- 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, 22, 31-48
- Nicholson, D. T. and Nicholson, F. H., 2000, Physical deterioration of sedimentary rocks subjected to experimental freeze-thaw weathering, Earth Surface Processes and Landforms, 25, 1295-1308.
- Park, H. D., 1996, Assessment of the geotechnical properties of the weathered rocks at historical monuments in Korea, Proc. of EUROCK'96, Torino, Italy, 1413-1416.
- Shoichi, K., Takabumi, S. and Satoru, K., 1994, Effects of acid rain on granitic building stone, Proc. of 7th Congress of the International Association for Engineering geology and the Environment, 3651-3658.

투 고 일 2004년 10월 14일

심 사 일 2004년 10월 15일

심사완료일 2004년 12월 14일

장현식

강원대학교 자연과학대학 지구물리학과

200-701 강원도 춘천시 효자2동 192번지

Tel : 033-244-9275

e-mail : whitennull@kangwon.ac.kr

장보안

강원대학교 자연과학대학 지구물리학과

200-701 강원도 춘천시 효자2동 192번지

Tel : 033-250-8583

e-mail : bajang@kangwon.ac.kr

이준성

강원대학교 자연과학대학 지구물리학과

200-701 강원도 춘천시 효자2동 192번지

Tel : 033-244-9275