

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

## Variations of Engineering Geological Characteristics of the Poongam sedimentary basin Cretaceous Shale on Hoengsung Kangwon-do due to Freezing-Thawing

이 준 성(Jun-Sung Lee)

한국시설안전기술공단 기술개발실

장 보 안(Bo-An Jang)

강원대학교 지구과학부

### 1. 서론

암석은 물과 산성비에 의한 동결현상으로 풍화가 되며, 동결될 때에는 팽창하는 물의 부피에 의해 암석에 압력을 가하게 되어 미세균열이 생성되고 그로 인해 파괴가 이루어진다. 기존의 연구에서는 동결·융해시 물의 증발을 고려하지 않고 단순히 시료를 침수만 시켰으므로 시료 내에 포화 상태를 파악할 수 없었다.

본 연구에서는 시료가 항상 포화상태를 유지하게 하여 물에 의한 동결·융해와 산성용액에 의한 동결·융해 실험을 실시하여 암석시료의 물리적·역학적 특성의 변화양상을 파악하고 자연현상을 유추하는데 목적이 있다.

### 2. 연구지역의 지질

연구 지역은 강원도 홍천군과 횡성군 일부에 걸쳐 분포하는 백악기 육성 퇴적 분지인 풍암분지로 북서쪽에서 단층 접촉에 의해 선캠브리아기의 흑운모 편마암 및 호상 편마암과 접하고 기반암인 쥐라기 화강암을 피복하고 있다. 중생대 백악기로 알려지고 있는 퇴적암은 적색, 회색, 회녹색의 다양한 색조에 역암에서 셰일에 이르는 다양한 입도분포를 보이고 있으며, 퇴적암상들은 입자크기, 퇴적구조 등에 따라 12개 퇴적상으로 세분되었다. 본 연구에 사용된 적갈색 셰일은 풍암분지내에 있는 강원도 횡성군 공근면 청곡리 1번지에서 채취하였다. 셰일은 층리가 발달되어서 성층면을 따라 쪼개지는 성질이 있고 풍화에 약하기 때문에 이 연구에서 시료로 선택되었다.

### 3. 시료 제작

시료의 물성분석을 위하여 피상 암석으로부터 core drilling machine을 사용하여 원주형 시험편을 획득한 후, 일축압축시험용 시편 52개, Slaking 시험용 시편 100개, 탄성과속도 측정용으로 직경 55mm, 길이 50, 70, 90mm의 시편을 각각 4개씩을 제작하였다. 물을 이용한 동결·융해 실험에 사용되는 시험편은 일축압축시험편 26개, Slaking 시험편 50개, 탄성과속

도 측정 시험편을 길이에 따라 2개씩으로 나누어 실험을 하고, 황산수용액을 이용한 동결·융해 실험에 사용되는 시험편의 개수도 물을 이용한 실험과 같다.

#### 4. 인공풍화실험

암석은 균열이나 공극에 존재하는 물이 동결될 때 부피가 약 9% 팽창하여 암석에 인장응력을 가하면서 미세균열이 생성되고 그로 인해 파괴가 진행되므로, 본 연구에서는 물의 존재 여부가 중요한 요소로 작용한다. 따라서 시료는 항상 포화 상태를 유지하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 진공 챔버를 이용하여 시료를 완전포화 시켰으며, 실험이 진행됨에 따라 물의 증발을 방지하기 위해 동결 실험에는 시료를 랩(wrap)으로 밀봉하고, 융해 실험에는 시료를 실험용액(물과 황산수용액)에 침수시켰다.

##### (1) 동결·융해 실험

암석의 동결·융해에 대한 규격화된 실험법은 없으나 일본토질공학회(1989), 김성수와 박형동(1999), 박진철과 백환조(2000) 등에서는  $-20^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ 의 온도 범위에서 동결·융해 실험을 실시하였으며, Bortz and Wonneberger(1995)의 시험법에서는  $-22^{\circ}\text{C} \sim 77^{\circ}\text{C}$  범위에서, 京谷孝史 et al.(2000)은  $-15^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$  범위에서 山本清仁 et al.(2000)은  $-18^{\circ}\text{C} \sim 6^{\circ}\text{C}$  범위에서 동결·융해 실험을 실시하였다. 본 연구에서는 우리나라 겨울의 기후 조건을 감안하여  $-20 \pm 2^{\circ}\text{C} \sim 15 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 를 온도 범위로 설정하였다.

김성수와 박형동(1999) 및 일본토질공학회(1989)의 실험에서는 동결시간을 3시간으로 설정하였으나, 본 연구에 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 12시간을 동결 및 융해 시간으로 설정하였다.

실험의 과정은 24시간 완전 포화 시킨 시료를 랩(wrap)으로 밀봉한 다음  $-20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 에서 12시간 동안 동결시킨 후, 동결된 시료를  $15 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 의 물 속에 8시간 동안 융해시키며, 융해된 시료를 진공 챔버를 이용하여 4시간 동안 포화시킨다. 이 과정이 동결·융해의 1 cycle이다. 5 cycle마다 동결·융해가 완료된 시료에 대하여  $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 에서 12시간 완전 건조시켜 비파괴 시험인 흡수율, 탄성파 속도, Shore 경도, Slake durability와 파괴 시험인 일축압축시험을 통해 자료를 얻었다. 위의 과정을 50 cycle까지는 5 cycle마다 실시를 하였으며, 51 cycle부터 80 cycle까지는 10 cycle마다 실시하였다. 50 cycle 이후에는 10 cycle로 실험을 실시한 이유는 30~50 cycle 이후에는 변화가 적기 때문이다(Bortz and Wonneberger, 1995).

##### (2) 산침수 동결·융해 실험

산성비의 영향을 고려하기 위한 실험으로, 산성비에서 암석에 가장 영향을 많이 미치는

황산을 사용하였다. 산의 농도에 대해서는 실제 빗물보다 다소 강한 산을 사용하는 것이 일반적이고(Jefferson, 1993) 이는 짧은 시간에 충분한 풍화가 발생하도록 하기 위함이다. 본 연구에서는 황산용액(95% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)을 약 1000배 희석하여 pH≒1.9 로 하여 실험을 하였다. 이 외의 실험 방법은 물을 이용한 시험 방법과 같다.

5. 연구 결과

(1) 일축압축강도

본 연구에서는 5 cycle마다 2개의 시료(평균치)를 사용하여 시험한 결과 동결·융해가 진행됨에 따라 물은  $UCS = 65.2 - 0.40 \times Cycle$ 의 관계를 보여 0.40 MPa, 산은  $UCS = 75.2 - 0.48 \times Cycle$ 의 관계를 보여 0.48 MPa씩 1 cycle마다 강도저하를 보였고(Fig. 1.), 탄성계수의 경우는 물은  $E = 39.3 - 0.21 \times Cycle$ 의 관계를 보여 0.21 GPa, 산은  $E = 40.1 - 0.30 \times Cycle$ 의 관계를 보여 0.30 GPa씩 1 cycle마다 감소하는 경향을 보였다. 흡수율의 경우는 물은  $Abs. = V_0 + 0.29 \times Cycle$ 의 관계를 보여 0.29 %, 산은  $Abs. = V_0 + 0.37 \times Cycle$ 의 관계를 보여 0.37 %씩 1 cycle마다 증가하는 경향을 보여 물보다는 산을 이용한 경우가 좀더 풍화에 취약한 것으로 분석되었다. <Fig. 1.>에 측정된 일축압축강도는 전반적으로 분산된 형태를 보이고 있다. 그 이유는 확인 작업을 거쳤다고는 하나 풍화등급이 Grade II인 암괴에서 채취한 시료가 균일하지 않거나 혹은 시료내에 분포하는 조그마한 균열이 상당한 영향을 미치기 때문이며 서로 다른 시료를 사용하였기 때문에 불규칙적인 경향을 나타내고 있다고 판단된다.

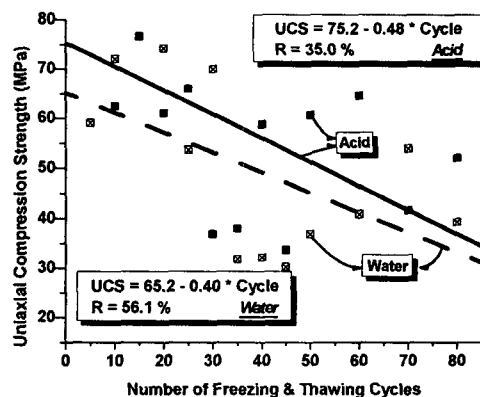


Fig. 1. Uniaxial Compressive Strengths with freezing-thawing cycles.

(2) 탄성과 속도(P-wave)

탄성과속도 측정은 탄성파시험에 적당한 형태인 50, 70, 90, 110mm의 시료로 2개씩 성형하여 합계 16개의 시료에 대하여 비파괴시험인 탄성파 시험을 실시하였다(Fig. 2.). 동결·

융해가 진행됨에 따라 건조상태의 탄성과속도의 변화는 물은  $V_p = V_0 - 0.26 \times \text{Cycle}$ 의 관계를 보여 0.26 %, 산은  $V_p = V_0 - 0.28 \times \text{Cycle}$ 의 관계를 보여 0.28 %씩 속도저하를 보였고, 포화상태의 탄성과속도의 변화는 물은  $V_p = V_0 - 0.12 \times \text{Cycle}$ 의 관계를 보여 0.12 %, 산은  $V_p = V_0 - 0.12 \times \text{Cycle}$ 의 관계를 보여 0.12 %씩 속도저하를 보였다(Fig. 2.). 건조상태보다 포화상태일 때의 속도변화량이 적은 이유는 물이 미세균열에 포화되어 있기 때문이다. 또한 탄성과 속도 변화량이 급격한 변화가 있거나 혹은 20 %가 넘어가면 파괴의 위험이 있으므로 면밀한 관찰이 필요하며, 파괴가 일어난 시료의 속도 변화량의 기울기가 좀 더 크게 나타난다.

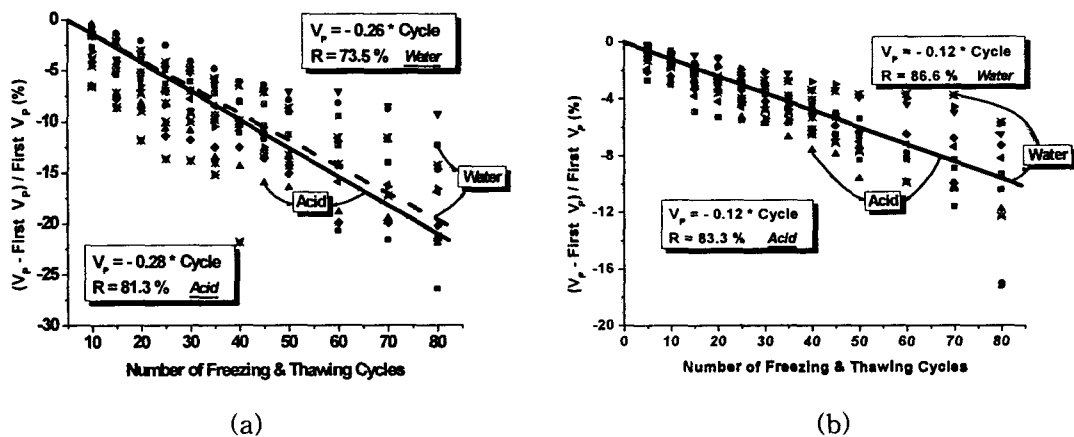


Fig. 2. P-wave velocities with freezing-thawing cycles

(a) dry samples. (b) saturated samples.

### (3) Shore 정도

동결·융해가 진행됨에 따라 건조상태의 Shore 정도는 물은  $\text{Shore} = 61.6 - 0.24 \times \text{Cycle}$ 의 관계를 보여 0.24, 산은  $\text{Shore} = 58.8 - 0.26 \times \text{Cycle}$ 의 관계를 보여 0.26씩 정도저하를 보였고, 포화상태의 Shore 정도는 물은  $\text{Shore} = 50.7 - 0.19 \times \text{Cycle}$ 의 관계를 보여 0.19, 산은  $\text{Shore} = 47.1 - 0.22 \times \text{Cycle}$ 의 관계를 보여 0.22씩 정도저하를 보여 큰 차이를 보이지 않는다.

### (4) Slake durability

내구성을 측정하는 실험으로 동결·융해가 진행됨에 따라 물은  $S = 100 - 0.025 \times \text{Cycle}$ 의 관계를 보여 0.025 %, 산은  $S = 100 - 0.03 \times \text{Cycle}$ 의 관계를 보여 큰 차이를 보이지 않는데 그 이유는 세일이 이미 열변성작용을 받았기 때문이다.

### (5) 동결·융해에 따른 물리적·역학적 특성 변화

초기값이 절반으로 줄어드는 기간을 반감기라고 하면 <Table 1.>과 같이 나타낼 수 있

다. 예를 들어, 물을 이용한 동결·융해 실험 중에서 일축압축강도의 관계식은  $UCS = 65.2 - 0.40 \times \text{Cycle}$ 와 같고 이때 초기값인 65.2 MPa이 절반으로 줄어드는 cycle을 살펴보면 약 80 cycle 후에 33.2 MPa로 되므로 이때의 반감기는 80 cycle이 된다. 이 반감기의 값이 작다는 것은 물리적, 역학적 특성에 취약함을 나타내며 값이 크다는 것은 강함을 나타낸다. 전반적으로 반감기의 값이 물보다는 산을 이용한 동결·융해 실험에서 적게 나타나는 양상을 보이는데, 이는 자연상태에서 산성비의 영향을 받은 경우에는 그렇지 않은 경우보다 풍화에 취약함을 보여준다.

Table 1. The half-life after each test(단위 : cycle).

	Water	Acid
Uniaxial Compression Strength	80	80
Young's Modulus	95	70
Absorption	350	270
Ultrasonic Wave Velocity	190	180
Shore	130	110
Slake durability	2000	1700

## 6. 인공풍화와 자연풍화사이의 상관관계

실험실에서 풍화에 가장 큰 영향을 미치는 몇가지의 요인을 선택, 제어하여 풍화를 진행시키는 인공풍화실험과 자연환경에서 일어나는 풍화와의 관계를 찾는 일은 매우 중요한 문제이다. 자연환경에서 최저기온이 영하 5℃ 이하인 날 중에서 그날의 최고기온이 영상 5℃ 이상인 날 일때만이 동결·융해가 일어날 수 있다고 가정하면, 본 연구지역과 가까운 홍천군의 10년간의 동절기(12월~2월) 평균기온에서 24일만이 1년간 순수하게 동결·융해가 발생하는 날이라고 말할 수 있다. 하지만, 암석은 자연환경에서 포화상태를 유지하기 어렵고 그로 인해 물이 동결될 때 9%의 체적팽창으로 발생하는 인장응력이 작어져 미세균열의 확장이 어려우므로 인공풍화실험보다는 풍화를 적게 받을 것으로 예상된다.

본 연구의 1 cycle은 24시간이므로 자연상태의 1년은 최하 24 cycle보다 작다고 판단된다. 따라서, 극한적인 환경을 조성한 인공풍화실험의 5~10 cycle은 자연상태의 1년에 해당된다고 판단된다.

## 7. 결론

1. 동결·융해가 진행됨에 따라 일축압축강도, 탄성계수, 탄성파속도, Shore 경도, Slake durability는 물리적 특성이 감소하는 경향을 보이고 흡수율은 증가하는 경향을 보인다.
2. 동결·융해가 진행됨에 따라 일축압축강도, 탄성계수와 흡수율은 산의 영향을 받고 있

으며, 탄성과속도, Shore 경도와 Slake durability는 산의 영향을 크게 받지 않는 것으로 보인다.

3. 시료의 동결·융해가 진행됨에 따라 일축압축강도와 탄성계수는 물리적, 역학적 특성에 취약하고 탄성과속도와 Shore 경도는 중간 정도의 취약성을 흡수율은 강한 것으로 보인다.
4. 탄성과 속도 변화량이 급격한 변화가 있거나 혹은 20 %가 넘어가면 파괴의 위험이 있으므로 면밀한 관찰이 필요하며, 파괴가 일어난 시료의 속도 변화량의 기울기가 좀 더 크게 나타난다.
5. 인공시험에서의 5~10 cycle은 자연상태의 1년에 해당된다고 판단된다.

## 8. 참고문헌

1. 김성수, 박형동, 1999, 인공풍화 실험을 이용한 석재 물성의 변화 연구, 한국자원공학회지, 36, 141-149.
2. 광진철, 2000, 풍화에 의한 편마암의 물성변화에 대한 연구, 강원대학교 석사논문, 91 p.
3. 일본토질공학회, 1989, 암석암반의 조사와 시험, 671 p.
4. 京谷孝史 et al., 2000, 다공질연암(대곡석)의 동결융해에 대한 역학물성멸화의 정량적 파악, 日本土木學會論文集, 652, 103-114.
5. 山本清仁 et al., 2000, 동결융해의 영향에 의한 암석의 역학정수의 변화“, 日本土木學會論文集, 666, 35-44.
6. Bortz, S. A. and Wonneberger, B., 1995, Durability testing of thin stone, Rock Mechanics, Proc. 35th U.S. Sympo, 373-378.
7. Jefferson, D. P., 1993, Building stone : the geological dimension, Quarterly Journal of Engineering Geology, 26, 305-319.