

## 남극 테라노바 만 편마암의 동결-융해에 따른 지반공학적 특성 변화

김영석\* · 김기주\*\* · 장현식\*\*\* · 장보안\*\*\*\*

Kim, YoungSeok\*, Kim, Kiju\*\*, Jang, Hyun-Shic\*\*\*, Jang, Bo-An\*\*\*\*

### Variations of Geotechnical Characteristics Following Freeze-Thaw of Terra Nova Bay Rocks, Antarctica

#### ABSTRACT

Freeze-thaw tests were performed on gneiss samples collected from Terra Nova Bay, Antarctica in order to examine the engineering properties of rocks with slightly weathered (SW) and moderately weathered (MW). The tests were conducted under temperature ranging from  $-20 \pm 2^\circ\text{C}$  to  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ . A cycle of test consisted of 5 hours of freezing followed by another 5 hours of thawing under full saturation. In this paper, total 200 cycles of freeze-thaw test were performed with measurements of porosity, absorption, ultrasonic velocity, and shore hardness per each 20 cycle and that of uniaxial compressive strength (UCS) per each 50 cycle. The UCS of the SW rocks approximately decreased 0.07 MPa per a single cycle, while that of MW rocks decreased around 0.2 MPa per a single cycle. During the 200 cycles of SW rocks, the absorption increased from 0.23% to 0.39%, the P-wave velocity decreased from 4,054 m/s to 3,227 m/s and S-wave velocity decreased from 2,519 m/s to 2,079 m/s. Similarly, those of MW rocks changed from 0.65% to 1.6%, 3,207 m/s to 2,133 m/s and 2,028 m/s to 1,357 m/s. In conclusion, it was inferred that the properties of SW rocks experienced approximately 200-300 cycles of freeze-thaw process become close to those of MW rocks.

**Key words** : Freeze-thaw, Antarctica, Terra Nova Bay, Gneiss, Rock Weathering

#### 초 록

남극 암석의 동결-융해 풍화현상에 관한 연구를 위하여 테라노바 만 지역의 편마암을 대상으로 풍화등급에 따라 약한풍화(SW) 및 보통풍화(MW)로 분류하여 암석의 공학적인 특성 변화를 실험하였다. 동결-융해시험은  $-20 \pm 2^\circ\text{C}$  ~  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 온도 조건에서 수행되었으며, 암석 시험편은 진공챔버에서 포화된 상태에서 5시간 동결과 5시간 융해 과정을 1 cycle의 동결-융해로 설정하였다. 본 논문에서는 전체 200 cycle의 동결-융해 과정을 진행하면서 20 cycle 마다 공극률, 흡수율, 초음파 속도 및 쇼어경도를 측정하였으며, 50 cycle 마다 일축압축시험을 수행하였다. SW 등급의 편마암은 동결-융해 1 cycle 마다 0.07 MPa 정도 일축압축강도가 감소하였으며, MW 등급의 암석은 0.2 MPa 정도 일축압축강도가 감소하였다. 동결-융해가 200 cycle 진행되는 동안 SW 등급 암석의 흡수율은 0.23%에서 0.39%로 증가하였으며, P파 속도는 4,054 m/s에서 3,227 m/s로, S파 속도는 2,519 m/s에서 2,079 m/s로 감소하였다. 이와 유사하게 MW 등급 암석의 흡수율은 0.65%에서 1.6%로 증가하였으며, P파 속도는 3,207 m/s에서 2,133 m/s로, S파 속도는 2,028 m/s에서 1,357 m/s로 감소하였다. 동결-융해시험 결과, 남극 테라노바 만 지역의 SW 등급 편마암은 동결-융해가 200 ~ 300 cycle 반복될 경우 MW 등급 암석에 가깝게 풍화되는 것으로 밝혀졌다.

**검색어** : 동결-융해, 남극, 테라노바 만, 편마암, 암석풍화

\* 정회원 · 한국건설기술연구원 연구위원 (kimys@kict.re.kr)

\*\* 정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 수석연구원

(Corresponding author · Korea Institute of Construction Technology · kim\_kiju@hanmail.net)

\*\*\* 강원대학교 박사과정 (whitenull@kangwon.ac.kr)

\*\*\*\* 강원대학교 교수 (bajang@kangwon.ac.kr)

Received February 14 2013, Revised May 20 2013, Accepted June 29 2013

## 1. 서론

남극대륙은 세계 기후환경과 관련된 연구활동 및 그 주변의 해양과 더불어 자연환경적, 과학적으로 가치있을 뿐만 아니라 미래 자원의 보고로서도 큰 의미를 가지는 지역이다. 현재 정부는 한반도의 약 60배 크기의 남극대륙 및 주변해역에 대한 지속적인 연구 및 조사활동을 수행하기 위하여 남극 장보고 과학기지(Jangbogo Antarctic Research Station) 건설을 추진 중이다. 장보고 과학기지는 남극에서의 활동영역 확대 및 향후 내륙 진출을 위한 교두보로서의 가치를 가진다(한국건설기술연구원, 2011). 남극대륙은 지구상에서 기온이 가장 낮고 바람이 강하며 건조한 지역으로서 극한환경 조건에서 구조물을 건설하기 위해서는 기반암의 역학특성을 이해하고 온도영향에 따른 암석의 역학특성 변화를 평가하여야 한다. 극지의 혹한 환경에 존재하는 암석은 극저온에서 오랜 시간동안 노출되었기 때문에 동결-융해에 의한 암석의 역학특성이 변한다. 따라서, 구조물의 장기적인 안정성 확보 및 향후 내륙기지 건설을 위한 암석의 풍화특성 분석을 위하여 대상지반의 동결-융해 현상을 포함한 풍화에 따른 지반공학적 특성 변화에 대한 연구가 필요하다.

동결-융해 작용에 의한 암석의 풍화작용은 암석의 물리적, 역학적 특성을 변화시키기 때문에 동결-융해 작용에 따른 암석의 풍화 메커니즘을 예측하는 것은 공학적으로 매우 중요한 부분이다. 동결-융해에 따른 암석의 풍화 메커니즘을 규명하기 위해서는 연구지역의 기후와 암석의 고유특성이 반영되어야 한다. Bortz et al.(1993)은 자연상태 및 인공풍화 실험에서 풍화를 받은 암석(석회암, 화강암, 대리암)의 상관관계를 제시하였다. 대리암의 경우는 12~16번 정도의 cycle이 대체로 자연풍화의 1년과 동등하다고 보았으며, 화강암의 구성물질의 변화는 300 cycle, 대리암은 500 cycle, 석회암은 200 cycle 이후에 나타난다고 발표하였다. 김성수와 박형동(1999)은 동결-융해 반복시험, 산성용액 침수시험, 염분의 결정화 시험을 통한 물성의 변화 연구를 하였다. 상대적으로 동결·융해 반복시험과 산성용액 침수시험보다 염분의 결정화 시험에서 더 큰 석재 물성의 변화가 관찰되었음을 발표하였다. Kyoya et al.(2000)은 일본의 동북부 지역에 존재하는 다공질연암을 이용하여 동결-융해시험을 하였으며 시험 중 암석의 수분 증발을 막기 위해 랩(wrap)을 씌운 후 암석을 동결시켜 시험을 하였다. Nicholson and Nicholson(2000)은 10 종류의 퇴적암을 동결-융해시험 하여 강도 저하가 나타남을 제시하였다. 동결-융해시 물의 증발을 고려하지 않고 단순히 시료를 침수만 시켰으므로 시료 내에 포화 상태를 파악할 수 없었다.

본 논문에서는 남극 장보고 과학기지 건설 예정지반의 온도변화에 따른 역학거동을 검토하고자, 남극 현장에서 직접 시료를 채취하여 동결-융해 풍화에 의한 지반공학적 특성변화 연구를 수행하였다.

즉, 건설 예정지인 테라노바 만(Terra Nova Bay, 74° 37'S, 164° 12'E) 지역의 기반암을 채취하여 동결-융해 과정에 의한 이 지역 편마암의 물리적, 역학적 특성 변화 양상을 파악하고, 남극 극한환경과의 상관성을 검토하였다.

## 2. 연구대상 지역 특성 및 시험편 제작

### 2.1 연구대상 지역

장보고 과학기지가 건설될 남극 테라노바 만은 북서-남동 방향의 완만한 경사를 가지는 2개의 반도와 2개의 만으로 이루어져 있다(Fig. 1). 이 지역의 암석은 섀캄브리아기로 추정되는 혼성암 또는 호상편마암과 빙하퇴적물로 이루어졌다. 연구지역의 지질은 석영, 장석질이 우세하며 빙하퇴적물의 형성으로 국부적으로 토양층이 존재하고 있다. 해안 절벽들은 대규모 선구조와 일치하며 단층으로 추정되고, 북북동-남남서 방향과 남북방향의 선구조들이 발달하고 있다. 기반암은 고 변성도의 편마암과 혼성암으로서 혼성암내에는 화성암 및 퇴적암의 흔적(relic)을 다수 포함하고 있고 호상 편마암, 중립질 흑운모 편마암, 중립질 흑운모 석류석 편마암 및 조립질 석영장석질 편마암 등이 혼재되어 있다. 조사 지역 A 및 B 위치에서 노두의 절리군 산정 결과, 대표적인 주향 및 경사 방향은 N10E/62NW과 N64E/68NW로 나타났다. 암석에 발달한 주절리대는 호상편마암의 엽리방향과 동일하게 0.1~0.5 m 간격으로 발달하며, 이에 수직하게 부절리대가 0.5~1 m 정도의 간격으로 발달하였다(한국건설기술연구원, 2011; 김기주 등, 2012).

### 2.2 지질학적 암석 특성 및 온도

동결-융해 방법을 이용한 인공풍화 실험을 위하여 연구지역의 노출된 기반암에서 시료를 채취하였다. Fig. 1의 A 및 B 지점은

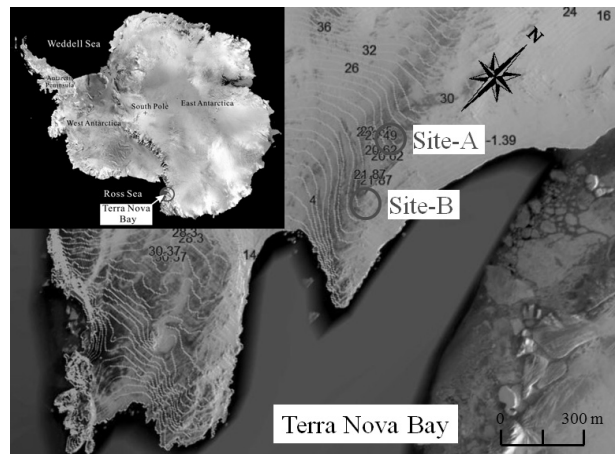


Fig. 1. Location of the study area in Antarctica

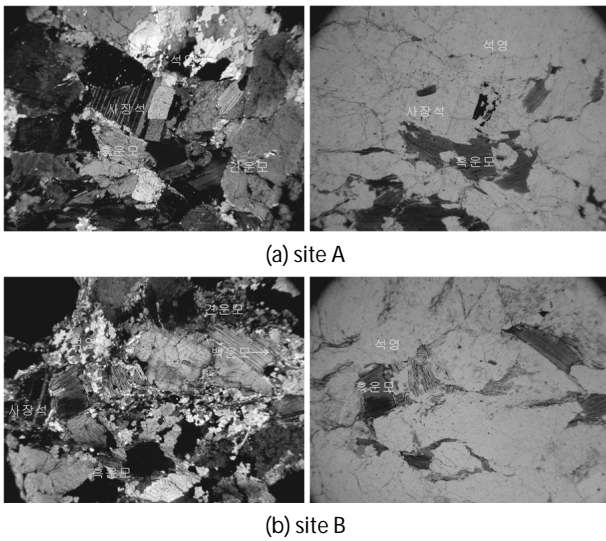


Fig. 2. Thin-section photomicrographs of gneiss under crossed polars(left) and opened(right)

암석 노두가 지표면에 비교적 넓게 노출된 상태로서 괴상의 암석 채취가 가능하였다. Fig. 2는 조사지역 편마암의 편광현미경 박편 관찰 결과를 보여주고 있다. 현미경 관찰 결과, 주 구성광물은 석영, 사장석, 흑운모이며 부 구성광물은 백운모, 견운모, 녹니석, 불투명광물로 이루어져 있다. 석영과 사장석, 흑운모 등의 광물에서 미약한 엽리가 형성되고 있으며 석영 내에 균열이 많이 발달해 있다. 석영은 세립 내지 중립의 결정 또는 재결정된 세립의 결정으로 산출된다. 사장석은 대부분 칼스바드-알바이트 쌍정을 나타내며 견운모작용에 의해 사장석 내에 세립의 견운모나 일부 백운모가 발달된 것이 관찰된다. A 지역 암석에서는 흑운모가 녹니석화작용으로 인해 녹니석으로 치환된 것이 관찰된다. 백운모는 2차광물로 나타나며 흑운모와 사장석내에 생성되기도 하였다. B 지역에서는 백운모와 흑운모가 교호하며 엽리면을 따라 발달해 있으며 암석내부에 미세균열이 관찰됨에 따라 동결-융해 과정에 대한 풍화에 민감하게 작용할 것으로 판단된다.

Table 1에는 조사지역 편마암의 광물 구성비를 나타내고 있다. 암석의 광물분석 결과, 이 지역의 편마암은 이방성이 큰 운모의 함량비가 높게 나타나고 있다. 운모의 함량이 높은 편마암은 엽리면을 경계로 이방성을 가지며 이 경계를 따라 암석의 변형이 발생하기

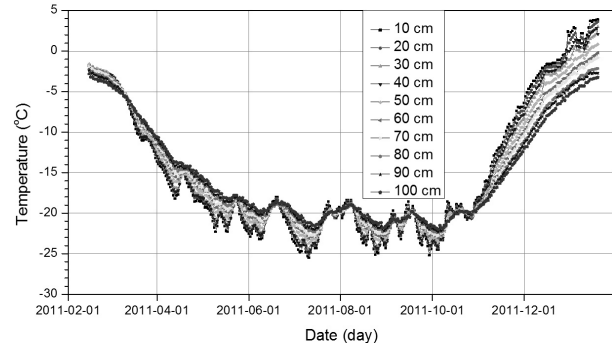
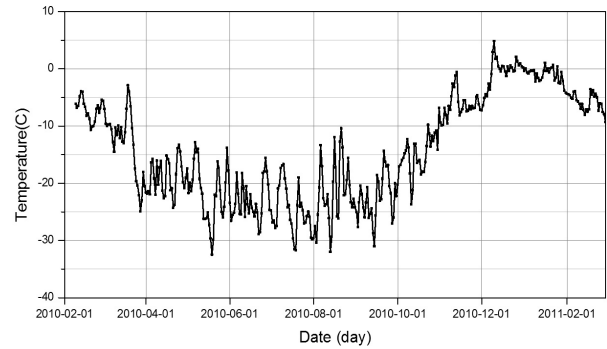


Fig. 3. Daily averaged air(a) and subsurface temperature(b) distribution in the study area

때문에 강도가 저하되며 풍화에 취약한 특징을 갖는다.

연구지역의 대기온도 및 동결-융해 횟수 분석은 인공풍화 실험과 자연풍화 실험간의 정량적인 암석의 특성 변화를 파악하기 위한 중요한 정보이다. 극지 암석의 풍화에 영향을 미치는 요인은 대기온도이나, 극지의 대기온도는 지표에 노출된 암석의 온도를 대변하지는 않는다(Debenham, 1921; Thorn, 1988). 극지 지표면 암석의 온도는 대기온도가 0°C 이하일 경우에도 태양 복사열에 의해 그보다 높은 것으로 나타난다(Hall, 1977).

장보고 과학기지 건설을 위해 연구지역의 대기온도 및 심도별 지중온도를 측정하였다. 대기온도는 2010년 2월 9일부터 2011년 3월 1일까지 1시간 단위로 측정하였다. 지중온도는 2011년 2월 15일부터 2012년 1월 19일까지 1일 2회, 심도 0.1 m부터 5 m까지 10~20 cm 간격으로 측정하였다(한국건설기술연구원, 2012). 지

Table 1. Representative mineral compositions of the gneiss in the study area

Site	Mineral (%)	quartz (%)	plagioclase (%)	microcline (%)	biotite (%)	muscovite (%)	sericite (%)	cholorite (%)	opaque mineral (%)
A		43.1	23.3	-	11.7	6.5	9.8	2.4	3.2
B		38.3	17.5	13.4	12.9	9.6	6.2	-	2.1
Average		42.3	19.4	11.8	11.5	7.3	8.3	2.4	2.6

중온도 측정지점은 심도 2.7 m까지 방하되적층으로 덮여있으며, 그 하부에 연암이 5.1 m 두께로 존재한다(김기주 등, 2012). Fig. 3은 암석의 동결-융해 심도 분석을 위하여 일평균 대기온도 및 심도 1 m 이내의 일평균 지중온도 분포도를 도시한 결과이다. 대기온도 분석결과 2010년 12월과 2011년 1월에 3일 이상 영상의 기온을 보이는 횟수가 3회로 기록되었다. 지중온도는 2011년 12월과 2012년 1월에 심도 0.5 m 이내의 지층에서 0°C 이상의 지중온도를 보이고 있다.

### 2.3 시험편 제작

암석의 인공풍화 실험용 암석채취는 노두에서 떨어진 암석 블록을 취하거나 모암에서 떼어내어 사용하였다. 인공풍화 실험을 위해 채취된 괴상 암석으로부터 실내 성형기를 사용하여 원주형 시험편을 제작하였다. 암석 시험편 제작은 암석시험 규격에 따라 제작되었으며(ISRM, 1981), 채취된 암석 양과 내부 균열 등에 의한 시료 성형의 문제점으로 43 mm×90 mm(직경×길이) 규격으로 성형하였다. 제작된 암석 시험편은 일축압축강도 측정을 위하여 풍화 등급별로 각각 15개씩, 초음파 속도 측정을 위해 풍화 등급별로 각각 5개씩 성형하였다. 또한 암석 표면의 쇼어경도 측정을 위하여 54 mm×25 mm(직경×길이)의 디스크 형태의 암석 시험편을 풍화등급별로 각각 5개씩 제작하였다. 시험에 사용된 암석 시험편은 43 mm×90 mm 규격이 40개이며 54 mm×25 mm 규격의 암석이 10개이다. 동결-융해시험에 사용되는 모든 시험편의 표면은 표면연삭기를 이용하여 암석의 상, 하단의 편평도 오차가 0.02 mm 이하가 되도록 성형하였다(ISRM, 1981).

암석의 풍화를 공학적으로 정량화하기 위해서는 암석의 역학적 물성 차이를 고려하여야 한다. 암석의 특성 변화는 시료에 포함된 균열 등의 여러 가지 불균질성이 암석의 역학적 특성에 영향(Fookes et al., 1971; Fookes et al., 1988; 백환조와 곽진철, 2000)을 주기 때문에 동결-융해시험에 의한 암석 특성의 정량적 변화를 파악하기 위해서는 암석의 풍화등급별로 분류할 필요가 있다. 암석의 풍화분류는 여러 연구자에 의하여 제시되었으며, 일반적으로 정성적인 방법과 정량적인 방법으로 구분할 수 있다(Dearman, 1976; Dearman et al., 1978). Irfan and Dearman (1978)은 암석의 상대적인 강도, 변색정도, 구성광물의 풍화상태 등에 의한 정성적인 방법을 사용하여 암석의 풍화등급을 분류하였다. 약한풍화(slightly weathered, SW) 암석의 특징은 신선한 암석에 비해 현저한 강도 저하는 나타나지 않으나, 불연속면이 열린 벽개면을 따라 변색되는 것이 나타나며 구성광물 입자는 치밀하게 맞물려 있으나 광물 표면에 미세균열이 발달하기도 한다. 보통풍화(moderately weathered, MW) 암석은 신선한 암석에 비하여 강도 저하가 현저하며, 변색이 암석내부로 진행되기도 한다. 입자간의

경계가 불분명하고 광물표면에 미세균열이 발달되고, 균열간격은 SW 암석에서 보여주는 것보다 넓어져 광물입자가 분리되는 특징을 가지고 있다. 본 논문에서는 Irfan and Dearman (1978)의 암석 풍화등급 분류 방법을 사용하여 암석의 풍화등급을 분류한 후 시험편을 제작하였다. 암반 풍화등급 분석 결과 연구지역 암석의 풍화등급은 SW 또는 MW로 나타났다. A 지역에서 채취한 암석의 경우 대부분 SW의 풍화상태가 많이 존재하며 일부 MW의 풍화를 보이기도 한다. B 지역에서 채취한 암석은 MW로 분류되었다.

## 3. 동결-융해에 따른 암석 특성 변화

### 3.1 동결-융해 설정

자연환경에서 발생하는 암석의 풍화는 대기, 물, 온도 등 여러 가지 요인이 복합적으로 작용하고 있기 때문에 인공풍화 실험에서 모든 조건을 고려하기는 매우 어렵다. 인공풍화 실험에서는 풍화에 영향을 미치는 주요한 몇 가지 요인을 선택하여 실시하게 되며, 자연계에서 발생하는 현상보다 극단적인 풍화 환경을 조성하여 풍화를 진행시키는 것이 일반적이다. 따라서 동결-융해시험에서의 온도 범위 및 시간 주기는 시험의 목적과 연구지역의 기온분포를 고려하여 설정할 필요가 있다.

동결-융해에 대한 시험법은 ASTM C-666, JIS A 6204 등에 콘크리트에 대한 동결-융해 시험법이 나와 있으나, 아직까지 암석에 대하여 규격화된 동결-융해 시험법은 없다. ASTM에 제안된 콘크리트 동결-융해시험 방법의 온도 범위는  $-17.8 \pm 1.7^\circ\text{C} \sim 4.4 \pm 1.7^\circ\text{C}$ 로 규정하고 있다. 동결-융해에 의한 암석의 풍화 특성 연구는 주로  $-20^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$ 의 온도 범위에서 시험을 실시하였다(Nicholson and Nicholson, 2000; 김성수와 박형동, 1999; 백환조와 곽진철, 2000). Fookes and Hawkins(1988)는 동결작용에 의한 암석의 강도 저하는  $-20^\circ\text{C}$ 에서 가장 큰 영향을 미치는 것으로 보았다. 백환조와 곽진철(2000)은 동결-융해에 의한 편마암의 물성 변화는 암석의 동결온도보다 암석 내부의 불균질성이 전반적인 물성 실험 자료에 영향을 미치는 것으로 판단하였다. 장현식 등(2004)은 연구지역의 10년간 동절기 기온을 분석하여 인공풍화와 자연풍화간의 상관관계를 규명하였으며 동절기 기온을 분석하여 동결-융해시험 온도를  $-20 \pm 2^\circ\text{C} \sim 15 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 설정하여 실험하였다.

본 논문에서 동결-융해시험을 위한 온도 범위는 기존연구에서 사용한 온도범위를 고려하여  $-20 \pm 2^\circ\text{C} \sim 20 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 설정하였다. 암석의 동결 및 융해 시간을 결정하기 위하여 43 mm×90 mm(직경×길이) 시험편 중간부분을 중심부까지 천공하여 온도센서를 삽입, 온도변화를 관찰하였다. 예비 실험 결과, 시험편 내부가  $-25^\circ\text{C}$ 까지 도달하는데 걸리는 시간은 약 4시간 정도 소요되었으며 상온으로

회복되는 시간 또한 약 4시간 정도 소요되었다. 본 실험에서 사용된 암석의 동결 및 융해속도는 약 10°C/hour로 추정할 수 있다. 동결-융해시험을 위하여 시험 시편은 수돗물에 침수된 상태에서 진공챔버를 사용하여 24시간 이상 강제포화 시켰다. 시편 동결시 암석 내부의 수분 증발을 억제하기 위하여 시편을 랩으로 밀봉시킨 후 동결하였다. 포화상태로 밀봉된 암석 시편을 -20 ± 2°C의 냉동고에서 5시간동안 동결시킨 후 20 ± 2°C의 상온의 물에서 5시간동안 융해시킨다. 이후 2시간 동안 진공챔버에서 강제 포화시키는 과정을 1 cycle의 동결-융해로 결정하였다. 이러한 동결-융해 과정을 20 cycle 반복할 때마다 암석을 105°C의 오븐에서 12시간 이상 건조시킨 후 공극률, 흡수율, 초음파 속도 및 쇼어경도를 측정하였다. 20 cycle마다 물성 측정을 수행한 후에는 수침된 암석을 진공챔버에서 24시간 강제 포화시킨 후 동결-융해 cycle을 반복시켰다. 일축압축시험은 50 cycle의 동결-융해 과정마다 3개의 시편을 완전 건조시킨 후 일축압축강도를 측정하였다.

테라노바 만 지역의 대기온도 분석 결과 3일 이상 영상기온을 유지하는 횟수는 연간 약 3회이며 이 지역 퇴적층을 이용한 지중온도 분석 결과 최소 1회 이상의 동결-융해를 받은 것으로 나타났다. 따라서 200 cycle의 동결-융해 과정은 조사지역 구조물의 장기적인 지반 안정성 검토에 충분할 것으로 판단하여 암석의 장기적인 특성 변화를 관찰하기 위한 동결-융해 반복 횟수를 200 cycle로 결정하였다.

### 3.2 암석의 물리적·역학적 특성 변화

암석의 경우 공극률이 높을수록, 구성입자가 클수록, 미세절리가 발달할수록 풍화가 촉진되며 암반 불연속면이 증가할수록 풍화 작용 표면적이 넓어져 암반 전체의 풍화가 가속된다(Fookes et al., 1988; Lumb, 1983; Onodera et al., 1974; Price, 1995). 편마암은 물성차이에 의해 풍화도가 명확하게 구분되는 것은 아니며 풍화정도의 차이에 따라 약간의 물성 변화를 보여주기(Brito, 1981; Serta, 1986; Barroso et al., 1993) 때문에 초기 자료로부터 암석 풍화등급 분류의 적정성을 확보할 필요가 있다. 암석내부의 불균질성 및 풍화의 영향은 공극률이나 흡수율의 변화와 이에

따른 초음파 속도의 변화 등으로 나타난다(Dearman et al., 1978). 초음파 속도는 암석 입자 자체의 성질과 내부의 불연속면의 분포 및 입자 결합상태를 간접적으로 반영하므로 물질의 변형특성은 물질 내부로 전파되는 초음파 속도에 의해 결정될 수 있다(Kolsky, 1953).

암석의 인공풍화 실험은 암석 내부에 발달한 미세균열이나 절리 등의 분포양상에 의해 역학적 특성에 차이가 발생할 수 있기 때문에 암석의 풍화정도에 따른 분류가 필요하다. 또한 편마암의 경우 편마구조에 의해 풍화대의 발달이 일어나기 쉽기 때문에 이러한 풍화등급을 고려한 풍화시험이 수행되어야 한다. 풍화등급이 높은 암석일수록 동일한 조건의 동결-융해에 의한 암석 강도변화가 크게 나타나기 때문에 암석의 풍화등급별 분류는 동결-융해에 따른 암석의 정량적 지수 설정에 중요한 역할을 한다.

#### 3.2.1 암석 초기 물성

동결-융해시험 전 측정된 암석의 초기값은 암석의 동결-융해 과정에 따른 공학적인 특성 변화를 정량적으로 확인하고 물성변화 정도를 지시하는 중요한 자료이다. 테라노바 만 지역 편마암의 공극률, 흡수율, 초음파 속도, 쇼어경도 및 일축압축강도 초기값을 Table 2에 나타내었다. 흡수율은 암석내의 유효 공극률의 정도를 나타내는 특성으로서 암석이 흡수할 수 있는 최대 물의 중량에 대한 암석 중량비이다(ISRM, 1981). 시험편의 건조중량과 진공챔버를 이용한 포화중량의 차이를 암석 건조중량으로 백분율(%)하였다. 암석의 초음파 속도 측정은 43 mm×90 mm(직경×길이) 규격으로 성형된 암석 시험편 양 끝단에 송수신기를 부착 후 100 kHz ~ 2 MHz의 파형을 송신기에서 발생시킨 후 수신기에 도달되는 지연시간을 기록하여 속도를 측정하였다. 쇼어경도 측정은 표면이 매끄럽게 연마된 54 mm×25 mm(직경×길이) 규격의 디스크 형태의 시험편을 제작하여 무게 4 g의 금강석 추를 25 cm 높이에서 자유낙하 시켜 튀어오른 높이로 경도를 측정하였다. 쇼어경도는 20회 측정된 반발값의 평균을 사용하였다.

암석 초기 물성 측정결과 풍화등급에 따라서 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 암석의 풍화등급 분류 적합성을 검토하기 위하여

**Table 2.** Range of rock properties of the pre-test sample specimens

Test type	SW rock			MW rock		
	Minimum	Maximum	Average	Minimum	Maximum	Average
Porosity (%)	0.4	0.82	0.61	1.31	1.92	1.58
Absorption (%)	0.15	0.31	0.23	0.49	0.73	0.6
P-wave velocity (m/s)	3,830	4,228	4,054	3,120	3,429	3,207
S-wave velocity (m/s)	2,298	2,663	2,519	1,956	2,163	2,028
Shore hardness	88	91	90	76	78	77
Uniaxial compressive strength (MPa)	165	187	178	90	127	110

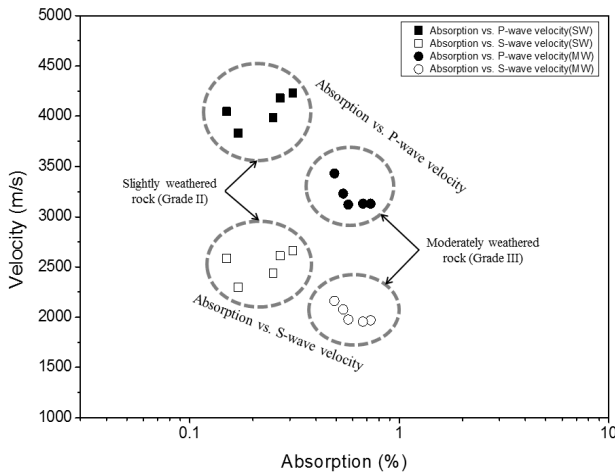


Fig. 4. Relationship between absorption and velocity of the rock specimen classified into SW and MW. The SW rock were illustrated in square colored black (Vp) and white (Vs) and the MW rock were illustrated in circle symbols.

각 암석 시편의 흡수율-초음파 속도 결과를 도시하여 풍화등급에 따른 특성을 비교하였다. Fig. 4는 동결-융해시험을 위한 시편의 흡수율-P파 속도 및 흡수율-S파 속도의 관계로서 SW 암석의 흡수율과 속도의 관계가 사각형으로 도시되었으며 MW 암석의 흡수율과 속도의 관계를 원으로 표현하였다. 흡수율과 P파 속도의 관계에서 암석의 풍화등급에 따라 두 암석의 물성차이가 뚜렷이 나타나고 있는 것을 확인 할 수 있다. 또한 흡수율과 S파 속도의 관계에서도 SW 암석과 MW 암석의 구분이 잘 나타나고 있다. 암석의 흡수율 또는 초음파 속도와 같이 단일 물성에 따른 풍화등급 구분은 그 경계가 모호하게 나타날 수 있는 반면, 흡수율과 초음파 속도의 교차 검토에서는 두 물성 경계에 따른 풍화등급의 차이가 보다 잘 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

### 3.2.2 암석 강도 특성 변화

동결-융해시험은 연구지역의 동일 물성을 가지는 암석에 대하여 광물조합과 균열 정도가 비교적 일정한 시료를 선별하여 시험한다. 일축압축시험은 시료의 재사용이 불가능하기 때문에 암석의 초기 상태가 유사한 시료를 다수 제작하여야 한다. 본 연구에서는 일축압축시험의 정확도를 높이기 위해서 시편 제작시 풍화정도 및 암석의 균열과 광물 분포가 유사한 암석 블록에서 시편을 제작하여 불확실 요소의 개입을 최소화하였다. 동결-융해 영향에 의한 암석 강도의 대표성을 확보하기 위하여 1회의 암석 파괴시험은 동일한 암석 시편 3개에 대하여 일축압축강도를 측정하는 방식을 사용하였다. 제한된 암석시편으로 인하여 200 cycle의 동결-융해가 과정동안 50 cycle 마다 일축압축강도를 측정하였다.

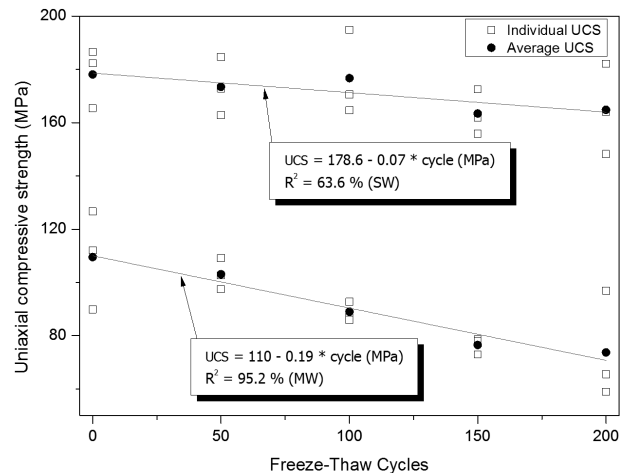


Fig. 5. Uniaxial compressive strength changes with freeze-thaw cycles SW and MW rocks

남극 테라노바 만 편마암의 일축압축강도 변화는 동결-융해가 200 cycle 진행되는 동안 SW 암석의 강도는 178 MPa에서 165 MPa로 변화하였으며, MW 암석은 110 MPa에서 74 MPa로 강도가 변화하였다. 암석의 동결-융해에 따른 강도 변화를 Fig. 5에 도시하였다. 초기값을 기준으로 볼 때 SW 암석의 경우 초기값에서 약 7%의 강도 저하가 발생하였으며, MW 암석의 경우 초기값에서 약 33%의 강도 저하가 진행되었다. 동결-융해가 지속될수록 암석의 강도가 감소하는 것을 볼 수 있으며 SW 암석에 비하여 MW 암석에서 강도 감소 기울기가 보다 크게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다. 이것은 풍화가 진행된 암석일수록 동결-융해에 의한 암석 풍화가 더 빠르게 진행되는 것을 의미한다.

쇼어경도는 20 cycle 동결-융해 과정을 반복할 때 마다 시험편을 건조시킨 상태에서 측정하였다. SW 및 MW 암석의 초기 쇼어경도 반발값은 90 및 77로 풍화등급에 따라 차이를 보이고 있다. 200 cycle의 동결-융해에 의한 쇼어경도 반발값의 변화는 SW 암석에서는 70으로 초기값의 약 22% 정도의 강도 감소가 나타났으며, MW 암석의 쇼어경도 반발 값은 53으로 초기값의 약 34%의 감소율을 보였다. Fig. 6은 200 cycle의 동결-융해에 의한 암석의 풍화등급별 쇼어경도 변화를 도시한 결과로서 암석의 강도 변화를 정량화하기 위하여 초기값에 대하여 표준화하여 나타내었다. 도시된 도형은 동일한 시편에서 20 cycle 마다 얻어진 표준화된 쇼어경도 반발값이다. 1 cycle의 동결-융해에 따른 SW 및 MW 암석의 강도 변화는 각각 0.11% 및 0.15%씩 반발력이 감소하는 것으로 나타났다. 또한 SW 암석에 비하여 MW 암석에서 암석 강도 변화 기울기가 더 크게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있으며 이것은 풍화가 진행된 암석일수록 동결-융해에 의한 풍화진행 속도가 더 가속화되는 것을 의미한다.

Table 3은 암석의 동결-융해 영향에 의한 일축압축강도 변화 및 정규화 된 쇼어경도 반발값 변화를 풍화등급별로 보여주고 있다. 암석이 1 cycle의 동결-융해 과정을 거치는 동안 SW 암석의 강도는 0.07 MPa의 강도 감소가, MW 암석에서는 0.2 MPa의 강도 감소가 발생하였으며, 쇼어경도는 1 cycle 마다 SW 암석에서는 초기값에서 0.11%씩, MW 암석에서는 0.15%씩 감소하였다.

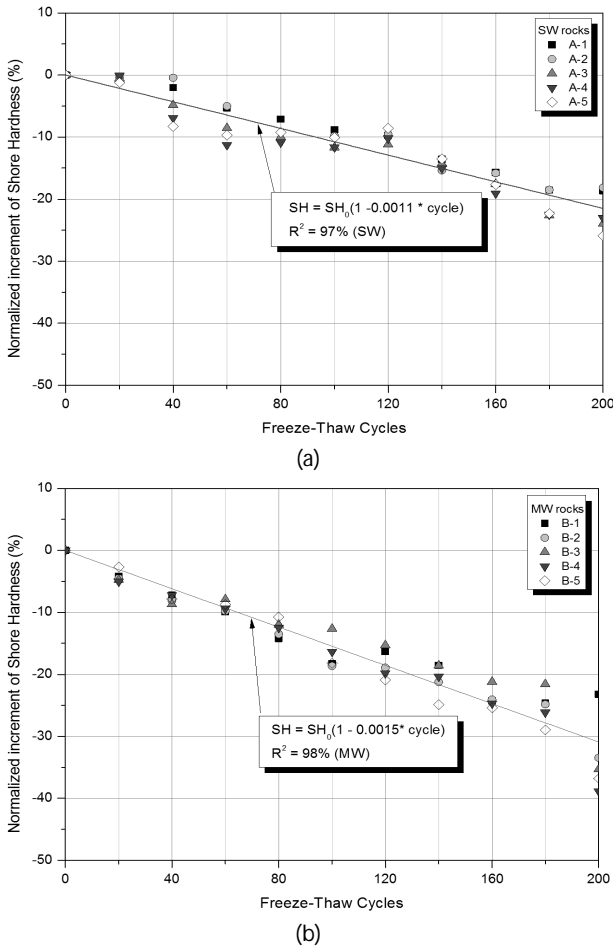


Fig. 6. Shore hardness changes with freeze-thaw cycles (a) SW and (b) MW rocks. The same symbols represent shore hardness measured from the same specimens

Table 3. Variation of rock strength and shore hardness due to freeze-thaw test

Test type	Weathering grade	Variation per cycle	R-square (%)
Uniaxial compressive strength (UCS)	SW	-0.07 MPa	63.6
	MW	-0.20 MPa	95.2
Shore hardness	SW	-0.11 %	97.1
	MW	-0.15 %	97.9

### 3.2.3 물리적 특성 변화

인공적인 풍화환경인 동결-융해시험에 의하여 나타난 흡수율 변화는 암석의 풍화등급에 따라 SW일때 초기 흡수율이 0.23%에서 200 cycle의 동결-융해를 거친 후 0.39%로 증가하였다. MW 암석의 초기 흡수율은 0.65%에서 200 cycle의 동결-융해 후 1.6%로 증가하였다. Fig. 7은 풍화등급에 따라 암석의 흡수율 변화를 초기값으로 정규화시킨 결과이다. 암석의 동결-융해 과정이 진행됨에 따라 모든 암석 시편에서 흡수율이 증가하고 있는 것을 알 수 있다. SW등급 암석의 경우 A-5 시편은 80 cycle 이후의 동결-융해 과정에서 흡수율이 크게 변화하고 있으며, 이러한 원인은 동결-융해 과정이 진행됨에 따라 시료내부에서 발생하는 균열이 점진적으로 발생하기도 하지만 특정 cycle에서 암석 내부의 균열이 크게 발달한 경우로 해석된다. 동결-융해에 의한 흡수율 변화 결과로 볼 때 SW 암석에 비하여 MW 암석의 흡수율 변화 기울기가 큰 값 보이고 있으며 풍화등급이 높은 암석일수록

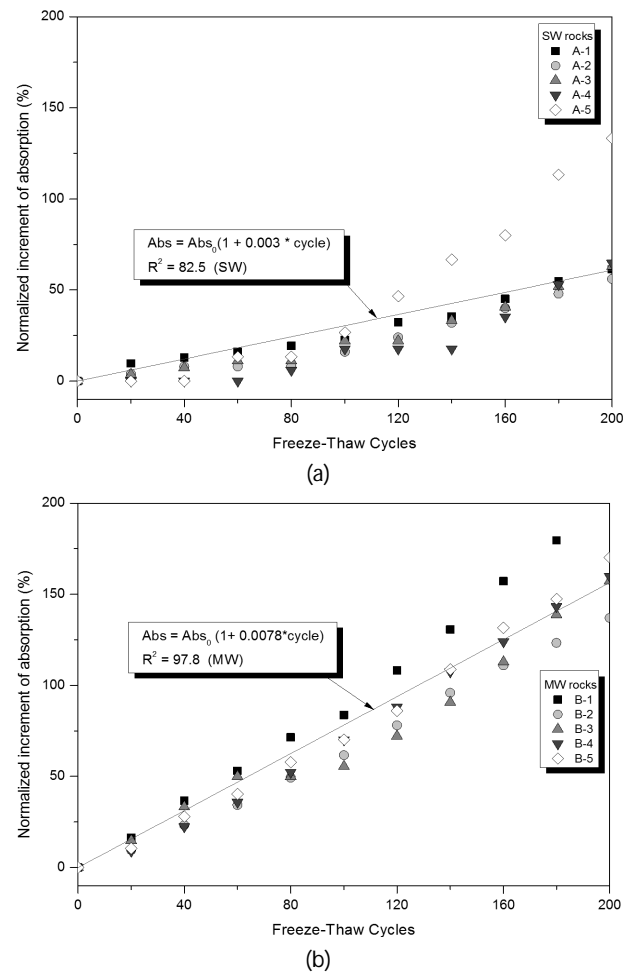
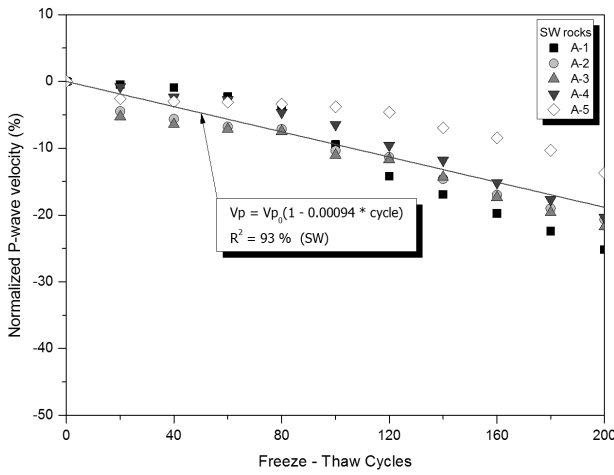
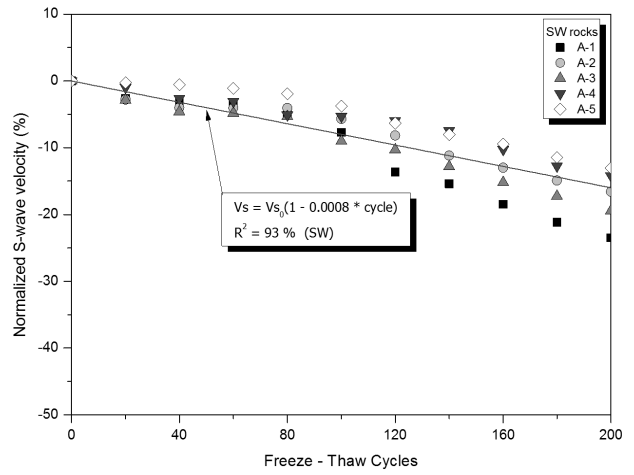


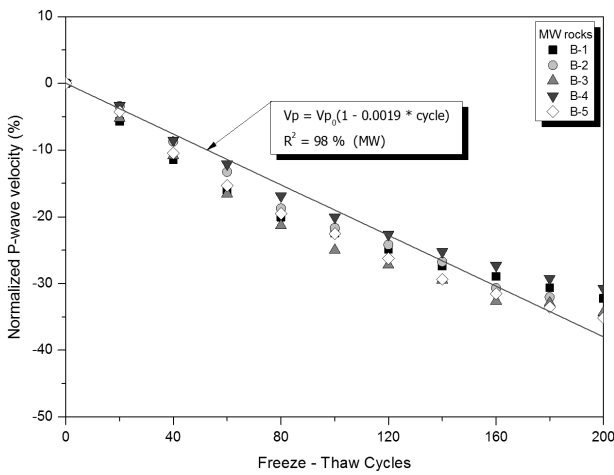
Fig. 7. Absorption changes with freeze-thaw cycles of (a) SW and (b) MW rocks (Abs denotes absorption)



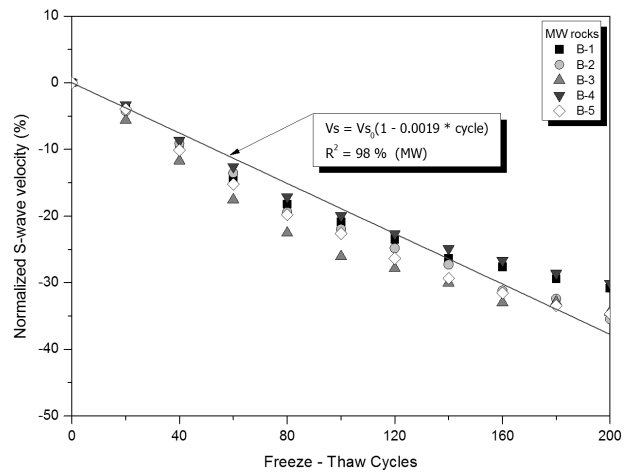
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 8. Normalized P-wave velocities with freeze-thaw cycles (a) SW and (b) MW

Fig. 9. Normalized S-wave velocities with freeze-thaw cycles (a) SW and (b) MW

동결-융해에 의한 흡수율 증가가 더욱 빠르게 진행되는 것으로 나타났다.

암석의 동결-융해가 200 cycle 진행되는 동안 SW 암석의 평균 P파 속도는 4,054 m/s에서 3,227 m/s로 감소하였으며 MW 암석의 평균 P파 속도는 3,207 m/s에서 2,134 m/s로 감소되었다. Fig. 8은 20 cycle 마다 측정된 P파 속도값을 초기값으로 정규화하여 도시한 결과이다. 동결-융해가 진행됨에 따라 P파 속도가 감소하고 있다. 동결-융해가 1 cycle 반복될 때마다 SW 암석에서의 P파 속도는 초기값에 대하여 0.09%(4.1 m/s)의 속도 감소가 발생하며 MW 암석에서는 0.19%(5.4 m/s)의 속도 감소가 발생하는 것으로 나타났다. Fig. 9는 동결-융해 과정에 따른 S파의 정규화된 속도 결과이다. SW 암석의 S파 속도는 2,519 m/s에서 2,079 m/s로 감소되었으며, MW 암석은 2,028 m/s에서 1,357 m/s로 속도가 감소되었다. 암석의 동결-융해가 200 cycle 진행된 후의

SW 암석과 MW 암석의 S파 속도변화는 초기값을 기준으로 할 때 각각 17% 및 33% 감소되었다. S파 속도의 변화량을 초기값에 대하여 정규화 시킨 결과 동결-융해가 1 cycle 반복될 때마다 SW 암석에서는 S파 속도가 0.08%(2.2 m/s) 감소되었으며, MW 암석에서는 0.19%(3.4 m/s)의 속도 감소가 발생하는 것으로 나타났다.

Table 4는 동결-융해에 의한 암석의 물리적 특성 변화를 보여주고 있다. 동결-융해에 따른 SW 암석의 흡수율 변화는 1 cycle 당 초기값에 대하여 0.3%의 흡수율이 증가되며 MW 암석은 초기값에 대하여 1 cycle 당 0.78%씩 흡수율이 증가되었다. 동결-융해 1 cycle 당 P파의 속도 변화는 SW 암석에서는 초기값에 0.09%씩 감소하며 S파는 0.08%씩 감소하는 것으로 나타났다. MW 암석에서는 1 cycle 마다 P파 및 S파의 속도는 0.19%씩 감소되는 것으로 나타났다.



**Table 4.** Variation of rock physical properties due to freeze-thaw test

Test type	Weathering grade	Variation per cycle	R-square (%)
Absorption	SW	0.30	82.5
	MW	0.78	97.8
P-wave velocity	SW	-0.09	92.9
	MW	-0.19	98.2
S-wave velocity	SW	-0.08	92.6
	MW	-0.19	97.9

### 3.3 인공풍화와 자연풍화의 상관성 분석

암석의 풍화 등급이 SW에서 MW로 변하는 시간을 동결-융해시험 결과로부터 산출할 경우 일축압축강도에서는 900 cycle 이상, 쇼어경도는 130 cycle, 흡수율은 450 cycle, 초음파 속도는 200 cycle 이상에서 풍화등급의 변화가 발생한다. 일축압축강도의 경우 자료의 편차가 큰 점을 감안할 때, 암석 내부의 균열 및 풍화상태와 밀접한 상관관계를 가지는 초음파 속도와 흡수율의 관계로부터 풍화등급 변화 기간을 유추해 볼 수 있다. SW로 분류된 암석이 200 cycle의 동결-융해 과정을 거치는 동안 MW 암석의 초기값에 근접한 물성값을 가지는 것으로 볼 때, 남극 테라노바 만에서 채취한 편마암이 동결-융해에 의해 SW 암석이 MW 암석으로 풍화되는 기간은 약 200~300 cycle이 소요되는 것으로 해석된다.

연구지역의 대기온도 및 지중온도 분석 결과 자연상태에서의 암석 동결-융해는 1~3회로 판단된다. 인공풍화 실험은 자연상태에서의 암석 동결-융해보다 극한 환경을 조성한 것이므로 일반적으로 1년 동안의 동결-융해 cycle의 회수는 인공풍화 방법이 자연상태보다 적은 것으로 본다. 자연상태의 암석은 인공풍화 실험 조건에 비하여 극한의 온도조건 및 해안의 영향으로 인한 염 결정화 작용에 의한 암석의 풍화를 감안 할 때, 자연상태와 인공풍화 실험간의 풍화 진행 정도의 차이는 거의 없는 것으로 판단할 수 있다.

## 4. 결론

남극 테라노바 만 지역 노두에서 채취한 암석에 대하여 동결-융해에 의한 암석의 풍화진행에 대하여 검토하였다. 지반공학적 특성 변화를 평가하기 위하여 일축압축강도, 쇼어경도, 흡수율 및 초음파 속도를 측정하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 테라노바 만 지역의 노출된 편마암은 흡수율-초음파 속도 관계에서 풍화등급에 따른 경계가 뚜렷이 나타났으며 주로 SW 및 MW의 풍화상태를 보이고 있다.
- (2) 풍화에 의한 암석의 물성 변화는 일축압축강도, 쇼어경도, 초음파 속도는 감소하는 경향을 보였으며, 흡수율은 증가하는 경향

을 보였다. 암석의 풍화등급에 따라 동결-융해에 의한 풍화진행 속도가 다르게 나타났으며, 풍화등급이 높을수록 풍화가 빠르게 진행되었다.

- (3) 암석의 일축압축강도는 동결-융해가 진행됨에 따라 가장 작은 폭으로 강도 감소가 감소하여 동결-융해 풍화에 강한 것으로 나타났으나 자료의 신뢰성이 낮으며, 흡수율, 초음파속도, 쇼어경도 순으로 동결-융해에 의한 풍화에 취약한 것으로 나타났다.
- (4) 암석의 풍화등급에 따른 동결-융해시험 결과 남극 테라노바만에서 채취한 편마암은 200~300 cycle의 동결-융해를 거치는 동안 SW 암석이 MW로 풍화되는 것으로 나타났다.
- (5) 연구지역의 연간 동결-융해 횟수는 1~3회로 추정되었으며, 연구지역의 자연환경을 고려할 때 자연상태의 1년은 인공풍화 실험에서의 1~3 cycle에 해당될 것으로 판단된다. 따라서 연구지역의 풍화등급이 SW인 편마암이 MW로 변하는 기간은 약 100~300년으로 예상된다.

본 논문에서는 동결-융해에 의한 암석의 장기적인 풍화특성 변화를 예측하였으며, 향후 남극 구조물의 장기적인 안전성을 확보하기 위해서는 풍화등급이 낮은 암석을 이용하여 풍화에 의한 암석 강도 변화 연구도 병행되어야 할 것이다.

## 감사의글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(극한지 지반평가 및 극한환경 모니터링 시스템 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## References

Baek, H. J. and Kwak, J. C. (2000). "Changes in the engineering geological properties of domestic gneisses due to weathering." *Journal of Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 37, pp. 262-271 (in Korean).

Barroso, E. V., Policanov, H., Prestes, A., Nunes, A. L. S., Vargas,

- E. A. and Antunes, F. (1993). "Basic properties of weathered gneissic rocks in Rio de Janeiro." *Geotechnical Engineering of Hard Soils-Soft Rocks*, Brazil, pp. 29-35.
- Bortz, S., Stecih, J., Wonneberger, B. and Chin, I. (1993). "Accelerated weathering in building stone." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 30, pp. 1559-1562.
- Brito, A. T. (1981). *Chemical and mineralogical study of a weathering profile in a migmatitic gneiss of the experimental site nr.1 at PUC-RJ*, MSc Thesis, Catholic University of Rio de Janeiro, Brazil.
- Dearman, W. R. (1976). "Weathering classification in the characterization of rock: a revision. Bulletin." *International Association of Engineering Geology*, Vol. 13, pp. 123-127.
- Dearman, W. R., Baynes, F. J. and Irfan, T. Y. (1978). "Engineering grading of weathered granite." *Engineering Geology*, Vol. 12, pp. 345-374.
- Debenham, F. (1921). "Recent and local deposits of McMurdo Sound Region In British Antarctic ('Terra Nova') Expedition, Natural History Report." *Ceology*, Vol. 1, No. 3, pp. 63-100.
- Fookes, P. G. and Hawkins, A. B. (1988). "Limestone weathering: Its Engineering Significance and a Proposed Classification Scheme." *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol. 21, pp. 7-31.
- Fookes, P. G., Dearman, W. R. and Franklin, J. A. (1971). "Some engineering aspects of rock weathering with field examples from Dartmoor and elsewhere." *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol. 4, No. 3, pp. 139-185.
- Fookes, P. G., Gourley, C. S. and Ohikere, C. (1988). "Rock weathering in engineering time." *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. Vol. 21, No. 1, pp. 33-57.
- Hall, K. (1997). "Rock temperatures and implications for cold region weathering I: New Data from Viking Valley, Alexander Inland, Antarctica." *Permafrost and Periglacial Processes*, Vol. 8, pp. 69-90.
- Irfan, T. Y. and Dearman, W. R. (1978). "Engineering classification and index properties of a weathered granite." *International Association of Engineering Geology*, Vol. 17, pp. 79-90.
- ISRM (1981). *Rock characterization testing & monitoring (ISRM suggested method)*, E.T Brown ed., Pergamon Press.
- Jang, H. S., Jang, B. A. and Lee, J. S. (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*, Vol. 14, No. 4, pp. 401-416 (in Korean).
- Kim, K. J., Kim, Y. S. and Hong, S. S. (2012). "Physical and mechanical characteristics of the Antarctic rocks exposed to the extreme environment." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 32, 6C, pp. 275-284 (in Korean).
- Kim, S. S. and Park, H. D. (1999). "A study on the change of rock properties using artificial weathering test." *Journal of Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 36, pp. 141-149 (in Korean).
- Kolsky, H. (1963). *Stress waves in solids*, Dover Publications Inc., Mineola, N.Y.
- Korea Institute of Construction Technology (2011). *Development of structural stability assessment and operation system for sustainable Antarctic research station construction(2)*, KICT2011-124 (in Korean).
- Korea Institute of Construction Technology (2012). *Development of structural stability assessment and operation system for sustainable Antarctic research station construction(3)*, KICT2012-099 (in Korean).
- Kyoya, T., Baek, Y. and Onda, C. (2000). "On deterioration of Oya-tuff in freezing-thawing cycle and its quantitative description." *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 652, pp. 103-114 (in Japanese).
- Lumb, P. (1983). "Engineering properties of fresh and decomposed igneous rocks from Hong Kong." *Engineering Geology*, Vol. 19, No. 2, pp. 81-92.
- 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, pp. 1295-1308.
- Onodera, R. F., Yoshinaka, R. and Oda, M. (1974). "Weathering and its relation to mechanical properties of granite." *Proceedings 3rd, International Congress of Society for Rock Mechanics*, Denver, Vol. 2A, pp. 71-78.
- Price, D. G. (1995). "Weathering and weathering processes." *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol. 28, No. 3, pp. 243-252.
- Serta, H. B. (1986). *Geological and geotechnical aspects of the residual soil from experimental site n.2 at PUC-RJ*, MSc Thesis, Catholic University of Rio de Janeiro, Brazil.
- Thorn, C. E. (1988). "Nivation: a geomorphic chimera. In: Clark, M. J., ed." *Advances in Periglacial Geomorphology*, John Wiley and Sons, Chichester, pp. 3-31.