

극지 암석의 역학적 특성 분석에 관한 연구 동향

류성훈¹⁾, 송재준²⁾*

Review of the Study on Mechanical Properties of Rock Under the Polar Climate Condition

Sunghoon Ryu, Jae-Joon Song

Abstract The polar region is in the limelight for an academic worth as well as plenty of natural resources. The study on the polar region was reviewed for better understanding of the polar region and its rock properties. The antarctica has a windy and dry climate along with the lowest temperature on the earth. The thermal distribution according to depth in the area was reported: The freezing-thawing process was repeated in shallow depth, and the temperature falls down below zero under the specific depth. There is a great temperature difference between the atmosphere and rock. A research reported for the degree of weathering of the antarctic slope by using Schmidt hammer and Taffoni test. The rock specimens weathered by repeated freezing-thawing process were tested of the shore hardness and uniaxial compressive strength: The rock strength gradually decreased as the freezing-thawing process was repeated. The comprehensive mechanical properties of the polar region rocks and the relationship between the laboratory weathering test result and the real rock property change in the site remain as future research topics.

Key words Polar region, Antarctica, Freezing-Thawing, Weathering

초 록 극지는 학문적인 가치뿐만 아니라 무한한 자원의 공급처로서 각광받고 있는 추세이다. 극지와 극지 암석의 암석역학적 특성을 이해하기 위하여 남극대륙의 암석을 포함하여 극지 환경 조건에서 진행된 암석의 물성 변화에 관한 연구를 살펴보았다. 남극대륙은 바람이 매우 강하고 지구상에서 가장 기온이 낮으며 건조한 지역이다. 남극 현지 암석의 심도별 온도분포를 조사한 연구에서는 지표면과 가까운 얇은 심도에서는 동결-용해 과정이 반복되는 한편, 특정 깊이 이하에서는 항상 0°C 미만의 온도 분포를 나타내는 것으로 보고 하였다. 현지 암석의 온도분포와 대기 온도를 비교해 보았을 경우 상당한 차이를 나타내었다. 남극 사면의 기후에 의한 풍화 정도를 알아보기 위하여 슈미트 반발경도와 taffoni의 분포를 조사한 연구가 있다. 그리고 실내 실험을 통해 암석 시료를 동결-용해 과정을 반복하여 풍화시킨 후 쇼어경도, 일축압축강도 등을 측정한 결과 동결-용해 횟수가 증가할수록 암석의 강도가 저하됨을 보고한 사례가 있다. 향후 극지암석에 대한 보다 상세한 암석역학적 물성 시험과 풍화에 관한 실내시험결과를 현장 암석의 물성변화에 적용시키는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

핵심어 극지, 남극대륙, 동결-용해, 풍화

1. 서 론

전 세계적으로 극지 연구의 필요성은 과학적, 산업적

측면에서 지속적으로 대두되어 왔다. 또한 극지 연구는 학문적인 연구가치 뿐만 아니라, 미래자원의 보고로서의 개발가능성에 대해서도 큰 의미를 지닌다. 우리나라의 경우 세종기지 건설 이후 남극활동이 비약적으로 발전하여 연구 분야와 지역이 확대되고 있다. 그에 일환으로, 지난 6월 22일 국토해양부는 제2남극기지의 명칭으로 '남극 장보고 과학기지(Jangbogo Antarctic Research Station)'를 선정하였으며, 장보고 과학기지는 남극 동남단에 위치한 테라노바 베이(Terra Nova Bay)에 2014년까지 완공될 예정이다.

¹⁾ 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 석사박사후합과정

²⁾ 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 부교수

* 교신저자 : songjj@snu.ac.kr

접수일 : 2010년 7월 16일

심사 완료일 : 2010년 8월 2일

게재 확정일 : 2010년 8월 23일

극지연구의 중심점이라 할 수 있는 남극대륙은 남극 해로 둘러싸인 남반구 최남단의 고립된 대륙이다. 남극 대륙은 그 주변의 해양과 더불어 자연 환경적, 과학적, 경제적, 정치적, 법적 측면에서 다양한 특징을 보여주고 있다(이방용, 1991).

한편, 남극대륙 대부분의 지역은 두꺼운 얼음으로 덮여 있다. 그리고 주변의 기압패턴과 지형적 특색으로 바람이 강하며 지구상에서 가장 기온이 낮고(연평균 기온 $-50^{\circ}\text{C} \sim -60^{\circ}\text{C}$) 건조한(연강수량 $30 \sim 70 \text{ mm}$) 자연환경과 더불어 하나의 독특한 기후군을 형성하고 있다(John, 1988).

여기에서는 제2남극기지인 장보고 과학기지 건설을 맞이하여 극단적인 환경하에 있는 극지 암석에 대해 그동안 국내외에서 진행되어온 주요 암석역학적 연구를 조사 분석하였다. 여기에서 얻은 결과는 향후 극지방 과학기지 건설과 극지 개발은 물론 암석역학적인 측면에서 앞으로 요구되는 연구의 방향을 설정하는데 도움이 될 것으로 생각한다.

2. 남극대륙의 자연환경

2.1 지형

남극대륙은 지구상에서 다섯 번째의 크기를 가진 대륙으로서 그 면적은 미국과 멕시코, 또는 중국과 인도를 합친 것과 같은 약 $1,350 \text{ 만 km}^2$ 에 이른다. 그리고 표면의 98%가 평균 두께 $2,160 \text{ m}$ 의 얼음으로 덮여 있어 “백색의 제 7대륙”으로 일컬어지고 있다.

한편 남극대륙은 로스해와 웨델해 그리고 로스빙붕과

필크너빙붕을 양끝으로 하는 남극횡단산맥(Transantarctic Mountains)을 중심으로 동남극대륙(East Antarctica)과 서남극대륙(West Antarctica)으로 구분 지을 수 있으며 동남극대륙이 서남극대륙에 비해 더 넓고 높으며 얼음이 더 두껍게 덮여 있다. 여름에는 남극대륙 전체의 약 2%인 $26 \sim 27 \text{ 만 km}^2$ 정도의 지면이 노출된다(Fig. 1).

동남극대륙의 중심부를 이루는 고원지대는 약 350 만 km^2 넓이의 고도 $3,000 \text{ m}$ 지역과 약 3 만 km^2 넓이의 고도 $4,000 \text{ m}$ 의 지역으로 구분할 수 있는데, 이 지역 모두는 얼음으로 덮여 있다(Oxman, 1978).

서남극대륙은 동남극대륙의 약 1/4의 크기로서 남극 횡단산맥으로부터 남극반도(Antarctic Peninsula) 끝까지를 일컬으며 마리 버드 랜드의 산악지대와 남극반도로 2개의 구조적 형태로 이루어져 있다(Campbell and Claridge, 1987).

서남극대륙의 기타 지역과 남극반도에서는 거의 모든 산들이 뾰족한 것이 특징이며 그 산 정상들은 보통 $2,000 \text{ m}$ 내지 $3,000 \text{ m}$ 의 고도로 분포되어 있다. 그중에서 남극대륙 최고의 단일봉인 빈슨매시프($5,140 \text{ m}$; $78,6^{\circ}\text{S}$, $85,4^{\circ}\text{W}$)는 서남극대륙의 엘스워스 산맥에 위치하고 있다.

서남극대륙의 중심부인 마리 버드 랜드는 고도 $1,500 \text{ m}$ 정도로서 동남극대륙에 비해 낮으며 얼음 두께가 $2,000 \text{ m} \sim 3,000 \text{ m}$ 에 달하므로 지반의 대부분은 해면 아래에 있다.

남극반도는 길이가 약 $1,287 \text{ km}$ 로서 동쪽에 웨델해와 서쪽에 벨링스하우젠해와 연해 있으며 해안이 험하여 상륙할만한 곳이 거의 없는 것이 특징이다. 남극반도 내륙은 산이 많고 일부 산들은 고도 $2,000 \text{ m}$ 내지 $3,050 \text{ m}$ 에 달한다. 그리고 해안선을 형성하는 대부분의 험하고 가파른 산정상과 절벽을 제외하면 거의가 육중한 빙하로 덮여 있다.

2.2 기후

2.2.1 남극대륙의 전체적 특징

남극의 기후는 지구상의 어느 지역보다도 가장 극단적인 면이 있다.

남극대륙은 평균 $2,160 \text{ m}$ 의 두꺼운 얼음으로 덮여 있고 지구상에서 가장 춥고 강한 바람이 불며 특히 내륙의 고원지대는 연중 강수량이 극히 적기 때문에 사하라 사막과 더불어 세계에서 가장 커다란 건조지대로 분류되고 있다.

또 하나의 차이점은 지구-태양간의 거리가 가장 가까울 때가 남반구의 여름이란 것이다. 이 사실은 북반구의 한여름 기간 동안에 북극 지역에 입사하는 태양복사열보다도 남반구 여름일 때 남극대륙에 약 7%의 더 많

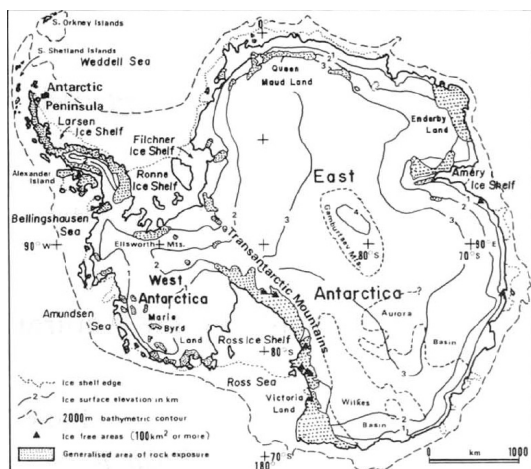


Fig. 1. Generalized distribution of ice and rock in Antarctica (after Elliot 1975)

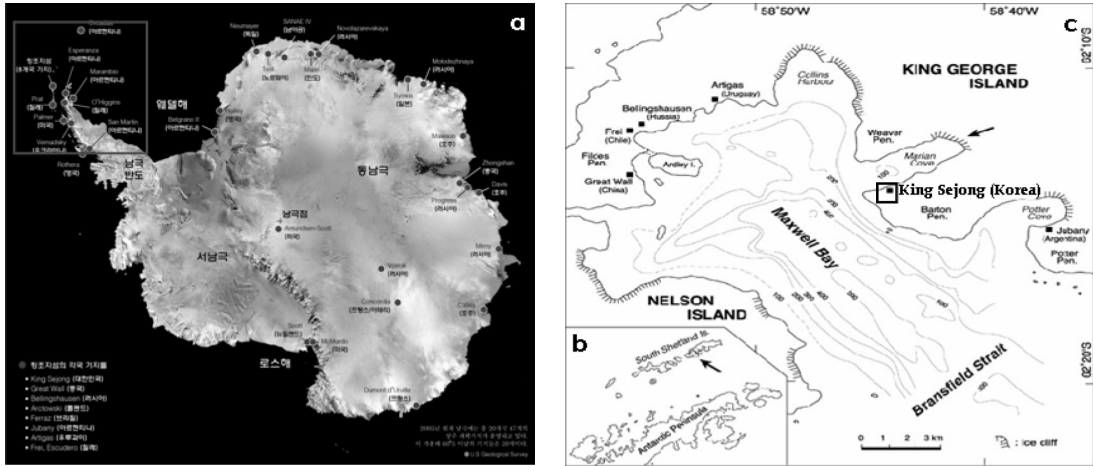


Fig. 2. The location of King Sejong Station (62°13'S, 58°47'W) in the King George Island (c), Antarctic Peninsula (b), Antarctica (a) (이방용 외, 2006)

은 태양복사열이 입사되는 결과를 야기한다.

기온의 경우, 남극대륙에서는 봄과 여름(12, 1, 2월)에는 현저한 변화(남극대륙의 내륙의 경우 최대 10°C)를 보이고, 겨울(6, 7, 8월)에는 1°C정도로 뚜렷한 차이가 없다. 기온의 극값은, 남극대륙의 해안지역에서는 여름에 최고 9°C부터 겨울에 최저 -30~-40°C의 기온 분포를 보이며 로스해와 웨델해 내륙쪽 고위도 지역에서는 이보다 훨씬 낮은 기온(웰스워스 10월 -56.7°C)이 기록되기도 한다. 남극대륙에서 관측된 최저기온은 1983년 7월 동남극의 소련 보스토크(78°27'S, 106°52'E, 고도 3,488 m)지에서 기록한 -89.6°C이었다(Bonner and Walton, 1985; ANARE, 1988).

2.2.2 남극 세종기지 근방의 기후

위에서 살펴본 바와 같이, 남극 대륙의 기후는 시간적, 공간적 변동이 크기 때문에 연구하고자 하는 곳의 국지적인 기후 특징을 이해하는 것이 필요하다. 예를 들어, 남극 세종기지가 위치해 있는 서남극대륙 남극반도의 경우, 연평균 기온이 약 -2°C이지만, 남극점의 경우 약 -40°C에 달한다. 그러므로, 추후 남극연구의 접근가능성이 가장 큰 현재 남극세종기지가 위치한 62°13'S, 58°47'W 지점의 기후에 대하여 알아보았다.

Fig. 2와 같이, 남극 세종기지(62°13'S, 58°47'W)는 서남극의 남극반도 주변의 남셰틀랜드 군도(South Shetland Islands)의 킹 조지섬 연안에 위치한다. 기후학적으로는 고위도 저압대에 속하며 대체로 중위도 편서풍 지역으로부터 유입되는 비교적 온난한 해양성 한대 기단과 남극 대륙으로부터 차고 건조한 남극 기단이 만나 남극

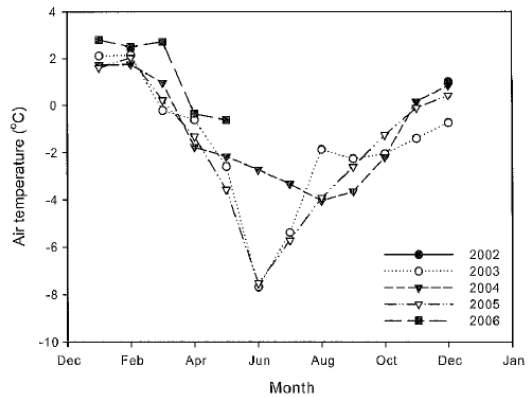


Fig. 3. Monthly averaged air temperature from December 2002 to May 2006 (최태진 외, 2006)

전선이 형성되는 곳이다. 1988년부터 2004년까지의 관측 자료에 근거하면 평균기온은 여름(12,1,2월)에 1.7°C, 겨울(6,7,8월)에 -5.0°C로 연평균 -1.6°C이며 연교차는 7.6°C로 나타난다. 기온 분포를 월별로 좀 더 자세히 살펴보면 Fig. 3과 같다. 월 평균 기온의 변동 폭은 -7.7°C~2.8°C 임을 알 수 있다. 운량(n, oktas)은 세종기지가 남극 전선대에 속해 있으므로 연평균 6.7(서울 4.0)로 나타나 완전 흐린 날씨(7≤n≤8)가 전 날씨의 60%를 차지하고 있다. 연평균 강수량은 540.6 mm로 봄에 107.3 mm로 제일 적고 여름이 166.0 mm로 제일 많다. 연평균 풍속은 8.0 m/s로 비교적 강하며 계절에 따른 변화가 거의 없고 풍향은 주로 여름에 북서풍계가 겨울엔 남동풍계가 우세하게 나타나지만 전반적으로 탁월풍은 북서풍계이다.

세종기지에서 태양 고도가 제일 높은 값은 동지 남중 시간에 약 50°(서울 하지 77°, 동지 30°)이다. 따라서 가조시간은 동지 때 약 19시간, 하지 때 약 5시간(서울 하지 15시간, 동지 9시간)이 된다. 전천 일사량과 전 자외선 복사량(1996-2004)의 연평균 값은 81.8 Wm⁻²와 5.7 Wm⁻²로 각각 나타났다.

2.2.3 남극 암반의 심도별 온도분포

남극에 존재하는 암반은 생성 초기부터 지금까지 남극의 독특한 기후에 영향을 받아 왔다. 따라서 심도별 온도분포 또한 기준에 알고 있는 양상과는 다른 분포를 띠 것이다. 그러한 이유로 남극 기후에 노출되어 있는 암반의 온도를 관찰한 다음과 같은 결과가 있다.

Han and Jung(1994)은 남극의 여름에 해당하는 1991년 12월~1992년 2월 기간 동안 세종과학기지내 하계 연구동과 기상관측소 사이의 1개 시추공에서 연구자가 설계, 제작한 geodata logger를 이용하여 지표면 상부의

온도 및 지하 암반의 온도를 측정하였다. 지상에서 지하로(지표면을 기준으로 +는 지상, -는 지하) +28 cm, +8 cm, -12 cm, -32 cm, -52 cm에 각각 설치한 6개의 resistive sensor에서 매 1분마다 자동적으로 동시 측정하였다. 측정된 결과는 Fig. 4와 같다. 이를 통해 지표면 근방의 기온은 0°C를 넘나드는 반면에, 지하 심도 32 cm부터는 항상 영상의 온도를 유지하는 것을 알 수 있다.

남극 세종기지에서 측정된 심도별 자료가 심도가 매우 얇다는 한계가 있는 것에 반해, 일본 쇼와기지에서 측정된 사례(NAGAO et al., 1985)에서는 약 8 m 깊이까지 측정하였다. Fig. 5b는 동남극에 위치한 일본 쇼와기지(69°00'S, 39°35'E)에서 1981년 4월부터 1985년 1월까지 측정된 자료이다.

깊이(지표면 기준)에 따른 보어홀의 평균 온도를 살펴보면 4 m, 6.8 m(Borehole No.2)에서 각각 -8.242°C, -8.220°C를 나타내었고 2 m, 5 m(Borehole No.1)에서

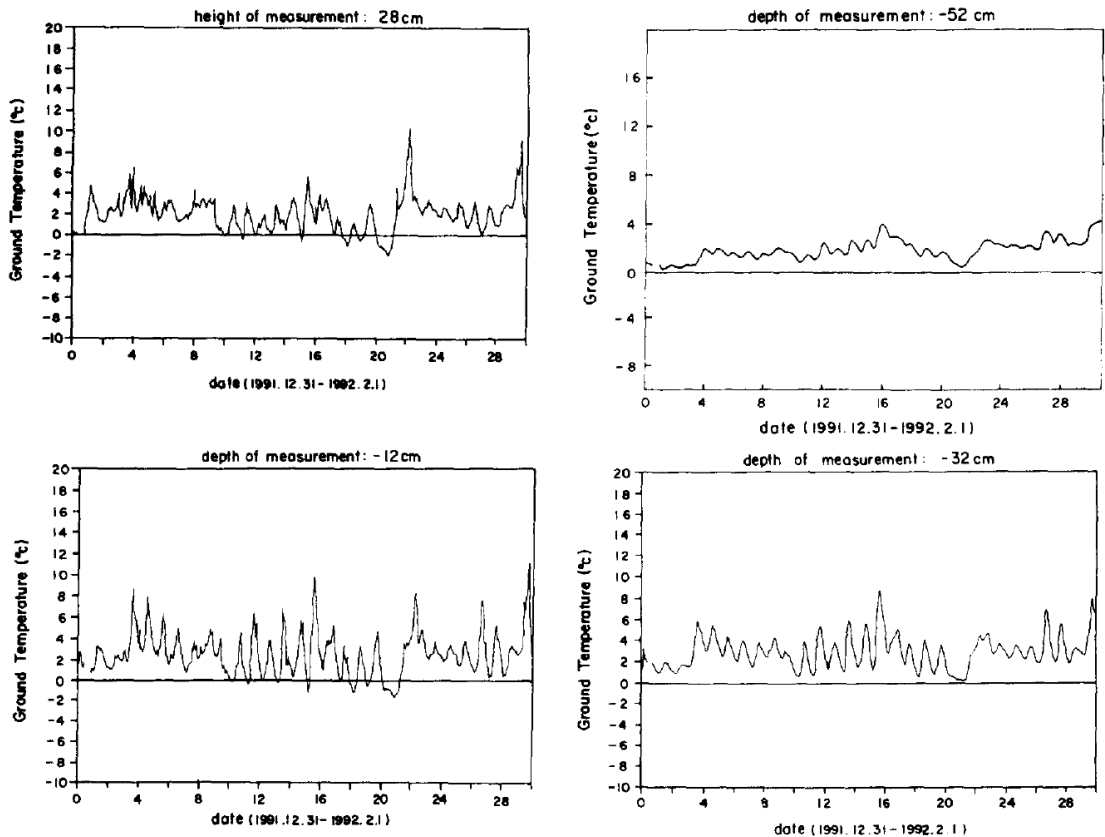


Fig. 4. Surface temperature variations at the height of 28 cm, -12 cm, -32 cm, and -52 cm, respectively (Han and Jung, 1994)

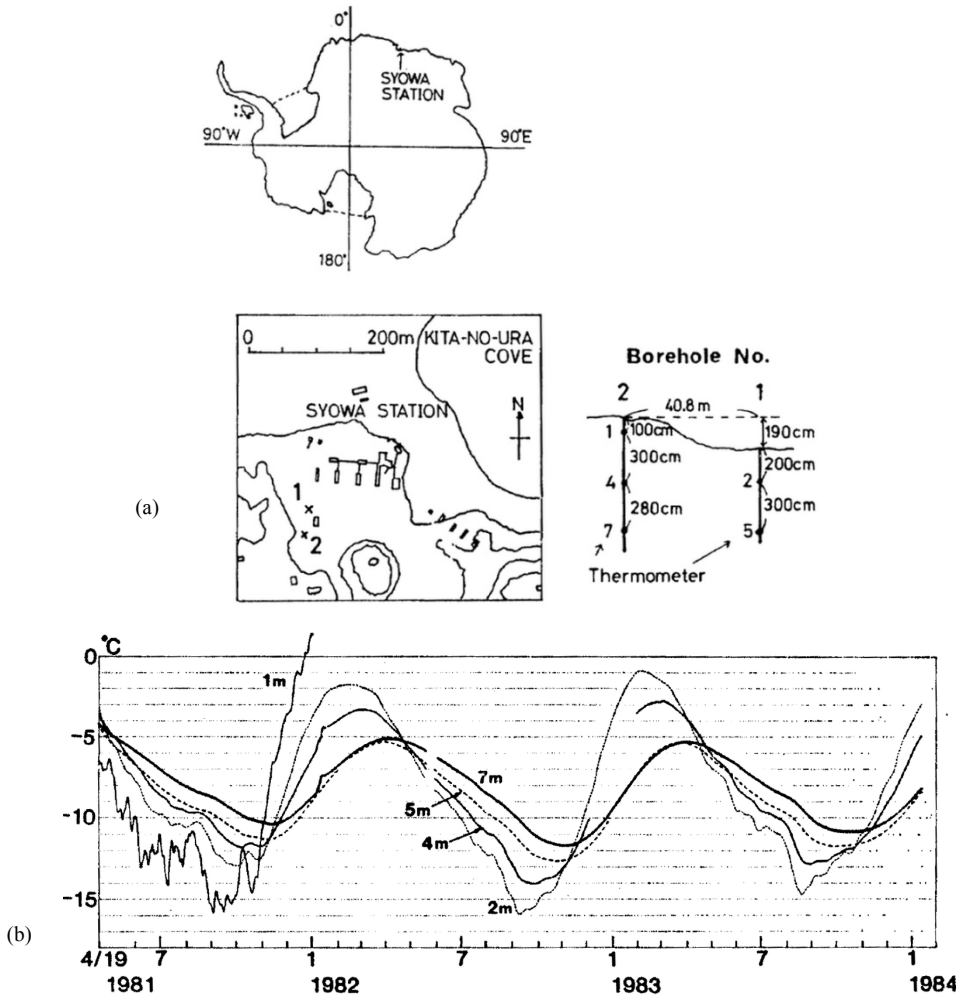


Fig. 5. Locations of the boreholes and sensor Installation (a), Observed data for the period from April 1981 to January 1984 (b) (Toshiyasu et al., 1985)

는 각각 -8.181°C , -8.843°C 를 나타내었다. 해당 기간의 평균 대기온도가 -10.8°C 임을 고려하면 측정된 지하온도가 약 2.6°C 정도 높음을 알 수 있다. 한편, 쇼와기지의 경우 측정 기간 동안 심도 2 m이상의 온도를 살펴보면 항상 영하의 온도를 나타냄을 알 수 있다. 0°C 를 기준으로 변동이 심할 것으로 예상되는, 심도 1 m의 온도 자료는 1982년도 이후부터 측정 장비의 고장으로 인해 측정되지 못하였다. 쇼와기지에서 1980년 4월부터 1981년 1월까지 측정된 자료에 의하면(SHIBUYA et al., 1982) 계절에 따른 심도 5 m, 10 m, 20 m에서의 온도변화폭은 5.47°C , 1.58°C , 0.20°C 로 나타났고 0.01°C 이하가 되는 심도는 33.8 m 일 것으로 예측하였다.

최근자료를 살펴보면, 국제 극지의 해(IPY, International Polar Year)인 2007년부터 2009년 기간 동안 영구동토층(permafrost, 2년 이상 계속해서 0°C 이하의 온도를 유지하는 영구적으로 얼어 있는 땅)과 활동층(active layer, 영구 동토층 상부에서, 겨울에는 얼고 여름에는 녹으면서 부피가 변하는 부분)을 모니터링하기 위해 많은 수의 borehole을 굴착하였고 대표적으로 Fig. 6과 같은 결과(Vieira et al., 2010)를 얻을 수 있었다. Fig. 6에서 나타내어지는 깊이는 활동층의 깊이를 나타내고 가운데 선이 평균 온도, 좌우에 있는 선이 최소최대 온도를 나타낸다. 지역마다 정도의 차이는 있지만 지표의 온도는 0°C 를 기준으로 동결-융해 과정을 겪음을 알 수 있다.

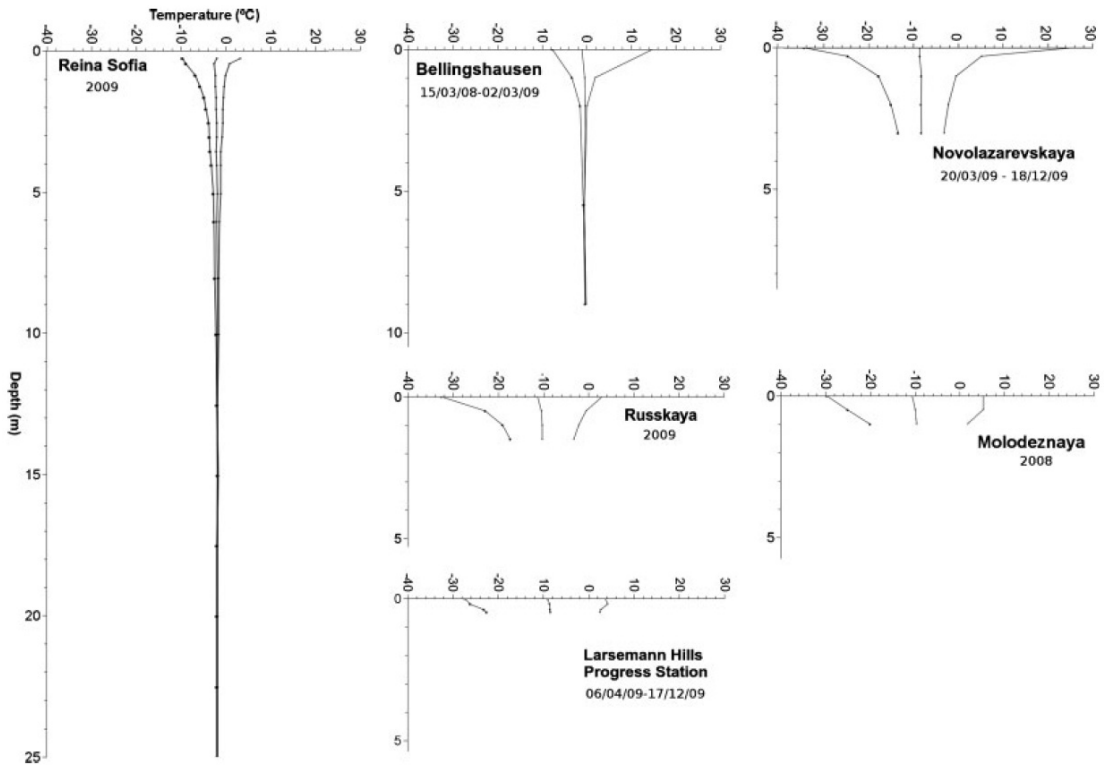


Fig. 6. Temperature versus depth profiles for selected Antarctic IPY boreholes (G. Vieira et al., 2010)

3. 남극의 기후에 노출된 암석의 풍화작용

극지 암석의 풍화에 영향을 미치는 가장 큰 요인은 대기온도라고 알려져 있으나, Debenham(1921)과 Thorn (1988)은 대기온도가 지표에 노출된 암석의 온도를 대변할 수 없다고 하였다. 이러한 점에 착안하여 Hall(1997)은 다음과 같이, 극지에 위치한 대기에 노출된 암석의 표면온도를 분석하고 그에 따른 풍화정도를 연구하였다.

알렉산더 군도(Alexander Island, 71°50'S, 68°21'W)의 남쪽 끝에 위치한 바이킹 밸리(Viking Valley)에서 여름과 겨울동안 다양한 위치에서 지표에 노출된 암석의 온도를 2분 간격으로 측정하였다. 이 지역은 강수량이 매우 적고 여름 평균 기온은 -2.5°C, 겨울 평균 기온은 -11.5°C이다. 지반은, 사암, 역암, 점토질 퇴적암으로 구성되어 있고 이암, 세일성 이암, 암영이 직교하는 규암질 사암도 분포하고 있다. 지배적인 구성암석은 석영질 사암이다. 이러한 퇴적암들은, 수평 혹은 거의 수평으로 층을 이루고 있다. 한편, 활동층의 두께는 보통 0.3~0.4 m의 두께로 분포하였다(Meiklejohn, 1995).

Fig. 7은 1993년과 1994년 여름의 대기온도와 지표

Table 1. Analysis of the temperature data for the periods of across 0°C oscillations for 1993 and 1994 (Hall, 1997)

| | Air 1993 | Rock 1993 | Air 1994 | Rock 1994 |
|-------------------------|-----------------|-----------|----------------|-----------|
| Mean | -2.65 | 1.51 | -4.31 | 0.54 |
| <i>s</i> | 2.64 | 4.61 | 2.93 | 5.19 |
| Range | 14.54 | 29.91 | 17.94 | 30.06 |
| Min. | -9.87 | -8.29 | -14.28 | -8.72 |
| Max. | 4.67 | 21.62 | 3.66 | 21.34 |
| Cycles 0°C ¹ | 14 ² | 46 | 7 ³ | 51 |
| Cycles -2.5°C | 22 | 20 | 23 | 39 |
| Cycles -5°C | 8 | 2 | 20 | 15 |

¹ Freeze-thaw cycles derived from the record in Figure 7 using thresholds of 0°C, -2.5°C and -8°C.

² From 51 days of record (13 January to 4 March 1993).

³ From 53 days of record (15 January to 8 March 1994).

면에 노출된 암석의 온도를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 알 수 있듯이, 대기 온도와 암석표면의 온도는 절

대적 수치가 다를 뿐만 아니라 경향도 다름을 알 수 있다. 대기온도보다 암석온도가 최고 15°C 이상 높은 것을 알 수 있는데, 이는 태양의 복사열에 의한 것으로 생각된다. Table 1을 보면 1993년 여름의 경우 대기와 암석

표면의 평균온도는 각각 -2.65°C, 1.51°C이고 최고온도는 각각 4.67°C, 21.62°C로 나타났다. 그리고 대기의 경우 0°C 이상의 기온을 기록한 날이 몇 차례에 불과하였으나, 암석표면의 경우 대부분임을 알 수 있으며 0°C를

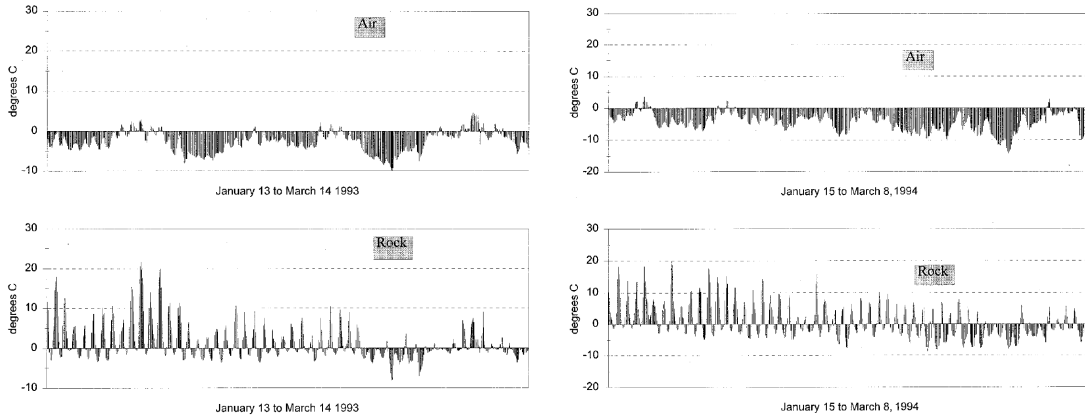


Fig. 7. Detail of the late summer through to early winter period of the air and rock temperatures (at one hour intervals) (Hall, 1997)

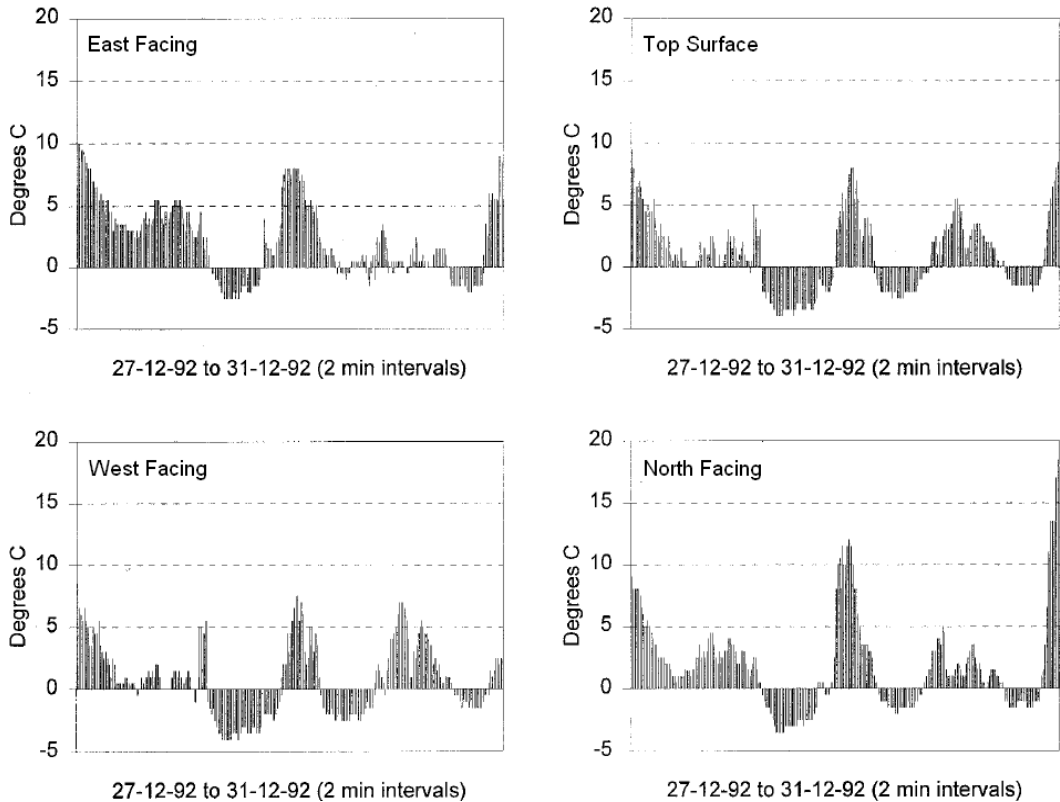


Fig. 8. An example of a five day record of temperatures for east, west and north aspects, together with a horizontal surface, collected at two minute intervals (Hall, 1997)

기준으로 기온의 오르내림도 훨씬 잦은 것을 알 수 있다. Table 1을 좀 더 자세히 살펴보면 1994년은 1993년에 비해 혹한의 조건으로 더 낮은 대기온도(각각 -2.65°C , -4.31°C)와 많은 동결-융해 횟수(-5°C 를 기준으로 각각 2회, 15회)를 보여준다. 이러한 점은 자료를 취득함에 있어 단기간의 자료만을 취했을 경우 초래하게 될 위험성을 보여준다.

Fig. 8은 사면의 방향에 따른 온도변화를 나타낸 그림이다. 0°C 를 기준으로 동향사면은 동결-융해 과정을 8번 겪었고 서향사면은 7번, 수평면은 5번, 마지막으로 북향사면은 오직 4번만을 겪었다. 이와 같이 사면의 방향에 따라 서로 다른 온도분포와 변화 모습을 보여주는데, 이는 역시 태양복사에너지와 연관이 있을 것으로 생각된다. Table 2에 나와 있는 측정 결과를 살펴보면, 태양복사에너지의 입사각이 가장 큰 북향사면이 가장 높은 온도와 변화 폭을 보여주었다. 그러나 평균온도는 동향사면이 가장 높은 값을 보여주는데, Hall(1997)은 이러한 원인을 동향사면이 보다 긴 태양복사에너지에 노출되기 때문이라고 논하였다.

네 가지 방향 사면의 풍화 정도를 알아보기 위하여, 슈미트 해머와 taffoni의 크기를 측정해 보았다. Taffoni는 교결물질의 풍화로 인해서 자갈만 빠져나간 형태를 말한다. Table 3에서 알 수 있듯이, 슈미트 해머 값은 북향사면이 가장 낮게 나왔고 그 다음은 서향사면이었다. Taffoni의 크기를 측정한 결과 역시, 북향사면이 가장 크

Table 2. Analysis of temperature data for north-, east- and west-facing exposures together with a horizontal surface for the per-iod 27 to 31 December 1992 ($^{\circ}\text{C}$) (Hall, 1997)

| | Mean | <i>s</i> | Range | Min. | Max. |
|--------------|------|----------|-------|------|------|
| Ease-facing | 2.07 | 2.953 | 12.5 | -2.5 | 10.0 |
| West-Facing | 0.65 | 2.759 | 12.5 | -4.0 | 8.5 |
| North-facing | 1.74 | 3.759 | 23.5 | -3.5 | 20.0 |
| Horizontal | 0.77 | 2.869 | 14.5 | -4.0 | 10.5 |

Table 3. Schmidt hammer and taffoni measurements (Hall, 1997)

| | Schmidt | | Taffoni (cm) | | | | | |
|--------------|-------------|----------|--------------|----------------|-------|----------------|--------|-----------------|
| | \bar{x}^1 | <i>s</i> | Depth | Depth <i>s</i> | Width | Width <i>s</i> | Height | Height <i>s</i> |
| North-facing | 15 | 2.6 | 11.0 | 7.6 | 27.9 | 29.8 | 10.9 | 7.9 |
| Ease-facing | 22 | 2.7 | 3.7 | 2.1 | 5.5 | 2.9 | 4.4 | 2.9 |
| West-Facing | 20 | 3.1 | 12.3 | 6.2 | 22.8 | 9.6 | 11.1 | 3.9 |

¹ Schmidt hammer rebound value (type N hammer).

고 그 다음은 서향사면이었다. 동향사면이 가장 많은 동결-융해 과정을 겪은 것과는 상반되는 결과이다. Hall(1997)은 이러한 원인으로 북향사면과 서향사면이 Cryoplanation Terrace 지형임 언급했다. 이 지형은 빙하의 침식작용에 의해 생성되는 지형을 말하는데, 생성되는 지형의 경사방향이 250° 에서 360° 사이, 즉 북향 혹은 서향사면을 띤다. Cryoplanation Terrace 지형의 풍화의 원인은 아직 명확히 밝혀지지 않았지만, 동결-융해 과정, 눈 혹은 수분 등에 의해 풍화가 진행되는 것으로 연구되고 있다.

4. 동결-융해 과정에 의한 암석의 풍화

위에서 살펴본 온도변화 양상에서 알 수 있듯이, 남극과 같은 극지 기후에 노출된 암석은 심도와 위치관계에 따라 그 횟수는 다르지만 0°C 를 기준으로 동결-융해과정을 지속적으로 반복하고 있다. 생성될 때부터 현재까지 동결-융해 과정을 거치면서 그에 따른 풍화가 진행될 것임은 자명하므로 이에 초점을 맞춘 연구들이 진행되고 있다. 그러나 아직까지 극지의 실제 암석을 대상으로 한 동결-융해 실험이 진행된 바는 발표되지 않고 있다. 따라서 일반적인 암석을 대상으로 한 동결-융해에 따른 암석의 풍화를 연구한 사례를 살펴보고자 한다.

4.1 반복적인 동결-융해 과정에 따른 암석의 고결성 상실(integrity loss)

Mutlutürk et al.(2004)는 반복되는 동결-융해 과정에 따른 암석의 고결성 상실(integrity loss)을 나타내기 위해, 쇼어경도를 그 척도로 사용하여 실험하였다. 동결-융해 반복 횟수는 9개(0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50회)로 나누어 각기 다른 10가지 종류의 암석을 대상으로 쇼어경도를 측정하였다. 실험에 사용된 10가지 암석의 종류와 기본적인 물성은 Table 4에 나타나있다. 동결-융해과정은 -20°C 상태로 2시간, 물에 담근 채로 20°C 에서 2시간을 반복 시행하였다. Table 5는 10가지 암석의 실험 전 쇼어경도를 나타내며 Fig. 9는 반복횟수에 따른

Table 4. The physical properties of the rocks used in this study (Mutlutürk et al., 2004)

| Rock no. | Rock class | Rock type | Unit weight | | Density (g/cm ³) | Effective porosity (%) | Total porosity (%) | P-wave velocity (km/s ²) |
|----------|-------------|----------------|--------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------|--------------------|--------------------------------------|
| | | | Dry (kN/m ³) | Saturated (kN/m ³) | | | | |
| 1 | Sedimentary | Limestone-I | 26.88 | 26.98 | 2.76 | 0.16 | 0.72 | 5.946 |
| 2 | Sedimentary | Limestone-II | 26.29 | 26.39 | 2.70 | 0.58 | 0.74 | 5.953 |
| 3 | Sedimentary | Limestone-III | 22.27 | 23.25 | 2.70 | 10.52 | 15.93 | 4.420 |
| 4 | Sedimentary | Limestone-IV | 25.21 | 25.51 | 2.70 | 3.26 | 4.81 | 4.976 |
| 5 | Sedimentary | Travertine-I | 23.94 | 24.23 | 2.70 | 2.90 | 9.96 | 5.298 |
| 6 | Sedimentary | Travertine-II | 24.43 | 24.53 | 2.71 | 1.01 | 7.78 | 5.550 |
| 7 | Sedimentary | Travertine-III | 24.13 | 24.62 | 2.70 | 4.92 | 9.23 | 5.529 |
| 8 | Metamorphic | Marble-I | 26.59 | 26.68 | 2.72 | 0.06 | 0.37 | 6.083 |
| 9 | Metamorphic | Marble-II | 26.59 | 26.68 | 2.73 | 0.22 | 0.73 | 5.853 |
| 10 | Igneous | Diabase | 28.35 | 28.55 | 2.98 | 2.49 | 3.02 | 5.011 |

Table 5. Initial Shore hardness (SH) values of the rocks under study (Mutlutürk et al., 2004)

| Rock no. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------|-------|------|-------|------|------|-------|-------|------|------|-------|
| Freezing-thawing | | | | | | | | | | |
| SH | 47.66 | 62.3 | 22.15 | 41.3 | 46 | 47.3 | 46.10 | 44.4 | 39.8 | 64.4 |
| SD | 3.10 | 3.2 | 4.18 | 4.5 | 3.4 | 6 | 7 | 3.8 | 3.8 | 12.8 |
| CoV | 6.51 | 5.14 | 18.87 | 10.9 | 7.39 | 12.68 | 15.18 | 8.56 | 9.55 | 19.88 |

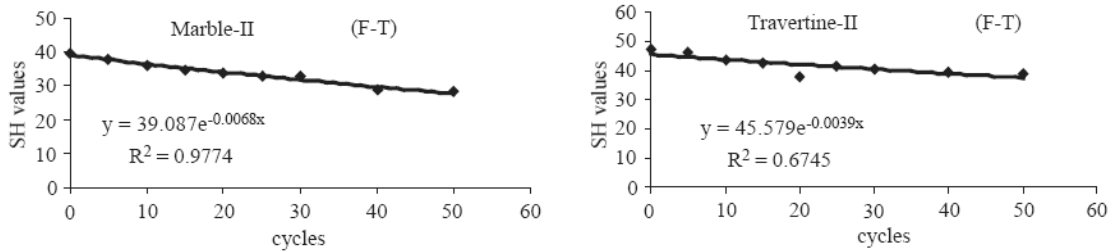


Fig. 9. The best (left) and the worst (right) fitted model for F-T cycles (Mutlutürk et al. 2004)

쇼어경도를 음지수함수로 표현한 후 상관정도를 살펴본 것이다. 음지수함수로 표현하는 것은 특정 횟수 이후에 남아있는 고결성의 비율 혹은 고결성의 반감기 등을 예측하기 위해 사용될 수 있고 Table 6과 같이 실험 결과를 잘 모사해주는 것으로 나타났다.

4.2 포화된 암석의 반복적인 동결-융해 과정에 따른 손상영역 전파

Liu et al.(2008)는 붉은 사암(red sandstone)과 셰일 두 종류의 암석에 대하여 동결-융해 시험을 실시하였다. 암석의 기본적인 물성은 Table 7과 같다. 융해 과정은 20℃의 증류수에 담긴 채로 12시간동안 진행되었고 동

결과정은 5℃에서 시작하여 -20℃까지 시간당 10℃의 온도변화 속도로 변화하는 챔버속에 12시간동안 진행되었다. 반복 횟수는 총 30회였다.

동결-융해 시험 이후에 나타나는 외견상의 변화는 붉은 사암의 경우 6회가 지남에 따라 미세한 균열이 발생하였다. 10회 이후에는 폭이 2 mm보다 큰 균열이 발생하였고 28회 이후에는 거의 점착력을 잃은 모래덩어리 처럼 되었다. 한편 셰일의 경우, 10회가 될 때까지 표면에서 균열을 찾을 수 없었으며 22회가 지났을 때에도 폭이 1 mm이상의 crack은 발견할 수 없었다. Liu et al.(2008)은 이러한 원인으로 셰일의 공극률이 붉은 사암보다 작는데 기인한 것으로 보았다.

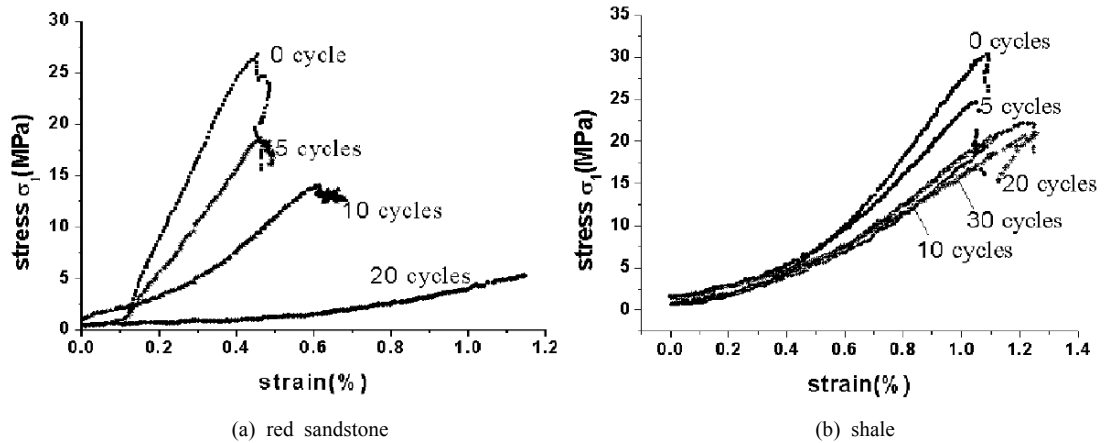


Fig. 10. Stress-strain curves at 20°C of rocks subjected to different cycles of freeze-thaw (Liu et al., 2008)

Table 6. The coefficient of determination (r^2) for the models fitted to the data (F-T=freeze-thaw) (Mutlutürk et al. 2004)

| Rock no. | Rock class | Rock type | R^2 |
|----------|-------------|----------------|--------|
| | | | F-T |
| 1 | Sedimentary | Limestone-I | 0.8029 |
| 2 | Sedimentary | Limestone-II | 0.9277 |
| 3 | Sedimentary | Limestone-III | 0.8818 |
| 4 | Sedimentary | Limestone-IV | 0.7940 |
| 5 | Sedimentary | Travertine-I | 0.9154 |
| 6 | Sedimentary | Travertine-II | 0.6745 |
| 7 | Sedimentary | Travertine-III | 0.8696 |
| 8 | Metamorphic | Marble-I | 0.8875 |
| 9 | Metamorphic | Marble-II | 0.9774 |
| 10 | Igneous | Diabase | 0.9692 |

또한 Liu et al.(2008)은 동결-융해 반복 시험 결과에 따른 풍화 형태에 대하여 두 가지로 구분하였다. 첫 번째는, 붉은 사암의 풍화형태로서, 표면의 응결물이 반복적인 동결-융해과정에 의해 강도저하를 보이는 surface scaling mode이다. 두 번째는, 셰일의 풍화형태로서 동결-융해과정에서 물의 상변화에 따른 압력의 발생으로 기인한 internal crack growth mode이다.

표면에 보이는 균열의 관찰뿐만 아니라 일축압축시험도 수행하였다. 결과는 Fig. 10과 같다. 공극률이 큰 붉은 사암은 반복 횟수가 증가함에 따라 강도가 급격히 감소하였고 30회가 되었을 때는 강도측정이 불가능하였다. 그에 반해 셰일은 반복횟수 10회 이후에는 큰 변화양상을 보이지 않았다.

5. 결론

극지의 특수한 기후 속에 존재하는 암석은, 극저온, 반복적인 동결-융해작용 등과 같은 환경 속에 생성초기부터 현재까지 오랜 시간동안 존재하여왔다. 위에서 살펴본 바와 같이, 이를 고려한 여러 연구들이 진행되고 있으나, 남극대륙의 노출암석을 대상으로 한 풍화 메커니즘에 대한 연구는 극지방 암석의 역학적인 물성치나 파괴특성보다는 화학적 조성과 기후특성에 초점을 맞춘 연구가 대부분이며 극지 암석의 역학적, 열적 특성에 대한 연구는 거의 수행된 바가 없는 실정이다. 또한 상대적으로 단기간 동안 저온 조건에 놓인 암석 물성에 대한 것이므로, 형성 이래 줄곧 저온의 대기나 얼음 등에 노출되어 있던 극지 암석의 역학적 특성에 직접적으로 연관 지어 평가하는 데에는 무리가 있다. 따라서 추후 극지 암석의 기후특성에 따른 풍화메커니즘 연구에서는 극지암석을 대상으로 한 역학적 물성치 및 파괴특성 연구와 더불어 실험실 조건의 연구결과를 현지 암석의 특성평가와 연결 짓는 방법에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부 한국연구재단 중견연구자 지원사업의 핵심연구과제인 “극지 동결-융해 풍화과정에 노출된 암석의 물성변화 메커니즘과 측정연구(과제 번호: 2009-0085129)”의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. ANARE, 1998, A low temperature record, ANARE News 14, Antarctic Division, Dept. of the Arts, Sports, the Environment, Tourism and Territories, Tasmania, Australia.
2. Bonner, W. N. and D. W. H. Walton, 1985, Key environments Antarctica, Pergamon Press, Cambridge, England.
3. Campbell, I. B. and G. G. C. Claridge, 1987, Development in soil science 16-Antarctica: Soils, weathering processes and environment, Elsevier, Amsterdam, the Netherlands.
4. Debenham, F., 1921, Recent and local deposits of McMurdo Sound Region In British Antarctic ('Terra Nova') Expedition, 1910, Natural History Report, Geology, Vol. 1, No. 3, pp. 63-100.
5. Elliot, D. H., 1975, Tectonics of Antarctica: A review, Am. J. Sci. 275A, pp. 45-106.
6. Gonçalo Vieira, James Bockheim, Mauro Guglielmin, Megan Balks et al., 2010, Thermal state of permafrost and Active-layer monitoring in the antarctic: Advances during the international polar year 2007-2009, Permafrost and Periglacial Processes, Vol. 21, pp. 182-197.
7. 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.
8. Han, U. and H. C. Jung, 1994, Temperature Response in the Permafrost at the Sejong Station, Antarctica, Jour. Korean Earth Science Society, Vol. 15, No. 3, pp. 170-176.
9. John, May. 1988, The Greenpeace book of Antarctica, Macdonald, New Zealand.
10. M. Mutlutürk, R. Altındag, G. Türk, 2004, A decay function model for the integrity loss of rock when subjected to recurrent cycles of freezing-thawing and heating-cooling, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 41, pp. 237-244.
11. Oxman, B. H. 1978. The Antarctic Regime: An introduction, Univ. Miami Law review, Vol. 33, No. 2.
12. Shibuya, K., Nagao, T. and Kaminuma, K., 1982, Measurements of underground and underwater temperatures by Quartz thermometers at Syowa Station, East Antarctica, Nankyoku Shiryo (Antarct. Rec.), Vol. 76, pp. 89-100.
13. Thorn, C. E., 1988, Nivation: a geomorphic chimera. In Clark, M. J. (ed.), Advances in Periglacial Geo-morphology, Wiley, Chichester, pp. 3-31.
14. Toshiyasu NAGAO, Katsutada KAMINUMA and Kazuo SHIBUYA, 1985, LOGN-TERM UNDERGROUND TEMPERATURE MEASUREMENTS BY QUARTZ THERMOMETERS AT SYOWA STATION, EAST ANTARCTICA, Memoirs-National Institute of Polar Research, pp. 13-21.
15. 이방용, 1991, 남극의 자연환경 고찰, Ocean Research, Vol. 13, No. 1, pp. 51-69.
16. 이방용, 조희구, 김준, 정연진, 이윤곤, 2006, 남극 세종기지에서 최근 태양 복사, 기온과 운량의 변화, Atmosphere, Vol. 16, No. 4, pp. 333-342.
17. 최태진, 이방용, 김성중, 박유민, 윤영준, 2006, 남극 세종기지 주변의 복사, 기온 및 풍향의 특징, 지구물리, Vol. 9, No. 4, pp. 397-408.

류 성 훈

2008년 서울대학교 공과대학 지구환경 시스템공학부 공학사



Tel: 02-880-7233
 E-mail: shryu@snu.ac.kr
 현재 서울대학교 에너지시스템공학부 석사박사통합과정

송 재 준

1993년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1995년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2000년 서울대학교 대학원 지구환경 시스템공학부 공학박사



Tel: 02-880-9043
 E-mail: songjj@snu.ac.kr
 현재 서울대학교 에너지시스템공학부 교수