

## 한라산 백록담 서북벽 암온의 향별 특성

김 태 호\*

### Rock-Surface Temperatures of Baeknokdam Northwest Face in the Summit Area of Mt. Halla

KIM, Taeho\*

**요 약** : 한라산 정상의 백록담 서북벽 표고 1,860m 지점에서 18개월간 용암돔 암벽의 표면 온도를 향별로 관측하여 동결융해 사이클의 빈도와 출현 시기, 동결기의 암온 저하량을 밝혔다. 관측 지점에는 일주기와 연주기의 동결융해 사이클이 나타난다. 유효동결융해 사이클을 포함하여 일주기성 동결융해 사이클은 북동향 암벽보다 남서향 암벽에서 더 많이 발생한다. 일주기성 동결융해 사이클은 남서향 암벽에서는 2월과 3월에, 북동향 암벽에서는 11월과 4월에 집중적으로 출현한다. 또한 남서향 암벽에서는 11월 중순~4월 중순, 북동향 암벽에서는 11월 초순~4월 하순에 걸쳐 0℃ 이하의 암온이 지속되는 계절적 동결기가 출현함으로써 연주기성 동결융해 사이클도 확인된다. 동결기의 암온 저하량은 동결지수가 더 높은 북동향 암벽에서 더 크고, 동결과쇄의 최적 온도 기준점으로 알려진 -3℃ 이하의 지속시간도 북동향 암벽에서 더 길어 북동향 암벽이 남서향 암벽보다 일주기성 동결융해 사이클의 빈도는 낮아도 동결 강도는 더 큰 것으로 보인다. 따라서 암벽의 향에 따른 일사 조건의 차이가 동결융해 사이클의 빈도와 동결 지속시간을 결정함으로써 일주기성 동결융해 사이클은 남서향 암벽에서, 연주기성 동결융해 사이클은 북동향 암벽에서 현저하게 출현한다. 암석의 동결과쇄는 온도 조건으로만 결정되는 것은 아니므로 식생피복, 지형적 위치, 고도, 향을 달리하는 다양한 장소의 온도 자료 축적과 함께 암석 물성과 수분 공급에 관한 조사가 필요하다.

주요어 : 암온, 동결융해 사이클, 용암돔, 서북벽, 한라산

**Abstract** : Rock-surface temperatures were observed at a trachytic lava dome, called as Baeknokdam Northwest Face, in the summit area of Mt. Halla, Jeju Island, to examine the frequency and occurrence season of freeze-thaw cycles and the rate of temperature changes during a freezing period. Long-term measurements were recorded over 18 months from November 2006 to April 2008, at a 1-hour logging interval and rock depth of 1.5 cm. Both diurnal freeze-thaw cycles and effective freeze-thaw cycles appear in larger numbers on a south-facing rock face than a north-facing rock face. The diurnal cycles were dominantly observed on February and March for the south face and on November and April for the north face, respectively. The annual freeze-thaw cycles were confirmed in terms of the presence of seasonal freezing periods lasting from mid-November to mid-April for the south face and from early-November to late-April for the north face, respectively. The rate of decreasing temperatures during the seasonal freezing periods is larger on the north face than the south face. Notwithstanding the lower numbers of freeze-thaw events, the north face experiences a higher frost intensity since the number of hours below -3℃ is larger on the north face than the south face. The number of freeze-thaw events and the duration of days with continuous sub-zero rock temperatures largely depend on the solar radiation controlled by the aspect of the monitored rock surfaces, and thus the high-frequency short-term frost cycle dominantly appears on the south face and the annual frost cycle on the north face, respectively.

**Key Words** : rock temperature, freeze-thaw cycle, lava dome, Northwest Face, Mt. Halla

\* 제주대학교 지리교육과 교수(Professor, Department of Geography Education, Jeju National University), kimtaeho@jejunu.ac.kr

## I. 서론

세계자연유산으로 지정된 한라산 천연보호구역은 표고 600m 이상의 산지로 이루어져 있으며, 백록담 일대의 정상부는 표고 2,000m에 가까운 고산 지역이다. 한라산에는 고도별로 4개의 식생대가 출현하는데, 1,500~1,800m 지역과 1,800~1,950m 지역을 각각 아고산대와 고산대로 구분하고 있다(공우석, 2007). 아고산대와 고산대는 한랭한 기후 조건으로 인하여 저지대와는 상이한 지형경관과 생태계가 출현하는 지역이다(小泉, 1998; 増澤, 2009). 한라산에도 유상구조토를 비롯하여 암괴원, 풍식나지 등 기후 조건이 반영된 지형이 발달하고 있다(김도정, 1970; 김태호, 2001; 김태호 2006a). 이 가운데 암괴원은 백록담 분화구 내사면, 만세동산, 선작지왓 등 아고산대와 고산대 전역에 걸쳐 분포하고 있다. 산악인에게 너털 또는 너털경으로도 알려져 있는 암괴원의 성인을 로진스키(Lozinski, 1909)가 대륙빙상 주변부에서 일어난 강력한 동결파쇄작용으로 설명하면서 주빙하 개념을 제창한 이래, 암괴원은 영구동토대의 구조토와 더불어 대표적인 주빙하 지형의 하나로 간주되고 있다(French, 2006).

한라산에 분포하는 암괴원은 표면이 지의류로 덮여 있는 직경 1m 내외의 각상 또는 아각상 암괴로 이루어져 있다(국립공원관리공단, 2002). 현재의 한반도 기후 환경에서는 대형 암괴가 생산되지 않으므로 이들 암괴원은 지난 빙기와 같이 현재보다 더 한랭했던 시기의 강력한 동결파쇄작용으로 만들어진 일종의 화석지형으로 판단하고 있다(전영권, 1993; 전영권, 1995; 권혁재, 1999; 오종주 등, 2012). 그러나 암괴원을 구성하고 있는 암괴와는 별도로 현재도 한라산 정상부에서는 동결파쇄작용으로 인하여 다량의 암설이 만들어지고 있다(그림 1). 특히 조면암으로 이루어져 있는 백록담의 북쪽, 서쪽 및 남쪽 화구륜과 암벽에서 암설 생산이 활발하게 진행되고 있어 북벽과 남벽의 추가적인 붕괴를 막기 위한 대책으로 암반의 결속력을 높일 수 있는 그라우팅이나 약액주입 공법 또는 고강도 텐션네트 공법의 적용을 제안하고 있다(제주대학교 등, 2005).



(그림 1) 백록담 분화구 내사면의 암괴원과 암설로 덮여 있는 북벽

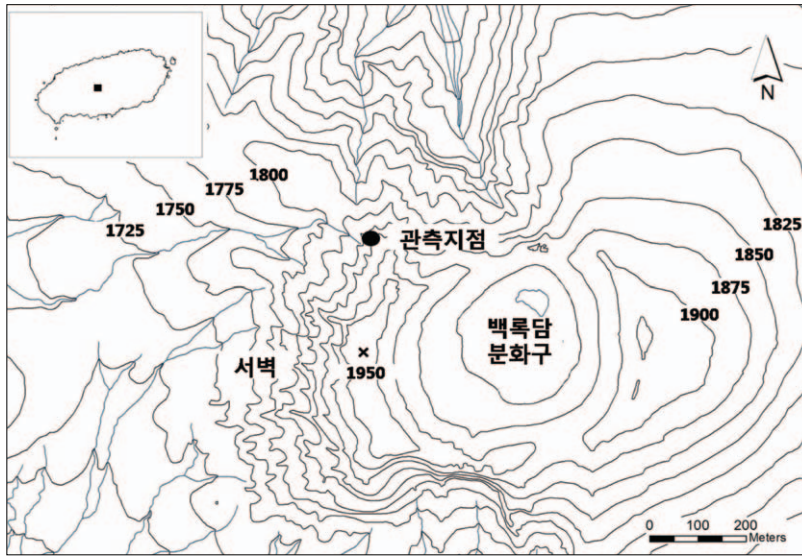
따라서 한라산 아고산대와 고산대는 현재도 주빙하 환경에 놓여 있는 장소로 볼 수 있는데, 백록담 화구지에 분포하는 유상구조토의 파괴(김태호, 2006b), 아고산 초지대에서 진행되는 초지박리(김태호, 2006a; Kim, 2008), 산록 지대 등산로에서 관찰되는 노퍽 확대(김태호, 2008)는 모두 서릿발작용을 비롯한 동결작용에 의해 주로 발생하는 것으로 보고되고 있다. 또한 아고산 나지대의 완사면에서는 동결포행에 의한 암설 이동도 활발하게 일어나고 있다(김태호, 2010).

그러나 다량의 암설 생산에도 불구하고 한라산 아고산대에서의 동결풍화에 관한 지형학적 연구는 아직 이루어지지 않아 동결파쇄작용과 암설 생산의 관계에 대한 자료는 존재하지 않는 실정이다. 이 연구에서는 암석풍화의 관점에서 한라산 정상에 발달한 조면암질 용암돔을 대상으로 암벽의 표면 온도를 관측하여 동결융해 사이클의 빈도와 출현 시기, 동결기 암온의 저하량 등 암벽 표면에서 현재 진행되고 있는 동결파쇄작용과 관련된 암온 특성을 밝히고자 한다.

## II. 연구 지역 및 방법

### 1. 연구 지역 개관

백록담 분화구를 사이에 놓고 동서 방향으로 비대칭적 단면을 보이는 한라산 정상부의 형성 과정을 살펴보



〈그림 2〉 연구 지역

면, 순산화산체 산정에서 조면암질 용암류가 분출하여 용암돔이 만들어진 후 용암돔 동쪽을 부수고 다시 조면 현무암질 용암류가 분출하여 산정 일대를 넓게 덮었다. 조면현무암의 분출 초기에는 수성화산활동이었으나 점차 스트롬볼리식 분화로 바뀌었으며, 이때 분출한 응회암과 스킨리아층이 조면암을 덮고 있다. 이후 분화 양식이 하와이식으로 변하면서 산정 화구로부터 조면 현무암질 용암류가 분출하여 스킨리아층을 덮고 동사면을 중심으로 북사면과 남사면으로 흘러내렸다(윤성효 등, 2002; 그림 2).

따라서 한라산 정상부에 분포하는 암석은 서쪽의 조면암과 동쪽의 조면현무암으로 크게 구분된다. 회색을 띠고 있는 한라산 조면암은 단면에 폭 1~2m의 수직 절리가 발달하며, 절대 연대는 2.5만 년(Won et al., 1986) 또는 7만 년(玉生, 1990)으로 알려져 있다. 백록담 동쪽 화구륜과 한라산 동쪽 산록에 넓게 분포하는 절대 연대 3만 년의 백록담 조면현무암의 두께는 화구륜에서 2~3m이나 동사면으로 내려가면 0.2~0.3m로 얇아진다(윤성효 등, 2002).

백록담 서벽 또는 남벽으로 불리는 한라산 정상의 용암돔은 돔과 함께 용암류가 만들어지는 쿠레(coulée)형이다. 용암돔 외곽의 테일러스 에이프런(talus apron)



〈그림 3〉 한라산 정상의 용암돔 백록담 서벽

은 침식으로 제거되고, 내부 용암류의 유동에 의한 주상절리가 노출되어 있다(윤성효 등, 2002; 그림 3). 용암돔에서 조면현무암질 용암이 분출하며 만들어진 백록담 분화구는 직경 585m, 면적 210,230m<sup>2</sup>, 화구륜 길이 1,720m이다(제주대학교 등, 2005).

표고 970m에 위치한 어리목의 연평균 기온은 9.7℃ 이므로 한라산 아고산대의 기온감률 -0.58℃(공우석, 1999)를 적용하면 연구 지역의 연평균 기온은 4.5℃로 추정된다. 연구 지역 부근의 장구목오름(1,810m)에서 2000년 2월부터 8월까지 관측한 자료에 의하면, 2월

과 3월의 월평균 기온은  $-7.9^{\circ}\text{C}$ 와  $-2.4^{\circ}\text{C}$ 이며, 관측 기간에 기록된 최저 기온은 2월 8일의  $-16.3^{\circ}\text{C}$ 이다(제주도, 2000). 어리목의 연 강수량은 3,356.5mm이며, 월별로는 8월이 631.0mm로 가장 많고 장마철인 7월이 575.5mm로 뒤를 잇는다. 월 강수량 100mm를 넘는 달이 11개월에 달할 만큼 전년에 걸쳐 강수가 지속되는 해양성 기후의 특징을 보인다.

백록담 일대의 식생은 초지, 침·활엽수 혼효림 및 관목림으로 크게 나누어진다. 초지는 김의털 군락과 눈포아풀 군락으로, 관목림은 시로미-눈향나무 군락과 털진달래 군락으로 구분되며, 혼효림은 구상나무와 좁고채목이 우점하고 있다. 식생별 분포 면적은 초지가 전체 면적의 39.6%인 76,939 $\text{m}^2$ 로 가장 넓고, 관목림이 7.1%인 13,823 $\text{m}^2$ 로 가장 좁다. 분화구 일대에 분포하는 66분류군의 고산식물 가운데 특산식물은 23분류군, 희귀식물은 21분류군으로 고산식물은 대부분 희귀식물이나 특산식물에 해당한다. 대표적인 희귀식물로 돌매화나무를 비롯하여 눈향나무, 시로미, 들쭉나무를 들 수 있다(제주대학교 등, 2005).

## 2. 연구 방법

암온 관측은 등산로가 유실되어 현재는 통행이 금지되고 있는 백록담 서북벽의 표고 1,860m 지점에 위치하는 조면암질 용암돔의 암벽에서 이루어졌다(그림 3). 용암돔에 발달한 주상절리를 따라 침식이 진행되면서 암벽은 직육면체의 암체로 분리되고 있다. 일사량과 일조시간 같은 일사 조건이 미치는 영향을 고려하여 같은 높이에서 향을 달리하는 두 암벽면에 관측 지점을 설정하였다(그림 4). 암벽면의 향은 각각  $S40^{\circ}W$ (이하 남서향 암벽)과  $N25^{\circ}E$ (이하 북동향 암벽)이며, 경사는  $85^{\circ}$ 와  $105^{\circ}$ 이다. 대상 암체가 용암돔의 북서 사면에 놓여 있으므로 북동향 암벽의 관측 지점은 별이 잘 들지 않는 응달에 위치하는 반면 남서향 암벽의 관측 지점은 오전에는 그늘이 지나 오후에는 별이 잘 든다.

암온 관측에는 데이터로거가 내장되어 있는 소형 온도계(T&D TR-52)를 사용하였다. TR-52의 로거는 16,000개의 데이터를 저장할 수 있으므로 관측 간격을 1시간으로 설정하면 2년간 연속 관측이 가능하나 이



〈그림 4〉 향별 암온 관측이 이루어진 조면암질 암벽

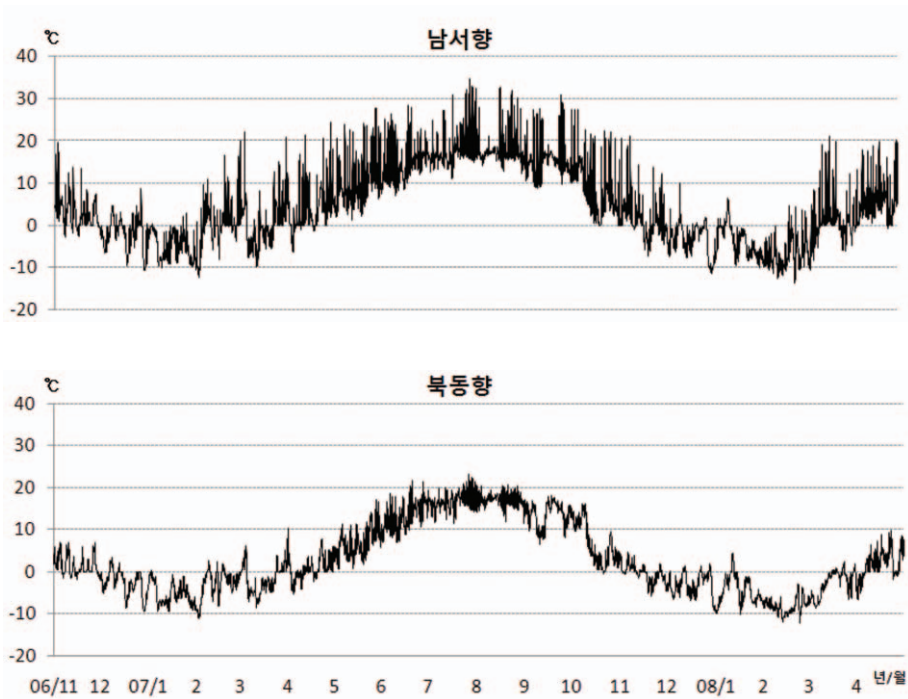
연구에서는 배터리 문제로 인하여 18개월 동안만 관측이 이루어졌다. 관측 개시일은 2006년 11월 1일이며, 관측 종료일은 2008년 4월 30일이므로 관측 일수는 총 547일이다. TR-52의 온도감지센서(thermister)는 직경 2mm, 길이 50cm의 케이블 형태로 측정 범위는  $-60^{\circ}\text{C}\sim 155^{\circ}\text{C}$ 이며,  $-20^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 약  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 의 정밀도를 갖고 있다.

휴대용 전동드릴을 이용하여 암벽면에 직경 5mm, 깊이 15mm의 구멍을 뚫고, 온도감지센서를 삽입한 후 암분(岩粉)과 실리콘을 섞어 만든 접착제로 구멍 안을 메워 센서를 고정시켰다<sup>1)</sup>. 데이터로거는 물리적인 손상을 방지하기 위하여 용기에 넣어 암벽면 사이의 토양 속에 파묻었다. 암온 관측은 매 시각 정시에 1시간 간격으로 이루어졌다. 관측 기간 동안 온도감지센서의 이탈 등으로 인한 결측은 발생하지 않았으며, 관측 자료 가운데 비정상적인 값도 없는 것으로 보아 관측 장비는 정상적으로 작동한 것으로 판단된다.

관측 자료로부터 동결융해 사이클과 유효동결융해 사이클(effective freeze-thaw cycle)을 구하였다. 전자는 암온이  $0^{\circ}\text{C}$ 를 사이에 두고 오르내리는 일반적인 변화 사이클인 반면 후자는 암석의 동결과해가 효과적으로 일어난다고 생각하는 사이클로서,  $+1^{\circ}\text{C}$  이상에서  $-1^{\circ}\text{C}$  이하로 내려갔다가 다시  $+1^{\circ}\text{C}$  이상으로 올라오는 경우(Lewkowicz, 2001)와  $+2^{\circ}\text{C}$  이상에서  $-2^{\circ}\text{C}$  이하로 내려갔다가 다시  $+2^{\circ}\text{C}$  이상으로 올라오는 경우(Matsuoka, 1990; 瀬戸, 2005) 두 가지가 제시되고 있

〈표 1〉 월별 암온(°C)의 관측 결과

연월	2006		2007												2008				전년	
	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4		
남서향	최고	6.6	0.6	-2.1	6.1	5.1	10.1	17.1	20.5	23.6	22.2	20.9	16.4	7.4	-0.7	-1.7	-2.7	7.0	11.9	9.4
	최저	0.5	-4.3	-7.1	-2.9	-2.9	0.5	5.5	11.3	14.7	15.3	12.6	5.3	-1.4	-4.9	-5.5	-9.9	-3.0	1.8	1.5
	평균	2.4	-2.4	-5.1	-0.5	0.0	3.4	9.4	14.4	17.7	17.6	15.0	8.2	0.9	-3.0	-3.9	-7.2	-0.1	4.9	4.0
북동향	최고	2.9	-1.5	-4.1	-1.4	-0.3	2.4	9.4	16.4	19.1	18.8	15.0	8.2	0.7	-1.6	-3.2	-7.2	-1.8	4.1	4.3
	최저	0.1	-4.1	-6.8	-4.5	-3.3	-0.9	4.0	10.3	14.3	15.1	11.9	4.7	-1.6	-4.6	-5.8	-9.5	-4.1	0.0	0.9
	평균	1.4	-2.8	-5.5	-2.9	-1.8	0.7	6.7	13.1	16.7	16.9	13.5	6.3	-0.5	-3.1	-4.6	-8.4	-2.9	2.0	2.5



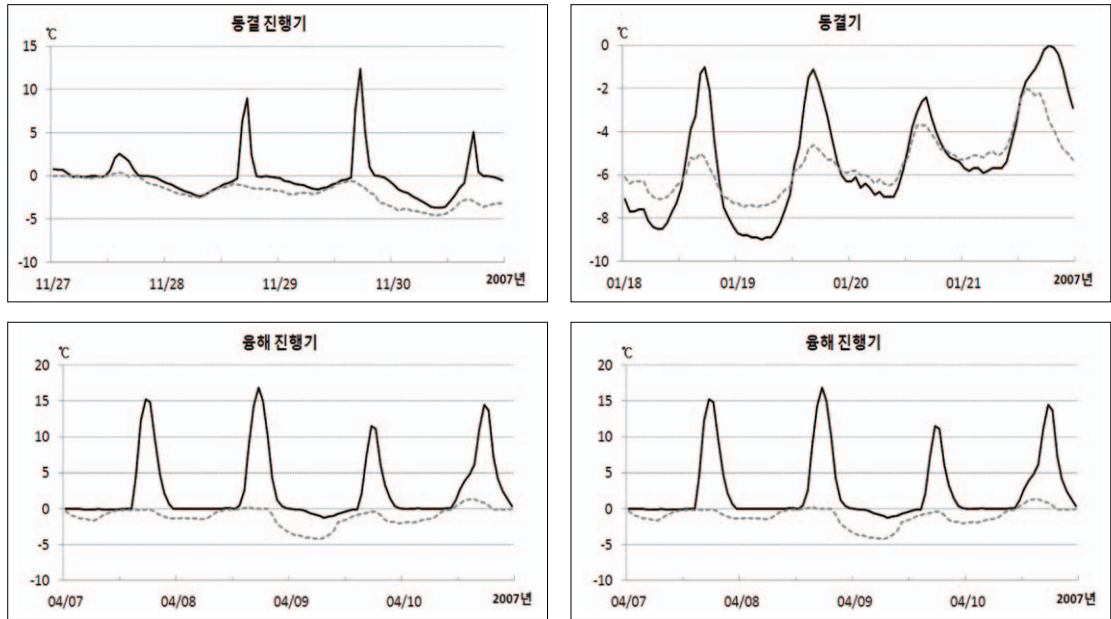
〈그림 5〉 관측 전년(2006년 11월 1일~2008년 4월 30일)의 암온 변화

다. 이 연구에서는 비교를 위하여 두 경우 모두 구하여 검토하였다.

### III. 결 과

두 번의 겨울을 포함하여 18개월간 관측된 암온은 계절적 변화를 잘 보여준다(표 1; 그림 5). 남서향 암벽의 평균 암온은 4.0°C이며<sup>2)</sup>, 월평균 암온은 17.7°C를

기록한 2007년 7월이 가장 높고, -7.2°C를 기록한 2008년 2월이 가장 낮다. 최고 암온은 34.8°C(2007년 7월 28일)이며, 최저 암온은 -13.7°C(2008년 2월 24일)이다. 반면에 북동향 암벽의 평균 암온은 2.5°C이며, 월평균 암온은 16.9°C를 기록한 2007년 8월이 가장 높고, -8.4°C를 기록한 2008년 2월이 가장 낮다. 최고 암온은 23.3°C(2007년 7월 26일)이며, 최저 암온은 -12.3°C(2008년 2월 24일)이다. 일평균 값으로 구한 암온도 비슷한 경향을 보여 남서향 암벽에서는 최고



〈그림 6〉 계절별 암온 변화

실선은 남서향 암벽, 파선은 북동향 암벽을 가리킨다.

치가 21.6℃(2007년 7월 28일), 최저치가 -10.8℃(2008년 1월 1일)인 반면 북동향 암벽에서는 최고치가 19.0℃(2007년 7월 26일), 최저치가 -11.2℃(2008년 2월 13일)로 최저치보다는 최고치의 향별 차이가 크다.

암온의 최대 일교차는 남서향 암벽 22.5℃(2007년 4월 28일), 북동향 암벽 10.5℃(2007년 6월 20일)로 북동향 암벽보다 남서향 암벽에서 크다. 계절별로 향별 일교차를 비교하면(그림 6), 영하의 일평균 암온이 지속되는 겨울(2007년 1월 18~21일)에는 남서향 암벽 4.6~7.9℃(평균 6.5℃), 북동향 암벽 2.3~3.3℃(평균 2.8℃)로 3.7℃의 차이를 보인다. 동결과 융해가 자주 반복되는 봄(2007년 4월 7~10일)과 가을(2007년 11월 27~30일)에는 남서향 암벽 12.7~15.8℃(평균 14.9℃)와 3.2~14.0℃(평균 9.4℃), 북동향 암벽 1.5~3.8℃(평균 3.0℃)와 1.6~2.8℃(평균 2.0℃)로 각각 11.9℃와 7.4℃의 차이를 보인다. 또한 여름(2007년 7월 27~30일)에도 남서향 암벽 15.2~19.3℃(평균 17.3℃), 북동향 암벽 6.9~7.8℃(평균 7.4℃)로 계절에 관계없이 대부분 북동향 암벽보다 남서향 암벽에서 암온의 변화 폭

이 크게 나타났다.

〈그림 7〉은 전체 관측일을 동결일, 동결융해일 및 비동결일로 각각 구분하여 일별로 나타난 것이다. 여기에서 동결일은 최고 암온이 0℃ 이하인 날이며, 비동결일은 최저 암온이 0℃ 미만인 날이다. 동결융해일은 최고 암온이 0℃ 이상이나 최저 암온은 0℃ 미만인 날이다. 총 547일에 달하는 관측일 가운데 동결일은 남서향 암벽 117일, 북동향 암벽 213일로 북동향 암벽에서 96일 더 많이 출현했으며, 비동결일은 남서향 암벽 299일, 북동향 암벽 243일로 남서향 암벽에서 56일 더 많이 출현하였다. 동결융해일은 남서향 암벽이 131일로 91일의 북동향 암벽보다 40일 더 많이 관측되었다<sup>3)</sup>.

한편, 동결융해일을 시기별로 살펴보면, 2006년도 동결기(2006년 11월~2007년 4월)에는 남서향 암벽 68일, 북동향 암벽 50일이며, 2007년도 동결기(2007년 11월~2008년 4월)에는 남서향 암벽 62일, 북동향 암벽 39일로 연도에 따라 출현 횟수는 달라지나 남서향 암벽에서 더 많이 출현하였다. 월별로는 남서향 암벽에서는 12월(31일), 2월(25일), 3월(25일)에 동결융

년	2006		2007						
월	11	12	1	2	3	4	5	6	7
남서향	[Bar chart showing freezing days for Namseohang in 2006 and 2007]								
북동향	[Bar chart showing freezing days for Bukdonghang in 2006 and 2007]								
년	2007					2008			
월	8	9	10	11	12	1	2	3	4
남서향	[Bar chart showing freezing days for Namseohang in 2007 and 2008]								
북동향	[Bar chart showing freezing days for Bukdonghang in 2007 and 2008]								

■ 동결일 ■ 동결융해일 □ 비동결일

〈그림 7〉 관측일별 동결, 동결융해 및 비동결 상태

해일이 많이 출현하는 반면 북동향 암벽에서는 11월(25일)과 4월(20일)에 잦아 향별로 출현 시기에 차이를 보인다(그림 7).

동결일은 2006년도 동결기에는 남서향 암벽 53일, 북동향 암벽 99일이며, 2007년도 동결기에는 남서향 암벽 64일, 북동향 암벽 114일로 북동향 암벽이 더 많다. 월별로는 남서향 암벽에서는 1월(47일), 2월(27일), 12월(26일), 북동향 암벽에서도 1월(58일), 2월(49일), 12월(43일)의 순으로 나타나 향별 차이는 보이지 않는다(그림 7). 또한 최대 동결지속일은 남서향 암벽에서는 2008년 1월 14일부터 2월 18일까지 36일인 반면 북동향 암벽에서는 2008년 1월 13일부터 3월 14일까지 62일로 약 2개월에 걸쳐 일별 최고 암온이 0℃를 넘지 않는다(그림 5).

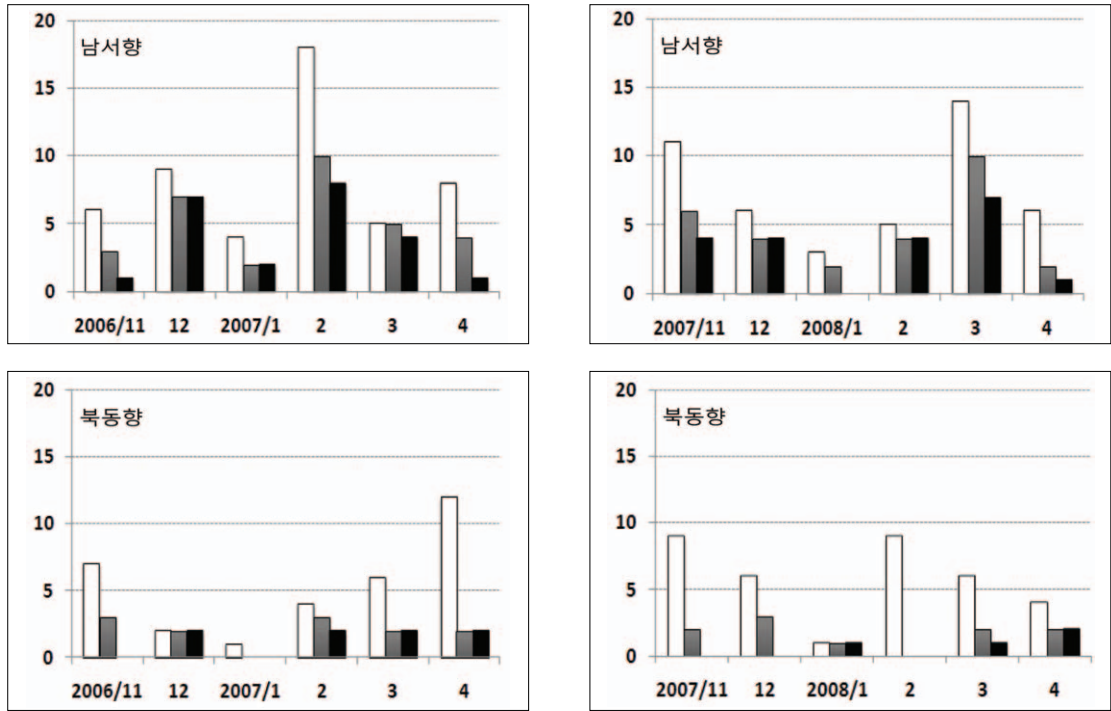
2007년 5월부터 9월까지는 일별 최저 암온이 0℃ 이상인 비동결일이 지속되었다. 또한 10월에도 최저 암온이 0℃ 밑으로 내려간 일수는 남서향 암벽에서 1회(21일), 북동향 암벽에서 2회(20일, 21일)에 불과하므로 연구 지역에서는 5월부터 10월까지 6개월간을 비동결기로 볼 수 있다(그림 7).

한편, 남서향 암벽에서는 2006년 11월 15일부터 2007년 4월 18일까지 그리고 2007년 11월 11일부터 2008년 4월 1일까지 암온이 전체적으로 0℃를 밑도는 기간이 이어졌다. 북동향 암벽에서도 2006년 11월 7일부터 2007년 4월 19일까지 그리고 2007년 11월 2일부터 2008년 4월 26일까지 일평균 암온은 대체로 0℃ 이하로 관측되었다(그림 5). 이 기간이 계절적 동결기(seasonal freezing period)에 해당하며, 암벽 내부 깊

숙이 동결이 진행된 것으로 보인다. 그러나 이 기간에도 기온이 일시적으로 회복되어 암온이 0℃를 오르내리는 경우도 나타났다. 일평균 암온이 0℃ 이하인 온도를 적산하여 구한 동결지수<sup>4)</sup>를 비교하면, 남서향 암벽에서는 2006년도 동결기 349.9℃·day(96일), 2007년도 동결기 504.1℃·day(111일)로 전부 854.0℃·day이다. 또한 북동향 암벽에서는 2006년도 동결기 445.5℃·day(124일), 2007년도 동결기 619.7℃·day(138일)로 전부 1065.2℃·day로서, 동결지수는 북동향 암벽에서 211.2℃·day 더 높게 나타났다.

계절적 동결기에 암온이 0℃를 사이에 두고 오르내리는 동결융해 사이클을 비교하면, 남서향 암벽의 경우 2006년도 동결기에는 2006년 11월 7일 처음 발생하여 2007년 4월 19일 종료될 때까지 50회가 관측되었으며, 2007년도 동결기에는 2007년 10월 21일 처음 발생하여 2008년 4월 26일 종료될 때까지 46회 관측됨으로써 전부 96회 출현하였다. 동결융해 사이클을 월별로 비교하면, 2007년 2월에 18회로 가장 많고 2008년 3월의 14회와 2006년 12월의 9회가 그 뒤를 따른다. 동결융해 사이클 가운데 암온 변화가  $\geq +1^{\circ}\text{C} \sim \leq -1^{\circ}\text{C}$ 인 유효동결융해 사이클은 59회이며, 월별로는 3월 15회, 2월 14회, 12월 11회, 11월 9회, 4월 6회, 1월 4회의 순이다. 또한 암온 변화가  $\geq +2^{\circ}\text{C} \sim \leq -2^{\circ}\text{C}$ 인 유효동결융해 사이클은 43회이며, 월별로는 2월 12회, 12월과 3월 11회, 11월 5회, 4월과 1월 2회의 순이다(그림 8).

북동향 암벽에서의 동결융해 사이클은 2006년도 동결기에는 2006년 11월 8일 처음 발생하여 2007년 4월 29일 종료될 때까지 32회 관측되었으며, 2007년도 동



□ 동결용해 사이클(±0°C) ■ 유효동결용해 사이클(≥+1°C ~ ≤-1°C) ■ 유효동결용해 사이클(≥+2°C ~ ≤-2°C)

〈그림 8〉 월별 동결용해 및 유효동결용해 사이클의 출현 횟수

결기에는 2007년 10월 21일 처음 발생하여 2008년 4월 27일 종료될 때까지 28회 관측됨으로써 전부 60회 출현하였다. 월별 동결용해 사이클은 2007년 4월에 12회로 가장 많고, 2007년 11월의 9회와 2006년 11월의 7회가 그 뒤를 따른다. 따라서 2월(23회)과 3월(19회)에 출현이 잦은 남서향 암벽과는 달리 북동향 암벽에서는 각각 16회를 기록한 4월과 11월에 가장 잦아 향별로 출현 시기에 차이를 보인다. 동결용해 사이클 가운데 암온 변화가  $\geq +1^{\circ}\text{C} \sim \leq -1^{\circ}\text{C}$ 인 유효동결용해 사이클은 22회이며, 월별로는 11월과 12월 5회, 3월과 4월 4회, 2월 3회, 1월 1회의 순이다. 또한 암온 변화가  $\geq +2^{\circ}\text{C} \sim \leq -2^{\circ}\text{C}$ 인 유효동결용해 사이클은 12회이며, 월별로는 4월 4회, 3월 3회, 12월과 2월 2회, 1월 1회의 순이다(그림 8).

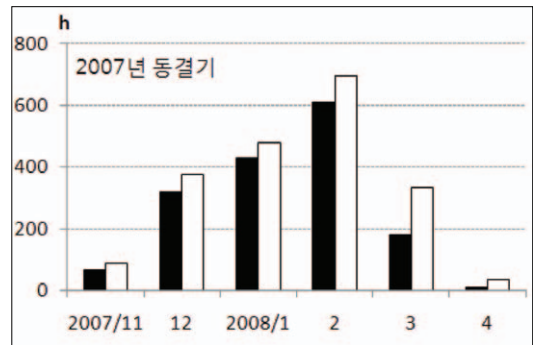
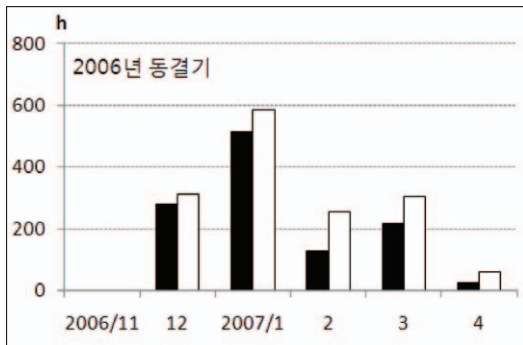
#### IV. 고찰

동결용해작용에는 기온의 일변화와 연변화에 각각

대응하는 두 개의 사이클이 나타난다(Matsuoka and Murton, 2008). 전자는 일주기성 동결용해 사이클(diurnal frost cycle)로 중위도 고산대에는 연간 10회 ~ 100회 이상 발생하며, 백야가 지속되는 여름철 남극대륙에서도 빈번하게 발생한다(Coutard and Francou, 1989; Matsuoka, 1990; Matsuoka et al., 1990). 후자는 기온이 높은 여름철에는 미동결 상태이나 겨울철에는 지속적으로 동결되어 있는 패턴의 사이클로 연주기성 동결용해(annual frost cycle)라고 부른다.

한라산 정상 of 용암돔 암벽에서도 일주기 및 연주기의 동결용해 사이클이 모두 출현하고 있다. 일주기성 동결용해작용과 관련하여 남서향 암벽에서 발생한 동결용해 사이클의 횟수는 96회, 북동향 암벽에서는 60회로 북동향 암벽보다는 남서향 암벽에서 일주기성 사이클이 더 자주 발생한다. 이런 경향은 유효동결용해 사이클에서도 나타나 암온 변화가  $\geq +1^{\circ}\text{C} \sim \leq -1^{\circ}\text{C}$ 인 경우에는 37회,  $\geq +2^{\circ}\text{C} \sim \leq -2^{\circ}\text{C}$ 인 경우에는 31회, 남





■ 남서향 암벽 □ 북동향 암벽

〈그림 9〉 월별 -3°C 이하의 동결 지속시간

서향 암벽에서 더 많이 출현한다(그림 8). 동결파쇄작용은 연평균 암온이나 동결지수와 같이 추위의 정도를 나타내는 지표뿐 아니라 동결융해 사이클의 빈도, 수분 상태, 암석 물성 등 여러 변수에 따라 다를 수 있으나 동결융해 사이클의 빈도만 놓고 보면 일주기성 사이클에 의한 동결파쇄작용은 북동향 암벽보다는 남서향 암벽에서 더 활발하게 진행될 것으로 보인다.

일주기성 동결융해 사이클은 남서향 암벽에서는 2월과 3월에, 북동향 암벽에서는 11월과 4월에 집중적으로 발생하여 출현 시기에 차이를 보인다. 동결 강도가 큰 북동향 암벽에서는 1월과 2월에 동결일이 지속되므로 일주기성 사이클이 거의 발생하지 않으나 동결 및 융해가 본격적으로 진행되기 시작하는 11월과 4월에는 동결융해일이 자주 나타나므로 일주기성 사이클도 발생하기 쉽다(그림 7). 반면에 동결 강도가 상대적으로 작은 남서향 암벽에서는 2월에도 일주기성 사이클이 자주 발생하고, 비동결일의 출현이 많은 11월과 4월에는 일주기성 사이클의 발생 횟수도 적어지는 등 일사 조건에 따른 암벽의 온도 환경 차이가 일주기성 동결융해 사이클의 출현 시기에 반영되고 있다.

한편, 남서향 암벽에서는 11월 중순부터 4월 중순까지, 북동향 암벽에서는 11월 초순부터 4월 하순까지 0°C 이하의 암온이 지속되는 계절적 동결기가 출현함으로써 연주기성 동결융해 사이클을 확인할 수 있다. 동결지수는 남서향 암벽보다 북동향 암벽에서 211.2°C·day 더 높게 나타나는 것으로 보아 겨울철 암온의 저

하량은 북동향 암벽에서 더 크다. 열전도율이나 함수율 등 암석 물성과 수분 조건이 같은 경우라면 겨울철 최대 동결심도는 지표면에서 구한 동결지수의 제곱근에 비례한다(福田, 1982)<sup>5)</sup>. 따라서 남서향 암벽보다는 북동향 암벽에서 내부 더 깊숙이 동결이 진행되고 있는 것으로 보인다.

동결풍화는 최대 0°C~-22°C의 범위에서 일어날 수 있으나(Matsuoka, 2001), 동결파쇄를 일으키는 최적의 온도 범위는 -3°C~-10°C로 알려져 있다(Anderson, 1998). 한라산 정상에서 관측된 일주기성 동결융해 사이클은 북동향 암벽보다 남서향 암벽에서 더 많이 발생하는 반면 남서향 암벽보다 96일 더 많은 동결일수를 비롯하여 동결 지속시간은 북동향 암벽에서 더 길다(그림 7). 동결파쇄의 최저 온도 기준점인 -3°C 이하의 지속시간을 비교하면, 남서향 암벽 2,684시간, 북동향 암벽 3,622시간으로 북동향 암벽에서 938시간 더 길다. 월별 동결 지속시간도 항상 북동향 암벽이 남서향 암벽보다 길어 상대적으로 적은 일주기의 동결융해 사이클에도 불구하고 동결 강도는 북동향 암벽에서 더 큰 것으로 보인다(그림 9).

암석의 물리적 풍화에 온도가 미치는 영향을 평가할 때에는 온도 변화의 빈도와 온도 변화량 모두를 고려해야 한다(Goudie and Viles, 1999). 암온의 시간당 평균 변화량을 비교하면, 남서향 암벽은 0.64°C인 반면 북동향 암벽은 0.2°C로 남서향 암벽에서의 변화량이 2.8 배 더 크다(표 2). 관측 지점 모두 동결기보다는 비동결

〈표 2〉 월별 시간당 암온 변화량(°C)

연월	2006		2007												2008				전년	
	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4		
남서향	최고	2.66	1.73	1.5	4.71	2.74	3.3	3.34	2.77	2.45	2.3	3.43	4.63	4.06	1.39	0.95	1.81	3.98	3.65	2.86
	평균	0.48	0.36	0.4	0.68	0.62	0.78	0.98	0.77	0.7	0.64	0.7	0.92	0.7	0.33	0.27	0.51	0.82	0.86	0.64
북동향	최고	0.69	0.61	0.6	0.67	0.82	1.07	2.38	2.57	2.15	1.33	0.89	0.98	0.63	0.73	0.6	0.45	0.53	1.19	1.05
	평균	0.21	0.19	0.19	0.21	0.25	0.27	0.48	0.51	0.4	0.33	0.26	0.29	0.18	0.22	0.19	0.16	0.17	0.33	0.27

기의 변화량이 커 남서향 암벽에서는 1.3배, 북동향 암벽에서는 1.6배의 차이를 보인다.

암온 변화에 따른 암석 내부의 열응력 피로(thermal stress fatigue)는 분당 변화량을 토대로 논의되고 있다(Hall, 1997, 1998, 1999). 이 연구에서는 1시간 간격으로 관측이 이루어졌기 때문에 분당 변화량을 직접 논의할 수는 없으나 시간당 변화량을 살펴볼 필요는 있다. 보통 분당 변화량 2°C는 균열을 만들고 영구적인 변형을 일으키기 시작하는 기준점으로 알려져 있다(Yatsu, 1988; Hall, 1997). 남아프리카의 드라켄스버그 고산대에서 관측한 시간당 변화량 1.6°C와 8.5°C가 분당 변화량 0.25°C와 3.6°C에 상응하는 사례(Grab, 2007)를 참고하면, 한라산에서 관측된 암온의 평균 변화량은 기준점에 이르지 못하는 못하고 있다(표 2). 그러나 최고 변화량은 남서향 암벽에서는 1.39~4.71°C, 북동향 암벽에서는 0.45~2.57°C의 범위를 보인다. 또한 최고치 14.0°C(2007년 2월 28일)를 비롯하여 기준점을 상회하는 것으로 보이는 시간별 변화량이 상당수 관측됨으로써 암석 내부에 열응력 피로가 발생하는 것으로 판단된다.

암석의 표면 온도는 일사를 비롯하여 공기에 의한 열전달 및 냉각 메커니즘, 알베도와 열전도율 같은 암석 물성에 의해 결정된다(McGreevy, 1985). 이 연구에서 암온 관측은 동일 암체에서 이루어졌기 때문에 관측 지점에 따른 열전달 및 냉각 메커니즘이나 암석 물성에는 큰 차이가 없을 것으로 보인다. 또한 동일 지역에서 일사의 차이를 일으키는 요인은 식생피복(瀬戸, 2005), 고도(Lewkowicz, 2001), 지형적 위치(瀬戸, 2005; Grab, 2007), 향(Lewkowicz, 2001; Grab, 2007) 등 다양하다. 그러나 향을 제외한 나머지 요인들은 동일한

것으로 볼 수 있으므로 단지 향에 따른 일사량과 일조 시간의 차이 때문에 인접한 두 관측 지점에서 동결융해 사이클의 빈도와 동결 지속시간이 달라지고 있다. 즉 일주기성 동결융해 사이클은 남서향 암벽에서, 연주기성 동결융해 사이클은 북동향 암벽에서 현저하게 나타나고 있다.

한라산 정상 백록담 화구륜 일대에서의 관찰에 의하면 남사면보다는 북사면에서의 암설 생산이 많은 것으로 보인다. 암설 생산에 유리한 일주기성 동결융해 사이클이 북사면보다는 남사면에서 더 자주 발생할 것으로 예상됨에도 불구하고 실제 암설의 분포가 이 예상과 다르게 나타나는 것은 동결융해 사이클의 빈도 이외의 다른 요인들이 동결파쇄에 영향을 주기 때문일 것이다. 예를 들면, 유럽 알프스에서 높은 절리밀도, 북향 단애면 그리고 영구동토의 존재가 빈번한 낙석 발생으로 이어지고 있는데, 여기에서 북향과 영구동토라는 두 요인은 동결융해 사이클의 빈도보다는 수분 조건이 암석의 동결파쇄에 더 중요하다는 것을 시사하고 있다(Sass, 2005). 따라서 한라산 정상 일대의 동결파쇄작용을 밝히기 위해서는 최근 양재혁(2011)의 암석풍화 실험에서도 확인했듯이, 온도뿐 아니라 수분 및 암석 물성에 관한 자료를 종합적으로 검토할 필요가 있다.

## V. 결론

암석의 동결파쇄작용과 관련된 동결융해 사이클의 빈도와 출현 시기, 동결기 암온의 저하량을 파악하기 위하여 한라산 정상에 발달한 용암돔 표고 1,860m 지점의 암벽에서 표면 온도를 관측하였다. 동일한 암체를

대상으로 남서향과 북동향 암벽면에 각각 깊이 1.5cm의 구멍을 뚫고 온도감지센서를 설치한 후, 2006년 11월부터 2008년 4월까지 18개월에 걸쳐 1시간 간격으로 암온 관측을 실시하였다.

관측 지점에서는 일주기와 연주기의 동결융해 사이클이 모두 출현하고 있다. 유효동결융해 사이클을 포함하여 일주기성 동결융해 사이클은 북동향 암벽보다 남서향 암벽에서 더 자주 발생한다. 동결융해 사이클의 출현 시기도 항별로 달라 남서향 암벽에서는 2월과 3월에, 북동향 암벽에서는 11월과 4월에 집중적으로 나타난다. 또한 남서향 암벽에서는 11월 중순부터 4월 중순까지, 북동향 암벽에서는 11월 초순부터 4월 하순까지 계절적 동결기가 출현함으로써 연주기의 동결융해 사이클도 확인된다. 동결지수가 더 높은 북동향 암벽에서 겨울철 암온 저하량이 더 크고, 결과적으로 암벽 내부 더 깊숙이까지 동결이 진행되는 것으로 보인다. 동결파쇄의 최적 온도 기준점으로 알려져 있는  $-3^{\circ}\text{C}$  이하의 지속시간도 북동향 암벽에서 더 길어 남서향 암벽보다 일주기성 동결융해 사이클의 빈도는 낮아도 동결강도는 더 크다. 암벽의 향에 따른 일사 조건의 차이가 동결융해 사이클의 출현 횟수와 동결 지속시간을 결정함으로써 일주기성 동결융해 사이클은 남서향 암벽에서, 연주기성 동결융해 사이클은 북동향 암벽에서 현저하게 나타난다.

이번 관측으로부터 한라산 정상 용암돔 암벽면에서는 일주기성 동결융해 사이클이 빈번하게 발생하고 있으며, 강수와 안개에 의한 수분 공급도 잘 이루어지는 곳이므로 암벽면에서 바리와 같은 마이크로 스케일의 동결파쇄가 일어날 가능성은 충분하다. 백록담 화구륜 일대를 덮고 있는 암설은 이런 동결파쇄의 결과로도 볼 수 있다. 또한 계절적 동결기의 암온 저하량과 동결 지속시간 등 동결 강도를 고려하면 압괴 분리와 같은 매크로 스케일의 동결파쇄가 진행되고 있을 가능성도 배제하기 어렵다. 그러나 암석의 동결파쇄는 온도 조건에 의해서만 결정되는 것은 아니므로 한라산에서의 암설 생산과 압괴 분리를 정확하게 파악하기 위해서는 식생피복, 지형적 위치, 고도, 향을 달리하는 다양한 장소의 온도 자료 축적과 더불어 암석 물성과 수분 공급에

관한 조사가 필요하다.

## 주

- 1) 적당한 절리가 없는 암벽에서 암석의 표면 온도를 관측하는 경우에는 보통 암벽에 드릴로 구멍을 뚫고 온도감지센서를 삽입한 후 센서를 고정시키기 위하여 실리콘으로 구멍을 메우는 방식을 사용한다(예를 들면, Matsuoka, 1990; Lewkowicz, 2001; 瀬戸, 2005; Grab, 2007). 관측에 사용한 센서의 두께는 2mm이므로 구멍 내부를 채우고 있는 실리콘의 두께를 고려할 때 실리콘으로 인한 온도 관측의 오차는 크지 않을 것으로 생각되며, 구멍 내부의 물성 변화를 최대한 줄이기 위하여 관측 암체에서 발생한 암분을 실리콘에 섞어 충전재로 사용하였다.
- 2) 암온의 관측 기간은 2006년 11월부터 2008년 4월까지로 두 번의 겨울을 포함하고 있어 실제 연평균 암온보다 낮은 값을 보이고 있다. 따라서 관측 기간을 1년으로 나누어 연평균 암온을 구하면, 남서향 암벽은  $6.7^{\circ}\text{C}$ (2006.11~2007.10),  $6.5^{\circ}\text{C}$ (2007.1~2007.12),  $6.2^{\circ}\text{C}$ (2007.5~2008.4)이며, 북동향 암벽은  $5.2^{\circ}\text{C}$ (2006.11~2007.10),  $5.0^{\circ}\text{C}$ (2007.1~2007.12),  $4.7^{\circ}\text{C}$ (2007.5~2008.4)이다.
- 3) 2007년 1월 1일부터 12월 31일까지 1년을 대상으로 동결일, 동결융해일 및 비동결일의 출현일수를 비교하면, 남서향 암벽에서는 동결일 54일, 동결융해일 72일, 비동결일 239일이며, 북동향 암벽에서는 동결일 101일, 동결융해일 56일, 비동결일 208일이다.
- 4) 동결지수(freezing index)는 동결 기간에  $0^{\circ}\text{C}$  이하 온도의 크기와 지속시간을 곱한 것으로서, 토양의 최대 동결심도를 구하는 데 중요한 지표가 된다(日本雪氷學會, 1990).
- 5) 동결심도( $D$ , cm)를 구하는 가장 간단한 경험식으로  $D = \alpha/F$ 로 표현할 수 있다. 여기에서  $F$ 는 일평균 기온으로부터 구한 동결지수( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ )이며,  $\alpha$ 는 비례정수로 보통 2~5의 값을 지닌다. 따라서 경험적으로 동결심도는 동결지수의 제곱근에 비례함을 알 수 있다(福田, 1982). 이 경험식은 동결지수가  $1,000^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ 까지의 계절적 동결 지역에 적용되고 있다(木下, 1984).

## 참고문헌

- 공우석, 1999, “한라산의 수직적 기온 분포와 고산식물의 온도적 범위”, 대한지리학회지, 34, 385-393.
- 공우석, 2007, 생물지리학으로 보는 우리 식물의 지리와 생태, 지오북.

- 국립공원관리공단, 2002, 한라산국립공원 자연자원조사.  
권혁재, 1999, 지형학, 법문사.  
김도정, 1970, “한라산의 구조토 고찰”, 낙산지리, 1, 3-10.  
김태호, 2001, “한라산 백록담 화구저의 유상구조토”, 대한지리학회지, 36, 233-246.  
김태호, 2006a, “한라산 아고산 초시대 나지의 확대속도와 침식작용”, 대한지리학회지, 41, 233-246.  
김태호, 2006b, “한라산 유상구조토의 붕괴 프로세스와 요인”, 한국지역지리학회지, 12, 437-448.  
김태호, 2008, “한라산 성판악 등산로 노퍽의 확대속도와 요인”, 대한지리학회지, 43, 296-311.  
김태호, 2010, “한라산 아고산대에서의 사면 물질 이동”, 대한지리학회지, 45, 375-389.  
오중주 · 박승필 · 성영배, 2012, “무등산 평활사면 (cryoplanation surface)의 형성시기와 분포 특성”, 한국지형학회지, 19, 83-97.  
양재혁, 2011, “동결-융해작용에 따른 암석풍화의 특성”, 한국지형학회지, 18, 21-36.  
윤성호 · 고정선 · 강순석, 2002, “백록담 분화구 일대 화산암류의 화산지질학적 연구”, 한라산연구소 조사연구보고서, 1, 137-167.  
전영권, 1993, “태백산 남부산지의 암설사면지형”, 대한지리학회지, 28, 77-98.  
전영권, 1995, “만어산의 Block Streams에 관한 연구”, 한국지형학회지, 1, 43-56.  
제주대학교 · 부산대학교 · 난대산림연구소, 2005, 한라산 백록담 담수보전 및 암벽붕괴 방지방안.  
제주도, 2000, 자연친화적인 한라산 삭도설치 타당성 조사.  
瀬戸眞之, 2005, “足尾山地北部古峰ヶ原高原の露岩に働く凍結・融解サイクル”, 地形, 26, 65-77.  
木下誠一, 1984, “永久凍土の分布と特徴”, 福田正己 · 小嶋尚 · 野上道男(編) 寒冷地域の自然環境, 北海道大學圖書刊行會, 99-121.  
福田正己, 1982, “土の凍結過程と凍上現象”, 木下誠一(編) 凍土の物理學, 森北出版, 29-59.  
小泉武榮, 1998, 山の自然學, 岩波書店.  
松岡憲知, 1992, “凍結融解作用の機構からみた周氷河地形”, 地理學評論, 65A, 56-74.  
玉生志郎, 1990, “韓國濟州島の火山岩のK-Ar年代とその層序的解釋”, 日本地質調査所月報, 41, 527-537.  
日本雪氷學會, 1990, 雪氷辭典, 古今書院.  
増澤武弘, 2009, 高山植物學, 共立出版.  
Anderson, R. S., 1998, “Near-surface thermal profiles in alpine bedrock: implications for the frost weathering of rock”, *Artic and Alpine Research*, 30, 362-372.  
Coutard, J. P. and Francou, B., 1989, “Rock temperature measurements in two alpine environments: implications for frost shattering”, *Artic and Alpine Research*, 21, 399-416.  
French, H. M., 2007, *The Periglacial Environment*, John Wiley.  
Goudie, A. S. and Viles, H. A., 1999, “The frequency and magnitude concept in relation to rock weathering”, *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband*, 115, 175-189.  
Grab, S., 2007, “Rock-surface temperatures of basalt in the Drakensberg alpine environment, Lesotho”, *Geografiska Annaler*, 89A, 185-193.  
Hall, K., 1997, “Rock temperature and implications for cold region weathering: I. New data from Viking Valley, Alexander Island, Antarctica”, *Permafrost and Periglacial Processes*, 8, 69-90.  
Hall, K., 1998, “Rock temperature and implications for cold region weathering: II. New data from Rothera, Adelaide Island, Antarctica”, *Permafrost and Periglacial Processes*, 9, 47-55.

- Hall, K., 1999, "The role of thermal stress fatigue in the breakdown of rock in cold regions", *Geomorphology*, 31, 47-63.
- Kim, T., 2008, "Thufur and turf exfoliation in the subalpine grassland of Mt Halla in Jeju Island, Korea", *Mountain Research and Development*, 28, 272-278.
- Lewkowicz, A. G., 2001, "Temperature regime of a small sandstone tor, latitude 80°N, Ellesmere Island, Nunavut, Canada", *Permafrost and Periglacial Processes*, 12, 351-366.
- Matsuoka, N., 1990, "The rate of bedrock weathering by frost action: Field measurement and a predictive model", *Earth Surface Processes and Landforms*, 15, 73-90.
- Matsuoka, N., 2001, "Microgelivation versus macrogelivation: towards bridging the gap between laboratory and field frost weathering", *Permafrost and Periglacial Processes*, 12, 299-313.
- Matsuoka, N. and Murton, J., 2008, "Frost weathering: recent advances and future directions", *Permafrost and Periglacial Processes*, 19, 195-210.
- Matsuoka N., Moriwaki, K., Iwata, S. and Hirakawa, K., 1990, "Ground temperature regimes and their relationship to periglacial processes in the Sør Rondane Mountains, East Antarctica", *Proceedings of the NIPR Symposium on Antarctica Geoscience*, 4, 55-66.
- McGreevy, J. P., 1985, "Thermal properties as controls on rock surface maxima, and possible implications for rock weathering", *Earth Surface Processes and Landforms*, 10, 125-136.
- Sass, O., 2005, "Spatial patterns of rockfall intensity in the northern Alps" *Zeitschrift für Geomorphologie*, NF. Supplementband, 138, 51-65.
- Won, C. K., Matsuda, J., Nagao, K., Kim, K. H. and Lee, M. W., 1986, "Paleomagnetism and radiometric age of trachytes in Jeju Island, Korea", *Journal of Korea Institute of Mining Geology*, 19, 25-33.
- Yatus, E., 1988, *The Nature of Weathering: An Introduction*, Sozosha.

최초투고일 12. 09. 05

최종접수일 12. 09. 16