

# 한라산 아고산대에서의 사면 물질 이동

김태호\*

## Slow Mass Movement on a Subalpine Slope of Mount Halla, Jeju Island

Taeho Kim\*

**요약** : 한라산 표고 1,710m에 발달한 나지 표층에 2개의 페인트 라인을 설치하여 자갈의 이동량을 관측하고, 이동 프로세스와 관련된 요인을 검토하였다. 관측 기간에 발생한 자갈의 이동량은 평균 58.2cm로서 일평균 이동 거리는 0.24cm이다. 계절별로 비교하면 동결기 0.3cm에 대하여 비동결기는 0.05cm에 불과하여 표층 자갈은 주로 동결기에 주빙하 프로세스를 통하여 이동하고 있다. 특히 서릿발 포행을 비롯한 동상 포행이 자갈의 이동을 주도하고 있다. 사면 경사각의 영향은 관측 기간 내내 측선Ⅱ의 이동량이 측선Ⅰ보다 큰 결과에 반영되어 있지만, 암괴와 식생이 자갈의 이동을 방해하므로 절대적이지는 않다. 자갈의 크기와 비중도 이동량에 관여하는 요인으로서 특히 스크리아의 작은 비중이 매우 큰 이동량을 가져왔다.

**주요어** : 사면 물질 이동, 동상 포행, 서릿발, 아고산대, 한라산

**Abstract** : In order to investigate the rates and factors of slow mass movement on a subalpine slope of Mount Halla, two painted stone lines were monitored in a bare patch at 1,710 m a.s.l. The mean movement of surface gravels is 58.2 cm, equivalent to 0.24 cm/day. However, the rates of movement vary with seasons. Compared with 0.05 cm/day of a non-frozen season, a frozen season shows 0.3 cm/day. It implies that the movement of surface gravels could be largely controlled by periglacial processes during a frozen season. In particular, frost creep including needle ice creep plays a main role in the movement of gravels under the thermal and soil conditions which are favorable for needle ice development. Since line II is located at a steeper slope than line I, the movement of line II was always larger than that of line I. However, slope gradient is not the most dominant factor contributing the movement of gravels, which can be interrupted by downslope big gravels and vegetation patches. The size and specific weight of gravels also can influence the movement of gravels. Porous and light scoriae result in relatively quick movement of gravels on the subalpine slope of Mount Halla.

**Key Words** : slow mass movement, frost creep, needle ice, subalpine zone, Mount Halla

### 1. 서론

산악 지역의 완사면 표층부에서 일어나는 물질 이동에는 토양 포행과 솔리플럭션 같은 느린 속도의 매스

무브먼트를 비롯하여 틸과 포상류에 의한 우세 작용, 바람에 의한 취식 작용 등 다양한 프로세스가 관여하고 있다. 이들 프로세스는 주빙하성 프로세스와 비(非)주빙하성 프로세스로 크게 구분할 수 있는데, 산악 지

이 논문은 2008년도 제주대학교 학술연구지원사업에 의하여 연구되었으며, 논문의 요지는 2009년도 대한지리학회 연례학술대회에서 발표하였다.

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

역의 기후 특성을 반영하여 주빙하성 프로세스가 탁월한 것으로 보고되고 있다(Shoma *et al.*, 1979; Suzuki, 1992). 또한 이들 완사면에서는 물질 이동뿐 아니라 토양 침식의 경우에도 서릿발 작용 등 동결·융해와 관련된 주빙하성 프로세스가 가장 중요한 것으로 알려져 있다(King, 1971; Grab, 2002; Kim, 2008).

현재 한반도 중·남부 지역은 계절적으로 주빙하성 프로세스가 진행되고 있는 아고산대(Jang, 1983; Park, 2000; Kim, 2001)와 다설 산지(Lee, 1991; Kwon, 1992; Kee, 1999)를 제외하면 활발한 주빙하 환경에 놓여 있다고 보기 어렵다. 그러나 한반도 전역에 걸쳐 특히 남해안 저지대까지 광범위하게 분포하고 있는 암설 사면은 최종 빙기에 한반도가 강력한 동결 작용을 받았음을 시사하고 있다(Kwon, 1999). 더욱이 암설 사면 이외에도 화강암 풍화층, 단구 퇴적물, 사구 퇴적층 등의 지표 피복물에 남겨져 있는 엽상 구조(Kwon, 1987)를 비롯하여 Bt 밴드(Park, 1987; Oh, 1989; Kee, 1999), 토양 썩기(Sin *et al.*, 2004), 인블루션(Choi, 1988) 같은 다양한 결빙 구조를 통해서도 과거 한반도를 지배했던 주빙하 환경을 확인할 수 있다(Oh, 2006).

이런 주빙하 환경 하에서는 토양 포행과 솔리플렉션이 사면의 물질 이동을 주도했을 것으로 생각되는데, 도로 절개지에서 기반암과 명료한 경계를 이루며 기반암 위에 놓여 있는 녹설층, 또는 모나지 않은 암괴로 이루어진 암괴원에서 사면의 경사 방향과 암괴의 장축이 일치하는 사실 등으로부터 솔리플렉션에 의한 물질 이동을 확인할 수 있다(Kwon, 1999). 또한 수평 배열을 보여야 하는 Bt 밴드가 물결 모양이나 망상 모양으로 변형되어 있는 모습도 당시 활발하게 일어났던 토양 포행의 흔적으로 판단하고 있다(Kee, 1999; Oh, 2006). 이와 같이 최종 빙기에는 한반도 전역에서 주빙하성 물질 이동이 활발하게 진행되었으나 물질의 이동량이나 이동 속도에 관한 연구가 전혀 없어 이들 주빙하성 물질 이동이 사면 지형의 발달에 어느 정도 기여했는지 정량적으로 파악하기는 어려운 실정이다.

한편, 한라산 아고산대에는 표고 1,400m의 사제비동산 일대부터 1,600m의 만세동산, 민오름 및 선작지왓, 1,800m의 장구목오름 일대까지 주로 서사면과 남

사면에 걸쳐 넓게 초지가 분포하고 있다. 사초를 비롯하여 관목과 최근 빠른 속도로 확산되고 있는 제주조릿대로 이루어진 초지대에는 산릉과 완사면에 다양한 크기와 형태의 나지가 발달하고 있다(Kim, 2006). 나지의 표면은 토양이 침식되는 과정에서 남겨진 각력으로 덮여 있어 나지 가장자리에 출현하는 작은 단애를 경계로 주변의 초지와는 명료한 차이를 보이고 있다. 자갈로 덮여 있는 이들 나지의 모습은 주빙하성 물질 이동이 활발하게 일어났을 것으로 생각되는 한라산 아고산대 최종 빙기의 지표 경관을 연상시킨다. 따라서 본 연구에서는 한라산 장구목오름 남서쪽 표고 1,710m의 완사면에 발달한 나지에서 표층 자갈의 이동 거리를 관측하고, 이들 자갈의 주된 이동 양식으로서 동상 포행과 관련된 요인을 검토하였다.

## 2. 조사 지역 및 방법

### 1) 조사 지역 개관

한라산 아고산대는 정상부의 용암돔 지형을 제외하면 완사면으로 이루어진 순산화산의 특징을 잘 보여준다. 특히 표고 1,600m 이상의 서사면에는 만세동산과 선작지왓을 비롯하여 장구목과 민오름 일대의 산릉 등 완사면이 넓게 나타난다(Figure 1). 이들 완사면은 범정동 조면현무암과 윗세오름 조면현무암 등 주로 조면현무암으로 이루어져 있다(Jeju Provincial Government, 2000). 반면에 상대적으로 급경사를 보이는 지역에는 7만 년 전(Tamanyu, 1990)에 분출한 것으로 알려진 한라산 조면암이 분포하고 있다.

한라산 아고산대 서사면의 표고 1,672m에 위치한 윗세오름 자동기상관측소의 2006년도 연평균 기온은 6.4°C이며, 평균 최고 기온과 최저 기온은 각각 10.7°C와 2.8°C를 기록하였다. 또한 2006년도의 연 강수량은 3,991.5mm이며, 월별로는 5월과 6월이 869.5mm와 860.5mm로서 가장 많고 장마철인 7월이 685.5mm를 기록하였다. 그러나 12월부터 3월까지 겨울철의 월 강수량은 전부 100mm를 넘지 못하여 계절적인 편차가

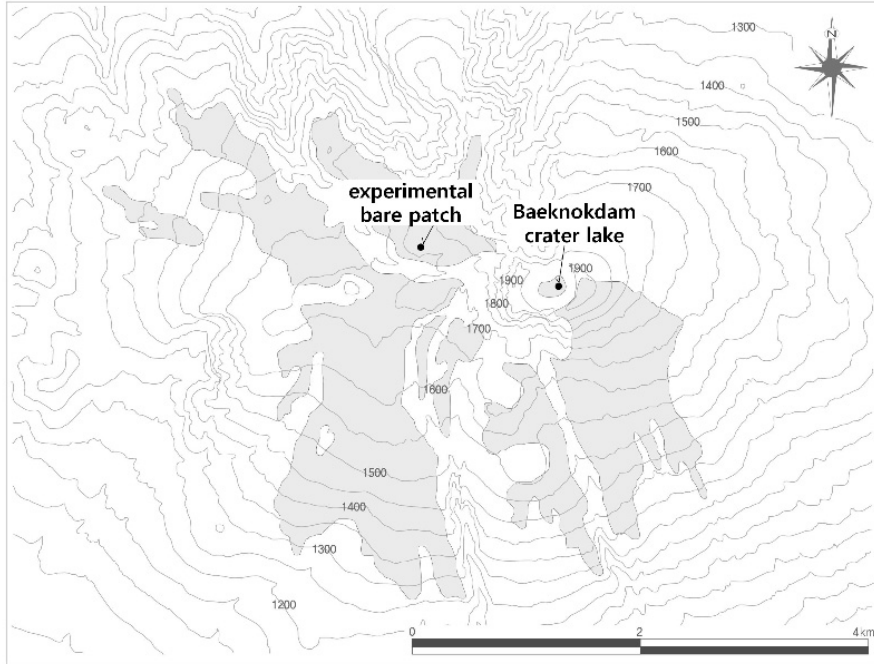


Figure 1. Distribution of the subalpine grassland (shade) of Mount Halla and the experimental bare patch in a northwestern gentle slope. 한라산 아고산 초지대(회색)와 실험 나지.

큰 편이다(Jeju Regional Meteorological Office, 2007).

한라산 아고산대에는 구상나무로 대표되는 침엽수림을 비롯하여 관목림과 초본 군락이 넓게 분포한다(Yim *et al.*, 1991). 이 가운데 관목림과 초본 군락은 완만한 서사면에 집중적으로 나타나 초지대를 이루고 있지만, 서사면에서도 북향이나 하곡 사면에는 구상나무의 교목림이 출현한다(Figure 1). 이런 초지대의 분포 특성에는 일사로 인한 건조 현상이나 바람이 영향을 미치는 것으로 추정하고 있다(Kim and Kim, 1985).

## 2) 실험 나지 및 조사 방법

실험 나지는 장구목오름 남서사면의 표고 1,710m 지점에 위치한다(Figure 1). 평균 경사각 7.6°의 사면에 출현하는 나지의 크기는 26×12m로서 형태는 타원형에 가깝다. 주변 초지와와의 경계에는 사면 아래쪽에

해당하는 남서쪽을 제외하면 나지 전체에 걸쳐 높이 30~80cm의 단애가 형성되어 있다(Figure 2). 나지 표면에는 시로미와 김의털 등 식생 패치도 일부 분포하나 대부분 각력으로 덮여 있으며, 직경 60cm에 이르는 암괴도 일부 산재한다. 또한 나지 남단의 제주조릿대와 경계를 이루고 있는 지점에는 자갈과 암괴들이 밀집하여 솔리플렉션 로브 같은 모습을 만들고 있다. 나지 표면에는 여러 곳에 띠의 흔적이 출현하여 지표류에 의해서도 암설이 사면 아래쪽으로 이동되는 것으로 보인다.

실험 나지에서 사면과 직교하는 방향으로 250cm 길이의 측선을 두 곳(사면 아래쪽은 측선 I, 사면 위쪽은 측선 II)을 정한 후, 측선을 따라 폭 5cm의 페인트 라인을 설치하였다. 페인트 라인의 양끝 지면에는 40cm 길이의 봉을 박아 넣어 움직이지 않는 기준점으로 삼았다. 그리고 두 봉을 잇는 기준선을 따라 10cm 간격으로 페인트 라인의 이동량을 주기적으로 계측하였다. 페인트 라인은 2006년 11월 3일에 설치했으며, 계측은

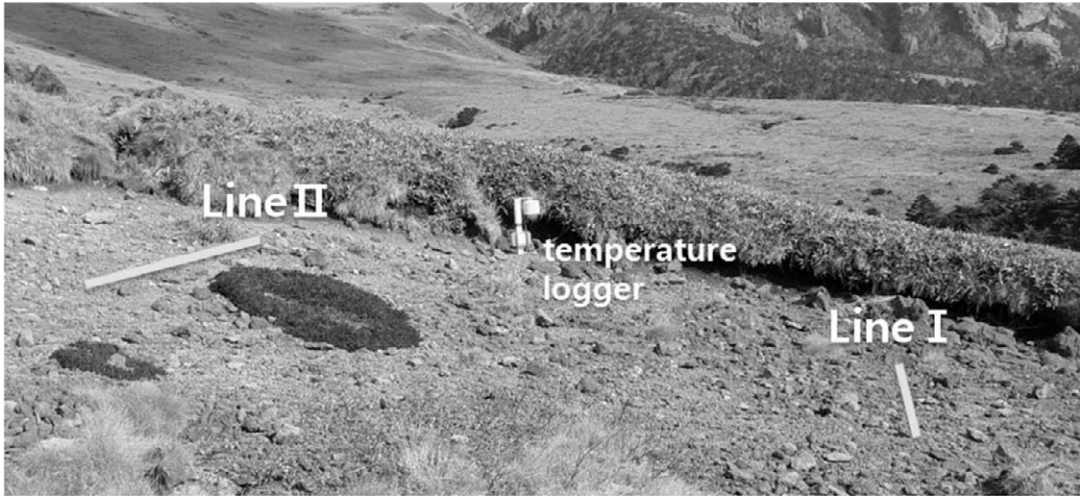


Figure 2. Two painted stone lines on surface gravels in the experimental bare patch.  
실험 나지 표층 자갈에 설치된 페인트 라인.

2006년 12월 10일, 12월 27일, 2007년 4월 2일, 5월 7일, 6월 11일 및 7월 31일에 실시하였다. 단, 12월 27일에는 눈에 덮여 있지 않은 측선Ⅱ에서만, 7월 31일에는 페인트 변색으로 이동한 자갈의 식별이 어려웠기 때문에 측선Ⅰ에서만 계측하였다. 실험 나지의 지표 형상을 파악하기 위하여 두 기준선과 일치하는 방향으로 실험 나지의 횡단면을, 그리고 두 기준선과 직교하는 방향으로 종단면을 측량하였다. 또한 두 기준선을 따라 10cm 간격으로 사면의 경사각을 계측하였다.

한편, 실험 나지 일대 완사면의 토양 단면은 토색을 기준으로 상부의 흑갈색 토층(7.5YR 2/2)과 하부의 암갈색 토층(7.5YR 3/4)으로 크게 구분된다. 나지에서는 상부의 흑갈색 토층이 토양 침식으로 인하여 제거된 상태이므로 표면의 자갈층 밑에 놓여 있는 암갈색 토층을 대상으로 입도 분석을 실시했으며, 나지 표면을 덮고 있는 자갈의 크기도 계측하였다. 이와 동시에 실험 나지의 온도 환경을 파악하기 위하여 HOBOS사의 데이터로거(H08-008-4)와 센서(TMC6)를 사용하여 지상 50cm 높이의 기온과 1cm 깊이의 지온을 관측하였다(Figure 2). 그러나 2006년 10월 2일부터 시작된 관측은 데이터로거의 작동 중단으로 2007년 3월 27일까지만 이루어졌다. 따라서 조사 지점에서 가장 근거리

인 표고 970m에 위치한 어리목 자동기상관측소의 관측 자료를 분석하여 보완하였다. 또한 지온 센서도 작동 이상을 보였기 때문에 지온 자료는 이번 분석에 사용하지 않았다.

### 3. 결과

#### 1) 자갈의 이동량

관측 기간별 페인트 라인의 이동 모습과 자갈의 이동량을 Figure 3과 Table 1로 정리하였다. 측선Ⅰ에서는 11월 3일~12월 10일 15.9cm, 12월 10일~4월 2일 14.3cm, 4월 2일~5월 7일 9.5cm, 5월 7일~6월 11일 1.6cm, 6월 11일~7월 31일 1.3cm이며, 측선Ⅱ에서는 11월 3일~12월 10일 24.6cm, 12월 10일~27일 8.1cm, 12월 27일~4월 2일 18.8cm, 4월 2일~5월 7일 20.2cm, 5월 7일~6월 11일 2.0cm이다. 따라서 관측 기간에 발생한 자갈의 총 이동량은 측선Ⅰ 42.6cm, 측선Ⅱ 73.7cm이며, 일평균 이동 거리는 측선Ⅰ 0.16cm, 측선Ⅱ 0.34cm이다.

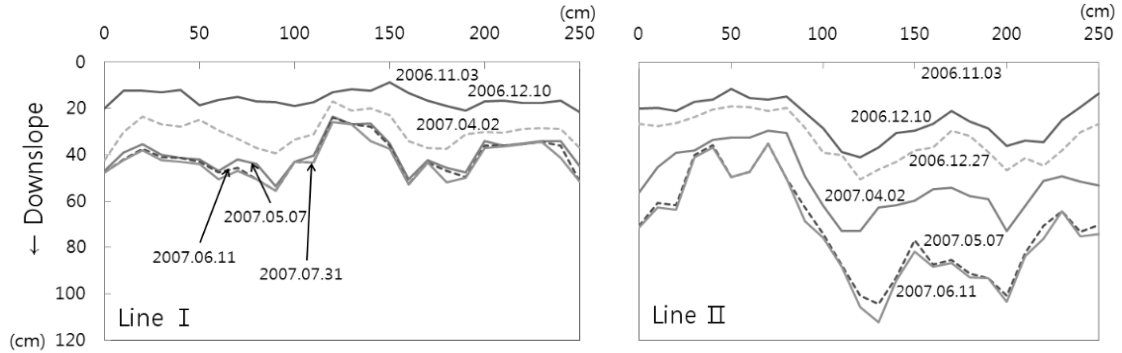


Figure 3. Displacement of two painted stone lines. 페인트 라인의 관측 기간별 이동 거리.

Table 1. Mean movement of two painted stone lines. 페인트 라인의 평균 이동 거리.

Date	Line I		Line II	
06. 12. 10	15.9	39.7(0.21)	24.6	71.7(0.39)
06. 12. 27	-		8.1	
07. 4. 2	14.3		18.8	
07. 5. 7	9.5	2.9(0.03)	20.2	2.0(0.06)
07. 6. 11	1.6		2.0	
07. 7. 31	1.3			
Total	42.6(0.16)		73.7(0.34)	

Notes: Unit is cm, and figures in brackets indicate a mean daily movement of surface gravels.

관측 기간을 계절별로 구분하여 비교하면, 동결기로 분류할 수 있는 11월 3일부터 5월 7일까지의 이동량은 측선 I에서는 39.7cm, 측선 II에서는 71.7cm이다. 이 기간의 일수는 185일이므로 일평균 이동 거리는 각각 0.21cm와 0.39cm가 된다. 반면에 비동결기라고 할 수 있는 5월 7일부터 7월 31일까지 85일 동안에 측선 I에서 관측된 이동량은 2.9cm이며, 6월 11일까지만 관측이 이루어진 측선 II에서는 2.0cm이다. 관측 일수를 토대로 일평균 이동 거리를 구하면 각각 0.03cm와 0.06cm에 불과하므로 동결기에 비하면 비동결기의 이동 속도가 매우 느림을 알 수 있다.

동결기를 다시 동결 진행기(11월 3일~12월 10일)와 융해 진행기(4월 2일~5월 7일)로 구분하여 비교하면, 동결 진행기에는 측선 I 15.9cm, 측선 II 24.6cm로 평

균 20.3cm를 기록하였다. 반면에 융해 진행기에는 측선 I 9.5cm, 측선 II 20.2cm로 평균 14.9cm이다. 따라서 각각의 관측 일수 37일과 35일을 기준으로 구한 일평균 이동 거리는 0.55cm와 0.42cm로서 동결 진행기가 융해 진행기에 비하여 1.3배 정도 크게 나타났다.

한편, 자갈의 이동량은 같은 측선일지라도 지점에 따라 차이가 크게 나타나 측선 I은 23.5~53.3cm, 측선 II는 35.0~104.0cm의 범위를 보이고 있다. 평균 경사가 5.3°인 측선 I에서 10cm 간격의 지점별 경사는 3.9~6.6°이다. 반면에 측선 II는 경사가 더욱 커 평균 8.1°이며, 지점별로는 5.1~10.2°이다. 자갈의 이동량과 지점별 경사를 비교하면, Figure 4와 같이 경사가 증가함에 따라 전반적으로 자갈의 이동량은 증가하고 있으나 결정계수는 0.67로서 그다지 높지는 않다.

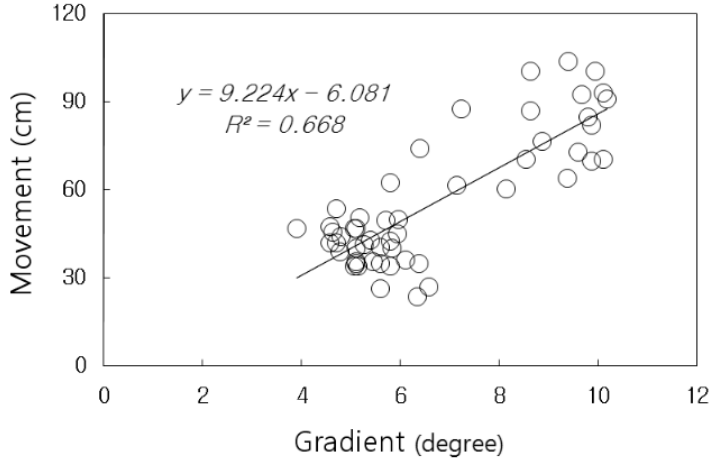


Figure 4. Relationship between mean movement of gravels and slope gradient. 지점별 경사와 자갈 이동량의 관계.

## 2) 온도 환경

지상 50cm 지점의 기온 관측 결과에 의하면, 시간별 기온은 10월 27일 22시에  $-0.61^{\circ}\text{C}$ 를 기록함으로써 처음으로 영하로 내려갔지만, 일평균 기온은 11월 7일 처음으로  $0^{\circ}\text{C}$  이하인  $-1.46^{\circ}\text{C}$ 를 기록하였다. 11월에 일평균 기온이  $0^{\circ}\text{C}$  이하로 내려간 일수는 8일이다. 12월에는 10일 전후의 4일간, 그리고  $2.01^{\circ}\text{C}$ 를 기록한 26일을 제외한 나머지 26일간의 일평균 기온은 전부  $0^{\circ}\text{C}$

이하로 내려갔다. 1월과 2월의 일평균 기온도 전부 영하를 기록했으며, 일평균 기온이 다시  $0^{\circ}\text{C}$  이상이 된 것은  $2.6^{\circ}\text{C}$ 를 기록한 3월 3일이 처음이다. 그러나 3월 중순까지의 기온도 이틀을 제외하면 전부 영하이며,  $-0.4^{\circ}\text{C}$ 를 기록한 22일을 마지막으로 일평균 기온은 영하로 내려가지 않았다(Figure 5).

관측 기간 중 일평균 기온의 최저치는 12월 28일에 기록된  $-11.07^{\circ}\text{C}$ 이며, 시간별 최저 기온은 12월 30일 오전 4시에 기록된  $-14.1^{\circ}\text{C}$ 이다. 한라산 아고산대에서

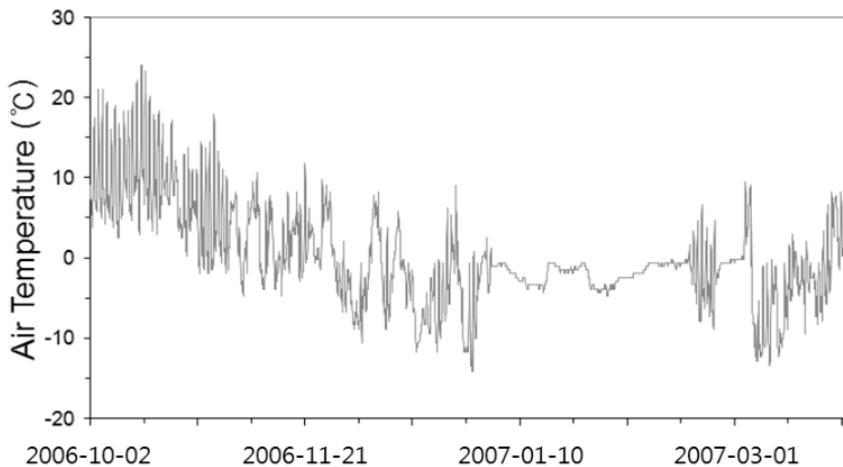


Figure 5. Air temperature of the experimental bare patch. 실험 나지의 기온 변화.

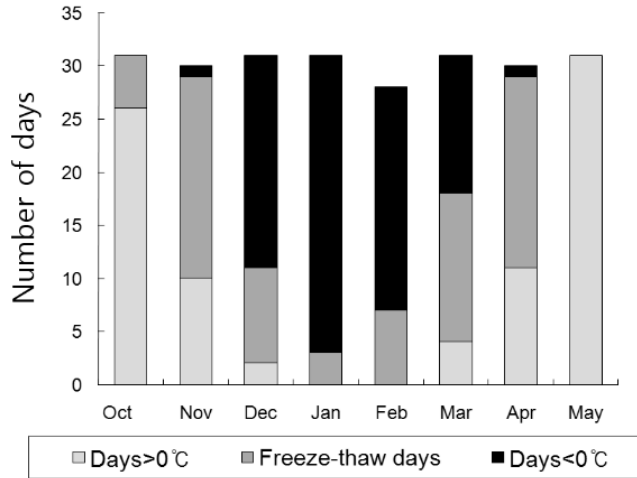


Figure 6. Freezing and thawing condition in the experimental site during a measured period.  
관측 월별 융해, 동결·융해 교대 및 동결 일수.

최저 기온은 보통 1월에 관측된다(Kim, 2008). 그러나 실험 나지는 1m 이상 눈이 쌓이는 곳으로서, 1월과 2월에는 관측 장비가 적설의 영향을 받았기 때문에 눈이 본격적으로 쌓이기 직전인 12월에 최저 기온이 관측된 것으로 판단된다. 실제로 1월과 2월에 기록된 일평균 기온의 최저치는 1월 28일의  $-4.11^{\circ}\text{C}$ 로서 대부분  $-1\sim-3^{\circ}\text{C}$ 에 불과하다. 반면에 눈이 녹아 관측 장비가 대기에 노출된 3월에는 기온이 다시 내려가 6일에는  $-10.72^{\circ}\text{C}$ 까지 기록하고 있다.

관측을 시작한 10월에는 27일부터 최고 기온과 최저 기온이  $0^{\circ}\text{C}$ 를 사이에 두고 변동하는 소위 동결·융해 교대일이 5일간 출현하였다. 11월에는 이 일수가 19일로 늘어났으며, 12월에는 9일간 나타났다. 1월에도 처음 3일간은 동결·융해 교대일이 관측되었으며, 이후 1월 4일부터 2월 17일까지 45일간은 최고 기온도 영하에 머무르는 동결일이 이어졌다. 동결·융해 교대일은 2월 18일부터 다시 출현하는데, 관측이 멈춘 3월 27일까지 38일 동안에 동결·융해 교대일과 동결일은 각각 20일과 17일 출현하였다. 3월 26일에는 최저 기온도  $0^{\circ}\text{C}$  이상을 기록하는 융해일이 처음으로 관측되었다.

관측이 중단된 3월 28일 이후의 기온은 어리목 자동 기상관측소의 기상 자료와 한라산 아고산대의 기온 체감률  $-0.58^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ (Kong, 1999)을 이용하여 추정하

였다. 그 결과 실험 나지가 위치한 표고 1,710m 지점의 동결·융해 교대일은 3월 말에는 1일, 4월에는 18일이 출현하며, 4월 26일 이후로는 융해일이 이어진다. 따라서 관측 기간에 발생한 동결·융해 교대일은 75일로서 2개월 반에 걸쳐 하루 주기의 동결·융해가 일어나고 있다. 또한 동결일도 84일에 달하므로 1년 가운데 5개월 이상 동결 작용을 받고 있다. 특히 4월과 11월에는 각각 19일과 18일씩 동결·융해가 반복되고 있는 등 실험 나지는 동결 작용이 활발하게 일어나는 장소로 볼 수 있다(Figure 6).

### 3) 자갈 및 토양의 특성

실험 나지는 다양한 크기의 자갈로 덮여 있으나 사면 아래로 내려갈수록 자갈의 크기는 증가하는 경향을 보이고 있다(Figure 2). 나지 표면을 덮고 있는 자갈의 크기는 측선 I이 설치된 사면 하부에서는 1.5~15.5cm의 범위를 보이며, 평균 직경은 5.7cm를 기록하고 있다. 반면에 측선 II가 설치된 사면 상부에서는 1.0~10.5cm의 범위를 보이며, 평균 직경은 3.5cm이므로 사면 하부에 비하여 약 2/3 크기이다(Figure 7).

실험 나지를 덮고 있는 자갈의 암질은 조면암과 스킨아로 구분할 수 있다. 자갈의 암질별 구성비를 비

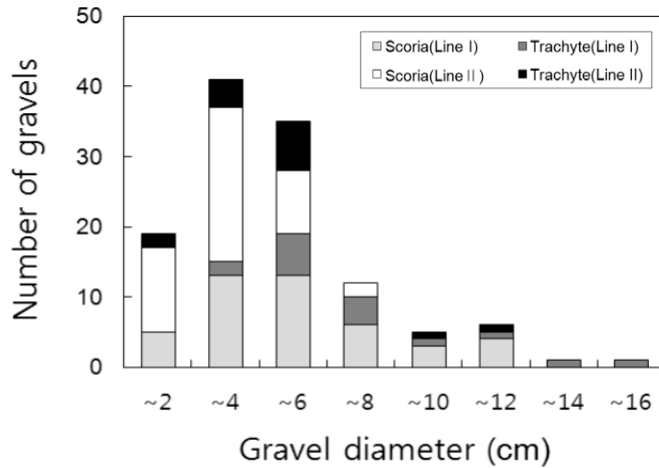


Figure 7. Number of gravels based on the lithology and diameter. 암질 및 직경별 자갈의 빈도 분포.

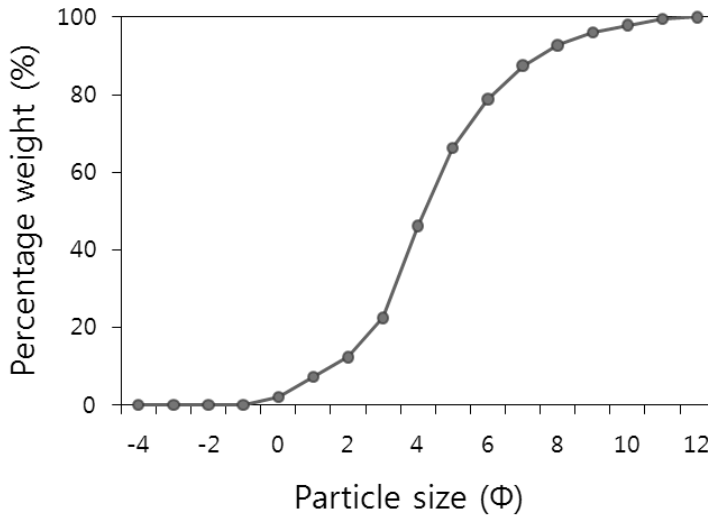


Figure 8. Distribution of particle size of dark brown soil in the experimental bare patch. 실험 나지 암갈색 토양의 입경 분포.

교하면, 적색 스코리아가 전체 자갈의 74.2%를 차지하고 있다. 이런 경향은 사면 전체에 걸쳐 비슷하여 측선 I에서는 73.3%, 측선 II에서는 75.0%를 스코리아가 차지하고 있다(Figure 7).

나지의 표층을 이루는 암갈색 토양의 입도 분석 결과에 따르면, 조사(-1~1Φ) 7.3%, 중사(1~2Φ) 5.0%, 세사(2~4Φ) 33.8%, 실트(4~8Φ) 46.6%, 점토(8~10

Φ) 7.2%의 구성비를 보인다(Figure 8). 따라서 토양 입자 가운데 실트가 가장 높은 비율을 차지하고 있으며, 실트 가운데서는 굵은 실트(4~5Φ)의 비율이 20.2%로서 가장 높고 입경이 작아지면서 구성비도 작아지고 있다. 실험 나지에서 북서쪽으로 1,400m 떨어진 또 다른 나지의 암갈색 토양에서도 실트의 함량은 68%에 달하고 있어 이 일대 토양에서 세립질이 차지하



는 비율은 전반적으로 높은 것으로 판단된다.

#### 4. 고찰

고산 지역의 완사면에서 일어나는 조립질 암설 이동에는 주빙하성 프로세스와 비 주빙하성 프로세스가 모두 관여하고 있다(Suzuki, 1992). 후자의 프로세스로는 우세와 같이 강우 시 출현하는 지표류의 역할이 중요하다. 실험 나지에서도 지표류의 흔적인 린이 종종 발달하고 있으며, 우세가 나지 확대를 조장하고 있다(Kim, 2006). 실제로 2007년 6월 11일부터 7월 31일 사이에 각각 5cm와 4.5cm의 자갈 이동량이 관측된 측선 I의 180cm 지점과 240cm 지점은 모두 린의 발달과 관련이 있으며, 특히 5월 7일부터 6월 11일 사이에 8cm의 이동량을 기록한 측선 II의 130cm 지점에도 린이 출현하였다. 그러나 같은 기간 지표류가 출현하지 않은 다른 지점에서는 대부분의 자갈들이 움직이지 않음으로써 우세로 인한 자갈의 이동은 장소에 따라 상당히 편재되어 있음을 알 수 있다(Figure 3). 즉, 우세로 대표되는 비 주빙하성 프로세스는 사면에 선(線)적으로 작용하고 있다.

반면에 주빙하성 프로세스가 탁월해지는 동결기에는 정도의 차이는 있지만, 장소에 관계없이 전 지점에서 자갈이 움직이고 있어 프로세스가 면(面)적으로 작용하고 있다(Figure 3). 더욱이 두 프로세스가 탁월해지는 시기별로 구분하여 일평균 자갈의 이동 거리를 비교하면, 주빙하성 프로세스의 경우는 0.3cm인데 비하여 비 주빙하성 프로세스는 0.05cm에 불과하여, 전자가 보다 광범위하게 그리고 효율적으로 지표면을 삭박하고 있다. 따라서 실험 나지에서는 주빙하성 프로세스가 사면 발달을 주도하는 프로세스라고 볼 수 있다.

일반적으로 주빙하 지역의 사면에서 가장 광범위하게 발생하는 매스무브먼트는 동상 포행과 젤리플렉션이다(Washburn, 1980). 이 가운데 동상 포행(frost creep)은 동결이 진행되면서 사면에 직각 방향으로 들어 올려진 표층 물질이 용해가 되면 연직 방향으로 내

려앉으면서 발생하는 느린 속도의 이동 양식이다. 서릿발의 생성과 용해에 의한 개별 입자의 이동, 즉 서릿발 포행(needle ice creep)도 동상 포행에 포함된다(Ono, 1978). Figure 9는 표층 자갈을 위로 들어 올린 서릿발 가운데 남쪽에 면한 서릿발이 먼저 녹으면서 자갈이 한쪽으로 기울어진 모습이다. 즉, 자갈의 사면 아래쪽 부분이 먼저 내려앉았기 때문에 사면 위쪽 부분이 들리면서 회전한 일종의 전동(轉動)에 해당한다. 이런 프로세스는 서릿발에 들어 올려진 자갈이 단순히 연직 방향으로 내려앉았을 때보다 이동 거리가 더 길다(Shoma *et al.*, 1979). 실험 나지에서는 동결기에 서릿발에 의해 들어 올려진 표층 자갈을 쉽게 관찰할 수 있는 것으로 보아 서릿발 포행을 비롯한 동상 포행이 활발하게 일어나고 있는 것으로 판단된다.

반면에 젤리플렉션은 수분으로 포화된 사면 표층부의 느린 유동으로서, 두 매스무브먼트는 별개의 작용이나 실제로는 두 유형이 동시에 작용하여 물질 이동을 일으키고 있다. 주빙하 사면에서 물질 이동이 일어나는 깊이는 최대 1.5m 정도로서, 이 가운데 동상 포행에 의해 움직이는 것은 지표로부터 십 수 센티미터 이내이며, 이보다 하층은 젤리플렉션에 의해 움직인다(Koaze, 1983). 실험 나지 일대는 적어도 1월부터 3월까지는 눈으로 덮이는 지역으로서, 적설 때문에 지표의 동결심은 깊지 않으므로 젤리플렉션에 의한 물질 이동은 크지 않을 것으로 생각된다. 일반적으로 젤리플렉션은 동결된 토양이 녹거나 융설로 인하여 지표 부근이 과포화 상태가 되기 쉬운 용해 진행기에 탁월해진다. 그러나 후술하듯이 용해 진행기의 자갈 이동량은 동결 진행기보다 작은 것으로 보아 젤리플렉션의 효과는 동상 포행에 미치지 못하며, 실험 나지에서는 서릿발 포행을 비롯한 동상 포행이 물질 이동을 주도하고 있다.

주로 동결기에 발생하는 표층 물질의 이동 속도는 표층 물질의 물성, 수분 함량, 동결 양식, 동결·용해의 빈도, 동상량 등 다양한 요인의 영향을 받는다(Koaze, 1983). 실험 나지에서 관측 기간에 발생한 동결·용해 교대일은 75일이며, 특히 4월과 11월에는 각각 19일과 18일로서 동상 포행에 유리한 하루 또는 수일 주기의 동결·용해가 빈번하게 반복되고 있다. 또

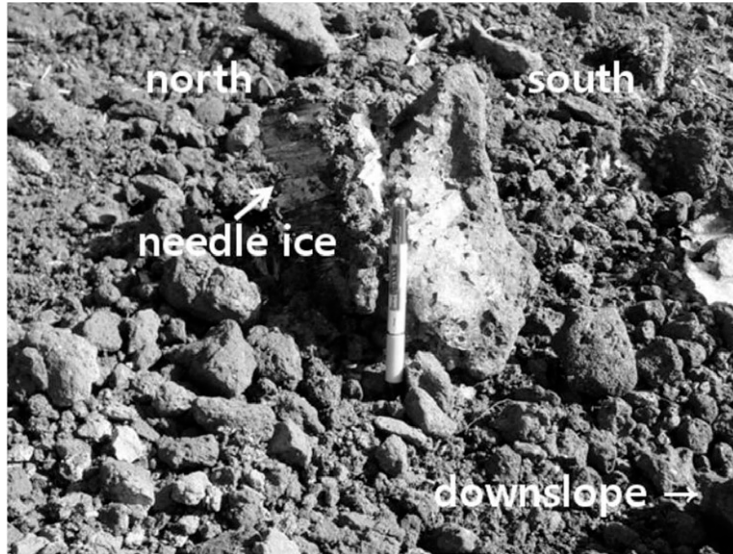


Figure 9. Partial thaw of needle ice makes a gravel to fall and tilt downslope.  
서릿발의 융해로 떨어지면서 사면 아래쪽으로 기울어진 자갈.

한 실험 나지의 토양은 실트의 함량이 46.6%로서 세립질 토양은 일반적으로 토양 공극이 작기 때문에 동결이 진행될 때 높은 공극 수압을 유지함으로써 아이스렌즈나 서릿발 등 분리빙(segregated ice)의 발달에 유리하다(French, 1996). 따라서 실험 나지에서는 이런 요인들이 복합적으로 작용하여 비교적 빠른 표층 자갈의 이동 속도를 기록하고 있다.

동결기를 동결 진행기와 융해 진행기로 구분하여 비교하면, 동결 진행기가 융해 진행기에 비하여 1.3배 빠른 이동 속도를 보이는데(Table 1), 비슷한 결과를 Sawaguchi and Koaze(1998)에서도 확인할 수 있다. 동결 기간에 따라 자갈의 이동 속도에 차이가 나타나는 것은 각각의 기간에 발달하기 쉬운 서릿발의 유형이 다르기 때문이다. 서릿발을 형태적 측면에서 보면, 지표에 석출되어 표면에 토양 입자가 실려 있지 않은 투명한 얼음으로만 이루어진 서릿발(C형), 지중에서 발달하여 상부에 토양 입자가 실려 있는 서릿발(SC형), 지표에 발달했으나 얼음 속에 토양 입자를 포함하고 있는 서릿발(D형)로 크게 구분할 수 있다. 그리고 세 유형 가운데 가장 효과적으로 물질 이동을 일으키는 것은 SC형이다(Ono, 1983; Horii *et al.*, 1987).

일반적으로 C형 서릿발은 토양 수분이 과포화 상태이거나 동결 전선이 지표면 부근에서 정체할 때 잘 발생하는데(Higashi, 1981; Ono, 1982), 융해 진행기에는 동토의 융해로 다량의 수분이 공급되므로 지표 부근은 과포화 상태가 되기 쉽다. 또한 낮에는 기온이 많이 상승하기 때문에 밤에는 기온이 큰 폭으로 내려가기 어려워 동결 전선이 지표면 부근에 정체하기 쉽다(Sawaguchi and Koaze, 1992). 따라서 기온이 큰 폭으로 떨어질 뿐 아니라 지표도 과포화 상태가 되기 어려운 동결 진행기에는 주로 SC형 서릿발이 발생하는 반면 융해 진행기에는 C형이나 D형 서릿발이 발생하는 것으로 생각된다.

한편, 다른 조건이 같은 경우라면 사면의 경사각이 클수록 자갈의 이동 속도는 빨라진다(Higashi and Corte, 1971; Koaze, 1983). 측선 I 과 측선 II 의 사면 경사각은 각각 5.3°와 8.1°이다. 관측 기간 내내 측선 II 의 이동량이 측선 I 보다 크며, 특히 동결기의 경우에는 측선 II 의 이동 속도가 측선 I 보다 1.8배나 빨라 자갈의 이동에 경사각의 영향이 잘 반영되고 있다. 또한 지점별 자갈의 이동량과 경사각의 관계를 보더라도 전반적으로 경사각이 커질수록 자갈의 이동량은 많아



Figure 10. The movement of gravels gets faster with an increase of gravel size. The measuring tape indicates the original position of Line I . 크기가 작아질수록 자갈의 이동량은 커진다. 줄자가 놓여 있는 곳이 측선 I 이 처음 설치된 위치이다.

지고 있다(Figure 4). 그러나 양자의 결정계수는 0.67에 불과하며, 특히 측선 I 의 지점들은 오히려 역의 관계를 보임으로써 경사각이 자갈의 이동량을 결정하는 절대적인 요인이 아님을 알 수 있다.

실제로 자갈의 이동량은 같은 측선에서도 지점에 따라 차이가 크게 나타나 측선 I 은 23.5~53.3cm, 측선 II 는 35.0~104.0cm의 범위를 보이고 있다. 따라서 경사각 이외에도 다른 요인들이 동상 포행의 속도에 관여하는 것으로 생각된다. 표층 물질의 물성과 관련하여 자갈의 크기에 주목하면, 실험 나지의 표층 자갈은 사면 아래쪽으로 갈수록 커지는 경향을 보이는데 (Figure 2), 사면 위쪽의 측선 II 에서는 평균 직경이 3.5cm인데 비하여 측선 I 에서는 5.7cm로 증가하고 있다. 따라서 자갈의 크기 차이도 측선 I 과 측선 II 의 이동량 차이에 반영되어 있을 것이다. 단일 입자별로 자갈의 이동량을 관찰하지는 않았지만, 자갈의 이동 속도는 자갈이 작을수록 빨라질 것으로 생각된다 (Figure 10). 실제로 측선 II 에서 가장 큰 16×8cm 자갈의 경우, 2007년 6월 11일까지의 총 이동량은 35.0cm로서 측선 II 에서 가장 작은 이동량을 기록하고

있다.

또한 사면 아래쪽에 식생 패치나 큰 암괴가 놓여 있는 경우에도 자갈의 이동량은 제약을 받게 된다. 측선 I 과 측선 II 모두 이동량이 작은 지점들은 사면 아래쪽에 암괴가 놓여 있는 경우가 많다. 예를 들면, 측선 I 에서 최소치 23.5cm를 기록한 120cm 지점에는 직경 17cm의 대력(cobble)이, 그리고 34.0cm를 기록한 230cm 지점에도 직경 29cm의 거력(boulder)이 놓여 있다. 측선 II 에서도 최소치에 가까운 35.5cm를 기록한 40cm 지점에 직경 29cm의 거력이 놓여 있는데, 사면을 따라 이동해온 자갈들이 이들 암괴에 가로막혀 암괴 위쪽에는 미세한 볼록 지형이 출현하고 있다 (Figure 11). 측선 II 에서는 사면 아래쪽으로 80cm 떨어진 지점에 150×160cm 크기의 시로미 패치가 분포하고 있는데, 이 패치에 의해서도 자갈의 이동은 크게 방해받고 있다(Figure 11).

다양한 주빙하 지역에서 관측된 표층 자갈의 이동량을 정리한 Koaze(1983)에 의하면, 표층 자갈의 연평균 이동량은 수 센티미터에서 수십 센티미터 정도이다. 사면 경사각 이외에 자갈 크기와 같은 정보가 없으

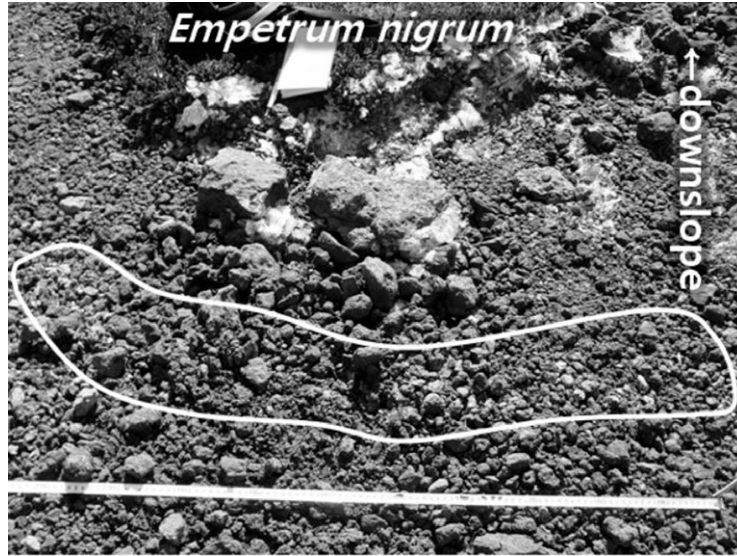


Figure 11. The downslope movement of gravels is interrupted by big gravels and vegetation patches. The measuring tape indicates the original position of Line II. 사면 아래쪽에 위치한 거력과 식생으로 인하여 자갈의 이동이 제약을 받고 있다. 줄자가 놓여 있는 곳이 측선II가 처음 설치된 위치이다.

로 직접 비교하는 것은 어려울 수도 있지만, 실험 나지의 완만한 사면 경사각을 고려할 때 한라산 아고산대에서의 이동량은 다른 지역에 비하여 매우 큰 편이다. 그리고 이런 결과에는 표층 자갈의 성질이 일부 작용한 것으로 판단된다.

실험 나지의 표면을 덮고 있는 자갈은 스코리아와 조면암질 암편으로서, 적색을 띠는 스코리아가 전체 자갈의 약 74%를 차지하고 있다. 이들 스코리아는 분화 과정에서 지표면으로 방출될 때 내부에 들어있던 가스가 빠져나가면서 고결되므로 다공질의 특징을 지니게 된다. 따라서 스코리아 자갈은 체적에 비하여 매우 가벼운 성질을 갖고 있다.

일반적으로 스코리아의 비중은 암편의 색상에 따라 달라지는데, 가장 작은 황갈색 스코리아는 1.31이며 상대적으로 큰 흑색 스코리아도 1.9에 불과하다. 실험 나지를 덮고 있는 적색 스코리아도 1.7 정도이므로 화강암이나 편마암의 2.6~2.7보다는 훨씬 작다. 또한 조면암질 자갈의 비중도 화강암이나 편마암보다 작아 한라산 조면암의 경우 1.86~2.12의 범위를 보이며 평균 2.04 정도에 불과하다(Lee *et al.*, 2007). 작은 자갈과

마찬가지로 가벼운 자갈도 서릿발에 의해 들어 올려지기 쉬우므로 결과적으로 서릿발 포행이나 동상 포행에 유리하다. 따라서 표층 자갈의 가벼운 성질이 실험 나지에서의 빠른 암석 포행으로 이어졌을 가능성이 매우 큰 것으로 보인다.

## 5. 결론

한라산 아고산 초지대에 발달한 나지는 잔류 자갈로 덮여 있어 주빙하성 물질 이동이 활발했을 것으로 생각되는 최종 빙기의 지표 경관을 연상시킨다. 따라서 장구목오름 남서쪽 표고 1,710m의 완사면에 분포하는 실험 나지의 2개소에서 표층 자갈에 페인트 라인을 설치하여 자갈의 이동량을 관측했으며, 그 결과는 다음과 같다.

1) 2006년 11월 3일부터 2007년 7월 31일까지 실시된 관측 기간에 발생한 자갈의 이동량은 측선 I 23.5~53.3cm, 측선 II 35.0~104.0cm로서 지점에 따라 큰

차이를 보인다. 평균 이동량은 약 58.2cm로서 일평균 이동 속도로 바꾸면 약 0.24cm를 기록하고 있다. 그러나 계절별로 일평균 이동 속도를 비교하면, 동결기의 0.3cm에 비하여 비동결기는 0.05cm에 불과하여 실험 나지에서 표층 자갈의 이동은 주로 동결기에 주빙하 프로세스를 통하여 일어나고 있다. 즉, 서릿발 생성에 유리한 실험 나지의 온도 및 토양 조건 하에서 서릿발 포행을 비롯한 동상 포행이 자갈의 이동을 주도하고 있다.

2) 동결기를 다시 동결 진행기와 융해 진행기로 구분하여 일평균 이동 속도를 비교하면, 각각 0.55cm와 0.42cm로서 동결 진행기가 융해 진행기보다 1.3배 빠르다. 이는 두 시기의 온도 및 수분 조건의 차이가 반영되어 시기별로 만들어지는 서릿발의 유형이 다르기 때문인 것으로 생각된다.

3) 사면 경사각의 영향은 관측 기간 내내 측선Ⅱ의 자갈 이동량이 측선Ⅰ보다 크게 나타난다는 사실에 반영되어 있지만, 암괴와 식생 패치가 자갈의 이동을 방해하므로 경사각이 이동량을 결정하는 절대적인 요인은 아니다. 또한 자갈의 크기와 비중도 이동량에 관여하는 요인으로서, 특히 실험 나지를 덮고 있는 적색 스크리아의 작은 비중이 매우 빠른 자갈의 이동 속도를 초래한 것으로 판단된다.

본 논문에서는 실험 나지를 덮고 있는 표층 자갈만을 대상으로 이동량을 관측하였다. 그러나 사면 발달에 미치는 주빙하 프로세스의 영향을 정량적으로 검토하려면 사면의 표층뿐 아니라 토층 단면을 따라 심도별로도 이동량을 관측해야 한다. 일반적으로 주빙하 환경에 놓여 있는 사면에서는 동상 포행과 켈리플러션이 동시에 작용하고 있다. 표층에서 탁월하게 일어나는 동상 포행에 비하여 켈리플러션은 주로 표층 하부에서 작용하고 있으므로 심도별로 토층의 변위량을 비교하지 않는다면 물질 이동에 기여하는 두 프로세스의 관계를 정량적으로 구분하기는 어려운 것이다. 또한 고산 지대의 지형 발달 과정을 논의하려면 사면에 따라 달라지는 식박 속도를 공간적으로 파악해야 하는데, 이를 위해서는 사면 물질에 따른 이동량을 단순히 거리가 아닌 체적으로 구하는 것이 필요하다. 이런 점들을 고려하여 향후 구성 물질을 달리하는 다양한 사

면에서 사면 물질의 심도별 이동량을 지속적으로 관측하고자 한다.

## 참고문헌

- Choi, S. G., 1988, Fossil cryogenic structures in the terrace deposit of Oship River, Samchok, Korea, *Science Reports of the Tohoku University, 7th series(Geography)*, 38, 133-139.
- French, H. M., 1996, *The Periglacial Environment (2nd edition)*, Longman, London.
- Grab, S. W., 2002, Turf exfoliation in the High Drakensberg, southern Africa, *Geografiska Annaler*, 84A, 39-50.
- Higashi, A., 1981, *Elements of Cold Region Engineering*, Kokonshoin, Tokyo (東晃, 1981, 寒地工學基礎論, 古今書院, 東京).
- Higashi, A. and Corte, A. E., 1971, Solifluction: A model experiment, *Science*, 171, 480-482.
- Horii, T., Matsuoka, N., and Matsukura, Y., 1987, Experimental study on soil movement due to frost creep, *Bulletin of Environmental Research Center, The University of Tsukuba*, 11, 21-27 (in Japanese).
- Jang, H., 1983, Periglacial landforms in the eastern part of the main ridge of Mt. Jiri, South Korea, *Geography*, 27, 31-50 (in Korean).
- Jeju Provincial Government, 2000, *Geologic Report of the Segwipo-Habyori Sheet*, Korea Institute of Geology, Mining and Materials, Daejeon (제주도, 2000, 서귀포·하효리 도폭 지질보고서, 한국자원연구소, 대전).
- Jeju Regional Meteorological Office, 2007, *The Detailed Climatic Characteristics of Automated Weather Stations in Jeju Island*, Jeju Regional Meteorological Office, Jeju (제주지방기상청, 2007, 제주도 AWS 상세기후 특성집, 제주지방기상청, 제주).
- Kee, K. D., 1999, *Morpho-pedologic Milieu in Taegwallyong Area*, Ph.D. Dissertation, Korea

- National University of Education (in Korean).
- Kim, C. and Kim, M., 1985, Phytosociological study of grassland and scrub on subalpine zone in Mt. Halla, *Report of Survey and Study of Mt. Halla*, 311-330 (in Korean).
- Kim, T., 2001, Earth hummocks on the crater floor of Baegnokdam at Mt. Halla, *Journal of the Korean Geographical Society*, 36, 233-246 (in Korean).
- Kim, T., 2006, Rates and processes of bare patch denudation in the subalpine grassland of Mt. Halla, *Journal of the Korean Geographical Society*, 41, 657-669 (in Korean).
- 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.
- King, R. B., 1971, Vegetation destruction in the sub-alpine and alpine zones of the Cairngorm Mountains, *Scottish Geographical Magazine*, 87, 103-115.
- Koaze, T., 1983, Slow mass movement in periglacial regions, *Transactions Japanese Geomorphological Union*, 4, 189-203 (in Japanese).
- Kong, W. S., 1999, The vertical distribution of air temperature and thermal amplitude of alpine plants on Mt. Halla, Cheju Island, Korea, *Journal of the Korean Geographical Society*, 34, 385-394 (in Korean).
- Kwon, H. J., 1999, *Geomorphology (4th eds)*, Bobmunsa, Seoul (권혁재, 1999, 지형학 제4판, 법문사, 서울).
- Kwon, S. S., 1987, A study on late Quaternary periglacial cryogenic structures of granite regolith in Korea, *Journal of Geography (Jiribak Nonchong)*, Supplement 4, 1-120 (in Korean).
- Kwon, S. S., 1992, Nivation morphology at Heul-Ri in Kwangwon Province, Korea, *Journal of Geography (Jiribak Nonchong)*, 19, 1-10 (in Korean).
- Lee C., Cho, T., Lee, S., and Won, K., 2007, A study of weathering characteristic of Baeknokdam trachyte in Jeju Island, *The Journal of Engineering Geology*, 17, 235-251 (in Korean).
- Lee, Y. B., 1991, *The Study of Nivation Hollows in Daekwan-Ryoung Area*, Master Thesis, Korea National University of Education (in Korean).
- Oh, K. S., 1989, Origin of Bt bands in sandy deposits, *The Korean Journal of Quaternary Research*, 3, 35-45 (in Korean).
- Oh, K. S., 2006, Cryogenic structures in superficial formation and associated periglacial morpho-climatic milieu in Korean Peninsula, *Journal of the Geomorphological Association of Korea*, 13, 1-17 (in Korean).
- Ono, Y., 1978, Pipkrakes as a periglacial process, *Bulletin of Environmental Research Center, The University of Tsukuba*, 2, 47-55 (in Japanese).
- Ono, Y., 1983, Soil erosion by pipkrakes on Tsukuba Upland, *Tsukuba Environmental Studies*, 7, 128-140 (in Japanese).
- Park, K., 1987, *Study of Dune-Reddening at Cbeonripo*, Master Thesis, Seoul National University (in Korean).
- Park, K., 2000, Mountaintop block fields of the Seoraksan National Park in Kwangwon Province, Korea, *Journal of the Korean Geographical Society*, 35, 653-663.
- Sawaguchi, I. and Koaze, T., 1998, Field experiment on periglacial mass movement and frost heave in the Kitakami mountains, northwestern Japan, *Transactions Japanese Geomorphological Union*, 19, 221-242 (in Japanese).
- Shoma, H., Okazawa, S., and Iwata, S., 1979, Slow mass-movement processes in an alpine region of Mt. Shirouma Dake, the Japan Alps, *Geographical Review of Japan*, 52, 562-579 (in Japanese).
- Sin, J., Yu, K., Naruse, T., and Hayashida, A., 2004, Study on loess-paleosol stratigraphy of Quaternary unconsolidated sediments at E55S20-IV pit of Chongokni Paleolithic site, *Journal of the Geological Society of Korea*, 40, 369-381 (in Korean).
- Suzuki, I., 1992, Movements of surface gravels on bare

- ground in the Tanigawa Mountains, central Japan, showing the relationship between periglacial and non-periglacial processes, *Geographical Review of Japan*, 65A, 75-91 (in Japanese).
- Tamanyu, S., 1990, The K-Ar ages and their stratigraphic interpretation of the Cheju Island volcanics, Korea, *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 41, 527-537 (in Japanese).
- Washburn, A. L., 1980, *Geocryology: A Survey of Periglacial Processes and Environments*, John Wiley, New York.
- Yim, Y., Paik, K., and Yi, N., 1991, *The Vegetation of Mt. Halla*, Chungang University Press, Seoul (임양재 · 백광수 · 이남주, 1991, 한라산의 식생, 중앙대학교 출판부, 서울).
- 교신: 김태호, 690-756, 제주특별자치도 제주시 제주대학로 66, 제주대학교 사범대학 지리교육과(이메일: kimtaeho@jejunu.ac.kr, 전화: 064-754-3235)
- Correspondence: Taeho Kim, Department of Geography Education, Jeju National University, Jejudaehak-Road, Jeju, 690-756, Korea (e-mail: kimtaeho@jejunu.ac.kr, phone: +82-64-754-3235)
- 최초투고일 2010. 6. 8  
수정일 2010. 6. 17  
최종접수일 2010. 6. 18