

ORIGINAL ARTICLE

의성 빙계리 얼음골의 저온 현상에 관한 연구

서광수* · 황수진

부산대학교 사범대학 지구과학교육과

Thermal Regime of a Cold Talus Slope in Uiseong Binggye-ri Ice Valley, Korea

Kwang-Su Seo*, Soo-Jin Hwang

Department of Earth Sciences Education, Pusan National University, Busan 46241, Korea

Abstract

Observations were conducted in Uiseong Binggye-ri Ice Valley of Korea, where a low temperature talus is located. The talus temperature at Ice Hole near the lower end of the talus remained at 0°C until summer or autumn and averaged -0.3°C over 2 years. The talus temperature at Warm Hole was much higher than the external air temperature during autumn and winter. The outflow of warm air at Warm Hole begins in the late summer of fall. The direction of airflow through the talus surface was determined by the relationship between talus temperature and external air temperature. Annual variations in talus temperature and air exchange between the talus and the external environment can be divided into four periods. It was found that the airflow directions at Warm Hole and Ice Hole were not necessarily opposites. The outflows from the talus at Ice Hole and Warm Hole can occur simultaneously.

Key words : Ice Valley, Talus, Thermal regime, Airflow, Ice Hole, Warm Hole

1. 서론

여름에도 얼음이 발견되거나 주위보다 훨씬 낮은 온도를 나타내는 곳이 우리나라를 비롯한 세계 여러 지역에 분포하고 있다. 이러한 현상은 너털(talus) 내의 찬 공기가 하단으로 유출되면서 발생한다. 경상북도 의성군 춘산면 빙계리에 위치한 의성 빙계리 얼음골(128° 45'E, 36° 14'N)도 저온 현상이 나타나는 곳으로(Fig. 1), 천연기념물 제527호로 지정되어 많은 탐방객들이 신비한 자연현상을 관람하기 위해 찾고

있다. 의성 빙계리 얼음골의 너털 하단부에서 저온 현상과 얼음이 뚜렷하게 나타나는 곳을 빙혈과 풍혈이라 부른다.

너털의 저온 현상과 관련하여 (1) 저온 현상의 발생 원리를 파악하기 위한 연구, (2) 생물상의 분포와 특성에 대한 연구(Ruzicka, 1999; Zacharda et al., 2005; Ruzicka et al., 2015), (3) 기후 변화와의 관련성에 대한 연구(Holmgren and Pflitsch, 2014), (4) 저온 상태를 활용하기 위한 연구(Goering and Kumar, 1996) 등이 수행되었다. 너털 하단부의 저온 현상을 설명하기

Received 2 November, 2017; Revised 4 January, 2018;

Accepted 5 February, 2018

*Corresponding author: Kwang-Su Seo, Department of Earth Sciences Education, Pusan National University, Busan 46241, Korea
Phone : +82-51-510-1626
E-mail : ksuseo@pusan.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

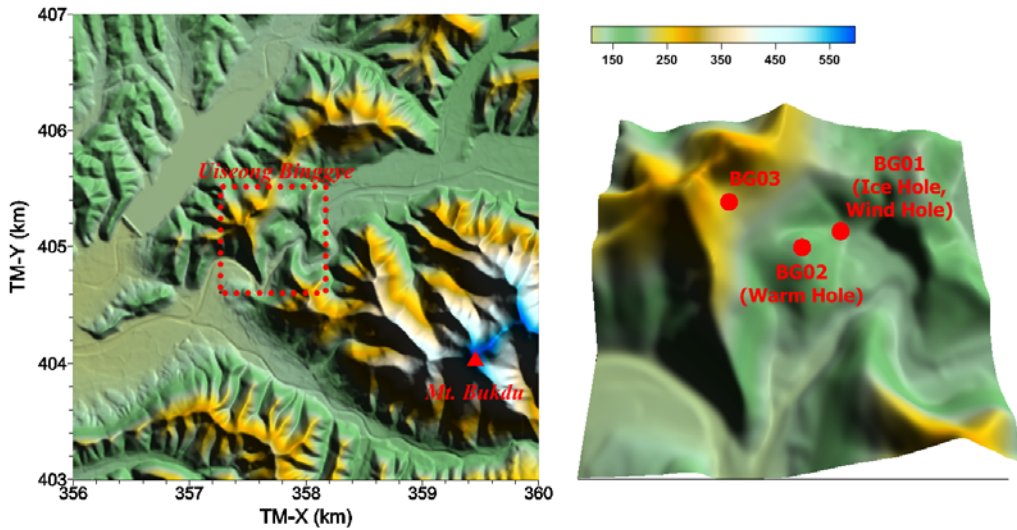


Fig. 1. Topography around Uiseong Binggye-ri Ice Valley in Uiseong, Korea.

위해 너털의 방향과 지형적 영향으로 인한 태양 복사 부족(Hoelzle and Haerberli, 1995; Kneisel et al., 2000; Etzelmuller et al., 2001), 지하수에 의한 온도 변화 지연(Bae, 1990), 너털 내부에 있는 물과 얼음의 증발과 승화에 의한 냉각(Moon and Hwang, 1977), 너털 내부 공기의 단열 팽창(Kim, 1968) 등이 제안되기도 하였지만 최근의 연구는 대부분 공기 순환에 의한 열교환을 저온 현상의 원인으로 인정한다(Song, 1994; Harris and Pedersen, 1998; Tanaka et al., 2000; Delaloye et al., 2003; Swada et al., 2003; Hwang et al., 2005; Zacharda et al., 2007; Morard et al., 2008).

저온 현상을 설명하기 위한 너털의 공기 순환 개념은 가역적 공기 순환 이론과 연속적 공기 교환 이론으로 나눌 수 있다. 가역적 공기 순환 이론은 굴뚝 효과 이론이라고도 하며, 너털 내·외부의 온도차에 의해 너털 내에서 계절에 따라 반대 방향의 공기 순환이 형성된다고 생각한다(Song, 1994; Tanaka et al., 2000; Delaloye et al., 2003; Morard et al., 2008). 즉, 겨울에는 너털 내부가 상대적으로 따뜻하여 내부의 공기가 너털 상단부로 유출되고 하단부를 통해 외부의 찬 공기가 유입되면서 너털이 냉각되는 반면, 여름에는 너털 내부의 찬 공기가 너털 하단부를 통해 유출되고 이에 따라 저온 현상이 나타난다는 것이다. 연속적 공

기 교환 이론에서는 외부의 기온이 낮아지면 너털 표면의 빈틈을 통해 찬 공기가 내부로 유입되어 너털이 즉시적으로 냉각되고 저온을 유지하는 것으로 생각한다(Harris and Pedersen, 1998, Hwang et al., 2005). 한편, 계절에 따라 적용하는 이론을 달리하여 너털 내·외부 사이의 공기 유동을 여름에는 굴뚝 효과, 겨울에는 연속 교환 과정으로 설명하는 것이 타당하다고 보는 견해도 있다(Zacharda et al., 2007).

너털에서 나타나는 저온 현상에 관한 여러 연구가 수행되어 왔지만, 국내의 경우 대부분이 밀양 얼음골에 한정되었다. 의성 빙계리 얼음골은 최근에 천연기념물로 지정되었으나 여름에 얼음이 뚜렷하게 관찰되고 저온 상태가 유지되는 기간도 길다. 본 연구에서는 의성 빙계리 얼음골 현지에서 2년에 걸쳐 관측을 수행하고, 그 결과를 바탕으로 저온 현상의 현황과 원인에 대해 살펴보고자 한다. 특히, 너털 온도와 외부 기온을 분석한 결과 너털의 표면을 통해 일어나는 기류의 유입·유출 방향에 따라 너털에서 측정되는 온도에는 특징적인 변화가 나타나는 것으로 판단된다. 이에 따라 관측에서 얻어진 외부 기온과 너털 온도를 바탕으로 의성 빙계리 얼음골에서 보다 타당하게 적용될 수 있는 기류의 양상을 추론하고자 한다.

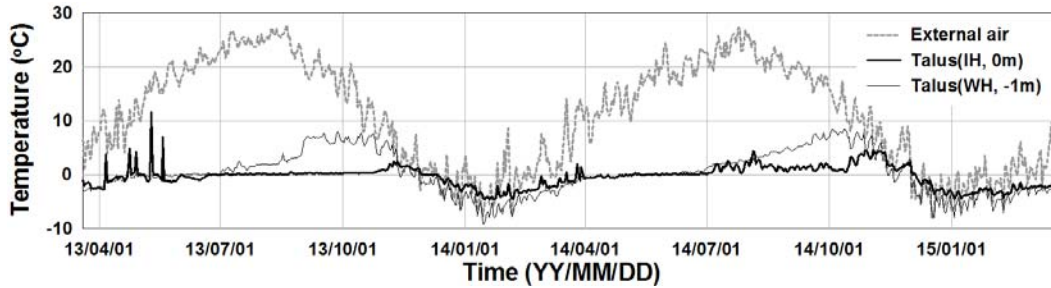


Fig. 2. Variations of daily-averaged air and talus temperature at the lowest part of talus (BG01) from March, 2013 to March, 2015(IH : Ice Hole, WH : Wind Hole).

2. 지형과 현지 기상관측

의성 빙계리 얼음골의 빙혈과 풍혈은 북동-남서 방향의 능선(해발 약 310 m)으로부터 남동쪽을 향하여 형성된 사면의 하단부(해발 약 150 m)에 위치하고 있다(Fig. 2). 능선 정상부에는 암벽이 봉우리를 이루고 있으며, 암벽을 이루는 기반암이 풍화작용을 받아 생성된 암편이 쌓여 너덜 사면을 형성하였을 것으로 판단된다. 너덜은 대부분 크기가 작은 쇄설물, 토양 및 부엽토 등으로 덮여 있지만 정상부와 하단부, 사면 여러 곳에서 암석이 노출되어 있어서 공기의 유동이 가능하다. 표면에 노출된 암석의 크기는 보통 수십 cm~2 m이다. 사면 상부와 하단부 사이에는 구릉처럼 솟은 부분이 있는데, 겨울에는 이 구릉의 바위틈으로 따뜻한 공기가 솟아올라 온혈이라 부른다. 저온 현상이 나타나는 너덜에서 따뜻한 공기가 유출되는 온혈 현상에 대해서는 Kim(2003), Byun et al.(2004) 등이 보고한 바 있다. 단, 가역적 공기 순환 이론에서는 겨울에 너덜 내의 공기가 상승하여 상단부에서 유출되는 것으로 생각하므로 온혈은 너덜 상단부에 위치하는 것으로 본다. 그러나 의성 빙계리 얼음골의 경우 이 온혈이 너덜 사면의 구릉에 위치하기 때문에 너덜 상단부와 온혈의 위치가 일치하지 않는다는 점에 유의하여야 한다. 사면 정상부 능선에서 너덜 하단부까지의 거리가 300~400 m에 이르고 사면의 폭이 250 m 이상으로 나타나므로 너덜은 이와 유사하거나 다소 작은 규모를 가질 것으로 판단된다. 의성 빙계리 얼음골이 위치한 지역에는 대체로 중생대 백악기에 형성된 유천화산암층군의 화산암류가 분포하고 있다.

의성 빙계리 얼음골에서의 현지 관측은 2013년 3월부터 2015년 3월까지 약 2년간에 걸쳐 수행하였다. 테일러스 하단부(BG01)의 빙혈과 풍혈, 온혈(BG02) 및 상단부(BG03), 총 3지점에서 너덜 외부의 기온, 상대습도, 풍향 및 풍속을 측정하였다(Fig. 1). 또, 너덜의 온도 변화를 측정하기 위해 열전대를 너덜 표면 아래 1 m 깊이에 설치하였다. 단, 너덜 하단부에서는 풍혈의 깊이 1 m와 빙혈의 너덜 표면 온도를 측정하였다. 각 측정 요소는 1시간 간격으로 데이터로거에 저장한 후 취합하였다. 빙혈과 풍혈은 모두 너덜 하단부에 위치하고 수 m 이내의 거리에 있지만 풍혈이 빙혈에 비해 높이가 약 2.5 m 높다. 그리고 빙혈은 인공구조물로 싸여 있어서 외부 기온 변화에 직접적으로 노출되지는 않는다. 너덜 하단부(BG01), 온혈(BG02) 및 상단부(BG03) 측정 지점의 해발고도는 각각 약 150 m, 195 m, 250 m이며, 각 지점에서 측정된 외부 기온은 고도와 지형에 따라 작은 차이가 있을 뿐 전체적인 변화 경향과 온도값의 차이는 크지 않았다.

3. 결과 및 분석

3.1. 각 지점의 온도 변화

Fig. 2는 너덜 하단부(BG01)의 일평균 외부 기온과 빙혈 및 풍혈에서 측정된 너덜 온도를 나타낸 것이다. 빙혈의 온도는 2014년에 -4.6°C, 2015년에 -4.5°C로 1월에 가장 낮았다. 겨울과 봄 동안 빙혈의 온도가 상승하여 0°C에 도달하면 여름 또는 가을까지 일정한 온도를 유지한다(zero-curtain period). 가을이 되면 빙혈의 온도는 다시 상승하여 최고 온도를 나타내지만 곧

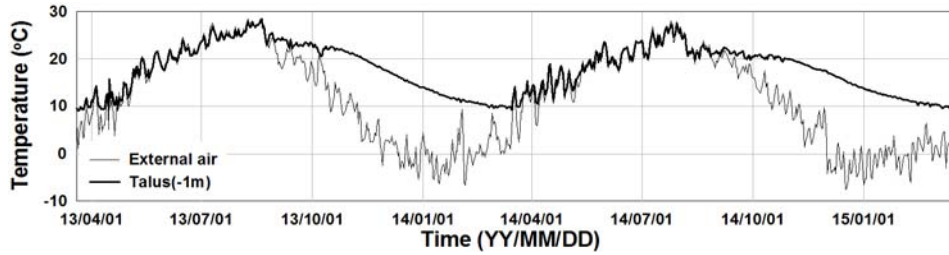


Fig. 3. Variations of daily-averaged air and talus temperature at Warm Hole (BG02) from March, 2013 to March, 2015.

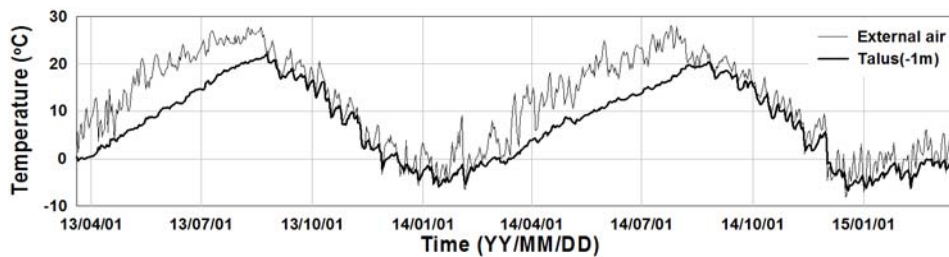


Fig. 4. Variations of daily-averaged air and talus temperature at the upper part of talus (BG03) from March, 2013 to March, 2015.

외부 기온이 빙혈의 온도보다 낮아지고, 이에 따라 빙혈의 온도도 함께 하강한다. 빙혈의 최고 온도는 2013년에 2.5℃, 2014년에 4.6℃이었다. 풍혈은 외부에 노출되어 있기 때문에 풍혈의 온도는 외부 기온의 변화에 더 직접적으로 영향을 받는 경향을 나타내었다. 관측 기간 동안 외부의 평균 기온은 11.1℃이었으나 빙혈의 평균 온도는 -0.3℃로 외부 기온에 비해 10℃ 이상 낮은 값을 보였다. 또 빙혈과 풍혈의 온도는 연중 대부분의 기간 동안 외부 기온에 비해 낮았다. 특히 풍혈의 온도가 외부 기온보다 높았던 날은 2년 동안 총 22일에 불과하였다.

Fig. 3은 온혈(BG02)의 일평균 외부 기온과 너털에서 측정된 온도를 나타낸 것이다. 이 지점의 너털에서 나타난 연중 온도 변화는 크게 2기간으로 나눌 수 있다. 3월 말부터 8월 말까지는 너털에서 측정된 온도가 외부 기온과 함께 변동하며 상승한다. 그러나 가을에서 겨울을 지나 이른 봄까지는 너털에서 측정된 온도가 외부 기온보다 높은 상태로 하강하고 외부의 기온 변동이 반영되지 않는다. 이러한 변화는 뒤에서 기술할 너털 내·외부 사이의 기류와 관련되어 있다. 너털

에서 측정된 최고 일평균 온도는 최고 기온과 비슷한 시기에 비슷한 값으로 나타나지만, 너털의 최저 온도는 외부 기온이 가장 낮았던 날보다 지연되어 나타나고, 그 값도 약 9℃로 외부 기온에 비해 훨씬 높다. 너털 온도와 외부 기온의 차는 12월이 16.6℃로 가장 컸고, 1시간 측정값으로는 27℃를 넘기도 하였다. 이 지점의 너털에서 측정된 온도는 너털 하단부 빙혈에서 측정된 온도보다 항상 높다. 전체 측정 기간에 대해 평균적으로 이 지점의 너털 온도는 빙혈에 비해 18℃ 더 높고, 여름에는 두 지점의 온도차가 20℃를 넘는다. BG01과 BG02 지점의 고도차가 50 m 이내이고, 직선 거리가 약 100 m인 점을 감안하면 이 온도차는 매우 큰 것이다. 따라서 너털 내부의 온도 분포는 균일하지 않고 위치에 따라 심한 차이를 보이며, 고도에 따른 너털 온도의 변화율이 대단히 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4에는 너털 상단부(BG03)에서 측정된 일평균 기온과 너털 온도를 나타내었다. 외부 기온이 상승하는 겨울부터 여름까지의 너털 온도는 외부 기온보다 항상 낮은 상태로 점차 높아진다. 반면, 늦은 여름이 되면 외부 기온이 너털 온도와 거의 같아지고, 이 시기

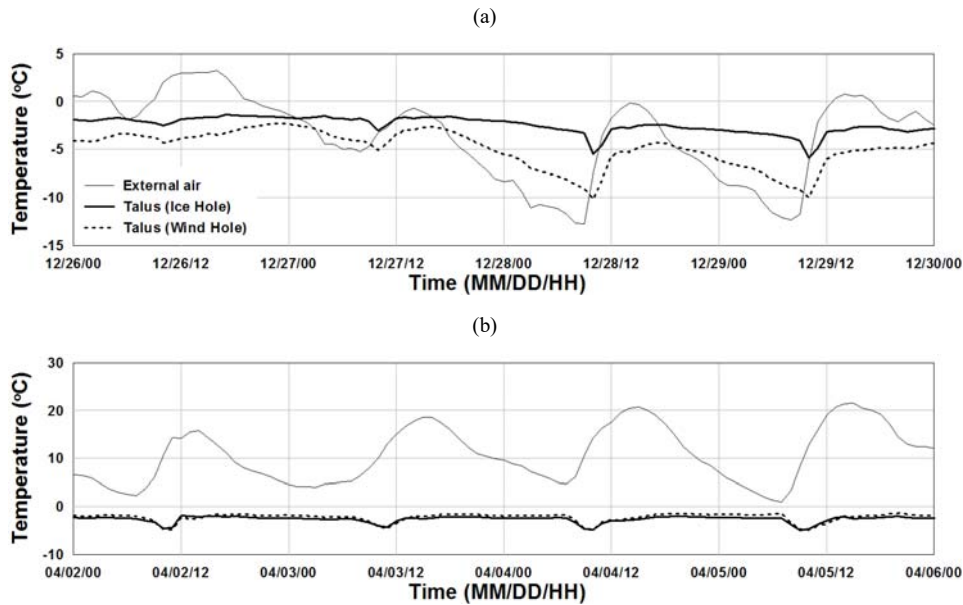


Fig. 5. Hourly temperature variations of external air and talus at the lowest part of talus at BG01 site. (a) Dec. 26-29, (b) Apr. 2-5, 2013.

이후에는 외부 기온의 하강에 따라 너털 온도도 함께 낮아진다. 외부 기온의 변동에 따라 너털 온도도 함께 변화하지만, 그 폭은 외부 기온보다 훨씬 작다. 이 지점의 너털 온도가 최고를 나타낸 뒤 하강하기 시작하는 시기는 온혈에서 내부의 따뜻한 공기가 방출되기 시작하는 시기와 거의 일치하며, 너털에서 측정된 온도는 상단부 쪽이 약간 낮다(Fig. 3, 4).

3.2. 온도 변화 분석을 통한 너털 내·외부간 기류 추정

이상에서 관측 기간 동안 나타난 너털의 온도 변화에 대해 살펴보았다. 너털 내·외부 사이에서 일어나는 기류의 방향은 너털 온도에서 나타나는 특징적인 변화와 외부 기온과의 비교를 통해 추론할 수 있다. Fig. 5는 너털 하단부(BG01)에서 측정된 시간별 기온과 너털 온도의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 5(a)에서 12월 26~27일에는 외부 기온과 너털 온도에 큰 변화가 없었지만 28~29일 새벽에는 외부 기온이 크게 하강하고 이에 따라 풍혈도 냉각되었다. 한파나 야간 냉각에 의해 외부 기온이 너털 온도보다 낮아지는 경우 외부의 찬 공기가 너털 내로 침강하면서 너털이 냉각된다. 낮이 되면 외부 기온은 상승하지만 너털의 온도

는 외부 기온보다 상승폭이 훨씬 작다. Fig. 5(b)와 같이 외부 기온이 높은 기간에는 너털 내부의 찬 공기가 하단부를 통해 유출되므로 일변화가 거의 나타나지 않는다. 다만, 외부 기온의 상승 속도가 큰 시간대에 너털 온도가 낮아지는 경향을 보인다. 이것은 너털 내·외 사이의 온도차가 커지면서 냉기 유출이 강화되기 때문이다.

여기서 주목할 점은 겨울동안 지속적으로 너털 하단부를 통해 외부 공기가 유입되고, 너털 내부에서 상승하는 공기 흐름이 유지될 수 있는가 하는 점이다. 2년 동안 22일을 제외한 대부분의 기간 동안 너털 하단부의 온도는 외부 기온에 비해 낮았으며, 온혈보다는 항상 낮았다. 따라서 연중 대부분의 기간 동안 너털 하단부를 통해 찬 공기가 유출되며, 외부 기온이 더 낮은 짧은 시간 동안에만 한정적으로 외부의 찬 공기가 너털 하단부 쪽으로 침강한다고 보는 것이 타당하다.

Fig. 6은 온혈(BG02)에서 측정된 시간별 기온과 너털 온도를 나타낸 것이다. Fig. 6(a)와 같이 여름에는 외부 기온에 비해 진폭은 작지만 일중 변화가 너털 온도에서도 나타났다. 그러나 가을과 겨울에 너털

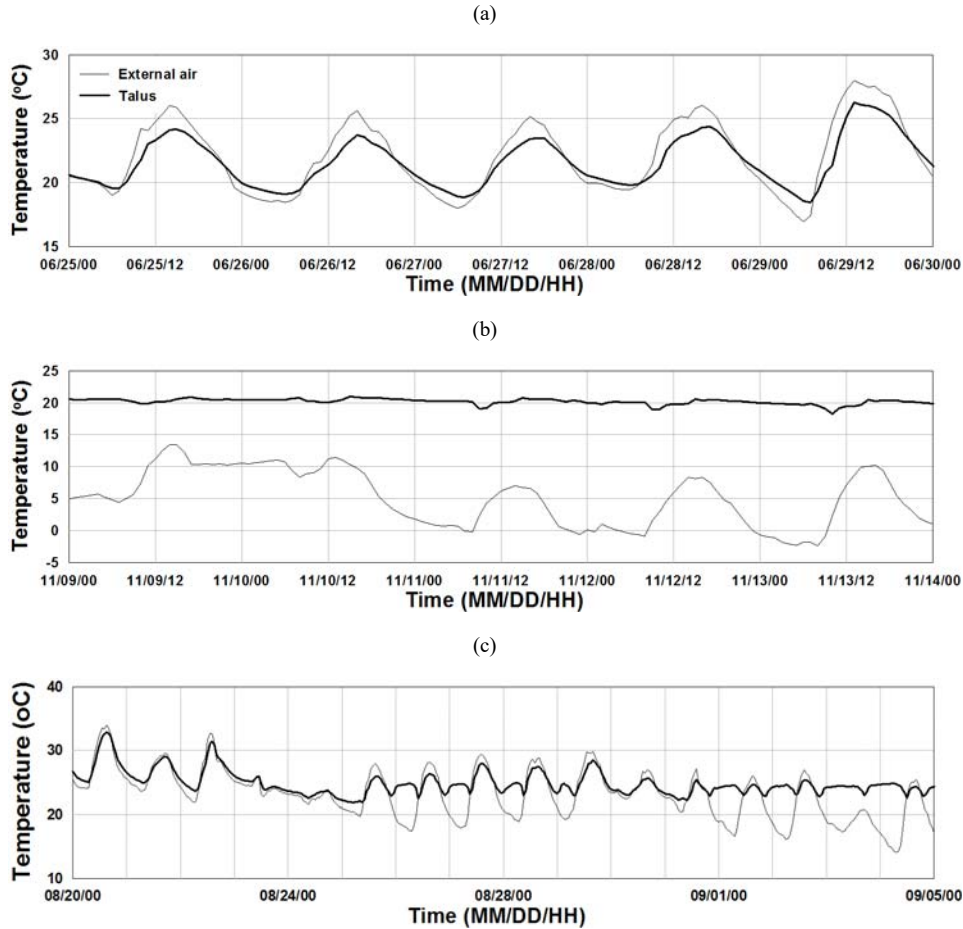


Fig. 6. Hourly temperature variations of external air and talus at BG02 site. (a) Breathing in external air from Jun. 25 to Jun. 29, 2013, (b) Breathing out internal air from Nov. 09 to Nov. 13, 2013, (c) Transition of airflow from Aug. 20 to Sep. 5, 2013.

온도는 외부 기온의 변화와 관계없이 항상 외부 기온보다 높은 온도를 나타내며, 느린 속도로 서서히 하강하였다(Fig. 6(b)). 너털 온도의 이러한 변화는 여름에는 온혈을 통해 외부 공기가 유입되는 반면 가을과 겨울에는 너털 내의 따뜻한 공기가 온혈을 통해 유출되면서 온혈 부근의 너털도 서서히 냉각된다는 것을 의미한다. Fig. 3의 온혈의 연중 온도 변화도 이러한 기류 변화에 따라 발생하는 것이다.

한편, Fig. 6(c)는 2013년 8월 말부터 9월 초까지의 기온과 너털 온도를 나타낸 것이다. 8월 26일부터 29일까지의 너털 온도는 극대값이 하루에 2번 발생하는

특이한 변화를 보인다. 너털 온도는 한낮에 가장 높지만 밤이 되면 다시 상승하여 새벽에 다시 한번 극대값을 나타낸다. 이 기간에는 온혈 내 너털 온도가 새벽의 일중 최저 기온보다는 높지만 한낮의 일중 최고 기온보다는 낮다는 특징이 있다. 외부 기온이 온혈의 너털 온도보다 높은 낮에는 온혈을 통해 외부 공기가 유입되고, 외부 기온이 낮은 밤에는 온혈 내부의 따뜻한 공기가 유출되므로 이러한 변화가 나타난다. 따라서 Fig. 6(c)에 나타난 기간은 온혈에서 일어나는 기류의 방향이 외부 공기의 유입에서 내부 공기의 유출로 변화하는 전이기에 해당하며, 내부의 공기가 유출될 때

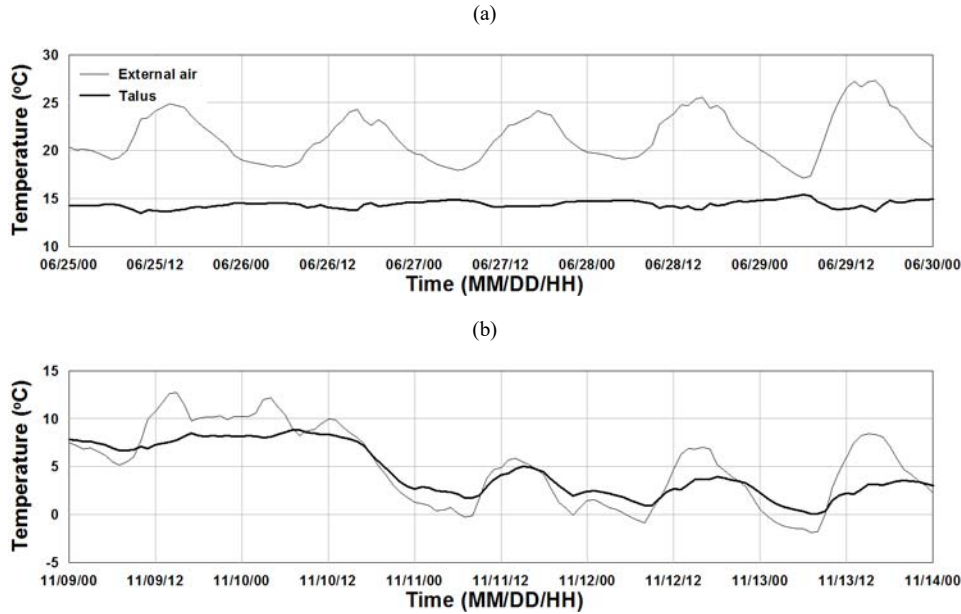


Fig. 7. Hourly temperature variations of external air and talus at BG03 site. (a) Heating period of talus from Jun. 25 to Jun. 29, 2013, (b) Cooling period of talus from Nov. 09 to Nov. 13, 2013.

측정되는 너털 온도는 약 24~25℃이므로 여름에 이르기까지 외부 공기의 유입에 의해 온혈 부근의 너털은 이 온도까지 가열된 것으로 볼 수 있다.

가역적 공기 순환 이론에 따르면 여름에는 너털 내에서 하강류가 발생하고 겨울에는 상승류가 일어나므로 너털 상단부 온혈과 하단부의 유입·유출은 반대가 되어야 한다. 그러나 이상에서 살펴 본 것과 같이 기류의 전이기는 8월에 시작되며, 겨울보다 훨씬 이른 9월부터 온혈에서 너털 내부의 공기가 본격적으로 배출된다(Fig. 3). 9~10월은 너털 하단부가 여전히 낮은 온도를 유지하고 찬 공기가 배출되는 시기이다. 따라서 너털 하단부와 온혈에서 동시에 너털 내부의 공기가 유출될 수 있으며, 너털 하단부와 온혈의 기류 방향은 독립적이라는 것을 알 수 있다. 이에 따라 의성 빙계리 얼음골에서 나타나는 너털의 온도 변화를 설명하기 위해서는 새로운 형태의 공기 순환이 제시되어야 한다.

Fig. 7(a)는 2013년 6월 25일부터 29일까지, (b)는 11월 9일부터 13일까지 너털 상단부(BG03)에서 측정된 시간별 외부 기온과 너털의 온도 변화를 나타낸 것

이다. (a)는 이 지점의 너털 온도가 외부 기온보다 낮은 시기로, 너털 온도는 느린 속도로 상승하고 있지만 외부 기온의 일변화 영향이 거의 나타나지 않는다. 한편 (b)에서 11월 9~10일에는 외부 기온이 너털 온도에 비해 높았지만 11일부터는 새벽에 기온이 큰 폭으로 하강하였다. 이에 따라 찬 외부 공기가 너털 내로 유입되어 너털 온도도 함께 낮아졌다. 따라서 외부 기온이 높은 시기에 너털 상단부의 공기는 거의 정체 상태에 있지만 가을과 겨울에 외부 기온이 하강하면 너털 상단부를 통해서도 찬 외부 공기가 유입되어 너털이 냉각됨을 알 수 있다.

3.3. 너털 온도와 기류의 계절적 변화

너털에서 형성되는 기류의 방향은 계절에 따른 기온과 너털 온도의 변화에 따라 달라진다. 너털 내부에서 온도 분포는 균일하지 않고 온혈 아래의 너털이 하단부보다 항상 따뜻한 상태를 유지한다. 너털 온도와 외부 기온의 연중 변화 관계는 Fig. 8과 같이 4개의 기간으로 나눌 수 있다. Fig. 9에는 Fig. 8의 각 기간별로 형성되는 너털 내·외부간 기류를 나타내었다. P1~

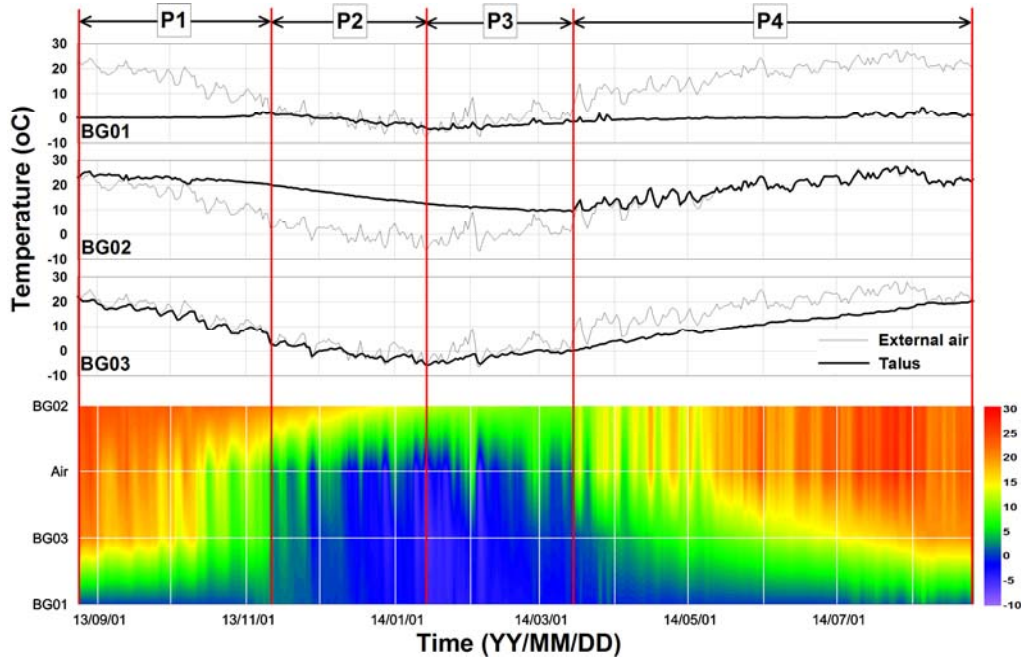


Fig. 8. Subdivision of annual air and talus temperature variations into 4 periods(P1, P2, P3 and P4).

P4의 구분은 외부 기온과 너털 온도의 고저 관계가 바뀌는 시점을 기준으로 설정할 수 있는데, P1 기간은 외부 기온이 온혈 너털의 연중 최고 온도보다 낮아지는 시점부터 시작한다. P1과 P2, P2와 P3, P3과 P4는 각각 너털 하단부의 연중 최고 온도 발생, 연중 최저 기온 발생, 외부 온도가 온혈 너털의 연중 최저 온도보다 높아지는 시점을 경계로 구분된다.

P1은 늦여름과 가을에 해당하는 기간으로 외부 공기가 너털 상단부와 표면의 빈틈을 통해 너털 내로 침강한다. 이 때 유입되는 공기는 온혈보다는 차고 하단부의 빙혈보다는 따뜻하기 때문에 온혈에서는 내부의 따뜻한 공기가 유출되는 반면 너털 하단부에서는 내부의 찬 공기가 유출된다. 이 기간에 너털 상단부와 온혈의 너털은 냉각되지만 하단부는 내부의 얼음과 냉기를 소진하면서 가열되어 빙혈의 온도는 P1 기간의 최종 시점에 최고를 기록한다. 너털 하단부와 외부의 온도차가 작아지므로 하단부의 냉기 유출은 점차 약화된다(Fig. 9(a)).

P2는 늦가을이나 겨울에 외부 기온이 너털 하단부의 연중 최고 온도보다 낮아지면서 시작한다. 이 기간

에는 외부의 찬 공기가 너털 상단부와 너털 표면의 빈틈을 통해 침강하여 너털 내로 유입되므로 외부 기온의 하락과 함께 너털은 전체적으로 냉각된다. 외부 공기의 유입에 따라 온혈에서는 내부의 따뜻한 공기가 유출된다. 이 기간의 마지막 시점에 너털 상단부와 하단부는 최저 온도를 기록한다. 너털 하단부 빙혈의 온도가 외부 기온보다 높거나 비슷할 때에는 냉기 유출이 정체되며, 한낮에 외부 기온이 상승하거나 한파가 약해져서 일시적으로 기온이 상승할 때 냉기 유출이 일어날 뿐이다(Fig. 9(b)).

P3은 늦겨울이나 초봄이 되면서 외부 기온이 상승하여 너털 하단부를 통해 내부의 찬 공기가 유출되는 기간이다. 이 기간에도 외부 기온이 너털 하단부의 온도보다는 높지만 온혈의 너털 온도보다는 낮다. 따라서 온혈에서는 따뜻한 내부 공기의 유출이 계속되어 온도가 하강하므로 P3 기간의 끝 무렵에 온혈의 최저 온도가 나타난다. 그러나 너털 하단부와 상단부의 온도는 점차 상승한다(Fig. 9(c)).

P4는 봄과 여름에 해당하며 외부 기온이 너털 상·하단부와 온혈 아래의 너털 온도보다 높다. 너털 하단부의

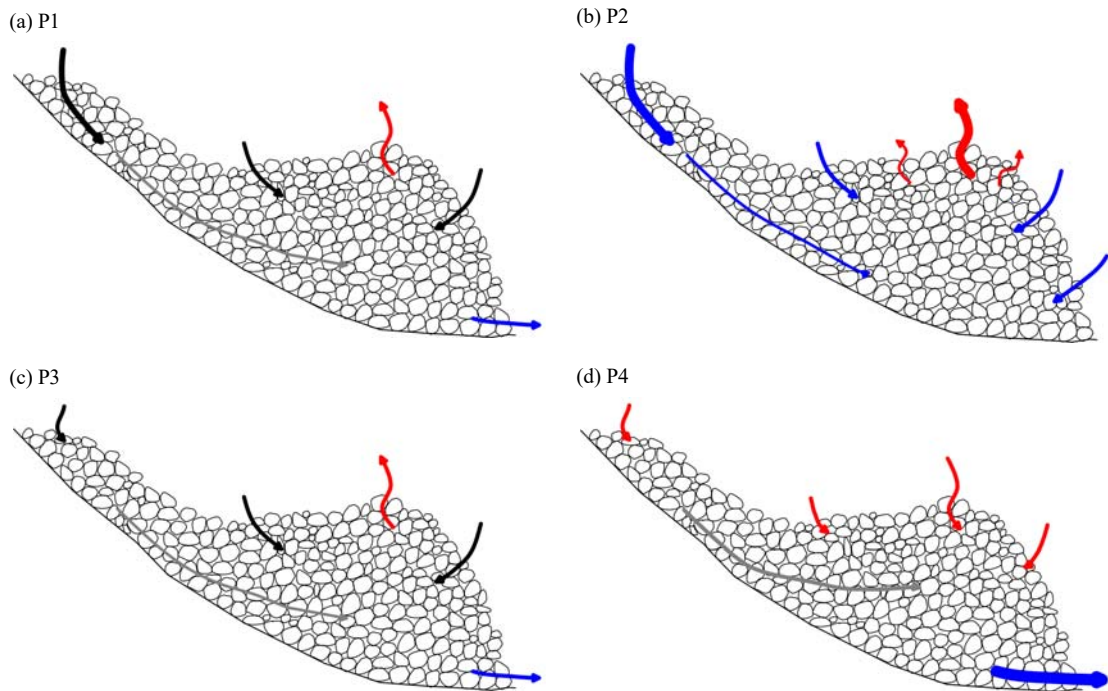


Fig. 9. Schematic diagrams of air exchange between the outside and talus according to 4 periods in the Fig. 11. (a) External cold air sinks through the upper part of talus and pores between rocks, and talus begins to cool. Warm air inside talus rises and exits through Warm Hole. Cold air inside talus flows out through the lower end of talus. (b) External cold air continues to sink into talus. Outflow of cold air at the lower end of talus becomes to be stagnant. Exhale of warm air inside talus through Warm Hole becomes stronger. (c) Warm air inside talus continues to exit through Warm Hole. Cold air inside talus flows out through the lower end of talus. External air is inhaled slowly and warms talus. (d) Outflow of cold air inside the talus through the lower end of talus becomes stronger. Warm external air is inhaled into talus through the pores between talus rocks and Warm Hole.

온도가 외부 기온보다 크게 낮기 때문에 하단부를 통한 냉기의 유출이 강하게 일어난다. 온혈을 비롯한 너털 표면의 빈틈으로는 따뜻한 외부 공기가 유입되며, 이에 따라 너털은 전체적으로 가열된다. 너털 하단부의 온도는 영하의 온도에서 상승하여 0℃에 도달하며, 빙혈에 영향을 주는 너털 내부의 얼음이 대부분 소진될 때까지는 0℃를 유지한다(Fig. 9(d)).

이상과 같이 너털의 각 지점에서 형성되는 기류의 방향은 온혈의 온도가 너털 하단부보다 항상 높다는 점과 외부 기온과 너털 온도의 고저 관계를 이용하여 설명할 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 8과 9의 P1, P3 기간에 너털 하단부와 온혈에서 동시에 너털 내부 공기가 유출될 수 있는 것으로 나타났다. 또 Fig. 7에서 보

인 전이기의 야간에도 두 지점에서 모두 내부 공기의 유출이 발생하였다. 즉, 온혈에서의 따뜻한 공기 유출과 빙혈에서의 찬 공기 유출이 동시에 일어날 수 있는 것이다. 이것은 너털 하단부와 온혈 이외에도 너털 경사면에 흩어져 있는 여러 통로를 통해 너털 내·외부 사이의 공기 교환이 일어날 수 있음을 의미한다. 다만, 외부 공기보다 따뜻한 너털 내부의 공기는 상승하여 온혈을 통해 유출되고 찬 공기는 하강하여 너털 하단부를 통해 유출된다.

4. 요약 및 결론

너털의 저온 현상이 나타나는 의성 빙계리 얼음골에서 너털 온도와 여러 가지 기상 요소를 약 2년간에

걸쳐 관측하고 온도 측정 결과를 위주로 분석하였다. 너털 하단부의 온도는 1월에 최저 온도를 나타낸 후 상승하여 5~6월에 0℃에 도달하면 여름이나 가을까지 일정한 온도를 유지한다. 가을에 최고 온도를 기록하지만 외부 기온이 낮아지면 너털 온도도 함께 하강하였다. 2년간 빙혈의 평균 온도는 -0.3℃로 외부 기온보다 10℃ 이상 낮았으며, 연중 최고 온도는 5℃ 이하이었다. 너털 하단부의 온도는 연중 대부분의 기간 동안 외부 기온보다 낮았다. 외부 기온이 하강하면 너털 하단부도 즉시적으로 냉각되어 너털 내부에 냉기가 저장되기 때문이다. 온혈에서 측정된 온도는 일반적인 연중 기온과 매우 다른 변화를 보였다. 봄과 여름에는 온혈을 통해 외부 공기가 유입되므로 너털 온도는 기온과 비슷하게 변화하였다. 그러나 가을과 겨울에는 너털 내부의 공기가 유출되면서 온혈의 온도는 외부 기온 변동과 무관하며 외부에 비해 높은 값을 나타내었다. 온혈에서 일어나는 기류의 방향이 변화하는 전이기에 너털 온도가 하루에 2번 극대값을 나타내었으며, 가을철과 늦은 겨울 및 이른 봄에는 너털 하단부와 온혈에서 동시에 기류의 유출이 일어났다. 너털 상단부의 온도는 가을과 겨울 동안 외부 기온과 함께 하강하였고, 봄과 여름동안 상승하였지만 온도 상승 속도는 외부 기온에 비해 느렸다.

너털의 각 지점은 가까운 거리에도 불구하고 큰 온도차가 나타났다. 너털 내부의 온도는 빙혈에 가까울수록 낮고 온혈에 가까울수록 높다. 외부 기온이 온혈 내부의 너털 온도보다 높으면 너털 내 공기는 하단부 쪽으로 침강하여 유출되고, 온혈을 포함하여 공기가 유동할 수 있는 너털 표면의 틈을 통해 외부 공기가 유입된다. 반대로 외부 기온이 너털 하단부의 온도보다 낮으면 너털 표면을 통해 외부의 찬 공기가 침강하여 너털 내로 유입된다. 이 때 너털 내에 있던 따뜻한 공기는 상승하여 너털 밖으로 빠져나가는데, 온혈은 내부 공기가 유출되는 주요한 경로 중의 하나이다. 외부 기온이 온혈 쪽 너털 온도보다는 낮고 너털 하단부의 온도보다 높을 때에는 너털 내의 찬 공기는 침강하여 하단부로 유출되고, 따뜻한 공기는 온혈을 통해 유출된다. 이 때 너털 표면을 통해 외부 공기가 너털 내로 유입된다. 이와 같이 너털 하단부와 온혈에서 동시에 너털 내부의 공기가 유출될 수 있고, 너털 표면을 통한

공기의 유동이 가능하므로 너털 내부에서 전체적으로 동일한 방향의 기류가 형성된다고 생각할 필요는 없다. 너털 외부의 찬 공기는 너털 표면을 통해 침강하여 너털을 빠르게 냉각시키고, 안정 상태를 형성하므로 너털 하단부의 저온 상태는 긴 시간동안 잘 유지되며, 너털 각 부분의 온도와 외부 기온의 차이에 따라 너털 내·외부간 기류가 너털 각 지점에서 독립적으로 일어난다고 보는 것이 가장 타당한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 외부 기온과 너털 온도를 측정하여 너털 표면에서 일어나는 공기의 흐름 방향을 유추하였다. 그러나 너털 표면에서 공기의 흐름을 직접 측정하고 이를 온도 자료와 비교한다면 너털 내·외부 사이에 일어나는 공기 교환을 보다 분명하게 밝혀낼 수 있을 것이다. 너털 온도의 경년 변화와 그에 영향을 주는 요인에 대해서는 여러 해에 걸친 관측을 수행하고 그 결과를 분석해야 하며, 온도 변화 메커니즘을 보다 상세하게 파악하기 위해서는 측정 지점의 수를 확장하여 공기 유동이 일어나는 여러 곳에서 관측을 수행할 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 의성군의 「의성군 빙계리 얼음골 학술조사구역」의 지원으로 이루어졌습니다.

REFERENCES

- Bae, S. K., 1990, Hydrological study of the freezing in summer season at the Ice Valley, Korea, *Journal of Korean Association of Hydrological Sciences*, 23, 459-466.
- Byun, H. R., Choi, K. S., Kim, K. H., Tanaka, H., 2004, The characteristics and thermal mechanism of the warm wind hole found at the Ice Valle in Mt. Jaeyak, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 40, 453-465.
- Delaloye, R., Reynard, E., Lambiel, C., Marescot, L., Monnet, R., 2003, Thermal anomaly in a cold scree slope (Creux du Van, Switzerland), *Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost*, A. A. Balkema, Zurich, 175-180.
- Etzelmuller, B., Hoelzle, M., Heggem, E. S. F., Isaksen,

- K., Mittaz, C., Vonder Muhll, D., Odegard, R. S., Haeberli, W., Sollid, J. L., 2001, Mapping and modelling the occurrence and distribution of mountain permafrost, *Norwegian Journal of Geography*, 55, 186-194.
- Goering, D. J., Kumar, P., 1996, Winter-time convection in open-graded embankments, *Cold Regions Science and Technology*, 24, 57-74.
- Harris, S. A., Pedersen, D. E., 1998, Thermal regimes beneath coarse blocky materials, *Permafrost and Periglacial Processes*, 9, 107-120.
- Hoelzle, M., Haeberli, W., 1995, Simulating the effects of mean annual air-temperature changes on permafrost distribution and glacier size: An Example from the Upper Engadin, Swiss alps, *Annals of Glaciology*, 21, 399-405.
- Holmgren, D., Pflitsch, A., 2014, Analysis of selected climatological observations of talus & gorge ice caves in New England, *Proceedings of the 6th International Workshop on Ice Caves: NCKRI Symposium 4*, National Cave and Karst Research Institute, Idaho, 68-71.
- Hwang, S. J., Seo, K. S., Lee, S. H., 2005, Study on ice formation mechanism at the Ice Valley in Milyang, Korea, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 41, 29-40.
- Kim, S. S., 1968, On the ice-formation at the "Ice-Valley", Milyang Koon, Korea in summer season, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 4, 13-18.
- Kim, Y. E., 2005, On the geographical features and ice-formation at Korean Ice-Valley, *Journal of Korean Meteorological Society*, 41, 6, 1151-1161.
- Kneisel, C., Hauck, C., Vonder Muhll, D., 2000, Permafrost below the timberline confirmed and characterized by geoelectrical resistivity measurements, Bever Valley, eastern Swiss alps, *Permafrost and Periglacial Processes*, 11, 295-304.
- Moon, S. E., Hwang, S. J., 1977, On the reason of the ice-formation at the "Ice-Valley", Milyang Kun, Korea in the summer season, *Teacher Education Research - Pusan National University, College of Education*, 4, 47-57.
- Morard, S., Delaloye, R., Dorthe, J., 2008, Seasonal thermal regime of a mid-latitude ventilated debris accumulation, *Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost*, Institute of Northern Engineering, University of Alaska, Fairbanks, 1233-1238.
- Ruzicka, V., 1999, The freezing scree slopes and their arachnofauna, *Decheniana-Beihefte*, 37, 141-147.
- Ruzicka, V., Zacharda, M., Smilauer, P., Kucera, T., 2015, Can paleoreugia of cold-adapted species in talus slopes resist global warming?, *Boreal Environment Research*, 20, 403-412.
- Song, T. H., 1994, Numerical simulation of seasonal convection in an inclined talus, *Proceedings of the 10th international heat transfer conference*, Brighton, 455-460.
- Swada, Y., Ishikawa, M., Ono, Y., 2003, Thermal regime of sporadic permafrost in a block slope on Mt. Nish-Nupukaushinupuri, Hokkaido island, northern Japan, *Geomorphology*, 52, 121-130.
- Tanaka, H. L., Nohara, D., Yokoi, M., 2000, Numerical simulation of wind hole circulation and summertime ice formation at Ice Valley in Korea and Nakayama in Fukushima, Japan, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 78, 611-630.
- Zacharda, M., Gude, M., Kraus, S., Hauck, C., Molenda, R., Ruzicka, V., 2005, The relict mite *Rhagidia gelida* (Acari, Rhagidiidae) as a biological cryoindicator of periglacial microclimate in European highland screes, *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 37, 402-408.
- Zacharda, M., Gude, M., Ruzicka, V., 2007, Thermal regime of three low elevation scree slopes in central Europe, *Permafrost and Periglacial Processes*, 18, 301-308.