

재약산 얼음골에 나타나는 온혈의 특징과 열적기구

변희룡¹ · 최기선¹ · 김기훈¹ · 田中博²

¹부경대학교 환경대기과학과

²筑波大學校 生命環境科學研究科

(2004년 7월 12일 접수, 2004년 8월 18일 승인)

The Characteristics and Thermal Mechanism of the Warm Wind Hole Found at the Ice Valley in Mt. Jaeyak

Hi-Ryong Byun¹, Ki-Seon Choi¹, Ki-Hoon Kim¹ and Tanaka Hiroshi²

¹*Dept. of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, South Korea*

²*Dept. of Life and Environmental sciences, Tsukuba University, Japan*

(Manuscript received 12 July 2004; in final form 18 August 2004)

Abstract

At the Ice Valley in the mid-slope of Mt. Jaeyak, a place much warmer than surroundings whole winter without any artificial heating was found and called the Warm Wind Hole (WWH). And the duration when the WWH was warmer than surroundings was defined as the Warm Hole Season (WHS). The variations of temperature and air humidity over, near and under the WWH from April 2003 till May 2004 were observed and analyzed. From results, following several characteristics are found. Firstly, the temperature of the WWH showed 13°C on 22 January when the nearby points showed -20°C. This was the maximum temperature difference between the WWH and nearby points during the period. Secondly, in the WHS, the relative humidity of WWH is almost always 100% and also the absolute humidity is much higher than surroundings, which means the huge inflow of the water vapor from underground and its condensation is the heat source of the WWH. Thirdly, during the WHS, the air temperature of the WWH never rises over the Upper Limit of Temperature (ULT). The ULT drops gradually from 19°C in middle September to 12°C in early April. During the ULT if the outer air temperature rises, the WWH temperature drops. This drop is big when the outer air temperature is above zero and small when it is below zero. This phenomenon is supposed to be the effect of underground icing. However, out of the WHS, the temperature of the WWH always goes in-phase with nearby points. Fourthly, as thermal mechanism, it is supposed that the warm be separated from the cold by the water that is enough in huge and inclined talus space of the valley and concentrated to the WWH. When the cold air penetrates into the ground, it evaporates the underground water. If the air is cold enough, the underground water freezes and releases the latent heat. This heat makes the air rise and the more underground water evaporate. Then resultant humid air continuously rises to, arrives to and condenses at the WWH and releases the condensation latent heat again. Evidences on this deduction were proposed. And it is known that this heat separation by water is not only a main cause on the secret of the Ice Valley but also the possibility of the natural heating without artificial energy.

Key words: Warm Wind Hole, Ice Valley, Heat separation, Natural heating, Latent heat

1. 서론

밀양시의 재약산 사자봉 줄기 아래에 위치한

얼음골에서는 여름에도 얼음이 남아있는 기이한 자연현상이 나타난다. 이 때문에 여름철에는 하루 10만 여명의 관광객이 몰릴 때도 있는 유명 관광지로 알려져 왔다. 그러나 이 신비한 자연현상이 학계의 연구대상이 된 것은 60년대 후반이 지나고부터이다. 대표적인 연구로 김성삼(1968), 문승의·황수진(1977), 밀양 문화원(1987), 배상근(1990), 정창희(1992), 田中博(1997), Tanaka et al.(2000) 등

Corresponding author address: Prof. Hi-Ryong Byun, Dept. of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, 599-1 Daeveon 3-dong, Nam-gu, Busan 608-737, Republic of Korea
Phone : +82-51-620-6283. Fax : +82-51-620-6283
E-mail : hrbyun@pknu.ac.kr

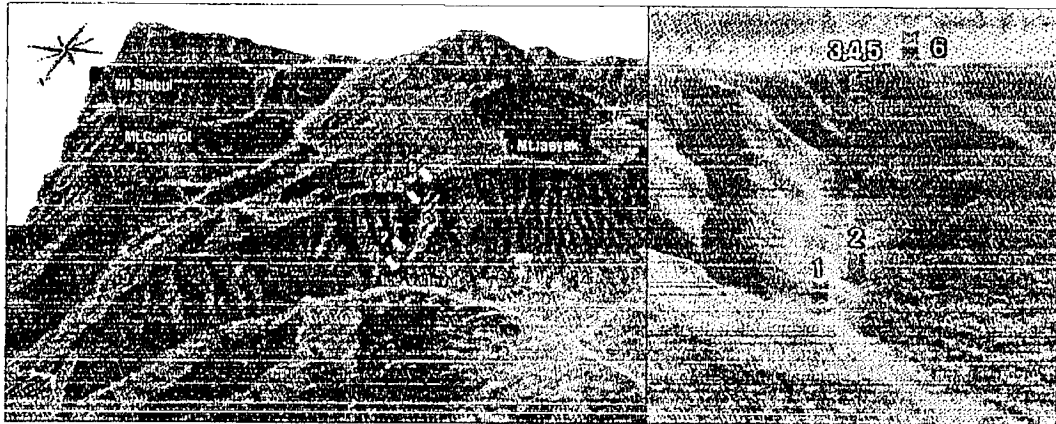


Fig. 1. Topography and locations of observations. Left panel is a tilted view of satellite image over the Yeong-Nam Alps. Right panel is an afternoon view of the Ice Valley simulated from height contour lines.

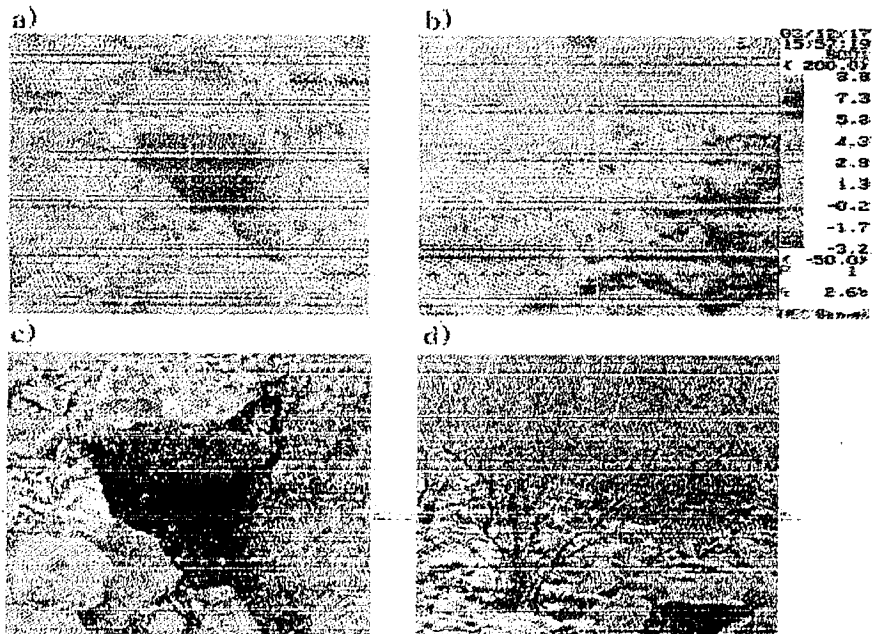


Fig. 2. The infrared (a) and the visual (c) image of the warm wind hole and those (b, d) of the warm air way passing underground.



Fig. 3. A line of snow melt by the warm air passing underground, pictured on 9 March, 2003.

온혈내기1과 온혈내기2는 Fig. 2c의 내부 60cm 지점에, 불과 20cm 거리로 떨어져 있다. 둘 다 굴속에 있으나 온혈내기1은 더 깊숙한 바위 틈 속에, 온혈내기2는 밖에서 보일 정도로 공기 중에 노출된 위치이다. 냉혈은 얼음골에 산재한 여러 냉혈 중의 한 곳으로서 흔히 얼음골 결빙지역이라 알려진 주 냉혈에서 약 100 m 하부에 위치한 다른 냉혈이다. 냉혈의 온도계도 온혈내기1, 2와 마찬가지로 지하에 설치되었다. 온혈외기는 온혈에서 불과 10 m 떨어진 곳에 있는 나무아래 지상 약 1.5 m 지점이다. 계곡지대는 냉혈과 마주보는 언덕 아래, 천황사 맞은 편 언덕의 숲 속이다. 지금까지 설명한 지점들을 Table 1에 각 지점의 위경도와 고도와 함께 요약하였고, 관측의 시작날짜 및 연중 최고·최저기온 자료는 Table 2에 있다.

3. 온혈과 온기통로의 발견

Fig. 2는 온혈(왼쪽) 및 온기통로(오른쪽)의 열

Table 1. The geographic information of the observation places.

S No.	S Name	Latitude	Longitude	Altitude
1	Lower valley	35°34'22.2"	128°59'11.7"	377 m
2	CWH	35°34'18.2"	128°59'10.8"	401 m
3	WWH_OUT			
4	WWH_IN1	35°33'54.4"	128°59'05.7"	759 m
5	WWH_IN2	35°33'54.4"	128°59'05.7"	759 m
6	Mt_Top	35°33'42.8"	128°59'00.9"	1,062 m

* Abbreviation : Station (S)

* WWH_OUT station information is not observed.

화상 사진(위, NEC San-eri로 촬영)과 가시화상 사진(아래)의 비교를 각각 나타낸다. 이 지역은 겨울에 주위보다 기온이 훨씬 높고 부근에서는 후덥지근한 열기를 직접 피부로 느낄 수 있다. 그러나 그 면적이 넓지 않아 등산로 바로 곁에 있으면서도 주의해서 살피지 않으면 그냥 지나치게 될 가능성이 높다. 주변에 눈과 얼음이 뒤덮여 있는 한 겨울(2003년 12월 17일)에도 푸른색의 이끼가 무성하게 자라며 이끼 사이에 물방울이 조롱조롱 맺힌 것을 볼 수 있다(Figs. 2c, 2d). 열화상 사진을 통해 살펴보면 명하 2도(온혈 부근)와 명상 10도(온혈)가 불과 수십cm의 거리에서 공존하고 있다(Figs. 2a, 2b). 그러나 온도계로 기온을 관측하면 온혈은 이보다 높은 온도를 나타내어, 기온 정도도 훨씬 더 크게 나타났다. 이러한 차이는 열화상 사진이 기온을 찍는 것이 아니라 주변 물체의 온도를 찍기 때문에 생긴다.

Fig. 3은 지하에 온기가 지나가는 통로가 있음을 보여준다. 눈이 쌓이지 않는 지역이 경사면을 따라 길게 형성되어 있다. 이 지역은 인적이 거의 닿지 않는 돌너덜로 여기에 눈이 쌓이지 않음은 이 지역 지하에 온기가 흐르고 있음을 의미한다. 이 온기통로는 온혈의 바로 아래에 위치해 있다.

4. 얼음골의 기온분포의 특이성

4.1 계곡내부의 평범한 공기

Fig. 4는 관측 지점들의 일 평균기온의 연변화이다. 우선 9월 초부터 관측된 산정기온이 온혈의

Table 2. The annual maximum and minimum temperatures at each observing point with related dates and times.

OBS point	Starting date of OBS	Minimum T			Maximum T		
		(°C)	Date	LST	(°C)	Date	LST
Lower Valley	28 Aug. 2003	-13.0	22 Jan. 2004	06:24	31.0	8 Sep. 2003	14:32
CWH	5 Apr. 2003	-12.0	22 Jan. 2004	03:25	13.5	13 Sep. 2003	14:32
WWH_OUT	5 Apr. 2003	-17.0	21 Jan. 2004	23:33	22.5	8 Sep. 2003	14:33
WWH_IN1	24 Aug. 2003 ◆	3.7	20 Feb. 2004	06:02	22.0	8 Sep. 2003	16:02
WWH_IN2	5 Apr. 2003	4.0	20 Feb. 2004	05:51	21.5	8 Sep. 2003	14:30
Mt.TOP	28 Aug. 2003 ◆	-20.5	22 Jan. 2004	00:00	18.5	6 Sep. 2003	13:46

* ◆ : Data of 1 hour interval. Remainders are 3 hour interval.

* Abbreviation : Local Standard Time (LST), Temperature (T), Observation (OBS)

기와 거의 같은 위상으로 변동하고(Fig. 4b), 또한 저지대에 위치한 계곡의 외기온도 같은 위상으로 등락한다(Fig. 4a). 산정의 관측위치는 해발 1,062 m로서 얼음골 계곡에서 상승하는 기류가 직접 닿지 않는 곳이다(Fig. 1). 따라서 이 위상변화는 온혈외기 즉 계곡내의 자유대기가 주변 대규모장의 공기 흐름과 동떨어진 특수한 공기가 아니며, 일반적인 다른 지역과 같이 여름과 겨울의 계절 변화를 하고 있음을 나타낸다.

4.2 기온 특이기간의 존재

4월부터 9월 중순까지는 온혈내기, 온혈외기 그리고 계곡의 기온이 거의 같은 위상으로 변한다. 단지 4, 5월에 온혈외기가 온혈내기보다 경일 변화의 진폭이 크다(그림 미 제시). 그리고 냉혈보다 약 400 m 높은 고도에 위치한 온혈내기의 기온이 계곡기온보다 거의 항상 낮아 자연법칙에 순응한다. 그런데 9월 말부터는 온혈내기가 온혈외기(계곡, 산정 등 모두) 보다 높아지기 시작하여, 두 지점의 기온 차이가 겨울이 깊어갈수록 커진다. 그러나 겨울이 지나면 기온차이는 점차 작아지다가 4월 중순부터는 외기와 내기가 함께 등락한다.

이 중 온혈내기가 온혈외기나 산정기온보다 계속적으로 높은 값을 보이는 것이 온혈현상이라

하고 온혈 현상이 나타나는 기간을 온혈기간이라 한다. 그런데 온혈의 기온은 겨울철에는 어떤 상한값 이상은 올라가지 않는다. 그래서 그림에서 직선에 가까운 형태를 보이며 특별한 경우에만 잠시 하강하였다가 다시 본래 값을 유지한다. 또한 이 시기의 온혈의 절대습도도 주변 대기보다 훨씬 높고(Fig. 6c), 상대습도는 주변 대기의 상대습도의 변동과는 무관하게 거의 항상 100%를 유지하는 특성을 보인다(Fig. 6d).

한편 냉혈의 기온은 1년 내내 다른 지점의 기온보다도 낮다(Fig. 4a). 겨울에는 다른 관측지점들보다 대체로 낮게 나타나고 가끔 비슷할 때가 있지만, 여름에는 현저하게 낮은 온도를 보인다. 그러나 본 연구는 우선 온혈에만 관심을 가지며 냉혈은 다음 기회에 다룰 것이다.

4.3 연중 최고·최저기온의 특이성

각 지점별 연중 최소 및 최고기온의 기록이 Table 2에 있다. 최고기온은 냉혈과 산정의 기온을 제외하고는 모두 9월 8일에 나타나 얼음골에서 여름의 절정은 9월 8일로 간주할 수 있다. 냉혈이나 산정의 최고기온의 발생일도 비슷한 시기에 나타났다. 최저기온은 거의 모든 지점에서 2004년 1월 21일과 22일 사이의 밤에 나타났다. 온혈외기(23:33 LST)와 산정(24:00 LST) 등 고지대에

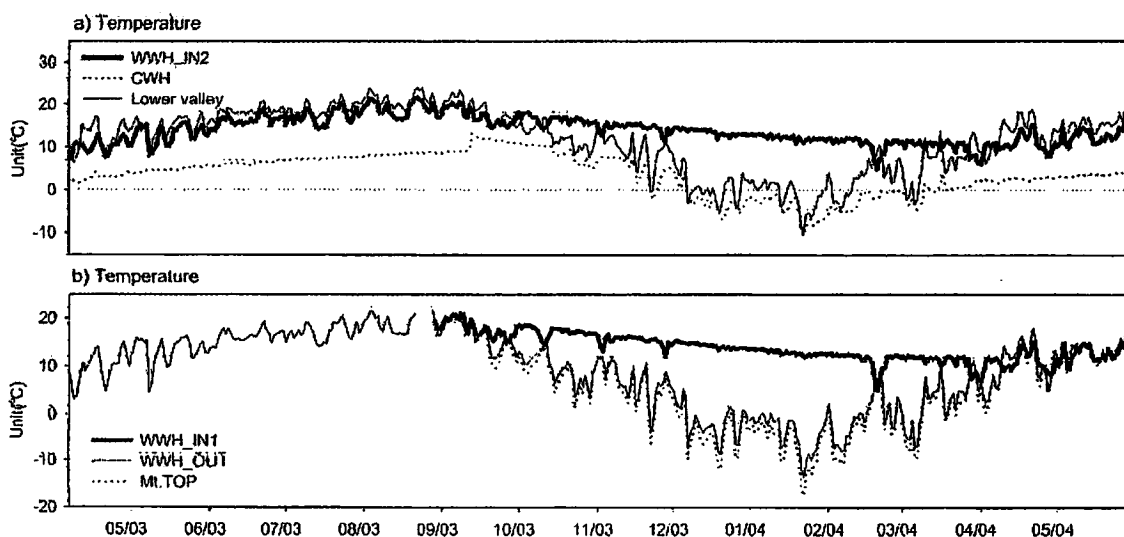


Fig. 4. The variations of the daily mean temperature from 7 April, 2003 to 28 May, 2004 at each point.

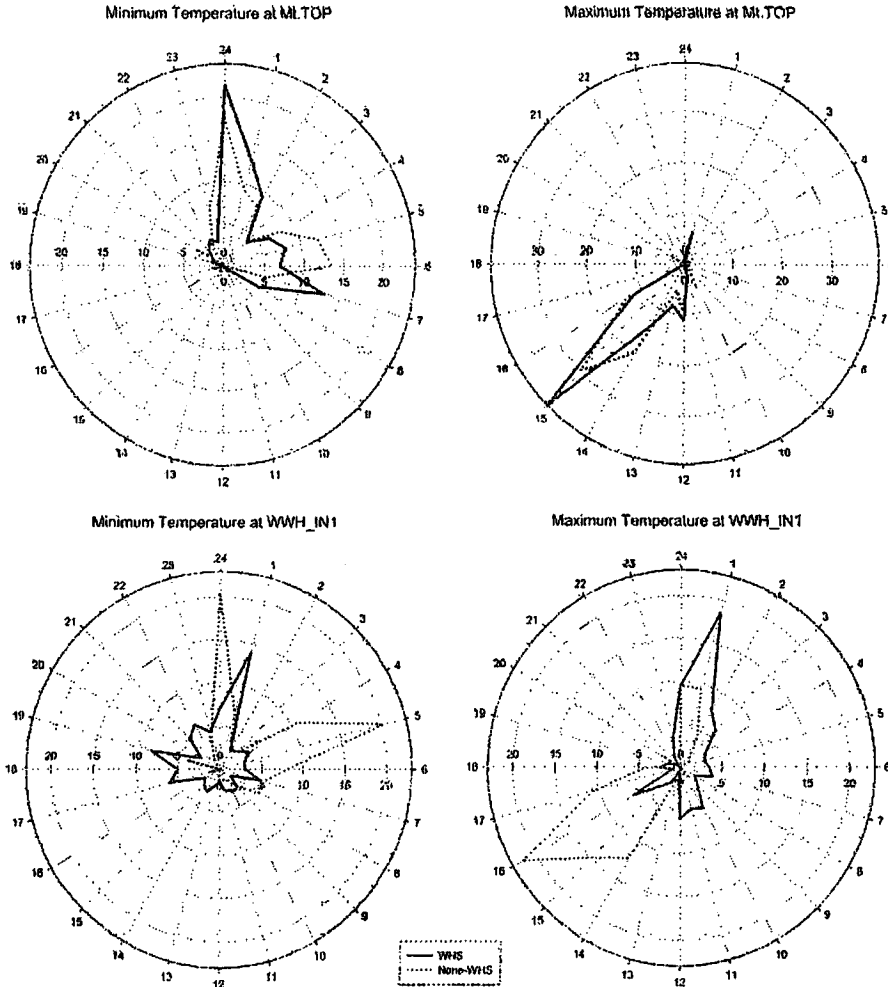


Fig. 5. Hourly occurrence percentile of the daily maximum and minimum temperatures at the top of the Mt. Jaeyak (upper panel) and WWH_IN1 (lower panel).

서 먼저 나타났으며 이후 냉혈(03:25 LST), 계곡 (06:24 LST) 순으로 저지대로 하강하였다.

그런데 온혈내기의 최저기온은 다른 지점들과는 큰 차이를 보였다. 온혈내기에서 최저기온이 나타나는 경우는 다음 두 가지로 구분되는데 첫째는 2004년 2월 20일처럼, 외부기온이 높아지는 날이다. 이 경우는 최저기온이 주변 종관장의 변화에 따라 발생하므로 언제 발생할지 예측이 어렵다. 둘째는 온혈기간이 종료되고 외기 기온이 내기기온보다 높아지는 4월 말이다. 이것은 해마다 비슷한 시기에 발생한다. 이 둘 중에 어느 쪽이 낮은 온도인지는 해마다 4월말은 기후특성을 말해주는 시기이므로 중요성을 가진다.

4.4 일 최고·최저기온의 특이성

Fig. 5는 온혈기간과 그 외의 기간으로 나누어서 산정파 온혈지점의 일 최고·최저기온의 발생 시간대를 조사한 것이다. 산정의 최저기온이 7시에 집중되는 경향이 있으며, 그 외 새벽기간에도 나타난다. 온혈기간에는 아침 최저기온이 1시간 늦게 나타나는 경향이 있는데 이는 겨울이라 일출시간이 늦어지기 때문이다. 온혈내기도 온혈기간 외에는 5시에 집중되는 경향을 보였다. 두 지점 모두에서 지표의 복사냉각에 의해 아침에 집중적으로 최저기온이 발생한다. 반면 온혈기간 동안의 온혈내기도 이러한 경향이 거의 없다. 즉,

온혈기간에는 야간 복사냉각에 의한 아침 최저기온이 발생하지 않는다. 두 지점에는 24시에 최저기온이 나타나는 이 지역 특유의 현상이 있다. 그 원인은 추가적인 연구를 필요로 한다.

최고기온은 산정에서는 계절 구분이 없이 낮 동안의 주간 복사가열에 의해 15시에 집중된다. 온혈내기1에서도 16시에 집중되는 경향이 뚜렷하나 온혈기간에는 최저기온과 마찬가지로 1시에 집중되어 현격한 차이를 보인다. 즉 온혈내기1은 일변화 특성이 미약하기는 하나 최고기온과 최저기온이 모두 1시에 나타나는 특징이 있다. 이는 이 지점이 주간 복사가열 및 야간 복사냉각과는 관계가 적은, 아직 밝혀지지 않은 어떤 특성을 가짐을 의미한다.

5. 온혈기간의 특성과 기구

5.1 온혈기간의 시작

Fig. 6a는 온혈내기1의 기온과 온혈내기2의 기온에 대한 일 평균기온의 차이를 보여준다. 온혈내기1과 온혈내기2의 변동추이는 거의 동일하지만, 온혈내기1의 기온이 평균적으로 0.7°C 정도 항상 높다. A에서 Z까지의 구간에서는 차이가 크게 나타나는 반면 A 이전 및 Z 이후에는 차이가 작고, 온혈내기2의 기온이 더 높은 기간(음수)도 나타난다. A~Z 구간에서의 양수는 온혈내기1의 온도가 더 지하에 갇혀 있기 때문에 발생한 것이다. 즉, 온혈내부 지하로부터 불어오는 온난공기

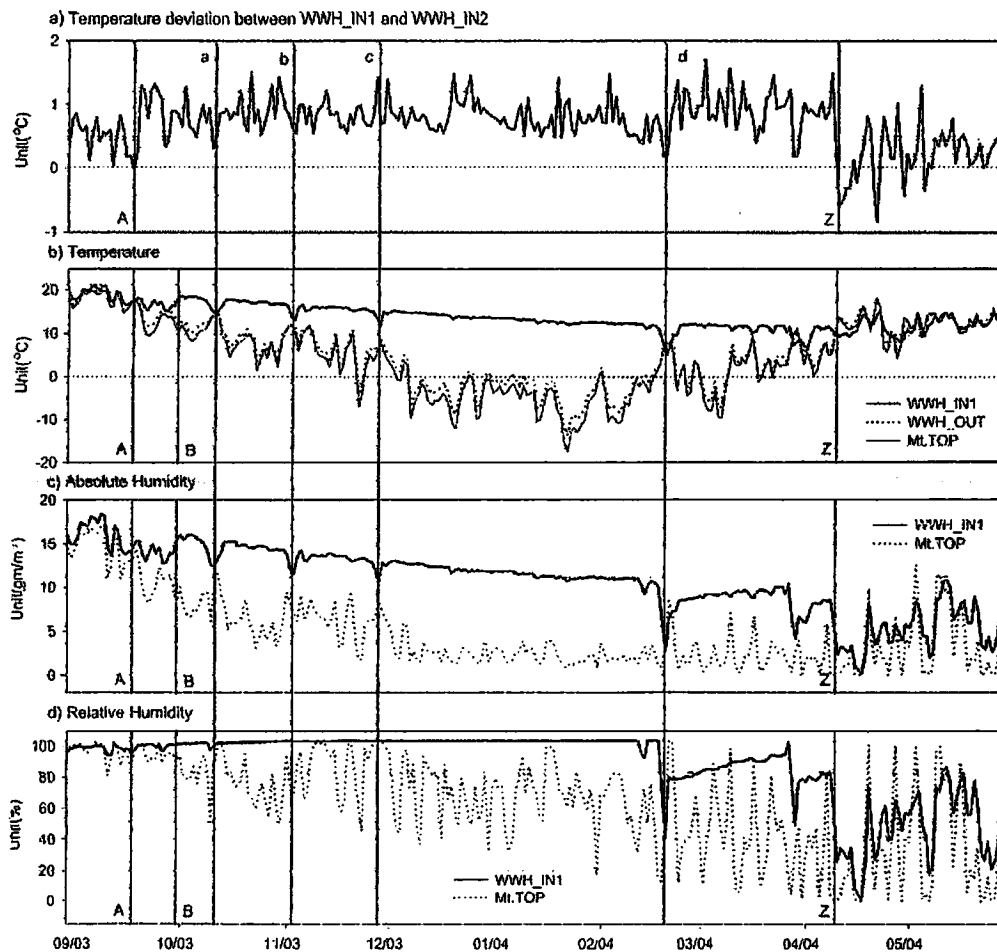


Fig. 6. (a) The time series of the difference of the daily mean temperature between WWH-IN1 and WWH-IN2. The comparison of (b) temperature, (c) absolute humidity, and (d) relative humidity from 1 September, 2003 to 28 May, 2004 among WWH-IN1, WWH-IN2 and the top of Mt. Jaeyak.

로 인한 것이다. Z지점 이후 온혈내기2 지점의 값이 높아지는 기간은 온혈내부에서 불어나오는 온난공기가 사라짐에 따라 발생한 것이다. 외부공기와 온혈내부의 혼합이 빈번히 발생하여 두 지점간의 차이가 작아졌다.

A~Z 구간의 이 특징은 이하 다른 지점의 관측치 비교에서 재차 확인된다. Fig. 6b는 온혈내기1과 외기의 온도가 같은 위상으로 변화하다가 2003년 9월 17일(A 지점)에 온혈내기1이 높아지기 시작함을 보여준다. 그러나 이 시기에도 등락은 여전히 같은 위상이다. 즉 온혈외기가 하강하면 온혈내기1도 함께 하강하고 온혈외기가 상승하면 온혈내기1도 함께 상승한다. Fig. 7이 더 자세하게 보여주는데 A 지점이 지난 후 외기하강과 함께 온혈내기1도 하강하나, 외기보다 하강 폭이 작아 내기의 기온이 더 높아진다. 이 시점에서는 습도와 기온이 모두 외기보다 내기가 높고 내기의 절대습도는 산정의 절대습도보다 현저하게 높으며 (Fig. 6c), 내기의 상대습도는 거의 항상 100%이다 (Fig. 6d). 즉 온혈에서 응결되며 방출되는 공기는 지하층을 지나오면서 충분히 흡습했음을 의미한다.

그러나 9월 30일(B 지점) 이후부터는 온혈외기가 하강하면 온혈내기1은 상승한다. 상승한 온혈내기1은 온도의 상한선을 가진다. 이렇게 온혈내기1의 온도가 상한선을 유지하는 기간을 온혈기간이라 정의한다. 온혈기간 내에서 온혈기온이 간헐적으로 등락하는 기간이 있는데 이것도 온혈기간에 포함한다. 온혈기간 전후에 온혈내기1이 온혈외기보다 높고 상대습도가 100%인 기간도 온혈기간에 포함한다. 그러므로 A가 온혈기간의 시작점이고 Z가 종료시점(4월 9일)이다. 온혈기간동안 온혈내기는 외기보다 온도 및 절대습도가 훨씬 높고 상대습도가 거의 항상 100%이다.

Fig. 7은 온혈의 특징이 시작되는 전후시기, 즉 2003년 9월과 10월의 기온변화를 자세하게 묘화한 것이다. 지점별 데이터의 비교를 쉽게 하기 위해서 1시간 자료는 모두 3시간 간격으로 바꾸었다. A, B는 Fig. 6과 같은 시점이다. A 시점까지는 온혈내기와 외기 그리고 산정기온이 같은 위상으로 등락한다. A에서 B까지는 두 가지 특징이 혼재한다. 즉 온혈외기와 온혈내기가 같은 위상으로 등락할 때도 있다. 반대로 외기가 상승하면 내

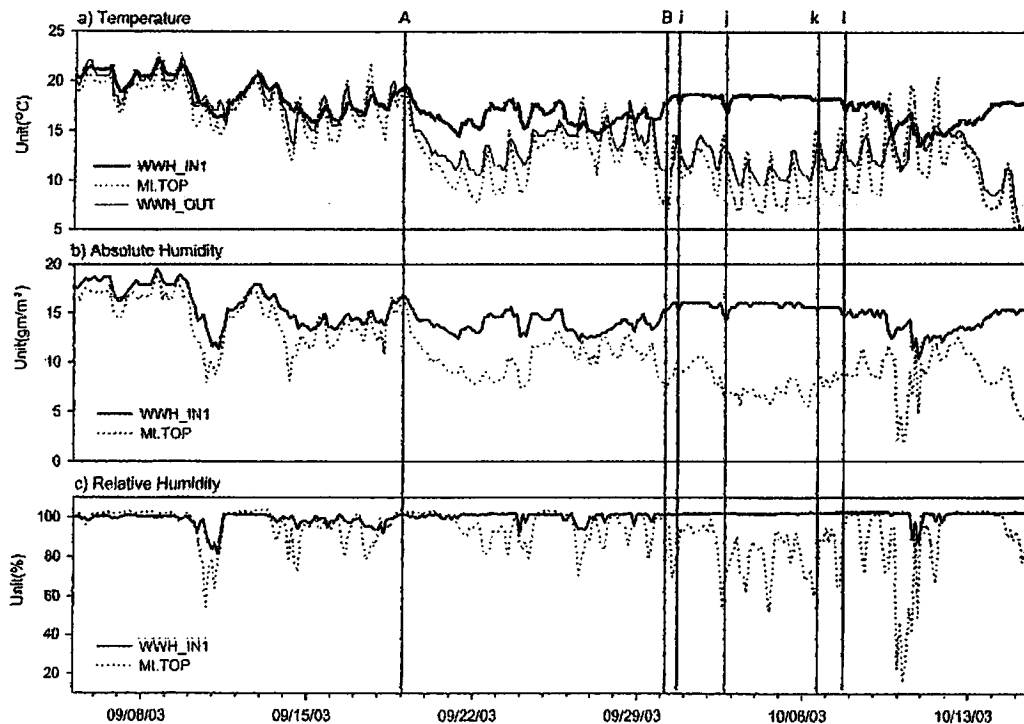


Fig. 7. As in Fig. 6 but for 3 hour interval data and from 5 September to 15 October, 2003.

기가 하강하는 경향을 보일 때도 있다. 그러나 이 때도 상한 온도가 나타나지 않는다는 점에서 B 이후와는 구별된다. B에서 외기가 10.5℃ 일 때, 처음으로 상한온도(18.7℃)에 도달하여 온혈기간이 시작되었다. 온혈기간은 한랭한 외기가 무거우므로 계곡 경사면을 누를 때, 계곡지하에 갇혀 있던 공기는 상대적으로 가벼우므로 밀려 올라가서 생기는 것인데, 지하공기를 밀어 올리기 시작하는 온도는 그 해 여름에 얼마나 가열되었는가에 달려 있다. 온혈기간 내에서도 온혈내기의 온도가 순간적으로 하강하는 경우가 있다. Fig. 6의 B와 a사이의 기간에 Fig. 7의 i, j, k, l이 있는 것이다. 즉 온혈내기가 상한 온도를 가지는 기간 내에 i, j, k, l과 같은 규모가 작은 기온하강도 있다. 또한 Fig. 6의 a, b, c, d처럼 제법 규모가 큰 기온하락도 있다. 이는 뒤에 상술한다.

5.2 기온 일교차와 경일변화

Fig. 8은 온혈내기1(Fig. 8a)과 산정(Fig. 8b)에서의 최고·최저기온의 경일변화를 보여준다. 온혈기간을 포함한 A~Z기간동안 온혈내기1의 최고기온은 상한온도를 가지며 서서히 감소하는 경향을 보인다. 최저기온도 함께 감소하지만 일별 등락의 진폭이 최고기온보다 크다. 이는 최저기온의 경우 상한온도에 도달하지 못하는 경우가 자주

생김을 의미한다. 최고기온과 최저기온의 차이 즉 기온일교차는 온혈내기1에서 산정보다 훨씬 작게 나타나며, 특히 온혈기간 중에는 더 작게 나타났다. a, b, c, d 기간을 살펴보면 산정의 최고·최저기온이 높아졌을 때 온혈의 최고·최저기온이 하강하였고, 이 때 일교차가 커졌다.

5.3 온혈의 열원

온혈기간 동안 온혈내기1의 절대습도는 산정(Figs. 6c, 7b)의 절대습도보다 훨씬 높다. 이 때 상대습도는 외부 조건에 무관하게 거의 항상 100%이다. 외기의 습도는 매일 심한 등락을 하지만 온혈내기1의 상대습도는 등락을 거의 하지 않는다. 이는 온혈내기1의 공기가 외부에서 바로 흘러들어간 공기가 아니라, 지하에서 수증기를 충분히 포함하고 있다가 흘러나온 것이기 때문이다. 따라서 온혈 열기의 근본적 원인으로 물의 역할이 중요시 된다.

5.3.1 지하수의 증발과 응결

얼음골 계곡에는 5개 이상의 폭포에서 겨울에도 계속 물이 흘러들어가고 있으며 지하에는 돌너덜이 산재하여 지하수가 이 돌너덜을 통과하는 동안 증발할 기회를 충분히 가질 수 있다. 그러므로 겨울철 지하로 유입된 찬 공기는 지하수를 증

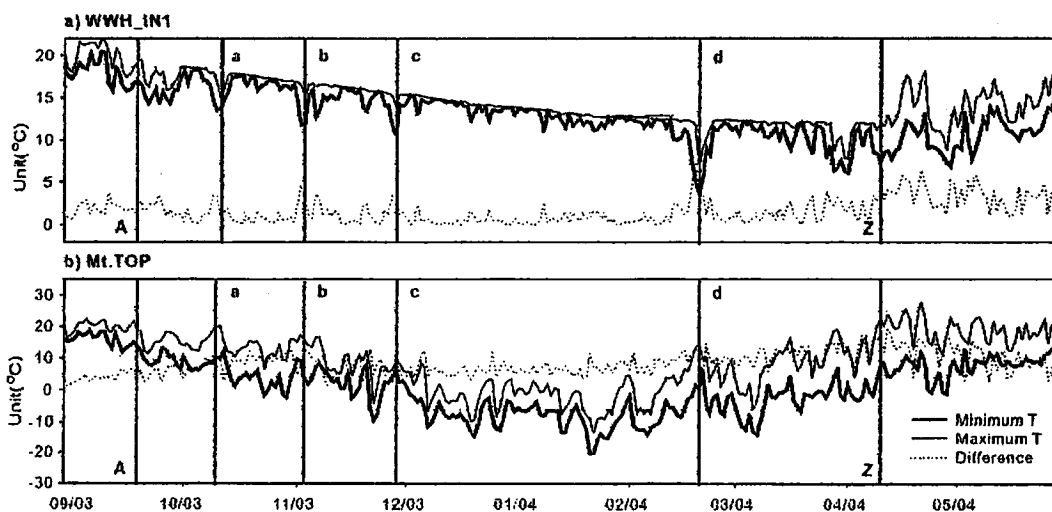


Fig. 8. The time series of the daily minimum and maximum temperatures, and the difference between the two at (a) WWH_IN1 and (b) Mt. Jaeyak.

발시키고, 증발된 공기는 잠열을 가진 채 상승한다. 증발과정에서 열을 뺏어가므로 냉기는 남아 아래쪽으로 흐른다. 상승하는 공기는 단열팽창으로 인해 다시 냉각하여 다시 응결한다. 응결한 후에는 물과 냉기를 남긴 채, 열은 다시 상승한다. 이 과정이 되풀이 되면서 열과 수증기는 고지대로 물과 냉기는 저지대로 이동되는 열 분리 현상이 발생한다. 결국 공기가 상승하는 통로의 지표는 습도가 높아지게 되고(예로 Fig. 3의 온기통로) 최종적으로 온혈로는 대단히 따뜻한 공기가 배출된다.

그리고 온혈기간 동안 온혈내기¹의 상대습도가 거의 항상 100%이며 절대습도가 온혈외기보다 훨씬 높다. 겨울에도 온혈 주변에 항상 습기가 많아 물방울을 많이 볼 수 있으며 이끼가 잘 자라며, 온혈기간이 종료되면 습도가 감소하며 이끼가 매달라진다. 이런 여러 사실들이 지하수 증발이 온혈의 열원이라는 사실과 잘 부합한다.

5.3.2 결빙잠열

수증기 응결의 효과 외에 지하수의 결빙과정도 온혈의 열원이 된다. 겨울철에 지하에 냉기가 유입되면 지하수를 얼려 얼음을 만든다. 이때 잠열이 방출된다. 찬 얼음과 찬 공기는 지하에 남거나 아래로 흐르고, 방출된 잠열로 따뜻해진 공기는 가벼워져서 위로 올라가는 부력을 받는다. 이 가열된 공기는 상대습도가 줄었으므로 상승하면서 주변의 물을 더 많이 증발시킨다. 따라서 수증기의 반복적 응결과정처럼, 온혈의 승온을 촉진하는 효과가 있다.

5.3.3 여름에 저장된 현열

여름동안 지하에 저장되었던 열기가 겨울동안 서서히 발산하는 것으로 볼 수도 있다. 그러나 겨울동안 계속적으로 발산할 만한 열기가 어디에 저장되는가 하는 문제가 남는다. 돌이 가열되어 있어도 비열이 크지 않아 찬바람이 수 일만 유지되면 다 식어 버린다. 따라서 지하의 돌이 13℃를 넘는 열기를 영하의 기온이 지속되는 겨울동안 계속 내 뿜는다고 간주하려면 추가적인 증명이 필요하다. 화류용회암이나 안산암의 평균 비열은 0.20, 공기의 정압비열은 $0.24 \times 1.4 \text{ cal/g} \cdot \text{K}$

이다. 즉 돌 속에 저장될 수 있는 열의 양은 공기 속에 저장될 수 있는 양보다 적다. 그래서 열기가 돌 속에서 겨울 내 버틸 수는 없다. 그리고 안산암류 암석의 열전도율은 1.4×10^{-3} 으로 암석 중에서도 아주 낮은 편이다(공기는 $5.7 \times 10^{-5} \text{ cal/cm} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$). 따라서 주변 바위에서 열기가 전도해 온다고도 상상할 수 없다.

5.3.4 유사 얼음골의 열원

얼음골과 유사한 돌너덜 지역은 지구상에 무수히 많다. 그런데도 다른 지역에서는 온혈이 좀처럼 나타나지 않는다. 만약 여름에 저장된 열기가 온혈 열기의 근원이라면 돌너덜 밭의 규모가 얼음골과 비슷한 다른 지역에서도 온혈이 많이 발견되어야 하는데, 아직 그런 현상은 보고되지 않았다. 밀양 얼음골이 다른 돌너덜 지역과 다른 점은 크게 세 가지인데 물이 사철 흘러 들어가는 사실, 돌너덜의 규모가 아주 큰 사실, 온기도 냉기도 한 지점을 모일 수 있도록 지형이 형성되어 있다는 사실이다. 다른 지역에서는 이 조건들이 충족되지 못하여 온혈현상이 생기지 않는 것이다.

5.3.5 열원의 정량적 계산

얼음골의 열원은 지하공간에서의 증발과 결빙에 가장 큰 근원을 두고 있다. 그러나 현 시점에서는 지하공간의 부피나 구조가 측정되지 못하여 지하공기의 대류규모를 결정할 방법이 없다.

5.4 상한온도의 점진적 하강

온혈기간에는 온혈의 기온이 특정 상한선 이상은 상승하지 않는다(Figs. 6, 7, 9). 이 상한온도는 10월 초에 약 18.7℃ 이다가 점차 하강하여 4월 초에 11.9℃까지 떨어진다. 이 감온은 온혈외기의 기온이 온혈내기 기온보다 높아지는 4월 초까지 계속된다.

온혈기간 동안 온혈내기가 상한온도를 가지는 원인은 다음과 같이 추측된다. 지하공기가 상승하거나 하강하는 기초적 원인은 외기와 지하공간간의 밀도차이 때문에 생기는 것이다(Tanaka *et al.*, 2000). 그러나 밀도차이가 커져서 부력이 커져도 내기의 상승 속도는 큰 차이가 나기 어렵다. 지하

의 마위틈 공간을 통하여 상승하기 때문이다. 따라서 지하에서 상승하는 수증기의 양은 일정하고 이에 동반되어 지하경로를 통해 온혈까지 도달하는 수증기의 양과 응결하는 양이 거의 항상 일정하다. 따라서 방출되는 잠열의 양도 일정하여 상한온도를 가지는 것이다.

상한온도는 Fig. 6의 Z 지점(10℃)까지 점진적으로 하강한다. 외부기온은 1월 22일에 최저치를 보이고 그 후 상승하였으나, 온혈내기1은 4월 9일 외기가 12℃를 초과할 때까지 2개월 이상 더 하강을 지속하다가 그 이후에 상승하였다. 그리고는 계속 외기와 내기가 함께 등락했다.

이 상한온도의 점진적 하강의 원인은 두 가지로 해석된다. 첫째는 지열이 서서히 식기 때문에 이 영향으로 4월까지 냉각이 계속된다는 견해이다. 지각의 최고온도가 9월초, 최저온도가 4월초에 발생한다면 온혈의 기온변화와 부합한다. 그러나 밀양의 지중 1 m 지점에서 최고온도는 8월에, 최저온도는 2월에 나타나는 기후 값을 가지니 엄연한 차이가 있다. 즉 이 이론만으로는 3월에도

계속 상한온도가 감소한 사실을 설명할 수 없게 된다.

둘째 이론은 물의 효과를 감안한 이론이다. 초겨울까지는 흘러 들어간 찬 공기가 지하에 여름 동안 저장된 온난공기를 밀어 올려 온혈의 온기가 유지된다. 그러나 그 열기는 오래 가지 못하고 금방 소모되고 만다. 지하의 수증기 증발, 응결의 과정이 반복되면 온혈로 열이 공급되어 온기는 계속 유지된다. 한편 지하에서 물의 결빙이 시작되면 용해잠열이 배출되므로 이 열이 증발, 응결을 촉진시켜 온혈의 열기를 유지하는 원인이 된다. 봄철에도 계속 하강하는 이유는 봄철에 지하로 유입되는 외기가 비록 온혈내기보다는 한랭하나 영상이기 때문에 지하에서 얼음을 녹이는 작용을 한다. 얼음이 녹으면서 열을 뱉어가므로 지하의 공기는 자체로 열을 잃을 뿐 아니라 증발, 응결의 작용까지 방해 받는다. 그래서 3월부터 지열은 증가하나 온혈의 기온은 4월 초순이 지나가야 증가할 수 있게 되는 것이다. 따라서 두 번째 이론이 더 설득력이 있다.

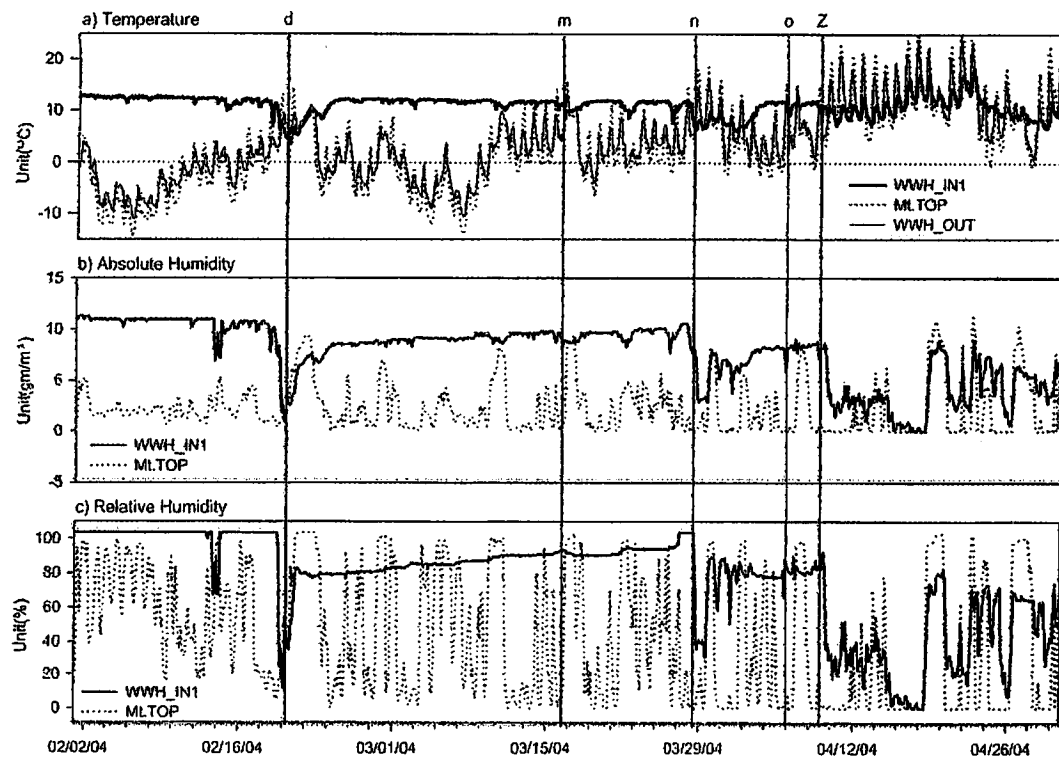


Fig. 9. As in Fig. 6 but for 3 hour interval data and from 1 February to 30 April, 2004.

5.5 온혈기간의 종료

Fig. 9는 온혈기간이 종료되는 시점을 세밀하게 표현한 것이다. 2월 말, 제약산정에 훈풍이 불면서 온혈의 냉각이 나타났고(d 시점), 3월 중순부터 4월 초순 사이에는 m, n, o 등 간헐적인 냉각이 자주 일어났다. 그 다음, 4월 9일부터 산정의 기온이 온혈기온보다 높아지고 이 상태가 지속되자 온혈기간이 끝났다. 그 이후는 온혈의 기온이 외기와 함께 등락했다. 이는 절대습도 및 상대습도의 변화에서도 그대로 반영된다(Fig. 9b). 즉 Z 시점 이후에는 온혈이 더 이상 습윤공기의 출구 노릇을 하지 않아 절대습도와 상대습도가 격감하였다. 4월 중순은 산정의 기온이 영하권을 벗어나니 지하의 조빙작용이 없어지는 시기이다.

5.6 온혈의 돌발적 냉각의 원인

5.6.1 중력차에 의한 온혈공기의 부력약화

Fig. 6의 a, b, c와 Fig. 7의 i, j, k, l, 등은 공통점이 있다. 온혈외기의 기온이 상승하였을 때 온혈내기가 하강한 점, 그리고 이와 같은 등락에도 불구하고 온혈내기의 상대습도는 계속 100%인 점, 그리고 이 때 온혈외기의 기온이 영상이라는 점이다. 이 시점의 온혈내기의 냉각은 부력의 약화 때문이다. 겨울동안 온혈에 온난 공기가 유출되는 가장 큰 원인은 지하공기가 외부공기보다 가볍기 때문에 외부공기의 중력에 의해 밀려 올라가는 것이다. 그래서 외부 공기와 중력차이가 클수록, 즉 온도차이가 클수록 밀려나오는 공기의 양은 많아져서 온혈에 열기가 집중된다. 그런데 온혈외기가 상승하면 외기와 내기간의 밀도차이, 중력차이가 줄고 이 때문에 부력이 약화하여 온혈로 올라가는 온기가 줄어들는다. 그래서 내기온도는 하강하게 되는 것이다. 외부공기가 상승하는 것과 온혈기온이 하강하는 것은 시간차이 없이 거의 동시에 발생한다.

5.6.2 온혈의 냉혈화

외기가 온난해져 가벼워지면, 고지대 지하 돌틈에 미리 축적되어 있던 한랭공기가 중력을 받아 아래로 흘러 온혈로 배출된다는 것이 온혈의

냉혈화이다. 이 경우 고지대의 외기온이 온혈내기보다 높아야 한다는 조건이 필요하다. 그래야 무거운 공기가 흘러내려 올 수 있기 때문이다. 실제로 온혈 상부에 들너덜이 많이 있고 Fig. 6의 d와 Fig. 9의 d, m, n, o 등은 이 조건을 만족한다. m을 제외하고 상대습도 및 절대습도의 현저한 감소가 명백하게 보인다. 온혈이 냉혈화할 때도, 외기 기온의 상승과 온혈기온의 하강은 시간차이 없이 거의 동시에 발생한다. 그래프에 두 작용의 최고점이 동시에 나타나는 것이다.

5.6.3 지하결빙의 영향

온혈의 냉각은 깊은 겨울을 피하여 즉 외기온도가 영상일 때 많이 발생한다. 도표에 제시된 a, b, c, d, i, j, k, l, m, n, o 등의 시점들은 모두 대기가 영상일 때이다. 외기가 영하인 1월과 2월, Fig. 6의 c와 d 사이 기간에도 온혈외기의 등락은 당연히 있다. 그러나 이 기간에는 외기가 상승해도 온혈의 기온 하강은 아주 미약하다. 외기가 영하인 상태에서는 유입된 공기에 의하여 지하에 결빙이 발생하기 때문이다. 지하에서 결빙으로 생긴 잠열의 방출은 온혈로 집중되는 온기의 양을 증가시키므로 지하결빙이 시작된 후부터는 지하공기는 항상 충분한 부력을 받는다. 그래서 이 시기에는 외기가 등락해도 온혈내기의 등락에 미치는 영향이 크지 않다.

5.6.4 강수와 외기습도의 영향

지하에서 응결하는 수증기량이 줄면 온혈내기의 기온은 하강할 수 있다. 실제로 외기에 습도가 높고 기온이 높은 날은 지하에서 상승하는 공기는 상승을 위한 부력을 적게 받는다. 그래서 응결이 줄어들어 방출되는 잠열도 준다. 그래서 비 오는 날은 온혈기온이 하강할 이유가 충분하다. 그러나 정작 비 온 날의 하강은 크지 않은 것으로 보이며, 2004년 2월 20일 큰 비가 왔는데, 온혈의 냉각은 강수 때문이 아니라 그보다 하루 전에 나타난 외기 기온의 상승 때문에 발생한 것으로 보인다.

6. 결론 및 토의

제약산 얼음골에 겨울동안 주변보다 약 30℃

높은 온도가 자연 상태에서 나타나는 지역이 있음이 확인되었다. 이 온혈현상은 9월 말부터 시작하게 되며, 4월 중순까지 지속된다. 그리고 이 온혈의 발생에는 지하수의 결빙, 응결과 증발 등이 큰 역할을 한다. 이런 현상이 전 세계에서 오직 채악산 얼음골에서만 발견된 것은 이곳의 특수한 지형 때문이다. 따라서 비슷한 지형과 수맥을 가진 지형을 대상으로 찾으면 이런 온혈은 지구상에 많이 분포할 가능성이 크다.

새로 발견된 것이 많지만 이번 1년의 관측과 조사로 온혈의 특성과 발생 원리를 다 알아낼 수는 없는 일이다. 앞으로 더 긴 기간의 관측, 더 많은 관측변수를 이용한 분석이 필요하다. 또한 관측변수를 추가시킴으로써(예를 들어 온혈부근의 강수시간) 다 방향에서의 온혈 발생 원리에 대한 연구 또한 요구된다.

중요한 점은 아무런 인공 에너지 또는 기계장치나 전기장치의 투입이 없이 자연력만으로 겨울에도 온기가 생산되고 유지될 수 있다는 사실이 발견된 것이다. 냉혈에 겨울동안 냉기가 저장되고 여름까지 보존되는 원인이 바로 이렇게 온기를 따로 분리해 주는 온혈이 있기 때문임은 불문가지이다. 따라서 얼음골의 비밀은 냉혈과 냉기만으로 풀리는 것이 아니라 온혈과 함께 풀어야 함이 확실하다. 여름에도 온혈은 어딘가 형성될 것이며 그 고도가 점차 하강할 것이기 때문이다. 이 온혈고도의 계절적 변화를 추적해 내는 것은 얼음골 연구의 다음 과제로 남긴다.

이 냉혈과 온혈은 에너지나 연료의 사용이 없이 자연 상태에서 열을 분리해 내는 기관이다. 즉 에너지 없이 지형만으로도 냉기와 온기를 생산해 낼 수 있는 증거이다. 따라서 이 연구의 성공은 추후 에너지 사용을 줄이고 자연친화적 인류문화를 형성해 가는 데 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글

연구에 협조해 주신 밀양시의 이상조 시장님 및 임원여러분, 얼음골 인근의 주민 여러분, 마산 MBC 지재동 PD 및 소속원 여러분께 감사드립니다. 연구에 직간접으로 기여해 주신 부산대학교 윤성효 교수님, 한국 지질자원 연구소 최범영 박

사님, 부경대학교 박맹인 교수님께도 감사드립니다. 본 연구는 2003년도 부경대학교 기성회 학술연구비로 수행되었다.

참고문헌

김성삼, 1968: 얼음골 (밀양)의 하계 결빙 현상에 관하여. *한국기상학회지*, 4(1), 13-18.

김윤이, 2003: 얼음골 탐구. 빙계와 석빙고의 장빙. *디지탈디오(주)*, 101pp.

문승의, 황수진, 1977: 밀양 얼음골의 하계 결빙 현상에 관한 연구. *부산대 사대 논문집 제4집 자연과학편*, 47-57.

밀양 문화원, 1987: *밀양지*, 382-383.

배상근, 1990: 얼음골의 하계 결빙현상에 관한 수문학적 연구. *한국수문학회지*, 23(4), 459-466.

변회룡, 2003: 얼음골 동계온풍 및 하계결빙과 연관된 지하대류. *대기*, 13(1), 230-233.

장광수, 1989: 충북 제원군 금수산 얼음골 하계 결빙현상에 관한 연구. *공주 사범대학 대학원 석사학위 논문*, 33pp.

정창희, 1992: 밀양 남명리 얼음골 (천연기념물 제 224호)의 조사연구. *천연기념물 및 공동 발자국 화석류 조사보고서* 대한 지질학회, 61-84.

田中博, 1997: 韓國密陽郡의 ICE VALLEY における夏季氷結現象の數値實驗. *地理學評論*, 70A-1, 1-14.

Nohara, D., N. Nura, and H.L. Tanaka 2002: Warm wind hole in winter at Nakayama. *Tenki*, 49, 745-746.

Ohata, T., T. Furukawa and K. Higuchi, 1994a: Glacioclimatological study of perennial ice in the Fuji Ice Cave, Japan. Part 1. Seasonal variation and mechanism of maintenance. *Arctic and Alpine Research*, 26, 227-237.

_____, _____ and K. Otsada, 1994b: Glacioclimatological study of perennial ice in the Fuji Ice Cave, Japan. Part 2. Interannual variation and relation to climate. *Arctic and Alpine Research*, 26, 238-244.

Sasaki, H., 1986: Geographical distribution of windholes in Tohoku district. *Tohoku Chiri*, 38, 34-35 (in Japanese).

_____, M. Yokoi and D. Nohara, 2000: Observational study of Summertime Ice at the Nakayama Wind-Hole in Shimogo, Fukushima. *Sci. Rep., Inst. Geosci., Univ. Tsukuba*, 21, 1-21.

Tanaka, H.L., D. Nohara, and M. Yokoi, 2000: Numerical simulation of wind hole circulation and summertime ice formation at Ice Valley in Korea and Nakayama in Fukushima, Japan. *J. Meteor. Soc. Jap.*, 78, 611-630.

Tanaka, H.L., N. Mura, and D. Nohara 2003: Mechanizm of wind hole at Nakayama. *Geogr. Rev. of Japan*, (submitted).

최종 원고체택 : 2004년 8월 19일