

'한여름에도 얼음' .. 얼음골 비밀 풀렸다

글_ 변희룡 부경대학교 환경대기과학과 교수 hrbyun@pknu.ac.kr



활강 유빙에 의한 결빙: 지하 깊숙한 곳에 두껍게 생기며 여름까지 간다. 2004년 4월 7일 촬영

경남 밀양의 얼음골은 기온이 30도를 웃도는 한여름에도 계곡수와 바람이 차고 얼음까지 남아 있는 유명한 장소다. 이 특이한 현상에 대한 연구는 1968년부터 시작되었다. 이 연구들을 간단히 요약해 보면 단열팽창설, 지하축빙설, 기화열설 등으로 분류된다. 논문으로 소개된 것을 보지는 못했으나 자연대류설, 열재생기설 등도 있었다. 단열팽창 효과에 의해 얼음이 얼려면 돌 틈에서 제트류보다 더 강한 바람이 나와야 하는데 실제로 그렇지 못해, 이 이론은 일찍부터 한계점을 드러냈다. 지하축빙설과 기화열설은 얼음이 녹으면서, 또는 물이 기화하면서 생긴 냉기가 다시 얼음을 얼린다고 본 것인데, 크게 공감을 얻지 못했다. 다시 얼음을 얼릴 수 있는 냉기가 있다면 차라리 얼음이 녹지 않았을 것이며, 얼음을 얼릴 정도로 자연상태에서 물이 강하게 증발하는 경우는 상상하기 어렵기 때문이다. 더구나 이 이론들은 열역학 제2법칙에 위배된다.

겨울에 지하에 저장된 냉기가 여름까지 흘러나온다는 자연대류설은 얼음골 암석의 열용량에서, 특수한 돌이 열을 한쪽으로만 흐르게 한다는 열재생기설은 아직까지 이런 물질이 실제로 이용된 적이 없다는 점에서 치명적인 문제가 발견된다. 모든 기존 이론들은 냉기가 어떻게 생산되는지에 주로 관심을 기울였고 얼음이 언다는 사실을 중요시하지 않은 듯하다. 그래서 이들 모두 겨울에는 얼음이 없고 봄에 인근 지역에서 얼음이 녹을 때에야 얼음이 언다는 사실 하나를 설명하지 못했다. 그래서 지금까지의 연구축적에도 불구하고 얼음골



의 신비의 비밀은 풀리지 않았다고 간주되어 왔다.

기존 연구들의 공통적인 문제점은 필요한 지점에서 장기관측을 하지 않고 주민의 증언이나 수십 차례의 방문관측에 의존한 점이였다. 관광객이 많은 이 곳에는 관광객들의 손이 닿지 않는 곳에 관측기구를 설치하기가 무척 어렵기 때문이다. 다행히 관측기계의 제작기술 발달에 힘입어 본 연구팀은 마이크로 센서 40여 개를 얼음골 주요지점에 배치할 수 있었다.

지하에 유입된 공기 열 빼앗긴 후 냉혈 형성

어느 눈 내린 겨울날, 눈이 쌓이지 않으면서 이끼와 고사리류 식물이 살아있는 지역을 발견하였다. 냉혈에서 1.2km 떨어진 400m 고지대였다. 오래 전부터 이 지역 주민들 사이에 확인이 안 된 소문으로 전해져 온 바로 그 온혈이었다. 어떤 기록에는 냉혈이 겨울에 온혈이 된다고도 하였고, 또 어떤 기록에는 소문일 뿐 발견되지 않는다고도 한 바로 그 온혈이었다. 그래서 그 지역과 인근에 온습도 자동관측을 시작하였다.

온혈에서는 9월 8일부터 다음해 4월 9일까지 바로 인근의 외부 공기보다 따뜻한 기온을 나타낸다. 이 기

간 중 온혈의 기온은 거의 일정한 온도, 즉 9월 8일 19℃에서 4월 9일의 13℃까지 점진적으로 하강하는 패턴을 보였다. 그러나 간헐적으로 기온이 하강한 경우가 있는데 외부기온이 상승할 때였다. 외부기온이 영상인 상태에서 상승하면 온혈의 기온은 큰 폭으로 하강하였다. 외부기온이 영하인 상태에서는 외기가 상승해도 온혈기온의 하강폭은 아주 작았다. 이 기간 외에는 온혈기온의 등락은 인근지역과 항상 등락을 함께 하였다. 즉 온혈은 가을에서 봄까지만 작용하는 것이다.

온혈이 외기보다 더 온난한 기간에 온혈에서 나오는 공기는 거의 항상 상대습도 100%를 유지하였다. 온혈의 일정한 간격으로 감온하다가 최저기온이 4월 9일 경에 나타났다. 이는 밀양지역의 1m 지하의 기온은 2월에 최저인 점과 많이 다르다. 즉 온혈기온과 지열과의 연관성이 크지 않음을 증명한다. 얼음골 하부에서 나오는 물의 온도가 영상 2℃인 겨울에도 온혈에서는 13℃ 이상을 보인다. 지하수온이 지중온도를 대변한다는 상식적 판단을 인정하고 보면, 온혈의 온도가 지중 온도 또는 지열보다 훨씬 높다는 사실을 알 수 있다.

냉혈에 연관된 관측과 분석은 아직 진행중이나 지금

겨울비에 의한 냉혈 결빙; 냉혈 입구에 국한되어 나타나며 2~3일 이상 지속되다가 말라 버린다. 2004년 2월 24일 촬영.



강설에 의한
냉혈 결빙:
비가 왔을 때
보다 많이 얼
어 있으나 지
표에 노출되
어 있어 일주
일 정도 지속
되다가 말라
버린다.
2003년 3월
9일 촬영

까지 알려진 사항만 보면, 냉혈의 기온은 반드시 외기의 기온이 급강하하는 겨울에만 하강한다. 그래서 하강일은 소위 시베리아로부터 한파가 닥치는 날이다. 영상 또는 영도 주변에서 하강한 기온은 약 7일 정도 지나면 원상회복된다. 이는 지하에 저장될 수 있는 냉기의 양이 7일 정도밖에 되지 않음을 의미한다. 그러나 영하의 냉기가 지하로 유입되면 얼음을 얼려 저장되므로 간단하게 원상회복되지 않고 오래간다.

하늘 향해 열린 지표 돌너털의 복사냉각이 아무리 심해도 냉혈 안의 기온 이하로 내려가는 경우는 사철 내내 발견되지 않는다. 즉, 냉기의 근원은 복사냉각과는 무관하다는 말이다. 냉혈에서 나오는 공기도 상대습도는 거의 항상 100%여서 지하에서 오래 침잠되었던 공기임을 증명한다. 냉혈의 기온은 관측 지점에 따라 현격한 차이를 보이거나 7월말까지 0℃에서 0.5℃ 사이를 유지한다. 즉, 내부 얼음이 다 녹을 때까지 기온이 상승하지 않는 것이다. 그러나 한번 영상이 되면 다시는 영하로 내려가지 않는다. 따라서 기온이 영상이 되었다가 다시 하강하여 얼음을 다시 얼리는 경우는 없다.

이상에서 얼음골내의 대류를 정리해 보면, 지하공기보다 무거운 냉기가 유입되면 이 냉기는 수시로 계곡내 돌 틈으로 들어간다. 그러나 따뜻한 공기는 들어오지 못한다. 유입된 공기는 지하에서 물을 증발시킨다. 증발된 수증기는 상승하고 열을 뺏긴 하부에는 냉기만 남는다. 상승하는 수증기는 응결, 증발을 반복하며 열

에너지를 상부로 운반하여 온혈을 형성하고, 아래층으로는 냉기가 쌓여 냉혈을 형성한다. 즉, 열 분리 현상이 물의 작용에 의해 발생하는 것이다.

'데사이트 회류응회암' 이 지하에 대류순환계 만들어

이 열 분리 현상으로도 영하의 냉기는 생산되기 어렵다. 단지 이미 저장된 영하의 냉기가 오래 유지하도록 보관하는 역할을 한다. 이 열 분리작용은 사철 내내 냉기를 냉혈로 쏟아 붓는다. 그러나 온혈로는 9월부터 4월 초까지 즉 추운 계절에만, 온기를 올려 보낸다. 지하공기와 외부공기와의 밀도차로 인해 추운 계절에만 지하공기가 부력을 받기 때문이다. 열 분리를 일으키는 공기가 지하로 유입되는 입구를 찾기 위해 몇 가지 실험을 전개하였지만 아직 성공하지 못했다.

이 열 분리 현상이 이곳에서 발생하는 이유로 몇 가지가 지목된다. 이 지역에 분포하는 비열과 열전도율이 극히 작은 특유한 암석인 '데사이트 회류응회암' 이 한 원인이다. 이 암석이 절리작용에 의해 입자류(큰 알맹이가 굴러 떨어짐)로 흘러 먼저 지하에 큰 동공을 만든 후, 다시 쇄설류(작은 알맹이들이 홍수 등에 밀려 내려옴)가 흘러 표면을 덮었다. 이로 인해 지하에는 고·저지대간에 외기와 단열된 1개 또는 수개의 대류순환계가 형성되었다. 쇄설류 상부는 식생이 단열의 효과를 추가하였다. 이 순환계가 얼음골 신비의 중심에 있다.

또, 해발 1천m를 넘는 능선이 20km 이상 동서로 이어져있는 재약산 능선이 얼음골 계곡에 남풍이 휘돌아 들어올 여지를 철저히 막는다. 북쪽 방향으로 하늘을 향해 부채꼴로 펼쳐진 얼음골 계곡은 냉기를 저지대 한 곳으로 집중시킨다. 계곡내에 충분한 지하공간으로 사철 충분한 물이 흐르는 북류하천(지하로 흐르는 하천)이 있어 증발, 결빙, 응결 등의 작용을 반복할 수 있다. 이 모든 조건이 구비되어 자연상태에서 열 분리가 일어나고 있는 것이다.

그렇다면 봄철에만 얼음이 어는 이유는 무엇인가. 얼

얼음골에도 겨울 눈비가 없을 리 없으며, 겨울에도 비가 오면 얼음골에는 얼음이 언다. 그러나 이 얼음은 지표의 바위 주변에 조그맣게 형성될 뿐이다. 이 얼음은 바위에 내린 빗방울 중에서 천천히 흘러가는 일부만이 돌 틈으로 지나가다가 돌 틈에서 나오는 냉기로 얼어붙은 것이다. 빨리 떨어지는 빗방울은 얼지 않고 돌 틈으로 스며들어 버렸기 때문이다. 그래서 양도 많지 않은 지표얼음은 외기에 접촉되어 있어 수일내로 말라 버린다. 그래서 대부분의 겨울날에 얼음골에서는 얼음을 볼 수 없다.

얼음골 여름 얼음은 3~4월에 이미 언 것

여름까지 가는 얼음은 3월부터 4월 초순까지 얼음골 상부에 있던 얼음이 녹는 시기에 다시 언 것이다. 즉, 고지대의 얼음(또는 눈)이 녹은 물이 냉혈로 흘러 들어가서 얼어붙은 것이다. 냉혈로 지하에서 물이 흘러 들어가는 시기는 일년 중 이 때 뿐이다. 다른 계절에는 흘러 내려오다가 돌 틈으로 빠져 지하 깊숙이 들어가 버리나, 이 시기에만 수로가 얼어있기 때문에 물이 지하로 스며들지 않는다. 상부의 얼음이 녹으면서 흘러내려 하부에서 다시 어는 방법으로 수로가 형성된다. 얼음 녹은 물은 빗물보다 천천히 흘러내리며, 빗물보다 차서 얼기도 쉽다. 그래서 수로가 형성된다.

이 수로를 따라 흘러온 얼음 녹은 물이 냉혈에 저장된 냉기를 만나 결빙한 것이 여름까지 가는 얼음골 얼음이다. 그래서 3~4월에 이곳에 어는 얼음은 지하 깊숙한 곳에 있고, 바위 틈에서 직경 2~10cm 이상의 얼음 기둥 또는 두께 10cm 이상의 얼음판이 된다. 그리고 이 얼음이 활강하면서 흐른다 하여 활강유빙이라 불린다.

얼음골의 춘계 결빙, 하계 잔빙의 원리는 이렇게 풀린다. 이 원리에 관하여는 각종 관측치, 사진 등 증거 자료가 많이 수집되었다. 그러나 아직도 다른 무수한 신비함이 얼음골에는 있다. 냉혈과 온혈에서 일 최고

및 최저기온이 새벽1시에 집중되어 나타난다. 얼음골 계곡으로 흘러 들어가는 물은 계곡수인데 나오는 물은 오히려 증류수에 가깝다. 얼음골에서도 홍수가 발생하는데 이 때도 수온은 여전히 영상 8도를 웃돌지 않는다. 2m 결을 지나는 다른 계곡수는 20℃를 넘을 때이니 이 냉기의 근원은 여전히 신비함으로 남았다. 얼어 어는 지역이 해마다 다르고 얼음의 크기나 모양도 해마다 다르다. 거꾸로 서있는 고드름이 유난히 많으며 특히 구슬모양을 한 고드름이 한꺼번에 다량이 생기기도



하는 등 아직 풀지 못한 수수께끼가 많다.

열 분리 현상이 발생하는 구체적 과정은 꼭 풀어야 하는 수수께끼이다. 추가관측과 분석이 필요함은 물론이다. 실험을 통해 재현하고, 중요한 열개만 추출하여 다시 인공으로 집약할 수 있을 정도까지 밝혀야 한다. 자연 상태에서 에너지 사용 없이 냉기와 열기를 얻을 수 있는 열쇠가 여기 있을 것이기 때문이다. 하부에서는 증발 촉진, 상부에서의 응결 촉진이 열쇠일 것이다. ⑤D



글쓴이는 서울대학교에서 대기과학과 박사학위를 받았고, 공군 기상연구부장을 지냈다.

강설 후 강수에 의한 결빙: 결빙에 필요한 수자원이 풍부하나 지표에 형성되기 때문에 오래가지 못한다.