

## 솟는 고드름의 형성과정에 관한 관찰, 실험 및 분석

윤마병<sup>1,\*</sup> · 김희수<sup>2</sup> · 손정호<sup>2</sup> · 양종우<sup>2</sup>

<sup>1</sup>대전과학고등학교, 305-338, 대전 유성구 과학로 30

<sup>2</sup>공주대학교 지구과학교육과, 314-701, 충남 공주시 신관동 182

## Observation, Experiment, and Analysis of the Ice Spikes Formation

Ma-Byong Yoon<sup>1,\*</sup>, Hee-Soo Kim<sup>2</sup>, Jeong-Ho Son<sup>2</sup>, and Jeong-Woo Yang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Daejeon Science High School, Daejeon 305-338, Korea

<sup>2</sup>Department of Earth Science Education, Kongju National University, Chungnam 314-701, Korea

**Abstract:** In this study, from January 2006 to February 2009, we observed 107 ice spikes formed in a natural state, and analyzed their environment. We developed an experimental device to reproduce ice spikes in laboratory and successfully made 531 ice spikes. We analyzed the process of the formation and the principle of how those ice spikes grow through videotaped data of the formation in the experiment. In the natural world, when the surface of water and the lower part of a vessel begin to freeze, a vent (breathing hole) develops at the surface where an ice is not frozen; this vent serves as the seed of an ice spike. It is assumed that the volume expansion of ice in the vessel which occurs when water freezes makes the supercooled water go upward through the vent and becomes an ice bar called an ice spike. In the laboratory, however, when distilled water is poured into an ice tray cube and kept in the experimental device for about one and a half hours at a temperature of  $-12$ - $-13^{\circ}\text{C}$ , a thin layer of ice then begins to develop on the surface of the water, the vent is formed, and ice spikes form for about 10-30 minutes. These spikes stop growing when the end becomes clogged. Ice spikes can be described as falling into seven categories of shape, with the apex type topping the list followed by the slant type in the natural state and the vertical type predominating in the laboratory.

**Keywords:** ice spike, vent, volume expansion of ice, supercooled water

**요약:** 본 연구에서는 2006년 1월부터 2009년 2월까지 자연 상태에서 만들어진 솟는 고드름( $n=107$ )을 관측, 분석하여 실험실에서 솟는 고드름을 재현할 수 있는 실험 장치를 개발했다. 이 장치를 이용하여 동영상 관측과 실험(531개의 솟는 고드름 생성)을 통해 그 생성과 성장 원리를 연구했다. 용기의 아래 부분이 위쪽 보다 더 차가운 상태에서 용기 바닥과 물 표면에서부터 얼음이 얼기 시작하는데, 표면에서 얼음이 얼지 않는 부분을 숨구멍이라고 하며 이곳으로부터 솟는 고드름이 만들어지기 시작한다. 솟는 고드름이 만들어지기 시작한 후 계속 성장하기 위해서는 용기 하부의 물이 얼음으로 변할 때의 부피 팽창 효과와 숨구멍을 통해 올라오는 과냉각수의 빠른 빙결 효과 등이 관련된다. 실험 장치에서 아이스 트레이 큐브에 증류수를 넣고,  $-12$ - $-13^{\circ}\text{C}$ 의 온도를 약 1시간 30분 정도 유지시키면 수면에 살얼음과 숨구멍이 생기기 시작한다. 숨구멍으로부터 생기기 시작한 솟는 고드름은 10-30분 동안 성장하고, 끝이 막히면서 성장을 멈춘다. 솟는 고드름의 형태는 7가지로 분류되며 자연 상태에서는 꼭지형과 기운형이 많았고, 실험실에서는 수직형이 가장 많았다.

**주요어:** 솟는 고드름, 숨구멍, 부피 팽창 효과, 과냉각수 효과

\*Corresponding author: mabyong@hanmail.net

Tel: 82-10-3450-6594

Fax: 82-42-863-5488

## 서론

전라북도 마이산의 은수사에서는 용기에 물을 담아 야외에 놓아두면, 물이 얼면서 위쪽으로 자라 오르는 고드름이 나타난다고 알려져 있다. 위로 솟아오르며 커지는 이 고드름을 원불교(1928)에서 처음으로 ‘역 고드름’이라고 소개했고, 불교 신도들이 정성으로 기도할 때 정화수가 얼어서 불체(佛體)화하여 나타나는 신기한 현상이라고 했다. 그러나 최근에는 이를 자연에서 일어나는 과학적인 현상으로 규명하여 ‘솟는 고드름’으로 불렀다(변희룡 외, 2004). 간혹 매스컴에서 거꾸로 솟아 올라온 고드름에 대한 기사가 있는데, 대부분 페티널이나 동굴 등에서 천정으로부터 떨어지는 물에 의해 형성된 석회동굴의 석순과 같은 고드름에 대한 것으로(동아일보, 2009) 본 연구의 대상이 아니다. 본 연구의 솟아오르는 고드름은 위에서 공급되는 물 없이 중력에 반하여 위로 자라 오르는 현상을 말하며 ‘솟는 고드름’이라고 칭한다.

솟는 고드름에 대한 국내외에서의 연구는 매우 드문데, 외국에서 솟는 고드름에 대한 최초의 보고는 Dorsey(1921)가 특별한 명칭 없이(Peculiar ice) 위로 자라 올라가는 특이한 고드름에 대한 것이었다. Bally(1935)는 급격히 자라는 침상체의 형성 원인을 제기 하였으며, Dorsey(1938)는 물이 천천히 얼 때, 얼음 표면에서 물이 위로 솟아 올라오며 튜브 모양으로 자란다고 보고하였다. Blanchard(1951)는 Bally(1935)와 Dorsey(1938)가 제기한 살얼음 위에 형성된 침상체의 얼음이 형성되는 원리를 Bally-Dorsey model로 설명하였다.

솟는 고드름이 ‘Ice spike’라고 불리기 시작한 것은 Perry(1993)의 연구부터이다. Perry(1995)는 기온이  $-6.7^{\circ}\text{C}$ 일 때 솟는 고드름이 가장 잘 형성되고, 그 모양과 크기도 다양하다고 보고했다. 삼각형 형태의 9.5 cm 높이의 솟는 고드름이 발견되기도 했지만, 아직까지 명확한 형성 원리가 알려지지 않고 있다(Abrusci, 1997).

실내의 실험 장치를 통해서 솟는 고드름을 재현하기 위한 시도도 이루어졌는데, Chen(1993)은 물이 얼어갈 때 표면의 가장자리부터 수지상 막(dendritic sheets) 형태로 어는데, 이 과정에서 용기의 중앙 부근에서 삼각형 형태의 얼지 않는 부분이 존재하고, 이곳에서 솟는 고드름이 생겨나서 자란다는 것을 관측했다. 또한 Libbrecht and Lui(2004)도 솟는 고드름

의 최적 형성조건은 기온이  $-7^{\circ}\text{C}$ , 불순물이 포함되지 않은 순수한 물(중류수)과 약간의 기류가 있을 때라고 했으며, 50%의 생성률을 보였다고 했지만, 이를 만드는 실험 장치에 대한 설명은 없다.

솟는 고드름에 대한 국내 연구는 변희룡 외(2004) 연구가 유일한데, 마이산 은수사의 솟는 고드름에 대한 원불교(1928)의 기록과 은수사 주지 혜수의 일기(1979) 등을 조사하였고, 자연 상태에서 솟는 고드름이 형성되는 과정을 관측하여 그 원리를 추론하였다. 그러나 솟는 고드름을 실험실에서 인공적으로 재현하지는 못했다. 솟는 고드름과 비슷한 겨울철의 특이한 기상 현상으로서 경상남도 밀양의 얼음골에서는 겨울에 결빙이 일어나지 않고, 여름에 물이 어는 기이한 현상이 나타나는데, 이러한 현상은 주변의 중규모 대기 순환과 관련하여 설명되고 있다(이순환 외, 2004). 본 연구에서는 2006년 1월부터 2009년 2월까지 자연적으로 발생하는 솟는 고드름을 관측하고 분석하였으며, 솟는 고드름 생성장치를 개발하여 실험실에서 솟는 고드름의 생성 원리와 최적의 생성 조건을 밝혔다.

## 관측 및 분석 방법

### 관측 지역

전라북도 진안군에 위치한 마이산은 금강과 섬진강의 분수령으로서 진안읍 단양리와 마령면 동촌리에 걸쳐 위치한다(Fig. 1). 동쪽에 솟마이봉(667 m)과 서쪽에 암마이봉(673 m)이 쌍을 이루고 있어서 멀리서 보면 말의 귀 모양을 이루고, 지표면은 역암층으로 덮여 있다. 암마이봉 남쪽에 탐사가 위치하고, 그 위쪽으로 은수사가 위치(솟마이봉 아래) 한다. 은수사(진안군 마령면 동촌리 3번지) 본당으로부터 동쪽으로 약 25 m 지점에 취수단이 위치하며, 더 동쪽으로(취수단으로부터 7 m) 오래된 청실배나무가 있는데, 이 지점이 마이산에서 솟는 고드름이 가장 많이 형성되는 것으로 알려진 장소이다. 본 연구에서는 은수사의 취수단과 청실배나무 아래에 용기를 설치하여 솟는 고드름을 수집했다. 또한 연구자가 쉽게 접근할 수 있는 충남 공주시 계룡산과 대전 시내에서 용기를 설치하여 솟는 고드름 생성을 실험하였다.

### 관측 방법 및 자료 수집

2006년 1월 3일, 마이산 은수사를 처음 방문하여 솟는 고드름을 확인하였고, 2006년부터 2009년까지

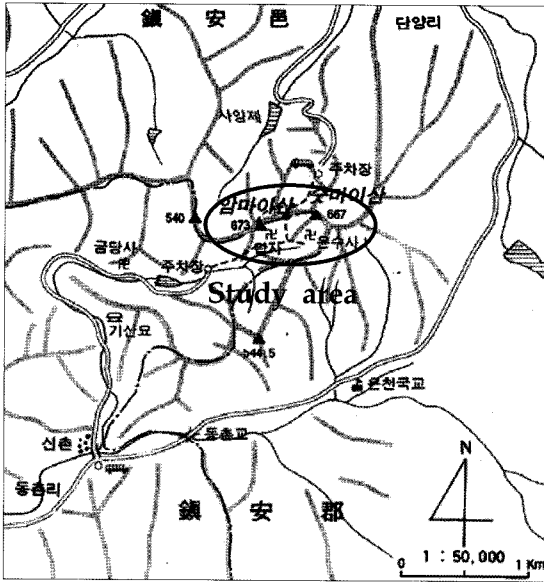


Fig. 1. Map of study area (Mai Mountain).

겨울마다 취수단과 배나무 아래에 용기(스테인레스 재질의 밥그릇(주발), 200 mL 용량)를 설치하여 취수단 약수물을 이용하여 썬는 고드름 생성을 실험하였다. 동시에 계룡산 금수산장 뒷마당과 아파트 베란다(대전시내, 16층)에도 용기를 설치하여 실험하였다. 초저녁에 용기에 물을 담아(6개-12개) 암석 위와 시멘트 구조물 등에 올려놓고, 다음날 아침 썬는 고드름 생성 여부와 최저기온을 관측했다. Fig. 2는 2006년 1월 11일 계룡산 금수산장 뒷마당에서 실험하는 장면과 생성된 썬는 고드름 사진이다. 이날 새벽 최저기온은  $-6.2^{\circ}\text{C}$ 였으며 하늘은 맑았고, 바람은 관측되지 않았다. ①과 ②는 철판, ④는 시멘트, ③, ⑤,

⑥, ⑦은 얼음 위에 같은 용기와 계곡물로 실험했는데, 벽면에서 가깝고 얼음 위에 놓인 ③과 ⑤ 용기에서만 3.4 cm 크기의 썬는 고드름이 생성되었다. 2006년 1월부터 2009년 2월까지 마이산과 계룡산, 아파트 베란다에서 총 48회 실험으로 3 cm 이상의 썬는 고드름 107개를 수집했다(Table 1).

### 실험 장치 개발

Fig. 3은 인공적으로 썬는 고드름을 만들 수 있는 실험 장치이다. 온도를 조절할 수 있는 냉동 장치가 아래쪽에 설치되어 있는 냉동고(유니크(주), FS-80-1)를 개조하여 관측과 촬영이 가능하도록 윗부분을 투명하게 만들고, 개방할 수 있게 했다. 또한, 냉동고 내부와 실험 용기 주변의 온도를 측정하기 위해 디지털 온도계(NAW-912) 4개를 설치했고, PC에 연결된 MBL(Microcomputer-Based Laboratory) 실험 장치(KDS-1031)를 통해 실시간 기온과 수온 변화를 기록하였다. 2층 철망을 설치하여 기류의 수직 흐름과 장치 내부의 상하간 온도 변화가 생길 수 있도록 하였고, 더 많은 실험 용기를 설치할 수 있는 공간을 확보했다. 실험 장치 바닥에는 미세한 상승 기류를 만들어내는 작은 팬을 설치했고, 관측과 촬영 및 실험 장치 상부의 온도 조절을 위해 전구를 달았다. 또한 미세한 흔들림조차도 썬는 고드름 생성에 방해가 되기 때문에 냉동 장치의 On/Off 중에 발생하는 작은 흔들림을 방지하기 위해 진동 차단 장치를 개발하여 장착했다. 이 실험 장치를 이용하여 531개의 썬는 고드름을 재현하였고, 실험에 사용된 아이스 트레이의 큐브(21개)에서 최대 71.4%의 생성물로 썬는 고드름을 만들 수 있게 되었다.

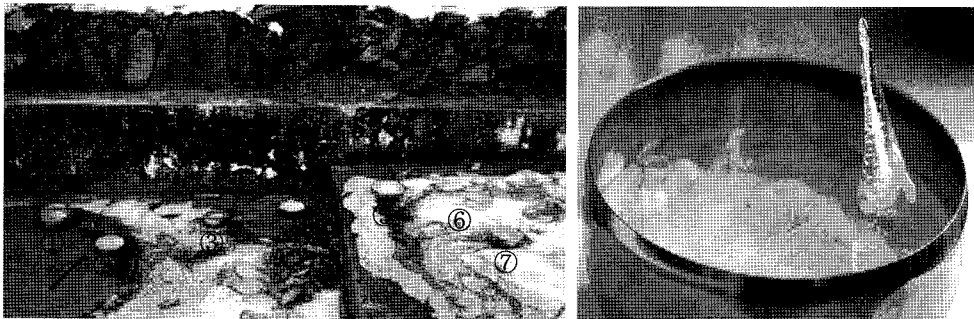
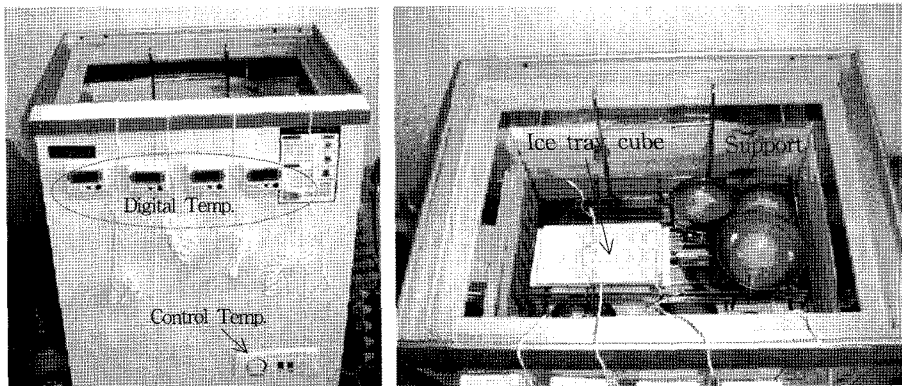


Fig. 2. Experimental device for the natural ice spikes (L) in the Mai Mountain area and the formed ice spike (R, height 3.4 cm).

**Table 1.** Observation of ice spikes in nature and their environment

Site	Date	Number of ice spikes (height≥3 cm)	Minimum Temp. (°C)	Snowfall (cm)	Date	Number of ice spikes (height≥3 cm)	Minimum Temp. (°C)	Snowfall (cm)
Mai Mountain	2006.1.3	3	-6.5		2007.1.11	3	-10.8	
	1.4	2	-8.3		1.12	1	-9.3	trace
	1.5	2	-12.5		1.13	2	-11.5	
	1.9	2	-10.8	trace	1.14	1	-13.8	trace
	1.10	3	-7.5		1.15	1	-10.1	
	2.1	4	-5.9	4.5	2008.1.4	2	-7.8	
	2.2	1	-6.8	trace	1.5	3	-7.5	
	2.3	3	-13.7	trace	1.6	1	-7.9	
Geryong Mountain	2006.1.11	2	-6.2		2009.1.11	2	-10.3	
	1.12	3	-8.1		1.12	3	-10.7	0.2
	2.4	1	-13.8		1.13	3	-10.1	0.1
	2.5	1	-11.1		1.14	2	-10.3	0.5
	2.6	4	-5.1	1	2009.2.15	3	-4.3	
	2.7	2	-3.5	0.4	2.16	3	-7.9	
	2007.1.13	3	-8.6		2.17	1	-10.1	
	1.14	2	-10.1		2.18	3	-8.1	trace
APT	2006.1.6	2	-8.2		1.14	2	-9.4	
	1.7	1	-11.7		1.15	3	-7.2	
	1.8	1	-10.8		2008.1.4	4	-4.6	
	1.10	2	-2.7		1.5	1	-3.9	
	2.2	3	-4.3	0.3	2009.1.11	2	-9.5	
	2.3	1	-12.1	trace	1.12	1	-9.8	0.2
	2007.1.11	3	-5.6		2.17	1	-9.7	0.1
	1.12	2	-4.2		2.18	2	-7.8	0.5
	1.13	2	-7.3	2.19	2	-2.9		



**Fig. 3.** Experimental equipment to manufacture the ice spikes (L) and the interior (R).

### 관측 결과

#### 야외에서 만들어지는 솟는 고드름

야외에서 솟는 고드름이 생성되기 위해서는 반드시 용기 아래 부분의 온도가 용기 상부 보다 더 낮아야 한다(Dorsey, 1938; Lihrecht, 2009; 변희룡 외,

2004). 용기에 물을 담아 암석 등에 올려놓고, 시간이 지나면 점차 기온이 0°C 이하로 내려가면서 수면에서 살얼음이 형성되고, 이때 용기 바닥도 얼게 된다. 용기 바닥이 기온 보다 덜 차가운 경우(용기를 흙 위에 놓았을 경우)에는 수면에서만 살얼음이 형성되고, 용기 바닥에서는 얼음이 얼지 못하는데, 이런 경우에

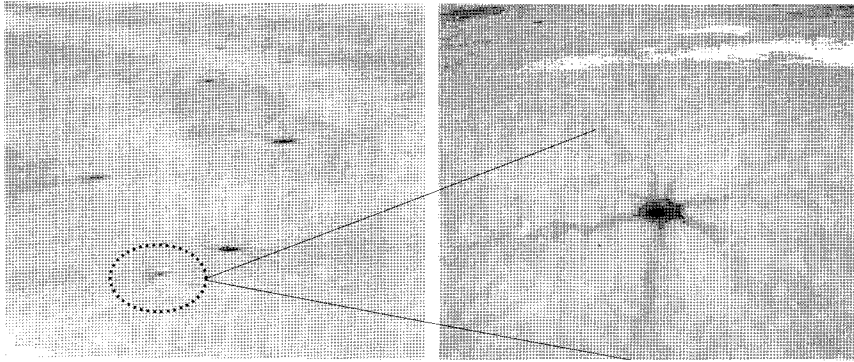


Fig. 4. Vent (diameter 10~11 cm) of ice observed in a reservoir.

는 솟는 고드름이 만들어지지 않는다. 또한 용기의 물이 모두 얼지 못하는 경우에도 솟는 고드름이 형성되지 않았다.

용기의 물이 얼어갈 때 공기와 접하는 빙면에서 특별히 얼지 않거나 덜 언 부분이 생기는데, 이 부분을 ‘숨구멍(vent, breathing hole)’이라고 한다(변희룡 외, 2004). 즉 대기 중의 공기와 직접 맞닿아 있는 수면의 물은 기온이 영하일 경우 얼어붙는데, 어느 동안 이 빙면은 점차 넓어지고, 가장 늦게까지 얼지 않고 남아 있는 좁은 영역이 숨구멍이다. 숨구멍은 물의 순환이 있는 곳이거나 오염물질이 집중된 지역, 중앙 부근 등에서 잘 나타난다. 얼음의 숨구멍은 물이 얼면서 배출되는 기체(기포)가 공기 중으로 빠져 나가는 통로가 되며 얼음이 두꺼워지면서 얼음 안의 수압이 높아져서 숨구멍을 통해 물이 흘러나오기도 한다. 저수지의 숨구멍은 겨울에 많이 볼 수 있는데, 숨구멍을 통해 흘러나온 물은 숨구멍을 중심으로 문어발 같은 형태로 많은 가지를 형성한다(Fig. 4). 솟는 고드름의 성장에 있어서 숨구멍의 모양과 크기는 초기 출발점 방향을 결정하기 때문에 솟는 고드름의 형태와 크기를 결정하는 중요한 요인이다.

솟는 고드름이 성장할 때 많은 기포가 발생하여 위로 올라오는 현상을 관찰할 수 있다. 물이 얼음으로 변할 때 얼음 내부에 포함될 수 있는 기체량이 적어지기 때문에 결빙되는 얼음 밖으로 기체가 배출되고, 그 기체들은 물속에서 기포로 남는다. 저수지에서 얼음 안쪽에 큰 기포가 발견되는 것이 이러한 이유 때문이다. 냉동고에서 물을 빨리 얼리면 기포들이 얼음에 포착되어 뿌연 얼음이 되고, 천천히 얼리면 기포가 공기 중으로 배출되어 맑고 투명한 얼음이 된다. 비행기의 착빙에서도 구름 내부의 기온이

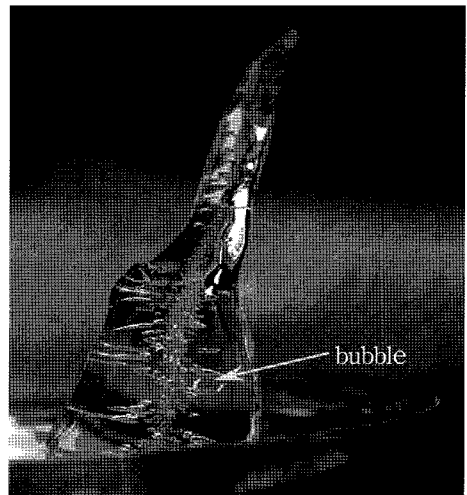


Fig. 5. Air bubbles inside the ice spike (height 8.2 cm).

0°C 부근에서 천천히 결빙하는 경우에는 기포가 모두 빠져 나가서 맑은 착빙(Clear icing), -10°C 이하의 낮은 온도에서 급냉할 경우는 기포가 얼음에 포함되어서 흐린 착빙(Rime icing)이 생긴다(홍성길, 1998). 솟는 고드름이 형성되는 과정에서도 그릇 하부에서 발생한 기포들이 빙면의 숨구멍으로 상승하면서 솟는 고드름과 함께 결빙한다. 야외에서 수집한 솟는 고드름에는 그 양의 차이는 있으나 대부분 기포를 포함하고 있었다(Fig. 5).

솟는 고드름의 크기와 형태는 결빙 초기의 기온 조건과 숨구멍의 형태, 성장 과정에서 미치는 기류 등에 영향을 받는다. 야외에서 만들어진 솟는 고드름(n=107)은 형태에 따라 7가지로 분류할 수 있다(Fig. 6). Table 2는 야외에서 만들어지는 솟는 고드름의 형태와 형성 조건을 정리한 것이다. 자연 상태에서 만

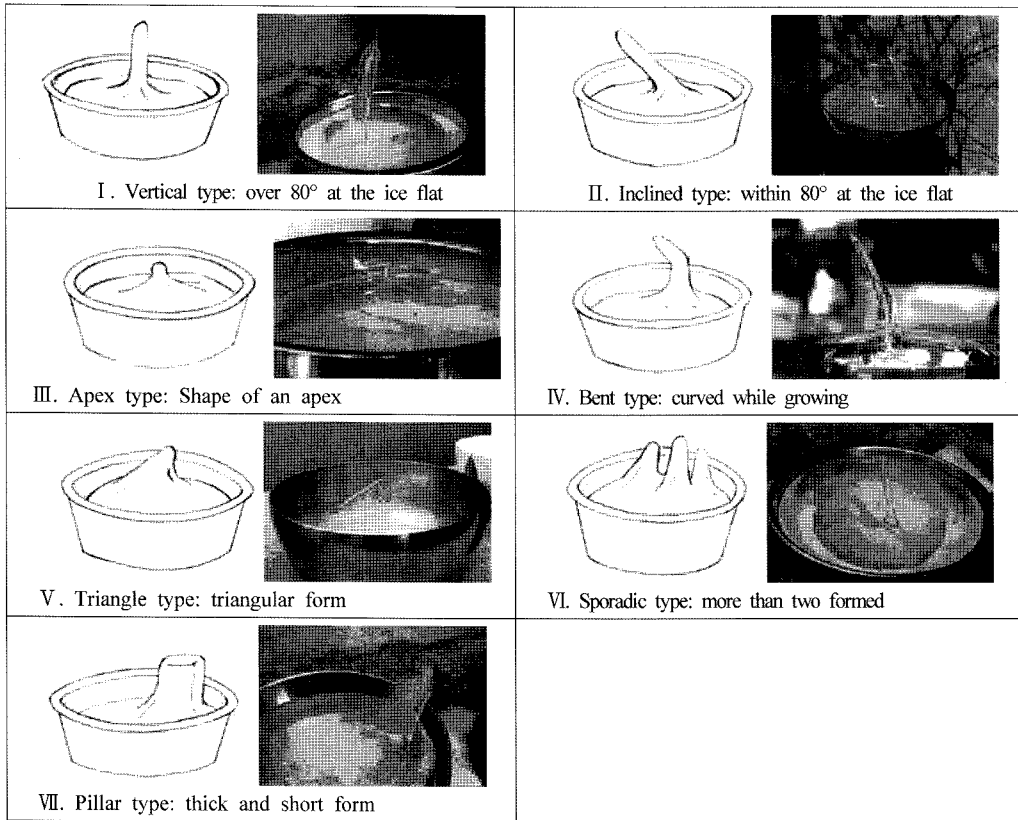


Fig. 6. Classification of ice spikes observed in the natural world.

Table 2. Classification of ice spikes observed in nature

Type	Characteristic Form
I. Vertical	It is formed when supercooled water is provided vertically without air current.
II. Inclined	It is formed when a vent on the ice spike has grown slightly slanted or when an air current keeps on affecting one direction.
III. Apex	When the temperature is near $-0^{\circ}\text{C}$ and the temperature is slowly lowering.
IV. Bent	It is formed when the pressure of supercooled water is weakened or when the air current affects it while growing.
V. Triangle	It is formed over $-3^{\circ}\text{C}$ when the vent on the ice surface is large and when the supercooled water overflows.
VI. Sporadic	It is formed when many vents on the ice surface exist and when the pressure is strong due to active ice formation.
VII. Pillar	When the vent is a large hole and has strong pressure, this makes supercooled water overflow and forms a thick short figure.

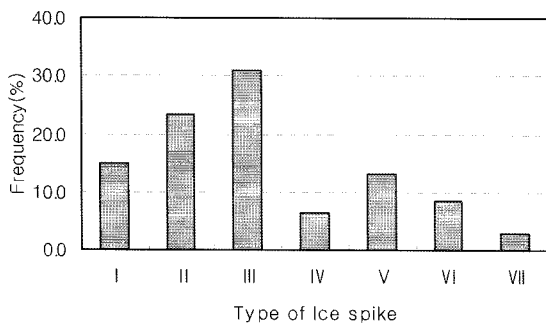
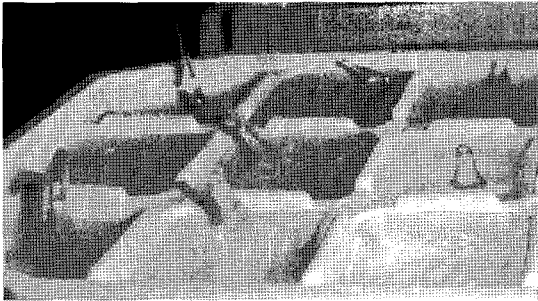


Fig. 7. Frequency of the type of ice spike.

들어진 솟는 고드름은 꼭지형(30.8%)과 기운형(23.4%)이 가장 많았고, 굽은형(6.5%)과 기둥형(2.8%)은 잘 형성되지 않았다(Fig. 7).

#### 실험실에서 재현한 솟는 고드름

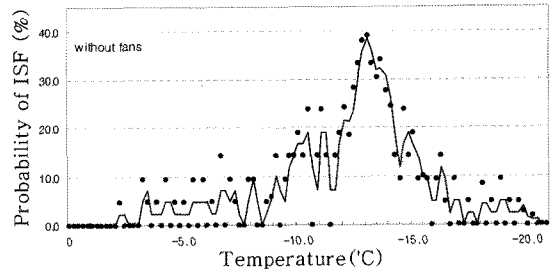
개발한 실험 장치에서 안정된 기류 조건과  $-12$ ~ $-13^{\circ}\text{C}$  온도 유지 등으로 솟는 고드름 재현에 성공하기 시작하여(2006년 5월부터) 21개 큐브를 갖는 아이스 트레이에서 최대 15개(71.4%)의 솟는 고드름이 만들어질 수 있게 되었다(Fig. 8).



**Fig. 8.** Ice spikes generated by experimental equipment. Fifteen ice spikes were generated among 21 cubes. Cube size is 3.3 cm×3.9 cm×3.5 cm.

실험실에서 재현한 솟는 고드름을 분석하여 그 생성 원리를 규명했으며, 솟는 고드름 생성과정을 확인하기 위하여 대전MBC의 협조를 받아 동영상을 촬영(2006. 5. 13)할 수 있었다. 이 동영상은 한국과학창의재단([http://www.scienceall.com/sa\\_ysc/boardList.sca?bbsid=42](http://www.scienceall.com/sa_ysc/boardList.sca?bbsid=42))에서 확인할 수 있다(한국과학창의재단, 2007). 실험 장치의 아이스 트레이 큐브(21개)에 증류수를 넣고 얼리기(실험 장치 내부 온도  $-13^{\circ}\text{C}$  유지) 시작하여 약 1시간 30분 후부터 솟는 고드름이 형성되는 과정을 포착할 수 있었다. 살얼음을 이룬 방면의 약한 곳(숨구멍)에서 물이 솟아 올라 오면서 얼어가는 과정으로 솟는 고드름이 성장하며 가느다란 기둥 형태로 자라났다. 솟는 고드름이 만들어지기 시작하여 성장이 멈출 때 까지는 약 22분 정도 시간이 소요되었다. 솟는 고드름이 성장할 때 내부에서 생기는 관을 따라 물방울(기포를 포함하고 있었음)이 올라오는 모습 등을 관찰할 수 있었다.

솟는 고드름의 형태: 실험 장치를 통해 만들어진 솟는 고드름( $n=531$ )은 야외에서 생성된 경우 보다 수직형(27.1%)이 많았고, 꼭지형(18.3%)은 적게 발생했다. 꼭지형은  $0^{\circ}\text{C}$  부근에서 천천히 얼 때 잘 만들어지는데 실험 장치에서는 낮은 온도( $-13^{\circ}\text{C}$ )에서 솟는 고드름이 잘 만들어지므로 꼭지형이 잘 형성되지 않는다. 또한 솟는 고드름이 성장할 때 기류의 영향을 받아 만들어지는 굽은형(1.3%)은 거의 나타나지 않았다. 솟는 고드름의 끝 모양은 실험실 내부의 기온이 높은 경우( $\geq -10^{\circ}\text{C}$ )에는 굽고 둥근 형태를 이루는데, 그 이하의 낮은 온도( $\leq -10^{\circ}\text{C}$ )에서는 얇고 뾰족한 모양을 형성했다.



**Fig. 9.** Probability of ice spike formation along the temperature variation without fans. Line denotes a moving average trend.

솟는 고드름 생성의 최적 온도: 실험 장치 내부가 안정된 대기 상태에서 증류수를 사용하여 솟는 고드름이 가장 잘 만들어지는 최적의 기온을 찾기 위해 아이스 트레이 2개(42큐브)로 2번씩 실험하였다.  $0^{\circ}\text{C}$ 부터  $-25^{\circ}\text{C}$ 까지  $0.2^{\circ}\text{C}$  간격으로 실험장치 내부의 온도를 유지하면서 최적의 솟는 고드름 생성 온도를 알아보았다.  $-2^{\circ}\text{C}$  이상에서는 실험 용기의 물이 어는데 시간이 많이 걸리고, 윗부분이 약간 부풀어 오르는 정도로서 솟는 고드름이 만들어지지 않았다.  $-2$ - $-5^{\circ}\text{C}$ 에서는 생성률 4.5% 정도로 만들어 졌다. 실험장치 내부 온도를  $-12$ - $-13^{\circ}\text{C}$ 로 유지했을 때, 솟는 고드름이 가장 잘 생성되어 42개 큐브 중 평균 13개 정도에서 만들어졌고(평균생성률 30.3%,  $-13^{\circ}\text{C}$ 에서 생성률 39%), 하나의 큐브에서 2개가 형성되는 경우도 있었다.  $-20^{\circ}\text{C}$  이하의 낮은 온도에서는 솟는 고드름이 거의 생성되지 않았다(Fig. 9).

야외에서 생성되는 솟는 고드름은 기온이  $0^{\circ}\text{C}$  전후를 반복하고 약간의 기류가 있을 때 잘 만들어지며(변희룡 외, 2004; Libbrecht, 2009; Perry, 2004), 본 연구의 야외 실험에서도 최저기온이  $-3$ - $-5^{\circ}\text{C}$  경우에 가장 잘 만들어졌다. 그러나 실험 장치에서는 야외에서 보다 기온이 훨씬 더 낮아야( $-12$ - $-13^{\circ}\text{C}$ ) 솟는 고드름이 잘 형성되었고,  $-5^{\circ}\text{C}$  이상과  $-20^{\circ}\text{C}$  이하에서는 잘 형성되지 못했다(생성률 4.5% 이하). 그 이유는 실험 장치 내부의 냉기 흐름과 수증기 조건, 하부에서의 냉각 조건 등에서 야외에서의 조건과 다르기 때문으로 추론되지만, 이 부분에 대해서는 추가적인 연구가 더 필요하다. 한편, 같은 온도와 조건에서도 경우에 따라서 많은 솟는 고드름이 만들어지기도 하고, 전혀 생성되지 않기도 했다.

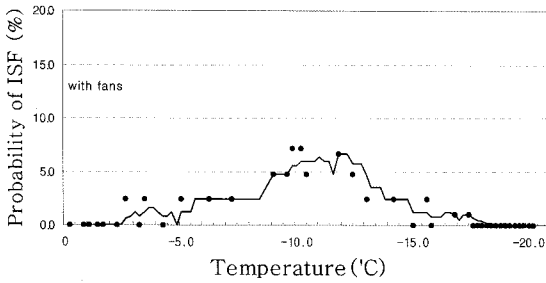


Fig. 10. Same as Fig. 9 but with pans.

솟는 고드름 생성에 미치는 기류의 영향: 마이산 은수와 같이 자연 상태에서는 솟는 고드름이 잘 형성되기 위한 조건 중 증발을 일으키는 바람(기류)과 냉기의 순환이 중요한 요인이 될 수 있다(변희룡 외, 2004). 그래서 실험 장치에서도 미세한 기류를 형성할 수 있는 팬을 설치하고, 기류가 솟는 고드름 생성에 어떤 영향을 미치는지 알아보았다. 그러나 아주 미세한 기류 조차도 실험 장치에서는 솟는 고드름 생성에 영향을 준다(Fig. 10). 실험 장치에서 솟는 고드름을 만들 때에는 기류가 차단되고 안정해야만 더 잘 만들어질 수 있었다. 이것은 실험 장치 하부에서 만들어지는 냉기가 안정한 대기 조건을 형성함으로써 하부로 내려갈수록 차가운 상태를 유지하여 아이스 트레이의 물이 얼어갈 때 밑에서부터 얼 수 있도록 작용하기 때문이다.

용기와 물의 종류에 따른 솟는 고드름의 생성률: 용기의 종류에 따라 솟는 고드름의 생성률을 알아보기 위해  $-13^{\circ}\text{C}$ 에서 아이스 트레이(플라스틱), 사기 그릇, 스테인리스 용기 등으로 실험하였다. 스테인리스 용기와 사기그릇에서는 표면이 약간 부풀어 오르거나, 작은 돌기 정도의 얼음 결정이 생성될 뿐 솟는 고드름이 거의 만들어지지 않았다. 그러나 플라스틱 재질의 아이스 트레이에서 가장 많이 생성되었다. 아이스 트레이의 각 큐브 크기도 솟는 고드름 생성과 관련되는데, 큐브 크기가  $3.3\text{ cm}\times 3.9\text{ cm}\times 3.5\text{ cm}$ 에서 가장 잘 만들어졌다. 본 실험 장치에서는 큐브 크기가 작거나( $1.2\text{ cm}\times 1.0\text{ cm}\times 1.1\text{ cm}$ ), 큰 경우( $3.8\text{ cm}\times 4.8\text{ cm}\times 4.1\text{ cm}$ )에는 거의 만들어지지 않았다. 한편 야외에서는 아이스 트레이 큐브에서 솟는 고드름이 거의 생성되지 않았고, 스테인리스 재질의 용기에서 가장 잘 만들어졌다. 아이스 트레이 큐브의 용량은 용기의 1/20 수준으로 작기 때문에 본 실험 장치와 같이 하

부의 냉기 조건(기류 없음)이 잘 통제된 상태에서는 큐브 아래 부분의 냉각이 잘되어 솟는 고드름이 잘 만들어지지만, 야외에서는 큐브의 상하부와 주변에서 동시에 얼기 때문에 숨구멍 형성과 솟는 고드름 성장이 어려운 것으로 생각된다.

실험 장치 내부 기온을  $-13^{\circ}\text{C}$ 로 유지하여 42개 큐브에 증류수와 수돗물, 0.1, 0.5, 1, 3%의 소금물을 대상으로 실험했다. 솟는 고드름은 순수한 물인 증류수에서 가장 잘 만들어지고, 수돗물에서도 만들어진다. 그러나 0.1%의 소금물 농도에서도 솟는 고드름은 생성되지 못했으며 설탕(물감)과 설탕 등을 첨가한 물에서도 솟는 고드름이 만들어지지 않았다.

## 논 의

### 솟는 고드름의 생성 원리

솟는 고드름이 형성되는 과정을 Blanchard(1951)가 연구한 Bally-Dorsey 모델과 변희룡 외(2004)의 모형에 숨구멍과 기포의 역할과 용기 상하부의 온도 차이 등을 추가하여 정리하면 Fig. 11과 같다. 실험 장치에서 스테인리스 용기 또는 아이스 트레이에 증류수를 3/4 정도 넣고, 용기 밑바닥을  $-13^{\circ}\text{C}$ 로 냉각시키면 1-2시간 정도 지나면서 용기의 밑바닥과 측면부터 얼기 시작한다. 수면에는 살얼음이 막대 형태로 얼기설기(무질서한 격자 모양) 형성되면서 위로부터 아래로 커튼 모양의 얼음을 형성해 나간다(Chen, 1993). 이때 밑바닥과 측면에는 이미 얼음 층이 쌓였으며 밑바닥 중앙 부근에서 기포가 하나 들쭉 형성되어 올라오고 물을 상승시키는 역할을 한다. 용기의 하부와 측면에서는 물이 더욱 얼어가면서 부피 팽창으로 인한 물이 상승 압력을 받아 수면의 격자 커튼 중 가운데 부근에서 빙면의 가장 약한 곳으로 솟아오르면서 숨구멍을 형성한다. 숨구멍으로 물이 계속 솟아오르면서 얼어가는 과정으로 솟는 고드름이 성장한다(Jamieson, 2006; Knight, 1998). 솟는 고드름의 씨앗이라고 할 수 있는 숨구멍이 얼지 않은 부분에서 생기는 것인지, 아니면 먼저 살얼음이 생긴 후에 그 살얼음이 깨지면서 형성되는 것인지는 아직 확실하지 않는데, 이것에 대한 추후 연구가 필요하다. 본 실험 장치에서는 살얼음이 얼어가는 과정에서 삼각형 또는 사각형의 격자 모양을 이루고, 동시에 이 격자로부터 막 형태의 얼음이 아래 방향으로 얼어 가는



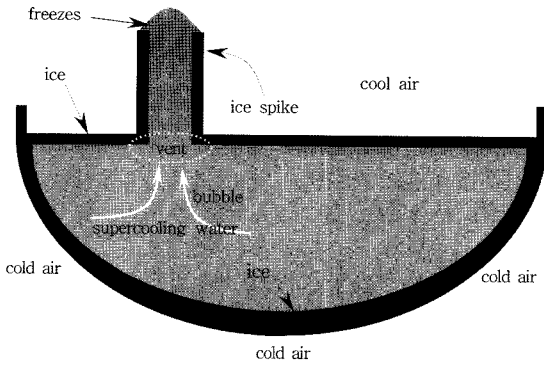


Fig. 11. Model on the formation of ice spikes after Byun et al. (2004).

것을 관측했다. 표면에 이룬 격자 모양의 실얼음 중에서 가장 나중까지 얼지 않는 곳이 숨구멍을 형성하는 것으로 추론되지만, 추가적인 연구가 필요하다. 숨구멍으로 물이 올라오면서 솟는 고드름이 성장하는 시간은 10-30분 정도의 짧은 시간이다. 숨구멍으로 솟아오르는 물은 용기에서 온도가 가장 낮은 과냉각수로서 외기의 낮은 기온과 압력 저하로 쉽게 얼 수 있는 조건을 갖는다. 솟는 고드름 중앙 부근에서는 올라오는 물과 기포들이 관 모양의 통로를 만들고, 여기를 통해 과냉각수가 계속 솟아 올라오면서 얼어 가며 성장한다(Morris, 2009). 최종적으로 솟는 고드름 끝의 물이 얼어 더 이상 물이 올라 갈 수 없을 때 솟는 고드름의 성장이 멈추게 된다.

용기의 측면이나 바닥에 접촉되는 냉기가 용기의 위쪽, 수면에 접촉하는 공기보다 더 차가운 것이 솟는 고드름 성장에 유리하다(Libbrecht and Lui, 2004; Morris, 2009; Perry, 1993). 용기의 측면이나 바닥의 냉각 속도가 느리면 용기 내부의 부피 팽창 효과가 작게 되고, 숨구멍으로 물이 솟아 올라오기 전에 얼어붙어 숨구멍을 막아 버린다. 이런 경우에는 위가 불룩한 형태로 얼게 된다. 또한 용기 상부의 얼음 표면의 냉각에 의한 부피 팽창 효과만으로는 솟는 고드름의 성장을 유지하기가 어렵다. 호수에서 솟는 고드름이 생기지 않는 것이 이러한 이유 때문이다.

### 솟는 고드름의 성장

숨구멍이 형성되고 난 이후, 솟는 고드름이 계속 성장하기 위해서는 솟아오르는 물이 얼어서 고드름을 형성하고 또 숨구멍 막을 정도로 얼지 않는 적당한 기온 조건이 필요하며 숨구멍으로 나오는 물이 용기 내에서

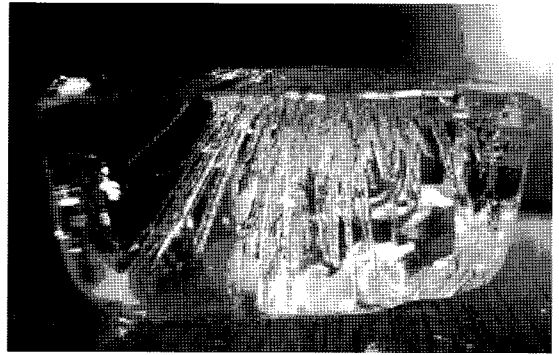


Fig. 12. Ice without a spike, that contains many bubbles.

최저 온도를 이루는 현상 등이 작용해야 한다.

물속에 녹아 있을 수 있는 용존 기체량은 수온이 낮을수록 많아져서 0°C인 경우에 용존 기체량이 가장 많다. 물이 얼음으로 변하면 물속에 있던 기체가 배출되어 기포를 형성한다. 보통 0°C 물 1L에는 69 mL 정도의 기체가 용해되어 있다(설동일, 2006). 그러므로 물이 얼음으로 천천히 변할 때 6.9% 정도의 기체가 얼음 밖으로 빠져 나온다. 솟는 고드름이 만들어진 얼음에서는 물이 얼면서 생긴 기포가 숨구멍을 통해 빠져 나와서 솟는 고드름 아래의 얼음에는 기포가 존재하지 않는다(Fig. 5). 그러나 솟는 고드름이 생성되지 못한 경우에는 기포가 빠져 나가지 못하고 그대로 얼어서 얼음 내부에는 다량의 기포가 포함되어 있다(Fig. 12).

숨구멍을 통해 솟아올라 오는 물은 그 용기 내에서 항상 최저밀도와 최저수온의 과냉각수(-0.0°C 이하)이다. 이보다 온도가 높은 4°C 정도의 물은 더 무거우므로 아래쪽에 위치한다. 이러한 물의 특성으로 숨구멍을 통해 나오는 물은 용기 내에서 수온이 가장 낮은 과냉각수를 이루며, 솟는 고드름을 통해 밖으로 배출되면 쉽게 결빙될 수 있는 조건을 갖고 있어서 솟는 고드름의 성장을 돕는 역할을 한다.

## 결론 및 제언

지금까지 신비하고 기이한 현상으로부터 알려져 왔던 마이산 은수사의 솟는 고드름을 야외에서 실험하여 재현하고 그 원리를 적용, 실험실에서 만들 수 있는 실험 장치를 개발하여 연구했다. 솟는 고드름의 형태는 자연 상태에서 꼭지형(30.8%)과 기운형(23.4%)이 많았고, 실험 장치에서는 수직형(27.1%)이 많이 형성

되었다. 실험 장치를 이용하여 솟는 고드름의 생성 조건을 실험한 결과, 첫째, 기류가 차단된 안정한 상태에서 솟는 고드름 생성의 최적 온도는  $-12\sim -13^{\circ}\text{C}$  이다. 둘째, 솟는 고드름이 생성되기 위해서는 야외에서와 달리 실험 장치에서는 대기 상태가 안정되어야 하며 미세한 흔들림조차도 솟는 고드름 생성에 영향을 준다. 셋째, 플라스틱 재질의 용기(아이스 트레이)에서 솟는 고드름이 가장 잘 만들어지며 최적의 아이스 트레이의 큐브 크기는  $3.3\text{ cm}\times 3.9\text{ cm}\times 3.5\text{ cm}$  이다. 넷째, 솟는 고드름이 생성될 수 있는 물은 증류수에서 가장 잘 형성되었으며 수돗물에서도 만들어 졌지만, 소금과 색소 등이 포함된 물에서는 만들어지지 않았다.

용기의 상하부간 온도차와 기포의 역할을 통해 생성되는 솟구멍을 강조하여 실험 장치에서 만들어지는 솟는 고드름의 생성과정을 정리했다. 솟는 고드름이 만들어지는 과정에서 솟구멍이 형성된 이후에도 과냉각수가 계속 공급되면서 성장하기 위해서는 첫째, 솟구멍이 형성된 이후에도 용기의 밑 부분이 계속 냉각되어야 한다. 물이 얼음으로 변하면서 늘어나는 부피만큼 용기 내에 압력이 가해져서 과냉각수가 계속 솟구멍으로 솟아 올라오는 힘이 작용해야 한다. 둘째, 물의 특성( $4^{\circ}\text{C}$ 에서 최고 밀도)으로 솟구멍을 통해 솟아오르는 물은 최소밀도를 갖는 물인데, 이 물은 용기 안에서 항상 최저온도를 갖게 됨으로서 결빙이 쉽게 될 수 있는 조건을 이루어 솟는 고드름 성장에 도움을 준다.

솟는 고드름의 씨앗이라고 할 수 있는 솟구멍이 얼지 않은 부분에서 생기는 것인지, 아니면 먼저 살얼음이 생긴 후에 그 살얼음이 깨지면서 형성되는 것인지는 아직 확실하지 않은데, 이것에 대한 추후 연구가 필요하다. 또한 실험 장치에서 같은 조건으로 솟는 고드름을 재현했을 때, 어떤 큐브에서는 잘 만들어 졌지만, 다른 큐브에서는 발생하지 않는 경우가 많은데, 그 원인에 대해서도 좀 더 자세한 연구가 필요하다. 본 연구의 실험 장치로 만들어지는 솟는 고드름 재현 실험은 학생들에게 과학 수업을 위한 프로그램으로 활용될 수 있으며(한국과학창의재단, 2008), 과학체험 관광 상품으로도 활용할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- 동아일보, 2009, 연천엔 땅에서 고드름이 자란다. 사회면 A12(2009년 1월 9일자).
- 변희룡, 서동일, 임병환, 2004, 자연 형성되는 '솟는 고드름'의 관측과 연관된 추론. 한국기상학회지, 40, 204-216.
- 이순환, 황수진, 서광수, 2004, 산악지역 도로건설에 따른 국지 대기 순환의 변화에 관한 연구. 한국지구과학회지, 25, 94-108.
- Abrusci, G., 1997, What conditions determine crystal growth? American Journal of Physics, 65, 941-949.
- Bally, O., 1935, Uber eine eigenartige eiskrystall bildung. Helvetica Chimica Acta, 18, 475-476.
- Blanchard, D.C., 1951, A verification of the bally-dorsey theory of spicule formation on sleet pellets. Journal of Meteorology, 8, 268-276.
- Dorsey, H.G., 1921, Peculiar ice formation. The American Physical Society, 18, 162-164.
- Dorsey, N.E., 1938, Super cooling and freezing of water. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 20, 799-808.
- Jamieson, K., 2006, Stalagmite ice. New Scientist, 2547, 81.
- Knight, C.A., 1998, Response to the previous reference. American Journal of Physics, 66, 1041-1052.
- Perry, H.F., 1993, Ice spikes can you explain them? The Physics Teacher, 31, 264-272.
- Perry, H.F., 1995, The last word on ice spikes. The Physics Teacher, 33, 148-152.
- 한국과학창의재단, 2007, 솟는 고드름 생성과정(UCC 콘테스트 최우수 수상작). [http://www.scienceall.com/sa\\_ysc/boardList.sca?bbsid=42](http://www.scienceall.com/sa_ysc/boardList.sca?bbsid=42)(검색일: 2009. 1. 5.)
- 한국과학창의재단, 2008, 솟는 고드름 생성 실험 프로그램(생활과학교실 프로그램 2). <http://life.kofac.or.kr/lsc/nugget.lc?todo=lscQuickView&NuggetIdx=2110>(검색일: 2009. 1. 5.)
- 홍성길, 1998, 기상분석과 일기예보. 교학연구사, 서울, 438-444 p.
- Chen, M., 1993, Ice spike formation induced by dendritic ice sheets. Undergraduate research report, University of Toronto. [http://www.physics.utoronto.ca/~smorris/edl/icespikes/Chen\\_icespikes\\_report.pdf](http://www.physics.utoronto.ca/~smorris/edl/icespikes/Chen_icespikes_report.pdf)(검색일: 2009. 2. 10.)
- Libbrecht, K.G., 2009, Ice spikes. <http://www.its.caltech.edu/~atomic/snowcrystals/icespikes/icespikes.htm> (검색일: 2009. 2. 10.)
- Morris, S., 2009, Got spikes on your ice cubes? <http://www.physics.utoronto.ca/~smorris/edl/icespikes/icespikes.html> (검색일: 2009. 2. 10.)