

빙정핵의 이해를 통한 눈 예보 활용



■ 발행: 예보국 ■ 문의: 예보기술분석과(내선 1657) ■ 발행일: 2013년 12월 5일(목)

공기 중의 순수한 물(수증기)은 영하의 기온에서도 쉽게 응결되지 않는 특징이 있다. 수증기가 얼음(응결) 입자로 변하기 위해서는 빙정핵(Ice Nuclei)이 필요하다. 이번 호에서는 구름 미세물리과정 중 빙정핵의 특징에 대해 알아보고 눈 예보에 활용할 수 있는 분석 방법을 제시한다.

1. 빙정핵(Ice Nuclei)의 종류와 특징

공기 중에 빙정핵의 수는 기온감소에 따라 증가하는데, 빙정핵의 종류별로 활발하게 성장하는 기온이 있다. -4°C 는 요오드화 은이 빙정핵으로 활발하게 성장하는 기온이고, 점토성분은 -20°C 이하의 낮은 기온에서 활발하게 성장한다. 표 1은 각 빙정핵이 활발하게 성장하는 기온을 요약한 것이다.

표 1. 빙정핵이 활발하게 성장하는 기온(출처: COMET)

silver iodide 요오드화 은	-4°C	Kaolinite 함수규산알미늄	-9°C
Volcanic Ash 화산재	-13°C	Vermiculite 질석	-15°C
Combustible 연소물	-15°C	Montmorillonite 점토성분	-20°C

표 2. 지역별 눈 결정에서 빙정핵의 구성 비율(Pruppacher and Klett, 1997)

Composition of center particle	Hokkaido (Japan)		Honshu (Japan)		Michigan (U.S.A)		Missouri (U.S.A)		Thule (Greenland)		Amundsen-Scott (South Pole)	
	Number	%	Number	%	Number	%	Number	%	Number	%	Number	%
Clay mineral	176	57	46	88	235	87	70	28	302	84	55	59.1
Hygroscopic particle	57	19	0	0	2	1	5	2	2	1	19	20.4
Combustion product	26	8	2	4	6	2	7	3	0	0	-	-
Micro-organism	3	1	0	0	0	0	3	1	0	0	-	-
Unidentified	30	10	4	8	25	9	100	40	39	11	5	5.4
Not observed	15	5	0	0	3	1	65	26	13	4	14	15.1
Total	307	100	52	100	271	100	250	100	356	100	93	100
Reference			Kumai (1961)				Rucklidge (1965)		Kumar and Francis (1962b)		Kumai (1976)	

Pruppacher and Klett (1977)은 토양성분 입자(Clay mineral)가 $-15\sim -4^{\circ}\text{C}$ 의 기온구간에서 활발하게

빙정핵으로서 성장하는 사실을 찾아냈다. 표 2는 눈 결정에서 빙정핵의 구성성분을 조사한 자료로서, 지역마다 빙정핵의 구성성분에 다소 차이가 있다. Kumai (1961)가 연구한 결과에 따르면, 우리나라와 동위도상에 위치한 일본 혼슈지역에서 토양성분 입자가 빙정핵 중 월등히 많은 88%를 차지하였다. 염화나트륨과 같은 흡습성물질(Hygroscopic particle)은 빙정핵에서 나타나지 않았다. 일본 북부에 위치한 홋카이도 섬에서도 토양 성분입자가 가장 많은 부분(57%)을 차지하고, 흡습성 물질은 19% 정도로 조사되었다. 해양의 염분입자는 응결핵에서 중요한 역할을 하지만, 빙정핵으로서의 역할은 그리 크지 않음을 보여주는 결과다.

2. 과냉각수적(supercooled water drop)의 역할

겨울철 강수의 형성과정에서 과냉각수적의 역할이 중요하다. 구름 속에 과냉각수적과 기온과의 관계를 조사한 연구에서, 과냉각수적은 -8°C 기온에 약 60%, -14°C 기온에 약 25%가 존재함을 찾아냈다 (Peppler 1940, Borovikov et al. 1963). 그림 1은 기존 연구결과를 종합하여 대기 중의 기온별 과냉각수적 비를 요약한 것이다.

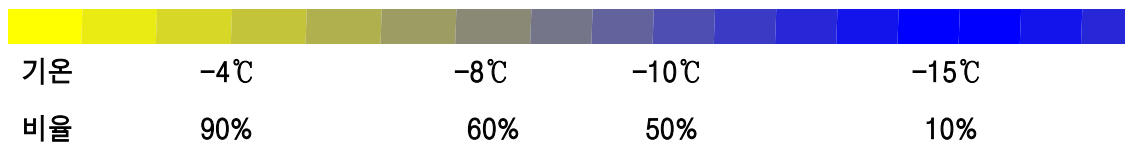
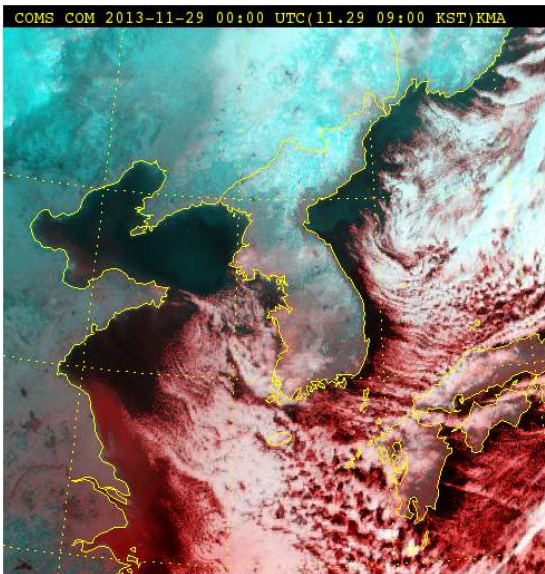


그림 1. 각 기온별 구름 속(포화된 공기 속) 과냉각수적 비

(a) 위성(합성)영상



(b) 단열선도

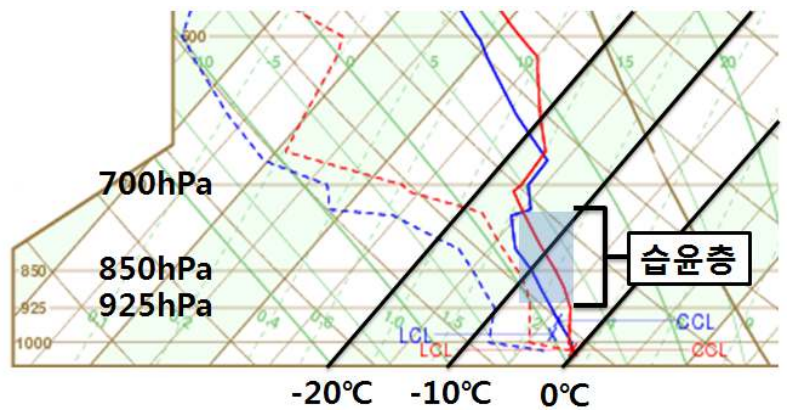


그림 2. 2013년 11월 28일 21시 위성영상(a)과 광주단열선도(b)

-15°C에서 -4°C의 기온은 토양성분 입자가 가장 활발하게 빙정핵으로서 활동하는 기온 구간이다. 이 기온 구간은 과냉각수적 또한 많이 위치한다. 일반적으로 작은 물방울은 쉽게 충돌하고 병합하므로 수증기가 빙정의 표면에 달라붙으면서 빙정은 성장한다. 만약, 상층 대기의 기온이 -15°C~-4°C 구간에서 습하다면(구름이 존재한다면) 빙정입자는 빠르게 성장할 수 있고, 이는 눈이나 비의 형태로 지상에 떨어질 수 있다.

그림 2(a)를 보면, 2013년 11월 29일 한랭한 공기가 우리나라로 확장하여 서해상에 적운열 구름대가 발생하였고, 이 구름대는 광주로 유입되어 29일 00시부터 10시까지 10시간동안 3.1mm의 강수량과 최심 신적설 5.2cm를 기록하였다. 단열선도(b)의 습윤층 기온은 -15°C에서 -4°C(925hPa)의 분포를 보인다. 이 습윤층 기온은 앞서 소개한 빙정핵이 성장하기 가장 좋은 기온으로서, 빙정핵의 가장 많은 부분을 차지하는 토양성분 입자가 빙정핵으로서 활발하게 발달하는 최적의 상태이고, 풍부한 과냉각수적이 포함된 기온 층이다. 따라서, 구름 꼭대기의 높이가 700hPa 보다 낮은 구름층 임에도 불구하고 수상당량비(snow rain ratio)가 최대 17배에 달할 정도로 부피가 큰 눈이 내렸다.

3. 습윤층의 기온구조와 눈의 크기

Politovich (1996)는 조종사 기상보고를 통해 항공기 착빙에 대해서 조사하였는데, 그림 3과 같이 70% 이상의 항공기 착빙이 -10°C 이상의 기온에서 발생하였음을 제시하였다. 또한 -15°C 이하에서는 착빙보고가 거의 없다는 사실도 보여주었다. 과냉각수적은 -15°C 이상에서 약 90%가 존재하므로, -15°C 보다 높은 기온의 습윤층을 통과하는 비행기는 응결핵의 역할을 하면서 기체에 물이 얼어붙어 착빙현상이 발생하기 쉽다. 빙정핵과 과냉각수적이 공존하면 빙정은 빠르게 성장하고 지상에 쉽게 눈이 내릴 수 있고, 강수량에 비해 적설이 많은 것이 특징이다. 그렇지만 습윤층의 최고 기온이 -15°C 보다도 낮을 경우 과냉각수적이 거의 없기 때문에 빙정은 크게 성장하지 못하므로 함박눈과 같이 큰 부피를 가진 눈이 지상에 내리기 어렵다.

만약, 그림 4(a)와 같이 낮은 고도에 얇은 습윤층이 존재하면서 구름내부의 기온이 0°C 보다는 낮지만 -4°C 보다는 높다면, 눈이 만들어지기 쉽지 않다. 왜냐하면, 대부분의 빙정핵을 구성하는 입자가 이 기온 구간에서 빙정핵 역할을 하지 않기 때문에 빙정이 발생하기가 어렵다. 반면, 그림 4(b)와 같이 구름(습윤층)의 상부 기온이 -10°C 부근이라면, 빙정핵이 활발하게 활동하는 기온이면서, 과냉각수적이 분포하므로

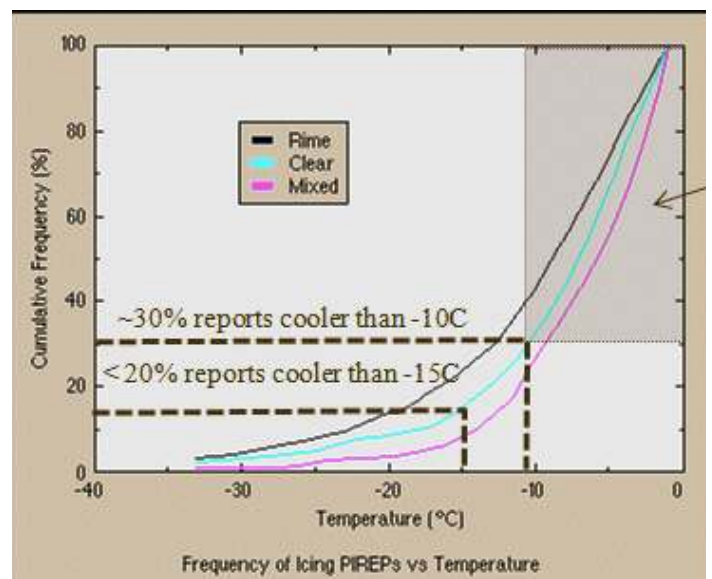


그림 3. 기온(x축)과 착빙발생(y축)

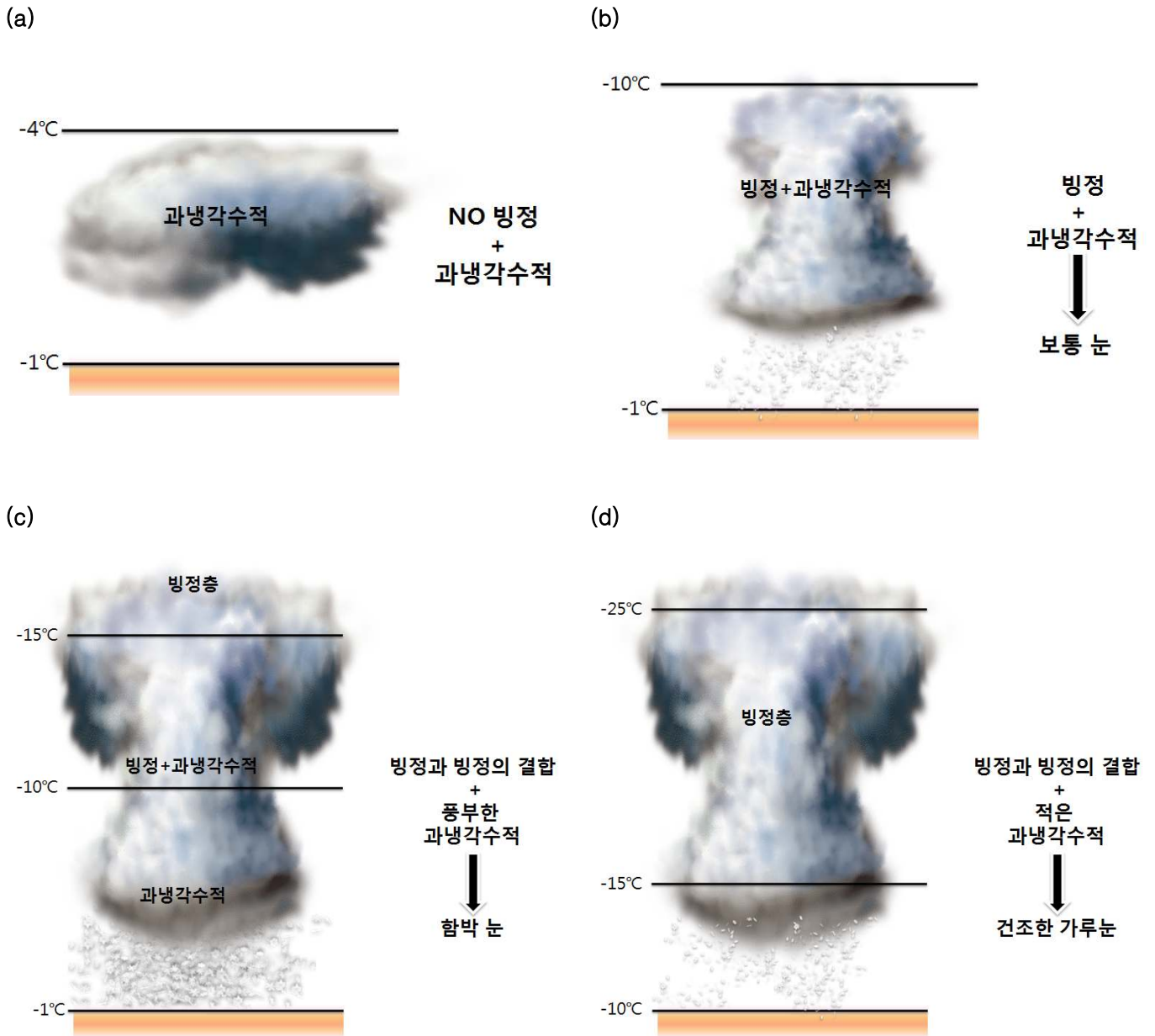


그림 4. 기온 분포별 구름대의 위치에 따른 눈 형태 모식도

빙정은 빠르게 성장하여 눈이 내리기 쉽다. 그림 4(c)와 같이 구름의 상부기온이 -15°C 부근이거나 이보다 낮으면서 구름 하부의 기온이 -10°C 보다 높을 경우에는 구름 상부에서 빙정과 빙정이 결합하면서 나뭇가지처럼 빙정의 입자가 달라붙어 공극률이 큰 눈 입자로 성장하고 구름 하부로 이동하면서 과냉각수적층을 만나 물방울이 빠르게 응결하면서 커지므로 함박눈과 같이 부피가 큰 눈이 지상에 떨어질 수 있다. 그러나 그림 4(d)와 같이 구름층은 높게 발달하였으나 구름하부의 기온이 -15°C 부근일 경우 과냉각수적이 거의 없으므로 함박눈과 같이 부피가 큰 눈이 내리기 어렵다. 우리나라에서 그림 4(d)와 같이 낮은 대기기온에서 발달한 구름대는 거의 나타나지 않는다. 그러므로 우리나라의 대설사례에서는 그림 4(c)와 같은 기온 구조를 보이는 경우가 많다.

그림 5는 각 기온별 빙정핵의 결정체 모양과 빙정의 포화증기압에 대한 과냉각수적의 포화증기압 차이(주황색 실선)를 보여준다. 이런 증기압의 차이는 빙정의 성장에 중요한 원인이다. 빙정은 과냉각수적에 비해 포화증기압이 작기 때문에 포화되지 않은 수증기가 쉽게 빙정에 달라붙어 응결된다. 특히, $-15^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$ 의 기온에서 과냉각수적과 빙정의 포화증기압 차이가 큰데, 이 기온 구간에서 과냉각수적은 약 10%~50% 정도 존재하므로 빙정에 달라붙어 빙정이 성장하기 좋은 기온이다. -10°C 이하에서 눈 결정체는 나뭇가지 형태로 나타나는데, 이 눈 결정체가 서로 달라붙거나, 과냉각수적과 만날 경우 함박눈과 같이 공극률이 큰 눈이 만들어진다. 따라서, 함박눈과 같이 부피가 큰 눈이 내리기 위해서는 $-15^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$ 의 습윤층(구름)이 존재해야 한다.

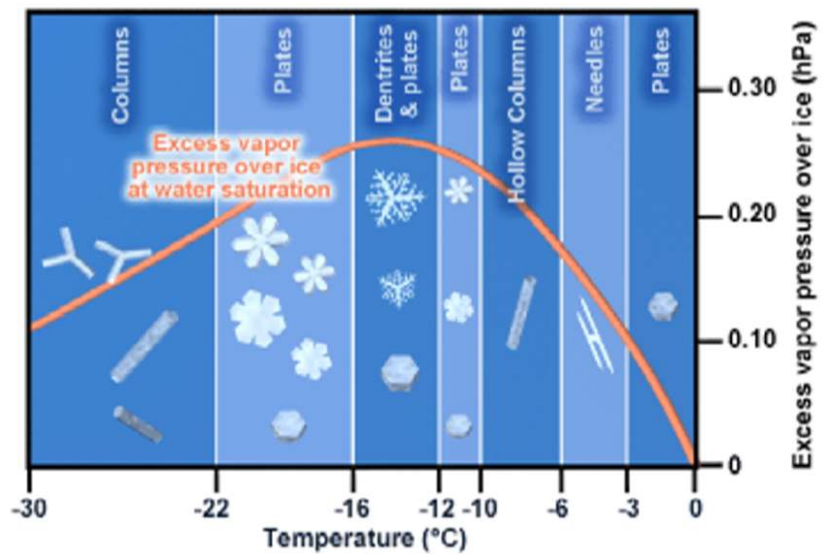


그림 5. 기온별 얼음에 대한 수증기압 초과값(hPa)과 눈 결정체 모양(출처: COMET)

<참고문헌>

미국기상청 자료: 출처 <http://www.crh.noaa.gov/arx/micro/micrope.php>
 Bernstein, B. C., 2000: Regional and local influences on freezing drizzle, freezing rain, and ice pellet events. *Wea. and For.*, 15, pp. 485-508.
 Bourguoin, Pierre. 2000: A Method to Determine Precipitation Types. *Weather and Forecasting*: Vol. 15, No. 5, pp. 583-592.
 Cortinas, J. V., M. E. Baldwin, 1999: A preliminary evaluation of six precipitation type algorithms for use in operational forecasting. *Proceedings, 6th Workshop on Operational Meteorology, Halifax, Nova Scotia*, pp. 207-211. Also online at www.nssl.noaa.gov/~cortinas/preprints/canada6.html.
 Cortinas, John, B. C. Bernstein, C. Robbins, and J. Strapp. 2004: An Analysis of Freezing Rain, Freezing Drizzle, and Ice Pellets across the United States and Canada: 1976-90. *Weather and Forecasting*: Vol. 19, No. 2, pp. 377-390.
 Czys, R. R., R. W. Scott, K. C. Tang, R. W. Przybylinski, and M. E. Sabones, 1996: A physically based, nondimensional parameter for discriminating between locations of freezing rain and sleet. *Wea. Forecasting*, 11, 591-598.
 Kain, J. S., S. M. Goss, and M. E. Baldwin, 2000: The Melting Effect as a Factor in Precipitation-Type Forecasting. *Wea. and For.*, 15, 700-714.
 Lackmann, Gary M., Keeter, Kermit, Lee, Laurence G., Ek, Michael B. 2002: Model Representation of Freezing and Melting Precipitation: Implications for Winter Weather Forecasting. *Weather and Forecasting*: Vol. 17, No. 5, pp. 1016-1033.
 Pepler, W., 1940: *Forschung. u. Erfahrung. Reichsamf. f. Wetterdienst.*, B., No. 1.
 Politovich, M., 1996: Response of a research aircraft to icing and evaluation of severity indices. *Journal of Aircraft*, 33, 291-297.
 Pruppacher, H.R., and J.D. Klett: *Microphysics of Clouds and Precipitation*. D. Reidel Publishing Company, Boston, 714 pp.
 Pruppacher, H.R., and J.D. Klett: *Microphysics of Clouds and Precipitation. Second Revision*. Kluwer Academic Publishers, Norwell MA, 1997, 954 pp.
 Rauber, R.M., L.S. Olthoff, M.K. Ramamurthy, and D. Miller, 2001b: A synoptic weather pattern and sounding-based climatology of freezing precipitation in the United States East of the Rocky Mountains. *Jour. of Appl. Meteor.*, 40, pp.1724-1747.