

겨울철 특이 기상

어는 비(freezing rain), 블랙아이스 외

■ 발행: 예보국 ■ 문의: 예보기술팀(내선 1656/1657) ■ 발행일: 2013년 1월 31일(목)



2012년 12월 14일 김포시에서 25중 자동차 추돌사고, 같은 달 21일에는 전북 군산에서 14중 자동차 추돌사고가 발생하여 많은 인명피해가 있었다. 또한, 2008년에도 12월 8일 충북 보은에서 20중 자동차 추돌사고가 발생한 바 있다. 이런 겨울철 대형 교통사고는 대부분 빙판길에서 발생하였는데, 앞서 나열한 사고들은 모두 비가 내리는 날 발생한 빙판길 사고들이다. 비가 차가운 아스팔트 도로 위에 내리면서 바로 얼어버리는 어는 비(freezing rain)로 인해 도로가 투명하게 얼음으로 덮여(coating) 있으나, 실제 운전자가 보기에는 얼지 않은 도로로 보이는 '블랙아이스(black ice)' 현상에 의한 사고로 추정된다. 이번 호에서는 이런 대형 자동차 사고를 초래하는 어는 비, 블랙아이스 등 겨울철에 특이 기상현상에 대해서 알아본다.

1. 어는 비(freezing rain)

1.1 정의

어는 비는 액체 상태로 내리던 비가 지표면에 닿거나 물체에 부딪혔을 때 유리면과 같이 코팅된 모습으로 얼어붙는 현상을 의미한다. 즉, '어는 비'란 대기 중에서 비로 내리지만 곧 물체에 닿으며 얼어붙을 비라고 표현할 수 있다. 항공기상관측에서 FZ란 수상코드로 표기한다. 어는 비가 내리기 위해서는 지표나 지표부근의 물체표면 온도는 반드시 영하이어야 한다. 또한, 대기 중의 기온이 0℃ 이하라고 하더라도 얼지 않은 과냉각수적이라면 가능하다. 특히, 지표에서 대기 중으로 돌출되어 있는 나뭇가지나 신호등은 바람에 의해 열손실이 지표면보다 크기 때문에 먼저 발생하고 뚜렷하게 눈으로 확인할 수 있다. 어는 비가 빈번하게 발생하는 지역은 지표면에 냉각이 잘 일어나는 곳으로써, 해안에서 멀리 떨어져 있고 주변이 산으로 둘러싸인 분지형 지역이다. 비행 중인 항공기가 과냉각 수적층을 통과할 경우 맑은 착빙(clear icing)이 발생하는 것도 어는 비의 한 종류라고 할 수 있다. 어는 비의 발생원인은 간단하다. 중·상층 대기에서 만들어진 눈이 하층대기로 떨어지면서 영상층에 들어가 녹아서 비로 내리다가 지면에 영하의 물체에 부딪치면서 얼어붙기 때문이다.



그림 1. 나무와 신호등에 내린 어는 비(2007. 1. 17. 미국 텍사스주 샌안토니오 시내, 촬영: 한상은)

1.2 발생 조건

그림 2는 대기기온 구조에 따른 강수형태(눈, 얼음싸라기, 어는 비, 비) 구분이다. 그림 2의 왼쪽 상단에 있는 그래프를 보면, 모든 대기층에서 기온선이 0°C 선보다 왼쪽(영하 구역)에 위치해 있다. 중층대기에서 떨어지는 눈은 지면 도달까지 0°C보다 낮은 영하의 기온을 보이기 때문에 눈으로 내린다. 오른쪽 상단에 있는 그래프를 보면, 0°C 이하의 중층대기에서 떨어지는 눈은 700hPa 부근에 위치한 영상층을 통과하면서 녹아 비로 바뀌나 다시 850hPa 부근을 지나면서 얼어붙어 얼음싸라기(Ice pellets)가 내리게 된다. 그렇지만, 왼쪽 하단에 있는 그래프 같이 지표부근에 영하의 층이 있지만, 그 두께가 크지 않으면, 내리던 비는 얼어붙지 못한 상태로 지면에 떨어진다. 지면의 기온이 영하기 때문에, 지면과 부딪친 비는 곧 얼어붙게 된다. 오른쪽 하단에 있는 그래프처럼 지표부근도 영하가 아닌 영상인 경우 비로 내린다. 따라서, 어는 비가 내리기 위해서는 하층대기에 두꺼운 영상층과 지표부근 대기에 영상층의 두께에 비해 얇은 영하 층이 각각 존재해야 한다.

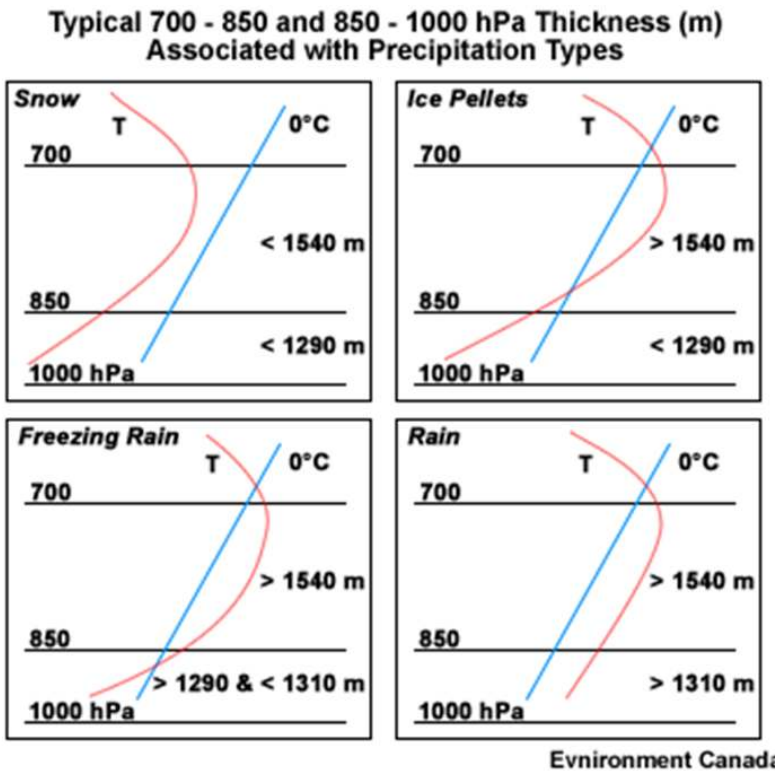


그림 2. 대기기온 구조에 따른 강수형태(눈, 얼음싸라기, 어는 비, 비) 구분으로서, 붉은색은 대기 기온선, 파란색은 0°C 선을 의미한다(자료출처: COMET).

그림 3은 2012년 12월 14일 00UTC에 관측한 우리나라 주요지점의 지상기온 분포와 연직 기온 분포를 보여준다. 14일 00UTC 현재 춘천은 -3.5°C , 대전은 0°C , 거창은 -1.2°C 의 지상기온을 보였다. 당시 내륙에 위치한 전국의 도로에서 크고 작은 빙판길 사고가 발생하였는데, 대부분 지역이 영하의 기온에서 비가 내리고 있었다. 3개 지점별 0°C 를 기준으로한 기온구조는 그림 2에서 소개한 어는 비의 구조와 비슷한 것을 알 수 있다. 925hPa 이상의 고도에서는 강한 남서풍이 불어 기온 상승이 있었지만, 지상 부근은 약한 국지풍이 관측되었다. 따라서, 상대적으로 가벼운 공기인 온난·습윤한 남서류가 지상으로 이동하지 않았기 때문이며, 지상부근은 차가운 공기가 그대로 남아 있어 어는 비가 발생할 수 있었다.

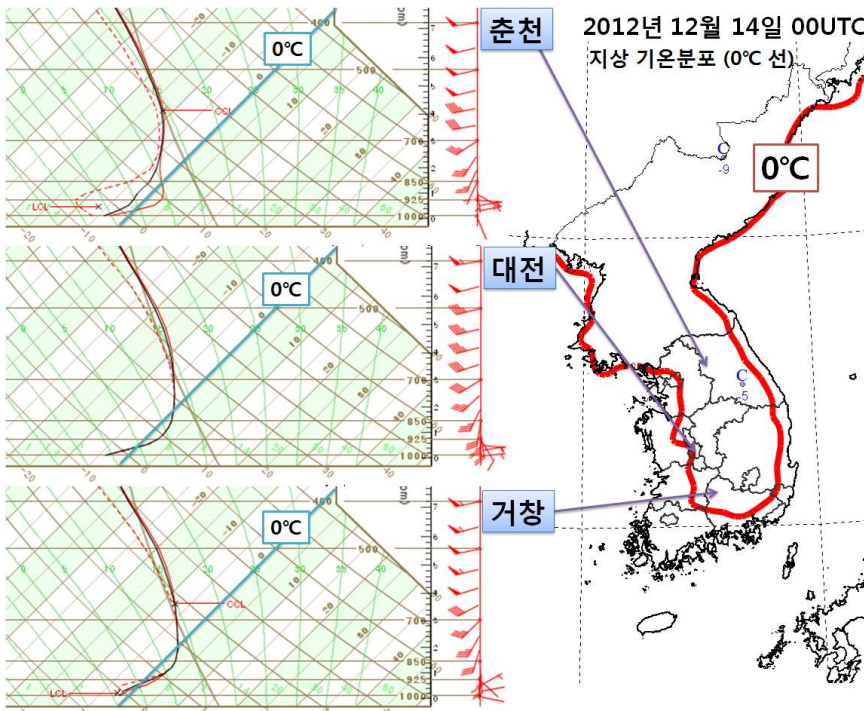


그림 3. KLAPS 분석장을 이용한 2012년 12월 14일 00UTC 비가 내렸던 3개 지점(춘천, 대전, 거창)의 단열선도와 지상 0°C 기온 분포도

1.3 예측

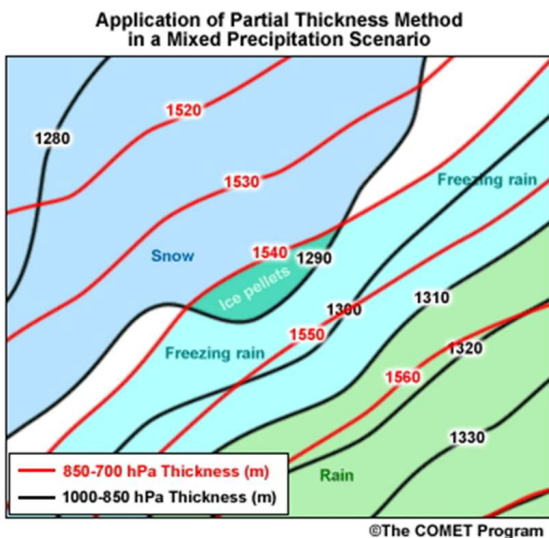


그림 4. 층후를 이용한 강수형태 구분방법(출처: COMET)

어는 비를 예측하기 위해서 여러 연구가 시도되었는데, 미국에서는 지역별로 통계적으로 어는 비 예측자료를 만들어서 활용하고 있으며, 어는 비 예측은 확률예보로 제공되고 있다. 그림 4는 여러 방법 중에서 층후를 이용한 눈과 비, 어는 비, 얼음 싸라기를 예측하는 방법이다. 이 방법은 그림 2와 3에서 보여진 연직 기온구조를 바탕으로 고안된 것으로서, 850-700hPa 층후는 약 1.5~3km 대기층의 기온을, 1000-850hPa 층후는 지상~1.5km 대기층의 기온을 각각 반영한 값이다. 높은 층후값은 온난한 공기층을, 낮은 층후값은 차가운 공기층을 의미하므로, 어는 비와 얼음싸라기의 경우 1.5~3km층과 지상~1.5km의 두 층간 기온이 역전되어야 한다. 따라서, 지면부근인 1000-850hPa 층후는 상대적으로 낮은 값을, 850-700hPa 층후는 높은 값을 보여야 한다.

따라서, 그림 4를 살펴보면, 어는 비가 내리기 위해서는 850-700hPa 층후값은 1540gpm보다 커야하고, 동시에 1000-850hPa 층후값은 1290~1310gpm 범위에 있어야 한다. 만약, 850-700hPa 층후값이 1540gpm보다 크지만 1000-850hPa 층후값이 1290gpm 보다 작을 경우는 얼음 싸라기가 내리는 조건이 된다. 1000-850hPa 층후값이 1290gpm 보다 작다는 것은 영하층의 두께가 두껍다는 것을 의미한다.

어는 비는 지상 온난전선의 북쪽에서 주로 발생하는데, 그 이유는 저기압 중심의 동쪽에 위치한 온난전선대 북쪽은 지면과 인접한 하층에 차가운 공기가 위치하고 따뜻한 기류가 상층에서 연직으로 상승하는 지역이기 때문이다. 그림 5의 (a)는 지상의 전선 저기압에서 어는 비와 얼음싸라기가 내리는 지역과 3차원 기온과 기류 구조를 보여주며, (b)는 온난전선의 연직 구조에서 어는 비가 내리는 지역을 의미한다. 온난전선의 북쪽은 지상에서 동풍의 바람이 불며, 이 바람은 서에서 동으로 이동하는 저기압 진행방향과 역방향이므로 풍속은 일반적으로 기압경도력에서 저기압의 이동속도를 감한 값만큼 줄어든다. 여기에 내륙으로 이동하면, 마찰효과도 크게 작용하기 때문에 내륙의 분지형 지방은 바람이 거의 불지 않는 경우도 있다. 또한, 차가운 공기이므로 지면부근에 위치할 때 가장 안정하므로, 쉽게 상층의 온난공기와 섞이기 힘든 역학적 구조를 보인다. 만약, 온난전선의 북쪽 강수지역이 가장 기온이 내려가고 안정화되는 이른 아침에 통과한다면, 어는 비의 발생가능성은 더욱 높아진다.

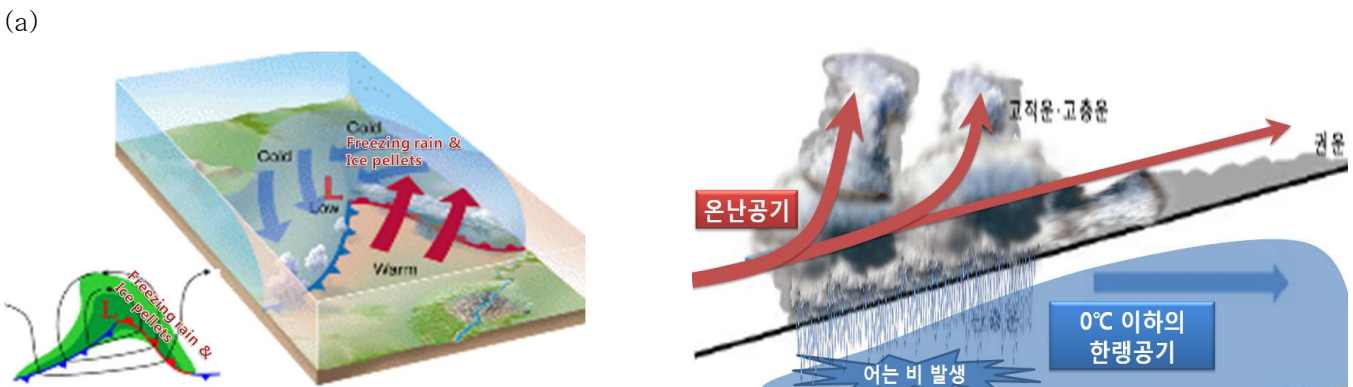


그림 5. (a) 지상전선저기압에서 어는 비, 얼음싸라기가 내리는 지역, (b) 온난전선면의 연직 대기구조

2. 블랙아이스(Black ice)

2.1 정의

블랙아이스란 검정색의 얼음이 아니라, 투명한 얼음이 아스팔트 위를 마치 코팅한 것처럼 뒤덮어 운전자의 눈에 도로에 얼음이 없는 건조한 상태(검정색)로 보이는 현상이다.

비는 영상의 기온에서 내리지만 지상의 기온이 영하권이고 도로의 표면온도가 기온보다 더 낮은 영하 2~3도까지 떨어지면 비는 내리는 순간 바닥에 얼어버린다. 어는 비의 원리는 과냉각현상과 같다. 빗방울이 어는점 이하로 내려가서도 얼지 않는 과냉각 상태를 유지하다 지표에 떨어지면서 순식간에 얼어붙는다. 이는 영하의 기온에서 존재하는 과 포화된 물 입자가 지표라는 응결입자에 부딪치면서 얼어붙는 빙정성장 이론과도 비슷하다.

어는 비가 포장된 도로 위에 내려 블랙아이스가 생기는 경우 대형 자동차 사고의 위험이 높아진다. 항공기의 경우 블랙아이스와 같은 형태로 맑은 착빙에 의해 이착륙을 불가능하게 만들 수 있고, 전선에 얼어붙으면 무게를 지탱하지 못한 채 전선이 절단돼 정전이나 전화 불통 등의 피해를 일으킨다. 또한 표면이 매우 미끄럽고 투명하므로 거리의 보행자들이 낙상에 의한 인적 사고 발생 가능성이 매우 높다. 고속도로나 국도에서 블랙아이스에 의해 발생하는 사고는 인명피해가 동반된 대형 사고이므로 이에 대한 사전 예보와 사고 예방을 위한 절차와 제반시설 확충이 반드시 필요하다. 미국에서는 그림 6과 같은 장비를 도로에 매설하여 도로 온도를 실시간으로 관측하며, 이 자료는 Road Weather Information Systems(RWIS)를 이용해

기온, 습도, 바람, 강수형태, 강수량 등을 실시간으로 생산하여 예보관이나 담당기관에서 상황인지 및 의사결정을 위한 자료로 활용하고 있다.

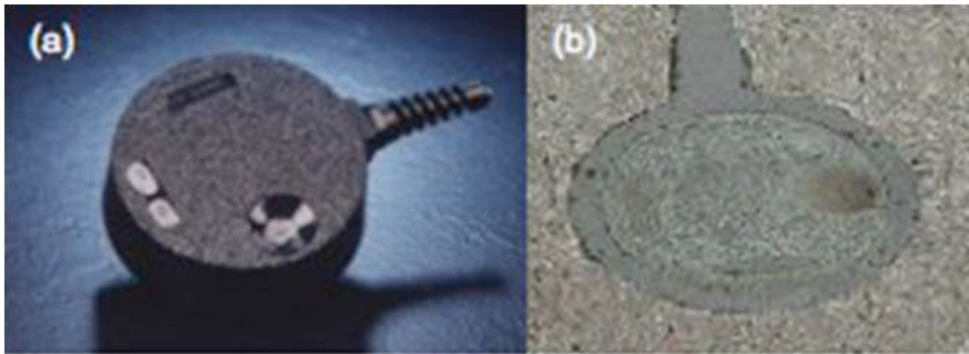


그림 6. (a) 아이스하키 펙(puck) 형태의 포장도로 표면 온도 센서, (b)아스팔트에 매립된 모습(Rathke and McPherson 2007)

2.2 발생조건

대기의 기온이 0°C 부근이라도 도로표면의 온도가 영하라면, 빗방울은 쉽게 달라붙어 얼어버린다. 도로표면의 온도는 대기의 기온보다 이른 아침에는 낮고, 낮에는 높다. 따라서, 어는 비는 보통 새벽과 오전사이에 많이 발생한다. 어는 비는 같은 도로에서도 교각에 많이 발생한다. 이 지역은 지표면에 열손실이 크기 때문인데, 낮에는 일사량이 작아 새벽에 기온이 많이 떨어진다. Rathke and McPherson (2007)는 그림 6과 같은 아스팔트 온도 관측장비를 이용해 평지와 교각이 위치한 다리의 기온을 조사하였다. 그림 7(a)는 미국의 특정 관측지점에서 2005년 1개월간 관측된 도로와 교각의 온도 관계를 보여준다. 교각의 온도가 1~2°C 정도 낮은 분포를 보였다. (b)는 대기기온, 도로온도, 교각온도와의 일 시간별(24시간) 기온분포를 보여준다. 아침 최저기온을 보이는 7~8시에 교각의 온도가 가장 낮고 대기의 기온과 약 2°C의 차이가 남을 알 수 있다. 지상의 대기 기온이 0°C 부근이라도 교각은 어는 비가 내려 블랙아이스에 의한 빙판길이 형성될 수 있음을 의미한다.

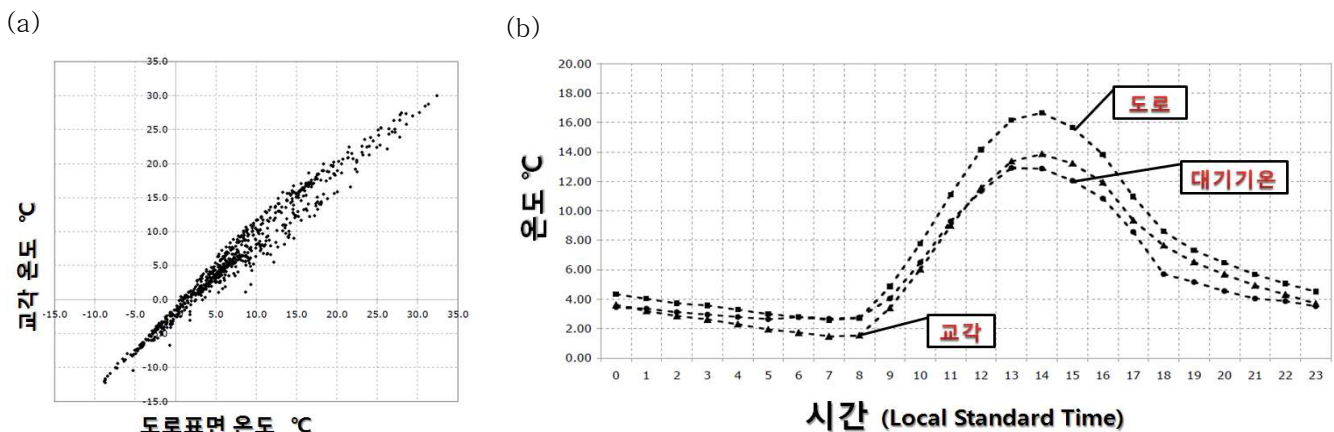


그림 7. (a) 2005년 1월 도로표면과 교각의 온도 분포, (b) 시간별 3지점의 온도 분포

2008년 12월 8일 오전 6~7시에 청원~상주간 고속도로에 29중 추돌사고, 2009년 1월 18일 오전 7시에 청원~상주간 고속도로 및 중부내륙 고속도로에서 5~20중 추돌사고, 2012년 12월 14일 오전 8시에 김포시 고가도로에서 25중 추돌사고, 2012년 12월 21일 오전 8시쯤 구산 27번 국도에서 14중 추돌사고는 모두 어는 비로 추정되는 대형 추돌사고들로서, 겨울철 가장 기온이 낮은 시간대인 오전 6~8시에 교각과 터널부근 및 계곡부근의 도로에서 발생하였다.

3. 얼음 싸라기(Ice pellets)

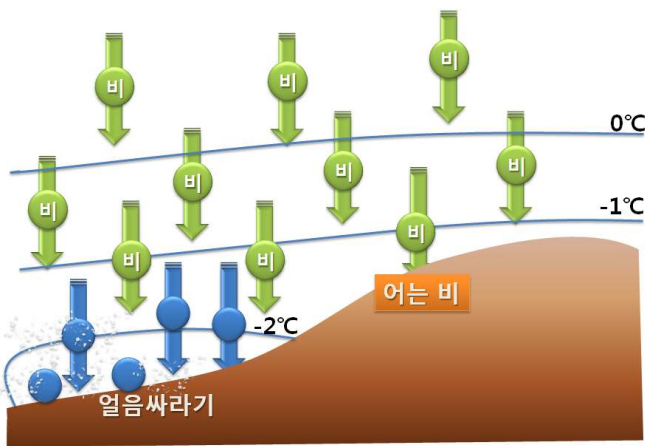


그림 8. 고도에 따른 얼음싸라기와 어는 비 분포

얼음알갱이로서, 지름이 5mm 미만인 것을 ice pellets(얼음싸라기)라고 한다. 얼음싸라기는 sleet(진눈깨비)와 small hail(작은 우박)과는 근본적으로 차이가 있다. 진눈깨비는 눈이 지면 부근에 위치한 영상층으로 내려오면서 일부가 녹아 눈과 비가 같이 내리는 것이고, 작은 우박은 눈입자 주위로 얇은 얼음층이 둘러싸고 있으며, 상승하강 운동을 되풀이 하면서 녹고 어는 과정을 거쳐 지면에 떨어지는 입자를 말한다. 얼음싸라기는 그림 2에 우측 상단의 기온구조를 보이며, 어는 비의 생성조건과 비슷하다. 단지, 얼음싸라기는 지표부근의 영하층이 두꺼워 비로 내리지 않고 얼음으로 내리는 것이다. 그러므로 같은 해발고도에서

어는 비가 내리는 지역의 북쪽은 지면부근의 기온이 더 차기 때문에 얼음싸라기가 관측되기 좋은 조건이 된다. 얼음싸라기의 입자는 지면에 부딪치면서 소리를 내고 튀어 오른다. 도로에서 얼음싸라기가 내릴 경우 육안으로 식별이 가능하며, 소리가 나기 때문에 운전자는 주의를 기울인다. 그렇지만 얼음싸라기가 내리는 지역보다 해발고도가 높은 지역은 어는 비가 내릴 수 있다. 대기의 기온구조가 역전이 되어 있기 때문에 눈이 녹은 비가 미처 얼지 못하고 지면에 부딪치면서 얼어붙기 때문이다. 그림 8과 같이 만약 어느 지방에 얼음싸라기가 관측되었다면, 이보다 높은 고도에서는 어는 비가 내릴 수 있다. 지표에서 하층대기의 기온이 역전되어 있으므로 그림 8과 같은 고도별 강수형태의 차이도 발생할 수 있다. 따라서, 예보관은 관측소에서 얼음싸라기가 관측되면 해발고도가 높은 지역에 어는 비가 내릴 수 있음을 사전에 숙지해야한다.

4. 날린 눈(blowing snow)

미국에서 내리던 눈이나 쌓여있는 눈이 강풍에 의해 마치 지표에서 대기중으로 날아올라가는 현상을 날린 눈(blowing snow)라고 한다. 그 기준은 지표에서 2m 이상 상승하고, 수평 가지거리가 11km 미만으로 축소되는 경우에 사용한다. 항공기상관측에서 BS 코드를 사용한다.

5. 블리자드(blizzard)

영국과 미국 등 일반적인 의미로서 블리자드(blizzard)는 강풍이 동반된 강한 눈 폭풍의 의미로 사용하고 있다. 미국에서는(U.S. National Weather Service 기준) 강풍이 동반되고 내리는 눈이나 blowing snow에 의해 수평시정이 악화되는 현상을 의미한다. 이 때, 풍속은 30kts 이상이며, 눈에 의해서 수평 기시거리가 400m 이하가 되는 경우로 정의한다. 기온은 -7°C 이하이며, severe blizzard는 -12°C 이하일 경우다. 블리자드(blizzard)는 미국에서 기원한 이름이며, 남극에서는 얼음모자를 벗기는 격렬한 가을바람의 의미이며, 프랑스 남동쪽(알프스 산맥)은 차가운 북풍과 동반된 눈의 의미로 사용한다. 러시아에서는 'buran', 시베리아 북부 동토대에서는 'purga'란 용어를 사용한다.

<부록 - 실시간 연직 기온자료 보기>

어는 비, 얼음싸라기, 진눈깨비 등 강수형태를 구분하기 위해서는 고층자료가 반드시 필요하다. 선진예보시스템의 통합기상분석 시스템을 활용하면 1시간 단위로 단열선도를 확인할 수 있다. 이번 개발된 통합기상분석 시스템은 연직 대기구조 분석에 적합한 여러 가지 툴을 제공한다. 이번호의 그림 3에서 제시한 단열선도와 기온분포는 통합기상분석시스템에서 실시간(1시간 단위)으로 분석가능한 KLAPS 자료를 사용한 것이다. 그림 10은 대표지점의 고층 기온분포(단열선도)를 확인하는 절차이다. 대표지점 외에도 임의지점을 선택해도 단열선도 기온분포가 그려진다. 이외에도 여러 기상요소를 연직좌표로 표현할 수 있는 도구들이 있다.

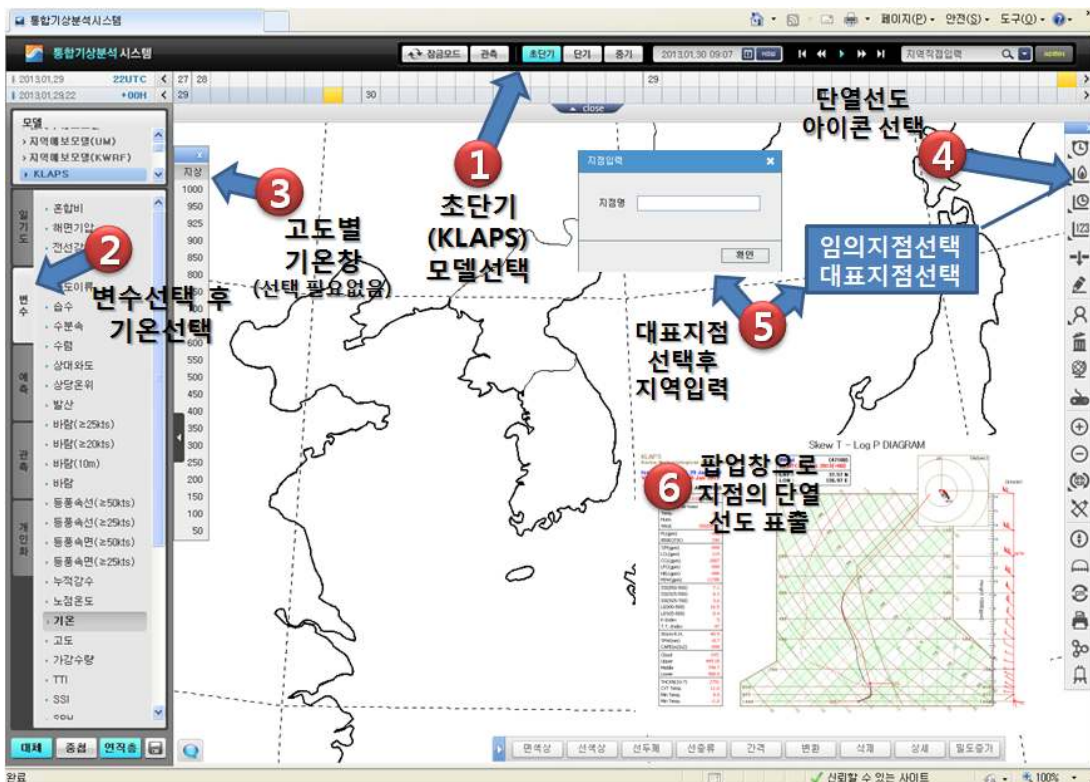


그림 9. 통합기상분석시스템을 활용한 시간, 지점별 단열선도 표출 순서

< 참고문헌 >

- 김광식, 1992: 기상학사전, 향문사.
- 민경덕, 민기홍 역, 2009: 대기환경과학, C. Donald Ahrens 저, 시그마프레스
- Rathke, J. M. and R. A. McPherson, 2007: Modeling road pavement temperatures with skin temperature observations from the oklahoma mesonet. 87th AMS annual meeting, Session 4A.
- C. Donald Ahrens, 2007: Meteorology today.
- Djuric, D., 1994: Weather analysis.
- Frederick K. Lutgens, et. al, 2009: Pearson Education, Inc., pp 311.
- Vasquez, T., 2002: Weather forecasting handbook. weather graphics technologies.