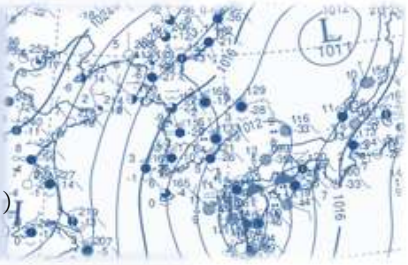
손에 잡히는 예/보/기/술 (제 7호 – 2011년 9월)

기상청 Korea Meteorological Administration

필수 예보요소 활용법과 정의

우박의 분석 및 판단 (Hail Analysis & Forecast)

·발행: 예보국 ·문의: 예보기술팀(내선 1656/1657) ·발행일: 2011년 9월 16일(금)



우박사례의 주요 특성

우박은 지면 가열에 의해 불안정해진 대기에서 발생하는 것 보다 대기 중·상층 고도의 찬 공기의 이류에 의한 기층 불안정으로 인하여 발생하며, 강풍이 동반된 강한 연직바람시어는 활발한 상승·하강운동을 만들어 우박을 성장시킨다(Fedchenko 1992, Billet et. al. 1997, Deese 2002). 따라서, 우박 분석과 예측을 위해서는 하층대기의 높은 기온의 영향이 큰 불안정지수(SSI, KI, LI 등)를 이용하는 것보다 중·상층 대기구조의 이해가 우선되어야 한다.

우리나라에서 발생한 우박의 분석 및 판단을 위해 우선, 최근 10년간(2001~2010년)간 관측된 총 50개의 우박사례를 이용해 3가지 유형으로 구분하였다.

첫째, 한랭전선형은 전선 통과 시 나타나는 수평 및 연직방향의 큰 기온차이와 강한 연직 바람시어로 발생하는 유형으로써, 주로 해안 및 산악지역에서 나타난다(Vivekanandan et al. 1993).

둘째, 중·상층 찬 공기 이류형은 500~300hPa 고도에 찬 공기의 이류로 인해 불안정한 대기가 만들어져 발생하며(Smith and Yau 1987, 1993), 상·하층 대기 간에 습도분포의 차이도 중요하다(Deng et al. 1989, Chen et al. 1990). 우리나라에서는 장마가 시작되기 전 5~6월 내륙과 산악지역에서 주로 많이 관측된다.

셋째, 권계면 접힘형은 매우 찬 공기의 침강으로 대류권계면고도가 500hPa 부근 고도에 위치할 때 발생하는 유형이다. 500hPa 일기도에서 한기핵을 가진 절리저기압(cut-off low) 내부에서 나타나며, 지상에서 500hPa까지 포화된 상태에서 불안정한 대기구조를 보인다(Rasmussen 1985, Shapiro et al. 1987, Fett et al. 1993).

기초탄탄코너 – 우박이란?

우박이란, 눈의 결정 주위에 차가운 물방울이 얼어붙어 떨어지는 얼음덩어리로 투명하거나 불투명한 얼음층이 번갈아 싸고 있다. 일반적으로 우박은 연직으로 바람시어가 강한 조건에서 수적이 강한 상승류를 따라 빙결고도이상으로 상승했다가 다시 하강하는 과정을 반복하면서 성장하게 되고, 그 무게를 이기지 못할 만큼 커지면 지상으로 낙하한다. 일반적으로 상층과 하층의 기온차가 많이 나는 봄과 가을에 주로 발생한다.

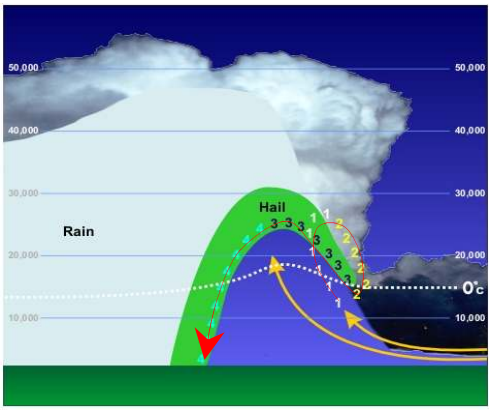


그림 1. 우박생성 구름내부 모식도
(출처 : NOAA 홈페이지)

그림 1은 우박 생성 모식도로써 푸른색 영역은 약한 에코 지역(weak echo region : WER), 흰색 점선은 온도 0도 선이 지나는 빙결고도이며 ①부터 ④까지의 과정을 거치게 된다.

① 우박핵이 상승기류에 의해 상층으로 이동하고, 다른 작은 우박 알갱이와 과냉각 빗방울이 충돌하면서 크기가 커지기 시작한다.

② 때때로, 우박이 주요 상승기류(노란색 화살표)를 벗어나 땅으로 떨어지기도 한다.

③ 상승기류가 매우 강하면, 우박은 다시 구름속으로 들어가 점점 더 성장하게 되고, 그 과정을 몇 번이나 반복한다.

④ 우박이 상승기류에 의해 더 이상 상승하지 못하면 땅으로 떨어지고 상승기류가 강할수록 더 큰 우박으로 성장한다.

우박발생 가능성 판단

우박사례의 선정 기준은 ① 우박이 관측된 관서를 기준으로 50km이내에 고층 관측소(레윈존데)가 위치하고, 우박 발생 3시간 이내에 관측된 고층 관측 자료가 있는 경우와 ② 고층관측소가 위치하고 있지 않은 경우에는 Regional Data Analysis Prediction System(RDAPS) 12시간 예측모델을 이용하여 모의된 상층 기온 자료가 있는 경우이다. 총 50개 사례가 선정되었다.

1. 500hPa 기온과 500hPa 기온에서 400hPa 기온을 뺀 기온차이의 관계

그림 2는 500hPa의 기온(x축)과 500hPa기온에서 400hPa 기온을 뺀 차(y축)로 나타낸 우박 발생 분포와 우박 직경을 보여준다. 원은 관측된 우박의 직경(cm)을 의미한다. 이 그래프에서 각 우박사례들은 500hPa에서 약 −8℃~−33℃ 사이에 넓게 분포하는 반면, 500−400hPa 기온차이가 10℃ 이상에서 밀집되어 있다. 우박은 대기 중층고도인 500hPa의 기온이 낮더라도 그 상층인 400hPa의 기온이 낮지 않다면 발생 확률이 낮고, 500hPa의 기온이 낮지 않더라도 상층 400hPa의 기온이 큰 차이로 낮다면 발생 확률이 높음을 의미한다. 그렇지만 여름철 발생한 사례(−8℃의 2개 사례)를 제외하고는 그림 2의 노란색 영역처럼 500hPa의 기온이 −10℃ 이하일 경우에 나타났다. 또한, 500hPa 기온이 −20℃ 보다 높은 경우에는 붉은 색 영역과 같이 500hPa과 400hPa의 기온의 차이가 12℃ 이상으로 급격하게 커져야 우박이 발생했다.

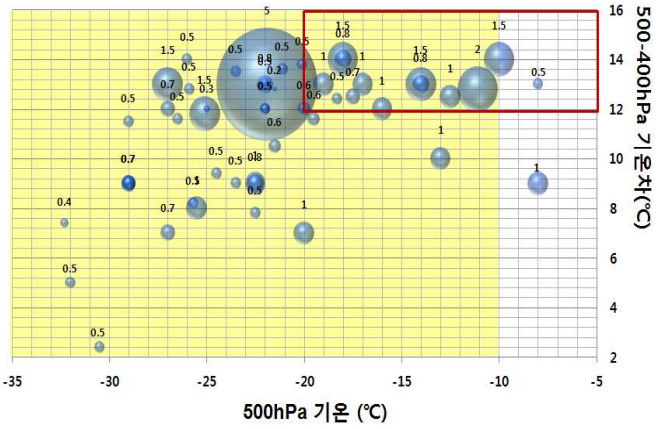


그림 2. 500hPa 기온과 500hPa 기온에서 400hPa 기온을 뺀 기온차이와의 관계를 이용한 우박 판단그래프

2. 500hPa 기온과 K−index(KI)의 관계

그림 3은 500hPa 기온(x축)과 대기의 불안정지수를 나타내는 KI[1](y축)의 관계를 이용한 그래프이다. 일반적으로 KI 30이상은 불안정 대기를 의미하지만 그 이하의 값에서 더 많은 우박사례가 분포하며, 0 이하의 안정한 대기 구조에서도 우박이 발생한 것을 볼 수 있다. 그림 2에서 500hPa 기온이 −8℃로 비교적 높은 기온에서 발생한 2개의 사례는 여름철에 발생한 사례로써 KI값이 25보다 높은 값에서 나타났다. 이 그래프를 통해 우박은 대류권 하부의 가열에 따른 불안정과는 관련이 적은 것을 알 수 있다.

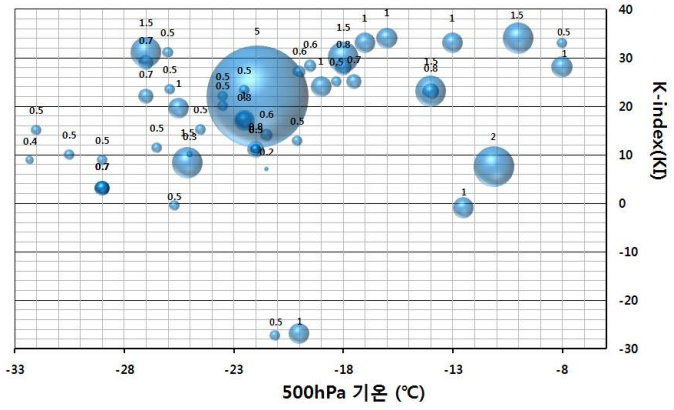


그림 3. 500hPa 기온과 KI와의 관계를 이용하여 나타낸 우박 판단그래프

1) KI지수와 뇌우강도: 25 ≤ KI < 30: 약, 30 ≤ KI < 40: 보통, 40 ≤ KI: 강 (손에 잡히는 예보기술 5월호 - 불안정지수 참고)

3. 우박발생 가능성 판단 그래프

앞에서 제시한 두 개의 그래프에서 분포된 우박사례 분석을 통해 그림 4와 같이 요약하여 우박 발생 가능성을 가늠해 볼 수 있다. 그림 4에서 제시하는 우박 발생 가능 구역은 50개의 사례 중 46개(약90%)의 사례가 포함된 영역이고, 우박 발생확률이 높은 붉은색 구역은 총 50개의 사례 중 28개의 사례(약60%)가 밀집된 구역이다. 여름철 발생한 우박은 500hPa의 기온이 영하 8℃내외로 하층과 중·상층 대기 사이의 불안정으로 인해 발생하였다.

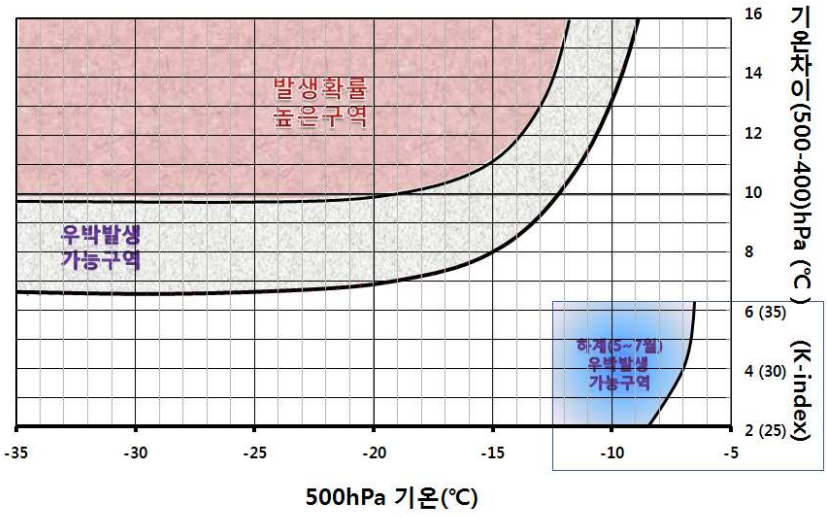


그림 4. 500hPa 기온과 500-400hPa 기온 차이의 관계를 이용한 우박 발생 가능성 판단그래프

유형별 우박사례 분석

1. 한랭전선형(2006년 11월 5일, 수원)

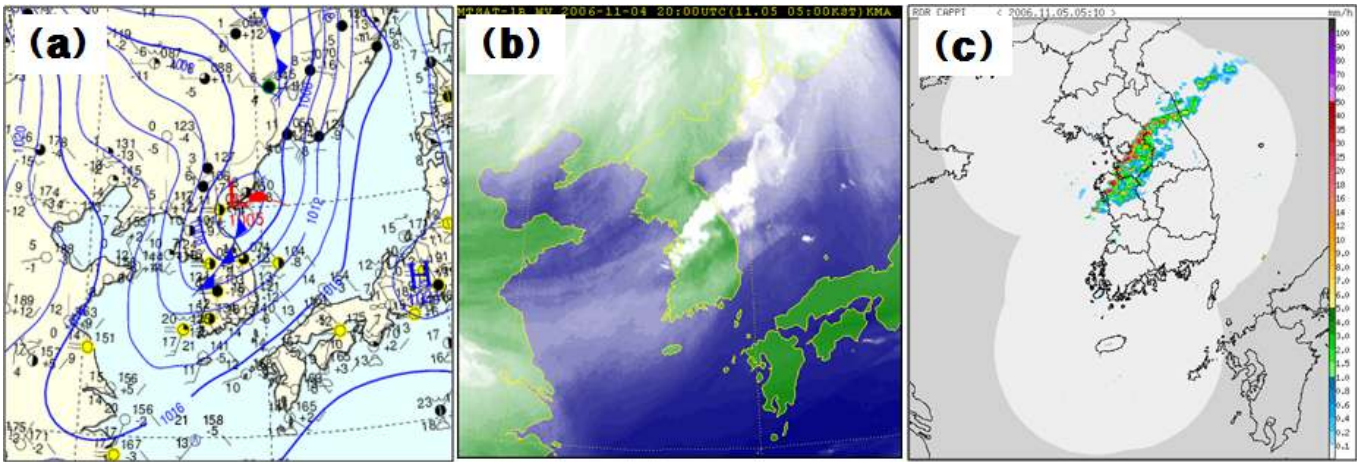


그림 5. 2006년 11월 5일 (a) 06시의 3시간 지상일기도, (b) 05시 수증기 영상, (c) 05시 10분 레이더영상

지상에서 대기 중층까지 습윤한 지역으로 한랭전선이 통과하면서 중·상층의 차고 건조한 공기가 습윤한 기층내로 침투하여 강한 연직운동으로 우박이 발생한 사례이다. 우박은 수원에서 새벽 5시 21분에 시작되어 3분간의 짧은 시간에 국지적으로 나타났다. 그림 5(a) 지상일기도에는 서해상에서 한랭전선이 접근하여 중부지방으로 이동하고 있으며, 한랭전선이 수원을 통과함과 동시에 우박이 발생한 것으로 분석되며, 그림 5(c)의 우박이 발생되기 직전의 레이더 영상을 통해서 확인할 수 있다.

수원에서 우박이 관측되기 약 2시간 전에 오산의 단열선도(그림 6)에서 지상에서 중층(약 600hPa) 대기까지 습윤층과 건조층이 함께 나타나고 있다. 또한 500hPa 이상의 고도에서는 차고 건조한 공기가 위치하고 있으며, 고도 증가에 따른 기온감률이 크게 나타났다. 이 사례(한랭전선형)는 단열선도상의 KI는 28, 850-500hPa의 SSI는 2.5로 관측되었다.

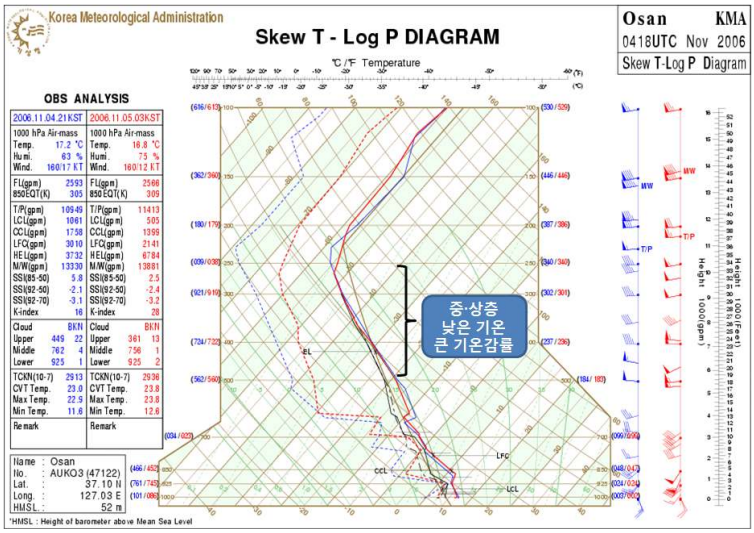


그림 6. 2006년 11월 5일 03시 오산 단열선도

2. 중·상층 찬공기 이류형(2009년 5월 26일, 남원)

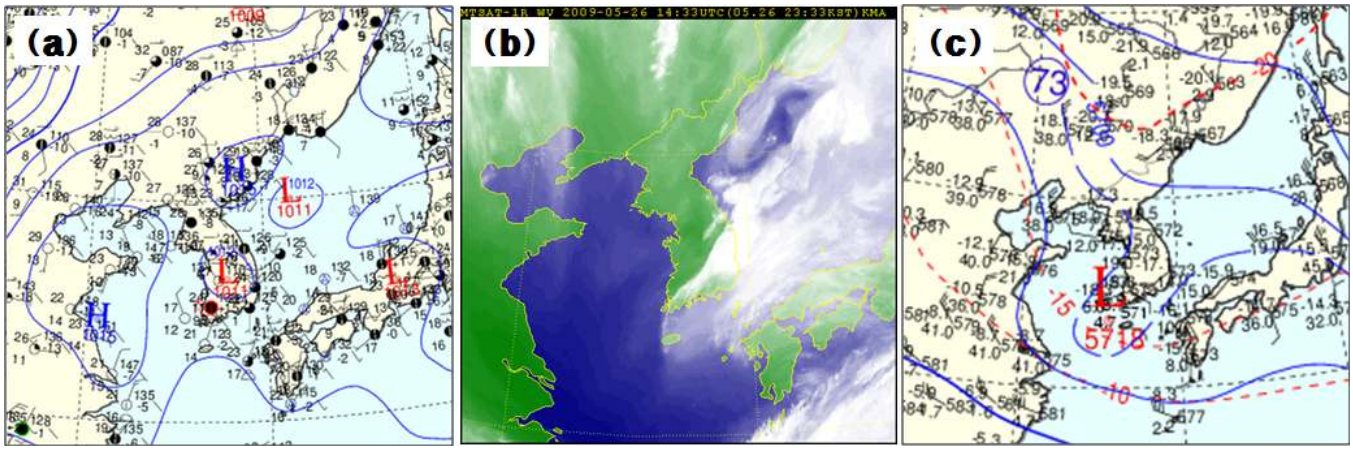


그림 7. 2009년 5월 26일 (a) 18시의 3시간 지상일기도, (b) 16시 33분 수증기 영상, (c) 09시 500hPa 일기도.

중·상층 찬 공기 이류에 의해 대기불안정이 형성되어 발생된 우박 사례로서, 일기도에서 뚜렷한 특징을 찾아내기 어려운 유형이다. 2009년 5월 26일, 남원에서 16시42분, 18시 31분에 발생한 두 번의 우박이 나타났으며, 지속시간은 각각 6분, 9분이었다. 그림 7(a)의 26일 15시 지상일기도에서 일사에 의한 가열로 한반도 내륙에 중심을 둔 열적 저기압이 존재하고 있다. 그림 7(b)의 수증기 영상에서 남원의 남쪽과 동쪽으로 발달된 구름대가 보이고, 남원은 건조역과 습윤역의 경계에 위치했음을 알 수 있다. 그림 7(c) 5월 26일 9시 500hPa 일기도에서 저기압 중심이 제주도 부근에 위치하고, 한반도는 온도골에 놓여 차가운 공기가 상층에 위치하여 영향을 주고 있는 것을 알 수 있다.

그림 8은 남원과 인접한 광주 15시 단열선도로서, 한랭전선형 우박형과 다르게 중·상층 대기인 500-300hPa에 습윤층이 위치하고, 700-500hPa에 건조공기가 침투한 모습이 나타나며, 중·하층 대기의 기온은 높은 상태로 고도에 따른 기온감률은 크게 나타났음을 볼 수 있다.

또한, 우박이 발생할 무렵인 16시 40분의 레이더 영상(그림 9)에서 붉은색으로 보이는 강한 강수대가 남원 지역에 보이며, 강한 강수대가 정체하면서 더욱 발달하여 두 번의 우박이 관측되었다. 이 사례는 일사에 의해 가열된 지면위로 500hPa의 한랭한 저기압이 접근하면서 불안정한 대기가 형성

되었기 때문인데 비록, 하층 대기가 건조하였으나, 습윤한 중·상층 대기에서 만들어진 우박 입자는 불안정한 대기에 의한 상승기류의 지지를 받아 지속적인 성장한 것으로 보인다.

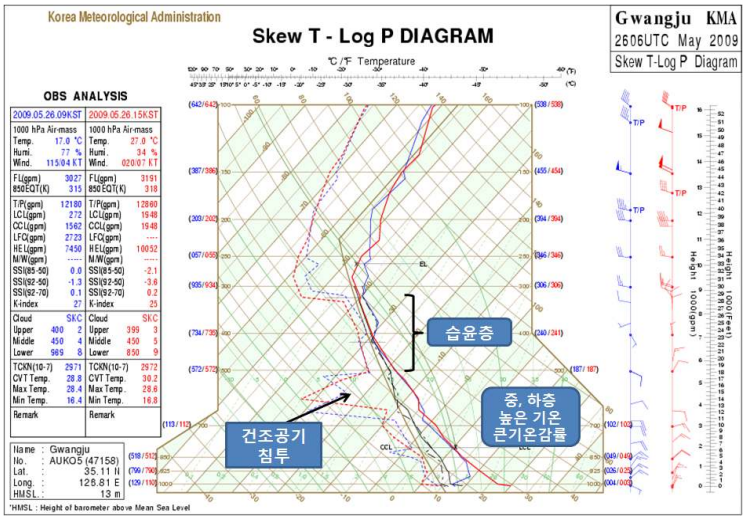


그림 8. 2009년 5월 26일 15시 광주 단열선도

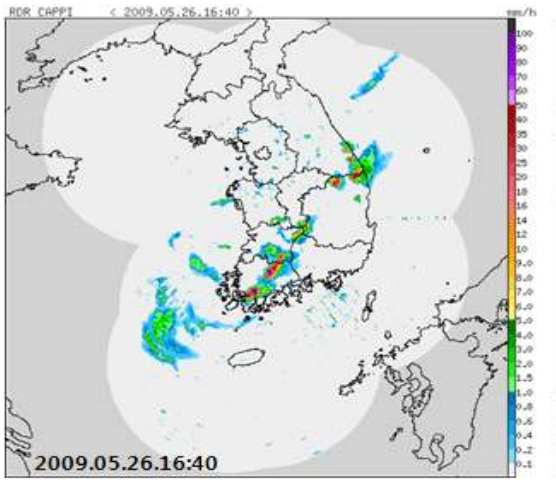


그림 9. 2009년 5월 26일 16시 40분 레이더 영상

3. 권계면 접힘형(2006년 4월 19일, 수원)

권계면 접힘형은 그림 10(a)의 지상일기도에서 볼 수 있듯이 발달한 저기압 중심이 동해상에 위치하면서 강한 북서풍이 부는 형태로서, 지면 가열효과는 거의 없는 특징을 보인다. 대표적인 사례로서 2006년 4월 19일 수원에서 22시 10분, 다음날인 20일 00시 15분에 2회의 우박이 관측되었다. 그림 10(b)의 우박 발생 당시 수증기 영상을 살펴보면, 백령도 부근에 중심을 둔 저기압성 회전을 하는 구름대가 보인다. 그림 10(c)의 4월 19일 21시의 500hPa 일기도에는 −30℃ 한랭핵을 가진 절리저기압이 북한에 위치해 있다.

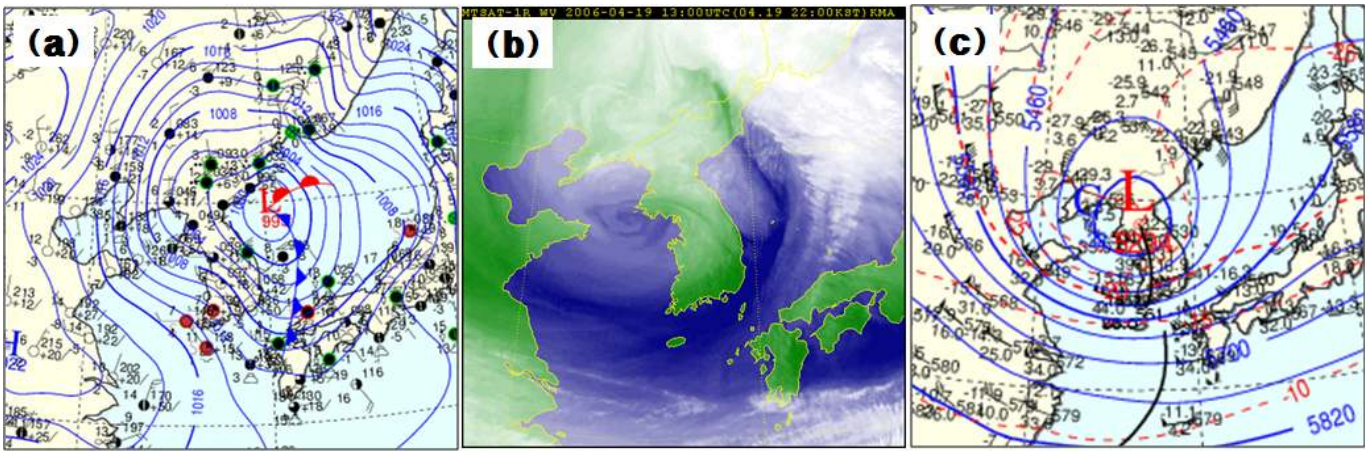


그림 10. (a) 2006년 4월 20일 00시의 3시간 지상일기도와 2006년 4월 19일 (b) 22시 수증기 영상, (c) 21시 500hPa 일기도.

그림 11는 4월 19일 21시 오산 단열선도로서, 500hPa 부근에 권계면 접힘 현상으로 보이는 역전층이 존재하며, 지상에서 500hPa까지 습윤한 대기 구조를 볼 수 있다. 700hPa 부근에서는 건조 공기의 침투 형태도 보이지만 전반적으로 두꺼운 습윤층으로 인하여 온도선은 습윤기온감률선과 비슷한 기울기의 연직기온감률을 보이며 특히, 지상에서 850hPa까지는 포화된 상태에서 건조기온감률선과 비슷한 기울기를 보인다. 권계면 접힘에 의한 우박 사례는 500hPa 절리저기압과 한랭핵이 중북

부지방으로 이동함에 따라 상층의 차가운 공기가 침강하면서 권계면 고도가 500hPa 부근에서 나타나는 현상으로서, 지상에서 500hPa까지 불안정한 대기구조를 보였기 때문에 발생하였다. 포화된 상태에서 지상부터 850hPa까지의 급격한 기온감률은 강한 상승기류를 발생시켜 지속적인 수증기와 에너지를 상층으로 전달시켜 우박 발생 가능성을 가중시켰다.

우박이 발생한 20일 00시 10분의 레이더 영상(그림 12)에서 경기남부지방을 중심으로 강수지역이 보이고, 앞에서 살펴본 2개의 유형과 달리 강한 에코는 보이지 않는다. 하지만, 500hPa 저기압성 기류의 회전방향과 일치하게 강수 구역이 회전하면서 지속적으로 경기남부에 강수가 유입되는 형태다.

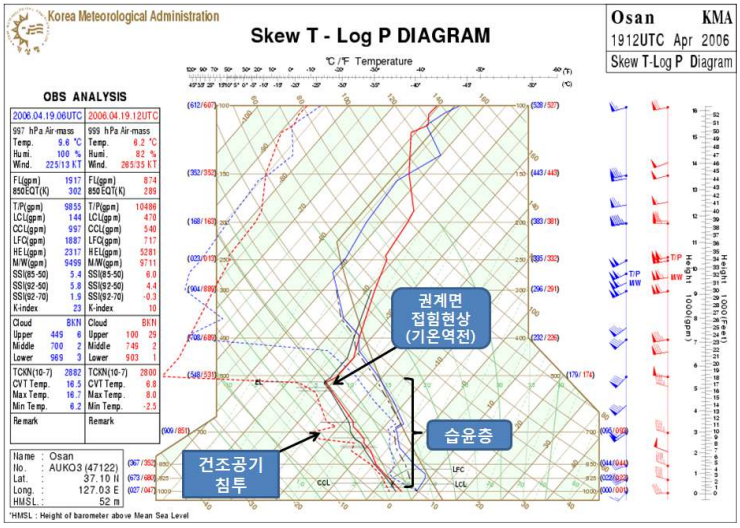


그림 11. 오산 2006년 4월 19일 21시 단열선도

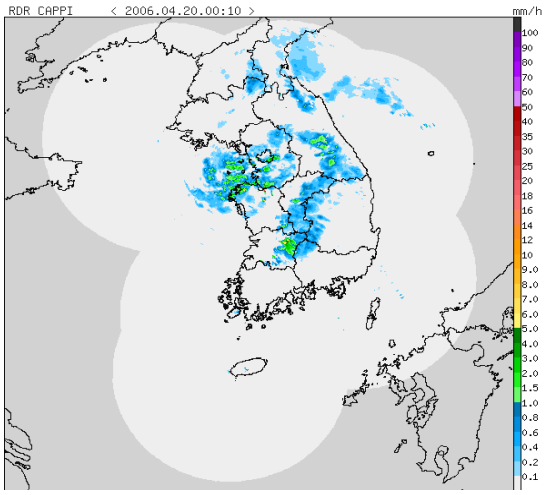


그림 12. 2006년 4월 20일 00시 10분 레이더 영상

우박관련 연구들

1. 지형효과

우박은 열적 가열과 상승기류를 발생시킬 수 있는 지형 구조여야 하며, 같은 대기조건에서도 발생분포의 지역적 차이가 매우 크다(Kallo 1989). 해안 및 저지대보다 산악 및 고지대에서 주로 발생하나 풍상측에 위치해야 하며, 쉽게 지면이 가열되어 강한 상승기류가 발생하기 좋은 지형이어야 한다.

우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸여 있어 해륙풍 순환의 영향을 크게 받으며, 해풍은 육상으로 많은 수증기와 에너지를 공급하므로 해상에서 육상으로 바람이 부는 오전 11시에서 오후 7시 사이에 우박이 주로 발생한다(김동호 등 1999).

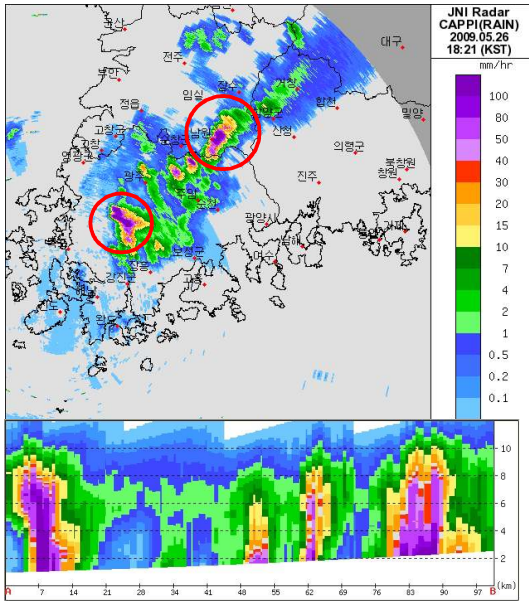


그림 13. 우박이 관측된 시간의 레이더 반사도와 연직단면

2. 레이더 분석을 통한 예측

레이더는 실시간 감시를 통해 우박을 탐지하고 도달

예측시간을 계산할 수 있으므로 우박탐지 및 초단기 예측에 가장 효과적이다(Aydin et al. 1990, Tunner 1995, Kitzmiller and Breidenbach 1993). 일반적으로 레이더 영상에서 강한 반사도가 나타나는 곳에 주로 발생하고, 그 지역은 57dBZ 또는 60dBZ 이상의 강한 반사도가 나타나는 특징을 가진다. 그림 13은 2009년 5월 26일 우박이 발생할 때 관측된 레이더영상과 연직 단면도를 보여준다. 연직 단면도에서, echo의 가장자리가 뚜렷하며 echo top(구름꼭대기)이 높다.

3. 체크리스트 활용

우박은 지면 가열이 아닌 대기 중·상층 냉각에 따른 불안정, 강풍이 동반된 연직바람시어에 원인이 있음을 분석하여 예측에 활용하고 있다(Fedchenko 1992, Billet et. al. 1997). Deese (2002)는 우박 발생 체크리스트를 개발하여 우박 예측에 활용하고 있다(표 1).

표 1. 미국(NOAA)에서 운영 중인 우박예측 점검표(Deese 2002)

Model Parameter	Units	Low Threshold	Moderate Threshold	High Threshold
Value		1	2	3
CAPE	JK/g	1000	2000	3000
T500	℃	-7	-10	-13
T400	℃	-18	-21	-24
Freezing level	m	4000	3500	3000
V850	m/s	15	20	25
V700	m/s	20	25	30
V500	m/s	35	40	45
V300	m/s	35	45	55
V200	m/s	40	50	60
Totals		9	18	27

<참고문헌>

김동호, 임은하, 권원태, 1999: 우리나라 우박 발생의 시공간 구조. *한국기상학회 1999년도 봄 초청강연 및 학술발표회*, **4**, 259-262.

Aydin, K., Y. Zhao, and T. A. Seliga, 1990: A differential reflectivity radar jail measurement technique: observations during the Denver hailstorm of 13 June 1984. *J. Atm. Oce. Tech.*, Boston, **MA. 7(1)**, 104-113.

Billet, J. B., M. Delisi, and B. G. Smith, 1997: Use of regression techniques to predict hail size and the probability of large hail. *Wea. Forecasting.*, **12**, 154-164.

Chen, G. T-J., L.-F. Chen, and L.-F. Chou, 1990: A study on the upper tropospheric cold vortices cases accompanying thunderstorms. *Meteorological Bulletin*, **36(1)**, 1-21, Taiwon, Republic of China.

Deese, J. T., NOAA/NWSFO, F. L. Ruskin, and C. H. Paxton, 2002: Utilization of the GFE in severe weather recognition at the Tampa bay area national weather service. *21st Conf. on Severe Local Storms.*, Session 10B.

Deng, Z., M. Yang, L. Jiang, H. Zou, and Z. Cheng, 1989: Preliminary study of a mesosynoptic case in early spring. *Meteorological Monthly*, Beijing, China, **15(10)**, 43-48.

Fedchenko, L. M., G. G. Gorala and N. M. Malbakhovaa, 1992: Detailed methods of hail forecast. *Atmospheric Research.*, **28(3-4)**, 375-384.

Fett, R.W., R.E. Englebretson, and D.C. Perryman, 1993: Forecasters Handbook for the Bering Sea, Aleutian Islands, and Gulf of Alaska. U.S. Naval Research Laboratory. NRL/PU/7541-93-0006.

Kallo, N. A., 1989: Synoptic conditions leading to intense hailfall in southern and southeastern Kazakhstan. *Trudy Ordena Lenina Gidro meteorologi cheskogo Nauchno Issledovarel'skogo Tsentra SSSR*, Leningrad, USSR, **302**, 89-100.

Kizmiller, D. H., and J. P. Breidenbach, 1993: Probabilistic nowcasts of large hail based on volumetri refectivity and storm environmental characteristics. Preprints, *26th Conf. on Radar Meteorology*, Norman, OK, Amer. Meteor. Soc., 157-159.

Rasmussen, Erik A., 1985: A case study of a polar low development over the Barents Sea. Tellus, **37A**, 407-418.

Shapiro, M.A., L.S. Fedor, and Tamara Hampel, 1987: Research aircraft measurements of a polar low over the Norwegian Sea. Tellus, **39A**, 272-306.

Smith, S. B., and M. K. Yau, 1987: Mesoscale effect of topography on the genesis of Alberta hailstorms. *Contributions to Atmospheric Physics, Wiesbaden*, Germany, **60(3)**, 371-392.

_____, and _____, 1993: The episodic occurrence of hail in central Alberta. *17th conference on severe local storms/conference on atmosphereic electricity*, **36-39**, St. Louce, Missouri.

Turner, R. J., 1995: The operational use of the WSR-88D mid and high level layer weather potential of thunderstorms. *14th conference on weather analysis and forecasting, Amer. Meteo. Soc.*, 459-464.

Vivekanandan, J., J. D. Tuttle, and E. A. Brandes, 1993: Observational and modeling considerations for multiparameter radar detection of hail. *26th international conference on radar meteorology*, Norman, Oklahoma, 525-527.

우박발생 모식도 http://www.srh.noaa.gov/jetstream/tstorms/hail.htm