

주요 기상현상별

단열선도 분석 및 활용

■ 발행: 예보국 ■ 문의: 예보기술분석과(내선 1657) ■ 발행일: 2014년 9월 12일(금)



단열선도(Skew T-log P diagram)는 현재 대기의 연직기온 및 바람분포를 가장 잘 표현해 주는 열역학선도로, 한 장의 그림에 층별 기온구조, 수증기량, 불안정도 등 많은 정보를 제공한다. 단열선도를 이용하면, 현재의 대기를 3차원 구조로 진단 할 수 있으며, 수치모델 예측자료와의 비교를 통해 예측 오차를 찾아 낼 수 있고, 가까운 미래에 발생할 날씨 예측에도 유용하다. 이 외에도 사례 분석 및 기상연구에도 활용성 높은 자료이다. 이번 호에서는 기 발간한 단열선도 사용 설명서를 바탕으로 주요 기상현상별 분석 및 활용 방법에 대하여 제시한다.

온난형 대기구조에서 하층제트에 의한 호우 분석

1) 2014년 8월 18일 광주 호우사례

그림 1 a)의 레이더영상에서 18일 새벽 3시에 서해안 지역에 발달한 에코가 보이며, b) 850hPa 유선과 하층제트 분석장에서 최대풍속의 중심부근에 호우구역(붉은색 점선)이 a)의 호우구역과 일치한다. 하층제트의 발생원인은 서해상에 위치한 중규모 저기압이 한반도로 접근함에 따라 기압경도력이 강화되었기 때문이다.

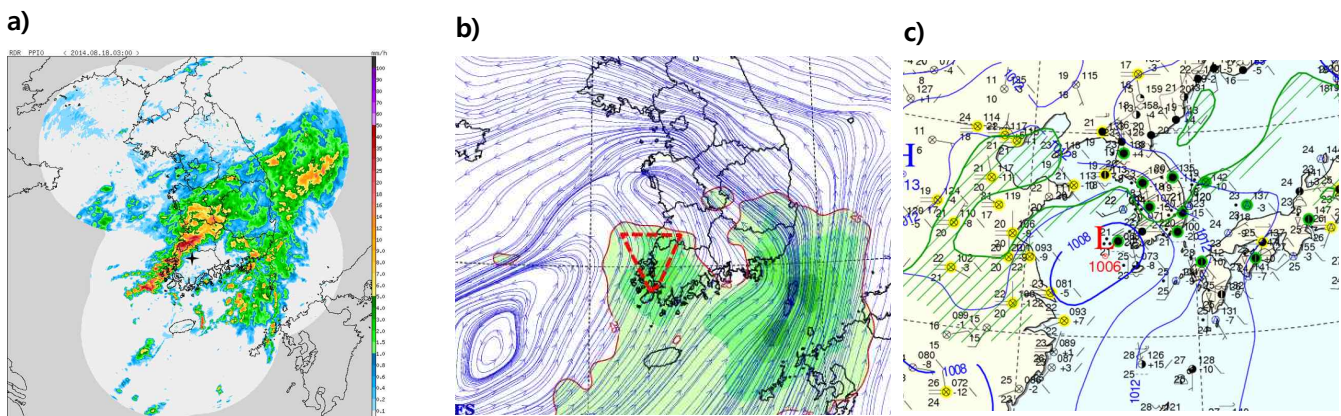


그림 1. 2014. 8. 18. 03시(KST)의 a) 레이더영상(별표: 광주 관측지점), b) 850hPa 유선과 하층제트, c) 지상일기도

그림 2는 그림 1과 같은 시각에 광주에서 관측된 단열선도 분석장으로 호우가 발생되기 직전의 대기구조를 보여준다. 왼쪽 분석란을 살펴보면, 열역학적 불안정도를 진단할 수 있는 CAPE(Convective Available Potential Energy) 값이 없는 것을 알 수 있다. CAPE 값은 자유대류고도(LFC: Level of Free Convection)부터 평형고도(EL: Equilibrium Level)까지 양의부력 면적을 적분한 값으로서 연직운동을 활발하게 만들 수 있는 잉여에너지를 의미한다. 그림 2의 단열선도에서 LFC고도부터 상승하는 공기는 포화된 상태이므로 습윤기온감률 곡선을 따라 상승하나, 실제 기온에 비해 상승온도가 낮으므로 LFC고도 이상으로 상승할 수 없는 조건이다. 그렇지만, TPW(Total Precipitable Water, 대기층 내의 가강수량)값은 65.3으로 호우를 발생시킬 수 있는 임계값 수준인 50이상을 넘어선 높은 값을 보인다. 기온과 노점온도의 분포를 보면, 지상부터 대류권계면 고도가 위치한 150hPa 부근까지 기온과 노점 온도의 차이가 5°C이하로써, 습윤한 대기 상태를 보여주고 있다.

우측상단의 호도그래프를 살펴보면, 지상부터 상층까지의 바람이 시계방향으로 회전하는 순전(veering)의 모습이 보인다. 즉, 대기 전 층에서 온난이류가 나타나고 있음을 알 수 있다.

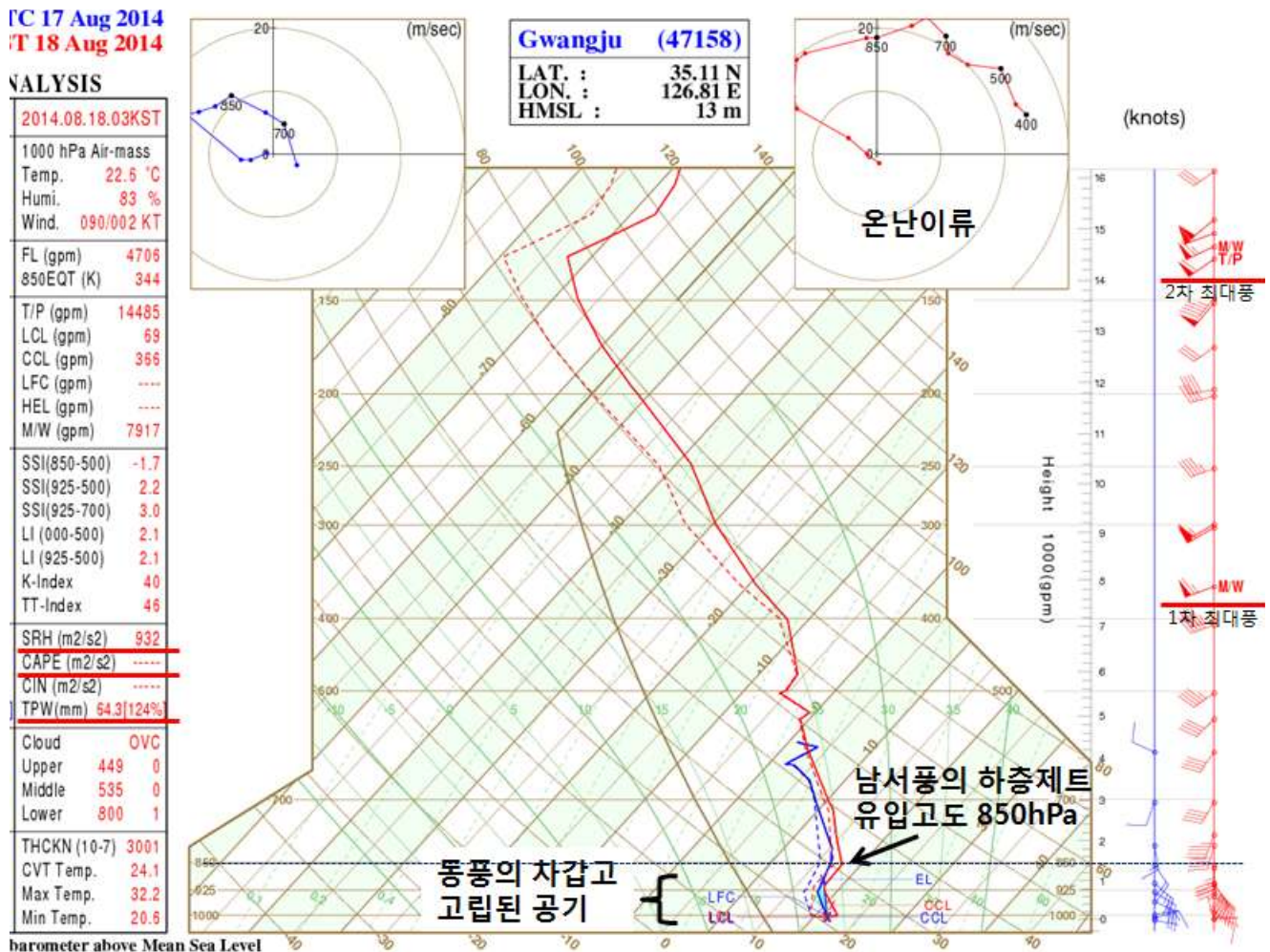


그림 2. 2014. 8. 18. 03시(KST)에 관측된 고층자료의 단열선도(광주) 분석장으로 온난전선형 호우구조로 지상은 동풍, 850hPa 부근 이상의 고도에는 남서풍의 하층제트가 위치하고 있음

호우발생의 역학적인 구조는 850hPa 부근을 기준으로 위와 아래고도의 기온과 바람 분포에서 찾을 수 있다. 850hPa 아래 고도에서는 동풍의 바람이 불고 있으며, 지상부터 850hPa 고도까지 기온차이가 크지 않다. 925~850hPa 구간에는 역전층까지 보인다. 반면, 850hPa 이상의 고도에서는 남서풍과 함께 하층제트(25kts 이상의 풍속)가 보인다. 이 남서풍은 150hPa 고도까지 불며, 이 구간 내에 습윤기온감률 곡선과 비슷한 기온감률 분포를 보인다. 포화된 상태에서 850hPa 이상의 대기는 불안정한 상태라고 할 수 있다. 고도에 따른 바람분포(우측 바람 기입란)를 보면, 2개의 최대풍 고도를 찾을 수 있다. 8km 부근에 위치한 1차 최대풍 고도와 대류권계면 부근인 15km에 위치한 2차 최대풍 고도가 발견된다.

그림 3은 하층제트에 의한 호우발생의 모식도이다. 남에서 북으로 이동하는 하층제트는 습윤하고 따뜻한 공기를 가지고 북으로 이동하므로 주변의 공기 무게에 비해 가볍다. 따라서 지상부근의 공기와 잘 섞이지 않으므로 온난전선과 같은 연직전선면(vertical front slop)이 형성된다. 대류권계면 부근의 상층 제트가 위치한 곳에 다다르면, 수평운동 성분이 연직운동 성분으로 전환되면서 강한 대류와 함께 호우가 발생한다. 이 때 연직운동이 강화되면서 수평운동 성분이 약해지므로 대류권 중·상층 고도에서 풍속이 약화되는 현상이 나타난다. 호우가 발생하는 지역의 연직 바람 분포는 그림 3의 왼쪽과 같이 중층고도에서 1차 최대풍과 대류권계면 고도에 2차 최대풍(상층제트)이 관측된다.

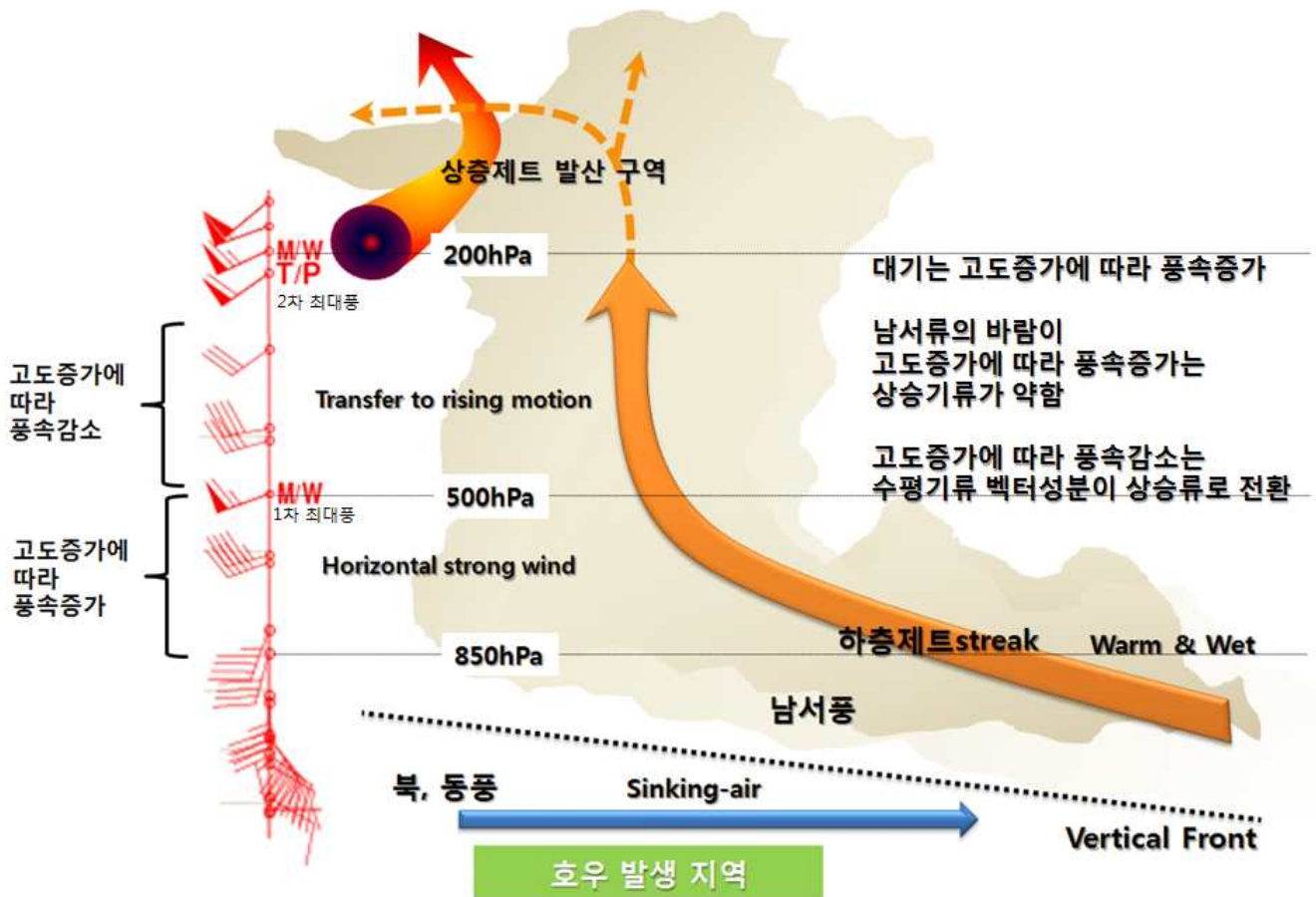


그림 3. 하층제트에 의한 호우 발생 모식도

2) 2014년 8월 21일 오산(수원) 사례

그림 4는 2014년 8월 21시 09시 오산(수원)을 기준으로 서쪽에서 접근하는 호우형 구름대와 지상 AWS 바람분포이다. 경기만 부근에 20mm/h 강도를 보이는 에코대가 위치하고 있다. 오른쪽 b)의 지상 바람분포를 보면, 강한 에코가 위치한 지역(노란색 파선)에 지상 바람은 북동풍이 나타나고, 수렴하는 모습은 보이지 않는다. 앞의 사례와 마찬가지로 하층제트에 의한 호우형 구조에서 나타나는 패턴이다.

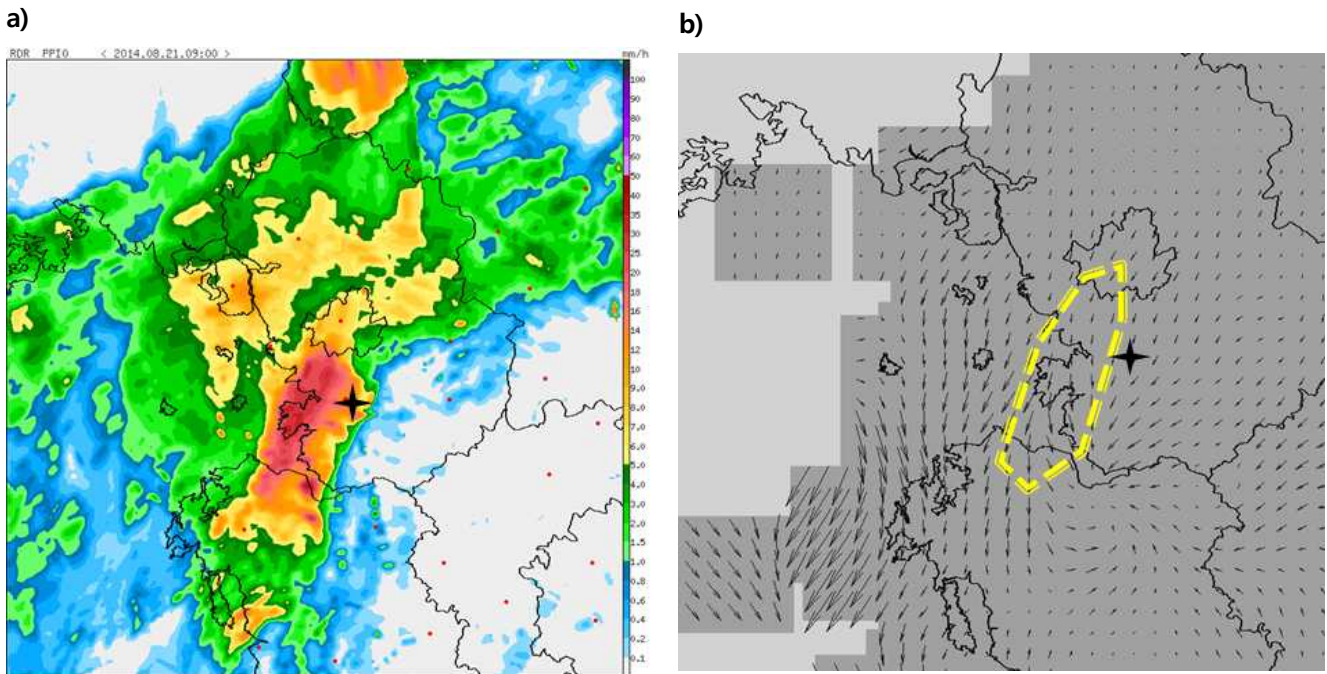


그림 4. 2014년 8월 21일 09시(KST) a) 레이더영상과 b) 지상AWS 바람 분포도(별표: 오산 관측지점)

그림 5는 같은 시각 관측된 오산의 단열선도이다. 이번 사례에서도 CAPE값은 나타나지 않고, TPW는 63.5로 높은 값을 보였다. 오른쪽에 연직 바람 분포를 살펴보면, 앞의 사례와 마찬가지로 지상과 하층대기에서는 동풍이 불고 있으며, 고도가 증가하면서 남~남서풍이 나타나고 풍속도 증가한다. 1차 최대풍 고도는 8km 부근에서 발견되며, 이후 고도증가에 따라 풍속이 감소하다가 약 13km 고도에 2차 최대풍인 상층 제트가 보인다. 이와 같은 고도에 따른 바람 분포를 이용하여 하층제트에 의한 대류발달 구조를 진단하고 호우예측에 활용할 수 있다.

FC 21 Aug 2014
T 21 Aug 2014

ANALYSIS

2014.08.21.09KST
999 hPa Air-mass
Temp. 22.2 °C
Humi. 95 %
Wind. 060/008 KT
FL (gpm) 4733
850EQT (K) 339
T/P (gpm) 13579
LCL (gpm) 212
CCL (gpm) 375
LFC (gpm) ----
HEL (gpm) ----
M/W (gpm) 13495
SSI(850-500) 1.7
SSI(925-500) 1.6
SSI(925-700) 0.9
LI (000-500) 1.6
LI (925-500) 1.5
K-Index 36
TT-Index 40
SRH (m2/s2) 375
CAPE (m2/s2) ----
CIN (m2/s2) ----
TPW(mm) 63.5(135%)
Cloud OVC
Upper 449 0
Middle 699 0
Lower 800 0
THCKN (10-7) 3017
CVT Temp. 23.6
Max Temp. 29.7
Min Temp. 18.6

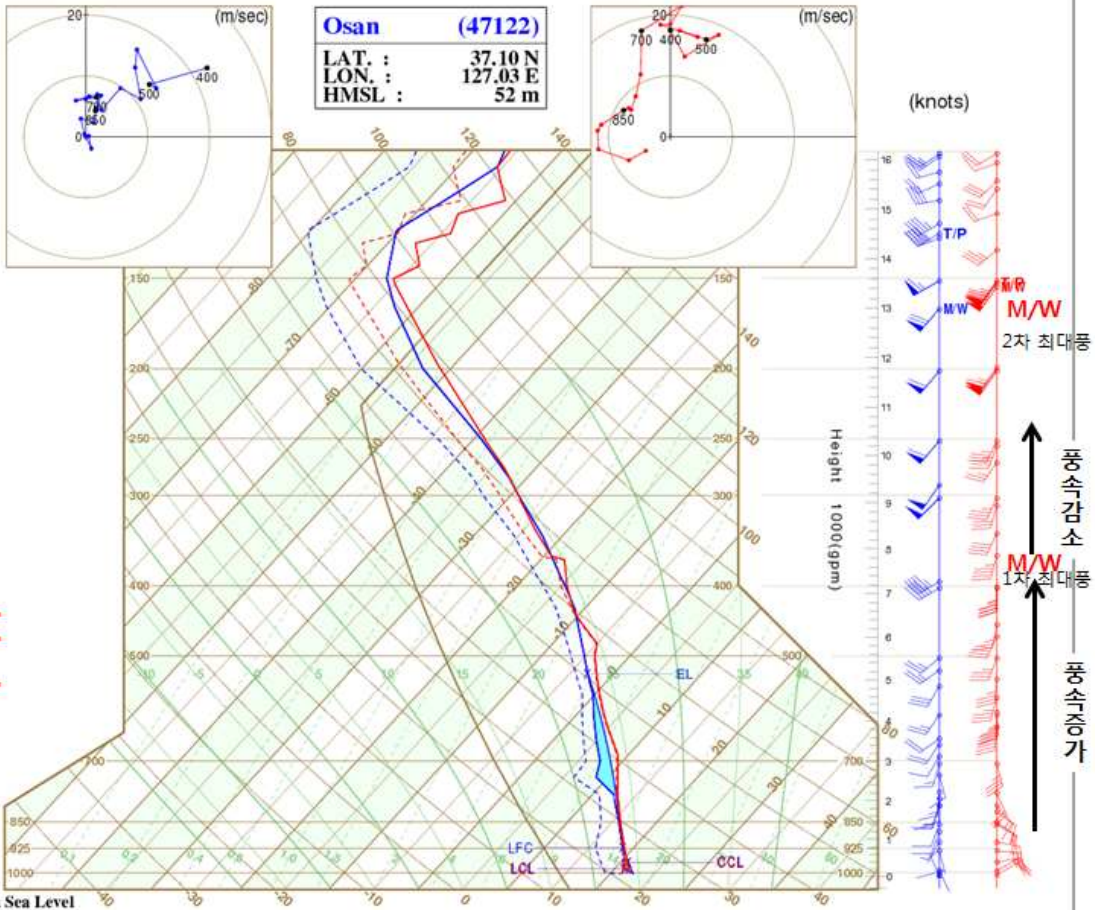


그림 5. 2014. 8. 21. 09시(KST)에 관측된 오산의 단열선도 분석장

☒ 뇌우 및 우박 분석

2014년 6월 12일 광주 우박 사례

그림 6은 2014년 6월 12일 오후 2시 5분경 광주에서 관측된 우박 사례와 단열선도 분석장이다. 우박 발생의 대기구조는 앞서 소개한 온난형 호우구조와는 다른 양상을 보인다. 그림 6 b)의 단열선도에서 왼쪽의 분석란을 살펴보면, CAPE 값이 3041로 매우 높았고, TPW는 33.3으로 호우사례에 비해 절반정도의 값을 보였다. 특이한 점은 우박 발생시 대류온도와 지상의 기온이 23.6°C로 같았다. 낮 시간대 지표 가열에 의해 지상의 기온이 대류온도에 도달했으며, 부력이 생긴 공기는 상승하여 우박을 발생시킬 수 있는 구름을 만들어 낸 것을 알 수 있다. 우박은 낮 최고기온이 나타나는 시간대에 주로 발생한다. 따라서, 대류온도를 구하고 지상의 기온이 대류온도에 도달하는 시간대부터 우박이 발생할 확률이 높은 시점이라고 할 수 있다.

우박의 발생시점은 지표가열이 일어나는 오후시간대이지만, 우박 발생의 주 원인은 상층대기에서 찾을 수 있다. 만약, 상층의 기온이 낮고 수증기가 적다면, 무겁기 때문에 하강하려 할 것이다. 따라서, 우박이 발생하기 위해서는 중·상층 대기에 차고 건조한 공기가 위치하여 하강

운동이 용이한 온도구조가 필요하다. 지표 가열에 의한 대기하층의 상승기류와 맞물리면서 우박으로 성장하기 위해 중·상층으로부터의 하강기류가 필수적이기 때문이다. 500hPa과 400hPa의 기온차이가 10°C 이상이면 500hPa 기온이 -10°C 이하인 기온조건은 우박발생 예측의 임계값으로 활용가능하다(손에 잡히는 예보기술 7호 '우박의 분석 및 판단'). 중·상층 대기의 차가운 공기는 CAPE값을 증가시켜(자유대류고도(LFC)부터 상승하는 공기는 습윤기온감률로 상승하므로 주위 공기보다 기온감률이 작기 때문) 대류운동을 활발하게 만든다. 우박은 앞의 호우 사례와 달리 높은 CAPE 값이 필요하다. 이 외에도 빙정핵의 특징과 미세물리과정의 이해도 우박 분석과 예측에 필요한 지식이다(24호 '빙정핵의 이해를 통한 눈 예보 활용' 참조).

a)



b)

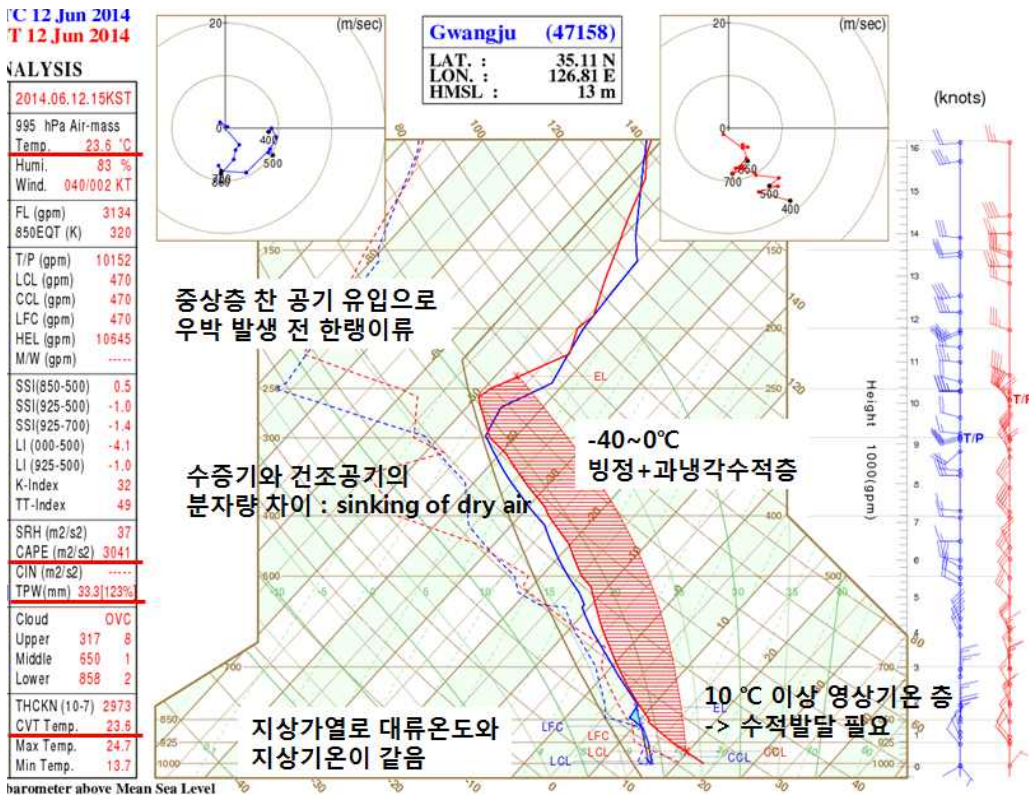


그림 6. a) 2014. 6. 12. 14시 5분경 광주에서 관측된 우박 사진과 b) 15시(KST)에 관측된 광주의 단열 선도 분석장

강수 예상시 기온 예측

습구온도는 온도계의 습구 부분의 물이 증발하면서 주변 공기로부터 열을 빼앗아 기온을 낮추는데, 이 때의 공기 온도에 해당한다. 만일, 공기 중에 수증기량이 적다면 습구온도는 실제기온보다 많이 낮을 것이다. 반대로 공기 중에 수증기가 많아 습도가 높다면, 증발량이 적기 때문에 기온과 차이가 크지 않을 것이다. 이런 습구온도의 특징을 이용하면, 강수가 발생하는 시점의 기온 예측에 도움을 받을 수 있다.

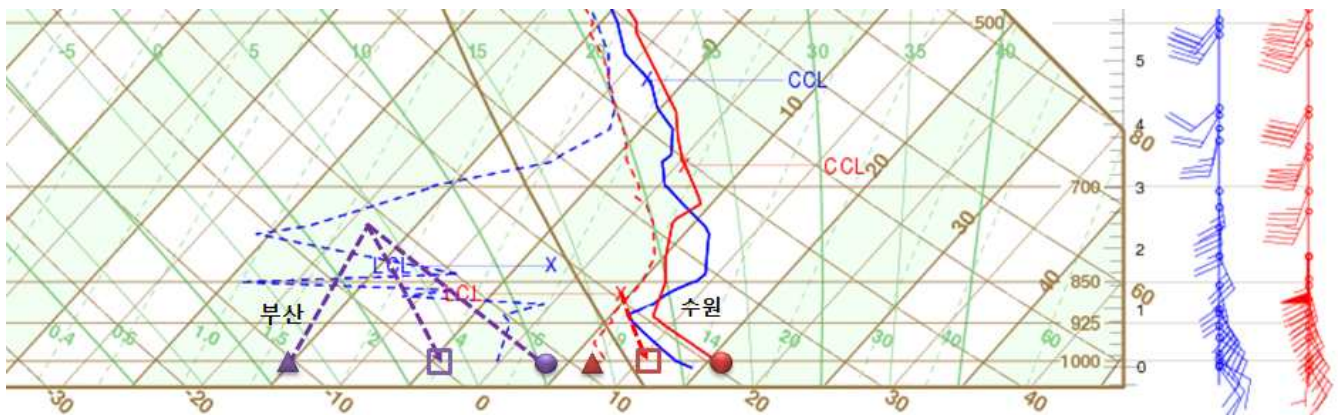


그림 7. 습구온도를 이용한 기온 예측의 예. 붉은색 원과 삼각형은 2014. 5. 11. 15시 수원의 기온과 노점온도를, 보라색 원과 삼각형은 2005. 3. 5. 15시 부산의 기온과 노점온도를 의미함, 네모는 수원과 부산의 습구온도임

1) 2014년 5월 11일 수원(오산) 사례

그림 7의 붉은색 원과 삼각형은 각각 15시 수원의 기온 20.1°C, 노점온도 11.8°C를 의미한다. 노점온도를 지나는 포화혼합비선과 기온을 지나는 건조기온감률 곡선이 만나는 고도 (LCL: Lifting Condensation Level)에서 습윤기온감률 곡선을 따라 지상으로 내리면 약 16°C의 습구온도를 구할 수 있다. 수원은 이날 18시에 비가 시작되었고, 21시부터 보통비의 강도로 내리면서 기온이 16.7°C로 하강하였다. 강수가 시작되면서 습구온도에 다다른 시점은 상대 습도가 95%이상으로 거의 포화가 되는 시간대이다.

2) 2005년 3월 5일 부산 사례

그림 7의 보라색 원과 삼각형은 각각 15시 부산의 기온 8.5°C, 노점온도 -10.2°C를 의미한다. 노점온도를 지나는 포화혼합비선과 기온을 지나는 건조기온감률선이 만나는 고도(LCL)에서 습윤기온감률선을 따라 지상으로 내리면 약 0°C의 습구온도를 구할 수 있다. 부산은 이날 18시에 눈이 내리기 시작하였고, 21시부터 강한 눈이 내리면서 18시 기온이 0.5°C, 21시 기온이 -0.3°C로 각각 관측되었다. 부산에서 강수가 시작되기 3시간 전 영상 8.5°C가 관측되어 습구온도의 이해가 없다면 눈 예보를 하기 어려운 사례였다. 미국에서는 강수형태 예측에 습

구온도를 중요한 예측 요소로 활용하고 있으며, 지상의 습구온도가 1°C 이하일 경우 눈을 예측하고 있다.

강수가 예측될 경우 습구온도를 이용하여 강수가 나타나는 시간대에 기온 예측에 활용하면 과학적 분석과 함께 좋은 예측결과를 나타낼 수 있다. 그렇지만, 이 방법은 지표 공기(기단)의 변동이 크지 않을 경우에만 기온예측에 활용하는 편이 좋다. 한랭전선이 통과하는 경우에는 지상의 바람과 기온이 급변하므로 습구온도를 이용한 기온예측은 정확성을 보장할 수 없게 된다.

❖ 뇌우세포의 이동 예측

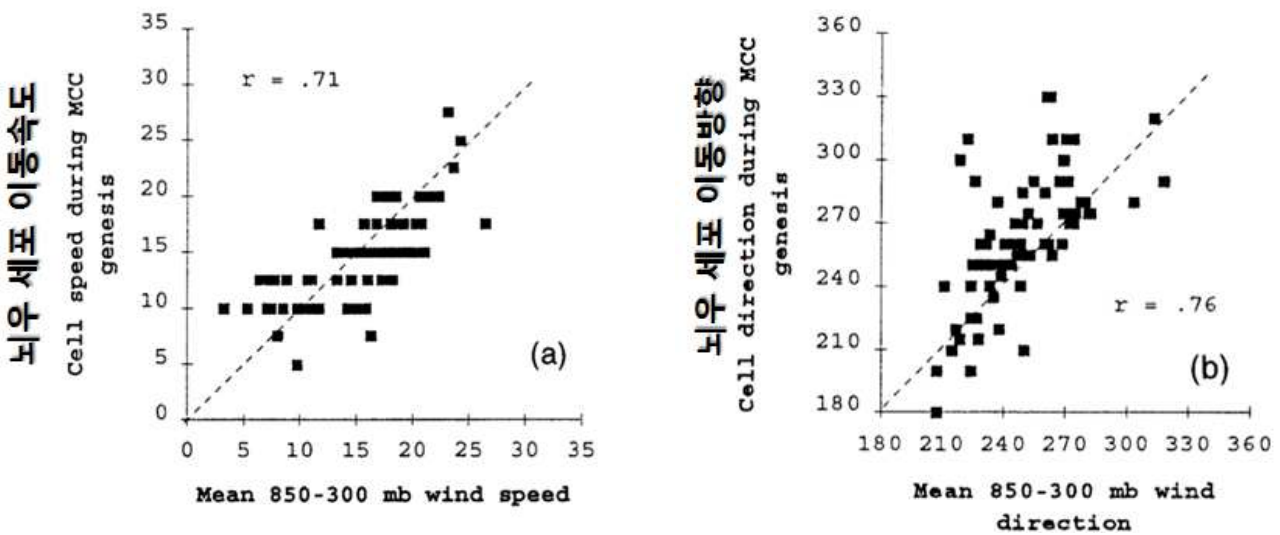
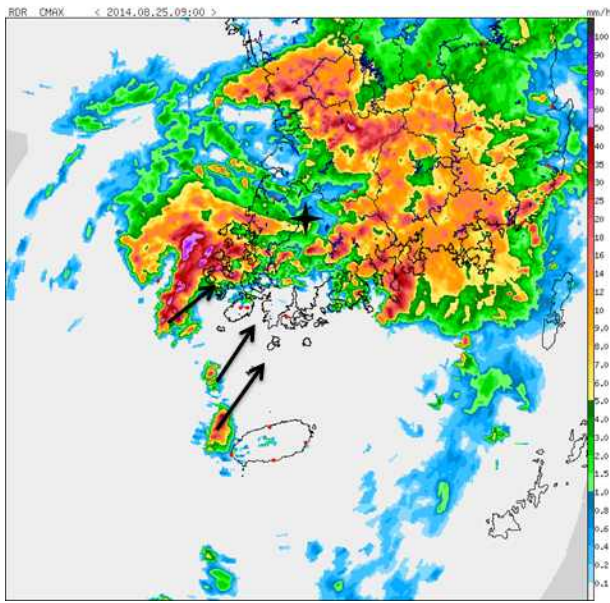


그림 8. 850~300hPa 층의 평균 바람(x 축)에 대한 뇌우세포 이동속도(a)와 이동방향(b) (Corfidi et al. 1996, Corfidi 2003)

그림 8은 850~300hPa의 평균 바람에 대한 뇌우 세포 이동과의 관계를 보여주는 그래프이다. 뇌우의 이동속도와 방향은 850~300hPa의 평균 바람과 선형적인 분포를 보이기 때문에 비교적 관련성이 높다고 할 수 있다. Bluestein and Jain(1985), Corfidi et al. (1996, 2003)의 연구에서 뇌우세포의 이동은 850~300hPa 사이에 위치한 700, 500hPa 바람과 비슷하다고 조사된 바 있다. 특히, 850hPa과 700hPa의 바람은 호우 셀 추적에 용이하다.

그림 9는 2014년 8월 25일 레이더에서 탐지된 강한 에코 셀의 이동경로를 보여준다. 목포 앞바다에 강한 에코가 발생하면서 1시간 후 최성기로 발달하였고 남서에서 북동쪽으로 이동하였다.

a) 9시



b) 10시

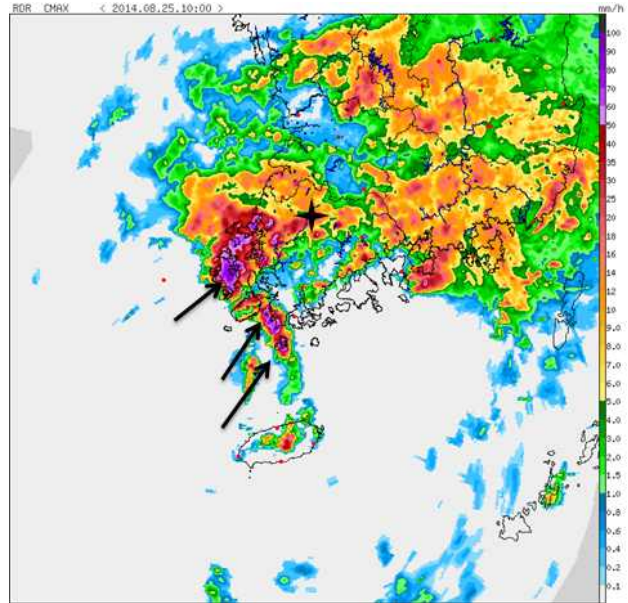


그림 9. 2014년 8월 25일 레이더 영상과 뇌우 셀의 이동 추적(화살표: 1시간 이동, 별표: 광주)

그림 10 a)는 같은 시각 관측된(09시) 광주 단열선도로, 앞서 소개한 온난형 호우구조와 비슷함을 알 수 있다. 850hPa 부근에 하층제트가 위치하고 약 4km 고도에 1차 최대풍속이 보인다. 4km 이상의 고도에서는 풍속이 약화되고 150hPa(14km) 고도 부근에서 2차 최대풍속이(가장 강한 풍속의 상층제트) 위치한다. 왼쪽의 분석란을 살펴보면, TPW값이 66.6으로 앞선 사례들과 같이 높은 값을 보였다.

단열선도의 오른쪽 상단에 위치한 호도그래프를 이용하여 뇌우 셀의 이동분석에 대해 알아보자. 그림 10 b)는 호도그래프상의 850hPa과 700hPa의 바람을 확대한 것이다. 그림 9에서 뇌우 셀 이동은 700hPa 풍향에 비해 오른쪽으로 약간 기울어져 있다. 뇌우 셀의 이동 방향은 850-700hPa의 바람시어 차이만큼 700hPa의 풍향에 비해 오른쪽으로 치우쳐 이동하고, 속도는 700hPa의 풍속과 비슷하다. Bluestein and Jain(1985), Robe and Emanuel(2001)은 사례연구를 통해 뇌우 셀의 이동방향이 평균적으로 700hPa의 바람방향에 비해 오른쪽으로 편향됨을 밝혔다. 새로운 셀이 발생하고 이동한 후 그 자리에 새로운 셀이 생기는 후방전파(Backward Propagation)는 최초에 뇌우 셀이 발생한 지점에서 850-700hPa 바람시어 값만큼 오른쪽으로 편향하여 나타난다. 후방전파는 전체적인 뇌우시스템의 이해를 바탕으로 분석해야 한다. 뇌우 셀의 후방전파 속도가 뇌우 셀의 이동속도와 큰 차이가 없을 경우 스킨라인과 같은 호우 시스템이 정체된 모습으로 나타나며, 긴 시간 동안 호우가 발생할 수 있다. 따라서, 중규모 저기압이나 호우 시스템의 이동속도 파악이 호우예보에 선행되어야 한다.

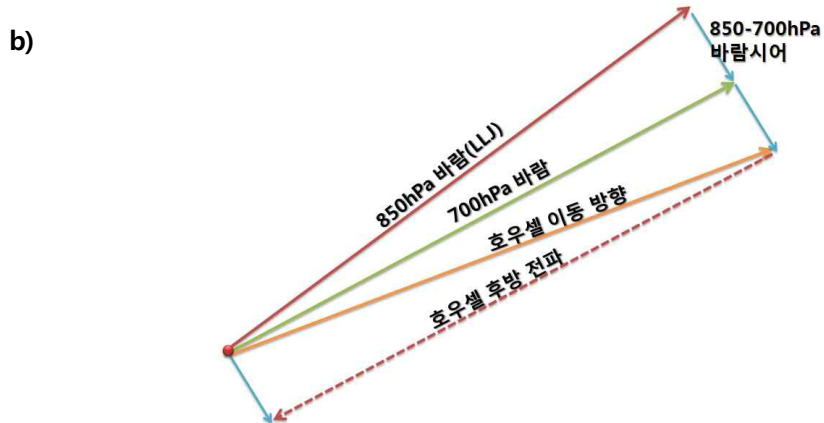
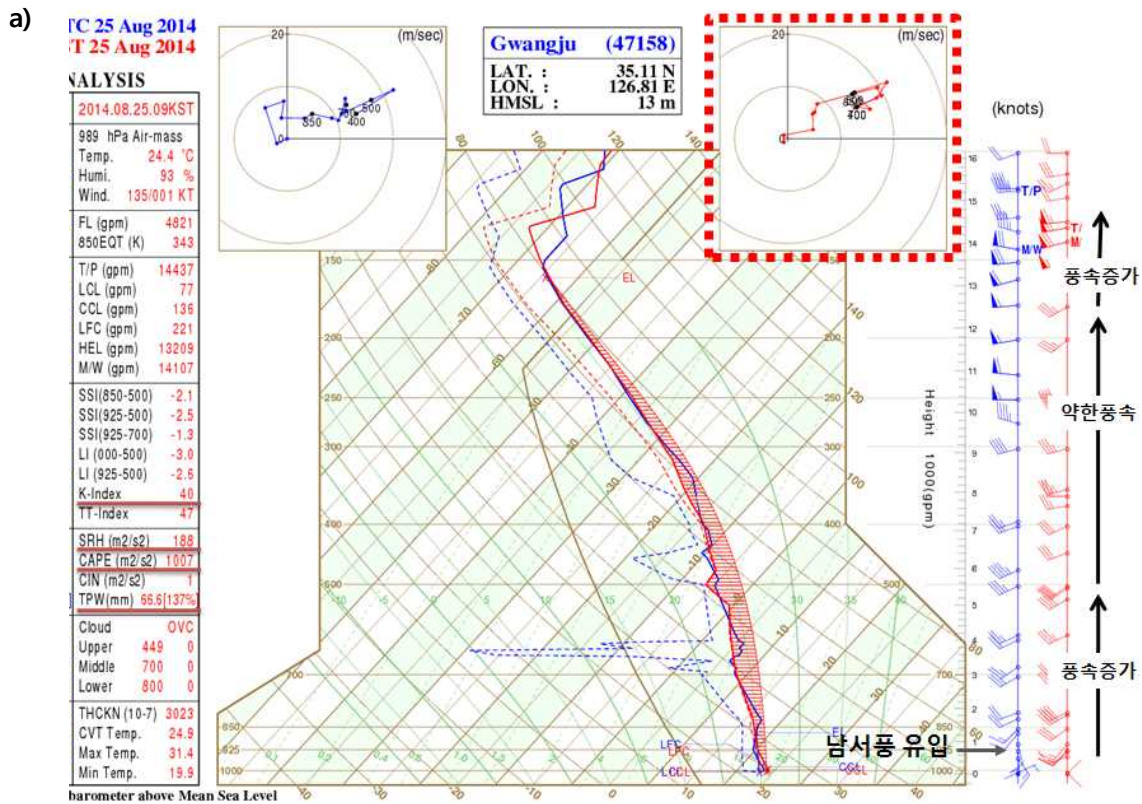


그림 10. a) 2014년 8월 25일 09시(KST) 광주 단열선도와 b) 호도그래프에 분석된 바람을 이용한 호우 셀 이동방향 추적 방법 예(Bluestein and Jain(1985), Robe and Emanuel(2001)의 연구결과 참조)

참고문헌

- 손에 잡히는 예보기술 7호, 2011, 우박의 분석 및 판단
 손에 잡히는 예보기술 9호, 2011, 단열선도 사용설명서
 손에 잡히는 예보기술 24호, 2014, 방정책의 이해를 통한 눈 예보 활용
 Bluestein, H. B., and Jain, M. H. 1985: Formation of mesoscale lines of precipitation: severe squall lines in Oklahoma during the spring. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 1711-1732.
 Corfidi, S. F. 2003: Cold pools and MCS propagation: forecasting the motion of downwind-developing MCSs. *Weather and Forecasting*, **18**, 997-1017.
 Corfidi, S. F., Merritt, S. F., and Fritsch, J. M. 1996: Predicting the movement of mesoscale convective complexes. *Weather and Forecasting*, **11**, 41-46.
 George, E. 1988: Weather forecasting: Rules, techniques and procedures. *American press, Boston, Massachusetts*.
 Robe, F. R., and Emanuel, K. A. 2001: The effect of vertical wind shear on radiative-convective equilibrium states. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 1427-1445.