



예 보 국
재해기상대응팀

CONTENTS

1. 호우 분석 가이드스	1
1. 1. 하층제트의 정의와 특징	1
1. 2. 하층제트의 상승 운동을 이용한 호우 구역 해석	3
1. 3. 분석 시 주의사항	8
2. 일변화 특성을 고려한 여름철 강수 예보	13
2. 1. 일변화란?	13
2. 2. 시간대별 강수 특징	14
2. 3. 첫 번째 특성, “하층제트는 야행성이다.”	15
2. 4. 두 번째 특성, “북태평양고기압은 하루 한 번 숨을 쉰다.”	26
2. 5. 여름철 일변화를 고려한 강수 예보 판단 흐름도	34
3. 장마의 초기와 종료단계 예보 방법	39
3. 1. 장마란?	39
3. 2. 장마의 시작단계	41
3. 3. 장마의 종료단계	53
3. 4. 장마의 시작/종료단계 예보를 위한 흐름도	64
4. 한반도 폭염의 원인과 예보 가이드스	69
4. 1. 폭염과 폭염 예보란?	69
4. 2. 우리나라 폭염에 영향을 주는 기단과 그 예측	70
4. 3. 폭염 예측 방법	76
4. 4. 극한의 기온(40℃ 이상) 예측과 일교차 활용법	84
4. 5. 폭염의 시작/종료단계 예보를 위한 흐름도	91

5. 북태평양고기압 가장자리에서 발생하는 중부지방 집중호우 예보	95
5. 1. 중부지방 집중호우 발생 현황	95
5. 2. 중부지방 집중호우 발생 메커니즘과 유형	96
5. 3. 북태평양고기압 가장자리 분석	100
5. 4. ‘하층제트형’ 집중호우 예보	104
5. 5. ‘중규모저기압형’ 집중호우 예보	115
5. 6. 중부지역 집중호우 예보 판단 흐름도	120

※ 《Why? How!》 제2권 ‘여름예보 사례분석’과 연계된 내용은 【】로 표시함.

예시) 【’20년 1번 사례】: ‘여름예보 사례분석’의 2020년 1번 사후분석 내용을 참고

여름 예보

1. 호우 분석 가이드



1. 호우 분석 가이드스

1. 1. 하층제트의 정의와 특징

동아시아에서 여름철 호우와 관련한 연구에서 빠질 수 없는 요소가 바로 하층제트이다. 하층제트는 700hPa 이하 층에서 25kts(12.5m/s) 이상으로 부는 강풍을 일컫는다. 단순히 25kts 이상의 모든 바람을 통용하지 않으며, 온난이류를 동반한 경우를 하층제트라고 한다. 결국, 우리나라에서는 남풍의 풍계를 갖는 25kts 이상의 바람 대부분을 하층제트라고 할 수 있으며, 겨울철 북서풍의 강풍을 하층제트라고 하지 않는다. 하층제트는 많은 양의 수증기와 저위도의 열을 운반하므로 집중호우의 가장 중요한 기작이 된다. 본 장에서는 하층제트에 동반된 호우 구조와 특징을 활용해 호우지역을 찾는 방법에 대해 알아보겠다.

1. 1. 1. 호우와의 높은 관련성과 일변화

우리나라를 포함한 동아시아의 호우는 하층제트와 밀접한 관련이 있다. 일본의 장마인 바이유(Baiu) 기간의 호우를 연구한 Matsumoto(1973)는 하층제트의 풍속이 강우강도와 비례함을 밝혔으며, 특히 집중호우와 상관관계가 높음을 제시하였다. 중국과 대만의 장마인 메이유(Mei-Yu) 기간의 호우를 연구한 Chen and Yu(1988)는 하층제트가 관측될 때, 호우 발생률이 91%로 매우 높음을 보였다. 우리나라에서는 황승언과 이동규(1993)가 장마기간 중 호우 발생 시 하층제트가 88.2% 관측됨을 제시했다. 이상의 연구들을 종합해 볼 때, 우리나라를 포함한 동아시아에서 발생하는 여름철 호우는 약 90% 안팎이 하층제트와 관련되어 있다고 할 수 있다.

이 하층제트는 행성경계층고도 부근에 위치하기 때문에 일변화(Diurnal cycle)가 발생한다(Wexler, 1961). 낮에는 일사에 의한 지면 가열로 행성경계층고도가 높아지고 난류에 의한 마찰 효과가 커지지만, 야간에는 지표 부근이 안정화되어 마찰력이 줄어들면서 하층제트의 풍속이 증가하게 된다. 특히, 야간에는 마찰 효과가 없는 상태에서 남에서 북으로 많은 수증기와 고열의 공기가 이동하는데 반하여 대기의 온도는 하강하므로 유입되는 수증기량은 많고, 담을 수 있는 수증기량은 줄어들어 더 많은 강수가 나타난다.

이런 낮과 밤의 풍속 차이와 대기의 기온 변동은 고위도로 수송되는 수증기와 에너지량에 큰 차이를 만들어 비가 내리는 시점에 따라 호우의 빈도와 강수량의 차이가 발생한다. 하층제트를 동반한 호우발생 빈도 연구에서 늦은 밤에서 이른 아침 사이에 발생한 호우가 낮에 발생한 호우보다 최소 25% 이상 많은 것으로 조사된 바 있으며, 비슷한 시스템으로 발생한 호우일 경우에도 야간에 강수량이 더 많은 것으로 알려져

있다(Hoecker 1963, Hoecker 1965, Bonner 1968, Augustine and Caracena 1994, Mitchell et al., 1995).

1. 1. 2. 상·하층제트 커플링 호우 구조

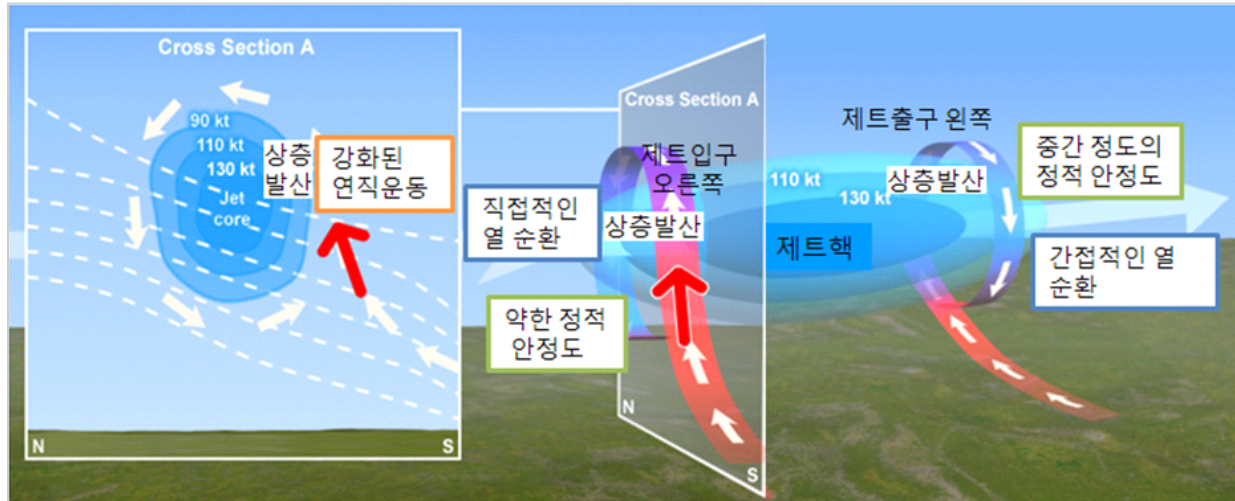


그림 1-1. 상층제트와 하층제트의 커플링 형태로 나타나는 직접적인 열 순환의 모식도(Uccellini and Kocin, 1987)

그림 1-1과 같이 지면 부근에서 형성된 하층제트는 일정 각도로 상승하면서 북쪽으로 이동한다. 그 이유는 높은 기온을 가진 공기이면서 수증기를 많이 함유하고 있어 같은 고도의 북쪽 공기보다 가볍기 때문이다. 같은 온도에서 기체의 H_2O 는 건조 공기보다 0.633 비율로 가볍다.

북쪽으로 이동하던 하층제트는 상층제트의 발산 구역 하부로 이동한 후 급격하게 상승운동으로 전환된다. 그 이유는 하층제트를 이루는 공기가 포화된 상태에서 많은 양의 수증기를 가지고 있어 상층의 발산이 더 쉽게 상승 운동으로 전환되기 때문이다. 즉, 높은 온도에서 많은 양의 수증기를 가진 공기는 대기 중으로 잠열을 많이 방출하기 때문에 주변 대기의 기온보다 높아 쉽게 빠른 상승 운동이 나타나게 된다. 결국, 포화된 상태에서 하층제트가 북쪽으로 이동하는 상황이라면, 상층제트의 발산 구역이 호우 구역을 결정하는데 중요한 열쇠가 된다고 할 수 있다.

호우는 대부분 상층제트의 입구 오른쪽 발산 구역에서 나타나는데, 하층제트가 이 구역의 하부에서 급격한 상승 운동으로 전환되어 제트의 북쪽 상공으로 이동한다. 따라서 저위도 지상 부근의 높은 에너지가 고위도의 상부 대기로 이동하게 되는데 이런 형태를 직접 열순환(Direct circulation)이라고 한다. 평면의 일기도에서 상층제트가 위치한 200hPa 일기도와 하층제트가 위치한 850hPa 일기도를 중첩해서 보면 두 제트가 직각 형태로 교차되는 모습이 보이는데, 이 형태를 상·하층 제트커플링이라고 한다.

1. 2. 하층제트의 상승 운동을 이용한 호우 구역 해석

1. 2. 1. 수평 일기도 상에서의 재해석

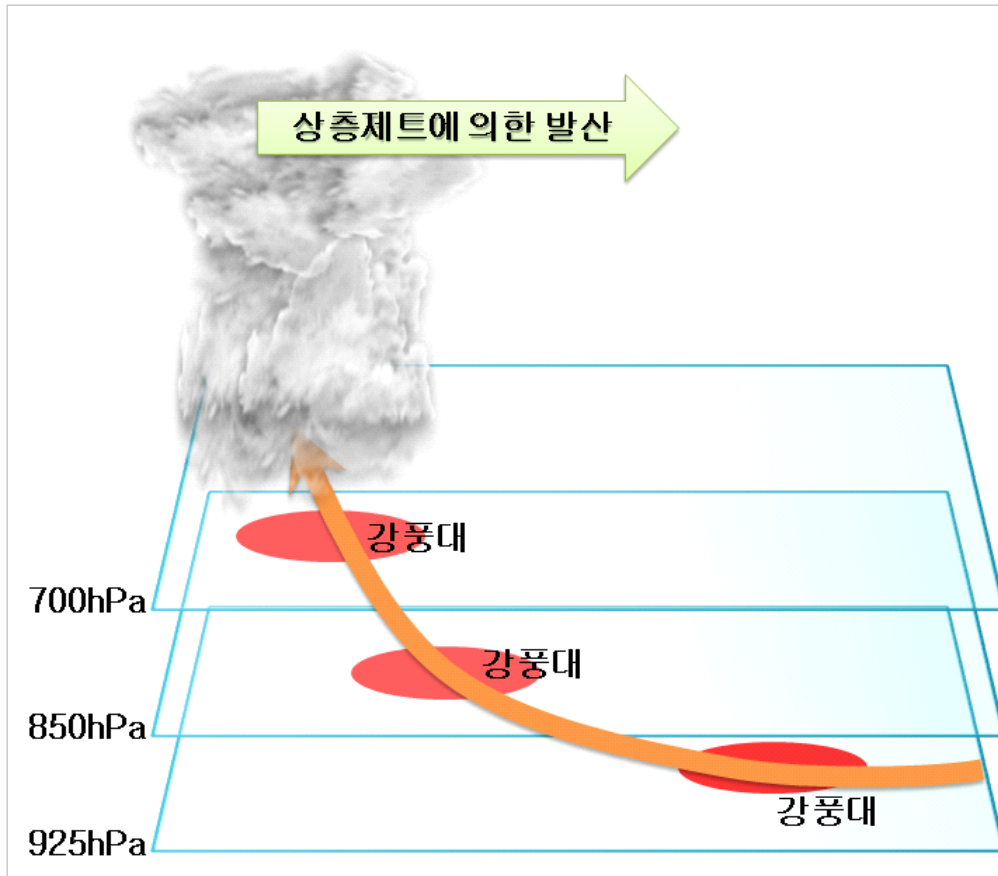


그림 1-2. 하층제트의 연직 이동 경로와 대류 구름대의 위치를 나타내는 모식도

하층제트는 수평적으로 이동하지 않는다. 그림 1-2와 같이 남쪽 저위도에서 지표 부근 대기를 통과한 후 925hPa, 850hPa, 700hPa 고도를 통과하고 상층제트 발산 구역의 하부에 들어서면서 강한 연직 운동으로 전환된다. 이런 3차원의 기류 움직임을 고려하여 각 등압면 고도에서 호우 구역을 찾아보면, 850hPa의 가장 강한 풍속 지역의 북쪽에서 강한 대류성 구름대와 호우가 나타난다고 해석할 수 있다.

그림 1-3은 하층제트에서 발생하는 호우의 연직운동을 재해석한 모식도이다. 남쪽에서 북쪽으로 이동하는 하층제트는 지표 부근의 공기와 밀도 차이가 발생하여 850hPa 안팎의 고도에서 남에서 북으로 기울어진 전선대가 형성된다. 이 전선대의 경사면을 타고 계속 북쪽으로 이동하므로 850hPa 수평 일기도에서 강풍 중심은 대류 구름대의 남쪽에 위치하게 된다. 여기서 호우 지역을 분석하는 실마리를 찾을 수 있다.

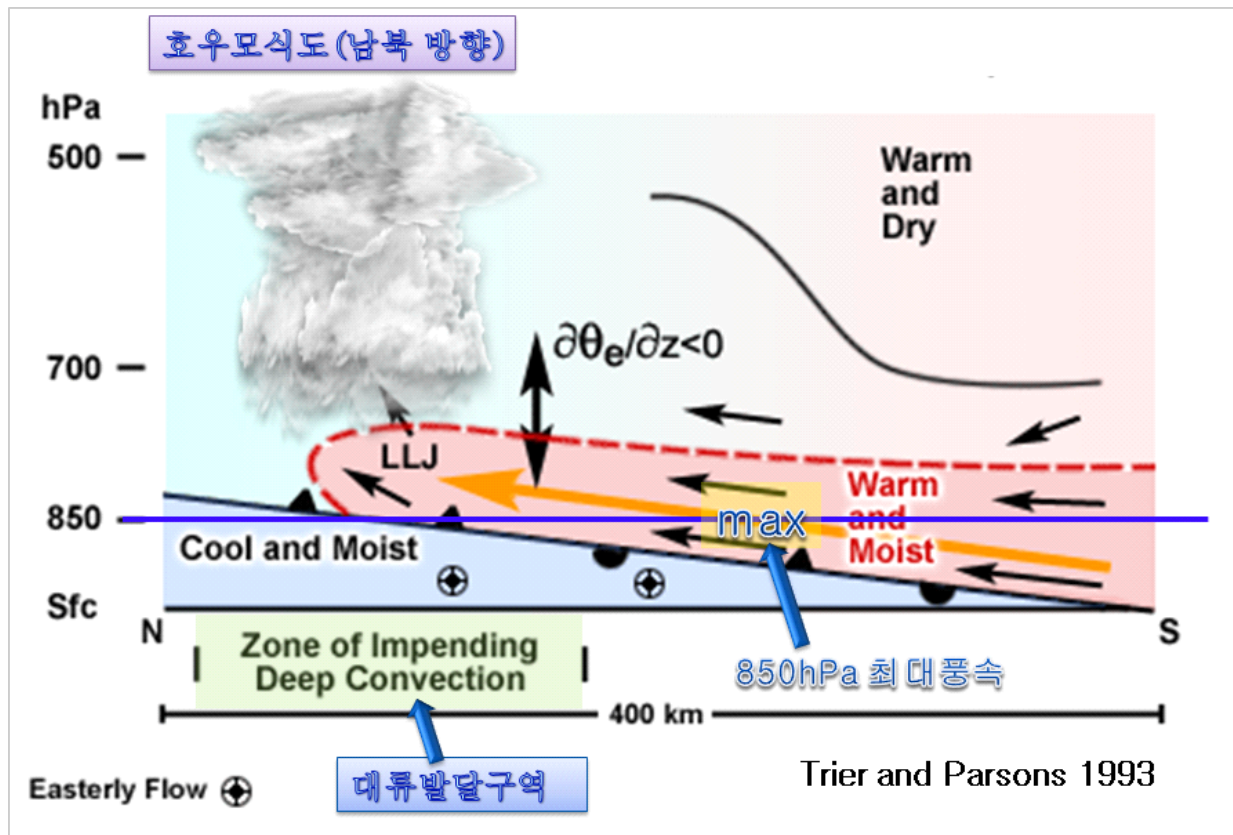


그림 1-3. 남쪽에서 북쪽으로 이동하는 하층제트에 의한 대기의 연직 구조 분포

그림 1-4는 실제 호우가 발생한 사례의 연직바람분포를 그림 1-3의 모식도와 같이 보여준다. 지상에서는 동풍의 바람이 불고, 1차 최대풍이 500hPa 고도 부근에서 나타나며, 이후 상공으로 이동할수록 풍속이 현저히 줄어드는 모습이 보인다. 다시, 200hPa 고도에서 상층제트에 의한 2차 최대풍이 나타난다.

즉, 지상 부근의 대기와 섞이지 않으면서 하층제트에 의해 북쪽으로 이동하는 공기에 의해 지상과 지표 부근 대기는 상부의 대기에서 관측되는 풍향(남서류)과 다른 동풍이 나타난다. 850hPa 하부의 전선면을 따라 북쪽으로 상승하는 하층제트에 의해 상공으로 이동할수록 풍속이 증가하는데, 500hPa 부근에서 최대 풍속이 나타난 후 풍속이 감소한다. 그 이유는 수평적 바람 성분이 500hPa 고도 부근에서 연직 운동 성분으로 전환되기 때문이다. 상승 운동이 대부분인 상황에서 500~200hPa 고도에는 풍속이 현저히 감소한다. 이후 상층의 제트 발산구역이 있는 대류권계면 부근 고도인 200hPa에서는 다시 풍속이 증가하는 모습이다.

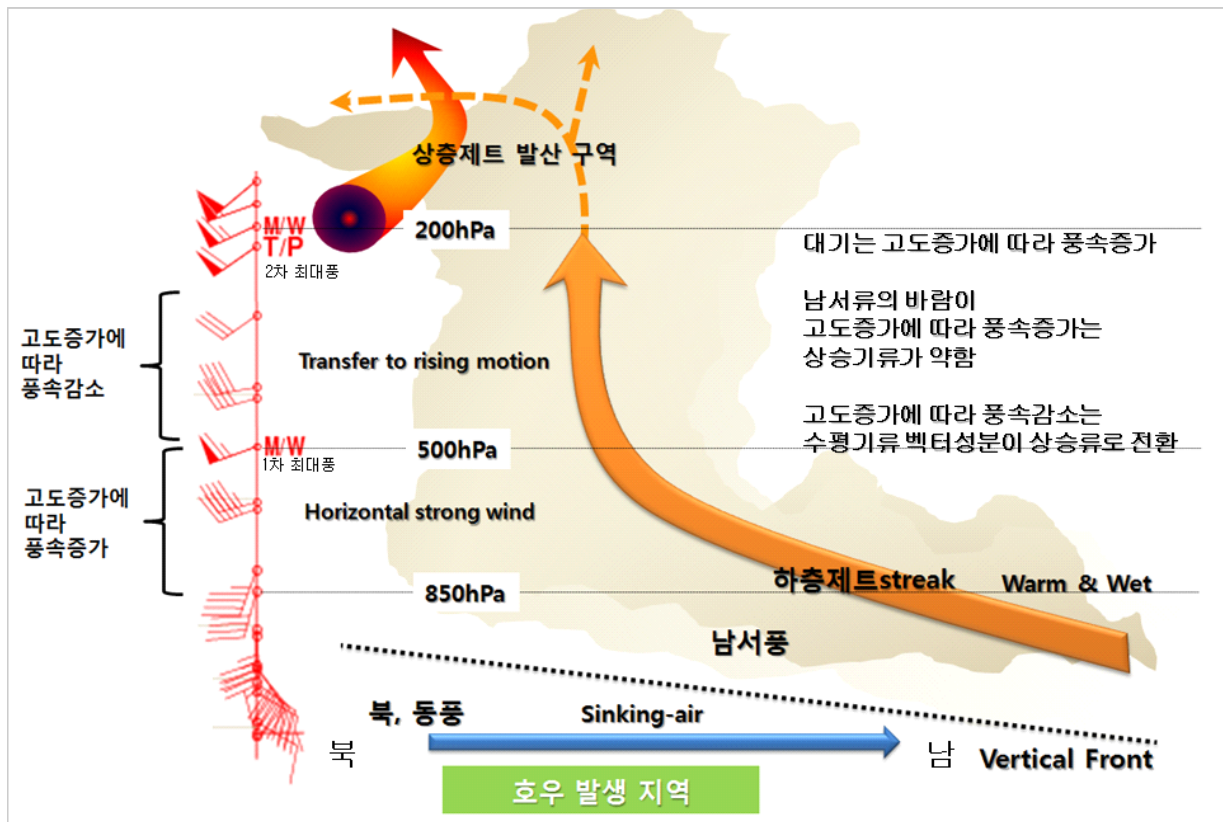


그림 1-4. 강한 대류성 강수대가 발생한 지역의 연직 바람과 그림 1-3의 중첩도

1. 2. 2. 호우구역 찾기

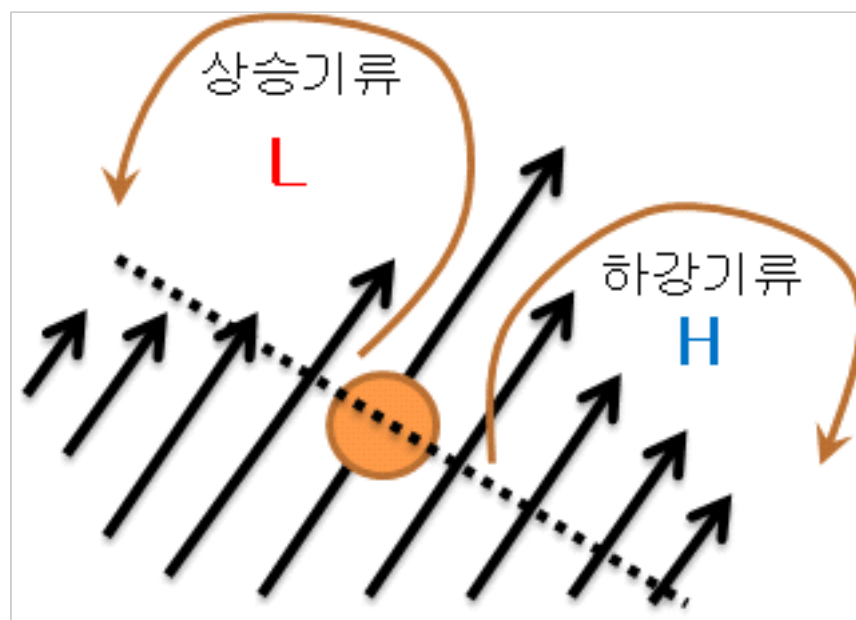


그림 1-5. 850hPa 유선장을 이용한 기류의 수렴과 발산구역 찾기
(주황색 원: 가장 강한 풍속이 위치한 지역)

그림 1-5는 850hPa 고도에 하층제트가 위치한 지역에서 수렴과 발산이 발생할 수 있는 지역을 모식도화한 것이다. 화살표와 같이 남에서 북으로 이동하는 기류가 존재할

때, 주황색의 강풍 중심을 통과하는 가장 강한 바람이 부는 화살표(vector를 의미)가 위치하고, 왼쪽과 오른쪽으로는 풍속이 서서히 감소한다. 이런 형태일 경우, 수평적 바람시어에 의해서 강풍 중심이 지나는 화살표의 왼쪽으로는 저기압성 회전에 의한 하층 수렴이, 오른쪽으로는 고기압성 회전에 의한 하층 발산이 나타난다. 따라서 공기가 하층대기에 모여서 수렴에 의한 포화가 나타날 수 있는 구역은 강풍 중심을 지나는 유선의 왼쪽 지역이라고 할 수 있다.

이 왼쪽 구역에서도 앞에서 보여준 그림 1-3과 1-4의 모식도를 참고하면, 그림 1-5에서 보여준 점선의 남쪽 구역은 하층제트의 주 기류가 850hPa 고도면을 뚫고 상승하지 못한 구역이라고 해석할 수 있다. 그에 반하여 점선의 북쪽은 850hPa 고도면을 뚫고 상승 운동이 일어날 수 있는 구역이다. 따라서 호우 구역은 850hPa 최대 풍속을 지나는 유선을 기준으로 그 북쪽과 북서쪽 영역으로 제한되어 나타난다.

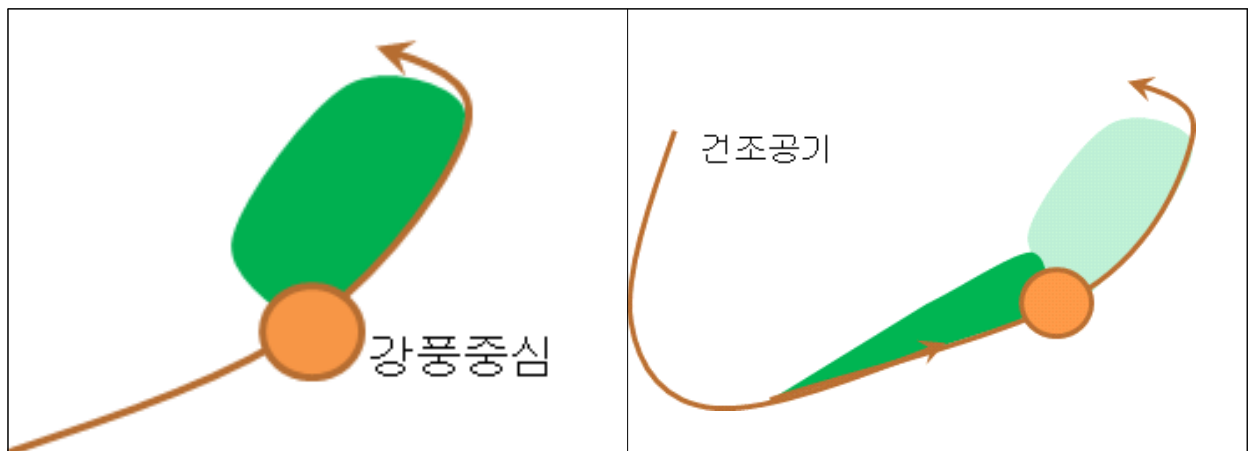


그림 1-6. 850hPa 풍속과 유선을 이용한 호우구역 찾는 방법(호우 탐지 방법. 한상은 등 특허등록(2012년))

(좌) 하층제트 중심을 기준으로 그 북쪽과 북서쪽에서 발생하는 호우구역

(우) 하층제트 중심을 기준으로 그 남쪽에서 발생하는 호우구역을 의미

그림 1-6은 850hPa 고도장에서 등풍속의 강풍 중심과 유선을 이용한 호우 구역을 찾는 방법이다. 앞에서 설명한 바와 같이 850hPa 하층제트에서 가장 강한 중심 풍속을 찾는다. 이 중심을 지나는 유선을 기준으로 그림 1-6의 왼쪽과 같은 호우구역을 찾을 수 있다. 이 호우구역은 하층제트 전면형 호우로 설명할 수 있으며, 전체 하층제트에 의한 호우 중 90% 안팎이 이에 해당한다(손에 잡히는 예보기술, 2014). 북쪽의 경계면은 유선의 방향이 휘어지는 구역이며, 풍속이 15kts 이상이다. 풍향이 휘고 풍속이 줄어드는 이유는 북쪽에 다른 기단의 경계가 위치하는 것을 의미하므로 더 이상 기류가 북쪽으로 이동하기 어려워 호우 구역의 북쪽 경계가 된다.

그림 1-6의 오른쪽은 하층제트 후면형 호우 형태인데, 모식도에서는 영역의 넓이가 실제보다 상당히 넓게 그려졌지만, 대부분은 하층제트 중심의 남쪽으로 그려진 유선의

위치와 거의 일치할 정도로 남북의 폭은 작다. 이 유형은 상층 저기압에 의한 건조공기가 남하하여 마치 한랭전선과 같은 대류성 구름대를 만들 때 나타난다. 따라서 건조공기라고 쓰인 곳에 저기압이 위치하고 그 저기압을 따라 그림과 같이 기류가 이동할 때 호우가 발생하므로 반드시 건조공기 침투가 있는지 파악해야 한다. 하층제트 후면형 호우는 그 폭이 좁아 강수 강도는 강하나 지속성은 적다. 그러나 정체할 경우에 국지적인 호우가 나타날 가능성이 크다. 만약 우리나라 서쪽으로 상층 저기압이 위치한다면 전면형 호우 구역과 후면형 호우 구조가 동반되는 경우가 있으니, 분석에 유의해야 한다.

1. 2. 3. 호우의 잠재성(potential)

우리나라에서 호우가 발생하기 위해서는 기본적인 임계값이 필요한데, 가강수량(PW)은 50 이상, 850hPa 상당온위는 333K 이상, KI는 30 이상이다.

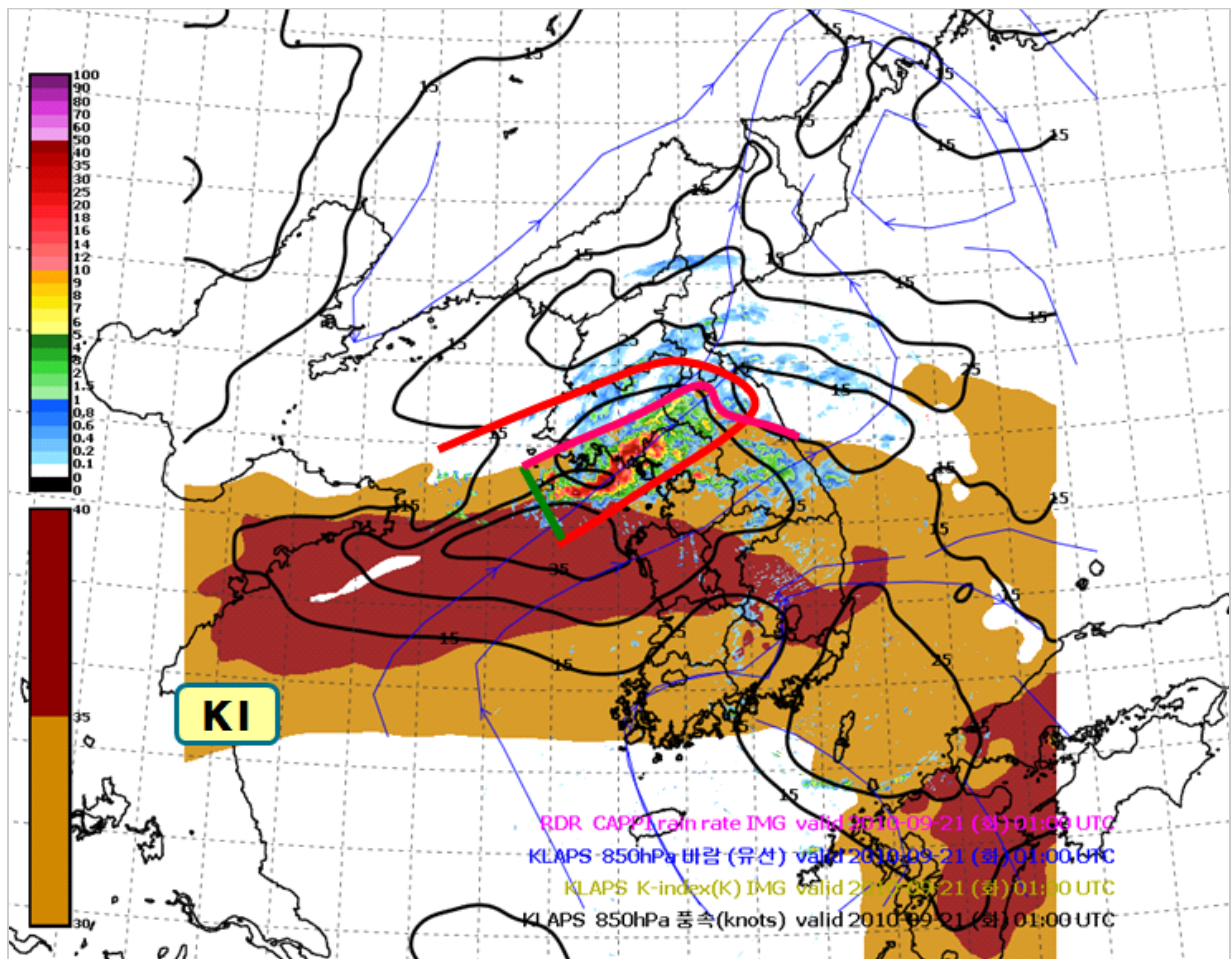


그림 1-7. 2010년 9월 21일 10시 기준 레이더 영상과 850hPa 기류 중첩
(검은색 실선: 등풍속선, 채색된 영역: KI 30 이상, 파란색 화살표 연결선: 유선)

그림 1-7의 실제 사례에서 가장 강한 바람은 태안반도 서쪽 해상에 위치한다. 이 중심 풍속을 지나는 유선을 따라 북쪽으로 이동하면 강원도 북쪽에서 유선이 휘어지는 모습이

나타난다. 여기까지가 호우구역의 북쪽 영역에 해당한다. KI 30 이상의 값을 중첩하여 호우 영역을 설정하면, 교집합이 되는 붉은색 영역이 호우구역과 일치함을 알 수 있다.

1. 3. 분석 시 주의사항

기본적인 호우구조를 이해하고, 그림 1-6에서 제시한 하층제트 전면형 혹은 후면형 호우 구조가 나타난다 하더라도 실제로 호우가 발생하지 않을 가능성도 있다. 물론, 예측보다 더 강한 호우가 발생하는 경우도 있다. 따라서 하층의 기온과 수증기량(이슬점 온도)에 대한 면밀한 검토와 모델과의 차이 분석이 호우 예측에 반드시 중요하다.

1. 3. 1. 하층제트 후면형 호우구조 예측 시 중요 고려사항

하층제트 후면형 호우구조는 큰 규모로 상승운동이 일어나지 않는다. 대부분 매우 폭이 좁은 (시, 군 단위) 긴 띠 형태의 스콜 라인에서 발생한다. 바람장의 수렴 모습을 보면, 한랭전선 형태의 좁고 강한 띠 모양이다. 따라서 활성화되기 위해서는 반드시 수반되어야 할 사항이 있다.

① 강한 건조공기가 전선면의 북쪽에서 파고드는 모습이 나타나야 한다.

② ①의 조건이 뚜렷하지 않더라도, 한랭전선 형태의 찬 공기 유입이 전선면의 북쪽에 존재해야 한다.

그림 1-8은 하층제트 후면에서 호우가 발생할 것으로 예측하였으나 전선면이 활성화되지 않아 강수 오차가 컸던 사례이다【'19년 8번 사례】. 2019년 9월 11일 새벽에서 오전 사이 850hPa 고도의 저기압 중심이 중부지방을 통과하면서 하층제트 전면형 호우와 후면형 호우가 동시에 나타날 것으로 예상하여 중부지방에 최대 200mm 이상의 많은 강수량을 예상하였다. 그렇지만 충청북부는 실제 5~40mm의 강수량이 기록되면서 예측과 큰 차이를 나타냈다. 그 이유는 강수를 발생시킨 저기압의 특징이 동중국해상에서 북상한 열대저압부 형태로서 저기압 중심을 기준으로 그 서쪽과 북쪽에 차가운 공기나 건조공기가 존재하지 않았기 때문이다. 오히려 한랭전선 형태의 전선면 북쪽으로 남쪽보다 기온이 높은 온난공기가 위치하여 온난, 습윤한 하층제트를 상층으로 견인할 힘의 존재가 없었다. 결국 이 사례에서는 하층제트 전면형의 폭넓은 호우구역만 나타나면서 경기도에는 150mm 내외의 많은 비가 왔지만, 하층제트 후면의 호우구역은 활성화되지 않아 충청북부의 강수량은 예측과 큰 차이를 보였다.

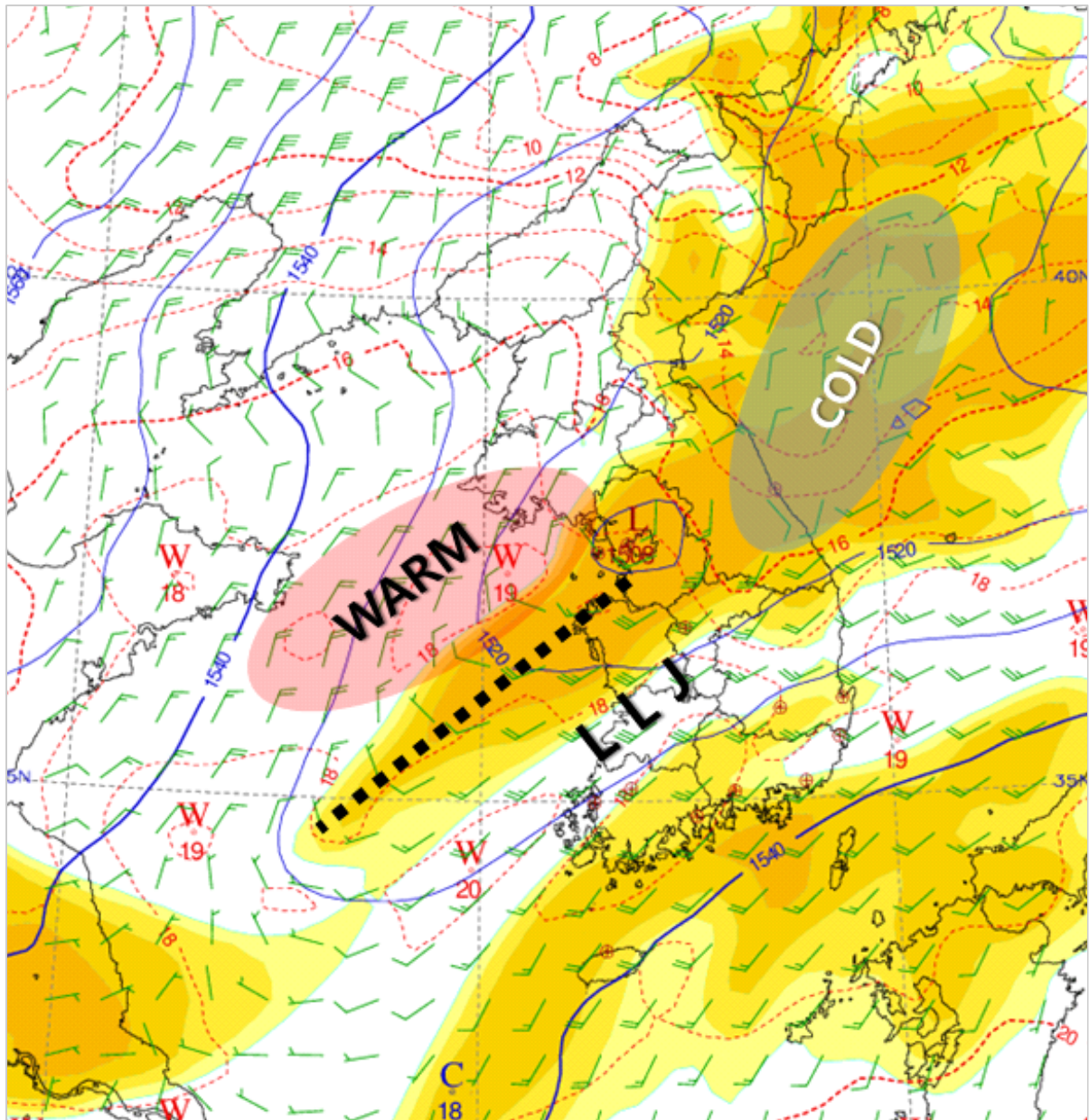


그림 1-8. 2019년 9월 11일 03시 UM 모델 초기장의 850hPa 바람과 기온 분포
(검은색 점선: 바람시어가 나타나는 전선)

참고문헌

1. 황승언, 이동규, 1993: 한반도에 발생한 호우와 하층제트의 관련성에 관한 연구. 한국기상학회지, 29(2), 133-146.
2. Augustine, J. A. and F. Caracena, 1994: Lower-tropospheric precursors to nocturnal MCS development over the Central United States. Wea. Forecasting, 9, 116-135.
3. AMS Glossary, 2000: AMS 전자기상사전.
<http://amsglossary.allenpress.com/glossary>
4. Bonner, W. D., 1968: Climatology of the low level jet. Mon. Wea. Rev., 96, 833-850.
5. Chen, G. T.-J. and C.-C. Yu 1988: Study of low-level jet and extremely heavy rainfall over northern Taiwan in the Mei-yu season. Mon. Wea. Rev., 116, 884-891.
6. Hoecker, W. H., 1963: Three southerly low-level jet streams delineated by the Weather Bureau special pilot network of 1961. Mon. Wea. Rev., 91, 573-582.
7. Hoecker, W. H., 1965: Comparative physical behavior of southerly boundary-layer wind jets. Mon. Wea. Rev., 93, 133-144.
8. Matsumoto, S., 1973: Lower tropospheric wind speed and precipitation activity. J. Meteor. Soc. Japan, 51, 101-106.
9. Mitchell, J. F. B., R. A. Davis, W. J. Ingram, and C. A. Senior, 1995: On surface temperature, Greenhouse Gases, and Aerosols: Models and Observations. J. Climate, 8, 2364-2386.
10. Uccellini, L. W., and D. R. Johnson, 1979: The coupling of upper and lower tropospheric jet streaks and implications for the development of severe convective storms. Mon. Wea. Rev., 107, 682-703.
11. Uccellini, L. W., and P. J. Kocin, 1987: The interaction of jet streak circulations during heavy snow events along the east coast of the United States. Wea. Forecasting, 2, 289-308.

《Why?How!》 제2권 ‘여름예보 사례분석’ 가이드스 연계 내용

- 1. 3. 1. 하층제트 후면형 호우구조 예측 시 중요 고려사항: 【'19년 8번 사례】

여름 예보

2. 일변화 특성을 고려한 여름철 강수 예보



2. 일변화 특성을 고려한 여름철 강수 예보

Why?

소나기를 제외한 여름철 강수는 대부분 새벽부터 오전 사이에 집중되며, 특히 이 시간대의 강수는 집중호우로 이어지는 경우가 많다(Lim, 1998). 이러한 강수의 일변화 특성은 왜 나타나는 것인지, 그리고 여름철 강수 예보 시 어떤 점을 고려해야 하는지 알아보고자 한다.

2. 1. 일변화란?

지구는 하루에 한 번 자전을 한다. 지구의 자전 때문에 어느 한 지점에서 낮에는 태양복사 에너지의 크기가 최대가 되고, 밤에는 최소가 되면서 규칙적으로 일주기(Diurnal cycle)의 진동을 하게 된다. 그림 2-1의 AWS 시계열을 보면 알 수 있듯이 기온(빨간색 실선)은 뚜렷하게 일주기 진동을 하는 기상요소이다. 일주기의 진동은 결국 기온의 일변화로 나타난다.

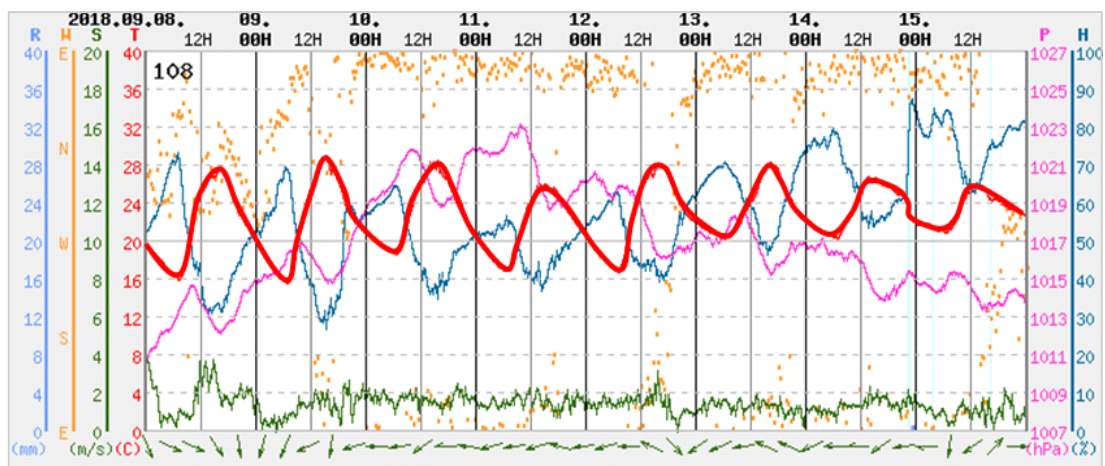


그림 2-1. AWS로 관측한 서울(지점번호: 108)의 2018년 9월 8~15일 기상요소들의 시계열

2. 2. 시간대별 강수 특징

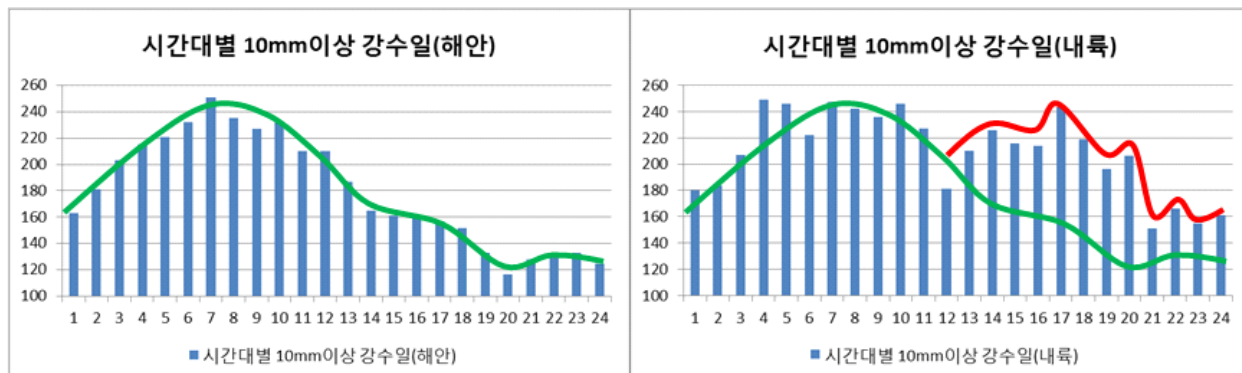


그림 2-2. 1990~2017년 5~9월 시간대별 10mm 이상 강수일수
(좌) 인천, 서산, 목포, 부산, 울산, 창원, 제주 총 7개 지점(해안)
(우) 서울, 수원, 청주, 대전, 춘천, 광주, 안동, 대구 총 8개 지점(내륙)

그림 2-2는 시간대별 10mm 이상의 강도를 갖는 강수일수를 해안과 내륙지역으로 분리해서 나타낸 그래프이다. 강수일수의 절댓값이 아닌 시간대별 차이에 주목해서 보게 되면 해안 지점을 나타낸 그림 2-2(좌)에서 새벽부터 오전 사이에 강수일이 집중되고, 오후부터 자정까지는 빈도가 현저하게 줄어드는 것을 알 수 있다(초록색 실선). 내륙 지점을 나타낸 그림 2-2(우)에서도 새벽부터 오전 사이에 강수가 집중되고 있으나(초록색 실선) 해안과는 다르게 오후에도 강수가 집중되고 있다(빨간색 실선). 내륙의 오후 강수가 14시부터 20시에 집중된 것을 보면 열적 불안정에 의한 소낙성 강수의 결과로 해석할 수 있다. 결국 내륙의 오후 강수를 소낙성 강수로 여기고 배제한다면 해안과 내륙 지점 모두 강한 강수가 집중되는 시간대는 새벽부터 오전 사이인 것을 알 수 있다.

이러한 특징들은 1시간 최대 강수량의 극값 발생 시간대에서도 나타난다. 표 2-1에서 내륙 지역인 청주의 1시간 최대 강수량 순위 자료를 보면 1위부터 5위까지 발생시각이 새벽부터 오전 사이 시간대와 오후 시간대 모두 골고루 나타나고 있다. 하지만 해안 지역인 부산을 보면 오직 새벽부터 오전 시간대 내에서만 극값이 나타나는 것을 알 수 있다. 내륙과 해안의 시간대별 강수 특징이 그대로 반영된 결과이다.

표 2-1. 청주와 부산 지점의 1시간 최대 강수량(mm) 순위 극값과 발생시각

지점		1위		2위		3위		4위		5위	
		값	시각	값	시각	값	시각	값	시각	값	시각
131	청주	91.8	07:11	64.0	17:24	63.0	16:22	62.7	16:50	62.0	10:20
159	부산	106.0	00:19	96.0	08:22	90.0	07:33	89.0	06:40	86.7	08:53

앞서 언급한 기온의 일변화를 고려하면 강수가 집중되는 새벽부터 오전 사이는 기온이 가장 낮은 시간대이고, 반대로 기온이 가장 높은 오후부터 밤 시간대에는 강수 빈도가 낮은 것을 알 수 있다. 과연 기온의 일변화는 여름철 강수 발생에 어떤 영향을 미치는가?

2. 3. 첫 번째 특성, “하층제트는 야행성이다.”

2. 3. 1. 하층제트와 호우

하층제트(Low-Level Jet)는 일반적으로 700hPa 아래에서 25kts 이상의 풍속으로 나타나며, 여름철 우리나라로 유입되는 남서풍의 하층제트는 다량의 수증기와 열을 이류시키는 역할을 한다. 하층제트는 대기 하층으로 수증기를 공급하기 때문에 강한 대류성 강수를 발생시킬 수 있어, 여름철 호우 발생에 있어서 매우 중요한 인자이다. 우리나라 장마기간 중 호우 발생 시에 25kts 이상의 하층제트가 존재할 확률은 88.2%로 높은 연관성이 있다(황승언, 1993).

2. 3. 2. 하층제트의 일변화

이러한 하층제트도 시간대별로 발생 빈도가 다르게 나타난다. 그림 2-3은 광주 고층관측 지점의 03시, 09시 15시, 21시 시간대별 850hPa 하층제트(25kts 이상) 발생 빈도 그래프이다. 6월에서 9월 사이 하층제트의 빈도는 새벽부터 오전 시간대인 03시와 09시에 높게 나타나고, 오후부터 밤 시간대인 15시와 21시에는 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 특히 호우가 빈번하게 발생하는 7월과 8월에는 그 차이가 더욱 뚜렷하게 나타나는데, 앞서 그림 2-2에서 살펴보았던 시간대별 강수 빈도 자료와 같은 결과를 보여주고 있다.

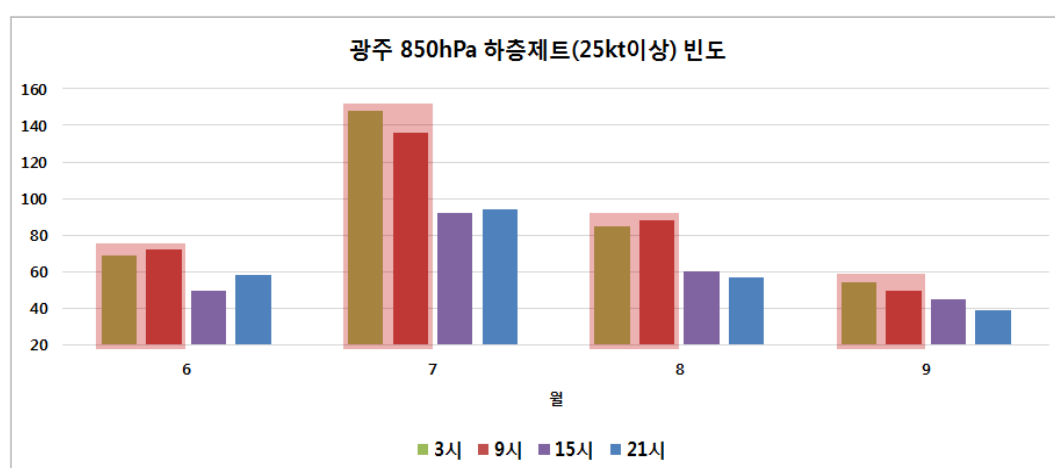


그림 2-3. 1998~2017년 6~9월 광주 지점의 시간대별 850hPa 하층제트 발생 빈도

통계 자료를 통해 두 가지 사실을 알 수 있는데, 첫 번째는 10mm 이상의 강도를 갖는 강수는 하층제트와 관련이 깊다는 것이고, 두 번째로 더욱 중요한 사실은 하층제트는

기온의 일변화에 영향을 받는다는 것이다. 결국 하층제트는 기온이 높은 시간대에는 약화되고 기온이 낮은 시간대에는 강화되는 특징을 보여준다.

2. 3. 3. 경계층과 하층제트

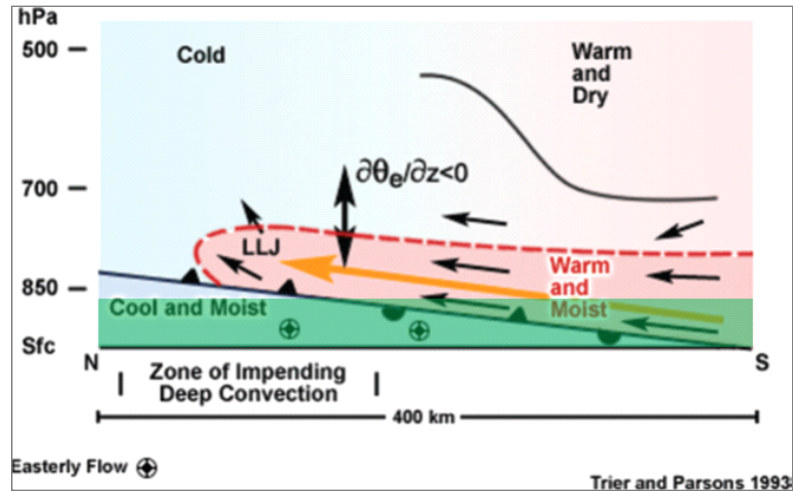


그림 2-4. 하층제트의 남북방향 연직 구조에서의 경계층 위치

그림 2-4는 하층제트의 남북방향 연직구조를 나타낸 그림이며, 경계층 깊이를 약 1km로 가정하여 초록색으로 채색하였다. 여기서 문제는 하층제트가 발생하는 고도에 경계층이 존재하게 된다는 것이다. 경계층 내부에는 혼합층이 존재하는데 이 혼합층 내에서는 에디(Eddy)의 운동이 활발해 마찰력이 작용하게 된다. 특히 경계층이 높게 발달할수록 에디의 운동은 더욱 활발해지고 마찰력도 더욱 커진다.

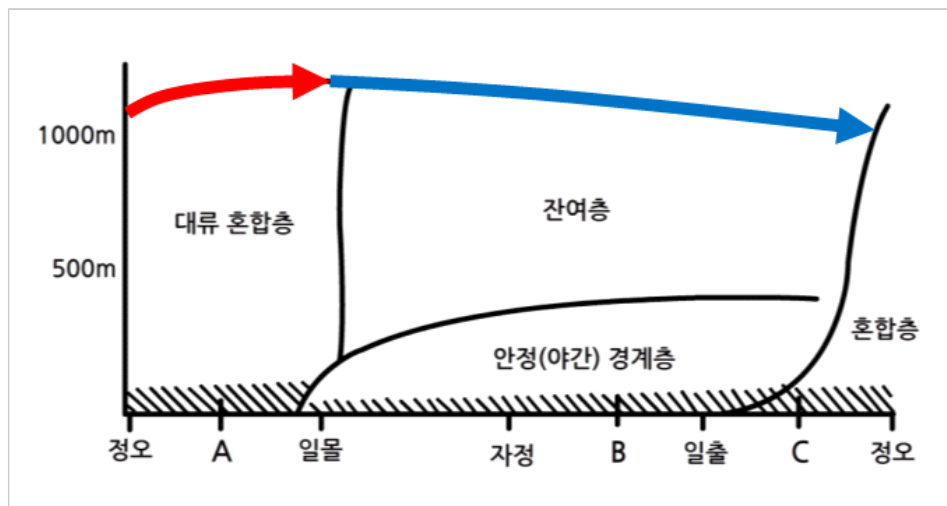


그림 2-5. 대류 혼합에 의한 경계층의 일주기 변동(Stull, 1988)

맑고 바람이 약한 대기 상태에서는 낮 동안 지표면의 일사 가열에 의해 대류가 강화된다. 그림 2-5와 같이 낮 동안은 대류에 의해 대류 혼합층이 깊게 발달하면서 경계층의 상부가 높아지게 된다(빨간색 화살표). 반대로 일몰 후 야간에는 대류에 의한

혼합이 약화되면서 경계층의 상부가 점차 낮아지게 된다(파란색 화살표). 이와 같이 기온의 일변화에 따라 경계층의 높이도 낮과 밤의 차이를 보이게 된다.

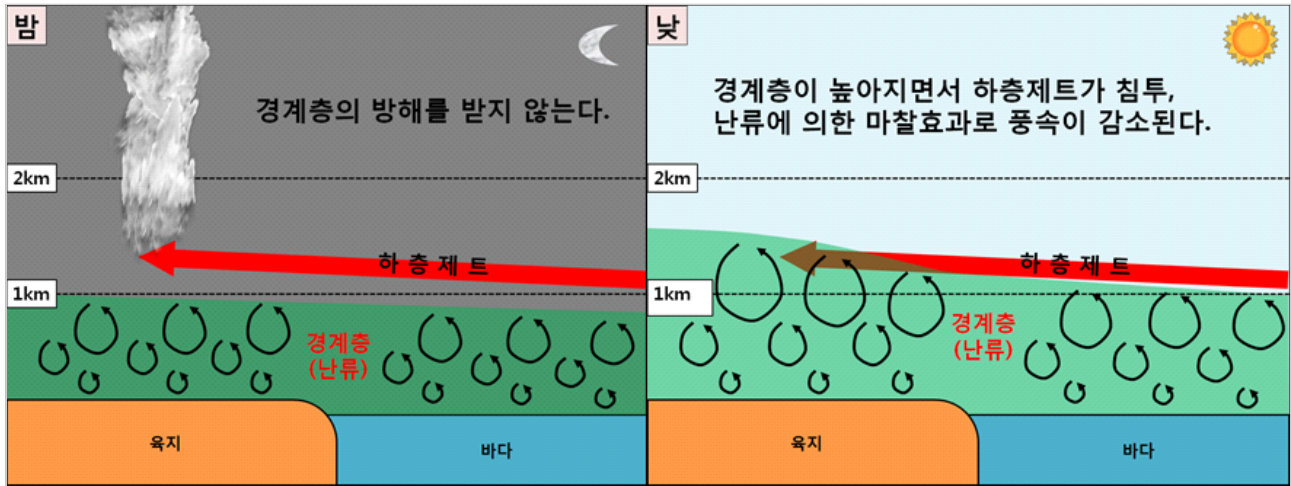


그림 2-6. 밤과 낮의 경계층 높이 변화와 하층제트의 위치

그림 2-6에서는 밤과 낮의 경계층 높이 변화와 하층제트를 단순화하여 나타냈다. 그림과 같이 하층제트가 1km 높이 바로 위에 위치한 상황에서, 밤과 낮의 변화를 생각해보자. 먼저 밤에는 경계층 상부의 높이가 1km 미만으로 낮아지면서 하층제트는 경계층에 의한 마찰의 영향을 받지 않아 풍속이 감소되지 않으므로 지균풍(기압경도력+전향력)에 가까운 풍속을 유지하게 된다. 하지만 낮에는 경계층 내의 혼합이 활발해지면서 그림과 같이 경계층 상부의 높이가 1km 이상으로 높아지면서 하층제트는 경계층 내부로 침투하게 되고 마찰력이 작용해 풍속이 감소하게 된다. 결국 낮 시간대에는 경계층의 마찰 효과로 하층제트의 발생 빈도가 줄어들게 되고, 호우 가능성도 낮아지게 된다.

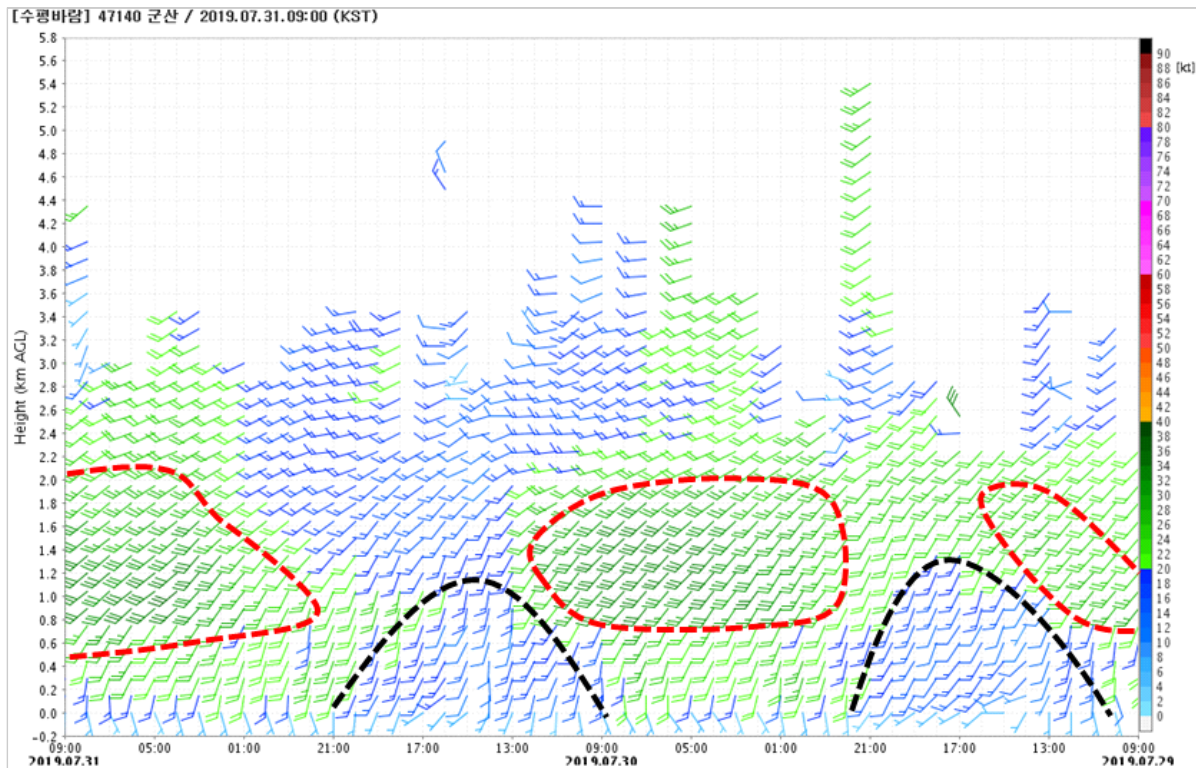


그림 2-7. 2019년 7월 29~31일 군산 연직바람(빨간색 점선: 25kts 이상의 하층제트 영역)

그림 2-7의 실제 사례에서 군산 연직바람 관측자료를 보면 1km 고도 부근으로 하층제트가 나타나는 것을 알 수 있으며, 빨간 점선으로 표시한 야간(21~09시) 시간대는 풍속이 강화되고, 검정 점선으로 나타나는 주간(09~21시) 시간대에는 약화되는 경향이 뚜렷하게 나타난 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 2-6의 모식도에서 나타낸 것처럼 경계층은 해상보다 육상에서 더욱 높게 발달하기 때문에 육상에서의 마찰력이 더 크게 작용한다. 여름철 낮에 해상에서 발달한 강수대가 육상으로 이동하는 경우 급격하게 약화될 때가 있는데 이러한 이유 때문이다.

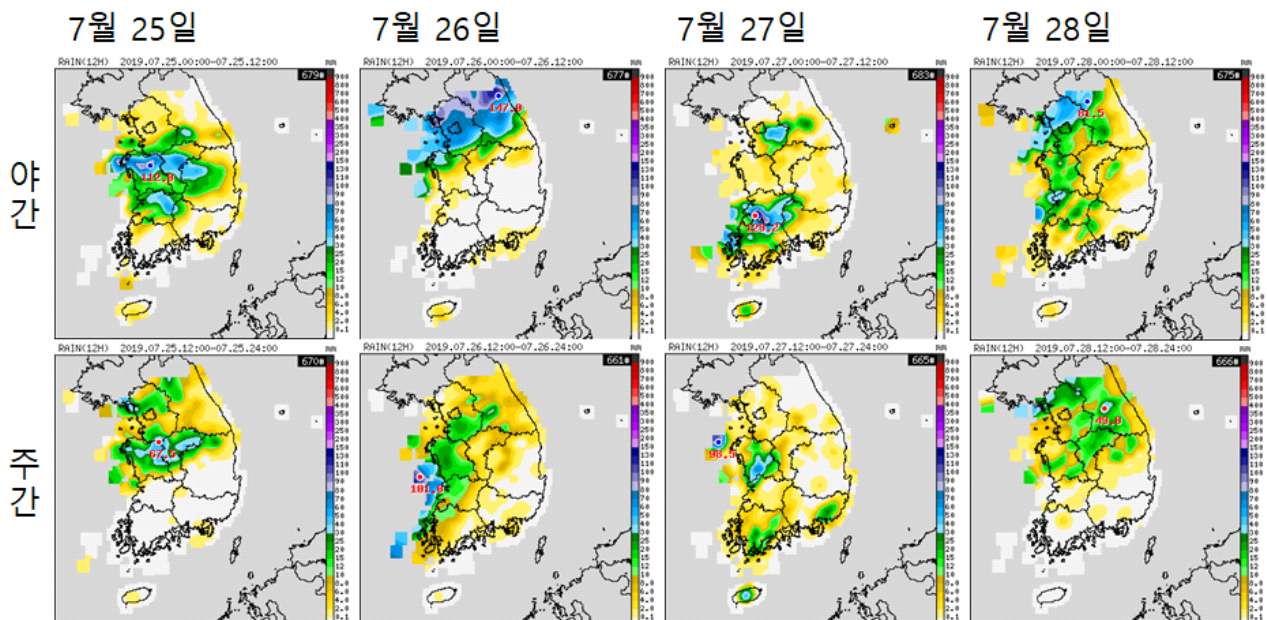


그림 2-8. 2019년 7월 25~28일 야간(00~12시)과 주간(12~24시) 시간대별 누적강수량 분포

그림 2-8은 정체전선의 영향으로 중부지방에 많은 비가 내렸던 7월 25~28일 강수량 분포도이다. 야간(00~12시) 시간대에는 조직적으로 많은 양의 강수가 집중된 형태로 나타났고, 주간(12~24시) 시간대에는 해상으로만 일부 많은 양의 강수가 나타났으며, 육상에서는 산발적인 분포로 적은 양의 강수만 기록된 것을 확인할 수 있다. 앞서 설명한 하층제트의 특성이 그대로 반영된 결과이다【'19년 5번 사례】.

2. 3. 4. 하층제트의 일변화를 고려한 강수 예보

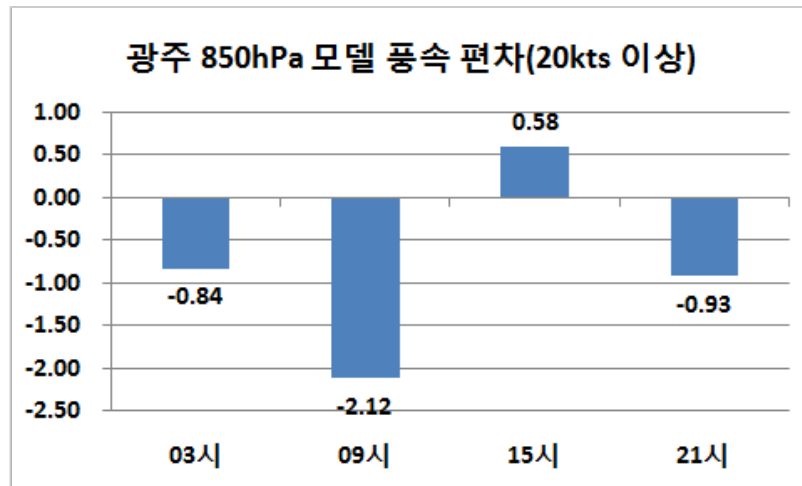


그림 2-9. 2016~2018년 6~9월 광주 시간대별 850hPa 모델 풍속 편차

앞서 통계 자료들을 통해 하층제트의 풍속은 기온이 높은 오후~밤에 약화되고 기온이 낮은 새벽~오전에는 강화됨을 확인했으며, 시간당 10mm 이상의 강도를 갖는 강수의 시간대별 빈도 또한 하층제트의 발생 빈도와 유사한 시간대에 나타나는 것을 확인했다. 따라서 하층제트가 강화되는 새벽~오전 시간대에는 호우 가능성이 높음을 인지하고 예보를 해야 하며, 반대로 오후~밤 시간대에는 호우 가능성이 낮음을 항상 염두 해야 한다.

이러한 특성을 고려하더라도 실제 예보를 할 때는 수치모델의 결과물을 참고해야하는데, 문제는 지표면의 영향을 크게 받는 경계층의 경우 수치모델의 모의 성능이 좋지 못하기 때문에 하층제트의 모의 성능도 영향을 받을 수밖에 없다. 그림 2-9는 2016~2018년 6~9월 기간 수치모델의 광주 지점 850hPa 예상(+18~36시간) 풍속을 실제 고층관측 자료로 검증한 결과이다. 모델은 UM전구 N768을 사용했으며, 하층제트와 가까운 풍속인 20kts 이상인 사례만을 검증하였다.

검증 결과를 보면 전체적으로 850hPa 풍속에 대한 수치모델의 편차는 음의 편차를 보이면서 하층제트를 과소모의 하는 경향이 나타난다(참고로 전체 풍속에 대한 검증 결과는 편차가 거의 나타나지 않음). 특히 09시에 -2.12kts로 음의 편차가 가장 크게 나타나고, 15시에는 0.58kts로 값은 작지만 유일하게 양의 편차가 나타난다. 만약 하층제트에 의한 강수가 예상되는 상황에서 시간대가 09시 근처라면 수치모델의 850hPa 예상 풍속보다 실제 풍속이 더 강하게 나타나면서 강수가 예상보다 더 강해질 수 있다. 반대로 하층제트에 의한 강수가 예상되는 시간대가 15시라면 수치모델의 예상보다는 강수가 강해지기 어려운 시간대라고 볼 수 있다.

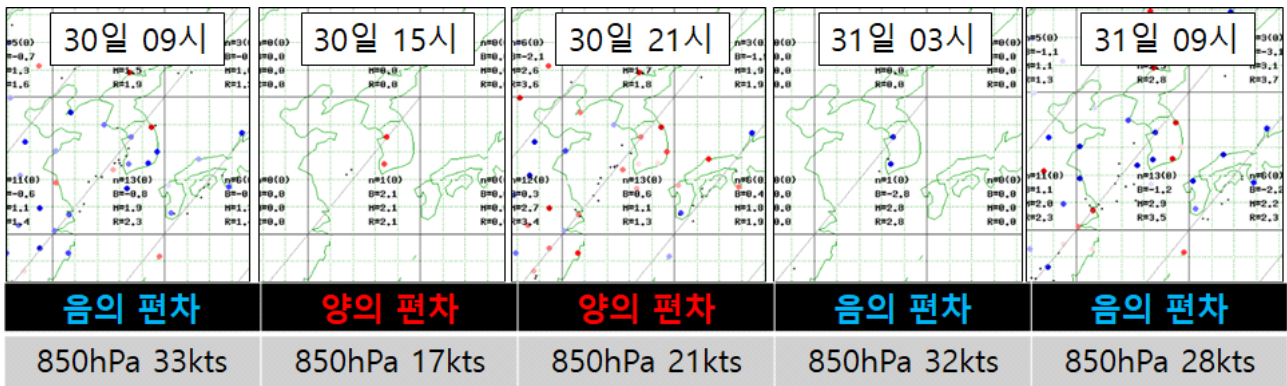


그림 2-10. 2019년 7월 30~31일 시간대별 UM 모델 850hPa 풍속 편차

그림 2-10은 2019년 7월 30~31일 하층제트의 영향을 받았던 사례로 6시간 간격의 시간대별 UM모델의 850hPa 풍속 편차를 나타낸 검증 분포도이다. 빨간색 점은 모델의 양의 편차, 파란색 점은 음의 편차를 의미한다. 주간 시간대인 15시와 21시에는 양의 편차, 야간 시간대인 03시와 09시에는 음의 편차가 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

2. 3. 4. 1. 새벽~오전 시간대에 예상보다 강해지는 강수

새벽에서 오전 사이 강수량을 수치모델에서는 어떻게 모의하는지 사례를 조사하였다. 그림 2-11은 2016~2018년 6~9월 기간 중 00~12시 사이 우리나라 AWS 중 누적강수량이 100mm 이상인 지점이 나타난 사례 총 45건 중 지형효과에 의해 강수량이 강화되었던 사례 9건을 제외한 나머지 36개 사례의 수치모델 예상 강수량 편차이다. 파란색 막대는 누적강수량을 크기순으로 나열한 것이며, 빨간색 점은 각 사례별 누적강수량의 모델과 실황의 편차이다.

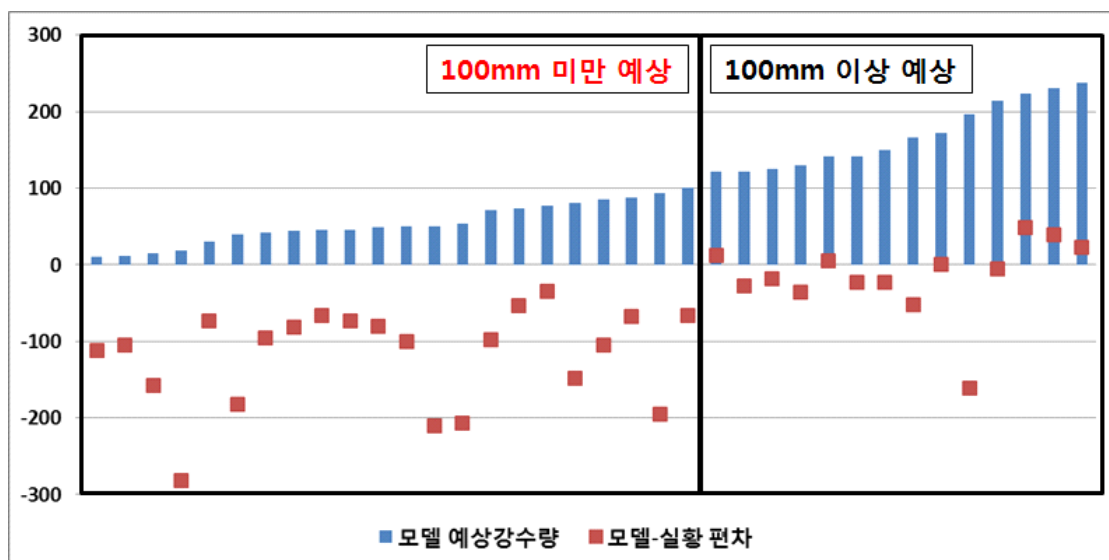


그림 2-11. 2016~2018년 6~9월 00~12시 누적강수량 100mm 이상 사례의 강수량 모델-실황 편차

그림 2-11의 왼쪽 박스 영역은 수치모델이 누적강수량을 100mm 미만으로 예상한 사례인데, 오차가 모두 음의 편차로 과소모의 하는 결과를 보여준다. 대부분 50mm 이상의 강수량 오차를 보이고 있으며, 이 구간에서의 모델 예상강수량 대비 실제 강수량의 비율은 평균 320%로 나타나 3배 정도의 오차가 발생함을 알 수 있다. 반면에 오른쪽 박스 영역은 수치모델이 누적강수량을 100mm 이상으로 예상한 사례로 약간의 음의 편차 경향이 있으나 대부분 오차가 50mm 이내로 크지 않다. 이 구간에서의 모델 예상강수량 대비 실제 강수량의 비율은 평균 110%로 모델과 실황의 차이가 크지 않음을 알 수 있다.

이와 같은 결과를 해석하자면, 수치모델이 100mm 이상의 강수량을 예상하는 사례들은 대부분 저기압이나 태풍과 같은 뚜렷한 중규모 시스템의 영향을 받는 경우이므로, 모델의 강수 모의 성능이 좋게 나타난다. 따라서 모델의 예상강수량을 그대로 참고하여 예보를 하면 된다. 반대로 수치모델이 100mm 미만의 강수량을 예상했으나 100mm가 넘게 기록된 사례들은 대부분 중규모 시스템의 영향을 받는 경우로 모델의 강수 모의 성능이 떨어질 수밖에 없다. 따라서 중규모 시스템이 예상되는 경우 모델이 100mm 미만의 강수량을 예상한다면 3배 정도의 오차가 발생할 가능성이 높으므로 예상강수량을 높여 예보할 필요가 있다.

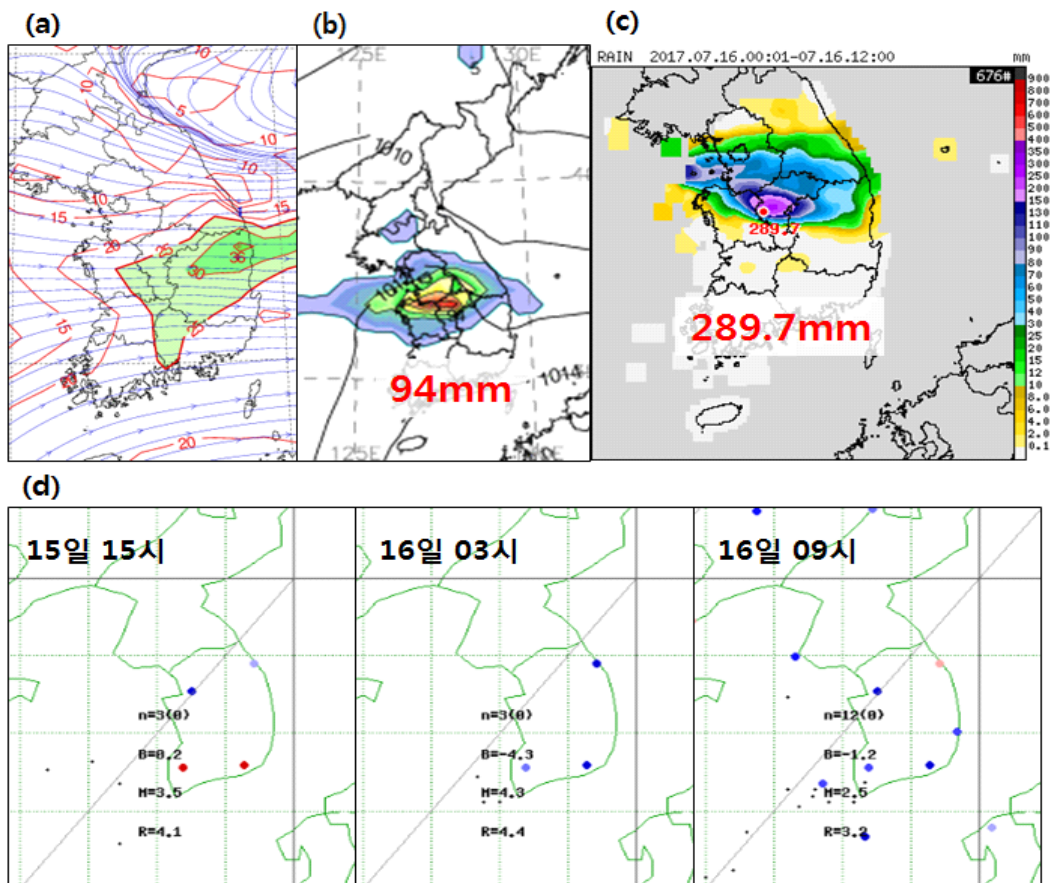


그림 2-12. 2017년 7월 16일 15시 수치모델 예상보다 강한 하층제트로 강수가 강화됐던 사례
 (a) 수치모델 850hPa 유선 예측장, (b) 수치모델 12시간 누적강수 예측장
 (c) AWS 12시간 누적강수 실황, (d) 시간대별 850hPa 모델-실황 풍속 편차

그림 2-12는 2017년 7월 16일 수치모델이 하층제트의 강도를 과소모의하면서 충청도를 중심으로 예상보다 많은 강수가 기록된 사례이다. 전날(15일) 09시 수치모델에서 16일 09시에 충청도 지역으로 하층제트 후면에서 강한 강수를 모의했으며, 12시간 누적강수량을 최대 94mm 예상했다. 하지만 실황은 모델 예상의 약 3배인 289.7mm를 기록하였다. 850hPa의 모델-실황 풍속 편차를 보면 주간인 전날 15시에는 뚜렷한 편차 경향이 없었으나 야간으로 접어든 후 03시와 09시에는 전체적으로 과소모의(파란색) 경향이 뚜렷해지는 것을 알 수 있다. 이번 사례 역시 저기압과 같은 종관규모의 시스템이 아닌 중규모 수렴 형태의 정체전선형 강수이므로 모델이 강수량을 충분하게 모의하지 못했다. 결국 야간의 하층제트 풍속이 예상보다 강해지면서 강수량이 많아진 사례라고 할 수 있다.

2. 3. 4. 2. 오후 시간대에 예상보다 약해지는 강수

새벽~오전 시간대와와는 반대로 오후 시간대에는 수치모델의 예상보다 하층제트의 풍속이 약해지는 경향이 있다. 하지만 그림 2-9를 보면 알 수 있듯이 09시의 편차보다 15시의 편차는 그 값이 작은 편이므로, 새벽~오전 시간대 보다 그 효과가 빈번하게 나타나진 않는다. 하지만 모델 결과에 따라 오후 시간의 강수를 과대 예보하는 경우가 많기 때문에 이러한 특징을 고려할 필요가 있다.

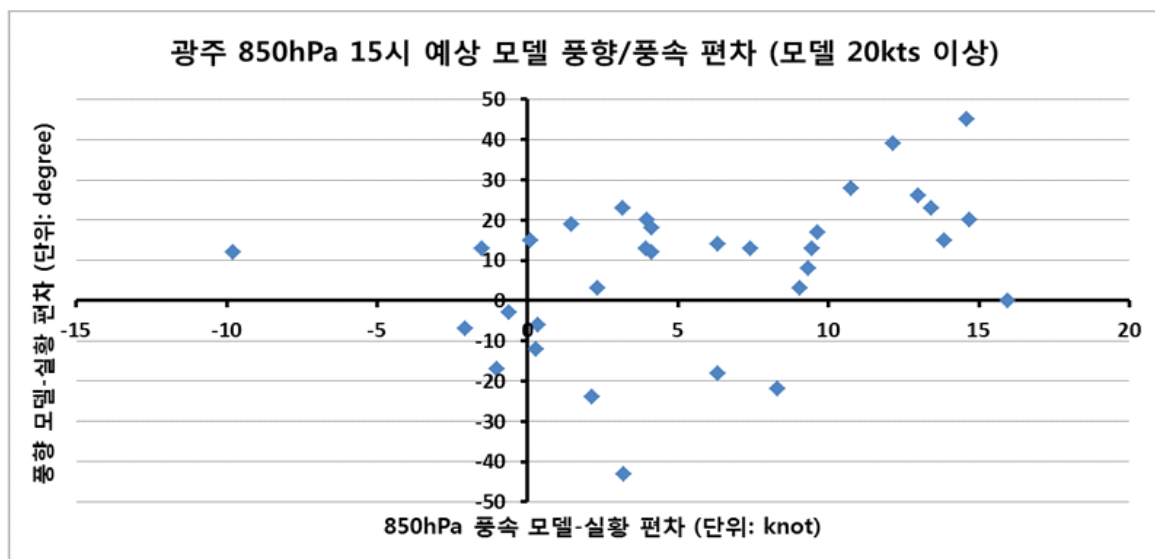


그림 2-13. 2016~2018년 7~8월 광주 850hPa 15시 예상 모델 풍향/풍속 편차(모델 20kts 이상 예상)

그림 2-13은 2016~2018년 7~8월 광주 지점의 850hPa 수치모델의 풍향과 풍속 편차 자료로 마찰력이 가장 커질 수 있는 15시를 대상으로 했다. 가로축은 풍속의 모델-실황 편차이고, 세로축은 풍향의 편차이다. 먼저 대부분 사례들이 풍속에서 양의 편차로 나타나는 것을 알 수 있어 수치모델의 15시 하층제트 과대모의 특성을 보여준다. 여기서 풍속과 풍향이 함께 양의 편차를 보이는 1사분면에 67% 이상의 많은 사례가 분포하고 있는데, 이것은 실황에서는 모델 예상보다 풍속이 약화되면서 풍향도 함께 반시계

방향으로 약화된 상황이므로 마찰력이 작용한 것을 의미한다.

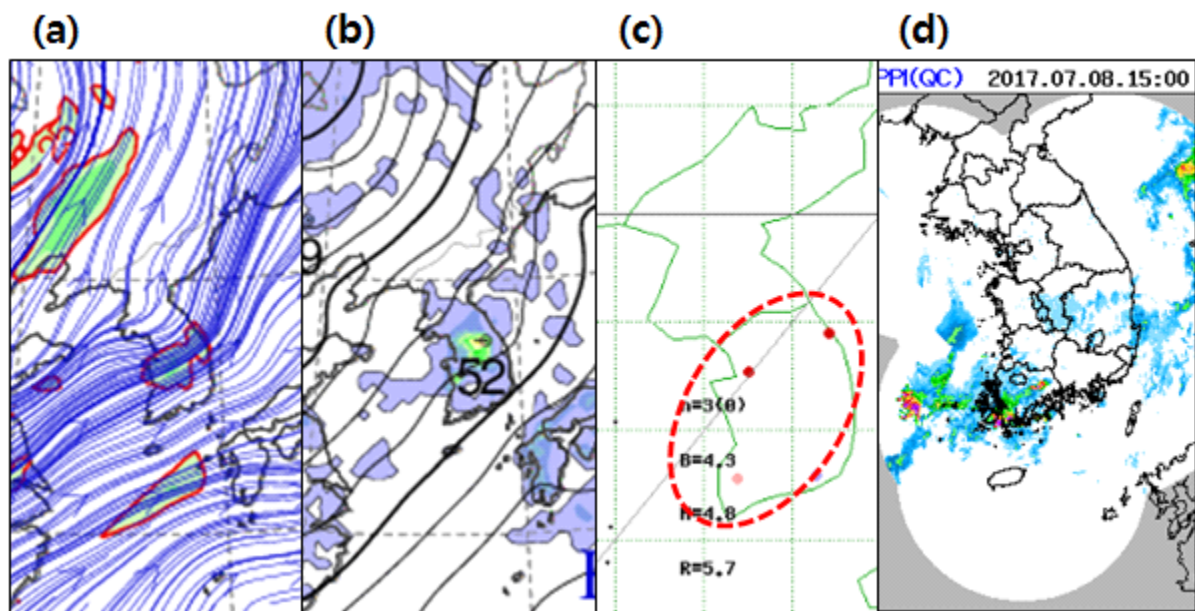


그림 2-14. 2017년 7월 8일 15시 수치모델 예상(+30h)보다 약한 하층제트로 강수가 약화됐던 사례
(a) 수치모델 850hPa 유선 예측장, (b) 수치모델 지상 강수 예상장
(c) 850hPa 모델-GTS 풍속 편차(빨간 점: (+)의 편차), (d) 레이더 영상

그림 2-14는 2017년 7월 8일 수치모델이 하층제트에 의한 중부지방에 강한 강수를 예상했으나 실제로는 강수가 매우 약했던 사례이다. 전날(7일) 09시 수치모델에서 이날 15시 중부지방으로 850hPa의 25kts 이상의 하층제트를 모의했고, 하층제트 북단인 수도권과 강원영서지역을 중심으로 매우 강한 비를 예상했다. 하지만 실제 풍속은 수치모델의 예상보다 약했고(편차도에서 빨간색 점, 오산의 경우 11kts의 매우 약한 풍속이 관측됨), 레이더 영상을 보면 알 수 있듯이 강한 강수도 전혀 나타나지 않았다. 역시나 이때의 시간대는 기온이 가장 높은 15시로 대기경계층이 발달하기 좋은 시간대였다.

하지만 15시가 하층제트의 마찰효과가 큰 시간대라 하더라도 예외적인 상황은 있을 수 있으므로, 무작정 강수를 약하게 예상하는 것은 위험할 수 있다. 따라서 다음과 같은 수치모델의 모의 경향 파악이 필요하다. 앞서 언급한 사례에서 그림 2-15를 보면 전날(7일) 09시 수치모델이 7일 15시에 지상기온을 과소모의(편차도에서 파란색 점) 하는 경향을 보여주고 있으며, 다음날인 8일 15시에도 계속해서 과소모의의 경향이 유지되면서 수치모델 예상보다 실제 지상기온이 높게 나타났다. 결국 수치모델의 예상보다 오후에 기온이 상승해 경계층이 강하게 발달하면서 하층제트에 의한 강수를 약화시켰다. 따라서 모델 예측 경향을 고려해 예보할 필요성이 있다.

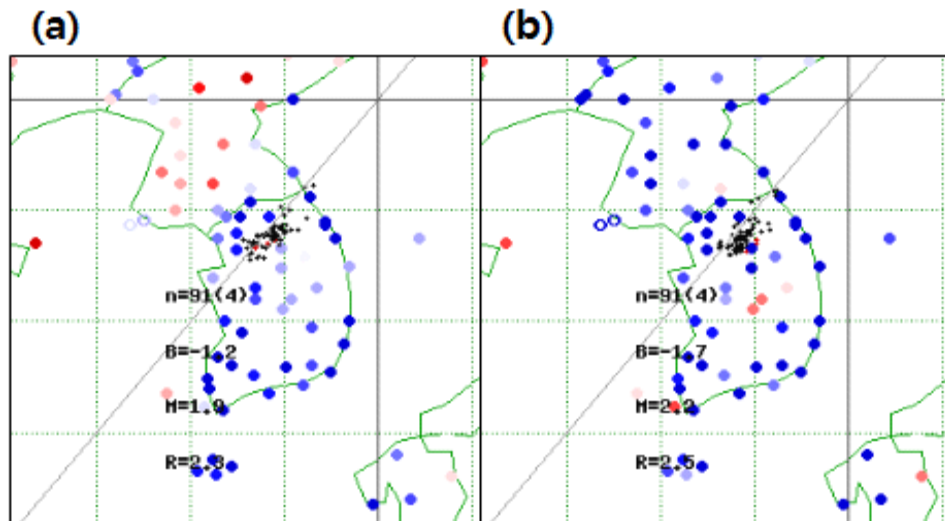


그림 2-15. 2017년 7월 7일 09시 모델이 예상한 지상기온과 GTS 실험의 편차
(a) 7일 15시 예상(+06h)-GTS 편차, (b) 8일 15시 예상(+30h)-GTS 편차

오후 시간대에 하층제트가 약화되거나 소멸될 수 있는 조건이 충족되면 하층제트에 의한 강수 시스템도 약화되거나 사라질 수 있다. 그리고 하층제트에 의한 강수가 아닌 불안정에 의한 소낙성 형태의 강수 확률이 높아질 수 있다. 반대로 같은 오후 시간대에 그림 2-16처럼 북쪽에서 건조역이 강하게 남하하는 경우, 즉 종관적인 강제력이 일내 변화보다 강하게 작용할 경우에는 하층제트에 의한 강수가 발달할 수 있음을 염두해 두어야 한다【'18년 5번 사례】.

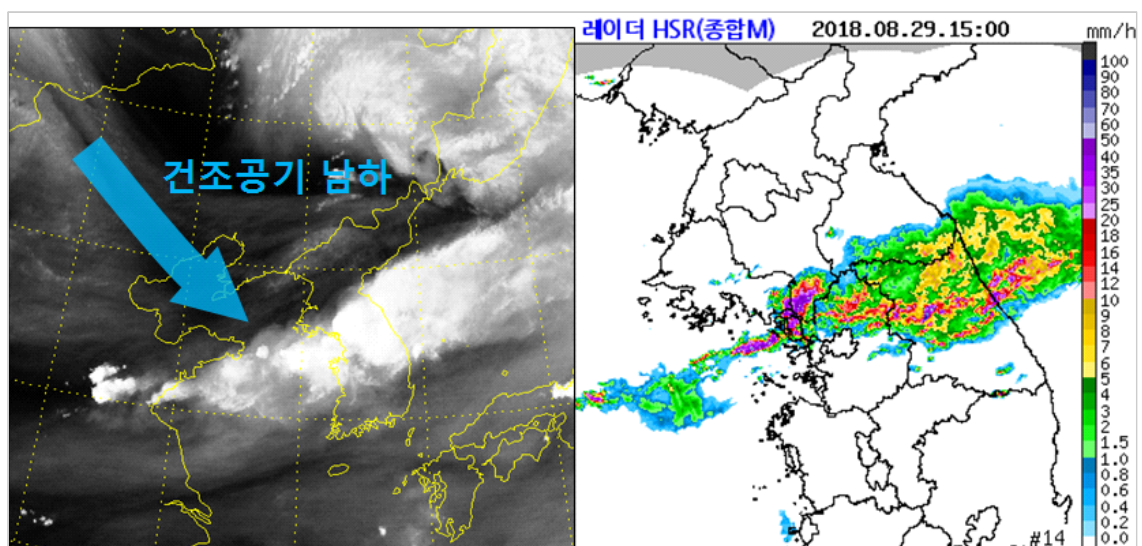


그림 2-16. 2018년 8월 29일 15시, 오후 시간대에 강수가 강화된 사례
(좌) 천리안위성 수증기채널 영상, (우) 레이더 강수 합성 영상

2. 4. 두 번째 특성, “북태평양고기압은 하루 한 번 숨을 쉰다.”

2. 4. 1. 북태평양고기압과 호우

북태평양고기압은 여름철 우리나라에 가장 큰 영향을 미치는 고기압이다. 특히 우리나라 여름철의 정체전선은 북태평양고기압의 북단 가장자리를 따라 형성되는 것이 일반적이므로(박순웅, 1988), 북태평양고기압은 집중호우와 매우 밀접한 연관이 있다. 여름이 되면 북태평양고기압이 점차 우리나라로 확장하면서 장마가 남쪽에서부터 시작돼 점차 북쪽으로 확대되게 된다. 결국, 북태평양고기압이 우리나라로 얼마나 확장과 수축을 하느냐에 따라서 정체전선에 의한 집중호우 구역이 남북 방향으로 달라질 수 있다. 따라서 북태평양고기압은 여름철 호우 분석에서 매우 중요한 인자이다.

2. 4. 2. 북태평양고기압의 일변화

일반적인 이동성 고기압과 저기압은 전체적인 기압계 파동의 흐름을 따라 이동을 한다. 하지만 북태평양고기압의 경우 기단의 성격을 가진 고기압이기 때문에 여간해서는 움직이지 않고 성질도 변하지 않는다. 상층 기압골이나 태풍과 같은 주변 기압계의 힘이 강하지 않은 이상 북태평양고기압은 쉽게 확장이나 수축하지 않는다. 결국 북태평양고기압은 키 큰 고기압이므로 기온(층후)의 변화에 따라 확장과 수축을 하게 된다.

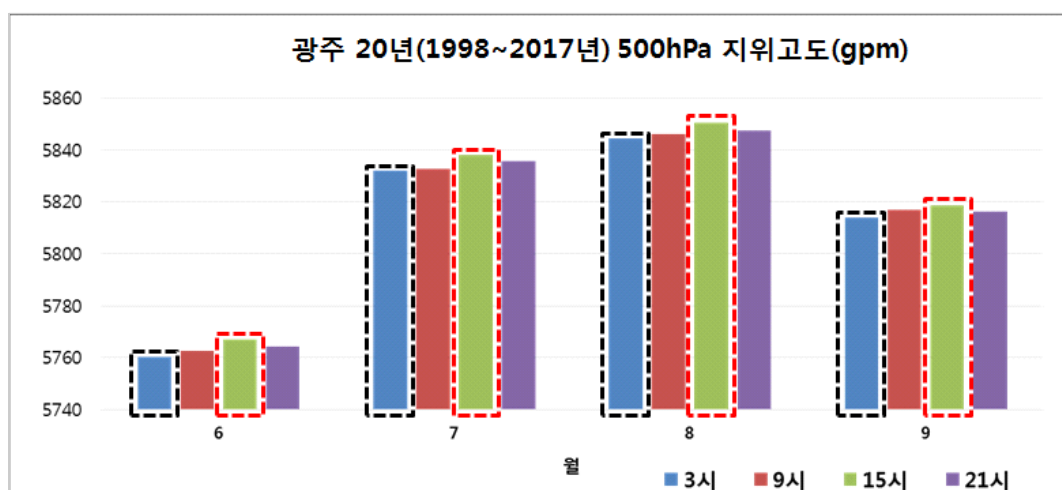


그림 2-17. 1998~2017년 6~9월 광주 지점 시간대별 500hPa 지위고도 평균

그림 2-17은 광주 고층관측 지점의 1998~2017년 20년 치의 통계자료로 03시, 09시 15시, 21시 시간대별로 500hPa 지위고도를 평균한 그래프이다. 6월부터 9월까지 모두

기온이 낮은 시간대인 03시에 최솟값을 기온이 높은 시간대인 15시에 최댓값을 가지는 것으로 나타난다. 특히 북태평양고기압의 영향을 가장 많이 받는 7~8월에는 그 차이가 약 7gpm으로 가장 크게 나타난다. 즉, 7~8월에 북태평양고기압은 우리나라 부근에서 평균 7gpm의 폭을 가지고 하루에 한번 확장과 수축을 반복한다고 볼 수 있다.

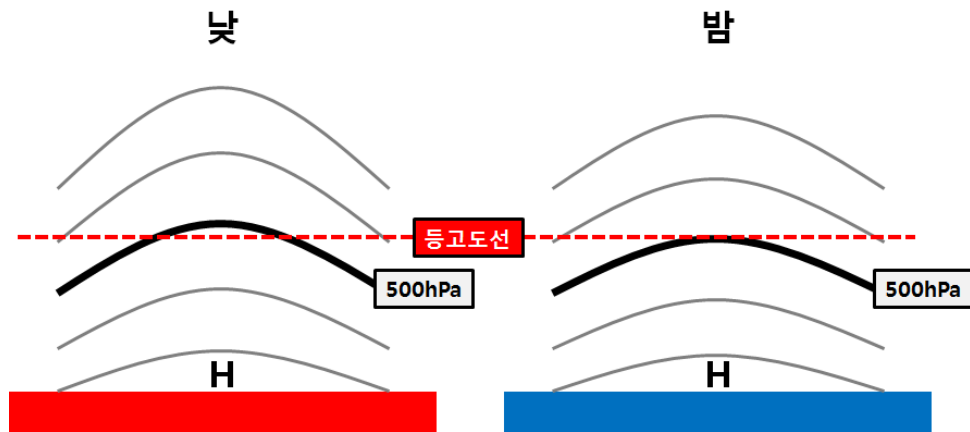


그림 2-18. 낮과 밤 기온(층후) 변화에 따른 키 큰 고기압의 지위고도 변화 모식도

북태평양고기압이 확장·수축한다는 것은 연직적으로 팽창과 수축을 한다는 것을 의미한다. 그림 2-18은 낮과 밤 기온(층후) 변화에 따른 키 큰 고기압의 지위고도 변화를 모식도로 나타낸 것으로, 500hPa 등압선의 위치가 층후가 팽창하는 낮에는 높은 고도에 위치하고 층후가 수축하는 밤에는 보다 낮은 고도에 위치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 500hPa 일기도에서 고기압 주변으로 낮에는 고도장이 상승하고 밤에는 하강하는 경향이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

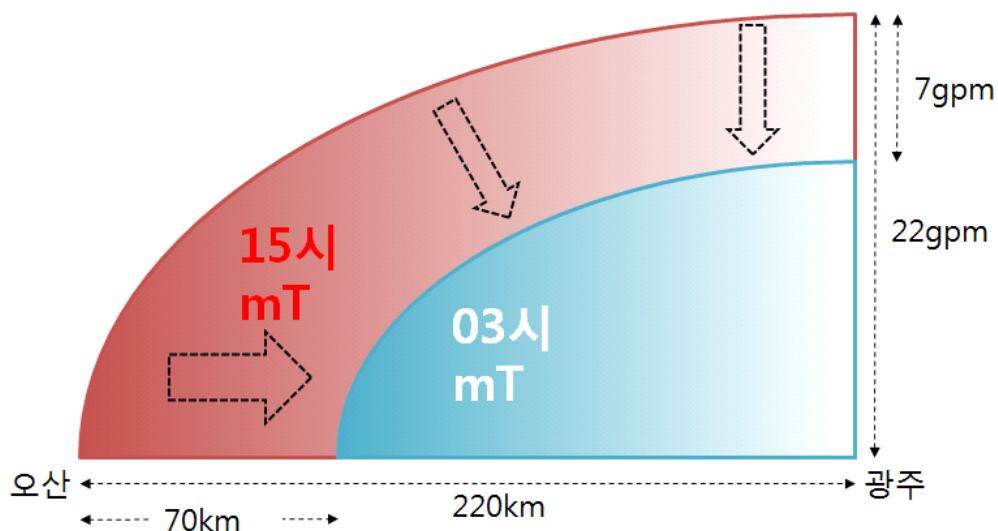


그림 2-19. 오산과 광주 고층관측 지점의 500hPa 평균 지위고도 차이와 수평거리 계산

그러면 7gpm의 변화가 수평적으로는 얼마만큼의 변화로 나타나는지 그림 2-19에 모식도로 단순화하여 나타내었다. 오산과 광주 고층관측 지점의 여름철 평균 지위고도

차이는 약 22gpm으로 나타나고, 오산과 광주의 수평거리는 약 220km이다. 따라서 그림과 같이 7gpm의 지위고도 차이는 수평거리 70km 차이로 생각할 수 있다. 쉽게 생각하면 북태평양고기압은 하루에 한번 숨을 쉬는 것과 같이 수평적으로 70km 거리만큼 배를 내밀었다가 집어넣는 행동을 하게 된다. 우리나라 행정 구역상 도(道)의 남북거리가 80~100km 정도 되는 점을 감안하면 70km의 거리는 강수 예보를 할 때 집중구역을 선정함에 있어서 엄청난 변화 폭이라고 할 수 있다. 더욱이 7gpm은 평균값이기 때문에 상황에 따라서는 더 큰 폭으로 숨을 쉬는 경우도 있을 것이다.

2. 4. 3. 강수대의 남북 진동과 정체

북태평양고기압의 북단 가장자리에서 강수대가 발달해서 남북으로 진동을 하고 있는 상황을 생각해보자. 만약 한기를 동반한 상층 기압골이 우리나라를 통과하는 경우처럼 강한 기압계 강제력이 작용하는 상황이 아니라면 강수대는 정체하는 경향을 보이면서 조금씩 남북으로 진동을 하게 된다. 그림 2-20과 같이 일주기의 지위고도 변화에 따라 북태평양고기압도 확장과 수축을 반복하고, 그에 따라 강수대도 남북으로 진동하게 된다.

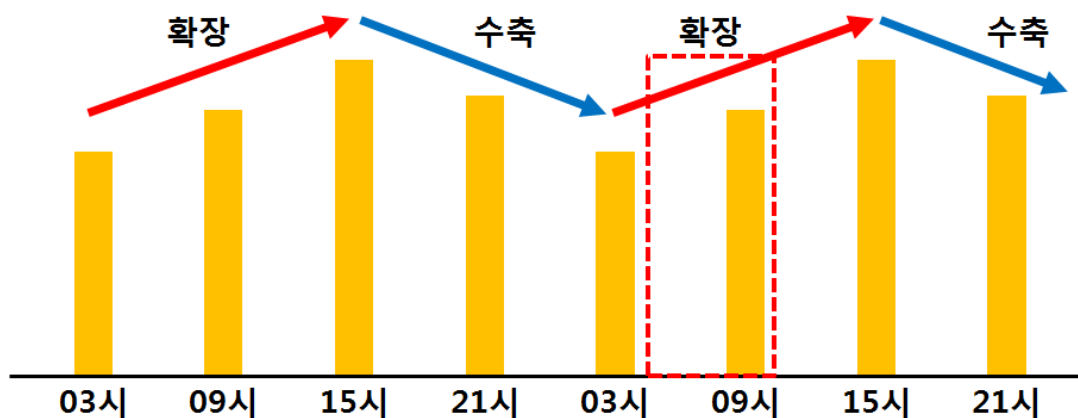


그림 2-20. 시간대별 500hPa 지위고도와 북태평양고기압의 변화 경향 흐름

이렇게 남북으로 강수대가 진동하는 상황에서 주의해야 할 시간대가 있는데, 그림 2-20의 빨간색 점선으로 표시한 09시 부근이다. 일반적으로 북상하는 강수대에서는 찬 공기 위로 따뜻한 공기가 상승하는 상황이므로 온난전선 강수의 특징을 보이고, 강수대는 넓게 분산된 형태로 나타난다. 하지만 남하하는 강수대에서는 따뜻한 공기 아래로 차갑거나 건조한 공기가 하강하는 상황이므로 한랭전선 강수의 특징을 보이면서 강수대는 좁고 강하게 나타난다. 만약 한랭전선 강수의 강도를 갖는 강수대가 정체한다고 생각하면 좁은 지역으로 집중호우가 발생하게 된다. 그림 2-20에서 표시한 09시의 시간대가 바로 이러한 상황이 나타날 수 있는 시간대가 되는 것이다. 또한 이 시간대에는 하층제트의 강화 효과도 함께 나타나기 때문에 더욱 집중호우가 발생하기 유리한 시간대가 되므로, 두 가지 상황을 모두 고려했을 때, 새벽~오전 사이의 시간대는 강한 강수와 함께 많은 강수가 나타날 수 있는 매우 위험한 시간대임을 꼭 염두 해야 한다.

2. 4. 4. 북태평양고기압의 일변화를 고려한 강수 예보

2. 4. 4. 1. 일변화 효과의 강수 예보 적용

앞서 언급이 있었듯이 강수 예보 시 북태평양고기압의 일변화 효과를 적용하려면 기압골이나 태풍과 같이 주변 기압계의 강제력이 강하지 않은 조건에서만 적용이 가능하다. 그림 2-21에서 왼쪽 그림과 같이 상층 기압골의 강제력을 받는 경압대기 상황에서는 고기압의 일변화 폭보다 기압골 자체의 위치나 강도에 따라 강수대의 위치가 변할 수 있으므로 이런 상황에서는 기압골의 분석이 더 중요하다. 오른쪽 그림과 같이 상층의 뚜렷한 기압골이 없이 동서의 흐름을 보일 때는 상당순압대기의 특징을 보이면서 북태평양고기압의 일변화가 뚜렷하게 나타나게 되고, 강수대의 위치에 영향을 주게 된다. 따라서 오른쪽과 같은 기압계 조건일 때 강수 예보를 하게 된다면 북태평양고기압의 일변화 효과를 고려해야 한다.



그림 2-21. 500hPa 기압계 모식도 (좌) 기압골 영향 강한 경우, (우) 기압골 영향 없는 경우

그러면 북태평양고기압의 일변화를 고려했을 때 무작정 09시 시간대에 강수량을 과대하게 예보하면 되는 것인가? 강수량도 문제지만 남하하는 전선성 강수의 경우 강수영역의 남북 폭이 좁기 때문에 정확한 강수영역의 예측이 더욱 문제가 된다. 실제 북태평양고기압이 숨을 쉬는 거리만큼 수치모델이 정확하게 모의를 할 수 있느냐의 문제이다.

그림 2-22는 2016~2018년 7~8월 기간 수치모델의 광주 지점 예상(+18~36시간) 500hPa 지위고도를 실제 고층관측 자료로 검증한 결과이며, 모델은 UM전구 N768을 사용했다. 먼저 오른쪽 상단의 관측 자료를 보면 앞서 20년치 지위고도를 조사했던 자료와는 다르게 검증 기간 동안 시간대별 지위고도는 15시가 아닌 21시에 최댓값이 나타난다. 이 기간 동안 여름철 티베트고기압이 우리나라로 강하게 확장한 것이 반영된 결과로 볼 수 있다(실제로 2016년과 2018년 폭염이 장기간 지속됐음). 문제는 왼쪽 상단의 모델 자료인데, 03시와 21시의 차이가 심하게 벌어져서 나타난다. 관측 자료에서는 03시와 21시의 차이가 약 6.4gpm이나 모델 자료에서는 약 13.5gpm으로 2배의 차이가 난다. 수평거리로는 70km의 모델 오차가 발생할 수 있는 결과이다. 결과적으로 가운데 아래 위치한 모델 편차 자료를 보면 21시에는 4.2gpm의 양의 편차, 03시에는 -3.2gpm의 음의 편차가 나타난다.

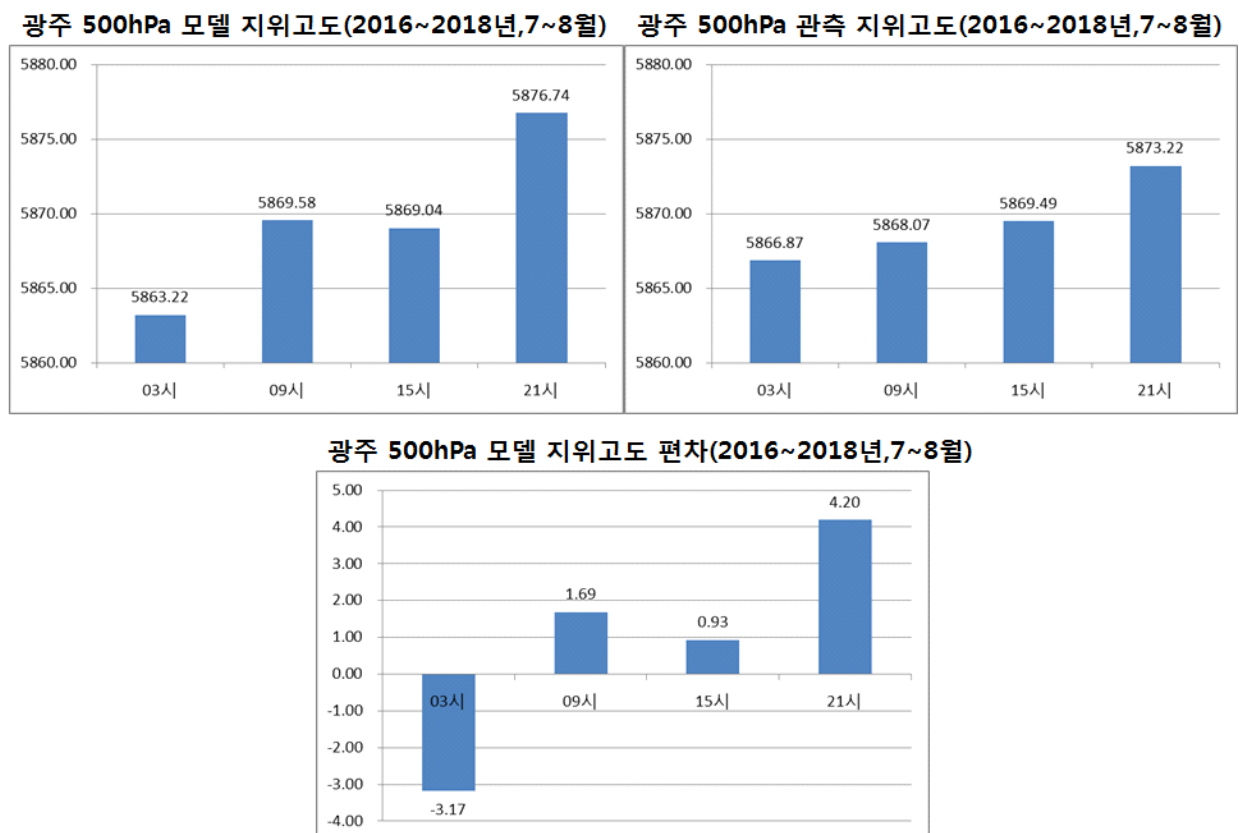


그림 2-22. 2016~2018년 7~8월 광주 지점의 시간대별 500hPa 지위고도 모델 검증 결과

모델의 편차만큼 실제 강수대의 이동이 시간대별로 어떻게 전개될 수 있는지 단순히 가정하여 그림 2-23에 나타냈다. 남북방향의 강수대 위치를 시간대별로 나타냈으며, 관측치의 평균값은 검정색으로, 수치모델은 초록색으로 강수대의 위치를 표현했다. 21시부터 09시로 이어지는 흐름에서 모델의 강수대는 크게 요동을 치는 경향을 보이는데 여기서 21시는 전선성 강수가 발달하기 어려운 시간대임을 고려하여 배제한다면 결국 중요한 시간대는 03시에서 09시의 변화이다. 03시에서 09시로 넘어가면서 관측의 강수대 위치는 조금 북상하는 경향으로 나타나지만 중요한 것은

수치모델의 상승 경향이다. 수치모델은 관측보다 더 큰 폭으로 강수대를 북상시키는 경향을 보여준다. 따라서 03시와 09시에는 이러한 오차를 반영해 강수대 위치를 예상할 필요가 있으며, 특히 09시 시간대에는 강수대가 정체하는 시간대이므로 집중호우 구역으로 설정하고, 수치모델의 예상보다 남쪽으로 호우 구역을 고려해야 한다.

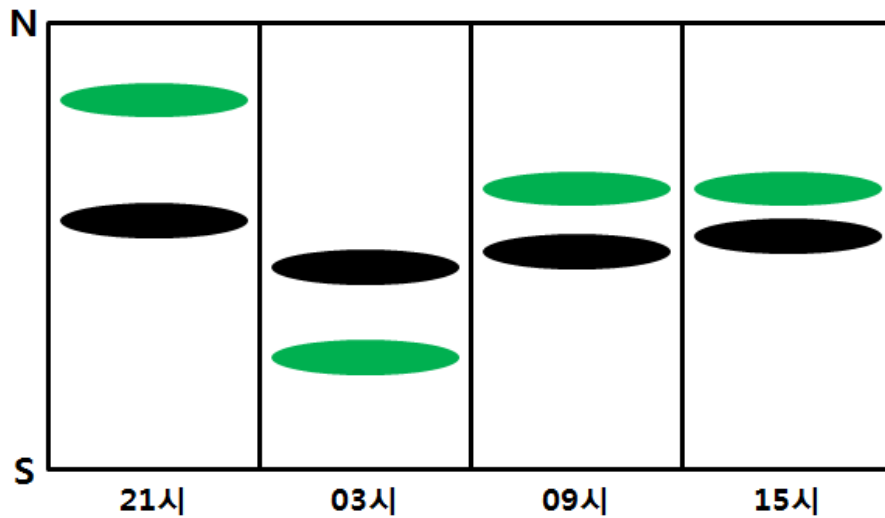


그림 2-23. 시간대별 남북방향 강수대 위치(초록색: 수치모델, 검정색: 관측)

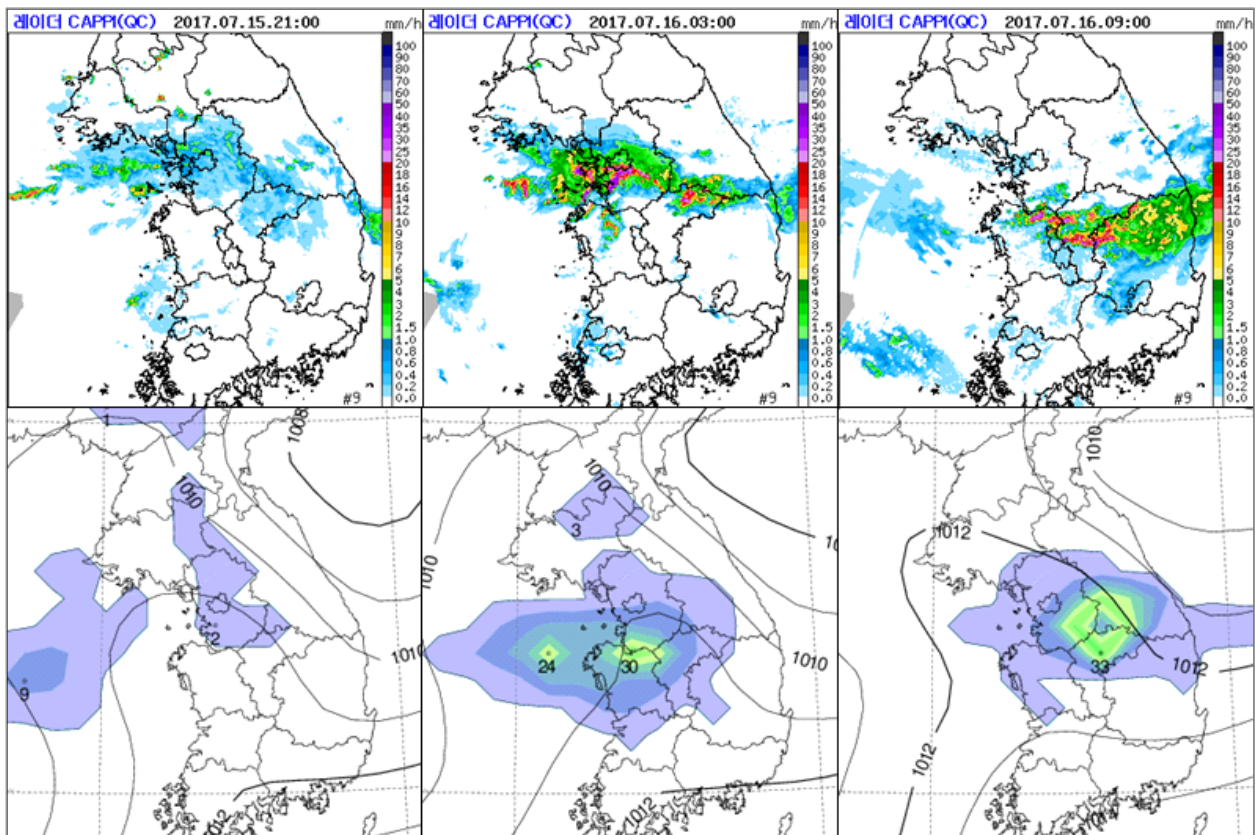


그림 2-24. 2017년 7월 15일 21시~16일 09시 (상) 레이다 강수 합성영상, (하) 수치모델 누적강수량

그림 2-24는 이와 같은 결과가 반영되었던 사례로, 2017년 7월 16일 아침 청주에 집중호우가 내렸으며, 수치모델의 예상보다 집중호우 구역이 남쪽으로 형성되었다. 시간대별로 나누어 보면 전선성 강수대가 발달하기 어려운 15일 21시에는 강수대가 약하고 수치모델에서도 산발적으로 강수를 모의하고 있다. 16일 03시부터 강수대가 강화되기 시작하는데 03시에는 수치모델의 예상보다 강수대가 북쪽에 위치하고 있다. 03시에서 09시로 넘어가면 통계자료에서 확인했듯이 강수대가 크게 남하한 것을 알 수 있고, 09시에는 그림 2-23처럼 수치모델이 실제 강수대보다 북쪽으로 강수대를 모의하고 있어 남북의 오차가 발생한 것을 볼 수 있다.

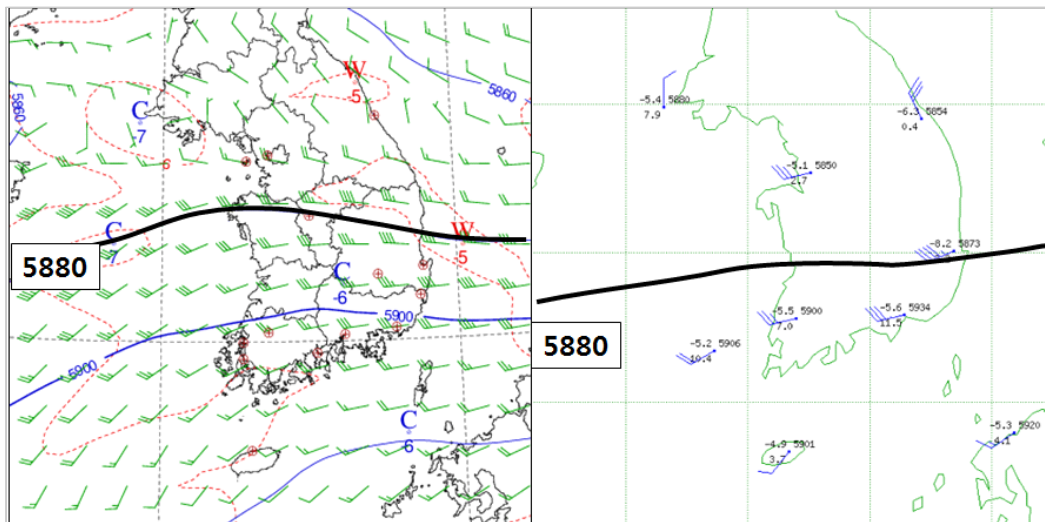


그림 2-25. 2017년 7월 16일 09시 (좌) 수치모델 500hPa 예상장, (우) 500hPa GTS 분석

그림 2-25는 전날 수치모델이 예상했던 16일 09시 500hPa의 5880gpm 선이 GTS 실황으로 분석한 결과보다 더 남쪽에 위치하고 있는 모습을 보여준다. 따라서 북태평양고기압 가장자리에서 형성된 정체전선 강수는 결국 09시 수치모델의 예상보다 남쪽으로 나타나면서 당초 예상보다 강수 집중구역이 남쪽으로 빗나갔다.

2. 4. 4. 2. 일변화 효과의 적용 예외

앞서 이야기했듯이 강수 예보 시 북태평양고기압의 일변화 효과는 기압골이나 태풍과 같이 주변 기압계의 강제력이 강하지 않은 조건에서만 적용이 가능하다. 만약 기압골이 통과하면서 영향을 주는 상황이라면 경우에 따라 저기압이 발달하면서 전혀 다른 강수 메커니즘의 양상으로 변할 수 있으며, 강한 태풍이 우리나라 주변으로 접근한다면 기압계 자체를 흔들어 강수대의 위치가 예상과 다르게 나타날 수 있다.

그림 2-26은 북태평양고기압의 일변화 효과를 적용할 수 없는 대표적인 사례이다【'19년 5번 사례】. 2019년 7월 26일 03시 모델이 예상했던 강수 예상도를 보면 중부지방을 중심으로 강수 집중구역이 나타나고 있으나, 실제 레이더 실황에서는 그보다

복상한 북한에 강수 집중구역이 나타나고 있다. 정체전선에 의한 강수대라면 서서히 남하해야 할 시간대임에도 불구하고 북한지역에서 머물고 있는 모습이다.

전날(25일) 21시 모델이 예상했던 500hPa 일기도와 500hPa GTS 자료를 묘화하여 비교해보면 큰 차이가 나타나는데, 실황에서 일본 남쪽에 위치한 TD 영향으로 저기압성 회전이 강화되면서 그 북쪽인 대한해협 부근으로 고기압성 흐름이 발생한 것을 알 수 있다. 모델 예상장의 5880gpm 선을 보면 확연한 차이가 나타나는데 결국 실황에서는 고압부가 더 강화되어 예상보다 강수대가 북상하게 된 것이다. 따라서 주변 기압계의 강제력이 강한 상황이라면 일변화의 효과보다 기압계 변화에 의한 효과가 더욱 크기 때문에 일변화 효과를 적용할 수 없는 예외 상황임을 명심해야 한다.

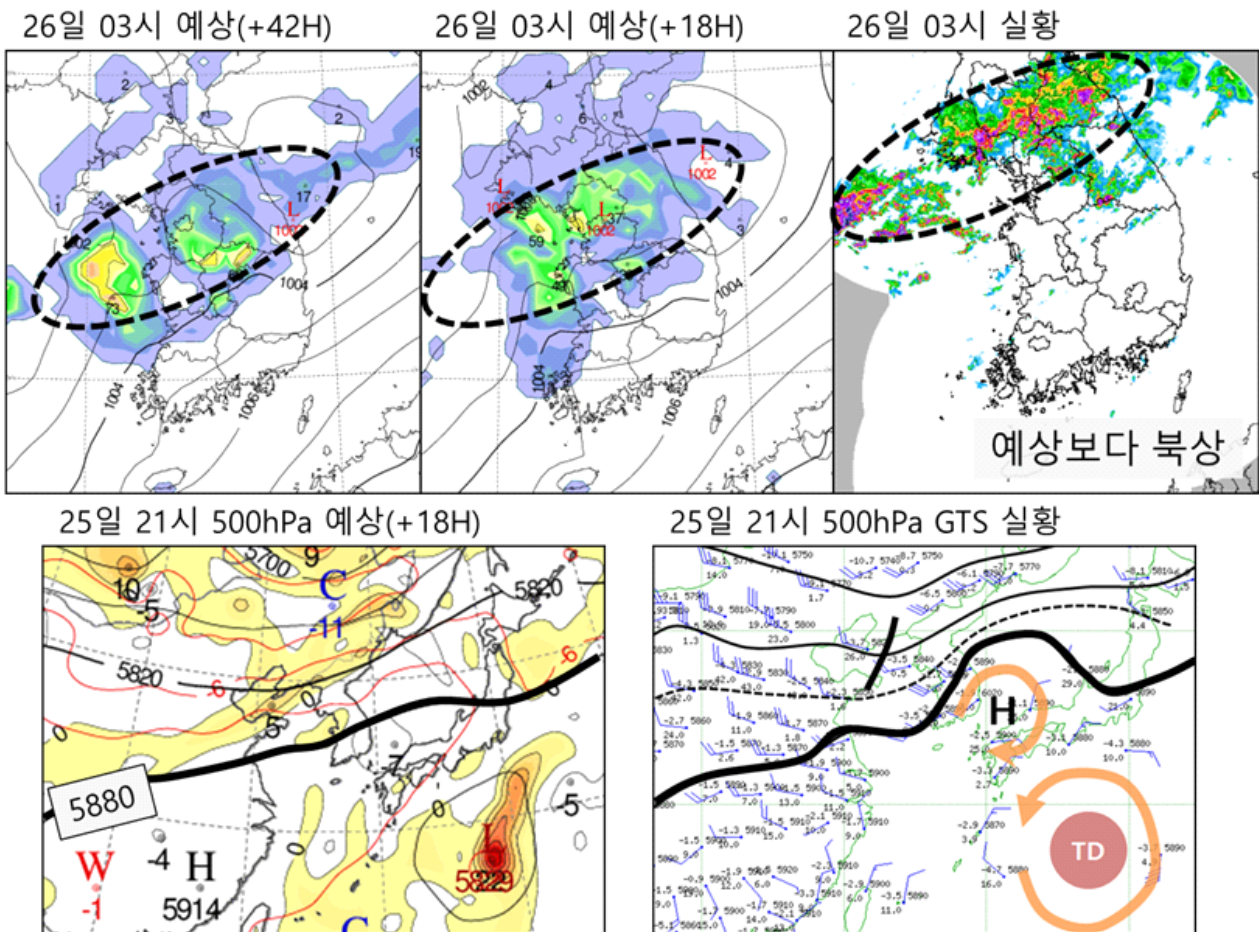


그림 2-26. (상) 2019년 7월 26일 03시 모델 강수 예상도와 레이더 실황 비교
(하) 2019년 7월 25일 21시 500hPa 모델 예상도와 GTS 실황 비교

2. 5. 여름철 일변화를 고려한 강수 예보 판단 흐름도

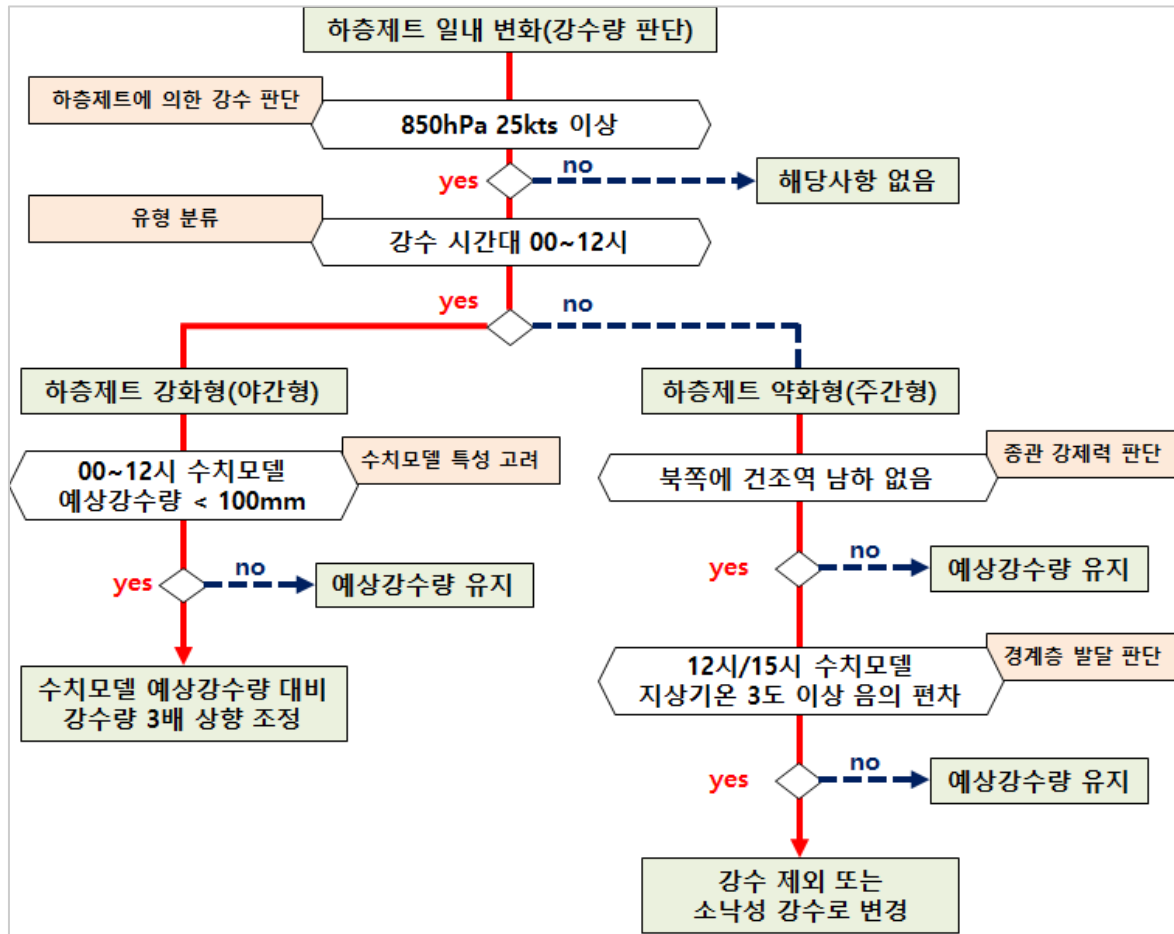


그림 2-27. 하층제트 일내 변화에 따른 강수 판단 흐름도

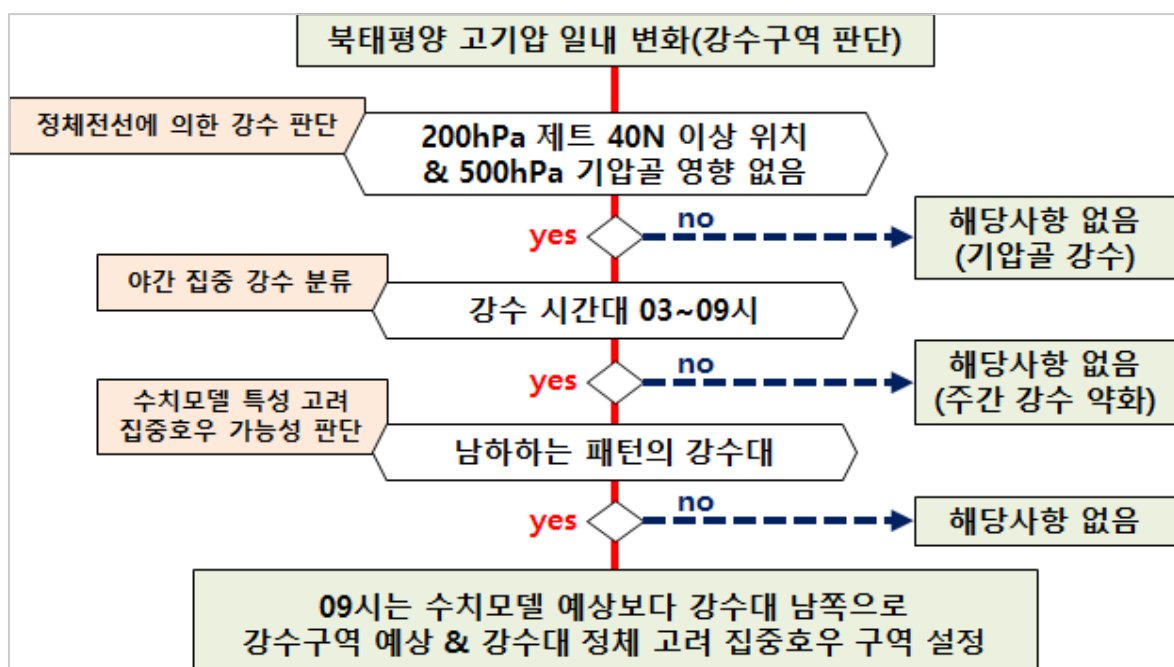


그림 2-28. 북태평양고기압 일내 변화에 따른 강수 판단 흐름도

참고문헌

1. 박순웅, 안현주, 전영신, 1988: 1985년 장마기간에 동부 아시아 지역의 대기 순환의 연구. 한국기상학회지, 29권 3호, 22-43.
2. 황승언, 이동규, 1993: 한반도에서 발생한 호우와 하층제트의 관련성에 관한 연구. 한국기상학회지, 29권 2호, 133-146.
3. Lim, G.-H., and H.-J. Kwon, 1998: Diurnal Variation of Precipitation over south Korea and its Implication. J. Korean Meteor. Soc., 34, 222-237.
4. Stull, R. B., 1988: An introduction to boundary layer meteorology. Kluwer Academic, 666 pp.
5. Trier, Stanley B., and David B. Parsons, 1993: Evolution of Environmental Conditions Preceding the Development of a Nocturnal Mesoscale Convective Complex. Mon. Wea. Rev., 121, 4, 1078-1098.

《Why?How!》 제2권 ‘여름예보 사례분석’ 가이드스 연계 내용

- 2. 3. 3. 경계층과 하층제트: 【'19년 5번 사례】
- 2. 3. 4. 2. 오후 시간대에 예상보다 약해지는 강수: 【'18년 5번 사례】
- 2. 4. 4. 2. 일변화 효과의 적용 예외: 【'19년 5번 사례】

여름 예보

3. 장마의 초기와 종료단계 예보 방법



3. 장마의 초기와 종료단계 예보 방법

Why?

기상청에서는 공식적으로 장마의 시작과 종료에 대한 예보는 하지 않고 있다(2009년 종료). 대신에 현상이 모두 종료된 이후 재분석하여 장마의 시작과 종료에 대한 정보를 국민에게 제공하고 있다. 그럼에도 불구하고 예보관의 입장에서 장마의 시작단계와 종료단계에 대한 예보 방법을 갖추는 것은 중요한 의미를 가진다. 일반 국민들은 장마에 대한 정보에 매우 관심이 많아 중·단기예보에서 장마에 대한 언급을 반드시 포함해야 하기 때문이다.

3. 1. 장마란?

장마의 정의는 보는 관점에 따라서 여러 가지로 해석이 가능하다.

먼저 장마백서(2011, 서경환)에서는 “동아시아 몬순 시스템의 일부로, 여름철 우리나라 남쪽의 온난습윤한 열대성 기단과 북쪽의 한랭습윤한 한대성 기단이 만나서 형성되는 정체전선으로, 전선이 걸쳐있는 지역에는 강한 남서풍과 습윤한 공기의 유입량이 증가하고 장기간 많은 비가 내리는데 이러한 현상을 장마라 한다”로 정의한다. 예보관의 관점으로는 정체전선 또는 정체전선 상에서 발달한 저기압의 영향으로 비가 올 것으로 예상이 될 때, 날씨해설 정보에 정체전선을 명시하여 강수의 원인이 정체전선에 의한 것으로 언급하게 되는데 이것이 곧 예보관 관점에서의 장마이다. 일반 국민의 상식에서 본다면 단순히 여름철 오랜 기간 지속되는 비를 장마로 생각하고 있으며, 이것은 기상학적인 정의와 차이가 있다.

따라서 예보관은 기상학적인 정의, 또는 장마백서에 따른 장마 시종의 정보를 국민에게 그대로 전달하는 것은 적절한 방법이 아니며, 기상학적인 정보를 토대로 국민 상식에 맞는 정보를 전달하여야 한다.

3. 1. 1. 우리나라 정체전선의 특징

우리나라와 중국, 일본의 여름철 우기는 동아시아 여름 몬순의 한 부분으로서 많은 연구가 이루어지고 있다. 그렇지만, 우리나라 부근의 정체전선은 대기층간의 바람 영향 이외에도 여러 종류의 기단이 만나 형성되므로 아시아 몬순의 연직 대기 구조보다 훨씬 복잡하다.



그림 3-1. 정체전선에 영향을 미치는 5개의 기단(장마백서, 2011)

그림 3-1과 같이 몬순 기압골, 북태평양고기압, 대륙성 기단(cT), 오호츠크해 기단, 극기단이 영향을 주어 복잡하고 다양한 양상이 나타나므로, 실제 정체전선 예보에서는 각 기단의 특성과 강수 메커니즘을 이해하고 모델에서의 각 기단별 예측력을 고려하여 예보하는 것이 필요하다.

3. 2. 장마의 시작단계

3. 2. 1. 장마 시작 단계에서 500hPa 지위고도와 850hPa 상당온위

흔히 북태평양고기압의 경계를 500hPa의 5880gpm이라고 이야기한다. 하지만 장마가 시작하는 단계에서 전선대 위치의 지위고도는 조금 다르다. 한여름이 되기 전 아직 북태평양고기압의 성장이 완전하지 않고, 중위도 상층 기압골 파동의 영향을 받기 때문에 지위고도가 5880gpm보다 더 낮은 곳에서 장마가 형성된다.

장마 시작 단계의 특징을 분석하기 위해 제주도와 일본의 오키나와, 규슈 남부에서의 장마 시작과 관련된 통계자료를 살펴보겠다.

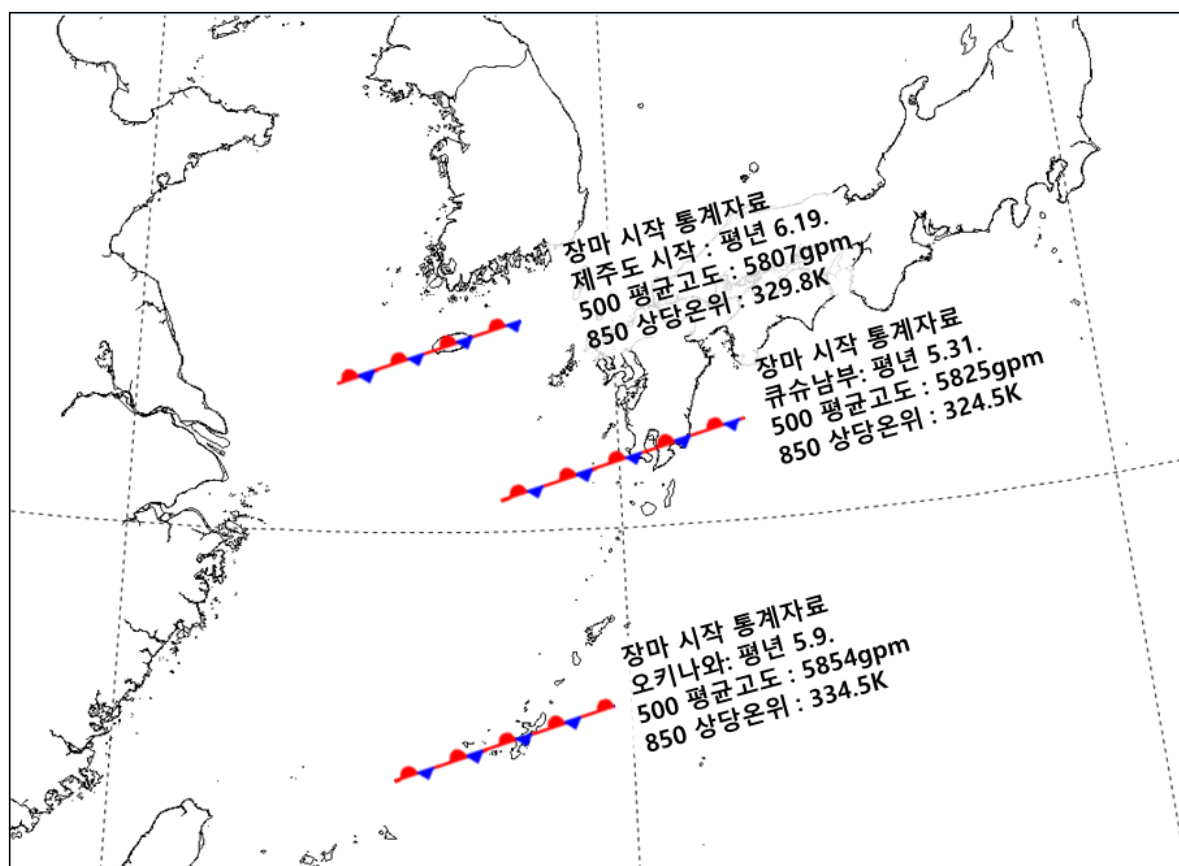


그림 3-2. 정체전선 위치 시 500hPa 지위고도와 850hPa 상당온위(2010~2019년 평균)

제주도는 오키나와와 약 800km 정도 떨어져 있으며 규슈 남부는 그 중간 정도에 위치한다. 장마 시작일의 평년값을 보면 오키나와는 5월 9일, 규슈 남부는 5월 31일, 제주도는 6월 18~19일로 각 20일 정도의 간격을 보인다.

장마가 시작할 때 500hPa의 2010~2019년까지 10년간 평균 지위고도를 보면 오키나와의 경우 5854gpm, 규슈 남부는 5825gpm, 제주도는 5807gpm이다. 즉 고위도일수록 기압골 영향을 받기 유리하기 때문에 더 낮은 지위고도에서 전선대가 시작됨을 알 수 있다.

같은 기간의 850hPa의 상당온위 평균값을 보면 오키나와 334.5K, 규슈남부 324.5K, 제주도 329.8K이다. 제주도가 규슈 남부보다 더 높은 상당온위에서 장마가 시작되는 것을 볼 때 제주도 장마 시작에 영향을 주는 고상당온위역의 유입원은 북태평양보다는 주로 중국남부에서 유입된 것임을 알 수 있다. 즉 중국남부에서 형성되는 고상당온위역의 유입 여부가 제주도 장마 시작 분석에 중요한 요인이다.

다음으로 과거 14년간 개별 년도에 대하여 제주도에 장마가 시작할 때 정체전선이 나타나는 500hPa의 지위고도 값과 850hPa 하층제트의 영역을 살펴보겠다.

표 3-1. 제주도 장마 시작 단계 시 정체전선이 나타나는 500hPa 지위고도와 850hPa 하층제트 영역

제주 장마 시작	500hPa 지위고도	850hPa 하층제트
2019년 06월 26일	5790~5820	하층제트 영역 북쪽
2018년 06월 19일	5790	하층제트 영역 북쪽
2017년 06월 24일	5760~5820	하층제트 영역 북쪽
2016년 06월 18일	5820~5850	하층제트 내 북단
2015년 06월 24일	5820	하층제트 영역 북쪽
2014년 06월 17일	5760~5820	하층제트 영역 북쪽
2013년 06월 18일	5760~5820	하층제트 없음(수렴라인)
2012년 06월 18일	5790	하층제트 영역 북쪽
2011년 06월 10일	5760	하층제트 내 북단
2010년 06월 17일	5790~5820	하층제트 영역 북쪽
2009년 06월 21일	5790	하층제트 없음(수렴라인)
2008년 06월 14일	5790	하층제트 내 북단
2007년 06월 21일	5790	하층제트 없음
2006년 06월 14일	5790	하층제트 내 북단

표 3-1에서 과거 사례들을 보면 대부분의 정체전선은 하층제트 내 북단 또는 하층제트 영역의 북쪽에 위치하였다. 500hPa 지위고도의 경우는 앞선 통계자료와 마찬가지로 5880gpm이 아니라 5820gpm보다 낮은 고도인 경우가 많았다.

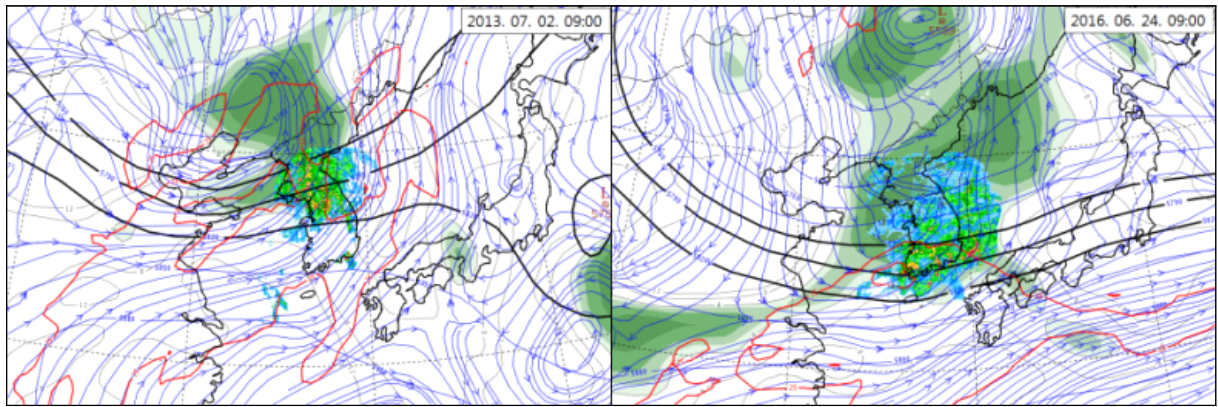


그림 3-3. 500hPa 지위고도(검은 선), 700hPa 습수(녹색 음영), 850hPa 유선(파란 선)과 레이더 합성영상
(좌) 2013년 7월 2일 09시, (우) 2016년 6월 24일 09시

그림 3-3의 2013년과 2016년의 사례를 살펴보면(선진예보시스템-통합기상분석 이용) 그림의 검은 선은 남쪽에서부터 500hPa의 5820gpm, 5790gpm, 5760gpm 선이고, 녹색 음영은 700hPa 습수, 파란 선은 850hPa 유선장, 그리고 빨간 선은 25kts 이상 강풍역이다. 강수의 남쪽한계선은 5820gpm과 잘 일치하는 모습을 보였고, 전선의 축은 5790gpm과 일치되는 경향을 보였다. 또한 강수영역은 700hPa 습수역과 하층 풍계가 남서풍인 곳에서 형성되었다.

장마의 시작을 고려할 때 강수의 지속 여부도 중요한 판단 근거가 된다. 장마백서(2011, 서경환)에서 제시한 자료 중에서 850hPa 상당온위 부분을 이용해 보자.

표 3-2. 장마 시작 정의방법(기상청, 2011)

장마 시작 정의방법	
122.5°~135°E 구역 내의 850hPa 평균 상당온위 335K 선이 32.5°N보다 북상해 3일 이상 지속	
125°~130°E 구역 내의 850hPa 평균 상당온위의 남북 경도 최솟값(조밀구역)이 32.5°N보다 북상해 3일 이상 지속	

위 표에서 제시된 북위 32.5°N는 제주도 남쪽 약 50~100km에 해당하는 위치이다. 따라서 장마의 시작은 상당온위 조밀역이 제주도 남쪽해상까지 북상하고 그 상당온위의 값이 335K 이상인 날이 3일 이상 지속될 때를 의미한다.

500hPa 지위고도와 850hPa 상당온위를 동시에 고려한다면 다음과 같이 정리할 수 있다. 장마가 시작할 때 정체전선의 위치는 하층제트 북단에서 500hPa의 5790gpm 이상을 기준으로 한다. 또한 335K 이상의 고상당온위와 조밀구역이 제주 남쪽 해상까지 북상하여 3일 이상 지속이 예상될 때 장마의 시작으로 보는 것이 타당하다.

3. 2. 2. 장마 시작 단계에서의 종관기압계 특징

제주도에 장마가 시작되었던 날의 종관기압계의 특징을 살펴보았다. 2010~2019년의 사례를 살펴보면 공통적인 특징이 몇 가지 있다. 첫 번째로 북위 30°에 해당하는 상해 인근에 지상저기압(또는 태풍)이 동반된다는 점, 두 번째로는 앞서 이야기한 것처럼 500hPa의 5820gpm과 5760gpm 사이에 제주가 위치한다는 점, 세 번째는 상층 기압골이 한반도 서쪽에 위치한다는 점이다. 네 번째로는 850hPa의 상당온위 335K가 제주, 또는 그 북쪽으로 확장한다는 점이다.

표 3-3. 장마 시작 단계에서의 종관기압계 특징

500hPa 지위고도	850hPa 상당온위	지상저기압 위치	500hPa 기압골
5760~5820gpm	335K 안팎	상해 인근 또는 그 북쪽	동경 120도 안팎

2017년 제주에 장마가 시작되었던 6월 24일 일기도에서 그 특징이 잘 드러난다. 발해만 인근으로 상층 절리저기압이 위치하고 있으며, 산둥반도 방향으로 골이 위치하고 지상에는 상해 부근에 저기압이 위치하고 있다. 또한 북위 30°에 500hPa의 5820gpm 선이 위치하며, 제주도에는 그보다 낮은 5770gpm이 관측되었다.

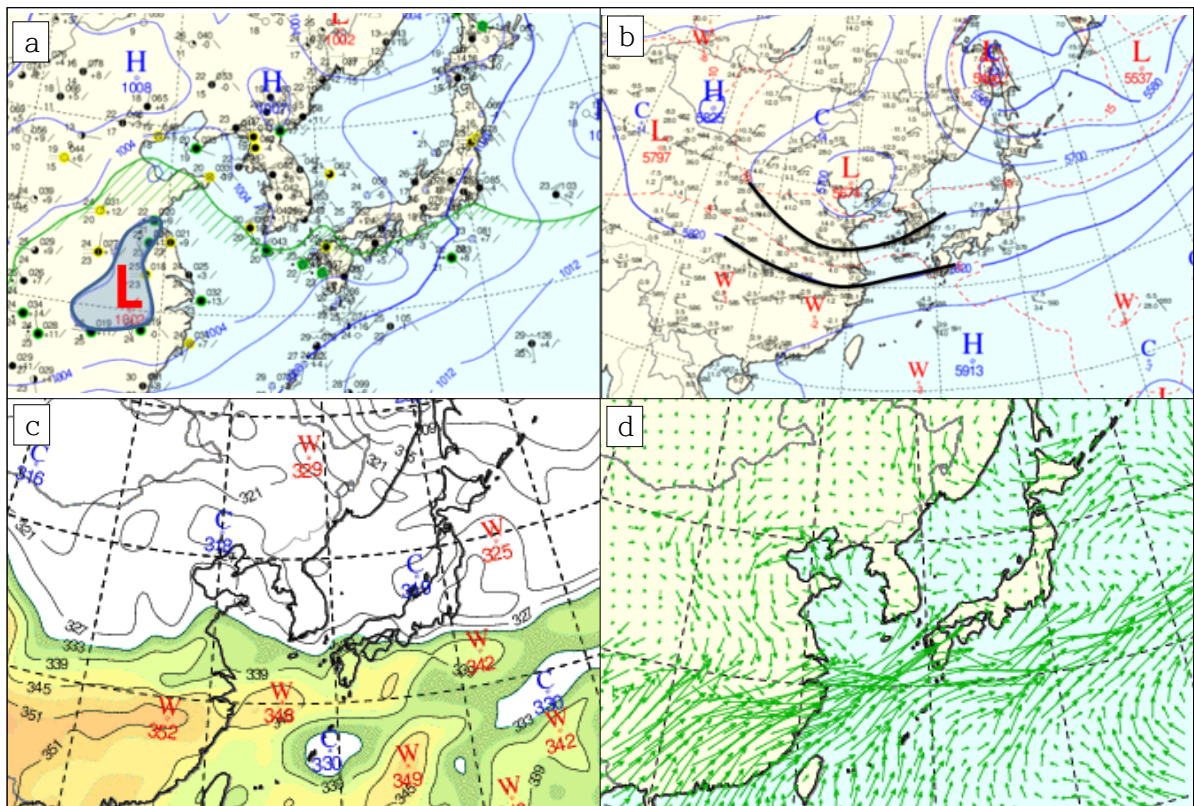


그림 3-4. 2017년 6월 24일 09시의 편집/분석 일기도

(a) 지상일기도, (b) 500hPa 일기도, (c) 850hPa 상당온위, (d) 850hPa 수분속

실제 강수대의 위치를 보면 상해 인근으로부터 제주도에 걸쳐 선형의 강수대가 형성되어 있고, 수증기 영상에서 기압골의 형태가 암역으로 잘 나타나고 있다. 즉 상해 인근의 저기압과 5820gpm 선에 동반된 북태평양고기압 가장자리, 그리고 북서쪽에서 접근하는 기압골이 균형을 이루며 제주도에 정체전선이 형성된 것으로 볼 수 있다.

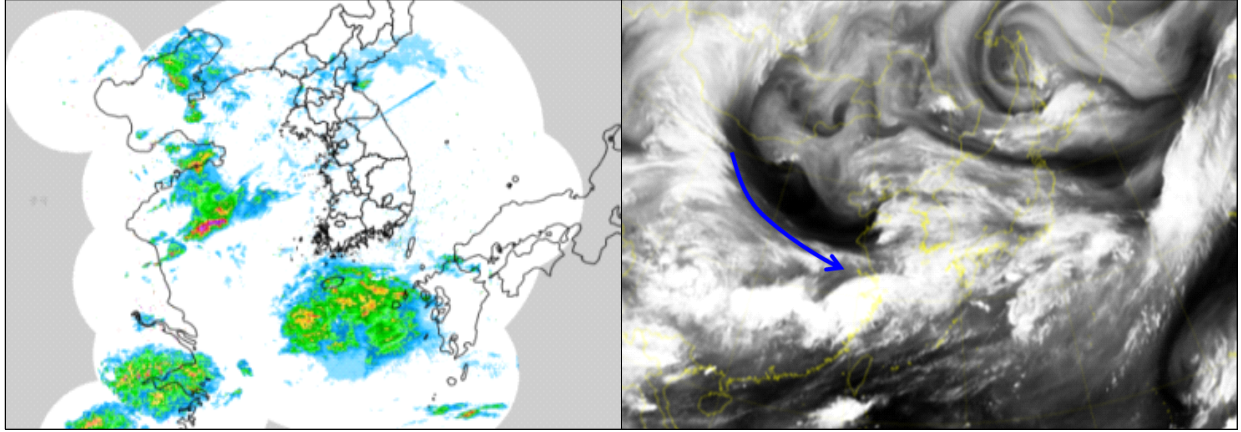


그림 3-5. 2017년 6월 24일 09시 (좌) 레이더 영상, (우) 히마와리 수증기채널 영상

3. 2. 3. 중기예보에서의 장마 시작 예측 실패 사례와 원인

앞 절에서 장마가 시작될 때 나타나는 종관기압계 특징을 크게 4가지로 제시하였다. 위 4가지 요인 중에서 어느 특정 요소가 크게 빗나간다면 장마 시작일 예측도 빗나갈 것이다. 과거 장마 시작 예측을 실패했던 사례를 통해 어떤 종관요소 예측이 빗나갔는지 살펴보고 개선 방법을 알아보도록 하겠다.

2018년 6월 22~23일 사례로 강수 예측 실패 원인을 살펴보았다.

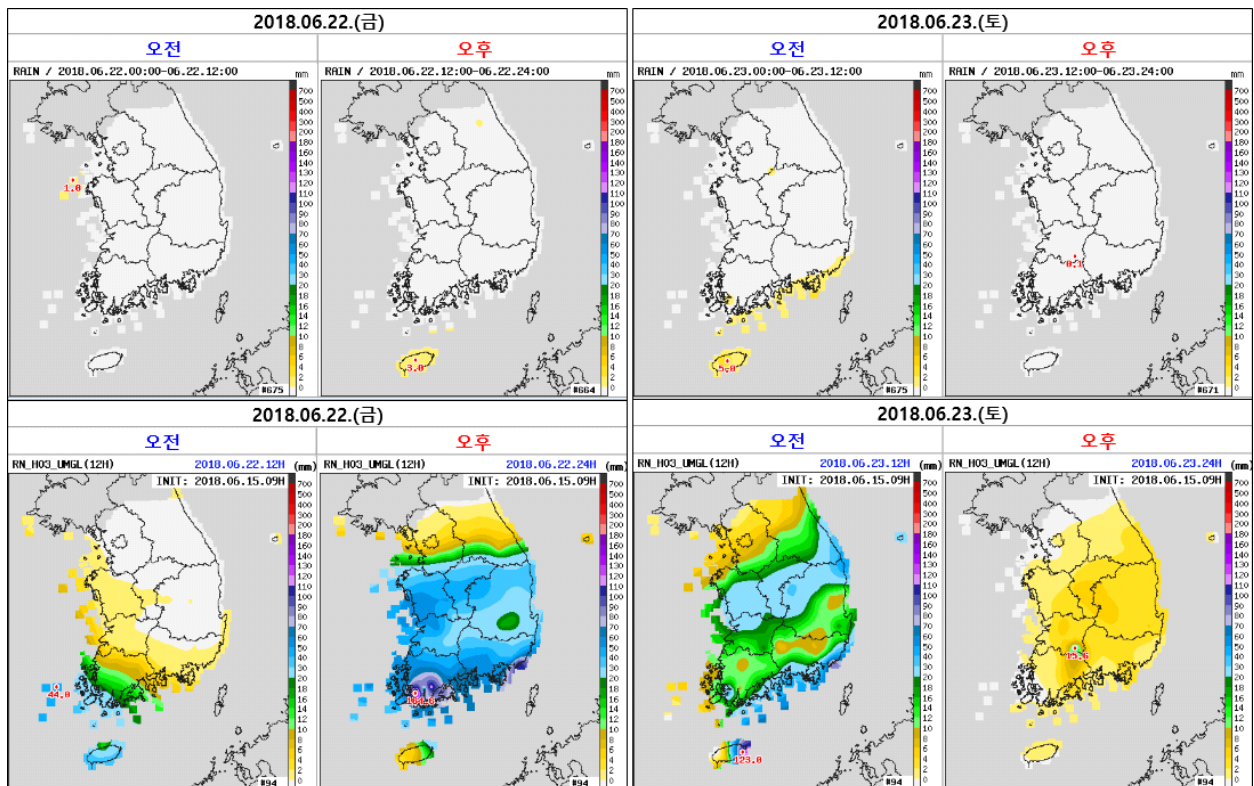


그림 3-6. 2018년 6월 22~23일 자료
(상) 강수 관측 현황, (하) 6월 15일 09시 UM 모델 예측결과

그림 3-6에서 보이는 바와 같이, UM 모델에서는 22일과 23일 전국에 강수를 예측했으나(16일 모델도 유사한 결과), 실제 22일과 23일에는 모델 예측 결과와 달리 제주도과 남해안 일부 지역에만 강수를 기록하였다. 이렇게 모델이 예측한 강수 예상 구역과 실제 강수 관측영역 차이가 크게 발생한 이유는 850hPa 상당온위에서 확인할 수 있다.

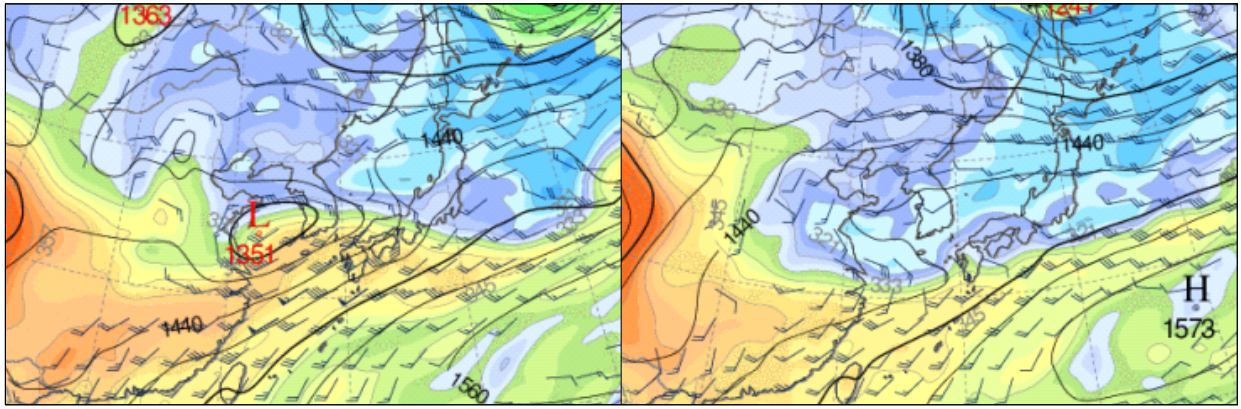


그림 3-7. 2018년 6월 22일 21시 850hPa 상당온위
(좌) 15일 09시 UM 예측장(+180h), (우) 22일 21시 UM 초기장(+0h)

그림 3-7을 보면, 좌우 그림에서 큰 차이를 발견할 수 있다. 서해상의 저기압 발달 여부가 달랐고, 그에 따라 우리나라 주변의 상당온위 값을 다르게 예측하고 있다. 15일 모델에서 예측하는 서해상의 강한 저기압은 중국 화남지역으로부터 열기와 수증기가 계속해서 축적된 상황에서 상층골이 접근하며 발달했다. 그러나 초기장을 보면 화남지역에서 저기압이 충분히 발달하지 못했고, 그 이후 상층에서 점차 침강역에 들면서 저상당온위가 서해상을 지배하며 강수현상은 남쪽으로 제한되는 구조를 보였다. 따라서 22~23일 우리나라 강수 오차의 원인은 화남지역에 수증기와 열기를 과대하게 모의하였기 때문이다.

그렇다면 북태평양고기압의 경계를 가늠할 수 있는 500hPa의 예측 정확도는 어떨을까?

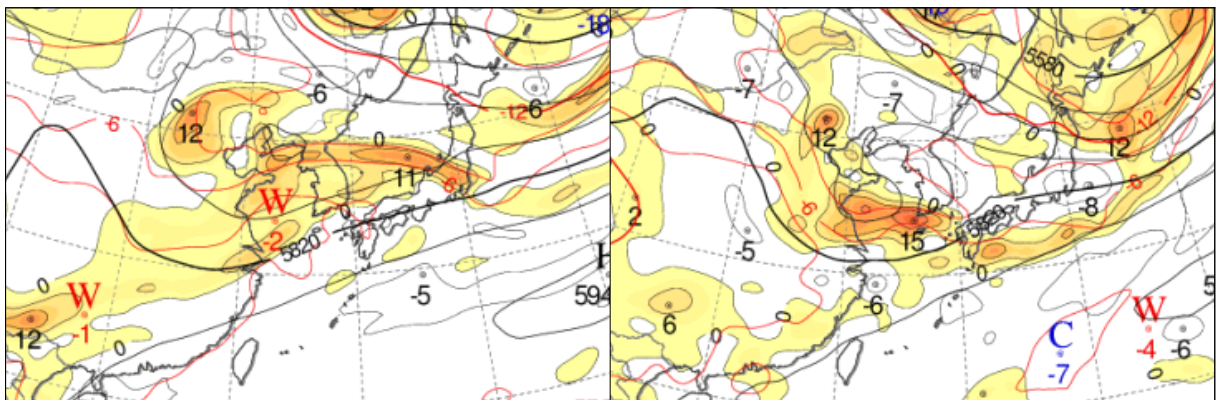


그림 3-8. 2018년 6월 22일 21시 500hPa 고도, 기온, 상대와도
(좌) 15일 09시 UM 예측장(+180h), (우) 22일 21시 UM 초기장(+0h)

500hPa 예측에서도 골의 모양, 주변 기압배치 등이 약간의 차이를 보이긴 했으나 7일 후 예측임을 고려하면 5820gpm의 위상을 비교적 잘 예측하였고, 500hPa의 고도값과 실제 강수 영역은 잘 일치하였다.

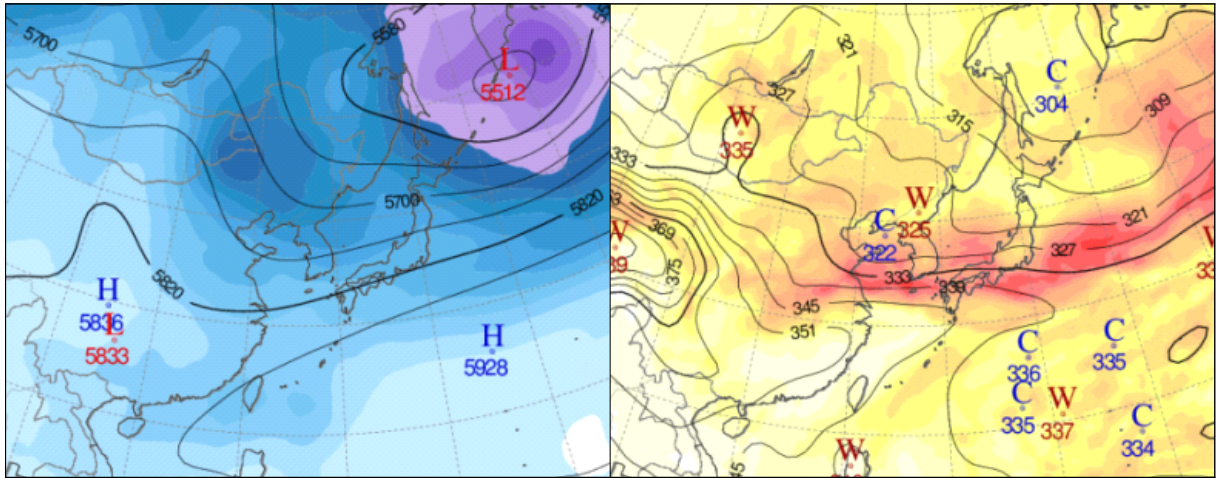


그림 3-9. 2018년 6월 22일 21시 UM 양상블 편차 예측장(15일 09시 발표)
(좌) 500hPa 지위고도, (우) 850hPa 상당온위

500hPa 양상블 편차도를 보면 5820gpm을 기준으로 편차가 20gpm 내외로, 중기기간 예측임을 고려하면 편차가 크지 않았다. 반면 오른쪽 그림의 850hPa의 상당온위를 보면 제주 인근으로 10K 이상의 큰 차이를 보이고 있다. 즉 양상블의 편차 정도를 토대로 각 고도의 예측의 일관성과 신뢰도를 따져 볼 수 있다는 뜻이다.

이를 다음 표와 같이 정리할 수 있다.

표 3-4. 양상블 편차에 따른 지상 강수 영역의 예측 방법

500hPa 지위고도	850hPa 상당온위	⇒	지상 강수 영역	⇒	강수 보정
양상블 작은 편차	양상블 작은 편차		예측 성공		-
양상블 작은 편차	양상블 큰 편차		예측 실패		500hPa 고도 활용

표 3-4는 화남지역에서 850hPa 상당온위의 작은 오차로도 예측기간이 길어지면 강수 예측에 큰 오차를 만들 수 있는 것을 보여준다. 따라서 중기예측에서는 500hPa 지위고도를 활용하는 것이 더 유용하다.

또한 단기예보의 기간으로 진입한다면 상해 인근에서 하층기압계가 보이므로, 관측되는 저기압과 실황의 강도, 크기, 위치 차이를 비교하는 등 실황분석을 면밀히 하여, 강수 예보에 적용하는 것이 매우 중요하다.

3. 2. 4. 앙상블 모델을 활용한 장마시작 예측

중기예보 강수예측에 실패했던 2015년도의 사례를 앞서 3. 2. 3.에서 제시한 앙상블 편차도를 활용하여 재분석해보았다.

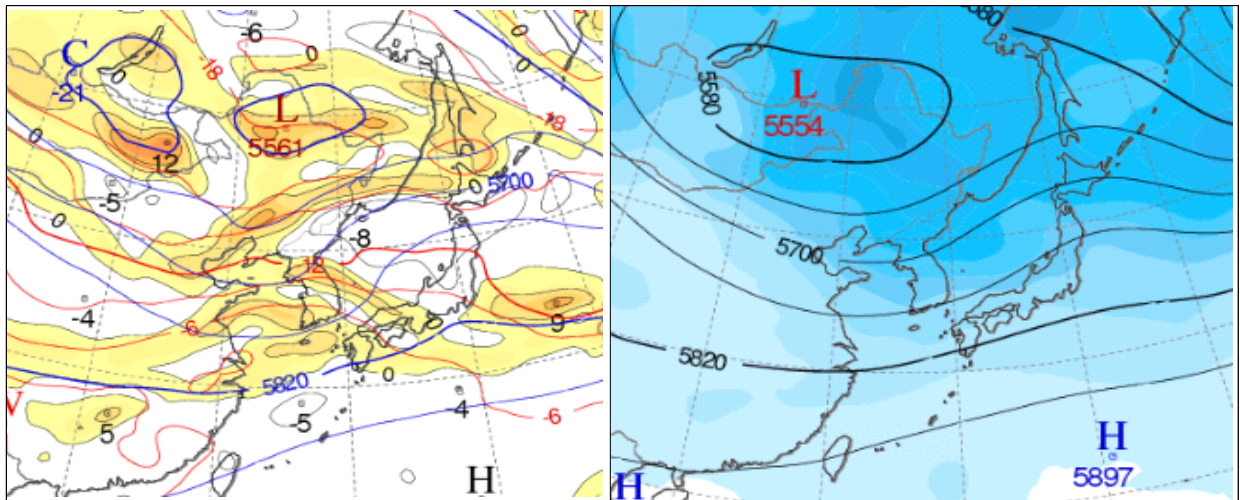


그림 3-10. 2015년 6월 8일 15시 예측장(5일 09시 발표)
(좌) 500hPa 지위고도, (우) 500hPa 앙상블 평균장과 편차

500hPa를 보면 앙상블에서 편차가 20gpm 정도로 상당히 낮게 나타나고 있으며, 이에 따라 5820선의 고도예측에서 UM 단일모델과 앙상블 평균값이 상당히 일치하고 있다. 500hPa의 예측은 비교적 안정적이다.

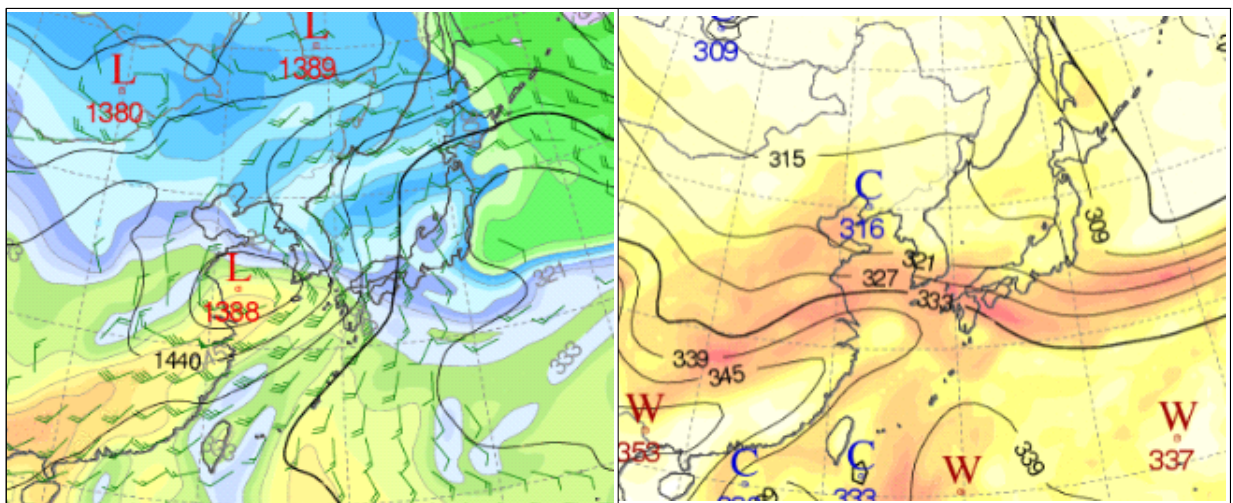


그림 3-11. 2015년 6월 8일 15시 예측장(5일 09시 발표)
(좌) 850hPa 지위고도와 상당온위장, (우) 850hPa 앙상블 평균장과 편차

반면에 850hPa 상당온위의 경우 8K 이상의 큰 편차를 보이고 있으며, 결정모델과

양상블 평균장도 큰 차이를 보인다. 결정모델의 예측결과에서는 333K의 경계선이 전남지역의 북단까지 북상해 있는 반면에 양상블 평균장에서는 제주와 남해안 사이에 위치할 만큼 더 낮게 위치해 있음을 볼 수 있다. 결국 2015년 사례는 500hPa의 편차도는 작으며 850hPa의 편차도는 큰 사례이다. 따라서 표 3-4에 따라 모델 예측 강수영역이 잘 맞지 않으며 500hPa의 고도값을 활용하여 예보를 해야 하는 경우이다.

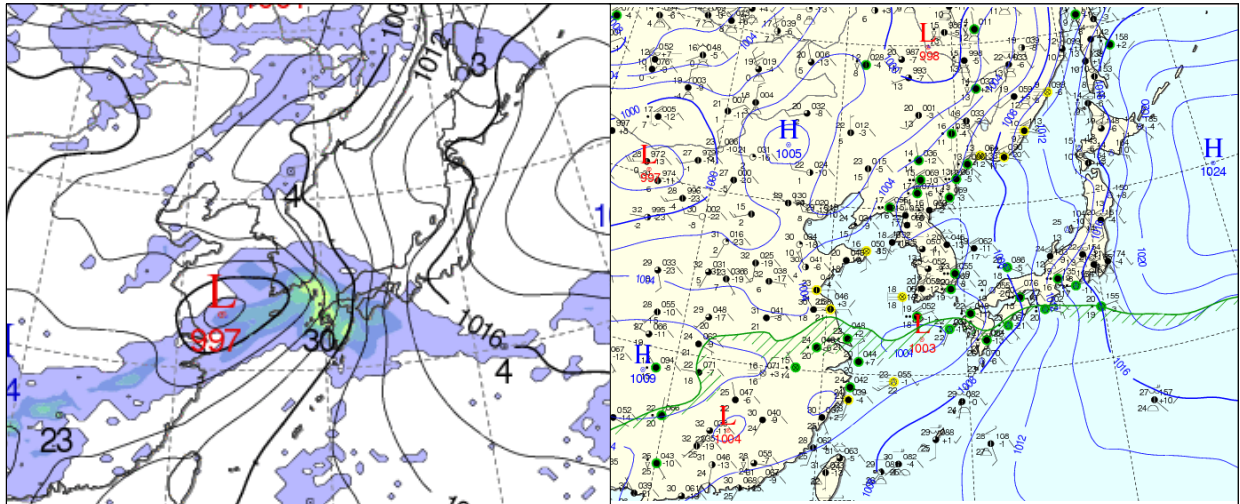


그림 3-12. 2015년 6월 8일 18시 예측장(5일 09시 발표)
(좌) 해면기압 누적강수량 예측장, (우) UM 분석장

모델이 예측하였던 지상일기도와 분석장을 비교해 보면, 결정모델에서는 서해상에 저기압을 발달시키며 강수 영역을 충청도와 강원남부까지 모의하였으나, 실제 저기압은 제주도 남쪽으로 통과하였다. 이에 따라 정체전선은 오히려 5790gpm에 해당되는 제주 남쪽해상 인근으로 형성 되었다(다만 중층기압골이 통과하며 강수량은 남부지방까지는 일부 기록되었다).

3. 2. 5. 500hPa 북서기류 과대모의와 강수 구역 불일치 사례

이번에는 500hPa의 고도장은 실제로는 크게 북상하였으나, 모델에서 강수영역을 오히려 낮은 위도로 예측했던 경우를 보겠다. 2018년 장마 시작단계에서 모델 예측자료를 살펴보자. 6월 26일 장마가 시작됐고, 중기예보의 측면에서 분석하기 위해 6일 전인 20일 모델 예측장을 기준으로 살펴보았다.

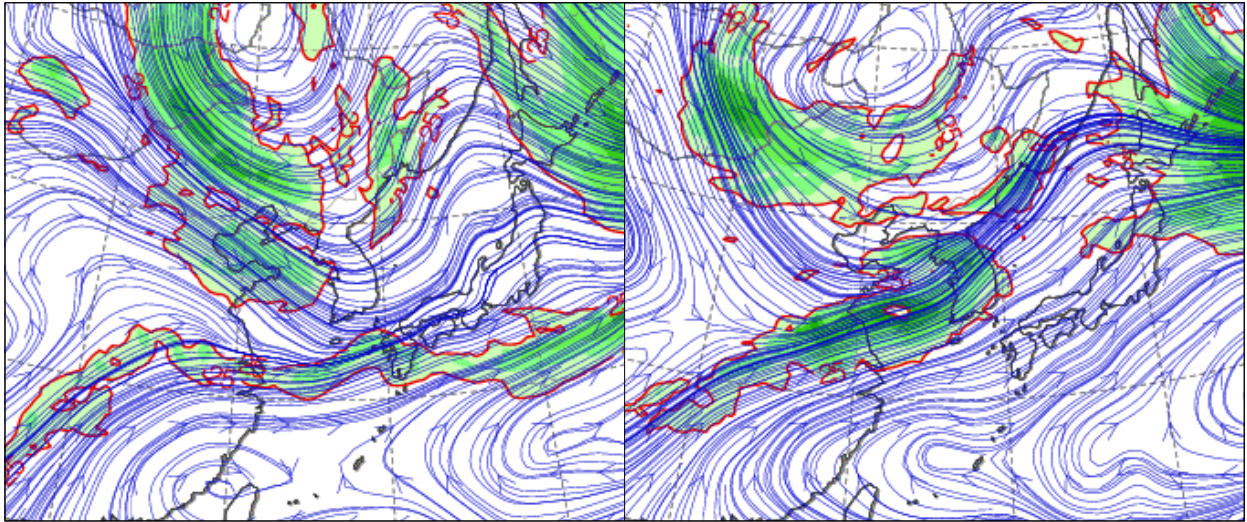


그림 3-13. 2018년 6월 26일 09시 500hPa 유선장
(좌) 20일 09시 발표(+144h 예상), (우) 20일 21시 발표(+132h 예상)

그림 3-13의 500hPa 유선장을 보면 6월 20일 09시 모델에서는 한반도 주변에 북서류가 지배하고 있으며 그에 따라 강수 영역이 남쪽으로 내려가는 구조이다. 반면에 6월 20일 21시 모델의 경우에는 남서류가 우세하며 하층 기압계를 북상시킬 수 있는 구조를 보이고 있다.

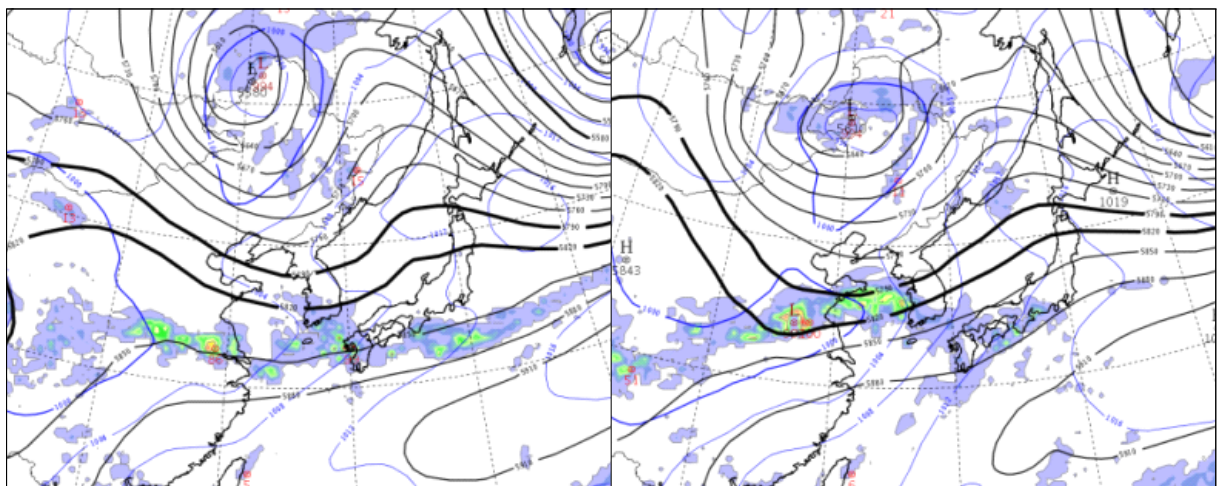


그림 3-14. 2018년 6월 26일 09시 500hPa 지위고도 예측장(검은색 실선: 위 5790gpm 아래 5820gpm)
(좌) 20일 09시 발표(+144h 예상), (우) 20일 21시 발표(+132h 예상)

그림 3-14를 보면 09시 모델의 경우 골이 깊지 않고 서에서 동으로 빠르게 이동하는 모습을 보이는 반면, 21시 모델은 북쪽의 절리저기압에서 분리되면서 느리고 깊게 이동하는 모습을 보인다. 이에 따라 지상 강수 예상 구역도 달라지는데, 09시 모델의 경우 5820gpm보다 높은 고도영역, 즉 저위도 인근으로 강수 영역을 그리고 있다. 5850gpm과 강수 영역이 일치한다고 볼 수 있다. 반면 12시간 뒤에 나온 21시 모델의 경우 강수 영역을 5820gpm과 5790gpm 사이에 모의하고 있다.

앞서 조사한 자료에 따르면 장마가 시작하는 시기에는 강한 북서류와 500hPa의 5880gpm이 만나는 구역에서 발생하는 강수보다 500hPa에서 강한 남서류가 유입되면서 5790gpm 인근에서 하층저기압을 동반하며 발생하는 강수가 대부분이었다. 이러한 점을 고려하면 09시 모델 자료보다 21시 모델을 더 신뢰할 수 있다.

실제로 2018년 6월 26일 실황을 보면 5820gpm 고도가 예상보다 더 북상하였고, 강수대의 축은 충청북부와 경기남부로 통과하였다.

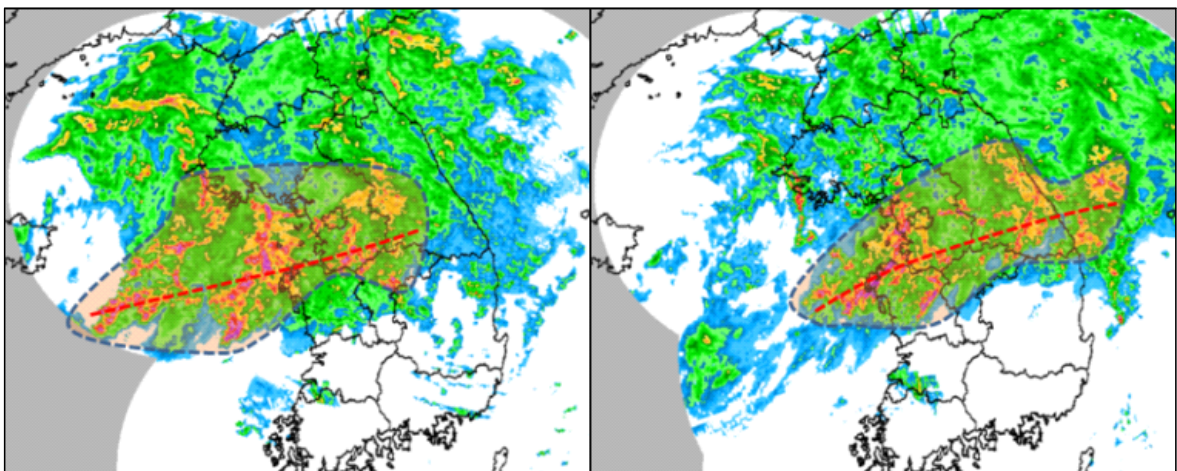


그림 3-15. 2018년 6월 26일 레이더 합성 영상 (좌) 09시, (우) 12시
(파란색 점선 구역: 10mm/h 이상 강한 강수가 내리는 구역, 빨간색 선: 강수 중심축)

따라서 전선대의 위치는 모델예측장의 상/하층의 일치 여부, 고도장의 변동성, 기압골의 속도를 실황분석 등을 통하여 종합적으로 고려하여야 한다.

Key Point!

1. 장마 초기 단계 강수 영역은 500hPa의 5790gpm을 이용
2. 850hPa 상당온위의 편차가 클 때는 앙상블 자료와 500hPa 고도 자료를 활용
3. 500hPa 고도장과 지상 강수역이 일치하지 않는 경우, 특히 예보에 주의

3. 3. 장마의 종료단계

3. 3. 1. 장마 종료 예보의 이해

일단 한반도에 장마가 시작되면, 앞서 이야기한 기단들의 상호작용으로 약 30~40일 가량 남북으로 진동을 한 후, 전선대가 중부지방 북쪽으로 올라가면서 장마가 종료된다. 일반적으로 중부지방을 기준으로 볼 때 장마가 종료되는 시점은 빠르면 7월 중순에서 늦으면 8월 중순까지도 이어진다.

장마의 종료를 정성적으로 이해하기 위하여 2018년도 북반구의 자료를 살펴보자.

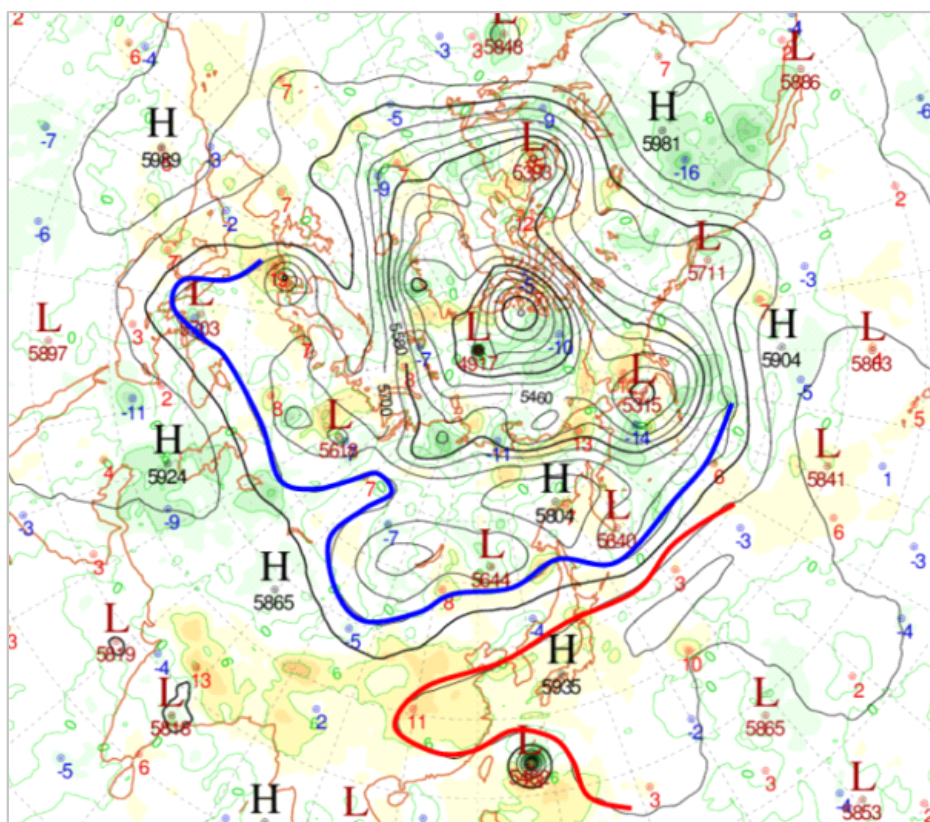


그림 3-16. 2018년 7월 10일 09시 500hPa 북반구 분석장(고도분석증분)
(빨간 실선: 5880gpm, 파란 실선: 5760gpm)

위 그림은 2018년 7월 10일 09시, 중부지방에 장마가 종료되기 하루 전의 북반구 500hPa 일기도이다. 우리나라를 기준으로 볼 때 남쪽에는 따뜻한 순압대기가 버티고 있고 북쪽에는 한기를 가진 기압골들이 주기적으로 통과하는 형태를 띠고 있다. 장마의 종료를 쉽게 정의한다면 남쪽에 고기압의 세력이 북쪽의 한기 세력보다 강한 때로 볼 수 있다【'18년 3번 사례】.

이를 상층대기와 하층대기로 나누어 생각해 볼 수 있다. 먼저 하층 대기를 고려한다면, 상당온위의 기울기가 큰 구역, 즉 상당온위의 불연속면이 북위 40° 이상 북상한다면 순압대기인 상태에서 수평경도가 없어지면서 기울기에 의한 상승운동이 일어나기 어려워진다. 두 번째로 상층대기에서는 200hPa에서 기인한 고압대가 우리나라 주변에 위치하게 된다면 상층 한기의 남하를 저지하고, 전체적으로 하강역에 들면서 강수는 더 이상 발생하기 어렵게 된다.

따라서 다음절에서 하층 상당온위에 의한 요인과 상층고기압에 의한 요인을 구분하여 장마의 종료를 생각해 보고자 한다.

3. 3. 2. 850hPa 상당온위를 활용한 장마 종료 분석

850hPa의 상당온위는 온난다습한 열대기단과 한랭건조한 한대기단을 구분하는데 유용한 지표이다. 기존 연구에 따르면 상당온위 335K 인근으로 남북 경도의 절댓값이 가장 큰 구역이 나타나며 이곳은 기단의 경계가 된다(기상청, 2011).

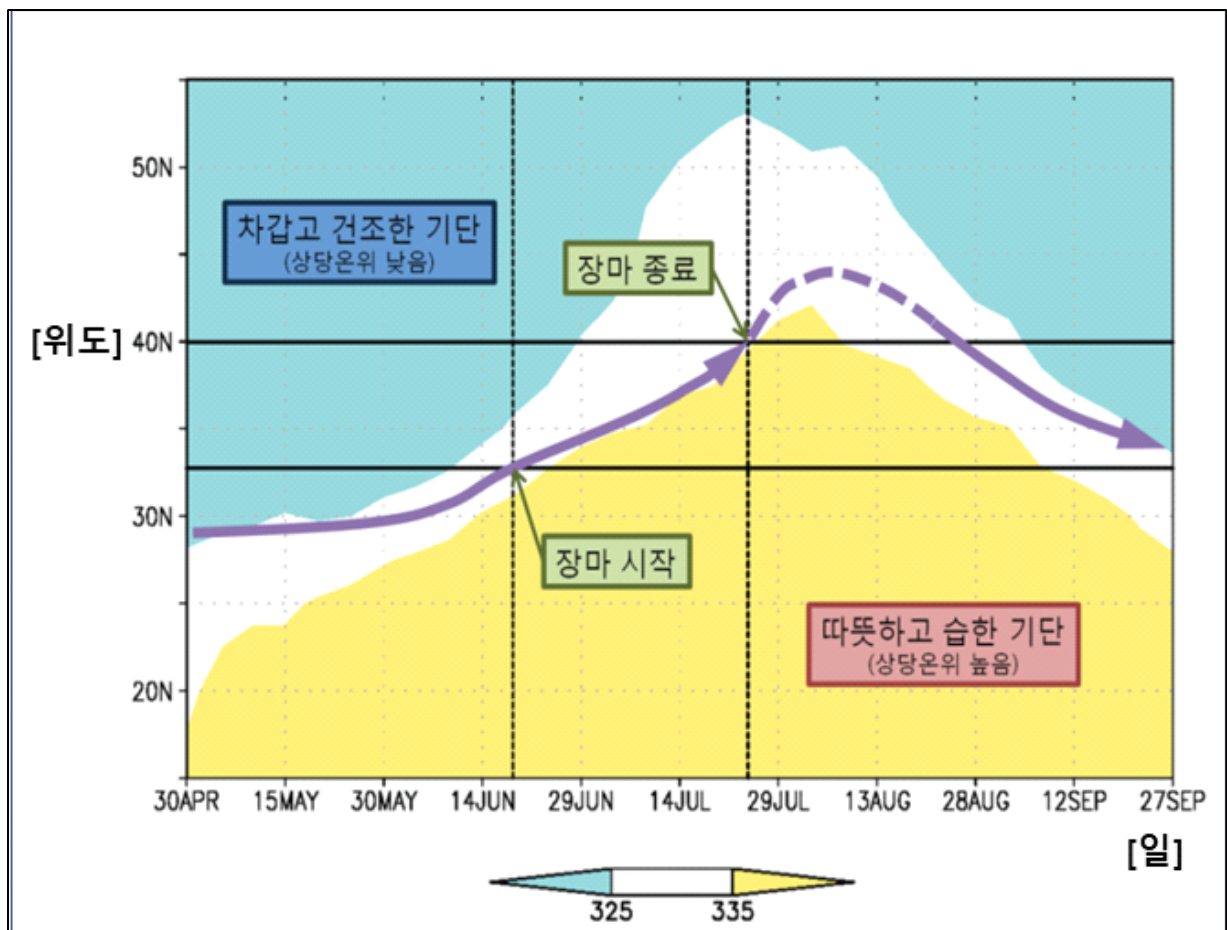


그림 3-17. 850hPa의 120°E~140°E 구역에 대해 평균한 날짜에 따른 위도별 상당온위
(노란색 영역: 상당온위 335K 이상, 청록색 영역: 상당온위 325K 미만)

그림 3-17은 동경 120~140° 구역을 평균한 850hPa 상당온위와 정체전선을 나타낸 자료이다. 335K인 구역이 북위 40° 이상으로 북상하면 장마의 종료기라고 볼 수 있다. 시기적으로 장마 종료는 7월 하순이 된다.

이를 한반도에 적용하기 위해 장마의 종료 조건을 더 세분화하면 동경 122.5°~135° 평균 상당온위의 남북 경도 절댓값의 최댓값이 북위 42.5°보다 북상하여 2일 이상 지속되는 것으로 정의할 수 있다(기상청, 2011).

이러한 상당온위를 이용한 정체전선 분석은 상당히 유용하며 기상청의 기후 값에 따른 정체전선 분석과 일치하는 부분이 많다. 그러나 앞서 장마의 시작 분석에서 보았듯이 850hPa의 상당온위 예측은 중기예보에서 낮은 정확도를 보이고 그 편차가 크다. 따라서 예보관의 관점에서 볼 때 하층 분석만을 통한 장마 종료 예보는 정확하지 않고, 위험한 방법이다. 따라서 다음 절에 나올 상층고기압 분석과 병행하는 것이 중요하다.

3. 3. 3. 티베트고기압, 북태평양고기압의 세력과 장마 종료

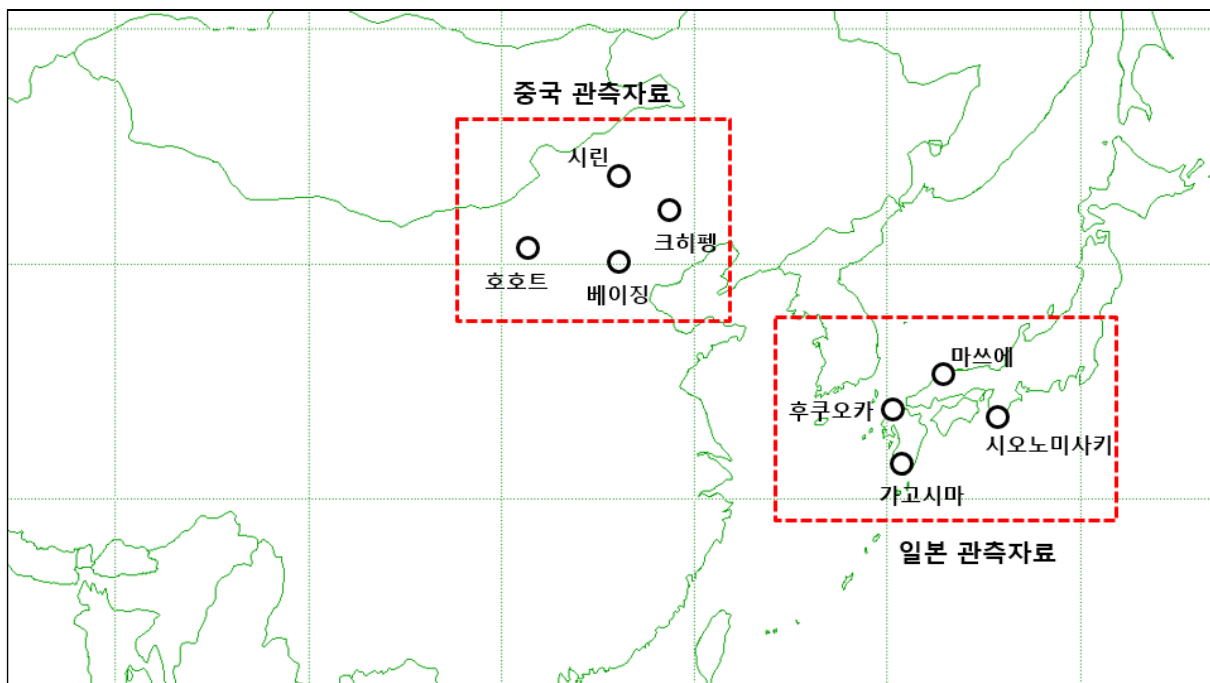


그림 3-18. 티베트고기압과 북태평양고기압 분석을 위한 200hPa(중국), 500hPa(일본) 지위고도 관측지점

발해만 북서 부근에서 발달하는 200hPa의 고압대 세력을 살펴보기 위하여 중국 북부 지역 4개 지점(시린, 호호트, 베이징, 크히펑)의 7월 15일 ~ 8월 15일 지위고도 자료를 분석하였다. 그리고 북태평양고기압의 확장을 살펴보기 위해 일본 남부 지역(가고시마, 후쿠오카, 마쓰에, 시오노미사키)의 동일 기간 500hPa 지위고도 자료를 분석하였다.

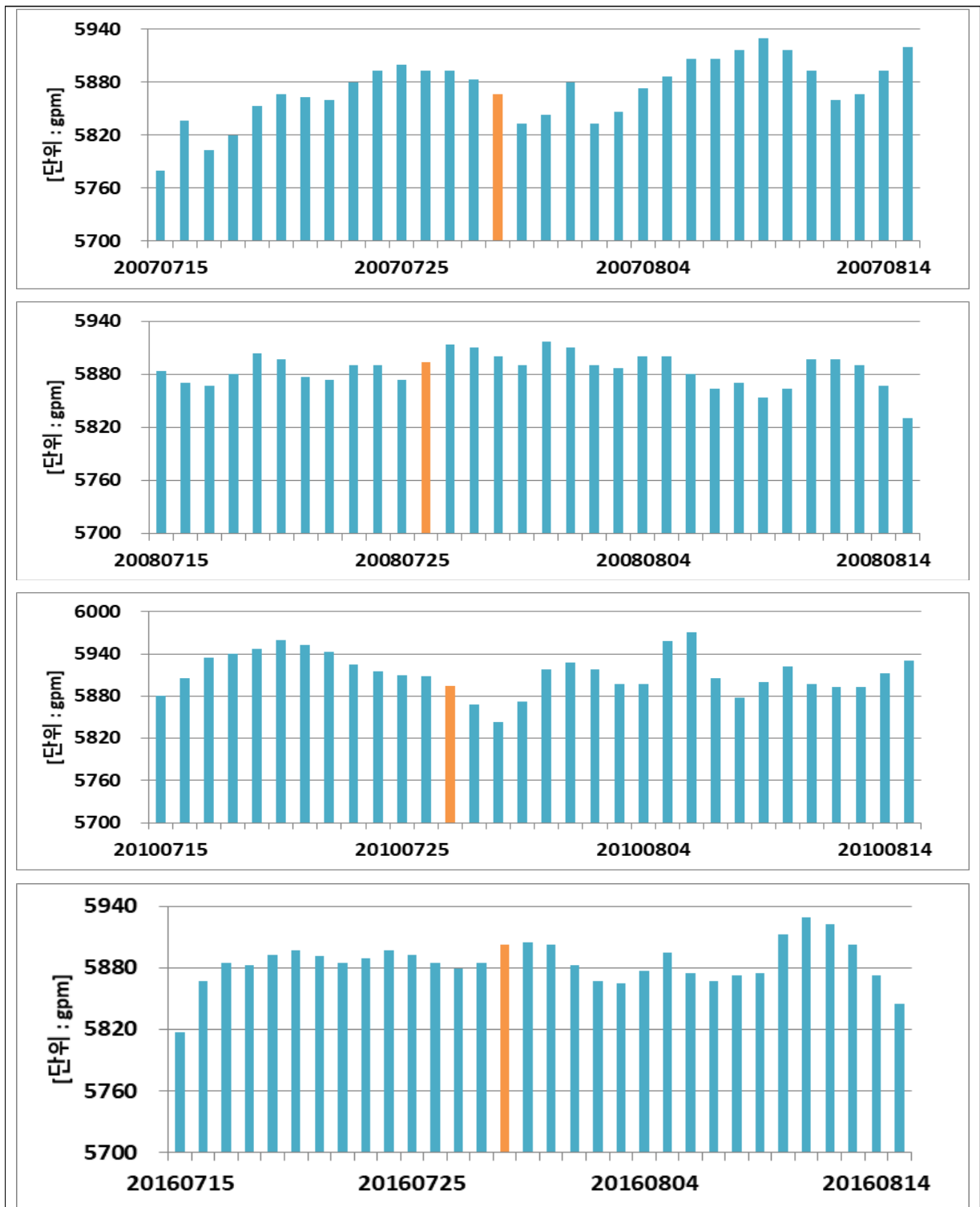


그림 3-19. 일본 관측지점들의 7월 15일~8월 15일까지 500hPa 평균 지위고도. 위에서부터 '07년, '08년, '10년, '16년 자료(주황색 세로 막대: 해당 연도의 장마 종료일)

먼저 북태평양고기압의 확장을 살펴보기 위해 일본 지역의 500hPa 고도장 변화를 살펴보았다(그림 3-19). 주황색 막대는 장마의 종료날짜이다. 장마 종료가 7월 하순에 선언되었던 2007년, 2008년, 2010년, 2015년, 2016년의 자료를 살펴보았다.(그 외의 연도에 대해서는 뒤쪽에서 언급) 500hPa에서의 특이점은 장마가 종료될 때 고도장이 상승기일 때도 있지만, 반대로 하강하는 경우도 많다는 것이다. 즉, 북태평양고기압의

확장만으로 장마의 종료를 판단하기는 어렵다. 왜냐하면 북태평양고기압이 일시적으로 확장한다고 하더라도, 골에 동반된 큰 규모의 한기가 남하하면 전선대가 남하하면서 다시 반복적으로 강수가 내릴 수 있기 때문이다.

이번에는 장마 종료와 티베트고기압의 연관성을 살펴보기 위해 중국 지역의 200hPa 지위고도 자료를 살펴보았다(그림 3-20).

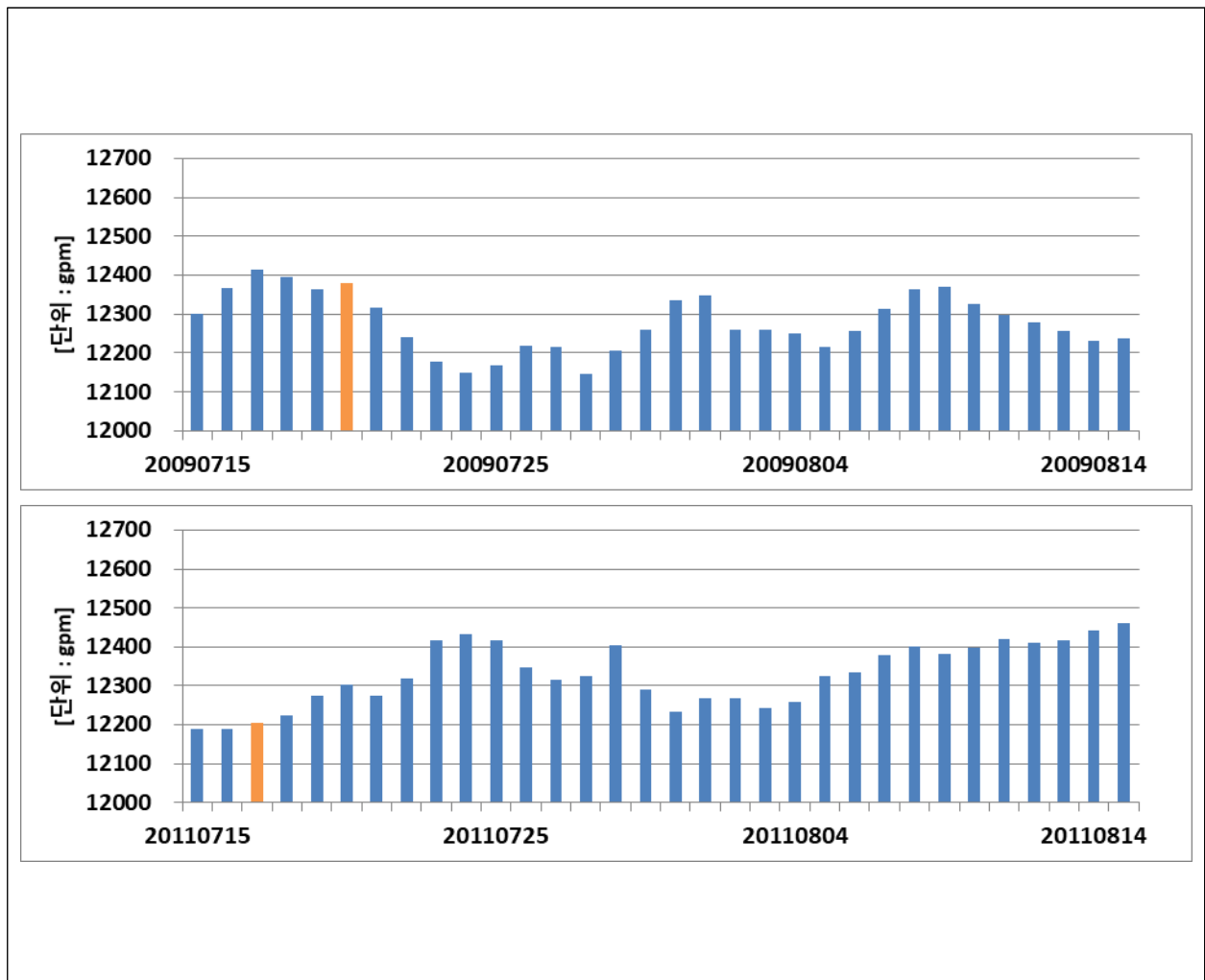


그림 3-20. 중국 관측지점들의 7월 15일~8월 15일까지 200hPa 평균 지위고도. 위에서부터 '07년, '08년, '10년, '16년 자료(주황색 세로 막대: 해당 연도의 장마 종료일)

중국의 200hPa 자료를 보면 2007년, 2008년, 2010년, 2016년에 한 달 동안 크게 3번 또는 4번의 고도상의 상승과 하강의 주기를 보였다. 장마가 종료된 날짜를 보면 대체로 두 번째 상승곡선에서 상승하는 구간, 즉 7월 하순에 고압대가 확장하는 시기에 장마가 종료되었다. 또한 종료되는 시기는 고도상승기임과 동시에 200hPa 지위고도값이 12400gpm 이상을 나타내었다.

여기서 장마가 종료될 때 12400gpm이라는 숫자는 특별한 의미를 지닌다. 그림 3-18에서 중국 부근의 관측 장소는 티베트고기압이 확장할 때 고도 값이 높아지는 곳이다. 그런데 이 지역은 상층 한기가 남하하는 길목이기 때문에 12400gpm 이상 고도가 높아진다면 한기를 차단하는 역할을 하게 된다. 또한 발해만 북쪽 고압대는 우리나라 인근으로 침강공기를 유발하게 되므로 우리나라 인근 하층 고기압을 더욱 강화하고, 단열적으로 침강된 공기들은 승온현상을 거치면서 기온을 상승하게 하는 요인이 된다.

다음으로 앞서 살펴보지 못한 2009년, 2011년, 2012년, 2013년(2014년은 GTS자료 누락으로 제외)을 살펴보자(그림 3-21).



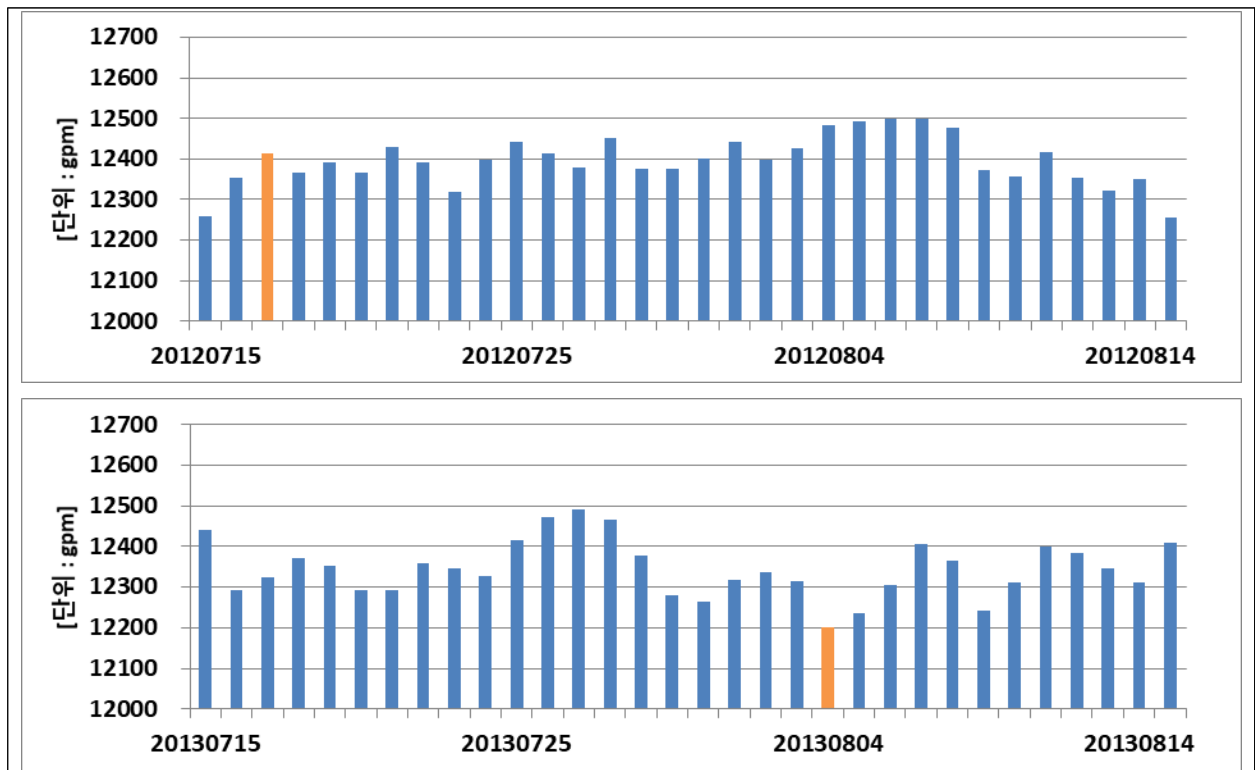


그림 3-21. 중국 관측지점들의 7월 15일~8월 15일 기간의 200hPa 평균 지위고도. 위에서부터 '09년, '11년, '12년, '13년 자료(주황색 세로 막대: 해당 연도의 장마 종료일)

2009년, 2011년, 2012년의 경우는 장마가 7월 상순에 이르게 종료된 해이다. 그러나 이 3개년도의 경우는 200hPa의 지위고도가 12400gpm 이하로 높지 않거나, 또는 하강 추세에 있는 특징을 보였다. 이에 따라 한기가 자주 남하하거나, 또는 태풍 북상 등의 이유로 많은 강수가 반복적으로 나타났다.

2013년의 경우는 8월 4일에 장마를 종료하였다. 그러나 장마 종료 당시 지위고도는 12200gpm에 불과했다. 상층 한기가 남하하기에 좋은 조건이었고 계속해서 대류성 강수들이 잘 발달하였다(상세한 기압계 설명은 다음절에서 언급).

북쪽 찬 공기의 세력이 강한 해에는 정체전선이 확실히 우리나라 북쪽으로 올라가지 못하는 사례도 있다(예, 2019년). 그런 경우 장마기간에는 비가 적다가 8월 하순부터 전선이 다시 활성화되면서 많은 비가 오는, 흔히 말하는 가을장마의 형태로 나타나는 경우도 있다. 반대로 티베트고기압이 너무 빨리 확장하면서 7월 초반에 장마가 깔끔하게 종료되는 경우도 있다(예, 2018년). 장마 종로의 패턴은 무난하게 나타나는 경우도 있으나 위 예시처럼 변동이 큰 경우도 있다. 따라서 향후 장마 종료에 대해서는 여러 가지 논의와 합의가 필요할 것으로 보인다.

3. 3. 4. 사례를 통한 장마 종료 기압배치 분석

개별 사례를 통해서 장마가 종료되었을 때 나타난 종관기압계 패턴을 살펴보자. 아래 그림 3-22와 3-23은 티베트고기압이 접근하면서 장마가 종료되었던 2016년의 사례이다.

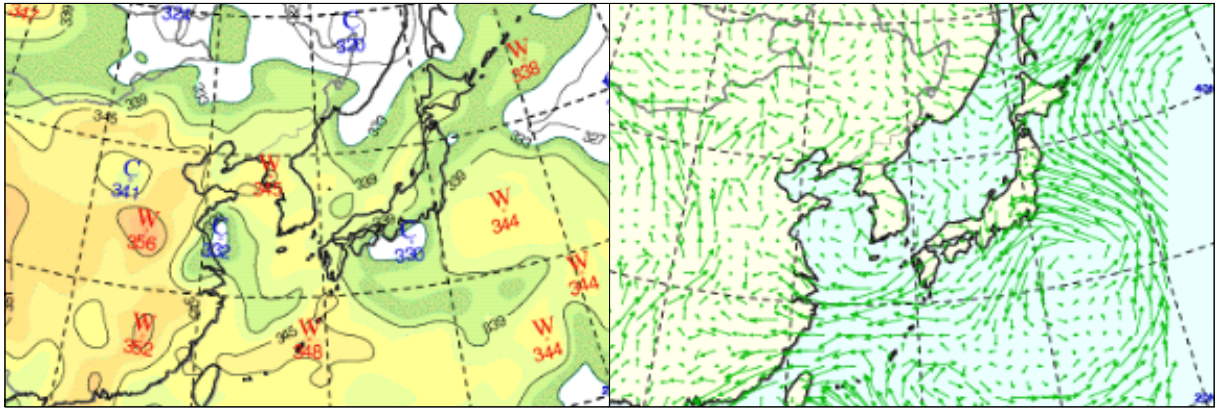


그림 3-22. 2016년 7월 31일 09시 (좌) 850hPa 상당온위, (우) 850hPa 수분속

먼저 상당온위를 보면 333K 구역이 북위 45° 이상까지 북상하였고, 하층에 특별한 수분속도 없는 상태이다. 수평적으로 불연속이 없는 상태이므로, 상층에 고기압이 자리 잡으며 상층 한기만 차단된다면 연직적으로 불안정도 사라지므로 장마의 종료로 볼 수 있는 상황이다.

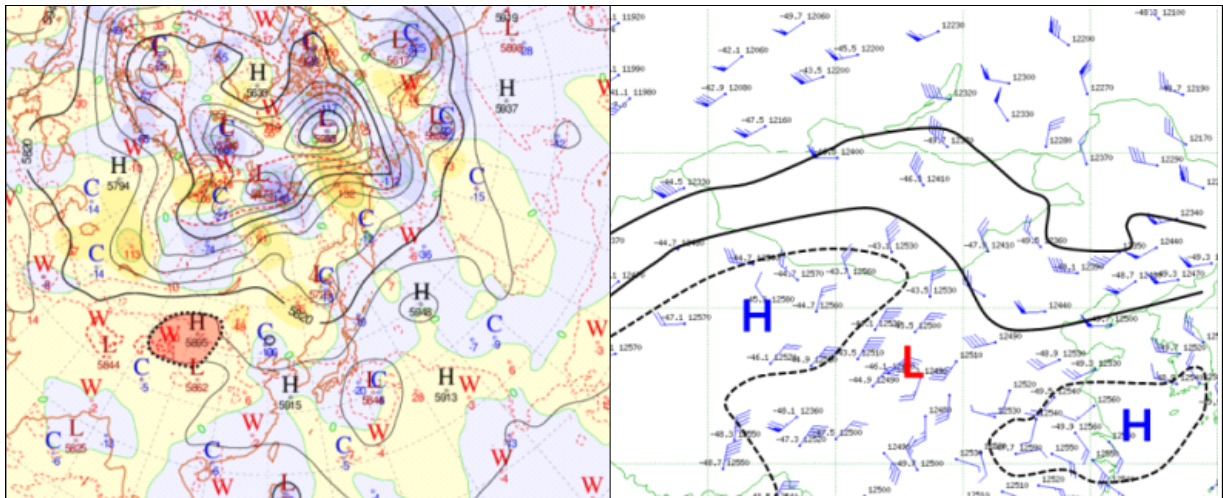


그림 3-23. 2016년 7월 31일 09시 (좌) 500hPa 북반구 분석장(고도분석), (우) 200hPa GTS 분석
(오른쪽 그림의 검은색 선: 위에서부터 12360gpm, 12480gpm, 12540gpm 등고선)

500hPa 북반구 일기도에서 우리나라를 중심으로 보면 5880gpm 선이 중부지방에 위치하고 골이 서쪽에서 접근하면서 정체전선을 이루고 있다. 그런데 특징적인 것은 몽골 남쪽에도 고기압이 크게 형성되어 있다. 이 고기압은 200hPa GTS 자료에서 보면 상층에서 확장하는 고기압의 가장자리에서 침강하는 구역에서 발생하는 역학적

고기압이다. 이 고기압은 북태평양고기압보다 훨씬 높은 위도에서 형성되고 서쪽에서 동쪽으로 이동하기 때문에 우리나라 서쪽에 골이 빠져나가면 키 큰 고기압이 우리나라를 뒤덮게 된다. 따라서 더이상 중위도 파동이 우리나라에 영향을 줄 수 없으며 정체전선에서의 강수 또한 발생하기 어렵다.

2014년의 경우도 비슷하게 전개되었다(그림 3-24, 3-25). 먼저 하층부터 살펴보자.

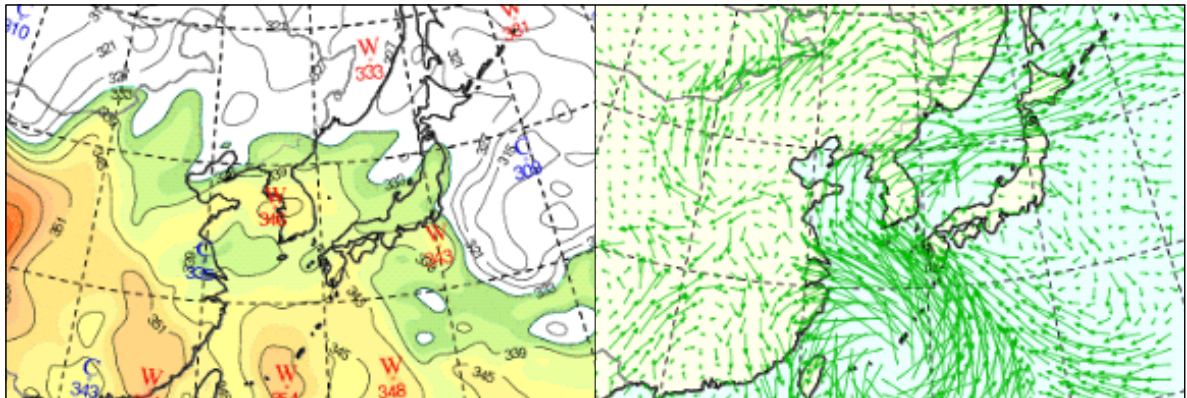


그림 3-24. 2014년 7월 31일 09시 (좌) 850hPa 상당온위, (우) 850hPa 수분속

850hPa의 상당온위는 평균적으로 북위 40° 안팎에 위치하면서 장마 종료 조건에는 약간 못 미치는 상태이며, 수분속의 경우에도 태풍을 따라 유입되면서 장마 종료를 판정하기에는 어려움이 있는 상태이다. 따라서 상층의 고기압 여부가 중요한 변수이다.

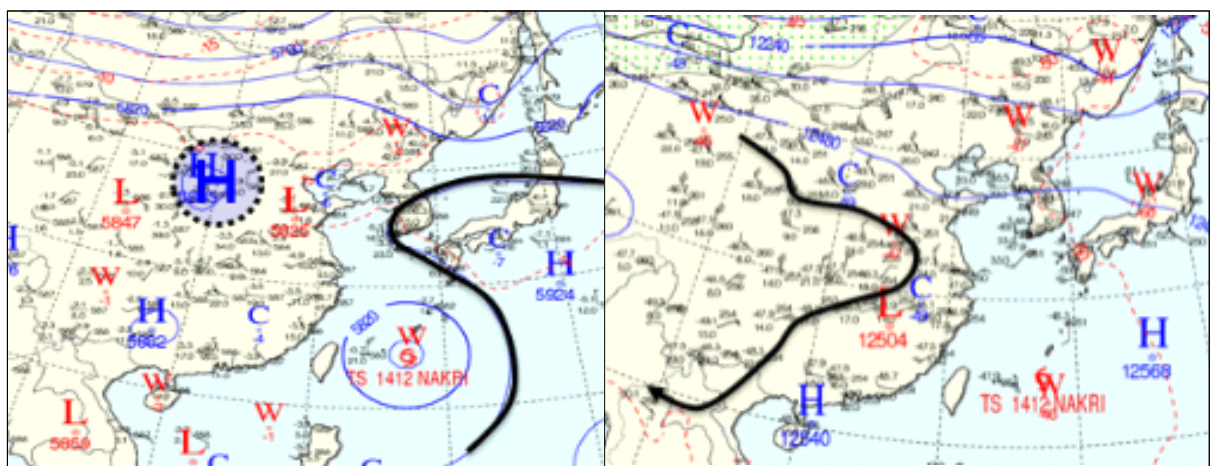


그림 3-25. 2014년 7월 31일 09시 (좌) 500hPa 일기도
(검은색 선: 5880gpm 등고선, 파란색 음영 영역: 200hPa부터 발달한 역학적 고기압의 중심)
(우) 200hPa 일기도(검은색 선: 티베트에서 발달하는 고기압권역)

500hPa 기압계를 보면 중형급 태풍 나크리가 대만 동쪽에 위치하고 있고 그 북쪽으로 북태평양고기압이 자리 잡고 있으며, 5880gpm 선은 중부지방에 걸쳐있다. 태풍이 받치고 있는 북태평양고기압은 태풍에 의해 에너지가 공급되면서 가장자리가 잘 버티는 형태를 띤다. 우리나라 서쪽을 보면, 몽골 남쪽에 고기압이 위치하고 있고, 그 전면 산둥반도 주변에 기압골이 위치하고 있다. 몽골 남쪽에 위치한 고기압은 200hPa부터

발달한 역학적 고기압이며, 전면에 기압골이 통과하고 나면 우리나라를 뒤덮으면서 중위도 단파골의 남하를 저지하는 역할을 하게 된다. 즉 태풍과 그 전면 북태평양고기압 그리고 티베트에서부터 역학적으로 발달하는 고기압이 연결되며 장마는 종료되었다.

위 두 사례의 공통점을 보면 북태평양고기압이 중부지방까지 위치하였고 또한 역학적 고기압이 동경 100~110°, 북위 40°를 중심으로 형성되어서 우리나라에 접근하였다는 것이다. 앞선 통계 자료와 일맥상통한다고 볼 수 있다.

그렇다면 이것과는 조금 상반되는 2013년도의 사례를 보자(그림 3-26, 3-27).

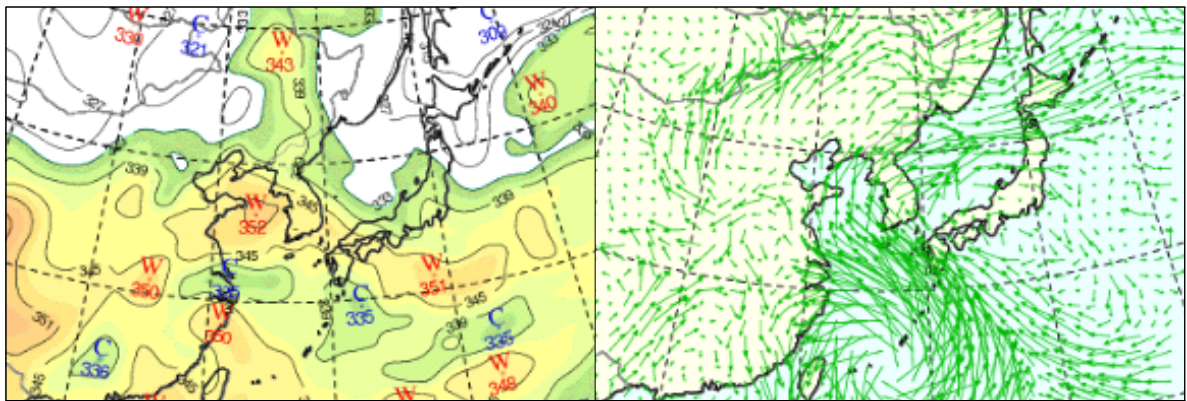


그림 3-26. 2013년 8월 2일 09 (좌) 850hPa 상당온위, (우) 850hPa 수분속

850hPa에서는 기압골 전면에서 남서류가 강한 구역이 북위 50°를 넘어서까지 북상해 있고 수분속에서도 수증기의 축은 북한 지역으로 북편하는 형태를 보여주고 있으므로 하층만 보아서는 마치 장마가 종료될 것 같은 형태를 보이고 있다.

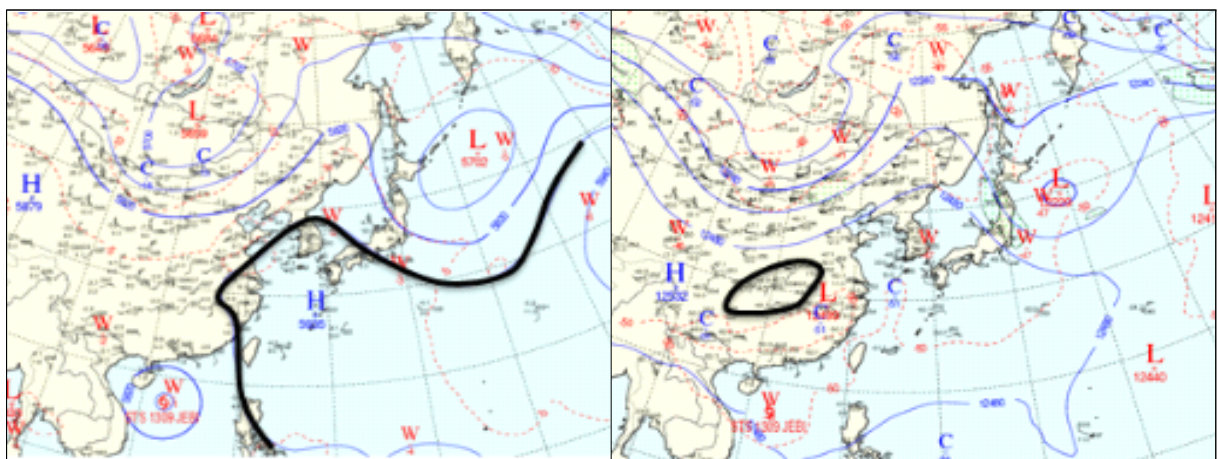


그림 3-27. 2013년 8월 2일 09시 (좌) 500hPa 일기도(검은색 선: 5880gpm 등고선), (우) 200hPa 일기도(검은색 선: 티베트에서 발달하는 고기압권역)

또한 500hPa에서도 5880gpm선이 백령도 인근까지 북상하여 상당히 넓은 범위를 차지하고 있다. 그러나 200hPa에서 보면 12480gpm 선 안에 고기압의 위치가 북위

30°에 위치하여, 이전 사례들보다 낮은 고도에 형성되어 있다. 그러다 보니 고기압의 동쪽으로 한기가 내려올 수 있는 통로가 열려있다.

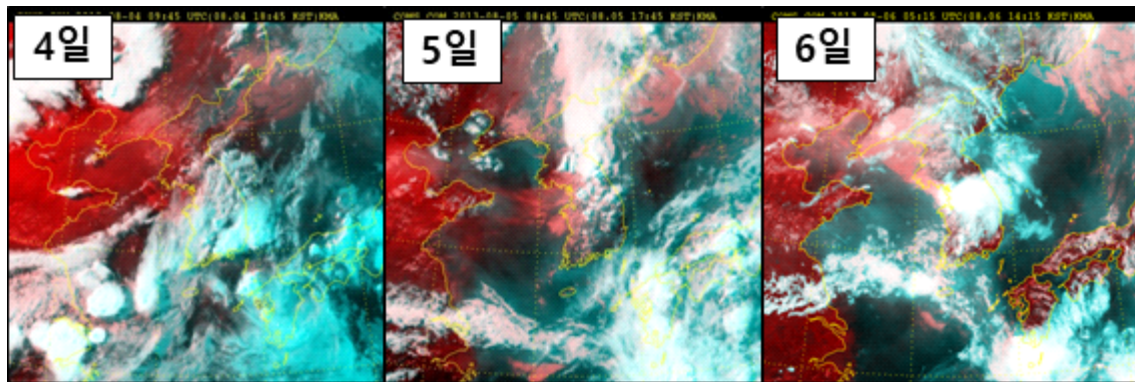


그림 3-28. 2013년 8월 4~6일의 주야간 합성영상

하층의 상당온위는 높지만 북쪽에 열린 상층의 통로로 한기가 내려오면서 불안정에 의한 강수가 8월 6일까지도 지속되었다. 따라서 이러한 경우는 장마가 종료되었다고 선언하기는 어려울 것이다.

Key Point!

1. 850hPa의 상당온위가 북위 42° 이상 북상하는 것은 장마 종료의 필요 조건
2. 북태평양고기압이 일시적으로 북한으로 북상하여도, 장마 종료 선언은 어려움
3. 7월 하순에 북위 40°, 동경 100~110° 사이에서 200hPa 고도장 상승할 때 상층 한기 남하를 저지하며 장마가 종료됨

3. 4. 장마의 시작/종료단계 예보를 위한 흐름도

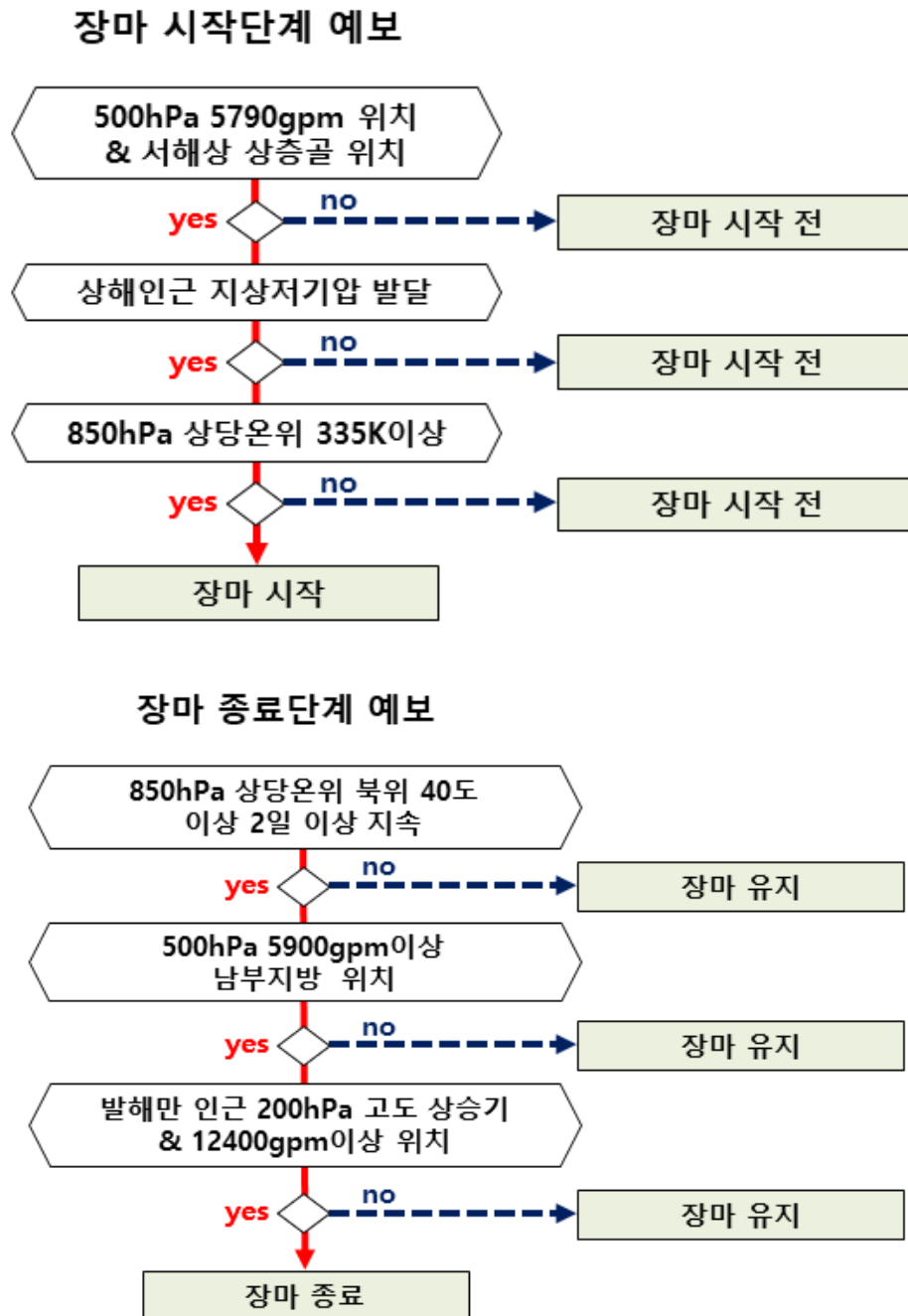


그림 3-29. 장마의 시작/종료 단계 예보를 위한 흐름도

참고문헌

1. 국가기후데이터센터, 2016 : 기후데이터로 보는 장마의 모든 것
2. 기상청, 2011 : 2011년 장마백서
3. 예보분석팀, 2017 : 예보관 관점의 장마 분석기법 연구
4. APCC, 2017 : 현업 장기예보 정확도 향상을 위한 APCC-기상청 협력 시스템 구축
5. James R. Holton, Gregory J.Hakim : An introduction to dynamic meteorology

《Why?How!》 제2권 ‘여름예보 사례분석’ 가이드스 연계 내용

- 3. 3. 1. 장마 종료 예보의 이해: 【'18년 3번 사례】

여름 예보

4. 한반도 폭염의 원인과 예보 가이드스



4. 한반도 폭염의 원인과 예보 가이드스

Why?

2018년은 폭염과 관련된 모든 기록을 경신한 해이다. 기상관측 이래로 가장 많은 폭염 일수를 기록하였고, 서울지역은 가장 높은 기온(39.6℃)을 기록했으며, 전국 전 지점을 통틀어 가장 높은 기온이 홍천(41.0℃)에서 기록되었다. 이러한 극한의 폭염, 그리고 장기간의 폭염을 예측하기 위해서는 기단 분석, 모델 분석, 과거 사례분석 등이 종합적으로 이루어져야 한다. 2018년에 있었던 폭염 분석 결과와 과거 통계자료를 이용하여 향후 폭염 예보에 활용할 수 있는 기준을 마련하고자 한다.

4. 1. 폭염과 폭염 예보란?

폭염의 사전적 정의를 찾아보면 ‘매우 심한 더위, 폭서’로 정의하며, 기상학적으로는 일 최고기온이 33℃ 이상인 날을 폭염일이라 한다.

폭염에 대한 예측은 호우, 태풍, 대설과 마찬가지로 조기에 탐지하여 정확히 예보하는 것이 매우 중요하다. 왜냐하면 폭염은 인명을 포함한 산업, 농업, 레저 등 사회 전반적으로 큰 피해를 주고, 또 그것을 예방하기 위해 대비할 충분한 시간이 필요하기 때문이다. 특히 2018년에는 기록적인 폭염으로 온열질환자, 사망자 모두 전년도에 비해 크게 증가하였고, 앞으로도 이러한 폭염 피해는 반복해서 나타날 가능성이 높다.

표 4-1. 폭염으로 인한 보건분야 피해(출처: 질병관리본부)

구분		2018년		2017년	
일자		온열 질환자	사망자 수	온열 질환자	사망자 수
8.10(금)	누계	4,513	48	1,567	11

사회·경제적 영향을 고려한다면 폭염 예보는 여러 가지 측면이 있다. 단순히 33℃ 이상의 기온을 기록할 것인가 여부, 얼마나 폭염이 지속될 것인가, 열대야가 발생할 것인가, 폭염은 언제 종료될 것인가, 극한의 폭염이 발생할 것인가 등을 고려하면서 예보를 해야 한다.

다음 장부터는 이러한 예보요소들을 하나씩 점검하여 폭염 예보의 가이드라인을 제시하고자 한다.

4. 2. 우리나라 폭염에 영향을 주는 기단과 그 예측

우리나라 초여름에도 이동성 고기압권 내에서 맑은 날씨에 강한 일사로 인해 33℃ 이상의 낮 최고기온을 기록하기도 하지만 흔히 말하는 지속되는 폭염은 더 큰 기단의 영향을 받는 경우이다. 우리나라 폭염에 영향을 주는 기단은 크게 두 가지로 요약할 수 있다. 첫 번째는 북태평양고기압, 두 번째는 티베트고기압이다.

4. 2. 1. 북태평양고기압

북태평양고기압은 적도와 극지역의 태양에너지 불균형에 의해 발생하는 대기 대순환으로 발생한다. 특히 이 고기압은 북서태평양의 높은 해수온도와 관련이 있고, 그렇기 때문에 고온다습한 성질을 가진다. 이 북태평양고기압과 고위도의 찬 공기 사이에서 정체전선이 형성되고, 7월 하순부터는 북태평양고기압의 세력이 더 확장하여 한반도 전체를 뒤덮으면서 고온현상을 유발한다.

4. 2. 2. 티베트고기압

평균고도 4km에 달하는 티베트 고원지역에서는 태양복사에너지에 의해 지표가 광범위하게 가열되고, 이로 인해 공기의 팽창이 일어나는데, 공기덩어리가 팽창하면서 발생하는 기단이 바로 티베트고기압이다. 5km 고도 부근에서는 주로 상승기류에 의해 저기압이 나타나지만, 부풀어 오르면서 축적되는 상층(200~100hPa)에서는 고기압으로 관측된다.

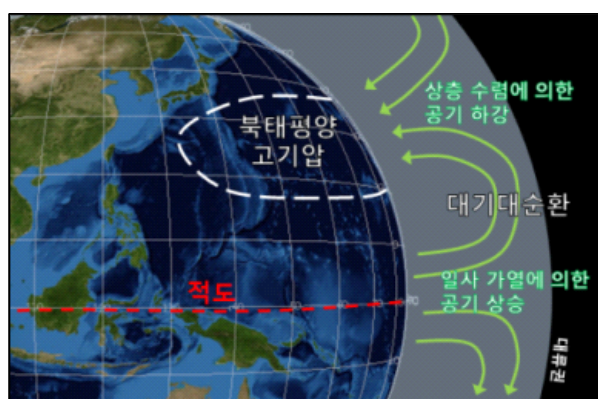


그림 4-1. 북태평양고기압 모식도

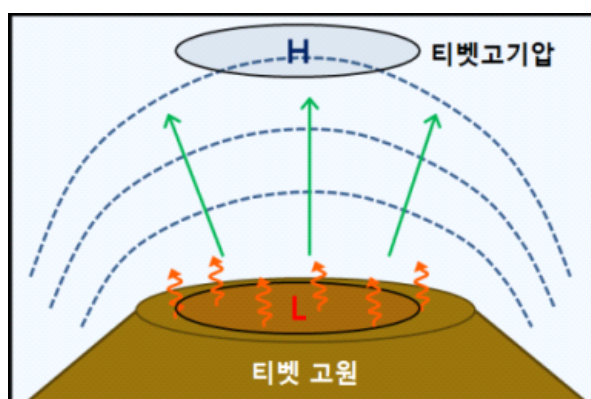


그림 4-2. 티베트고기압 모식도

4. 2. 3. 최근 한반도 폭염의 기단 특징

폭염은 주로 북태평양고기압의 영향권에 들면서 시작된다. 6월 하순 경에 장마가 시작하면 7월 상순에는 정체전선이 오르락내리락하면서 우리나라는 점차 북태평양고기압의 영향을 받기 시작한다.

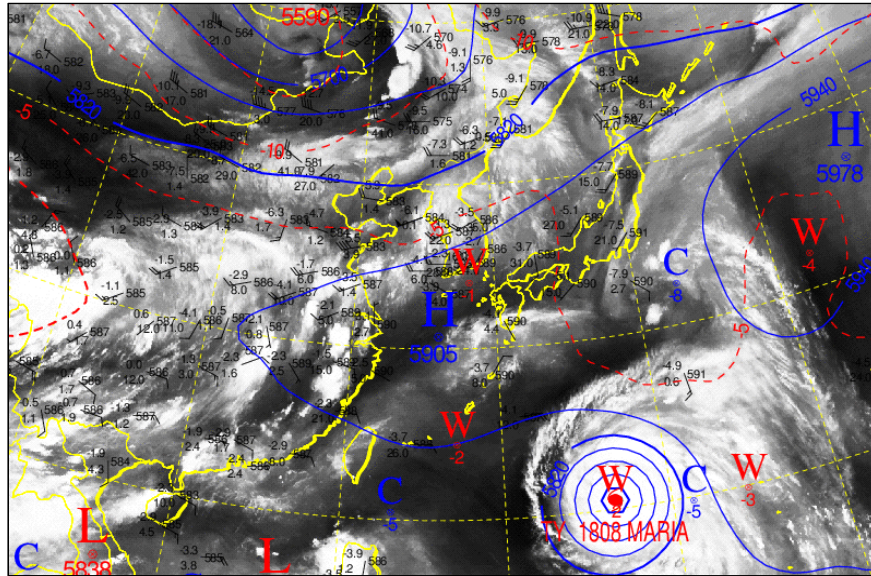


그림 4-3. 2018년 7월 8일 21시 500hPa 분석장과 수증기영상

그림 4-3에서 북위 20° 부근에는 태풍이 위치하고 있고 그 위로 북태평양고기압의 중심이 잘 나타나고 있다. 그리고 5880gpm 부근을 따라 정체전선이 형성되어 있다. 이런 경우 구름대만 벗어난다면 남부지방에서는 북태평양고기압의 영향으로 높은 기온을 기록할 수 있다.

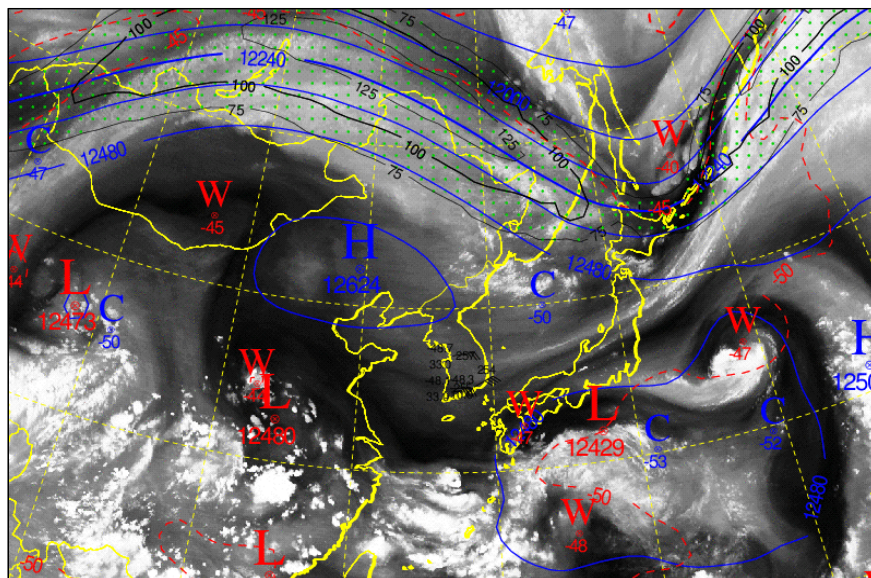


그림 4-4. 2018년 8월 1일 15시 200hPa 분석장과 수증기영상

7월 중순에서 하순이 되면 본격적으로 티베트고기압의 영향을 받기 시작한다. 그림 4-4를 보면 몽골에서 연해주 쪽으로 지위고도 12480gpm 선이 확장되어 있으며 발해만 인근으로는 고기압의 중심이 잡혀있다. 티베트고기압의 경우는 세력이 크고, 오래 유지되기 때문에 한반도 폭염의 장기화를 가져오는 주요 원인이다.

실제로 티베트고기압과 한반도의 폭염의 상관관계를 살펴보기 위해 중국의 200hPa 지위고도와 우리나라 중부지방의 최고기온을 비교해보았다.

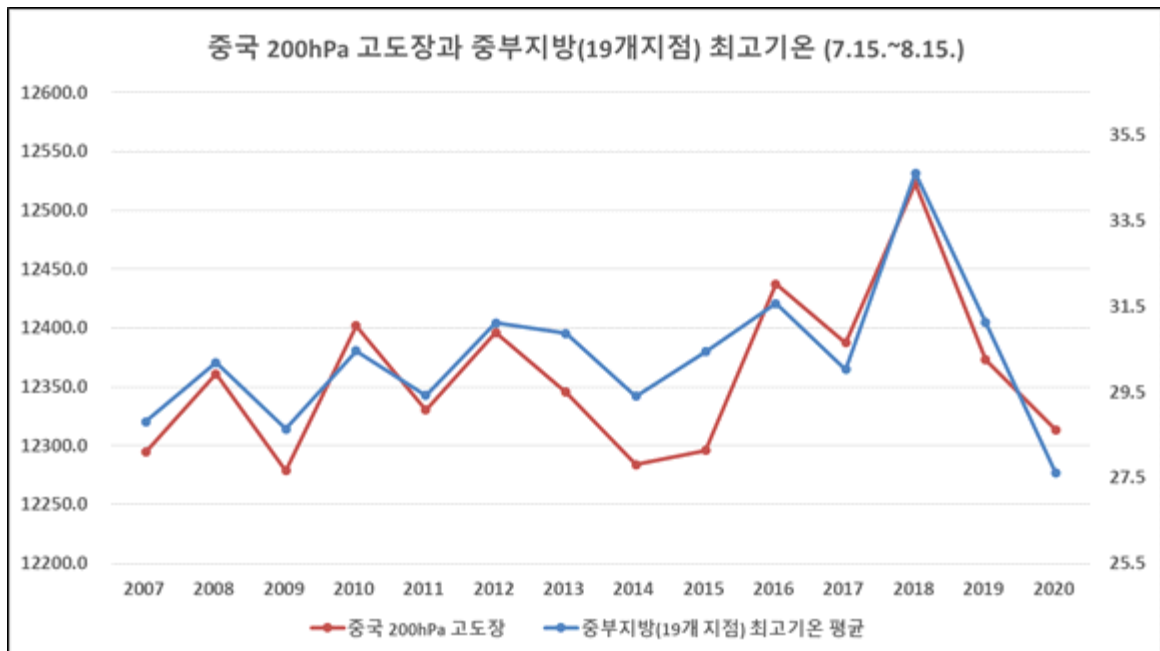


그림 4-5. 2007~2020년 각각의 해의 7월 15일~8월 15일 동안 중국 4개 지점(베이징, 호호트, 크히펑, 시린)의 200hPa 지위고도 평균값과 중부지방(19개 지점) 최고기온의 평균값
(파란색 선: 중부지방 최고기온, 빨간색 선: 중국 200hPa 고도장)

실제로 7월 중순을 넘어서면서 장기화되는 폭염의 경우는 티베트고기압의 영향이 매우 크다. 티베트고기압이 확장하는 경로인 베이징 주변의 4개 관측지점의 200hPa 지위고도와 우리나라 중부지방의 기온은 매우 밀접한 관련이 있다. 지난 14년간 7월 15일부터 8월 15일까지의 데이터를 보면 베이징 부근의 200hPa 지위고도와 우리나라 중부지방의 최고기온 경향이 매우 유사한 모습을 보인다. 즉 다시 말하면 따뜻한 공기의 유입원이 북태평양이 아니라 우리나라 서쪽 지역임을 의미한다. 결국 7월 하순 이후 폭염 분석을 위해서는 티베트고기압의 분석이 필수이다.

티베트고기압이 우리나라에 주는 영향은 해가 갈수록 점점 커지고 있다.

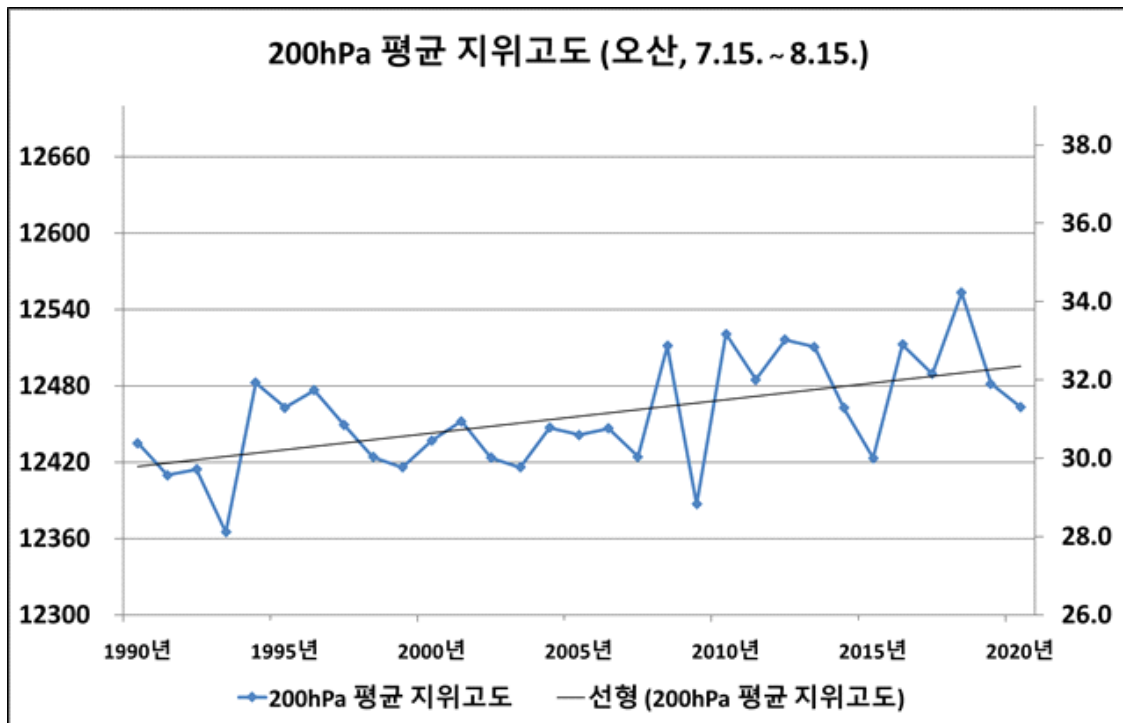


그림 4-6. 1990~2020년 7월 15일~8월 15일 오산의 200hPa 지위고도 평균값(검은 선: 선형 추세선)

위 그래프는 최근 30년간 7월 15일~8월 15일 오산 지역 200hPa 지위고도의 평균을 연도별로 나타낸 것이다. 전체적으로 상승 추세에 있는데, 지난 30년간 거의 100gpm 차이가 날 만큼 크게 증가했다. 연도별로 최솟값과 최댓값을 비교해보면 1993년에 12365gpm, 2018년에 12553gpm으로 거의 200gpm 가까운 차이를 보인다. 이는 그만큼 티베트고기압의 영향력이 과거에 비해 증가하고 있으며, 폭염 예보에 있어서 200hPa에서의 고기압 분석이 더욱 중요해진 것을 의미한다.

4. 2. 4. 우리나라 수치모델의 중기예보 기단예측에 대한 정확도

여름철 폭염 예보를 할 때, 단기기간(+2~3일) 예보보다 중기기간(+3~10일) 예측이 더 어렵다. 그 이유는 폭염에 영향을 주는 티베트고기압, 북태평양고기압과 같은 기단을 예측하는 기간이 길어질수록 모델이 잘 모의하지 못하기 때문이다. 이러한 이유로 7월 후반부, 즉 장마 종료 시점에서 500hPa의 모델 오차가 커지는 경우가 많다.

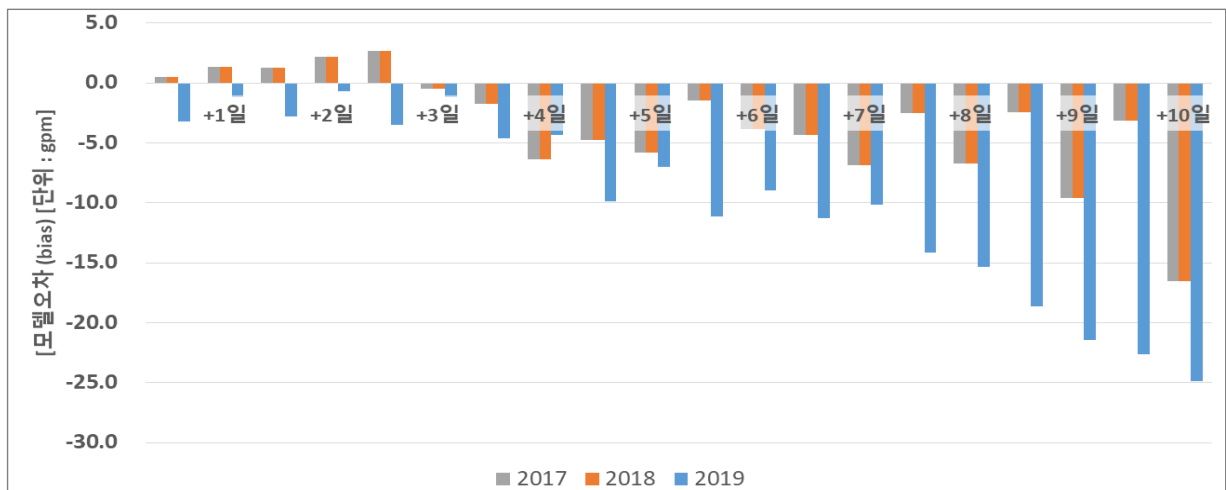


그림 4-7. 2017~2019년의 7월 15일~8월 15일의 500hPa 지위고도의 모델 예측과 분석장의 차이(서울)

2017년부터 2019년까지 UM 모델이 예측한 500hPa의 지위고도와 분석장을 비교해 보면(그림 4-7) 3일 예측까지는 $\pm 5\text{gpm}$ 정도의 편차(Bias)를 보이다가, 4일 이후부터 음의 편차로 쏠림 현상이 나타나는 것을 볼 수 있다. 특히 2019년에는 20gpm 이상의 쏠림이 있는 것을 볼 수 있다. 편차가 한쪽으로 쏠린다는 것은 모델이 실황을 전혀 반영해 주지 못하고 있다는 의미이다. 이러한 음의 편차는 2014~2016년에도 비슷하게 나타났다.

다음은 2017~2019년 UM 모델이 예측한 200hPa의 지위고도와 분석장을 비교해 보았다.

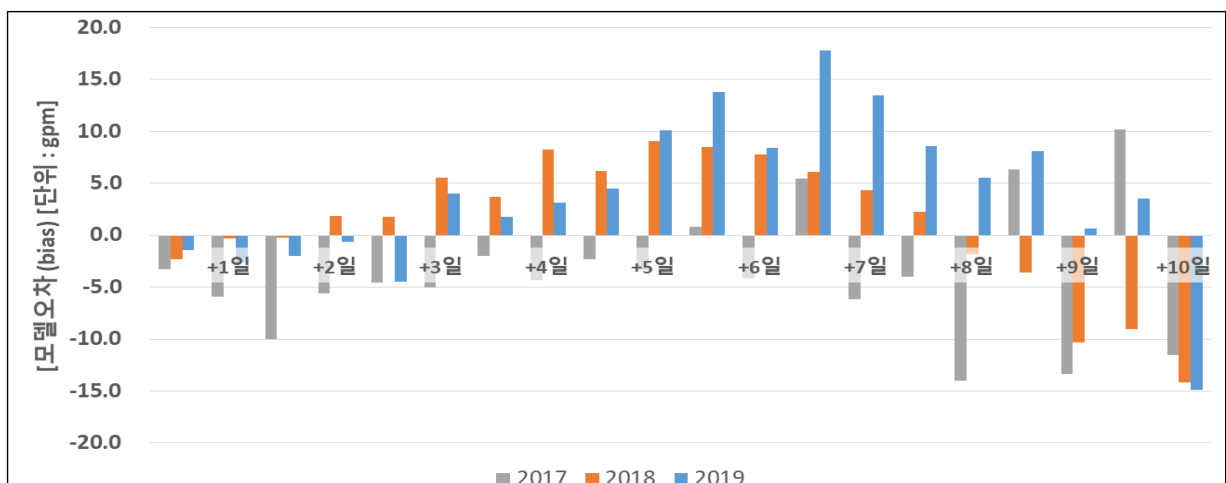


그림 4-8. 2017~2019년의 7월 15일~8월 15일의 200hPa 지위고도의 모델 예측과 분석장의 차이(서울)

200hPa의 편차를 보면 3일 예측까지는 $\pm 5\text{gpm}$ 정도의 편차(Bias)를 보이다가 이후 편차가 커지는 경향을 보인다. 다만 500hPa과는 달리 예측시간이 길어지더라도 한쪽으로 쏠림현상이 적고, 전체적인 균형은 맞는 경향이 있다. 다시 말하면 모델의 추이를 고려하면 예측력을 확보할 수 있다는 의미가 된다.

중기예보를 할 때 모델 예측의 경향성은 중요하다. 한쪽으로 쏠림현상이 심하게 나타나면 예보시각이 바뀔 때마다 그 흐름을 계속 뒤쫓아 가게 된다. 그러나 편차가 쏠리지 않으면 변동성을 고려하며 예보를 하면 큰 틀은 맞춰나갈 수 있다. 따라서 200hPa의 기압계를 모델 추이, 모델 간 비교 등을 통해 경향성을 이해하면 폭염의 흐름을 읽고 예측하는데 큰 도움이 될 수 있다. 따라서 7~8월에 실제 폭염에 큰 영향을 주는 200hPa의 자료로 폭염의 임계값을 구하고, 그것을 토대로 폭염 중기예보를 하는 것이 좋겠다.

Key Point!

1. 우리나라 폭염에 영향을 주는 기단은 북태평양고기압과 티베트고기압이며
폭염 초기에는 북태평양고기압, 후기에는 티베트고기압의 영향을 많이 받음
2. 지구온난화와 더불어 티베트고기압 또한 점차 강화되는 추세
→ 한반도 폭염이 강화되고 있음
3. 여름철 모델의 지위고도 예측 편차는 500hPa보다 200hPa에서 균형 있게 나타남

4. 3. 폭염 예측 방법

4. 3. 1. 폭염 시작 단계에서의 임계값

앞 절에서 200hPa의 모델장으로 폭염을 예측하는 것이 더 타당하다는 것을 확인하였다. 물론 기온은 하늘상태, 하층바람, 습도 등 여러 가지 변수가 작용하기 때문에 200hPa과 1:1로 대응을 시킬 수는 없다. 따라서 그 경향성과, 폭염에 이르거나 해소될 최소한의 임계값을 살펴보자.

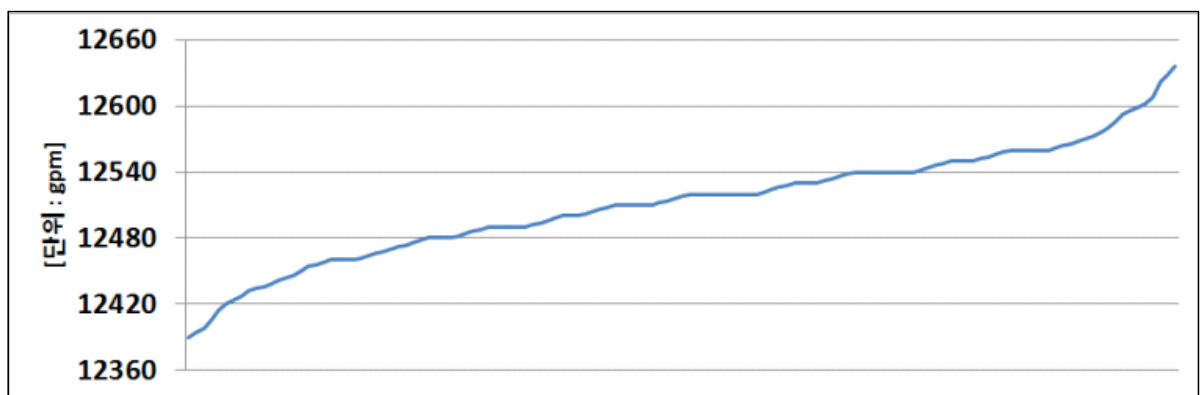


그림 4-9. 2002~2018년의 7~8월 동안 서울 기온이 33°C가 넘는 날의 200hPa 지위고도
(가로축은 서울 기온이 33°C가 넘는 모든 날짜에 해당되며, 지위고도 기준 오름차순 정렬)

그림 4-9는 2002~2018년의 7~8월 동안 서울에 33°C가 넘는 날의 200hPa 지위고도를 나타낸 것으로 낮은 고도부터 오름차순으로 정렬한 자료이며, 최솟값은 12380gpm, 최댓값은 12640gpm이다. 이를 정규분포로 나타내면 아래 그림 4-11과 같다.

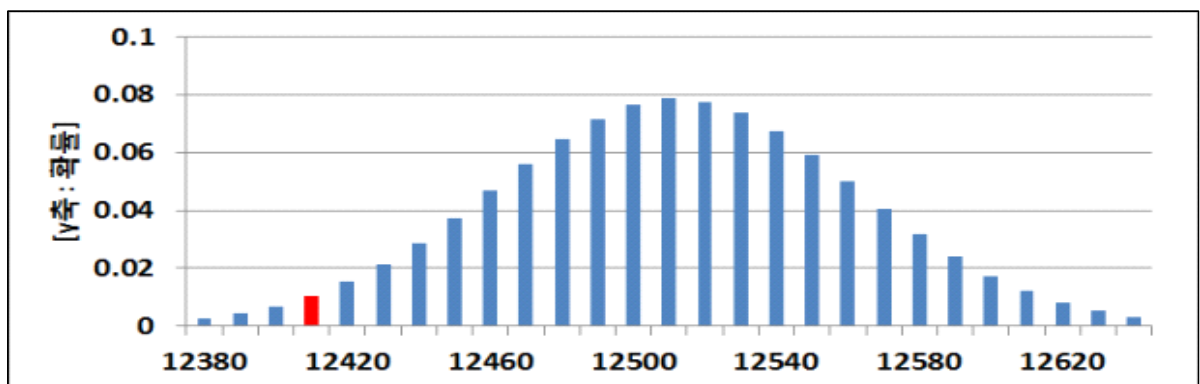


그림 4-10. 2002~2018년의 7~8월에 서울 기온이 33°C가 넘는 날의 200hPa 지위고도 분포
(빨간색 막대: 지상 기온 33°C 이상이 95% 확률로 나타나는 구간의 임계점인 12410gpm)

200hPa 지위고도의 평균은 12510gpm이고 표준편차(σ)는 50.1로, 2σ 구간(95% 확률구간)은 12410~12610gpm이 된다. 우리는 33°C가 넘는 최소한의 임계값을 생각해야 하므로, 12410gpm은 넘어야 33°C가 넘는 95%의 확률에 포함된다고 이해할 수 있다. 즉 다시 말해서 서울 기온이 33°C 이상으로 나타나기 위해서는 200hPa의 고도가 최소한 12410gpm 이상이어야 한다.

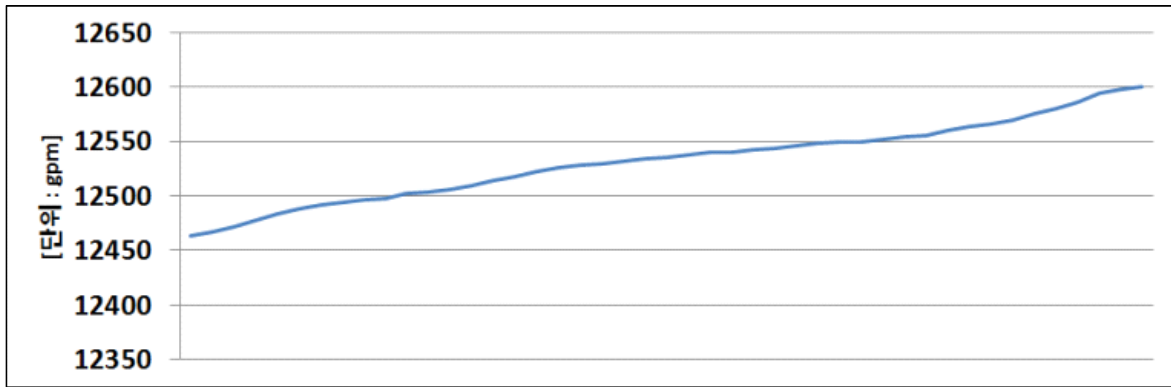


그림 4-11. 2002~2018년의 7~8월 동안 서울 기온이 35°C가 넘는 날의 200hPa 지위고도
(가로축은 서울 기온이 35°C가 넘는 모든 날짜에 해당되며, 지위고도 기준 오름차순 정렬)

같은 방식으로 35°C가 넘는 경우도 생각해 볼 수 있다. 2000~2018년의 7~8월 동안 서울 기온이 35°C가 넘는 날의 200hPa 지위고도는 그림 4-12와 같이 나타나며, 최솟값은 12460gpm, 최댓값은 12610gpm이다.

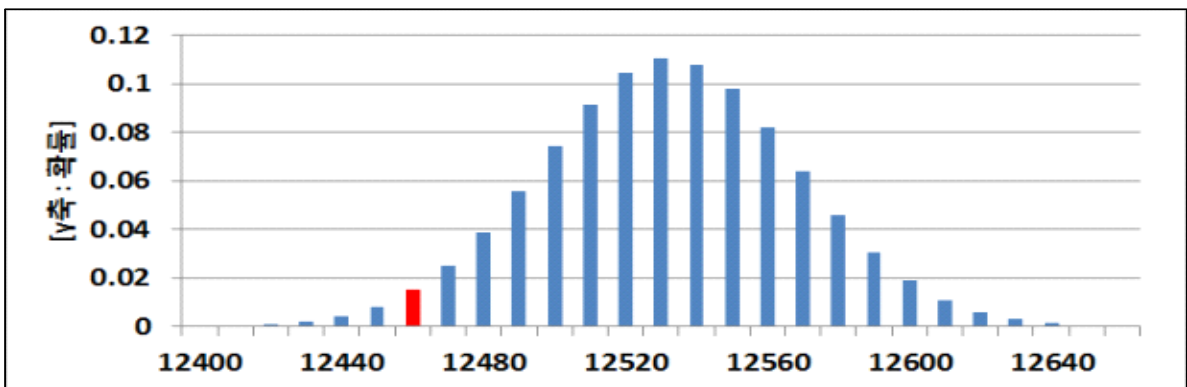


그림 4-12. 2002~2018년의 8월에 서울 기온이 35°C가 넘는 날의 200hPa 지위고도 분포
(빨간색 막대: 지상 기온 35°C 이상이 95% 확률로 나타나는 구간의 임계점인 12460gpm)

통계적으로 200hPa 지위고도의 평균은 12530gpm이고 표준편차(σ)는 36.1이다. 따라서 2σ 구간(95% 확률구간)은 12460~12600gpm이 된다. 앞서 결과와 마찬가지로 우리는 35°C가 넘는 최소한의 임계값을 생각해야 하므로, 12460gpm은 넘어야 35°C가 넘는 95%의 확률에 포함된다고 이해할 수 있다. 다시 말해 서울에 폭염경보가 발표되기 위해서는 200hPa 고도가 최소한 12460gpm 이상을 기록하여야 한다.

4. 3. 2. 폭염 종료 단계에서의 임계값

폭염 시작 단계와 마찬가지로 폭염 종료 단계에서도 200hPa와 최고기온과의 관계를 이용하면 된다. 즉 앞서 이야기 하였던 12410gpm 고도 이하로 떨어지게 되면 폭염의 종료 단계로 접어든다는 의미이다. 그런데 폭염이 종료될 때 200hPa의 온도보다 하층 고도의 기온이 다소 먼저 떨어지는 특성을 보인다.

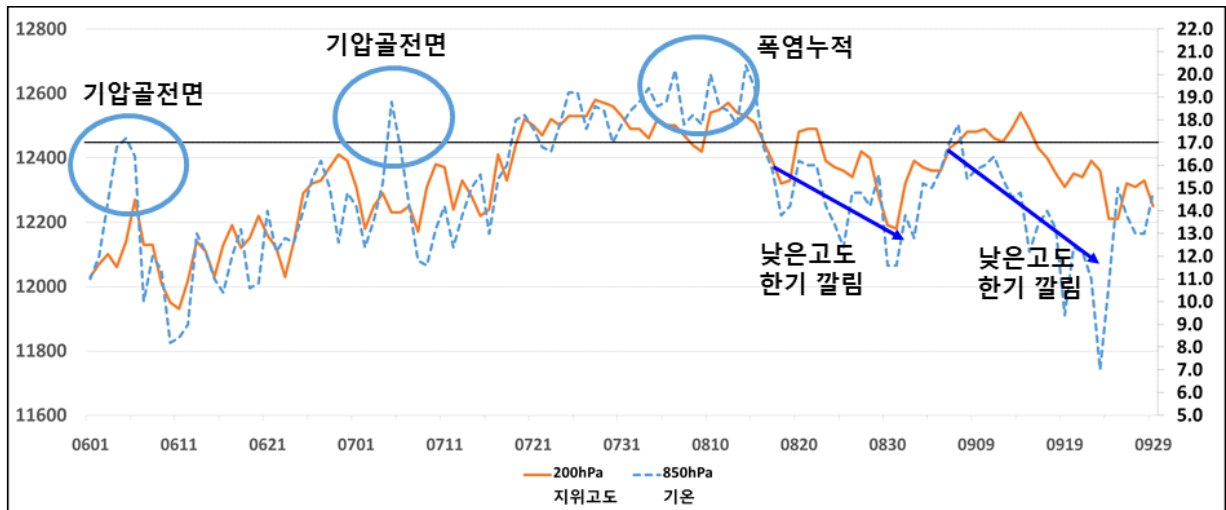


그림 4-13. 2019년 6월 1일~9월 30일 오산의 850hPa과 200hPa 기온의 시계열

그림 4-14는 2019년도 6~9월 200hPa과 850hPa의 기온 자료이다. 8월 하순 분포를 보면 200hPa보다 850hPa의 기온이 먼저 하강하고 하루, 이를 뒤따라서 200hPa의 기온이 하강하는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 한기가 남하할 때 더 낮은 고도로 침투하고, 뒤따라서 전체적인 층후가 낮아지기 때문이다. 그러므로 폭염이 종료될 때는 200hPa의 지위고도가 임계값인 12410gpm 이상이어도, 850hPa의 기온이 더 낮은 폭으로 떨어질 때는 폭염 종료를 고려해야 한다. 따라서 폭염 종료를 예보하기 위해서는 850hPa 기온의 임계값도 필요하다.

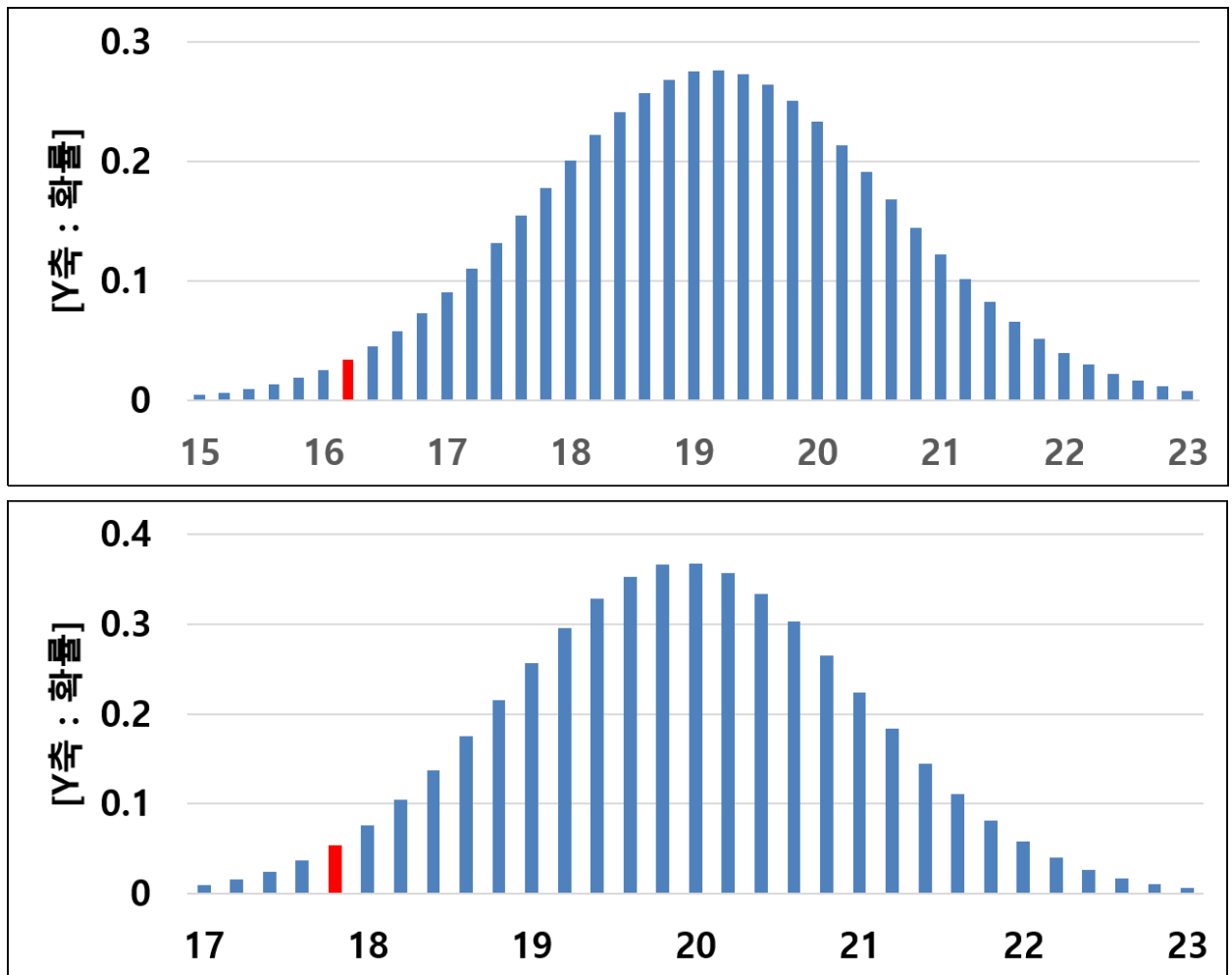


그림 4-14. 2002~2018년 6~9월 서울의 기온이
(상) 33~35°C, (하) 35°C 이상이 95%의 확률로 나타날 때 850hPa의 기온

서울의 기온이 33~35°C와 35°C 이상이었던 날의 850hPa 기온을 정규분포로 나타내 보았다. 33°C 이상일 경우, 850hPa의 95% 이상 확률값은 16.2°C, 35°C 이상인 경우는 850hPa 값이 17.8°C였다. 이것을 폭염의 종료와 연계하여 본다면 850hPa의 기온이 17.8°C 이하인 경우는 폭염경보 종료, 16.2°C 이하인 경우는 폭염이 종료된다고 볼 수 있다.

4. 3. 3. 사례를 통한 폭염 종료 단계에서의 기압계 분석

앞 절에서 통계적으로 폭염의 시작과 종료를 살펴보았다. 이번 절에서는 폭염이 종료될 때 개별 사례분석을 통해서 기압계 특징을 알아보고자 한다. 티베트고기압이 매우 강하게 팽창되어 있는 경우, 기단이 무너지기 위해서는 고위도에서 찬 공기가 남하하여 대기를 혼합해줘야 한다. 2016년과 2018년의 사례로 상황을 살펴보자.

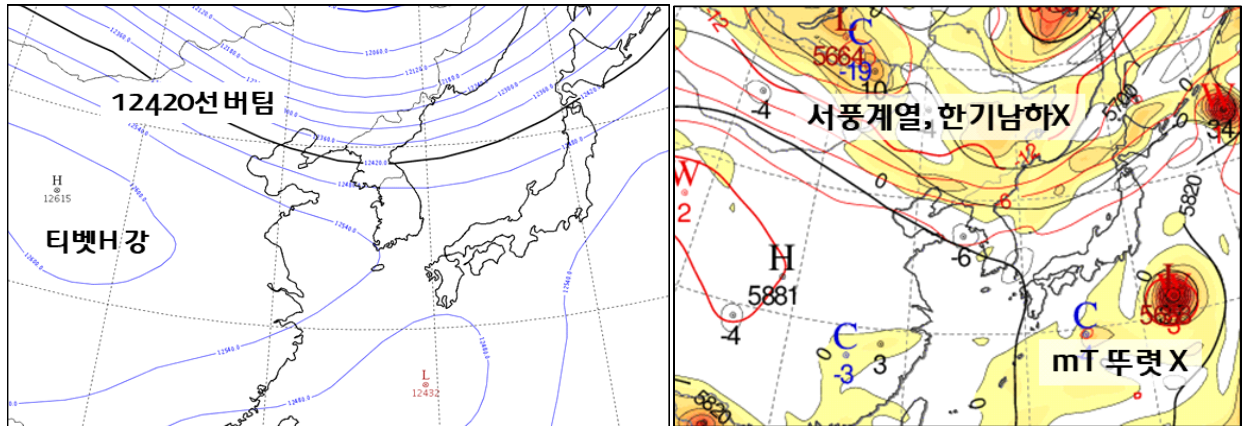


그림 4-15. 2016년 8월 10일 09시 UM 모델이 예측한 16일 09시
(좌) 200hPa 지위고도, (우) 500hPa 고도, 와도, 온도장

그림 4-16은 2016년 8월 16일 폭염 종료를 예상하였지만 고온 현상이 지속 되었던 사례이다. 10일 모델에서 200hPa 지위고도를 예측한 자료를 보면, 12420gpm 라인이 북한쪽에 위치하면서 우리나라는 임계값 이상의 지위고도를 나타내고 있다. 500hPa 에서도 우리나라 주변에는 서풍이 지배하고 있기 때문에 찬 공기가 뚜렷하게 내려오는 형태를 보여주지는 못했다.

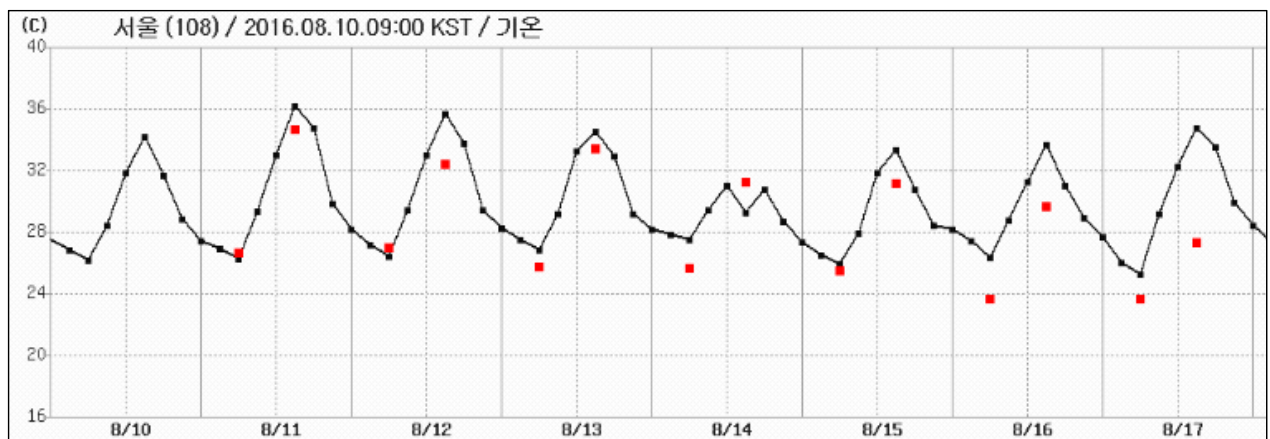


그림 4-16. 서울에 대한 2016년 8월 16일 기온 예측과 실황자료
(검은색 점: 관측자료, 빨간색 점: 모델 예측)

그림 4-18은 2016년 8월 18일 09시에서의 기온예측과 실황자료이다. 모델에서는 14일부터 폭염이 종료되는 것으로 예측했지만 실제 관측에서는 폭염 특보 기준을 넘을 정도로 높은 기온을 유지했다. 즉 200hPa의 지위고도가 높고, 500hPa에서도 한기가 내려오는 형태를 보이지 못하면 폭염은 쉽게 해소되지 않음을 보여준다. 2016년 8월 21일의 경우도 비슷한 200hPa의 지위고도와 500hPa의 형태가 나타났고 마찬가지로 모델에서는 폭염이 종료되는 것으로 나타났지만, 실제로는 폭염이 유지되었다.

위 사례인 16일과 21일은 폭염 종료 예측이 빗나간 사례이다. 다음은 실제 폭염이 종료되었던 시점의 모델 예측과 실황 전개를 살펴보겠다.

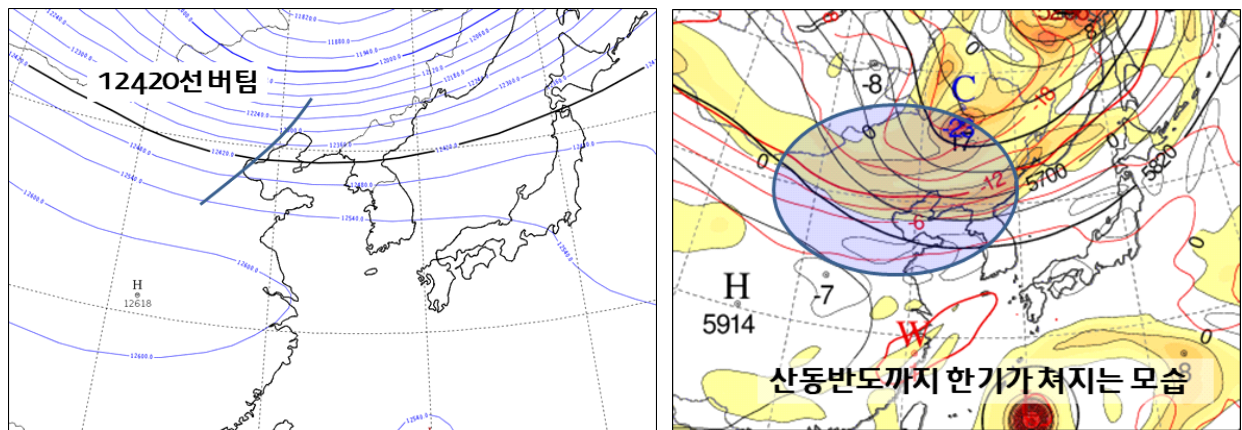


그림 4-17. 2016년 8월 20일 09시 UM 모델이 예측한 26일 09시
(좌) 200hPa 지위고도, (우) 500hPa 고도, 와도, 온도장

그림 4-18은 2016년 8월 20일 모델의 예측자료이다. 200hPa의 지위고도는 여전히 12420gpm 이상을 유지하고 있으므로, 앞선 두 사례의 날짜와 마찬가지로 상황이다. 하지만 500hPa 일기도에서는 다른 특징이 나타나고 있다. 앞선 사례들의 경우 우리나라 북쪽에 서풍류가 지배하고 있어서 한기가 내려오는 형태가 나타나지 않았다. 하지만 26일의 경우는 기압골이 통과하면서 산동반도 부근으로 강한 북서류가 한기를 끌고 내려오는 형태를 보여준다. 이렇듯 500hPa에서 큰 규모의 한기가 남하하게 되면 대기 하부의 공기들이 섞이게 되므로, 큰 틀에서 폭염은 종료되는 형태로 진행이 된다.

다음은 2018년 사례이다.

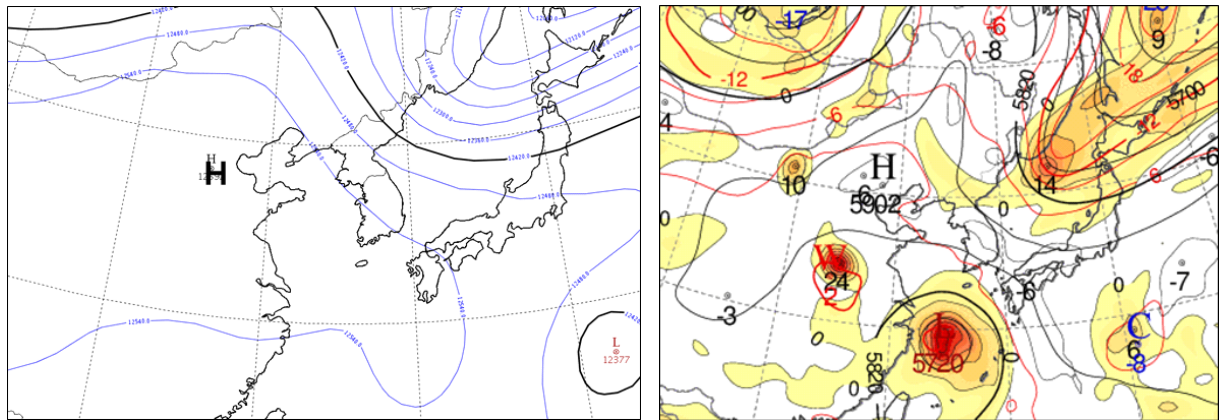


그림 4-18. 2018년 8월 10일 09시 UM 모델이 예측한 16일 09시
(좌) 200hPa 지위고도, (우) 500hPa 고도, 와도, 온도장

그림 4-19는 2018년 8월 10일 모델이 예측하였던 16일의 일기도이다. 이 사례의 경우 티베트고기압이 매우 강하게 발해만 부근으로 자리 잡고 있는 형태를 볼 수 있는데, 500hPa에서도 고기압의 센터가 나타나고 있다. 이러한 형태라면 상층은 물론 하층까지 한기가 남하할 수 있는 통로가 완전히 차단된 형태이다. 따라서 이러한 경우는 폭염이 유지될 수 밖에 없는 구조이다.

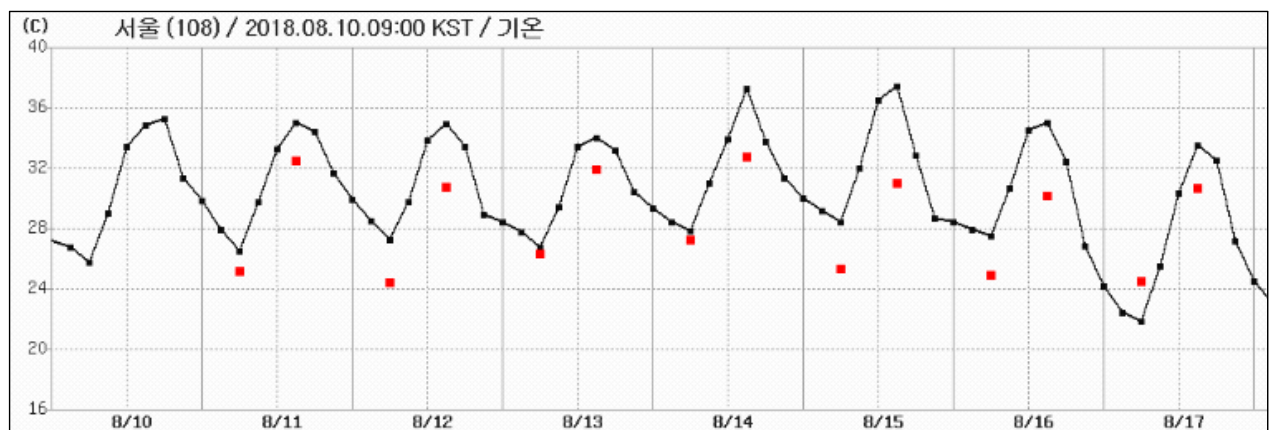


그림 4-19. 서울에 대한 2018년 8월 16일 기온 예측과 실황자료
(검은 선: 관측자료, 빨간색 점: 모델 예측)

이 사례에서도 15일 이후 기온의 흐름을 시계열 자료로 살펴보면 모델은 기온이 점차 낮아지는 것으로 예상했지만, 실제 기온은 한기가 차단되고 고압부의 영향으로 열기가 갇히는 구조가 되면서 기온이 오히려 올라간 것을 알 수 있다.

마지막으로 2018년 폭염이 종료되었던 사례를 살펴보겠다.

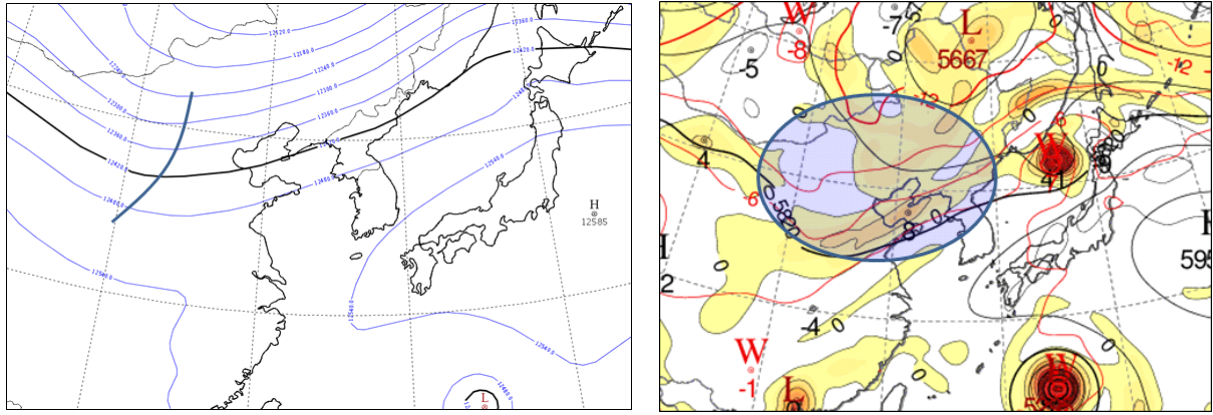


그림 4-20. 2018년 8월 17일 09시 UM 모델이 예측한 23일 09시
(좌) 200hPa 지위고도, (우) 500hPa 고도, 와도, 온도장

23일 폭염이 종료되었던 날 상황을 보기 위해 17일 모델 자료를 살펴보면 200hPa에서 12420gpm 라인이 북한지역에 위치하지만, 앞서 2016년 폭염이 종료되었던 8월 26일 사례와 같이 500hPa에서는 산둥반도 부근으로 온도 경도 구역과 함께 북서류가 예상되었다. 특히 이때는 저위도에서 올라오는 태풍에 의해 한기가 더 강하게 끌려 내려오는 효과가 더해지면서 매우 강했던 폭염의 고리를 끊을 수 있었다.

결론적으로 폭염이 종료되기 위해서는 기압 분포에 따라 200hPa의 고도장이 무너지는 것도 중요하지만, 그보다 낮은 고도에서 광범위한 규모의 한기가 내려오는 요소도 중요하다. 따라서 폭염의 종료를 예보할 때는 200hPa의 지위고도와 함께 500hPa의 흐름, 850hPa의 기온 임계값도 함께 고려하는 입체적인 분석이 중요하다.

Key Point!

1. 폭염 시작단계의 200hPa 지위고도: 최소 12410gpm 이상, 평균 12510gpm 이상
2. 폭염 종료단계의 경우는 850hPa의 기온이 급격히 하강하기 시작함
3. 티베트고기압(12480gpm)이 무너지기 위해서는 우리나라 북서쪽에서 광범위한 한기가 남하해야 함

4. 4. 극한의 기온(40℃ 이상) 예측과 일교차 활용법

4. 4. 1. 폭염 경보를 발표하기 위한 기본 조건

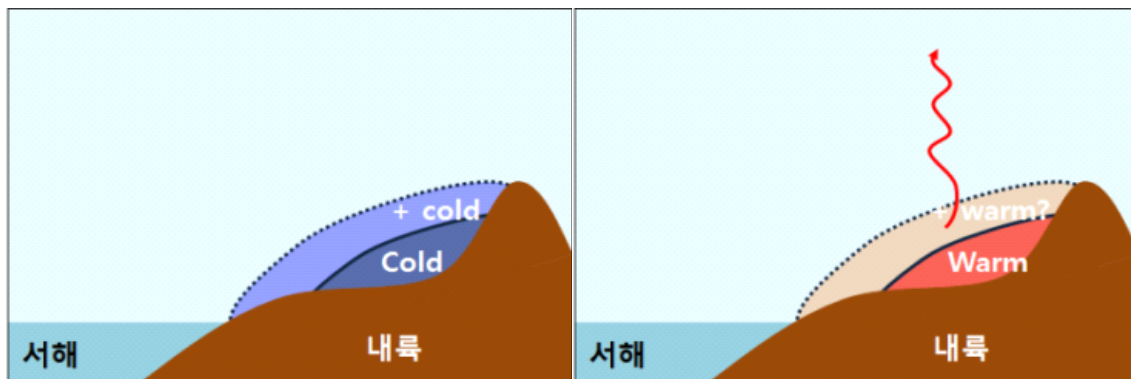


그림 4-21. (좌) 한파, (우) 폭염 모식도

그림 4-22의 왼쪽과 같이 한파를 생각해보면, 사실상 지표 근처에는 무한하게 한기가 축적될 수 있다. 왜냐하면 찬 공기는 무겁기 때문에 중력의 방향과 일치하는 바닥으로 쌓일 수 있기 때문이다. 그러나 폭염의 경우는 조금 다르다. 오른쪽 그림과 같이 열적인 안정도만을 고려해 보면 따뜻한 공기는 가볍기 때문에 데워진 공기는 부력에 의해 높은 고도로 열기가 빠져 나가게 된다. 따라서 보편적인 대기 상황을 고려한다면, 각 지점별로 올라갈 수 있는 기온의 한계점이 존재한다.

일반적인 대기 조건에서는 일사가 강하고, 850hPa의 기온이 높다고 하더라도 중부지방을 중심으로 기온이 40℃를 넘기가 거의 불가능한 이유이다. 그러나 고기압이 하층부터 상층까지 놓이게 된다면 역학적인 힘이 위에서 아래로 작용하면서 열기가 지면 부근에 축적될 수 있는 전개 과정을 보이게 된다.

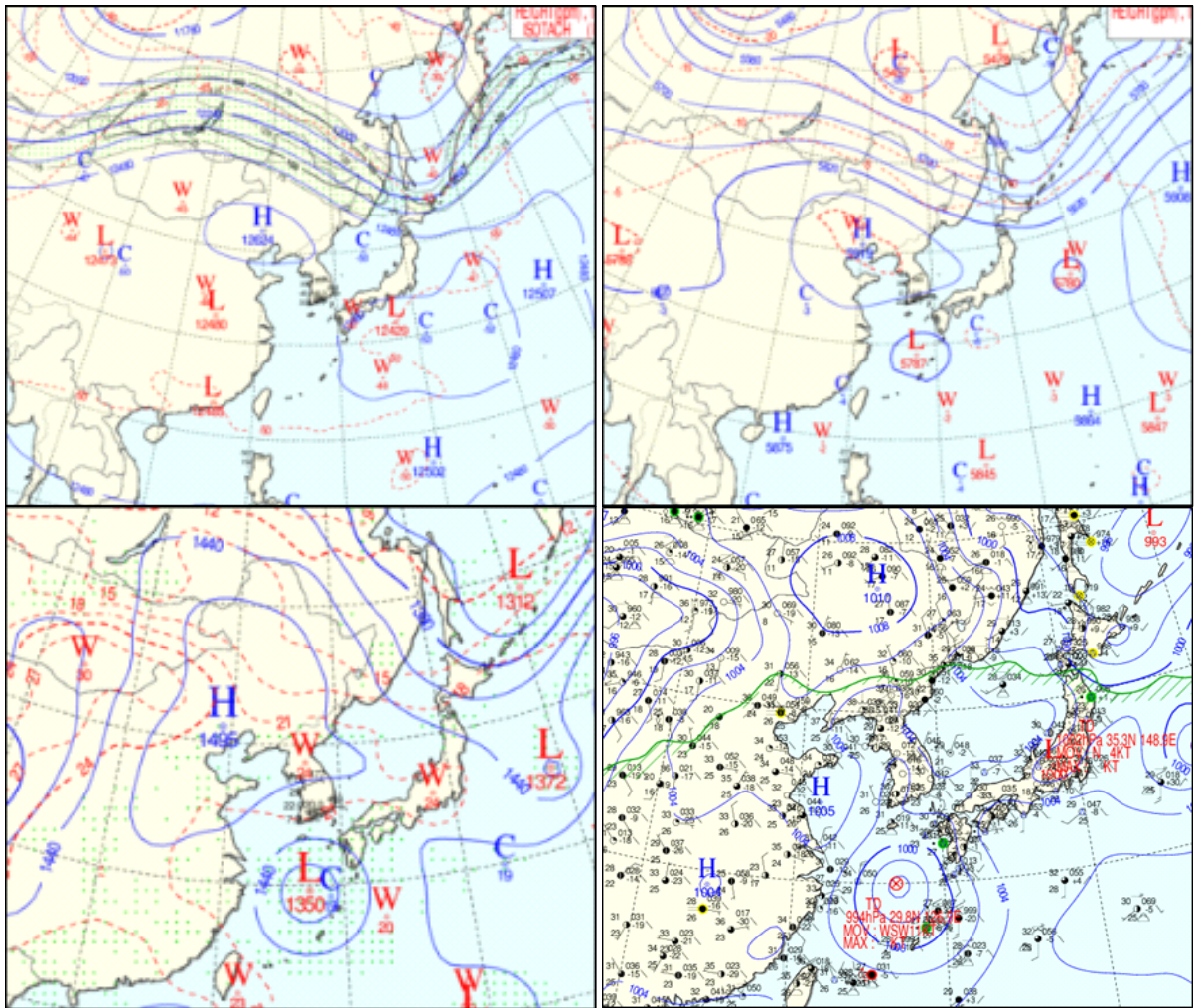


그림 4-22. 2018년 8월 1일 09시의 고도별 일기도
(좌상) 200hPa, (우상) 500hPa, (좌하) 850hPa, (우하) 지상

그림 4-23의 200hPa 일기도를 보면, 발해만 인근으로 고기압이 위치하고 있다. 이 상층부에서 고기압성 순환은 폭염과 관련성이 깊다고 앞서 언급하였다. 또한 500hPa과 850hPa를 보더라도 거의 같은 위치에 고기압이 위치되고 있는 것을 볼 수 있다.

850hPa의 기온은 중부지방을 중심으로 약 22°C의 분포를 보이는데, 앞서 850hPa의 기온이 17.8°C 이상이면 폭염경보가 가능한 기준으로 보았으므로, 그 보다도 4°C 이상 높은 값을 보여주고 있다.

추가적으로 태풍은 북위 30°에 위치하며 저위도에서 열기를 올려주는 역할을 한다. 수평과 연직을 동시에 고려해서 본다면 수평적으로는 열기 공급이 한반도로 모여들고, 역학적으로는 고기압이 열을 가두면서 빠져나갈 수 없게 하는 구조이다.

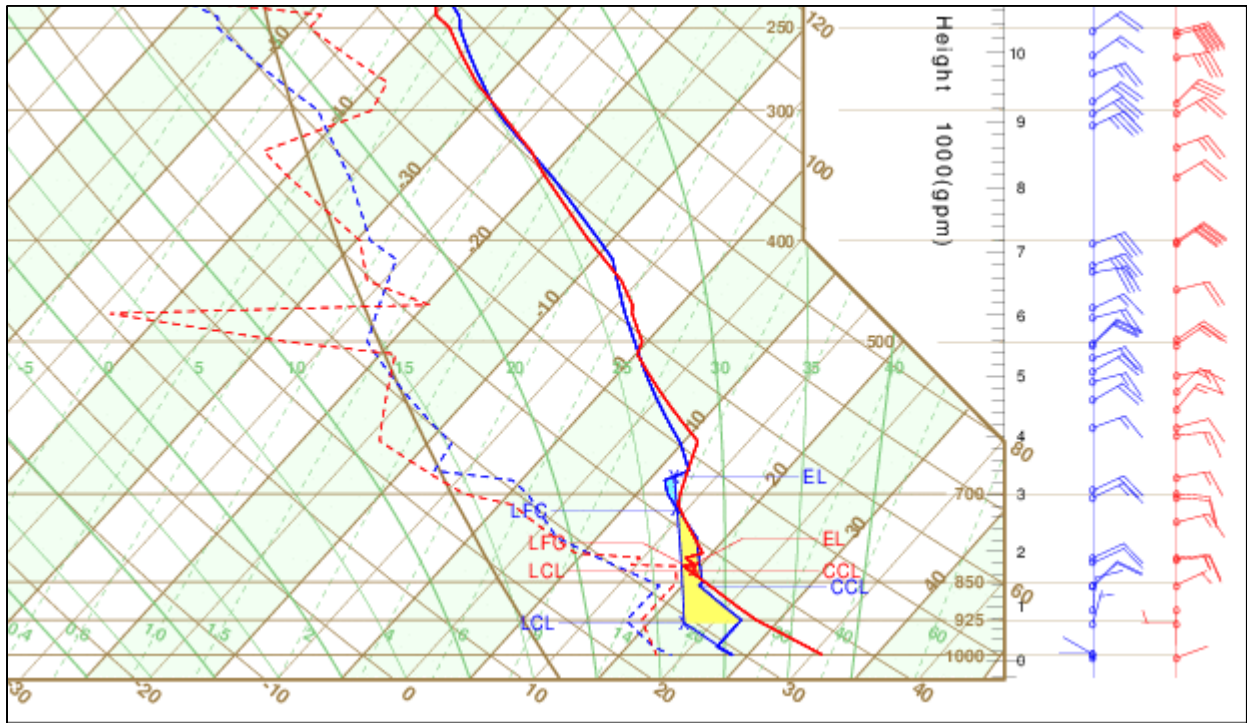


그림 4-23. 2018년 8월 1일 15시 오산의 단열선도

2018년 8월 1일은 서울의 낮 최고기온이 39.6°C로 역대 최고기온을 경신한 날이었는데, 가장 가까운 지역인 오산의 단열선도를 보겠다(그림 4-24). 앞서 말한 고기압이 견고한 가운데, 하층의 기온선 기울기를 보면 건조단열선 보다는 더 누운 형태임을 볼 수 있다. 따라서 850hPa까지 열기가 혼합된 형태를 보이고 특히 지면 부근으로는 열이 갇히면서 기록적인 폭염을 기록 할 수 있었다.

Key Point!

극한의 폭염이 발생하기 위해서는 하층에서는 열기 유입원이 필요하며, 열기가 빠져나가지 못하도록 중상층에서는 견고한 고기압이 필요함

4. 4. 2. 일교차를 이용한 극한 폭염 예보

MOS¹⁾의 경우도 매일 기후값을 기초로 하여 통계적인 방식으로 예측하는 모델의 한 방식이기 때문에, 기후값에서 크게 벗어나는 예측값을 잘 모의하지 못한다.

서울						광주					
발표/예보		7월 30일(월)		7월 31일(화)		발표/예보		7월 30일(월)		7월 31일(화)	
		예측	bias	예측	bias			예측	bias	예측	bias
관측		36.9		38.3		관측		36		37	
7월 30일	18시			36.6	-1.7	7월 30일	18시			36.6	-0.4
	06시	35.7	-1.2	36.8	-1.5		06시	35	-1	36.4	-0.6
7월 29일	18시	36	-0.9	37.1	-1.2	7월 29일	18시	35.4	-0.6	36.5	-0.5
	06시	35.8	-1.1	36.7	-1.6		06시	35.2	-0.8	35.7	-1.3
7월 28일	18시	35.7	-1.2	36.1	-2.2	7월 28일	18시	34.5	-1.5	34.3	-2.7
	06시	35.4	-1.5	35.8	-2.5		06시	34.1	-1.9	34.8	-2.2
7월 27일	18시	34.6	-2.3	35.7	-2.6	7월 27일	18시	32.7	-3.3	33.5	-3.5
	06시	34.1	-2.8	35.2	-3.1		06시	33.9	-2.1	33.4	-3.6
7월 26일	18시	35	-1.9	34.6	-3.7	7월 26일	18시	33.7	-2.3	33.2	-3.8
	06시	34.5	-2.4	33.9	-4.4		06시	32.9	-3.1	32.9	-4.1
7월 25일	18시	33.9	-3	33	-5.3	7월 25일	18시	32.9	-3.1	32.5	-4.5
	06시	34	-2.9	33	-5.3		06시	34.7	-1.3	33.2	-3.8
7월 24일	18시	33.2	-3.7	32.6	-5.7	7월 24일	18시	33.3	-2.7	32.3	-4.7

그림 4-24. 서울 낮 최고기온의 MOS 예측값과 편차

그림 4-25. 광주 낮 최고기온의 MOS 예측값과 편차

특히 2018년 여름에는 강한 폭염 속에서 MOS는 계속해서 최고기온 예측에서 음의 편차를 보였는데, 단기예보 기간(+2days)까지는 편차를 -2~-1°C로 안정적으로 예측한 편이지만, 중기기간(+3~+10일)은 -6~-1°C의 큰 편차를 보였다. 무더위를 일으키는 기단이 지배하고 있을 경우에는 기후값을 초과하는 기온이 예상되기 때문에 모델에서의 큰 편차가 발생한다는 점을 반드시 고려해야 한다.

반면에 여름철 최저기온 예측의 편차는 어떨까? 낮 최고기온과는 반대로 최저기온의 MOS 예측 능력은 상당히 좋은 결과를 보인다.

서울						광주					
발표/예보		7월 30일(월)		7월 31일(화)		발표/예보		7월 30일(월)		7월 31일(화)	
		예측	bias	예측	bias			예측	bias	예측	bias
관측		26.2		27.8		관측		27.6		25.9	
7월 30일	18시					7월 30일	18시				
	06시			26.4	-1.4		06시			25.6	-0.3
7월 29일	18시	25.7	-0.5	26.4	-1.4	7월 29일	18시	26.3	-1.3	25.6	-0.3
	06시	25.7	-0.5	26.1	-1.7		06시	26	-1.6	25.6	-0.3
7월 28일	18시	25.5	-0.7	26.2	-1.6	7월 28일	18시	25.9	-1.7	25.5	-0.4
	06시	25.5	-0.7	26	-1.8		06시	25.8	-1.8	25.3	-0.6
7월 27일	18시	25.5	-0.7	26	-1.8	7월 27일	18시	25.4	-2.2	25.4	-0.5
	06시	25.6	-0.6	25.6	-2.2		06시	25.5	-2.1	25.4	-0.5
7월 26일	18시	25.4	-0.8	25.8	-2	7월 26일	18시	25.4	-2.2	25.5	-0.4
	06시	25	-1.2	26	-1.8		06시	25.5	-2.1	25.3	-0.6
7월 25일	18시	25.2	-1	25.6	-2.2	7월 25일	18시	25.4	-2.2	24.7	-1.2
	06시	25.3	-0.9	25.5	-2.3		06시	25.6	-2	25.4	-0.5
7월 24일	18시	24.8	-1.4	25.6	-2.2	7월 24일	18시	24.8	-2.8	25.5	-0.4

그림 4-26. 서울 최저기온의 MOS 예측값과 편차

그림 4-27. 광주 최저기온의 MOS 예측값과 편차

1) MOS : Model output statistics, 각 지점의 과거 수년간의 수치예보 결과와 그에 대응하는 각지의 실제 날씨를 조합하여 양자 사이의 통계적 관계식을 미리 도입하는 방식

그림 4-25와 그림 4-26을 보면 단기와 중기예보 기간 모두 $-2 \sim -1^{\circ}\text{C}$ 이내의 편차만을 보인다. 낮 최고기온의 경우, 편차가 일정하지 않기 때문에 예보가 크게 빗나갈 수 있다. 그러나 일교차가 크지 않은 지역에서는 편차가 비교적 작은 최저기온의 MOS 예측결과를 참고하여 일교차를 감안해 예보하면 극한 폭염의 예측에는 더 유리할 수 있다.

최저기온을 이용하여 폭염예보를 하기 위해서는 일교차를 조사해야 한다. 일교차의 경우는 그 지역의 지형조건, 바다조건 등에 따라 달라진다. 서울의 일교차 통계를 살펴보자.

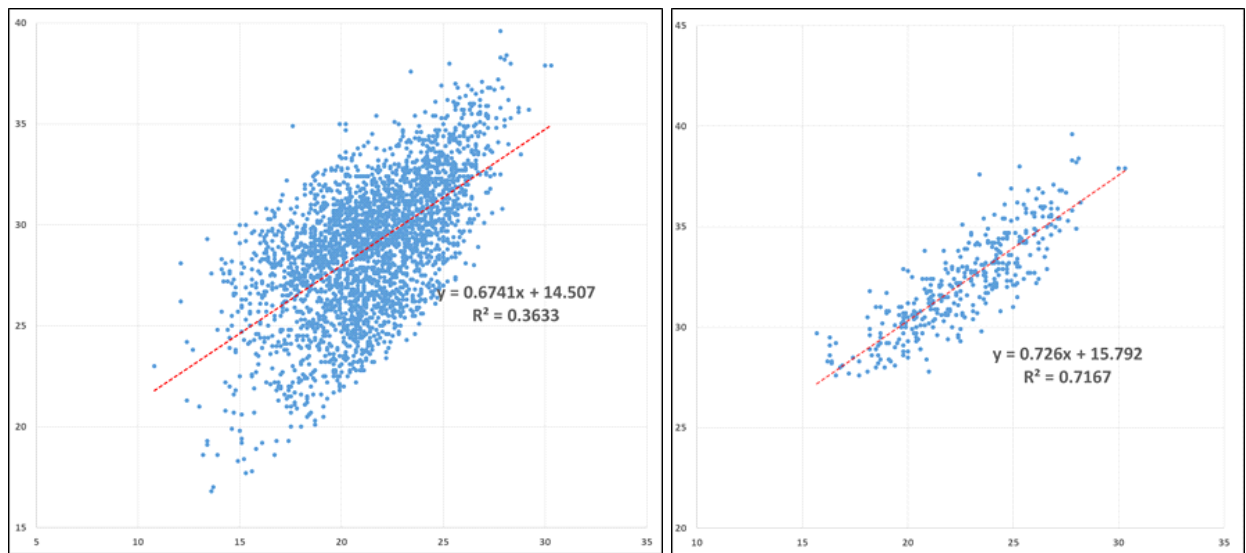


그림 4-28. 1981~2020년 서울의 최저기온과 최고기온의 분포

(좌) 6~8월 전체 사례, (우) 7~8월 맑은 날(구름 5할 이하) 사례

(빨간 점선: 추세선, 수식: 최저기온과 최고기온의 선형방정식, R^2 : 상관계수)

그림 4-27은 서울의 최저기온(X축)과 최고기온(Y축)의 관계를 나타낸 그래프이다. 왼쪽 그림은 30년간 6~8월까지 모든 날씨에 대한 분포이고, 오른쪽 그림은 7~8월 맑은 날 분포이다. 결정계수를 보면 모든 사례일의 경우 약 0.36으로 낮지만, 7~8월 맑은 날로 한정 지으면 선형성이 강해지고, 결정계수도 약 0.72로 높아진다. 다시 말하면 폭염기단의 영향을 받을 때 맑은 날씨라면 일교차는 대체로 일정하다는 의미이다.

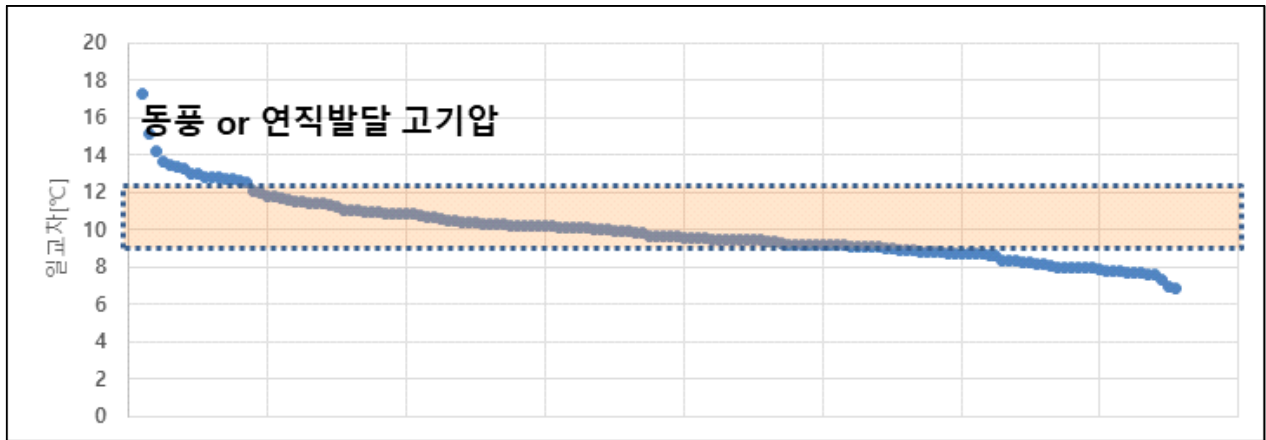


그림 4-29. 1981~2020년 서울 강수량 없고 맑은 날(구름 5할 이하)의 일교차 순위 분포

최저기온에 적용할 일교차를 구하기 위해 그림 4-28처럼 1981년부터 서울의 강수량이 없고 맑은 날의 일교차를 조사하였다. 전체 사례 중 일교차는 대부분 9~12°C의 범주에 포함이 되었고, 평균은 9.8°C였다. 서울의 경우 만약 동풍이 불게 되면 편현상에 의해 같은 조건에서 더 기온이 올라가게 되는데, 이러한 동풍의 지원이 없다면 일교차의 최댓값은 약 12°C가 된다.

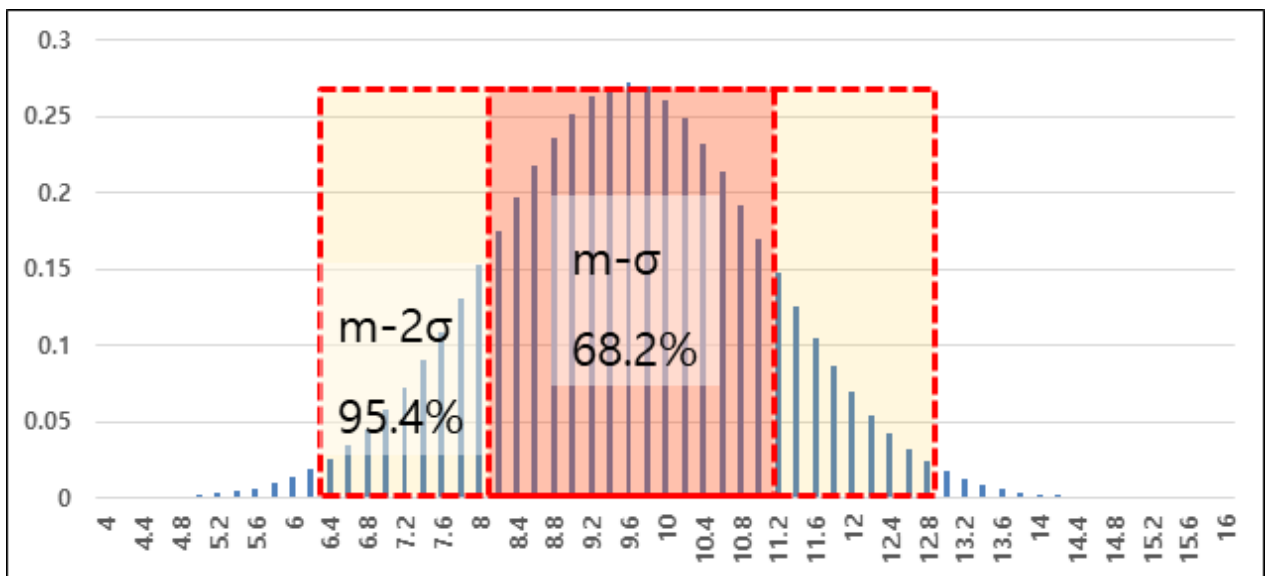


그림 4-30. 1981년부터 서울 강수량 없고 맑은 날(구름 5할 이하)의 일교차 정규분포,
(작은 빨간 점선 박스: 평균- σ 구간, 큰 빨간 점선 박스: 평균- 2σ 구간)

더 객관적인 기준값을 제시하기 위해 일교차를 정규분포화 시켜보면 그림 4-29과 같이 나타난다. 여름철 맑은 날씨 조건이라면 확률 약 70% 구간 8~11°C의 일교차를 적용하고, 동풍이 불거나 고기압에 열기가 갇히는 극한 조건이라면 확률 약 95% 구간인 최대 13°C의 일교차 적용하면 된다.

한 가지 사례로 2018년 8월 1일을 살펴보겠다.

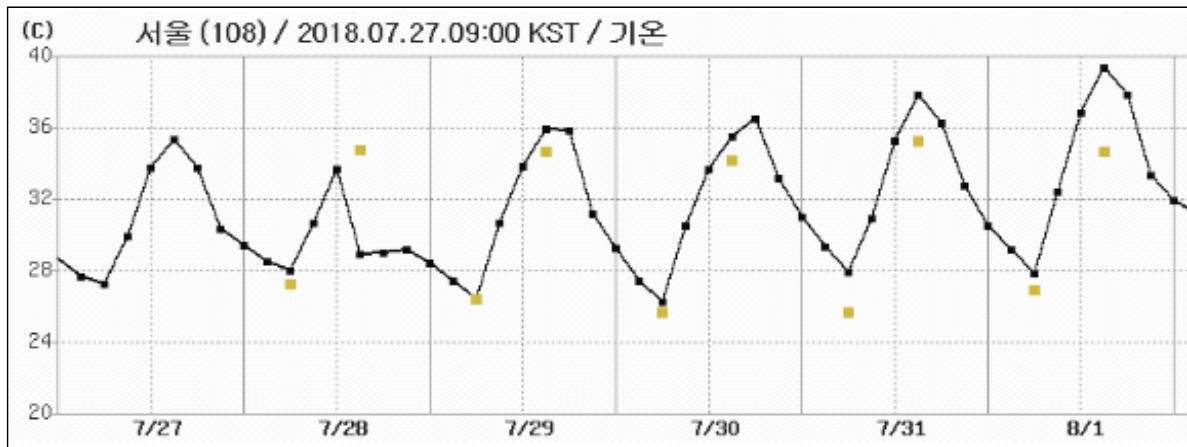


그림 4-31. 2018년 7월 27일 09시 서울의 기온 예측과 실험자료(검은 선: 관측자료, 황색 점: 모델 예측자료)

사례일 5일 전에 생산한 27일의 최적 모델에서 8월 1일 최저기온을 27°C로 예측하였고 실제로는 27.8°C를 기록하여 최저기온은 비교적 정확하게 예측하였다. 하지만 최고기온의 경우는 약 34.5°C를 예측하였으나 39.6°C를 기록하여 약 5°C의 오차를 보였다.

반면에 일교차를 고려한다면 최저기온이 27°C로 예상되고, 연직적으로 발달한 고기압에 의해 열기가 갇힐 것으로 예상 되는 기압계이므로, 95% 확률에 해당하는 +13°C를 더하면 40°C 예측이 가능하다.

이렇듯 위 방법을 최저기온에 일교차를 고려하는 방식으로 낮 최고기온을 예보하면 좀 더 안정적인 중기기온을 예측할 수 있다. 이러한 방식을 이용하지 않고 중기기간 기온예보를 하게 되면, 예상보다 높은 낮 최고기온이 나타나면서 빗나간 예보를 하게 될 가능성이 높다.

Key Point!

1. 여름철 MOS의 기온 예측은 최고기온보다 최저기온의 정확도가 높음
2. 폭염단계에서 일교차는 대체로 일정하다. 서울의 경우 약 9.8°C를 보임

4. 5. 폭염의 시작/종료단계 예보를 위한 흐름도

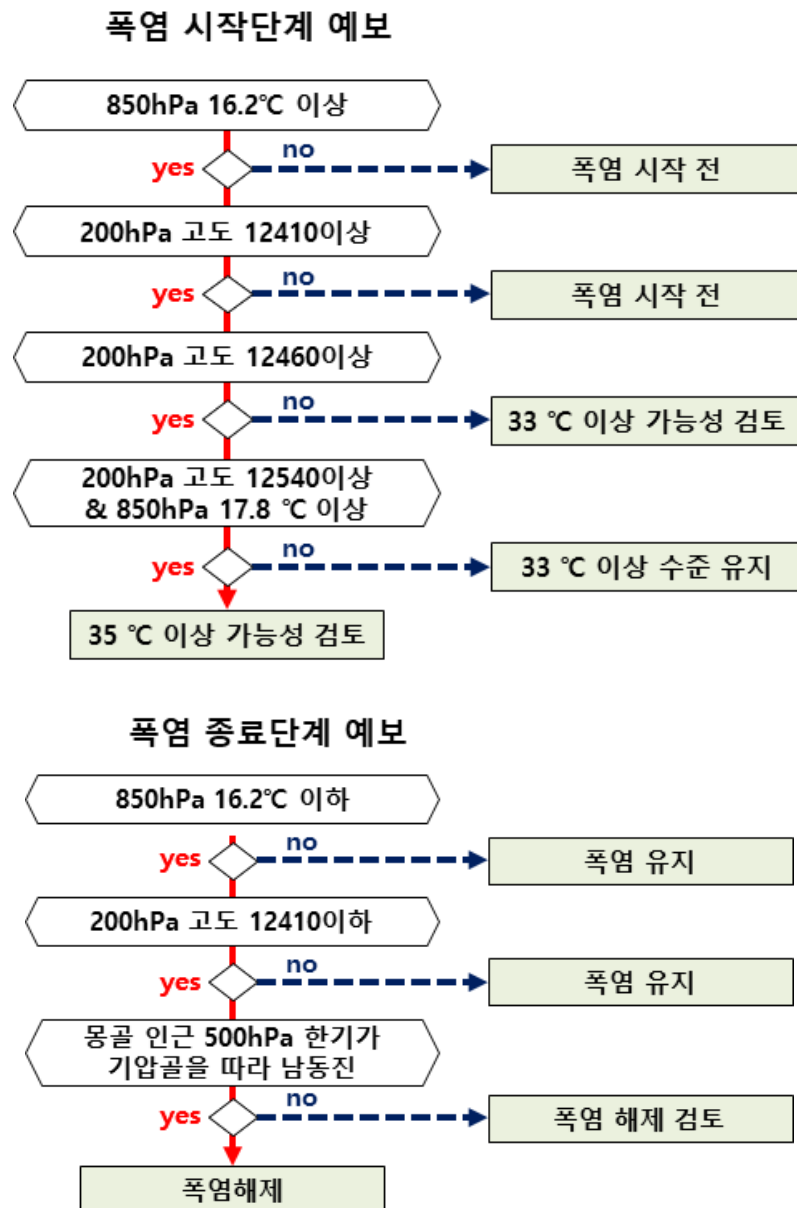


그림 4-32. 폭염 시작/종료 단계 예보를 위한 흐름도

참고문헌

1. 기상청, 2017 : 이해하기 쉬운 날씨시리즈 - 북태평양고기압
2. 기상청, 2012 : 예보관 중급과정 훈련교재 - 대기물리
3. 질병관리본부, 2018 : 2018 온열질환감시 결과 통계자료
4. James R. Holton, Gregory J.Hakim : An introduction to dynamic meteorology

여름 예보

5. 북태평양고기압 가장자리에서 발생하는 중부지방 집중호우 예보



5. 북태평양고기압 가장자리에서 발생하는 중부지방 집중호우 예보

Why?

매해 여름철 서울을 포함한 중부지방에 시간당 강수량 80mm 이상의 집중호우가 발생해 큰 피해를 주고 있다. 이러한 집중호우는 대부분 북태평양고기압의 가장자리에서 발생하는 중규모 현상으로 정확하게 예보하기 어렵다. 본 장에서는 중부지역에 집중호우가 발생하는 메커니즘을 이해하고, 예보에 활용할 수 있는 가이드언스를 제시하고자 한다.

5. 1. 중부지방 집중호우 발생 현황

최근 들어 긴 시간 지속적으로 내리는 강수보다 짧은 시간 강하게 내리는 집중호우에 의한 피해가 많이 발생하고 있다. 이에 따라 기상청은 호우 특보 기준을 12시간 강수량에서 6시간 강수량으로 변경하였고, 최근에 다시 3시간 강수량으로 변경해 특보 기준을 강화하였다. 참고로 일본에서는 1시간 강수량도 호우 특보 기준으로 삼아 짧은 시간 강하게 내리는 비에 대응하고 있다. 본 중부지방 집중호우 가이드언스는 시간당 80mm 이상의 매우 강한 강수에 초점을 맞춰 분석하였으며, 지형적인 특성을 고려하여 강원영동은 제외하고, 전북을 포함하여 분석하였다.

그림 5-1은 2010~2020년 여름철(6~9월) 중부지방의 시간당 80mm 이상의 호우 발생 일수를 나타낸 것으로 2016년을 제외한 모든 해에서 발생한 것을 볼 수 있다. 또한, 평균 발생일수는 3.8일로, 매해 3~4일 시간당 80mm 이상의 집중호우가 발생해 큰 피해가 있었음을 알 수 있다.

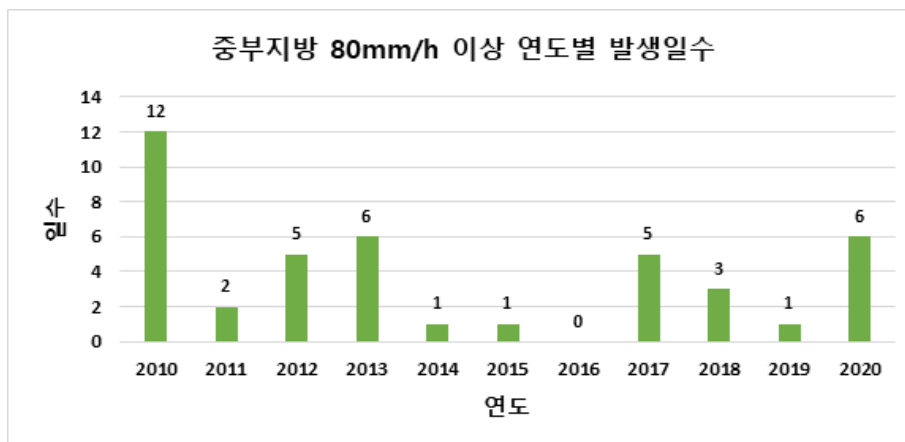


그림 5-1. 2010~2020년 연도별 여름철 중부지방(강원영동 제외, 전북 포함)의 시간당 80mm 이상 호우 발생일수

그림 5-2는 같은 기간 지역별 시간당 80mm 이상 호우 발생일수이다. 서해안과 접해 있는 수도권, 대전충남, 전북 지역의 발생일수는 평균 15.7일이며, 이는 내륙지역인 강원영서, 충북의 발생일수인 평균 3.5일에 비해 4배 이상으로 높게 나타난다. 따라서 수증기 공급이 유리한 해안에 인접한 지역에서 호우의 발생 빈도가 높은 것을 알 수 있다.

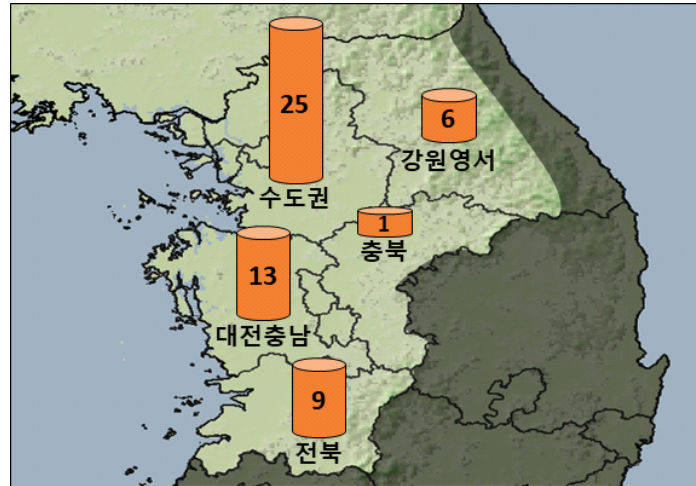


그림 5-2. 2010~2020년 여름철(6~9월) 지역별 시간당 80mm 이상 호우 발생일수

5. 2. 중부지방 집중호우 발생 메커니즘과 유형

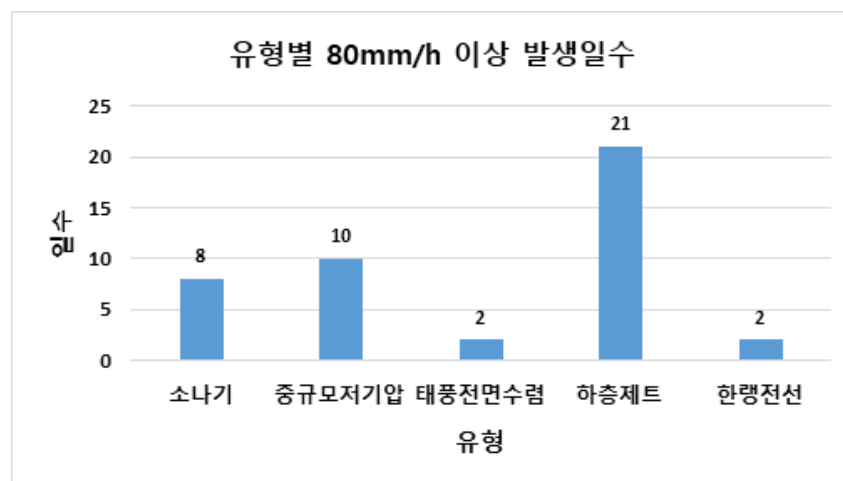


그림 5-3. 2010~2020년 여름철(6~9월) 강수 메커니즘별 시간당 80mm 이상 호우 발생일수

중부지방에서 시간당 80mm 이상의 집중호우 발생일수를 호우 유형별로 분류해보면 그림 5-3과 같이 하층제트(21일)와 중규모저기압(10일)이 전체 발생일수의 70% 이상을 차지하는 것으로 나타난다. 그리고 하층제트와 중규모저기압에 의한 집중호우 사례들은 모두 북태평양고기압 가장자리에서 발생한다는 공통점이 있다.

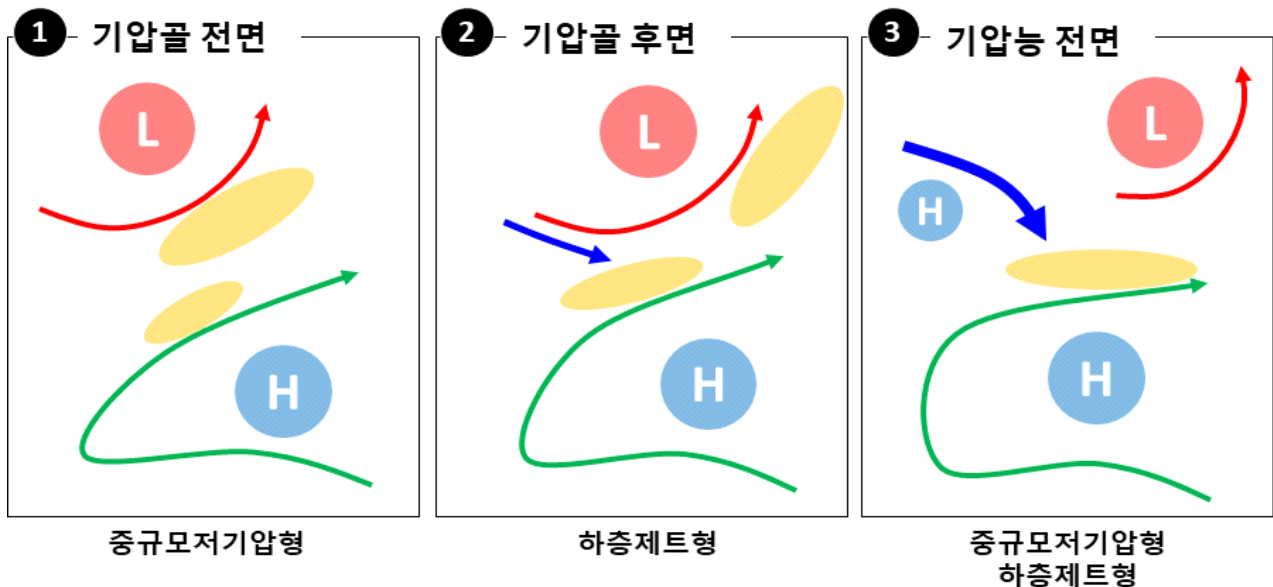


그림 5-4. 남고북저 기압계 흐름에 따른 중부지방 집중호우 발생 유형 3단계 모식도(노란색 음영 구역: 강수 구역)

여름철 북태평양고기압 가장자리에서 발생하는 집중호우는 남고북저 기압계에서 가장 빈번하게 발생하며, 기압계의 흐름에 따라 그림 5-4와 같이 크게 3단계로 구분할 수 있다. 1단계는 기압골 전면에서 기압골에 동반된 강수와 고기압 가장자리의 강수가 별개로 나타나는 단계로 특별히 강한 강수가 발생하기는 어려운 패턴이다. 다만, 북쪽의 기압골이 고기압 가장자리 부근까지 남하하는 경우에는 지상 저기압을 발달시키면서 ‘중규모저기압형’ 호우가 발생할 수 있다. 2단계는 기압골 후면의 북서류가 남하하면서 고기압 가장자리의 하층제트를 강화시켜 호우를 유발하는 패턴으로 ‘하층제트형’ 집중호우를 발생시키는 빈도가 가장 높은 패턴이다. 마지막 3단계는 기압능 전면의 북서류 또는 북동류가 남하하면서 하층제트를 강화시켜 ‘하층제트형’ 호우를 유발하는 패턴으로 남쪽의 고기압과 북쪽의 기압능 사이에 기압골이 발달하는 경우 ‘중규모저기압형’ 호우가 나타나기도 한다. 3가지 단계에서 공통적으로 나타나는 특징은 강한 강수역은 모두 북태평양고기압의 가장자리에서 발생한다는 점이다.

북태평양고기압은 해안에 위치하고 있으며, 그 가장자리를 따라 유입되는 기류는 저위도의 따뜻한 해안을 거쳐 오기 때문에 고온다습한 성질을 가지고 있다. 다량의 수증기를 머금은 공기가 대기 하층으로 유입되기 때문에 열적으로 상하층의 불안정이 강화된다. 특히, 시간당 80mm 이상의 강한 호우는 깊은 대류(Deep Convection)에 의해 발생하게 되는데, 하층의 수증기량과 수렴이 이루어지는 고도가 대류 강도에 큰 영향을 주게 된다.

그림 5-5의 왼쪽은 상대적으로 기온이 낮은 T1과 기온이 높은 T2의 조건에서 지상에서부터 포화된 공기가 포화단열선을 따라 상승했을 때 CAPE(대류가용잠재에너지)의 차이를 나타낸 것이다. 기온이 높은 경우 포함할 수 있는 수증기의 양이 더 많아지기 때문에 포화단열감률이 작아지고, 포화단열선의 기울기가 수직에 가까운 형태로 나타난다. 따라서 CAPE의 면적도 더욱 커져 깊은 대류가 발달할 수 있는 조건이 된다.

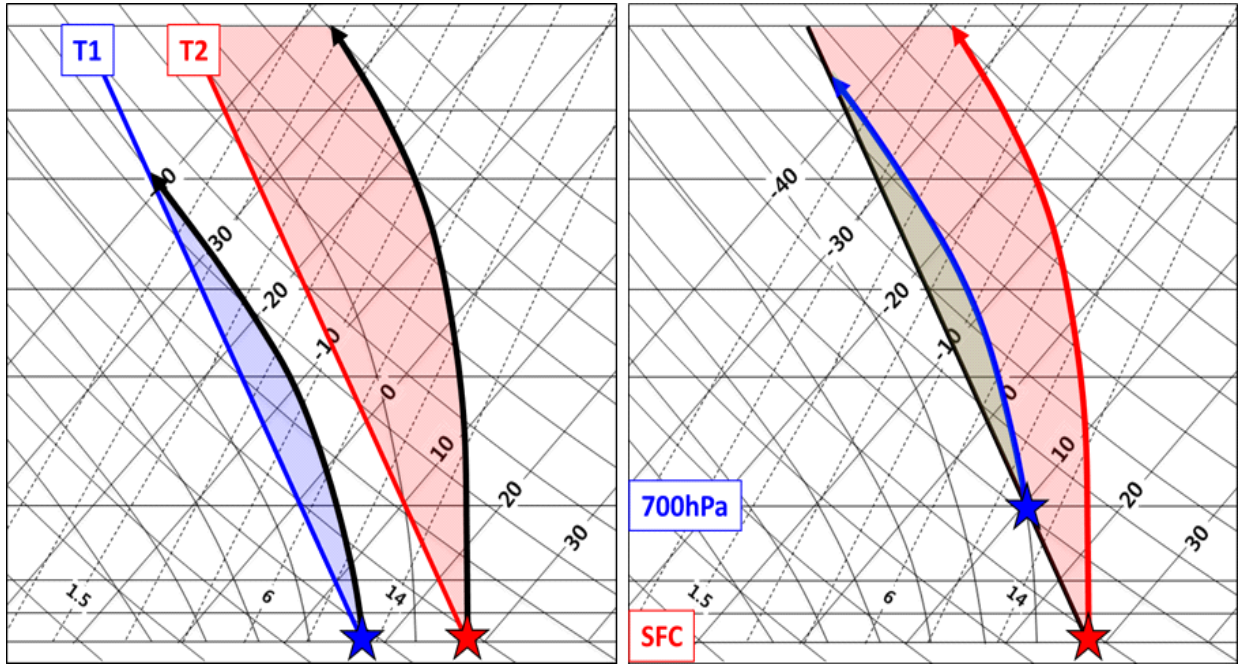


그림 5-5. (좌) 기온 차이에 따른 대류 강도의 변화, (우) 고도 차이에 따른 대류 강도의 변화

또한 그림 5-5의 오른쪽은 상승이 일어나는 고도가 다를 때 CAPE의 차이를 나타낸 것으로, 대류가 발생하는 고도가 지상에 가까울수록 수증기량이 많아지기 때문에 CAPE의 면적이 더욱 커져 깊은 대류가 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 깊은 대류의 발생은 이슬점온도가 높거나 수렴이 발생하는 고도가 낮을수록 유리한 조건이 되는데, 이러한 조건이 잘 갖추어진 곳이 바로 북태평양고기압 가장자리이다.

그림 5-6은 북태평양고기압 가장자리에서 발생하는 두 호우 유형인 ‘중규모저기압형’과 ‘하층제트형’에서 시간당 80mm 이상의 호우가 발생했을 때, 수증기량을 보여주는 이슬점온도의 분포이다. ‘하층제트형’에서는 25kts 이상의 제트가 발달하는 925hPa 부근에서 수렴이 형성되고, ‘중규모저기압형’에서는 지상에서 저기압이 발달한다. 각각의 고도에서 1시간 강수량과 이슬점온도의 분포를 비교하였다. ‘하층제트형’ 강수는 925hPa의 이슬점온도가 20°C 이상인 조건에서 주로 발생하였고 강수량은 대부분 80~110mm/h 범위를 보였다. ‘중규모저기압형’ 강수는 대부분 지상 이슬점온도가 23°C 이상인 조건에서 발생하였고, 24°C 이상에서는 110~140mm/h의 매우 강한 호우가 나타났다. ‘중규모저기압형’은 지상에서부터 대류가 시작되기 때문에 대류의 강도가 매우 강해질 수 있어 강수의 강도적인 측면에서 가장 위험한 유형으로 볼 수 있다.

이처럼 북태평양고기압 가장자리에서는 다량의 수증기가 공급되어 지상 및 925hPa 하층에서의 이슬점온도가 매우 높게 나타나게 되고, 강한 대류로 이어지게 된다. 따라서 북태평양고기압 가장자리에서 발생하는 집중호우를 예보하기 위해 가장 먼저 분석해야 할 요소는 고기압 가장자리의 정확한 위치라고 할 수 있다.

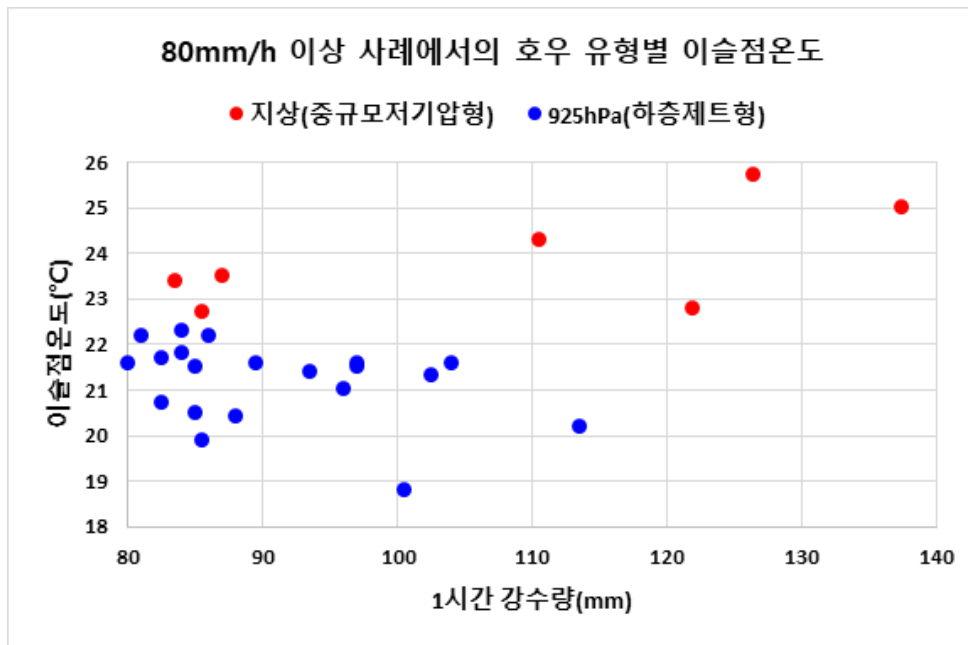


그림 5-6. 2010~2020년 여름철(6~9월) 시간당 80mm 이상 호우 사례의 호우 유형별 이슬점온도 분포

5. 3. 북태평양고기압 가장자리 분석

북태평양고기압의 가장자리는 다량의 수증기 유입으로 대기가 불안정하지만 반대로 고기압의 중심부는 침강이 일어나 안정한 상태로 강수가 발생하기 어렵다. 따라서 북태평양고기압 가장자리에서 발생한 강수대는 고기압 중심부로 이동하기 어렵고, 결국은 고기압의 가장자리가 강수역의 남방 한계 구역이 된다. 또한, 북태평양고기압은 기단의 성질을 가지고 있는 고기압이기 때문에 지속성이 강하여 고기압 가장자리에서 발생한 강수대의 위치 변동성이 크지 않다. 이러한 이유로 북태평양고기압 가장자리는 강수집중구역으로 이어질 가능성이 높아 정확한 위치 분석이 중요하다.

북태평양고기압을 분석하기 위해 500hPa의 지위고도 변화를 해석하는 방법을 주로 사용한다. 500hPa의 지위고도는 키가 큰 아열대 고기압의 상태를 잘 반영하고 그에 따른 장마전선의 위치변동을 잘 나타내기 때문이다(박순웅, 1988). 일반적으로 북태평양고기압의 세력 변동을 해석할 때 5880gpm 선을 분석하며, 이 선을 북태평양고기압의 가장자리로 여기기도 한다. 하지만 5880gpm 선은 고기압 가장자리의 평균적인 기후값이며, 정확한 기준값은 고기압의 발달 정도에 따라 달라진다. 따라서 무작정 5880gpm 선을 북태평양고기압의 가장자리로 분석하여 호우를 예보하는 것은 정확한 분석이 될 수 없다.

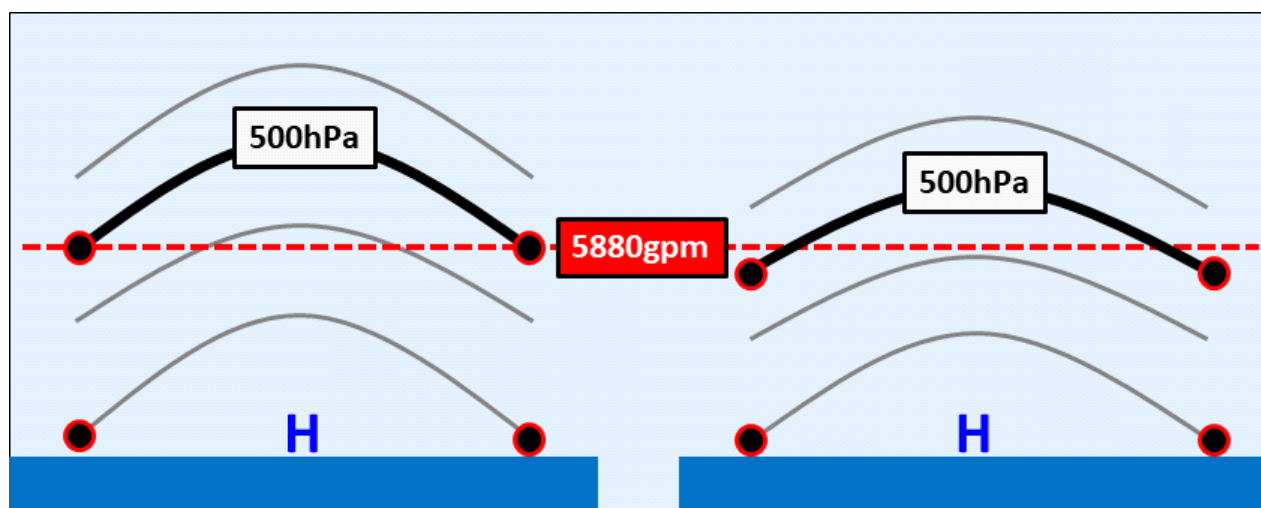


그림 5-7. (좌) 키 큰 고기압, (우) 키 작은 고기압의 연직 구조와 5880gpm 고도선 위치

그림 5-7은 키가 큰 고기압의 연직 구조를 모식도로 나타낸 그림으로, 왼쪽 고기압이 상대적으로 키가 커서 층 두께(Thickness)가 두꺼운(등압면의 사이의 간격이 큰) 구조를 보여주고 있다. 왼쪽 고기압의 경우 층두께 차이로 인해 500hPa 등압면이 위치하는 고도가 오른쪽 고기압보다 높은 곳에 위치하고 있어서 그림에서와 같이 5880gpm 선의 위치도 달라지게 된다. 따라서, 연직으로 강하게 발달한 고기압일수록 고기압의 가장자리를 결정짓는 지위고도의 기준값이 더 높게 나타나게 된다. 실제 북태평양고기압도 강도가

변화하기 때문에 고기압의 강도에 따라 가장자리를 결정하는 지위고도 값도 조건에 따라 달리해야 한다.

표 5-1. 북태평양고기압 중심의 지위고도 변화에 따른 가장자리의 지위고도 기준값(gpm)

중심 지위고도	5910	5920	5930	5940	5950	5960	5970
가장자리 지위고도	5860	5870	5880	5890	5900	5910	5920

북태평양고기압 가장자리에서 강수가 발달한 2010~2020년 여름철 사례를 조사한 결과 고기압 중심 강도에 따른 가장자리의 지위고도 기준값은 표 5-1과 같이 나타났다. 고기압의 중심 지위고도 값이 높을수록 가장자리의 기준이 되는 지위고도 값도 높게 나타났으며, 대체로 50gpm의 차이를 보였다.

그림 5-8은 북태평양고기압의 가장자리가 5880gpm이 아니었던 사례들의 500hPa 지위고도선을 묘화한 것으로, 강한 대류성 강수대가 발달한 위치의 지위고도 기준선(빨간색 실선)과 고기압 중심 지위고도 값의 차이가 50gpm으로 나타난 것을 알 수 있다. 따라서 북태평양고기압의 가장자리를 분석하기 위해서는 먼저 500hPa 일기도를 묘화하여 고기압의 중심을 분석하고, 대류성 강수대가 발달한 위치의 지위고도선과 비교해 보아야 한다. 고기압 중심의 지위고도와 강수대의 지위고도 차이가 50gpm 내외로 나타난다면, 대류성 강수대가 발달한 위치를 가장자리로 판단하여 분석하면 된다. 만약 그 차이가 50gpm보다 크게 나타난다면 북태평양고기압 가장자리의 강수가 아닌 북쪽 기압골과 연관된 강수일 가능성이 높다. 반대로 중심 지위고도와의 차이가 50gpm보다 작고 강수대가 산발적으로 나타난다면 고기압 영역 안에서 발생하는 소낙성 강수로 판단할 수 있다. 쉽게 생각해서 조직화된 대류성 강수대가 2개 이상 존재한다면, 가장 남쪽에 위치한 강수대가 북태평양고기압 가장자리에서 발달한 강수대일 확률이 높다. 또한, 가장자리보다 남쪽에 위치한 강수대는 고기압 내부에서 발생하기 때문에 대류성 강수로 조직화되면서 발달하기 어렵다.

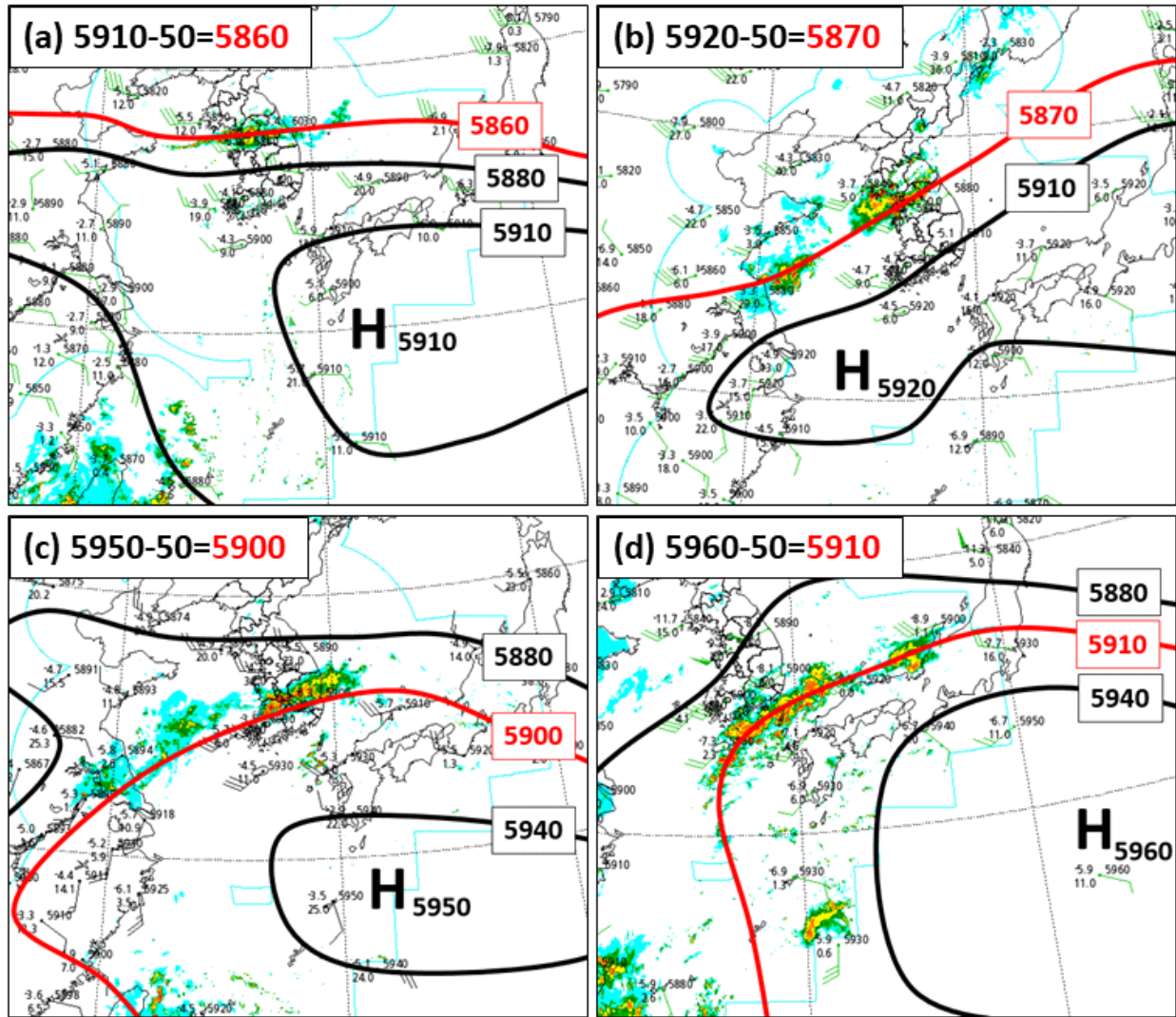


그림 5-8. 북태평양고기압 가장자리에서 대류성 강수가 발달한 사례의 500hPa 일기도 분석과 레이더 영상 중첩
(a) 2018년 8월 29일 21시, (b) 2019년 7월 31일 09시, (c) 2020년 7월 30일 09시, (d) 2019년 9월 27일 21시

그림 5-9의 사례를 보면 5880gpm 선과 5920gpm 선에 각각 강수대가 발달하였다. 여기서 고기압 중심의 지위고도의 값이 5970gpm으로 분석되므로 50gpm의 차이를 고려하면 5920gpm 선이 고기압의 가장자리가 된다. 따라서 이 사례의 경우는 5880gpm 선이 아닌 5920gpm 선에서 발달한 강수대를 북태평양고기압 가장자리에서 발달한 강수 시스템으로 분석해야 한다. 실제로 5880gpm 선에서 발달한 강수대에서는 강수강도가 50mm/h보다 약했으며, 누적강수량도 100mm를 넘지 못하였다.

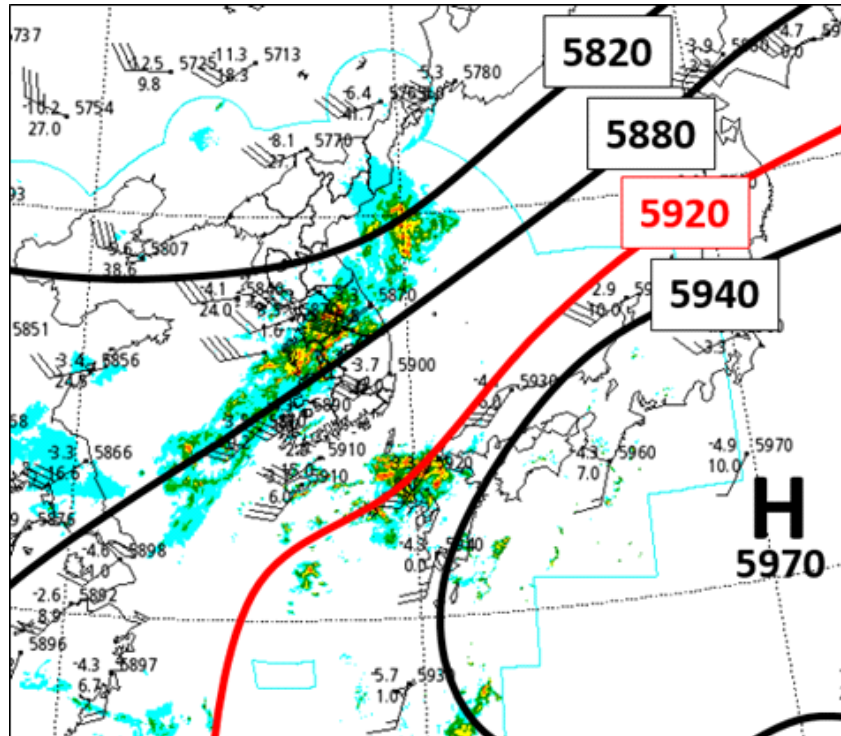


그림 5-9. 2020년 8월 11일 09시 500hPa 일기도 분석과 레이더 영상 중첩

Key Point!

〈 북태평양고기압 가장자리 분석 방법 〉

1. 500hPa 고기압 중심 지위고도에서 50gpm 낮은 등고선의 위치를 분석한다.
2. 분석한 등고선 주변으로 대류운이나 대류성 강수대가 위치하는지 비교한다.
3. 2번이 일치한다면 해당 등고선을 북태평양고기압의 가장자리로 분석한다.

5. 4. ‘하층제트형’ 집중호우 예보

‘하층제트형’ 집중호우 유형은 북태평양고기압 가장자리에서 발생하는 집중호우 유형 중 발생 빈도가 가장 높은 유형으로 남고북저 기압계의 2~3단계에서 주로 발생한다. 호우의 발생 기압계와 특징을 그림 5-10에서 모식도로 나타내었다. 북태평양고기압의 세력이 우리나라 남부지방까지 확장하여 고기압의 가장자리가 중부지방에 놓여있고, 북위 40°의 북쪽에서 상층제트와 함께 기압골이 통과하게 된다. 이 기압골은 직접 중부지방을 통과하지 않고 북위 40° 이상의 북한 지역을 주로 통과하는데, 그 후면으로 건조공기가 남하하게 되고, 고기압 가장자리의 하층제트 강도를 강화시킨다. 이때 건조공기의 남하에 따라 하층제트의 통로가 좁아지면서 그림 5-10의 오른쪽 레이더 영상처럼 강수대가 동서 방향의 좁은 띠 형태로 형성되는 특징을 보인다【'20년 2번 사례】.

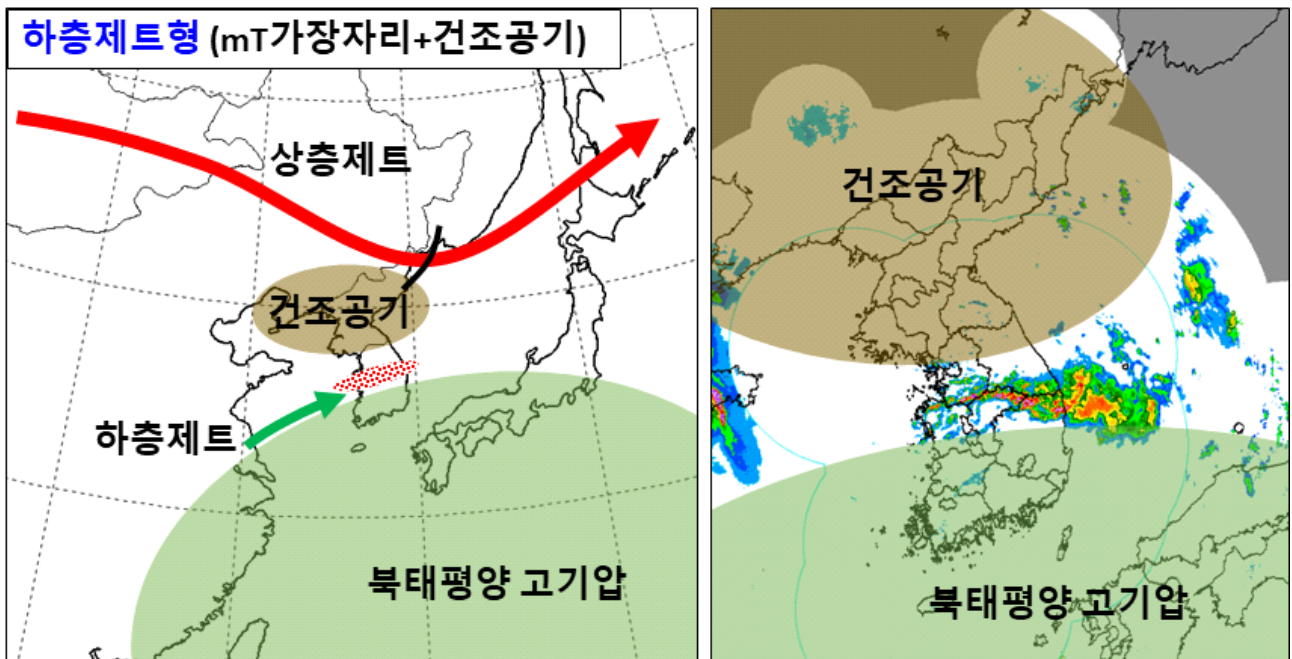


그림 5-10. (좌) mT 가장자리에서 발생하는 ‘하층제트형’ 호우 모식도, (우) 2020년 8월 2일 06시 레이더 영상

5. 4. 1. 고기압 중심 위치와 수증기 유입 경로

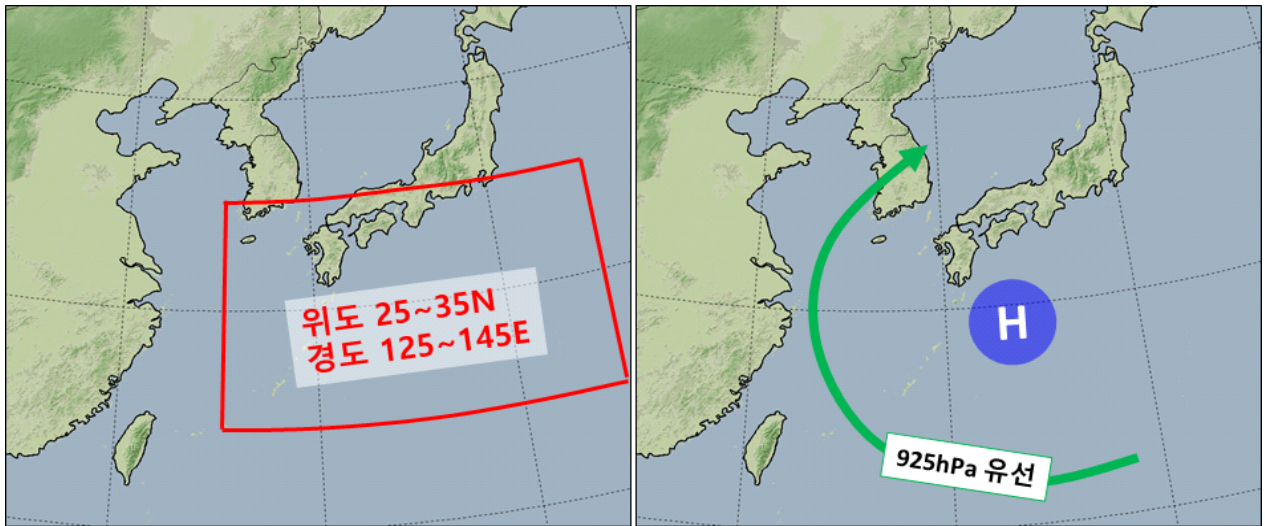


그림 5-11. (좌) ‘하층제트형’ 집중호우 발생 시 고기압 중심 위치 영역, (우) 925hPa 유선 모식도

북태평양고기압 가장자리에서 ‘하층제트형’ 집중호우가 발생한 사례의 고기압의 중심 위치를 조사해본 결과, 그림 5-11의 왼쪽과 같이 한반도의 남동쪽인 위도 25~35N, 경도 125~145E 구역에 대부분 위치하였다. 고기압이 한반도 남동쪽에 위치하기 때문에 925hPa 유선장에서는 하층 기류가 동중국해와 서해상을 거쳐 한반도로 유입되는 경로로 나타나며 해상에서부터 수증기를 공급받기 유리한 조건을 형성한다. 그러나 고기압의 중심이 한반도보다 남서쪽에 위치하거나 고기압의 축이 서쪽으로 확대되면 하층의 기류가 해상이 아닌 중국내륙에서부터 유입되어 집중호우로 이어지는 사례는 극히 적었다.

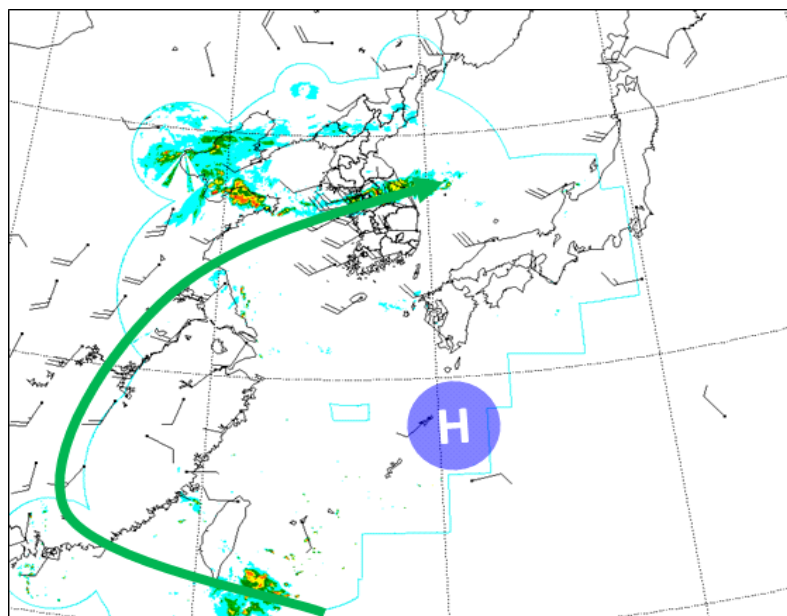


그림 5-12. 2020년 8월 15일 09시 925hPa GTS 바람 관측자료와 레이더 영상 중첩

그림 5-12는 고기압의 축이 서쪽으로 크게 확장하면서 하층 기류가 중국내륙에서부터 유입된 2020년 8월 15일의 925hPa 기류를 분석한 자료이다【'20년 5번 사례】. 고기압의 중심은 한반도 남동쪽에 위치하고 있으나 25kts 이상의 강풍축은 중국내륙에서부터 서해상으로 유입되고 있어 수증기의 공급 경로가 짧은 형태이다. 이날 중부지방에는 많은 곳에 130mm 내외의 강수가 내렸지만 강수강도는 최대 50mm/h 내외를 기록하여 집중호우 기준에는 도달하지 못하였다. 따라서 북태평양고기압 가장자리에서 집중호우 발생 여부를 판단할 때 925hPa 하층에서 유입되는 기류가 동중국해를 거쳐 오는지 고려해야 한다.

단, 그림 5-13처럼 태풍이 중국내륙으로 들어와 있는 경우는 주의가 필요하다. 중국내륙에 위치한 태풍으로부터 다량의 수증기가 방출되어 고기압 가장자리를 따라 유입될 경우 집중호우로 이어질 수 있기 때문이다. 이날 서울에는 300mm에 가까운 많은 강수가 내렸고, 시간당 100mm 이상의 매우 강한 강수강도를 기록하였다. 따라서 내륙을 거쳐오는 경우라도 다량의 수증기가 지속적으로 유입될 수 있는지 파악하는 것이 중요하다.

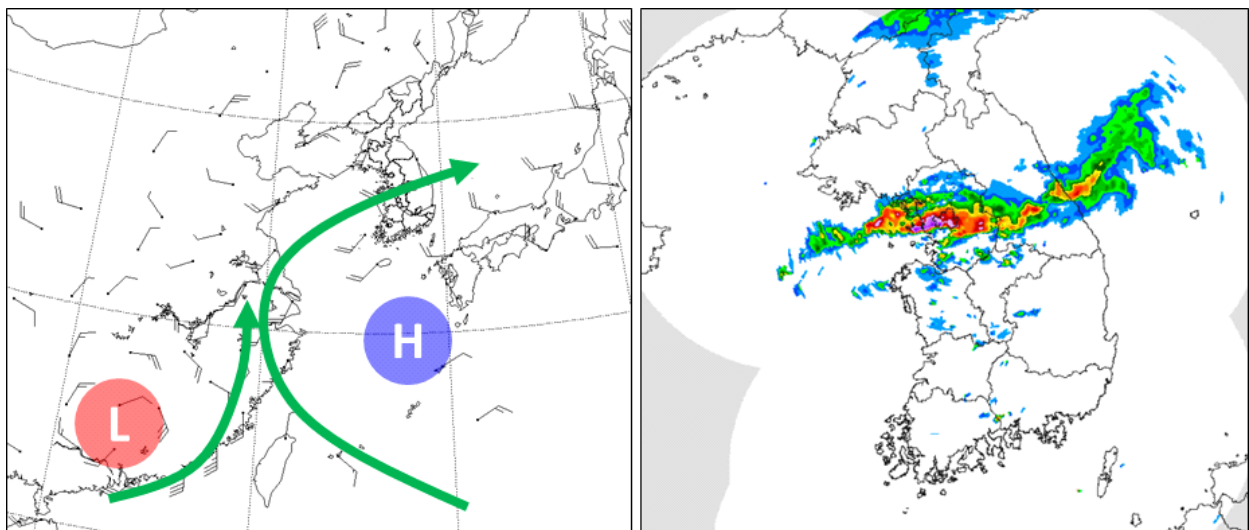


그림 5-13. 2010년 9월 21일 (좌) 09시 925hPa GTS 바람 관측자료, (우) 15시 레이더 영상

5. 4. 2. 건조공기의 남하

북태평양고기압 가장자리에서 ‘하층제트형’ 집중호우가 발생하기 위한 핵심 요소는 건조공기의 남하이다. 그림 5-14의 왼쪽 모식도는 북태평양고기압 가장자리로 건조공기가 북서풍을 타고 중부지방 부근까지 남하하는 경우이다. 정체된 고기압의 가장자리로 건조공기가 밀고 내려오면서 빨간 실선으로 표현한 하층제트의 등풍속선이 압축되면서 좁은 구역으로 풍속이 강화된다. 따라서 하층제트의 수렴으로 나타나는 대류는 좁은 구역으로 집중되고, 집중호우로 이어질 수 있다. 반면 오른쪽 모식도와 같이 건조공기가 남하하지 않고 남서풍의 영향을 받아 북쪽으로 흘러간다면, 고기압 가장자리의 등풍속선은 넓은 형태로 나타나 하층제트의 풍속이 강화되기 어려운 상황이 된다. 따라서 ‘하층제트형’ 집중호우로 이어지기 위해서는 반드시 북쪽의 건조공기가 북태평양고기압 가장자리 근처로 남하해야 한다.

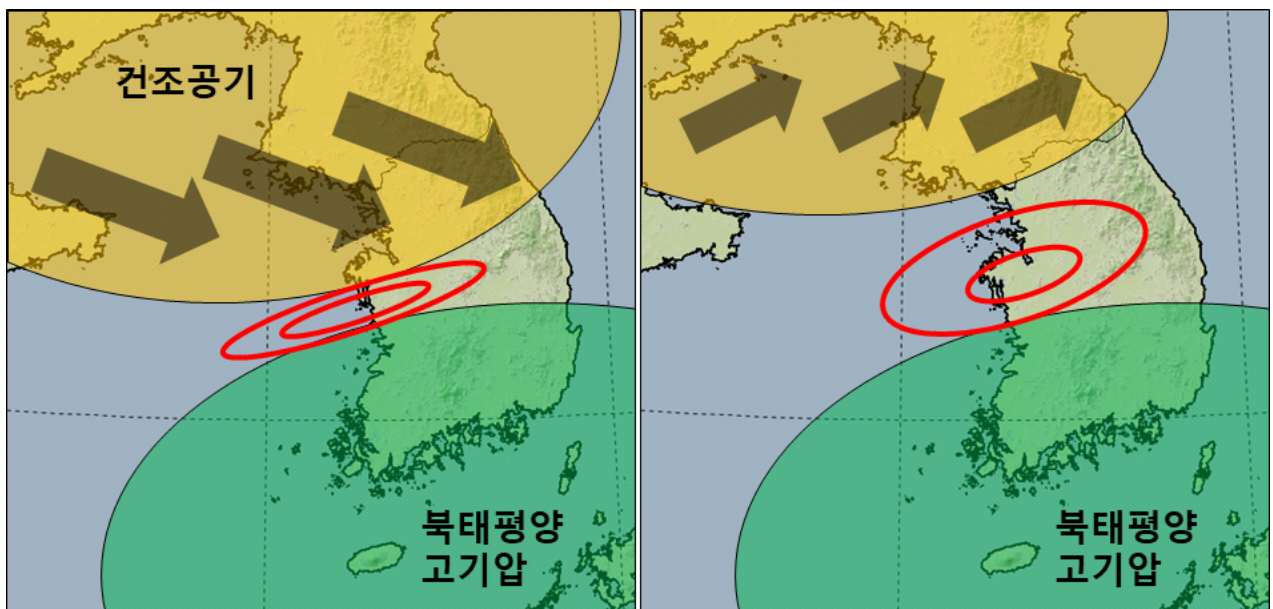


그림 5-14. 북태평양고기압 가장자리로 건조공기가 (좌) 남하하는 경우, (우) 남하하지 않는 경우의 모식도
(빨간 선: 하층제트의 등풍속선)

북태평양고기압 가장자리의 위치에 따라 북쪽 건조공기의 남하를 관측할 수 있는 고층 관측 지점을 그림 5-15에 나타냈다. 고기압 가장자리에서 북쪽으로 100~150km 거리에 위치한 지점에서 500~700hPa 고도의 건조공기 남하를 파악하는 것이 핵심으로 북서~북동(270~360°, 0~90°)의 풍계가 나타나야 한다. 그림 5-15의 왼쪽 그림과 같이 고기압 가장자리가 경기도 이남에 위치하는 경우에는 백령도, 파주, 철원, 북강릉 지점을 참고하고 오른쪽 그림과 같이 충청 이남이 고기압 가장자리일 경우 북격렬비도, 오산, 원주, 울진 지점의 바람 자료를 참고하면 된다. 또한, 백령도, 오산, 북강릉 지점의 단열선도를 통해 500~700hPa 고도의 습수가 10 이상으로 건조한 상태인지 확인하는 것이 필요하다.

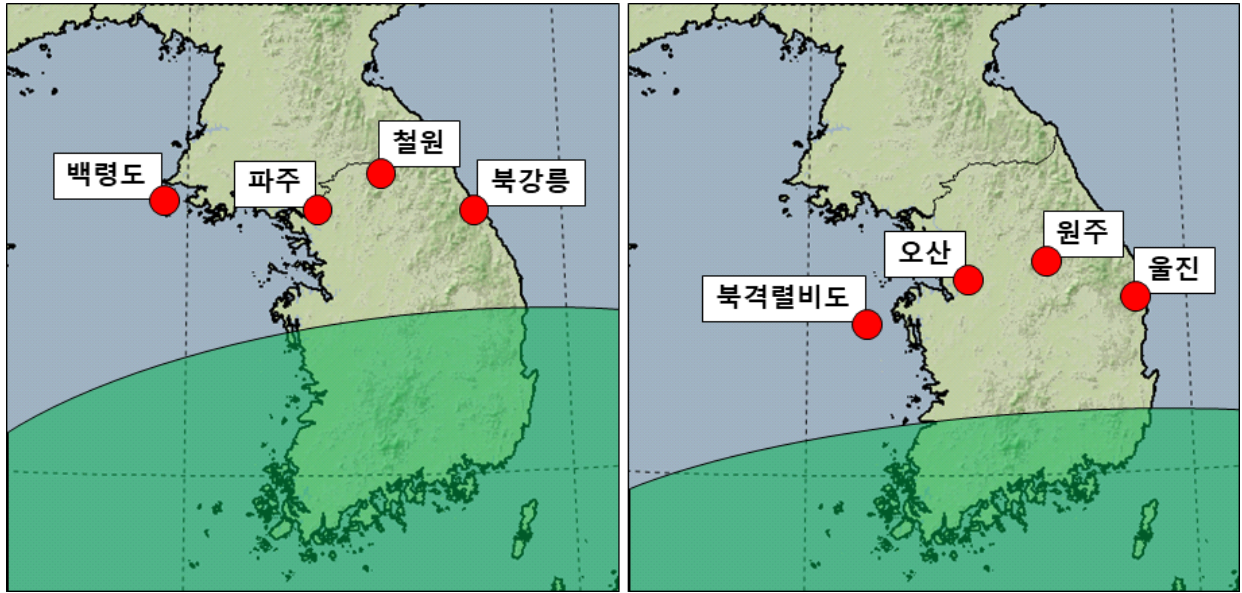


그림 5-15. 북태평양고기압 가장자리 위치에 따른 건조공기 남하 시 고층 바람 감시 지점

그림 5-16은 ‘하층제트형’ 집중호우 유형에서 건조공기 남하에 따른 강수 집중구역 형성 과정의 모식도이다. 먼저 왼쪽 그림과 같이 건조공기가 북태평양고기압 가장자리 부근으로 남하하게 되면 가장자리 부근에 기압경도가 강화되면서 하층제트에 의한 ‘집중호우 구역1’이 발달하게 되고, 건조공기가 직접 파고드는 구역에서는 불안정에 의한 ‘집중호우 구역2’가 발달하게 된다. 이때 두 집중호우 구역은 건조공기가 남하하면서 고기압 가장자리와의 거리가 약 150km 이내로 가까워지면 형성되기 시작하여 건조공기 남하에 따라 점점 좁혀지게 된다. 만약 건조공기가 고기압 가장자리까지 남하하게 되면 오른쪽 그림과 같이 하층제트에 의한 ‘집중호우 구역1’과 건조공기에 침투에 의한 ‘집중호우 구역2’가 합쳐지게 되는데, 이때 발생하는 집중호우 구역은 강도도 강하고 지속성이 커 더욱 많은 양의 강수가 내릴 수 있으므로 주의해야 한다.

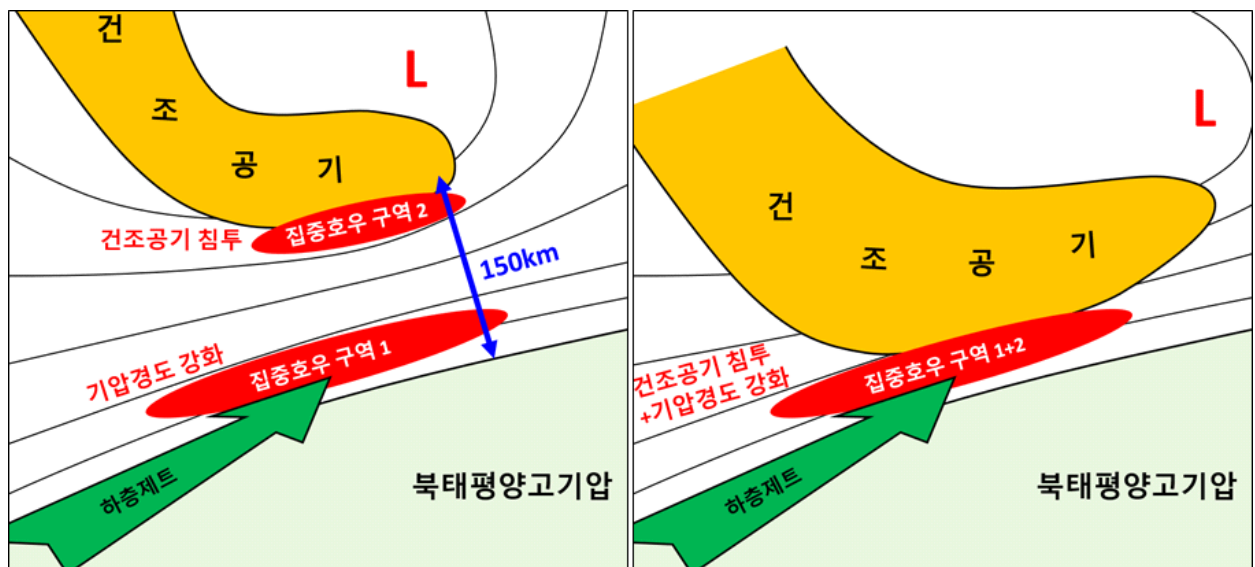


그림 5-16. 북태평양고기압 가장자리로 건조공기가 남하하는 과정에서 형성되는 집중호우 구역 모식도

그림 5-17은 북태평양고기압 가장자리 부근으로 건조공기가 남하하지 못해 집중호우 기준에 도달하지 못했던 사례의 500hPa 일기도와 백령도의 단열선도이다【'20년 2번 사례】. 이 사례에서는 5880gpm 선이 지나가는 경기남부와 충청북부 지역을 경계로 고기압 가장자리가 형성되었으며, 가장자리의 북단인 수도권과 강원도 지역으로 강수대가 발달한 것을 볼 수 있다. 하지만 고기압 가장자리의 북쪽 지점인 백령도 지점을 보면 대기 전층으로 남서풍 계열의 바람이 불면서 건조공기가 남하하지 못하고 오히려 상층으로 난기가 이루어지면서 불안정이 악화되는 형태를 보여준다. 이날 강수대가 발생하였지만, 강수가 조직화되지 못하였고, 강수강도는 50mm/h 내외에 그쳤다【'20년 4번 사례】.

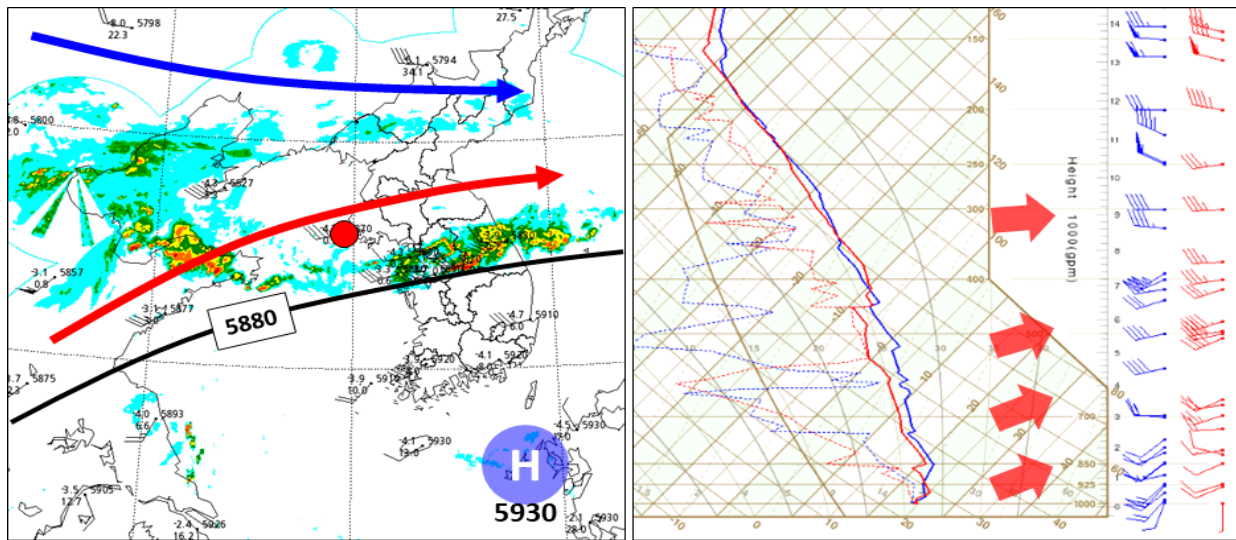


그림 5-17. 2020년 8월 15일 09시 (좌) 500hPa 일기도와 레이더 영상 중첩, (우) 백령도 단열선도

그림 5-18은 2020년 7월 30일 발생한 강수 사례로, 북태평양고기압의 가장자리가 5900gpm 선에 형성되었고, 가장자리의 북단으로 강수대가 발달한 것을 볼 수 있다. 앞선 사례(그림 5-17)와는 다르게 500hPa 일기도에서 우리나라 북서쪽에서부터 오산 지점까지 북서풍 계열의 바람이 관측됐다. 오산 단열선도에서 500hPa와 700hPa의 풍향이 각각 275°, 280°로 나타났으며, 매우 건조한 상태인 것을 알 수 있다. 이날 대전에는 시간당 100mm가 넘는 집중호우가 발생하였다.

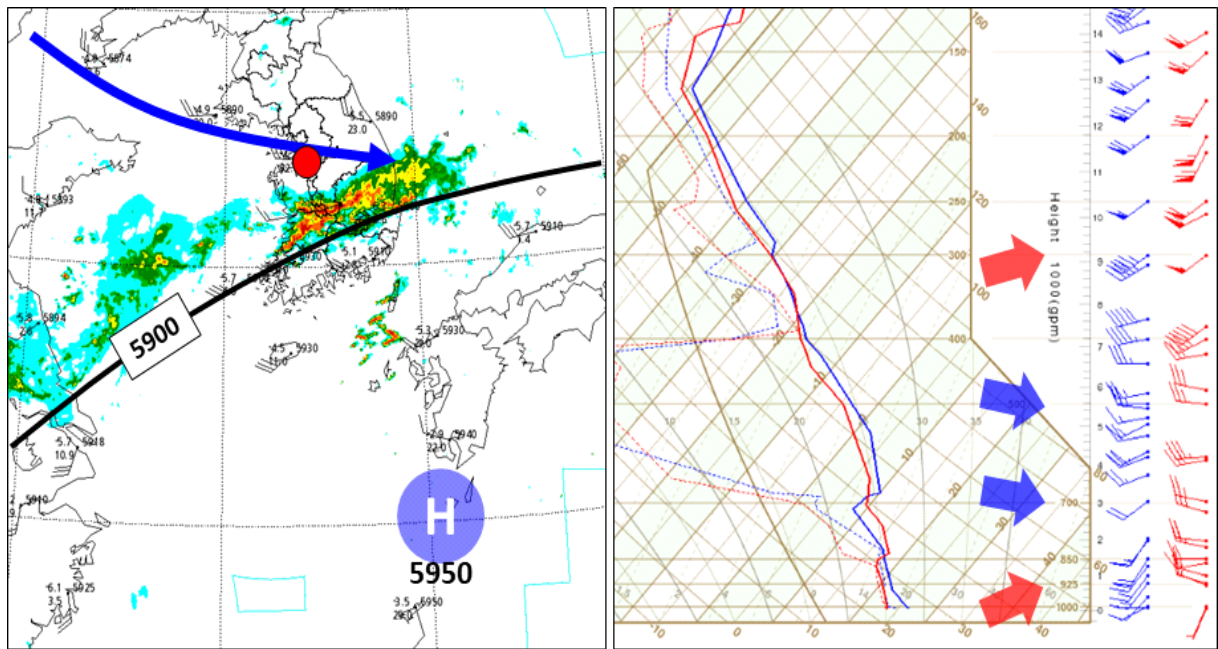


그림 5-18. 2020년 7월 30일 09시 (좌) 500hPa 일기도와 레이더 영상 중첩, (우) 오산 단열선도

5. 4. 3. 강수대의 정체

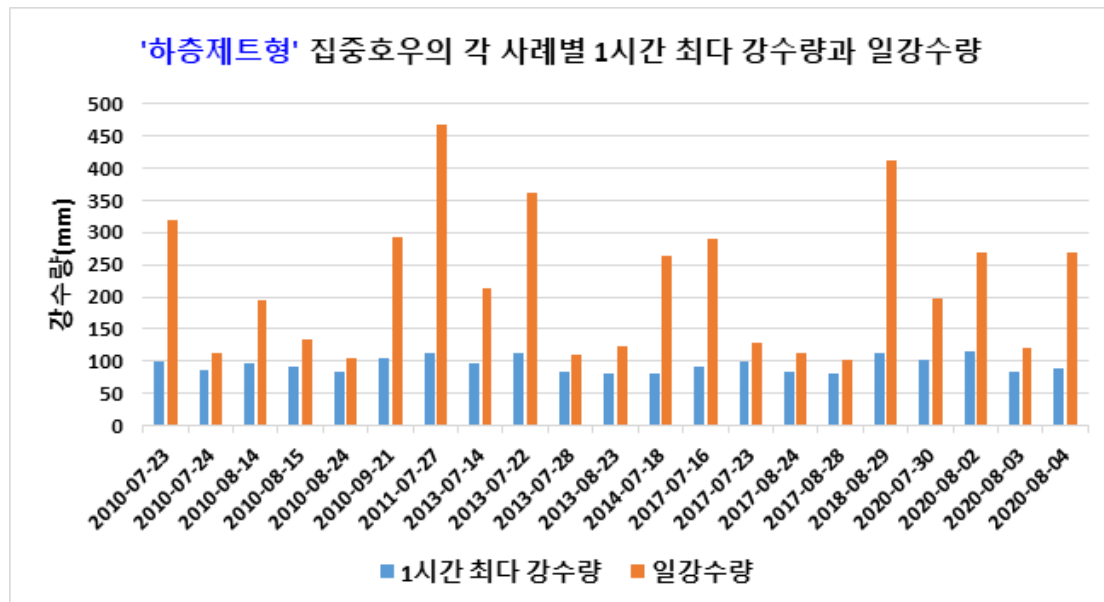


그림 5-19. ‘하층제트형’ 집중호우의 각 사례별 1시간 최다 강수량과 일강수량

‘하층제트형’ 집중호우의 또 다른 특징은 남쪽의 고기압과 북쪽의 건조공기가 대립하는 형태를 보이기 때문에 고기압의 가장자리에서 강수대가 정체하는 경우가 빈번하게 나타난다는 것이다. 따라서 좁은 구역으로 강수가 집중되면서 강수 강도가 강할 뿐만 아니라 총 누적강수량도 많은 양을 기록하게 된다. 그림 5-19는 중부지방에 나타난 80mm/h 이상의 ‘하층제트형’ 집중호우 사례 21건의 1시간 최다 강수량과 일강수량을 나타낸 그래프로 절반 이상의 사례에서 누적 일강수량이 200mm 이상을 기록한 것을 볼 수 있다.

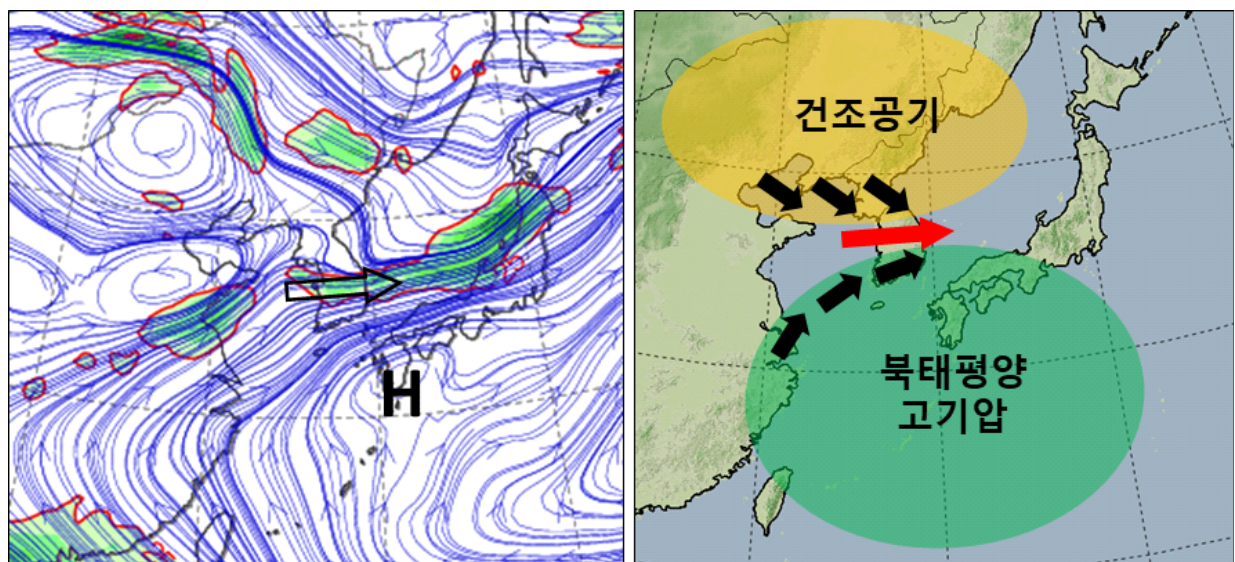


그림 5-20. 2017년 7월 16일 09시 (좌) 700hPa 유선장, (우) 기압계 모식도

강수대가 정체하면서 많은 강수가 내리기 위해서는 남쪽 고기압의 힘과 북쪽 건조공기의 힘이 적절하게 균형을 이루어야 한다. 그러나, 건조공기가 남하하는 힘을 정량적으로 판단하기는 쉽지 않으므로, 북태평양고기압의 가장자리에서 형성되는 700hPa 고도의 지향류를 활용해 힘의 균형을 파악할 수 있다. 700hPa의 지향류가 25kts 이상으로 강풍대가 동반되면서, 풍향은 270° 내외의 정서풍류로 나타나면 강수대의 동서 흐름이 지속되면서 정체하게 된다. 그림 5-20은 2017년 7월 16일 사례로, 충북 청주에 강수대가 정체하면서 시간당 90mm 내외의 강한 강수가 3시간 가까이 이어졌으며 일강수량은 290.2mm를 기록했다.

5. 4. 4. 500hPa 지위고도와 상당온위를 이용한 집중호우 판단

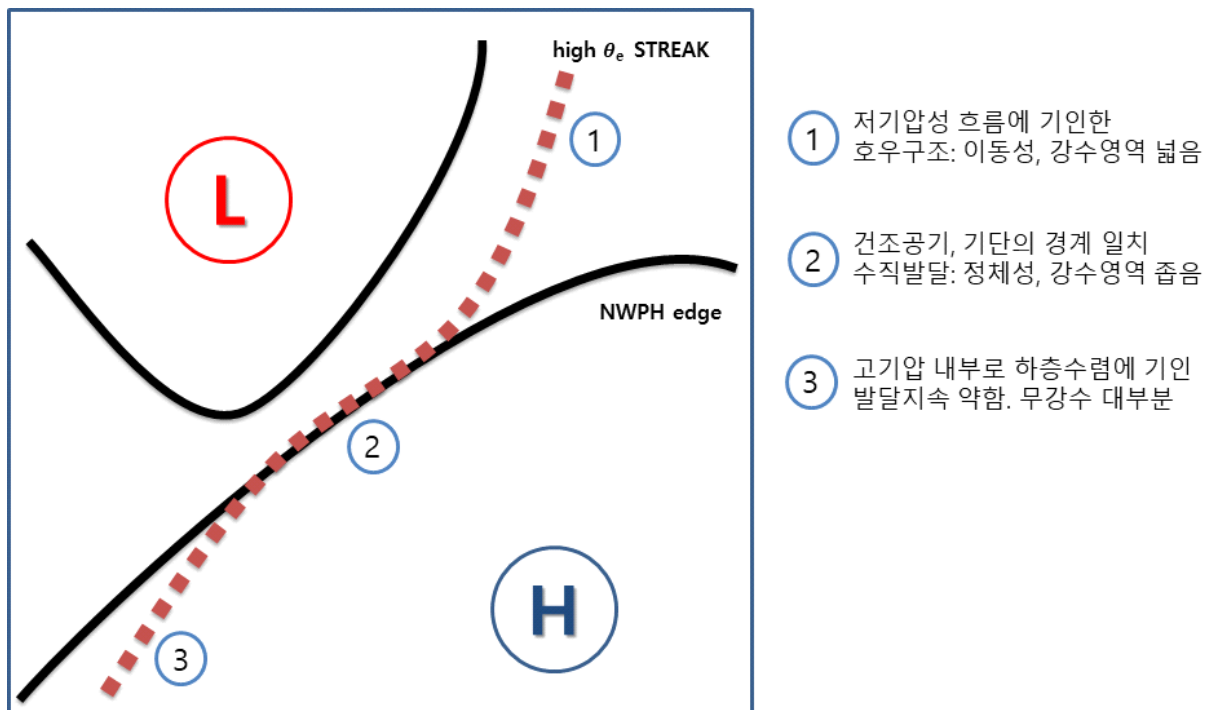


그림 5-21. 북태평양고기압 가장자리와 500hPa 상당온위 streak 위치에 따른 강수 특징

‘하층제트형’ 집중호우의 발생을 판단하기 위해 500hPa의 지위고도와 상당온위를 이용할 수 있다. 앞서 다루었던 방법으로 지위고도를 이용해 북태평양고기압의 가장자리를 먼저 분석한 후, 상당온위 streak의 위치를 파악해 집중호우의 가능성을 판단할 수 있다. 500hPa 상당온위의 streak 영역은 저기압이 동반된 강한 구름대를 의미하는데, 그림 5-21의 모식도와 같이 남고북저의 기압계에서 북쪽의 저기압에 동반된 상당온위의 streak의 위치(빨간색 점선)가 어느 곳에 위치하는지에 따라 강수의 양상이 달라진다.

고기압 가장자리의 북쪽이자 저기압의 전면인 1번 구역으로 상당온위 streak가 위치할 때는 저기압 전면에서 난기에 의한 강수가 북상하여 넓은 영역으로 영향을 주게 되며, 이동성을 가지기 때문에 지형성 강수를 제외하고는 집중호우로 연결되기는 쉽지 않다.

저기압의 남쪽 혹은 저기압 통과 후에 나타나게 되는 2번 구역에서는 상당온위 streak가 고기압 가장자리에 일치하게 된다. 즉, 저기압 후면에서 남하하는 건조공기가 고기압 가장자리로 유입되는 영역으로 ‘하층제트형’ 집중호우가 나타나게 된다. 3번 구역은 고기압 가장자리의 내부로 상당온위가 유입되기 때문에 조직적인 강한 강수로는 이어지지 못한다.

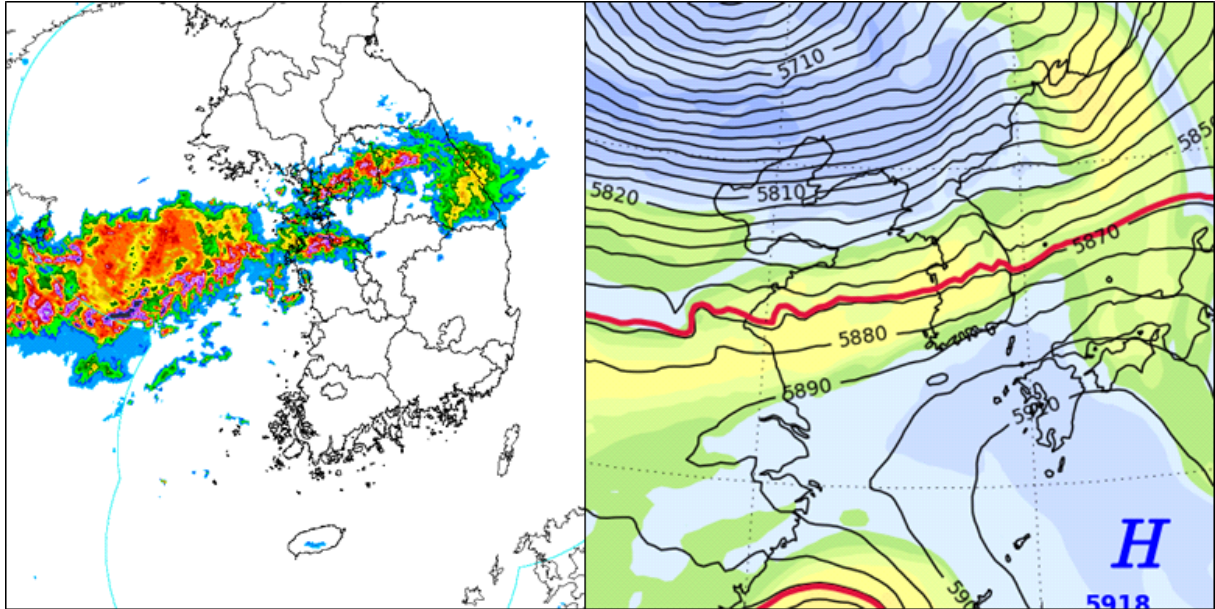


그림 5-22. 2020년 8월 3일 9시 (좌) 레이더 영상, (우) 500hPa 지위고도(검정색 선)와 상당온위(빨간색 선) 중첩

그림 5-22 사례에서 오른쪽 그림을 보면 500hPa 지위고도의 고기압 가장자리와 상당온위의 위치가 일치하는 2번 구역이 충남 북부 지역에 나타난 것을 알 수 있다. 이날 충남 북부 지역에는 ‘하층제트형’ 집중호우로 시간당 90mm 이상의 강한 비와 250mm 이상의 많은 비가 내렸다. 그림과 같이 500hPa 지위고도와 상당온위를 중첩한 자료를 통해 북태평양고기압의 가장자리를 분석하고 ‘하층제트형’ 집중호우의 발생여부를 판단할 수 있다.

Key Point!

〈 '하층제트형' 집중호우 판단과 예보 〉

1. 고기압의 중심은 북위 25~35°, 동경 125~145°에 위치해야 한다.
2. 고기압 가장자리 925hPa 유선의 경로는 동중국해~서해상으로 형성되어야 한다.
(단, 태풍의 수증기가 방출되는 경우 중국내륙을 경유해도 가능하다.)
3. 200hPa 제트와 500hPa 기압골이 모두 북위 40° 북쪽으로 지나면서 상층 기압골의 영향을 직접적으로 받지 않아야 한다.
4. 북태평양고기압 가장자리와 500hPa 상당온위 streak 구역 일치 여부를 판단한다.
5. 북태평양고기압 가장자리 북쪽 150km 이내 지점의 500~700hPa 고도에서 270~360° 또는 0~90°의 풍향이 예상되면 건조공기가 남하할 것으로 판단한다.
6. 925hPa 풍속이 25kts 이상이고, 이슬점온도는 20°C 이상이어야 한다.
7. 고기압 가장자리의 700hPa 지향류의 풍속이 25kts 이상이고, 풍향이 270° 내외일 때 강수대는 정체한다.

⇒ 1~5 만족 시 80mm/h 이상 예보, 1~6 만족 시 200mm/h 이상 예보

5. 5. ‘중규모저기압형’ 집중호우 예보

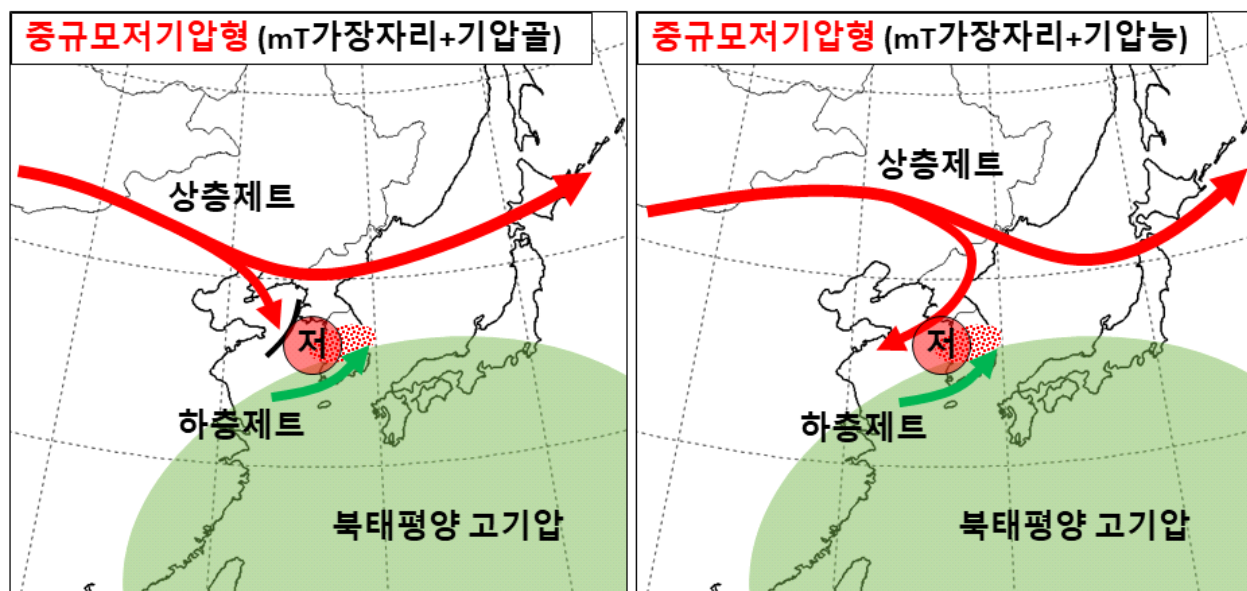


그림 5-23. mT 가장자리에서 발생하는 ‘중규모저기압형’ 호우의 두 가지 유형 모식도

‘중규모저기압형’은 북태평양고기압 가장자리에서 발생하는 집중호우 유형 중 발생 빈도가 두 번째로 높은 유형으로, 남고북저 기압계의 1단계와 3단계에서 주로 발생한다. 그림 5-23은 ‘중규모저기압형’ 호우가 발생하는 기압계 특징을 나타낸 모식도이다. ‘중규모저기압형’ 호우는 ‘하층제트형’과 마찬가지로 북태평양고기압 세력이 우리나라 남부지방까지 확장하여 고기압의 가장자리가 중부지방에 놓여있는 상태에서 발생한다. ‘하층제트형’ 호우와의 차이점은 고기압 가장자리로 중층의 기압골이 직접적으로 영향을 주면서 지상에 중규모저기압을 발달시키게 되고, 저기압에 동반된 강한 대류성 강수가 발생하게 되는 것이다. ‘중규모저기압형’은 지상에서부터 발달하는 대류성 강수이기 때문에 925hPa 고도에서 발달하는 ‘하층제트형’보다 발생빈도는 적지만 강수강도가 강한 경우가 많다(그림 5-6 참고). 그리고 마찰의 영향을 적게 받는 서해안 지역에서 더욱 강하게 나타나는 특징을 보인다.

5. 5. 1. 중규모저기압의 발달

‘중규모저기압형’ 집중호우 예보의 핵심은 중규모저기압의 발달 여부를 분석하는 것이다. 중규모저기압의 발달 메커니즘은 일반적으로 북쪽 상층 한기가 남하하면서 종관저기압을 발달시키는 것과는 조금 다르다. 그림 5-23의 왼쪽 모식도와 같이 북태평양고기압 가장자리에서 하층제트가 발달하는 형태는 ‘하층제트형’ 호우와 유사해 보이지만, ‘중규모저기압형’은 단파골이 북위 40도 남쪽의 서해상을 직접 통과하면서 기압골에 의한 경도력 증가로 하층제트가 발달하게 된다. 따라서 하층제트의 풍향도 서풍보다는 남풍에

가까운 풍계가 나타나고, 그에 따라 지상에 저기압이 발달하게 된다. 그림 5-23의 오른쪽 모식도의 경우 북쪽의 기압능과 북태평양고기압 사이에서 절리된 저기압이 발달해 통과하면서 지상의 저기압을 발달시키는 형태이다.

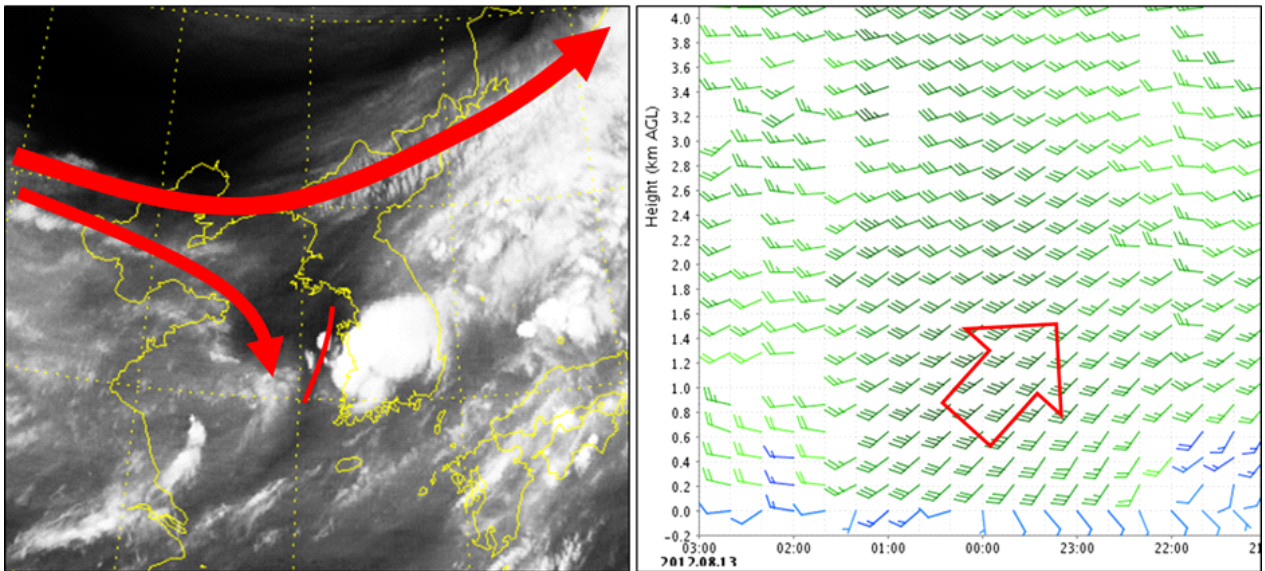


그림 5-24. 2012년 8월 12일 23시 (좌) 수증기 영상, (우) 군산 연직바람관측 시계열

서해상에서부터 중층의 단파골이 통과하거나, 절리된 저기압이 발달하여 통과하는 과정에서 모두 중규모저기압이 발달할 수 있기 때문에 기압골 분석이 중요하다. 하지만 여기서 발달하는 기압골은 규모가 작은 단파골이거나 절리 저기압 형태이기 때문에 500hPa 일기도 상에서 뚜렷하게 나타나지 않아 기압골을 분석하기 어렵다. 따라서 일기도 분석으로 파악이 안 되는 경우 수증기 영상을 함께 참고하는 것이 좋다.

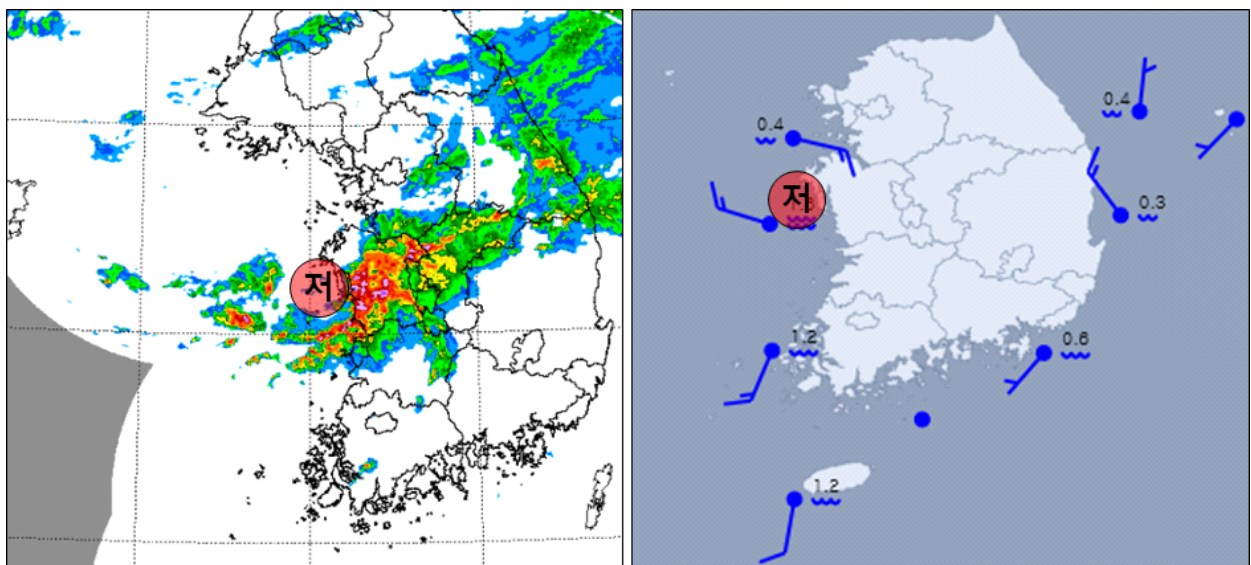


그림 5-25. 2012년 8월 12일 23시 (좌) 레이더 영상, (우) 해양기상부이 바람 분포

그림 5-24는 2012년 8월 12일 사례로, 왼쪽 수증기 영상을 보면 상층제트는 북위 40° 부근에 위치하고 있지만, 제트 남쪽 침강류에 의해 단파골이 발달해 서해상을 통과하면서 지상 저기압을 발달시킨 상황이다. 오른쪽의 군산 연직바람관측 시계열 자료를 보면 1km 이하 고도로 30kts 이상의 강한 하층제트가 발달한 것을 확인할 수 있다. 그림 5-25는 같은 사례의 레이더 영상과 해양기상부이의 바람 분포로 각각의 그림에서 서해상에 중규모의 저기압이 발달한 것을 확인할 수 있다.

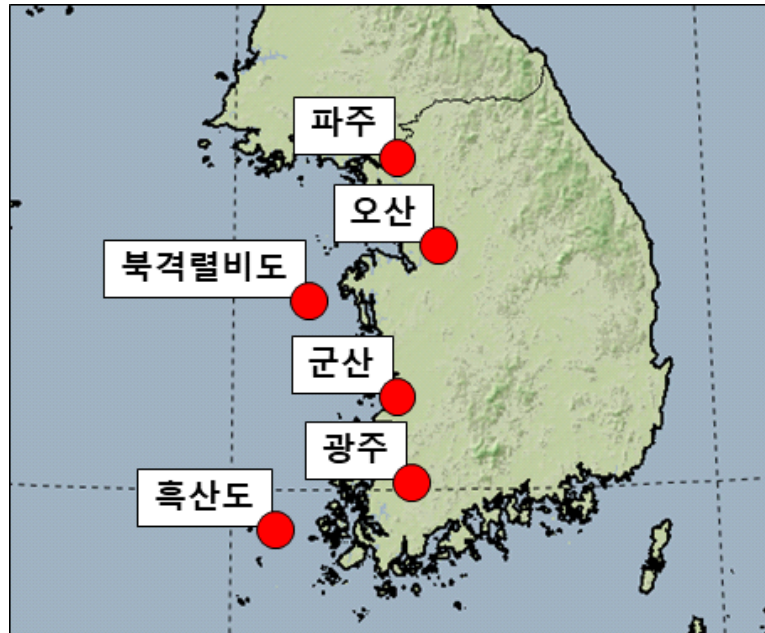


그림 5-26. ‘중규모저기압형’의 하층제트 감시 지점

‘중규모저기압형’ 집중호우 사례에서 925hPa의 하층제트는 풍속이 25kts 이상이고 풍향은 180°~230°으로 나타났다. ‘하층제트형’ 호우 유형과의 차이점은 하층제트의 풍향이 서~남서풍이 아닌 남~남서풍 형태로 나타난다는 점이다. 따라서 지상 저기압을 발달시키기 유리한 조건이 된다. 그림 5-26은 서해안 근처 고층관측 지점들로, 이 지점들로 유입되는 925hPa 하층제트를 예상하여 저기압 발달 여부를 판단하면 된다.

5. 5. 2. 강수강도와 강수집중 구역

‘중규모저기압형’ 집중호우는 이동성 저기압이 통과하는 형태이기 때문에, 강수대가 정체하는 시간보다 통과 당시의 대류 강도가 강수강도를 결정한다. 이때 대류 강도를 판단하는 요소가 지상의 이슬점온도이다. 앞서 그림 5-6에서 ‘중규모저기압형’ 호우의 경우 지상 이슬점온도가 23℃ 이상일 때와 24℃ 이상일 때의 강수 강도가 각각 80mm/h 이상, 110mm/h 이상으로 나타나 지상 이슬점온도가 높을수록 시간당 강수량이 많아지는 것을 확인하였다.

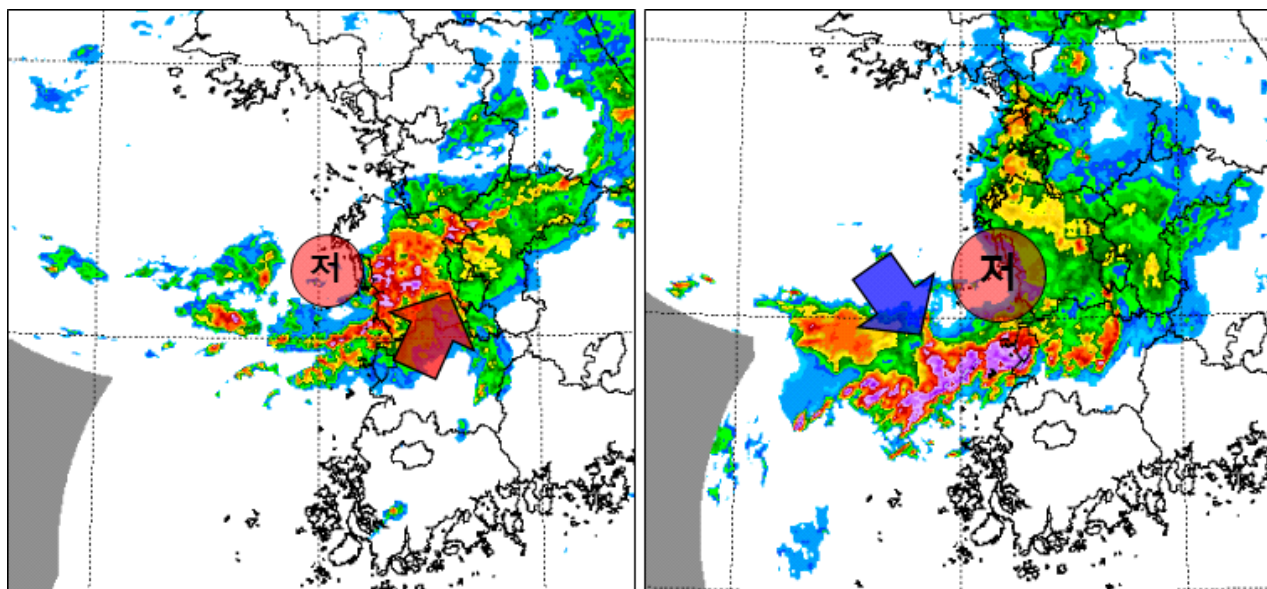


그림 5-27. 레이더 영상 (좌) 2012년 8월 12일 23시, (우) 2017년 7월 15일 03시

또한, ‘중규모저기압형’에서 호우구역을 결정짓는 요소로 저기압의 발달 정도를 고려해야 한다. 저기압의 발달 정도에 따라 강수가 집중되는 구역이 달라지게 되는데, 그림 5-27의 왼쪽 사례는 상대적으로 저기압이 약했던 사례로, 저기압의 동쪽에 위치한 난기에 의한 호우 구역이 강수집중 구역이 된다. 오른쪽 사례는 저기압이 상대적으로 강했던 경우로, 저기압성 순환이 강화되어 북쪽의 한기가 끌려 내려오면서 그 전단으로 일종의 한랭전선 강수대가 발달한 모습을 보여준다. 이 경우 강수집중 구역이 저기압의 남쪽으로 형성되며, 저기압이 강할수록 한랭전선 강수대의 영역은 더욱 남쪽으로 쳐지게 되므로 주의가 필요하다【’20년 4번 사례】.

Key Point!

〈 ‘중규모저기압형’ 집중호우 판단과 예보 〉

1. 고기압의 중심은 북위 25~35°, 동경 125~145°에 위치해야 한다.
 2. 고기압 가장자리 925hPa 유선의 경로는 동중국해~서해상으로 형성되어야 한다.
(단, 태풍의 수증기가 방출되는 경우 중국내륙을 경유해도 가능하다.)
 3. 700hPa 기압골이 서해상으로 통과해야 한다.
 4. 지상의 이슬점온도는 23℃ 이상이어야 한다.
 5. 서해안 지점에 925hPa 풍속 25kts 이상, 풍향 180~230 °가 예상되어야 한다.
- ⇒ 모두 만족 시 80mm/h 이상 예보

5. 6. 중부지방 집중호우 예보 판단 흐름도

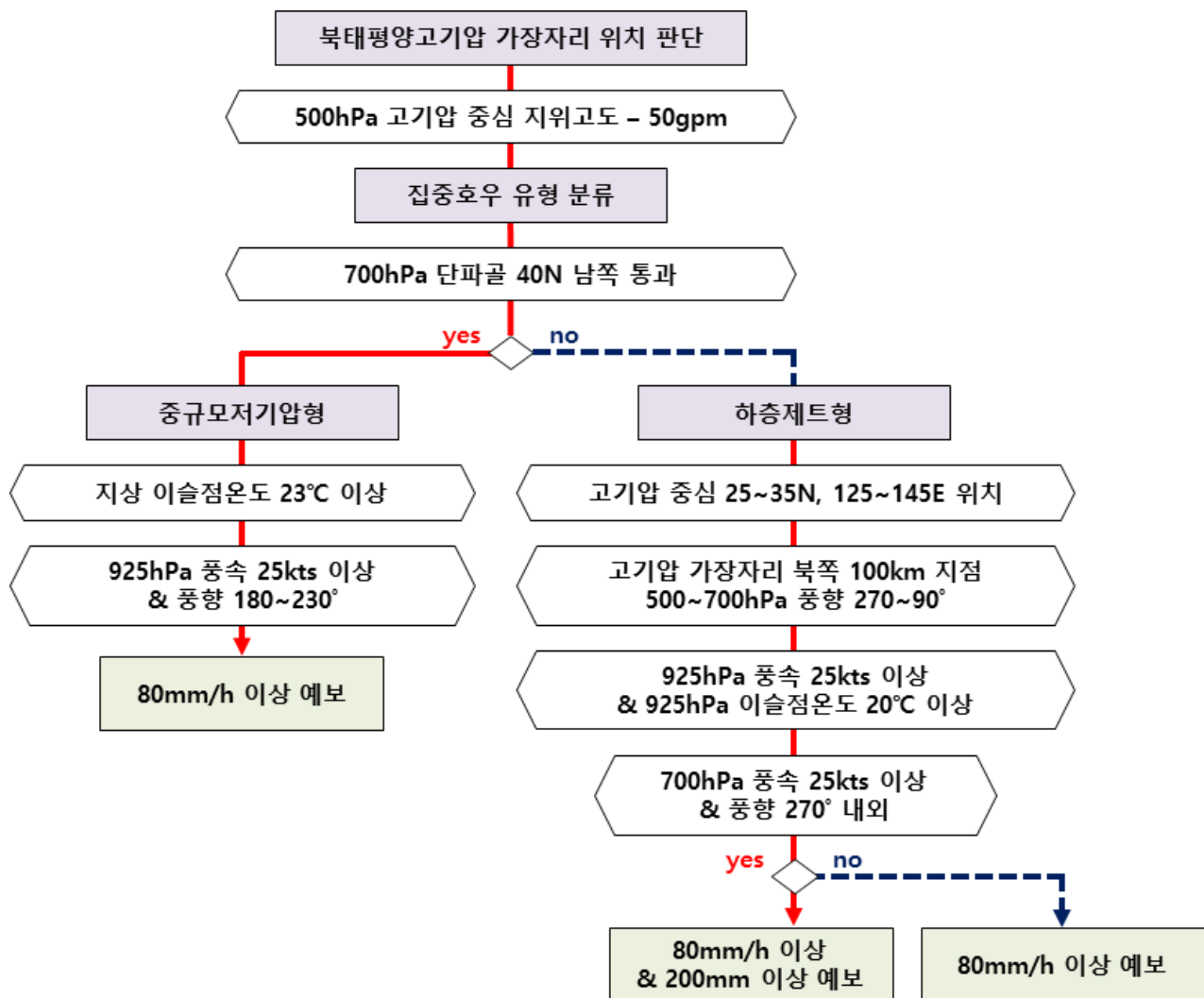


그림 5-28. 중부지방 집중호우 예보 판단 흐름도

참고문헌

1. 박순웅, 안현주, 전영신, 1988: 1985년 장마기간에 동부 아시아 지역의 대기 순환의 연구. 한국기상학회지, 29권 3호, 22-43.

《Why?How!》 제2권 ‘여름예보 사례분석’ 가이드스 연계 내용

- 5. 4. ‘하층제트형’ 집중호우 예보: 【‘20년 2번 사례】
- 5. 4. 1. 고기압 중심 위치와 수증기 유입 경로: 【‘20년 5번 사례】
- 5. 4. 2. 건조공기의 남하: 【‘20년 2번 사례】, 【‘20년 4번 사례】
- 5. 5. 2. 강수강도와 강수집중 구역: 【‘20년 4번 사례】