



겨울철 예보 가이드스

Why?
How!



예보국 예보분석팀

CONTENTS

1. 온난이류에 의한 강수의 이해와 예보 활용	1
1. 1 온난이류형 강수 정의	1
1. 2 우리나라 온난이류형 강수의 형태	1
1. 3 온난이류형 강수 모식도	2
1. 4 온난이류형 강수를 결정하는 요소	3
1. 5 온난이류형 강수 예보 시 주의사항	16
1. 6 온난이류형 강수 예보를 위한 흐름도	18
2. 발해만 기압골에 의한 온난이류형 강수	23
2. 1 발해만 기압골을 동반한 경우의 온난이류형 강수	23
2. 2 온난이류형 강수에 미치는 발해만 기압골의 영향	25
2. 3 발해만 기압골에서의 예보 흐름도	31
3. 호수 효과에 의한 서해안 강설 메커니즘의 이해와 예보 활용	35
3. 1 호수 효과에 의한 서해안 강설 정의	35
3. 2 호수 효과에 의한 강설 메커니즘	36
3. 3 강설 판단 요소 I - 해기차	37
3. 4 강설 판단 요소 II - 바람과 취주거리	42
3. 5 대설 판단 요소 - 수렴	50
3. 6 서해안형 강설 판단을 위한 흐름도	58

4. 북동기류에 의한 강수시스템 이해와 예보 활용	61
4. 1 북동기류 강수의 정의	61
4. 2 겨울철 북동기류에 의한 강수 예측의 3가지 어려운 점	62
4. 3 눈구름이 동해안으로 들어올지 해상에 머물지?	63
4. 4 눈으로 올까 비로 올까?	71
4. 5 동해안 강수의 유형 분류	80
5. 습구온도를 이용한 강수형태예보	97
5. 1 습구온도의 정의	97
5. 2 습구온도계의 원리	98
5. 3 실제 대기에서는... ..	99
5. 4 습구온도의 일 변동성	100
5. 5 강수형태 예측에 효과적인 요소	102
5. 6 강수에 의한 기온 하강 예측	106
5. 7 습구온도 활용 시 주의사항	107
6. 실황분석 가이드스	119
6. 1 실황분석의 중요성	120
6. 2 실황분석 방법과 절차	120
6. 3 실황분석에 기반한 예보	127
6. 4 실황분석 사례	131
부록 겨울철 유형별 사후분석	143
부록 업무매뉴얼 요약	275

거울 예보 가이드스

1. 원인이류에 의한 강수의 이해와 예보 활용



1. 온난이류에 의한 강수의 이해와 예보 활용

Why?

온난이류형 강수의 과거 유사사례들을 분석하여 온난이류에 의한 강수 메커니즘을 이해하고 예보 결정 요소를 정량적으로 제시하여 향후 예보 시 활용될 수 있는 기준을 마련하고자 한다.

1. 1 온난이류형 강수 정의

겨울철, 우리나라에서 대표적으로 나타나는 대설유형 중 하나로 찬 공기덩어리(cold pool)가 잘 형성될 수 있는 11월 중순부터 2월 중순까지 나타난다. 이 기간 동안 우리나라는 찬 대륙고기압의 영향을 주기적으로 받는데, 이 차가운 기단은 따뜻한 서해상을 통과하면서 이동성고기압으로 변질되어 우리나라를 통과하는 경우가 많다. 이때 이동성고기압의 가장자리를 따라 난기가 한반도로 유입되면 기존에 쌓여있던 찬 공기와 부딪히고, 성질이 다른 두 공기의 불연속면에서 기류가 상승하며 강수가 나타난다.

1. 2 우리나라 온난이류형 강수의 형태

우리나라에서 온난이류형 강수가 발생하는 유형은 크게 두 가지의 형태로 나타난다. 첫 번째로는 해상에서 하층부터 포화된 공기덩어리가 서해안으로 유입되는 형태, 두 번째로는 내륙에서 찬 공기덩어리(cold pool) 또는 지형 상승에 의해 응결이 시작되면서 강수가 발생하는 형태이다. 두 가지의 온난이류형 강수 형태는 동시에 나타나기도 하고 개별적으로 나타나기도 한다. 일반적으로 해상에서 포화된 공기가 들어오는 지역(주로 경기남부, 충청도, 전북북부)의 강수강도가 강하지만, 서풍기류가 매우 강할 때는 강원산지에 강제상승 효과로 인하여 10cm 이상의 많은 눈이 오는 경우도 있다.

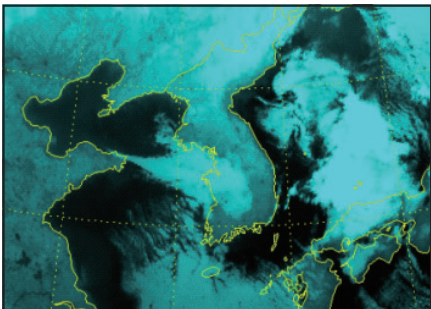


그림 1-1. 해상부터 발달하는 온난이류형 구름

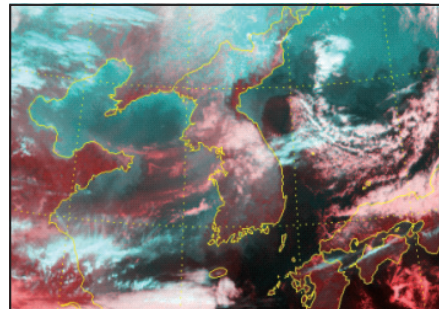


그림 1-2. 내륙에서 발달하는 온난이류형 구름

1. 3 온난이류형 강수 모식도

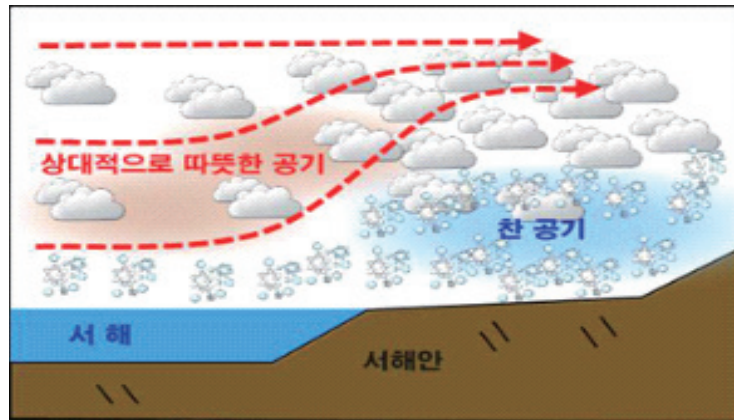


그림 1-3. 해안에서의 온난이류형 강수 모식도

온난이류형 강수 두 유형의 메커니즘은 서로 차이점을 보인다. 첫 번째로 해안에서 발달하는 유형의 경우(그림 1-1, 그림 1-3) 해상에서의 수증기공급, 그리고 해안에서의 온도경도가 주요 강수 발생 요인이 되며, 두 번째로 내륙과 산간 지역에서 발달하는 유형(그림 1-2, 그림 1-4)의 경우 cold pool과 지형 효과를 받은 기류의 상승이 주된 요인이 되므로 수평풍속과 cold pool의 강도 등이 주요 강수 발생 인자가 된다.

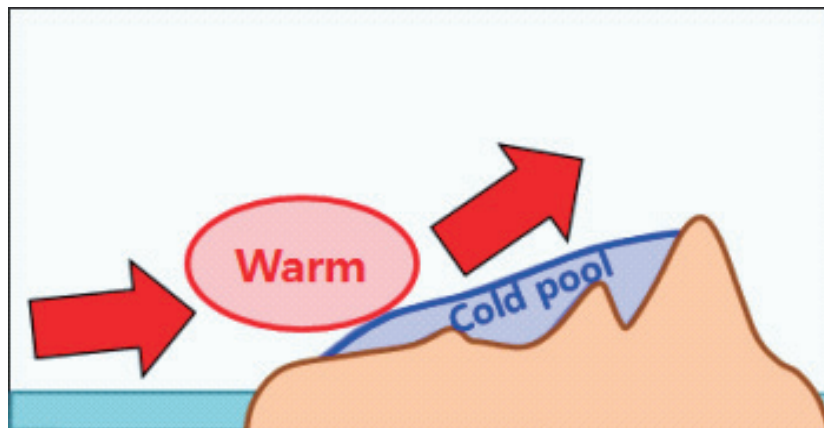


그림 1-4. 내륙에서의 온난이류형 강수 모식도

물론 두 유형 모두 온난이류라는 공통적인 요소가 작용하지만, 강수 발달을 결정하는 결정적 요소는 각각의 유형에 따라 조금 다르게 적용해야 한다.

1. 4 온난이류형 강수를 결정하는 요소

1. 4. 1 해수면 온도

온난이류형 강수에서 해수면 온도는 크게 세 가지의 역할을 하게 된다. 첫 번째로는 **내륙과의 온도차로 인한 온도경도 발생**이고 두 번째로는 **하층대기의 수증기공급**, 그리고 세 번째는 **발해만 저기압을 발달시키는 역할**이다.

서해안에 온도경도가 크게 발생하려면 **내륙의 온도는 낮고, 해수의 온도는 상대적으로 높은 시기여야 한다**. 내륙지역의 월평균 최저기온 분포를 2017년 11월~2018년 3월 서울과 춘천의 자료(표 1-1)로 살펴보면, 서울의 경우 12월 -5.7°C , 1월 -7.3°C , 2월 -5.9°C 로 12월부터 큰 폭으로 떨어져 1월이 가장 낮고 2월부터는 회복세에 접어든다. 반면에 덕적도 부이(경기만 인근)의 해수온도를 보면 12월 7.9°C , 1월 4.1°C , 2월 1.3°C 로 2월까지의 계속해서 수온이 내려가고, 그 이후 회복세를 보이기 시작한다.

즉 해수면온도는 계속해서 떨어지지만 2월부터 내륙기온이 상승하기 때문에 온도경도는 11월부터 1월까지 가장 크게 나타나고 2월부터는 온도경도가 점차 완화된다.

표 1-1. 덕적도 부이의 월평균 수온과 서울, 춘천의 월평균 최저기온 비교

기간 요소	2017년		2018년		
	11월	12월	1월	2월	3월
최저기온(서울, $^{\circ}\text{C}$)	1.3	-5.7	-7.3	-5.9	3.8
최저기온(춘천, $^{\circ}\text{C}$)	-3.0	-10.3	-11.8	-10.3	0.2
덕적도 부이 수온($^{\circ}\text{C}$)	14.3	7.9	4.1	1.3	3.0
해수면온도-기온(서울, $^{\circ}\text{C}$)	13	13.6	11.4	7.2	-0.8
해수면온도-기온(춘천, $^{\circ}\text{C}$)	17.3	18.2	15.9	11.6	2.8

수증기 공급 측면에서 해수면온도를 보면, 온도의 절대값이 낮은 2월에는 수증기 함량이 적어 강수발달에도 불리한 조건이 된다. 여기서는 남서풍이 강하게 불면서 온난이류가 있었던 11월 사례 2가지, 2월 사례 2가지의 총 4가지 사례로 비교하여 살펴보고자 한다.

그림 1-5는 네 가지 사례에 대한 지상일기도와 레이더 영상이다. 2010년 11월 27일 사례와 2017년 11월 25일 사례의 경우는 해상으로부터 수증기가 원활하게 공급되면서 전선대 전면으로 강한 강수대가 발달하였다. 반면 2000년 2월 27일 사례와 2016년 2월 8일 사례의 경우에는 해안으로는 강수대가 거의 발달하지 못하고 대신 지형

에 의해 강제상승 영향을 받는 경기동부, 강원영서와 산지를 중심으로만 많은 강수가 있었다. 즉, 2월은 낮은 해수온도로 인하여 수증기 공급이 제한적이었음을 사례를 통해 확인 할 수 있다.

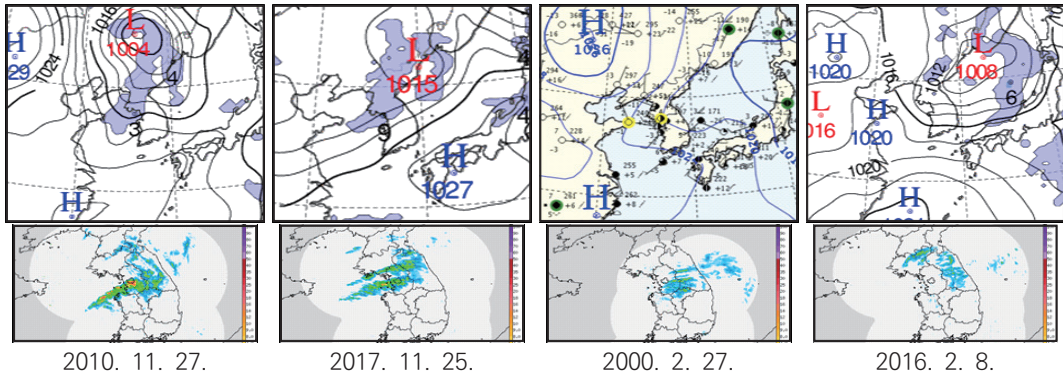


그림 1-5. 지상일기도(상)와 레이더 PPI0 실태(하)

또한, 발해만의 해수온도도 우리나라의 온난이류형 강수에 크게 영향을 미친다. 발해만의 해수온도가 높은 11월 하순부터 12월까지의 상층(주로 500hPa)한기를 동반한 기압골이 통과할 때 높은 해수온도와 상층 찬 공기 사이의 상호작용으로 인해 주기적으로 지상에 발해만 기압골이 형성된다. 이 발해만 기압골은 온난이류형 강수를 강화시키는 역할을 하는데, 이 부분은 다음에서 다시 살펴보려고 한다. 반면 1월부터는 해수온도가 너무 낮아져서 발생 빈도가 낮아지게 된다.

Key Point!

1. 온난이류형 강수는 해수면온도와 육상의 기온차가 큰 11월에서 2월까지 발생하며, 특히 11월 하순부터 12월까지 그 빈도가 가장 높다.
2. 2월에는 해수면온도가 낮아 수증기의 공급이 제한적이므로 적설은 평지지역에서 3cm 이상 쌓이기 어려우나, 산간에서는 강제상승에 의해 10cm 이상의 대설이 내리기도 한다.
3. 발해만 기압골은 1월부터 해수온도가 낮아지면서 잘 발생하지 않는다.

1. 4. 2 온도경도

앞서 11월에서 2월까지의 해수면 온도와 육지 온도 차이에 의해 온난이류형 강수가 잘 발생한다는 것을 언급하였다. 즉 온도차이가 온난이류형 강수의 원동력이라 할 수 있다. 따라서 온난이류형 강수를 고려할 때 가장 먼저 살펴봐야 할 점은 서해안에 위치한 온도조밀역이다.

개별 사례에 대해서 온난이류형 강수의 발생 가능여부를 판단하기 위해서는 각 사례에 대해 서해안 지역에 대한 온도경도를 정량적으로 제시해야한다. 이 기준을 선정하기 위해 본 가이던스에서는 예보장 자료에서 손쉽게 접할 수 있으면서 하층의 기상 조건을 잘 고려할 수 있는 전구 925hPa 등압면의 상세바람장을 활용하였다.

2017년 12월 25~26일에 있었던 온난이류 사례를 보면 온도조밀역의 중요성을 알 수 있다. 이날 남쪽으로는 고기압이 확장하고 있는 상황에서, 경기만 인근에 925hPa에서 10kts 이상의 서풍이 예상되어 서울과 경북서부는 1cm미만, 경기남부, 충청북부와 영서남부에는 1~3cm의 적설을 예보했다.

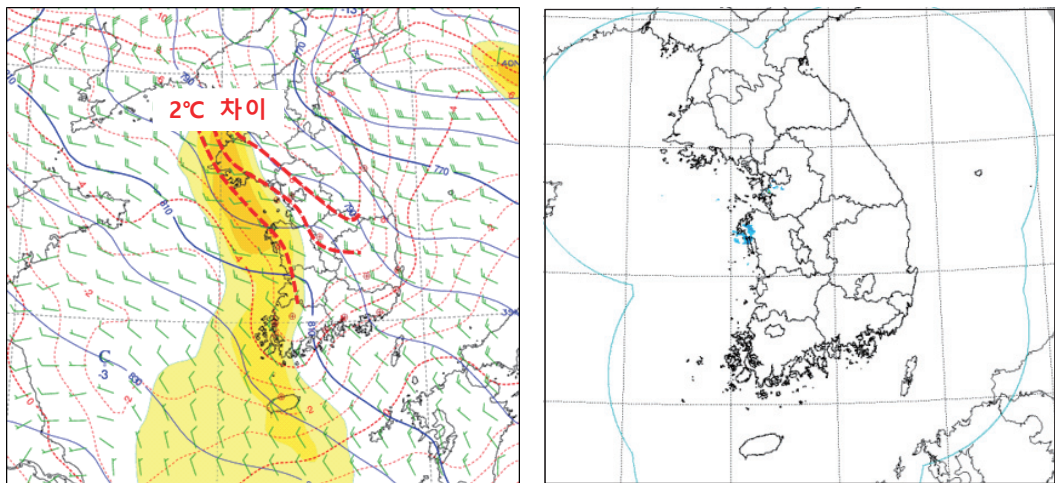


그림 1-6. 2017. 12. 25. 21:00의 (좌) 925hPa 상세바람장 (우) 레이더 합성영상

시간의 순서대로 25일 21시에서 26일 03시까지 바뀌는 바람과 온도 상황을 살펴보겠다. 먼저 25일 21시 상황이다. 925hPa 상세바람장(그림 1-6)을 보면 경기만 인근으로 서풍 계열의 바람이 등온선을 가로지르는 형태를 띠고 있다. 이때 백령도에서 충남 서해안을 잇는 선과 서울 동쪽 경계선 사이에서의 등온선을 보면 약 2°C의 온도 차이를 보였다.

이 시점에서의 레이더 영상을 보면 충청과 전북 일부지역에만 눈이 내리고 대부분 지역에서 적설이 기록되지 않았다.

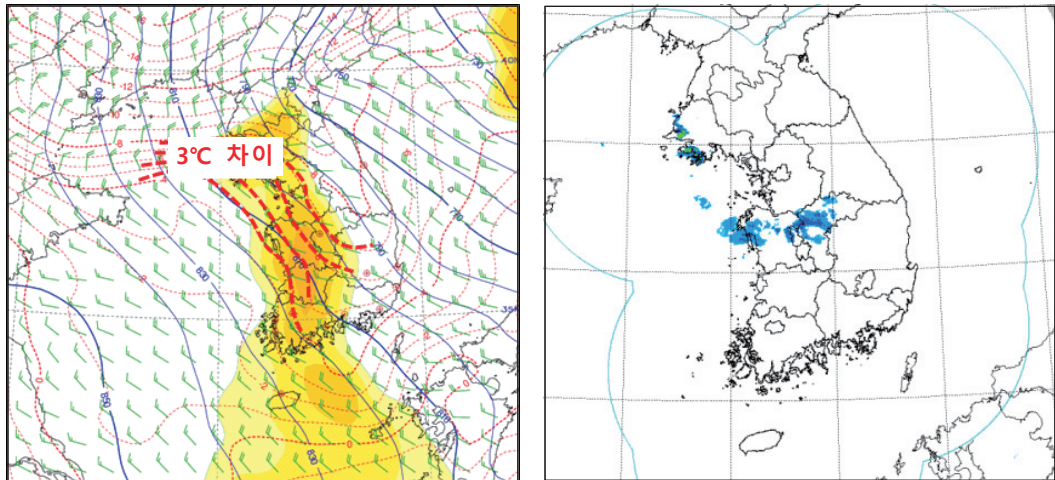


그림 1-7. 2017. 12. 26. 03:00 (좌) 925hPa 상세바람장 (우) 레이더 합성영상

다음은 26일 03시의 상황을 보겠다. 서쪽에서는 난기가 불어 들어오고 내륙에서는 한기가 축적되는 시간이므로 온도경도가 필연적으로 커지는 시점이다.

이 당시의 925hPa 상세바람장(그림 1-7)을 보면 충청지역으로 서북서풍의 바람이 20kts 정도로 강화되었고 같은 구간에서 3°C로 커졌다. 온도 경도가 커짐에 따라 습윤 역은 더욱 강화되고 구름도 더 발달하면서 강수대도 점차 발달 되는 형태를 보였다.

이 외에도 2018년 1월 13일 사례를 보면 다른 조건들은 유사하나 같은 구간의 온도경도가 3.5°C를 나타내었고 서울 지역에 0.6cm, 그 외에 경기도 지역에서는 2~5cm까지의 적설을 기록하였다.

위 사례들을 토대로 요약해 보면 온도경도가 2°C에서는 눈날림 정도의 구름이 형성, 온도 경도 3°C 이상이면 1cm 이상의 적설이 가능한 조건이 되고, 온도경도가 4°C 이상이 되면 본격적으로 강수가 강화되기 시작한다. 이것은 온도경도가 커지면서 3cm 내외의 적설을 수월하게 기록할 수 있는 조건이 된다.

Key Point!

1. 온난이류형 강수가 발생하기 위해 충분한 온도경도는 가장 먼저 고려해야할 필수 조건!
2. 백령도에서 서울 동쪽까지 925hPa 온도경도가 2.0°C 이상일 때 눈구름이 생성되기 시작하고, 1cm 이상의 적설을 위해서는 약 3.0°C 이상의 온도경도가 필요하다.

1. 4. 3 바람조건

온도경도와 반드시 함께 생각하여야 하는 것이 바로 하층의 바람조건과 이에 따른 온도이류이다. 온도이류항은 속도와 온도경도의 내적($-\vec{v} \cdot \nabla T$)으로 나타나므로 온도이류는 바람의 방향이 등온선과 수직($\theta=90^\circ$)일 때 그 크기가 최대가 된다.

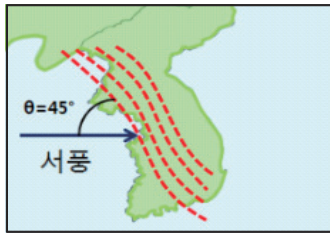


그림 1-8. 온도이류 모식도(서풍)

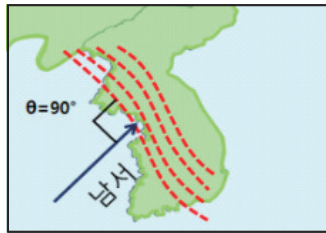


그림 1-9. 온도이류 모식도(남서)

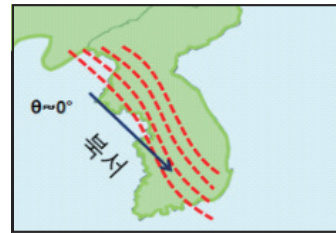


그림 1-10. 온도이류 모식도(북서)

일반적으로 온난이류형 강수에서 서해안의 등온선은 수평에서 시계방향으로 45° 가량 기울어져 있기 때문에 이류의 정도는 남서풍(그림 1-9)에서 가장 크고(100%), 서풍(그림 1-8)일 때 70%정도로 작아지며, 북서풍(그림 1-10)일 때는 10~20%정도로 온도이류가 거의 일어나지 않는다. 따라서 풍향조건만 고려하면 925hPa 남서 또는 서풍 일 때 온난이류가 활성화 되고, 점점 북서풍에 가까워지면 온난이류가 약하다.

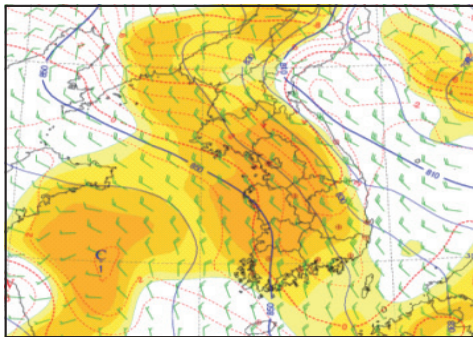


그림 1-11. 925hPa 상세바람장
(2017. 12. 29. 06:00)



그림 1-12. 레이더 합성영상
(2017. 12. 29. 06:00)

2017년 12월 29일 새벽 사례(그림 1-11과 1-12)를 보면 925hPa에서 서해안에 경압성을 보이며 하층대기가 습윤한 상태를 보이고 있다. 925hPa의 풍속도 20kts 이상으로 온난이류형 강수가 내리기에 충분한 조건이었다. 그러나 당시 하층 풍계가 북서풍에서 서풍으로 바뀌지 않았고, 바람이 등온선과 나란하게 불었다. 따라서 등온선을 가로질러 습윤한 공기를 상승시키는 요인이 거의 없었으며 이 때 서해안에는 약한 강수에 코만 나타났다(부록/사후분석 1-3 참고).

925hPa의 바람조건이 최하층의 구름 발달을 결정한다면 850hPa의 바람조건은 온난이류가 일어나는 대기의 두께를 결정한다. 따라서 850hPa의 바람은 강수의 강도에 크게 영향을 미칠 수 있다. 925hPa에서의 온난이류가 충분했던 사례(온도조밀+서풍류) 중 850hPa 바람이 북서류, 서풍류인 경우 두 가지를 비교해보면 명확한 차이점을 볼 수 있다.

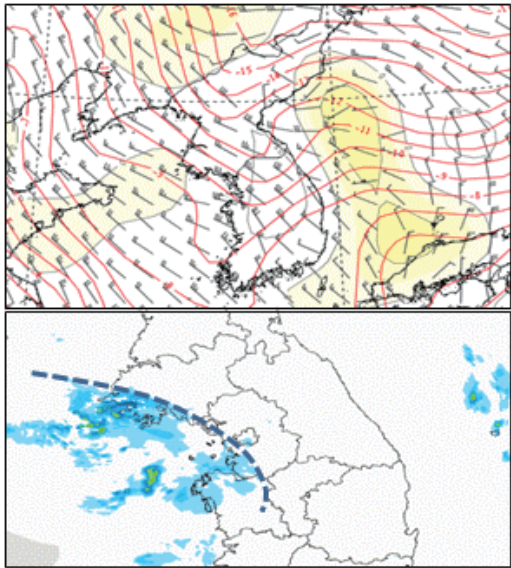


그림 1-13. 850hPa 기온, 바람, P속도, 레이다합성
(2017. 12. 8. 21:00)

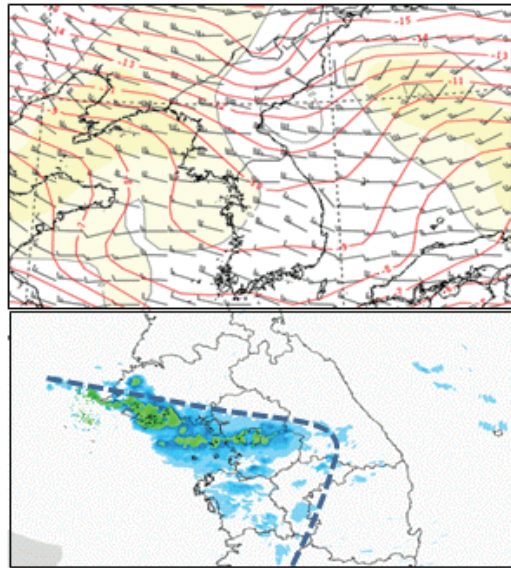


그림 1-14. 850hPa 기온, 바람, P속도, 레이다합성
(2017. 12. 18. 09:00)

그림 1-13과 그림 1-14서의 차이를 보면 2017년 12월 8일의 경우 850hPa 풍향이 북서이고, 2017년 12월 18일은 서풍의 바람이 나타난다. 이에 따라 18일 사례는 850hPa에서도 온난이류가 일어나면서 850hPa의 p속도가 음의 값(상승운동)을 나타내는 지점이 내륙까지 나타나는 것을 볼 수 있고, 실제 강수강도도 내륙까지 뚜렷하게 나타났다. 반면, 8일의 사례는 850hPa의 상승이 없고 운저가 낮은 구름만 발생하여 강수가 매우 약하게 나타남을 볼 수 있다(부록/사후분석 1-1 참고). 즉, 온난이류가 최하층에서부터 850hPa까지 이루어져야만 원활한 강수발달이 이루어진다.

강수 발달의 정도와 별개로, 풍향은 강수대의 전체적인 이동 흐름에도 영향을 주며, 온난이류형 강수의 경우 구름대가 850hPa의 기류 흐름과 비슷하게 이동하는 경향이 있다. 그림 1-13과 그림 1-14의 사례에서도 나타나듯이 실제로 850hPa에서 북서류가 강하게 불면 해상의 강수대는 대부분 해안에 거의 나란하게 움직이기 때문에 충남 서해안, 전북 일부 지역에만 영향을 준다.

비슷한 논리로, 925hPa 풍향에 따른 서울지역 0.1cm 이상의 적설여부를 통계자료로 확인해 볼 수 있다. 그림 1-15는 서울지역에 0.1cm 이상의 적설이 있었던 사례의 풍향과 풍속을 나타낸 그래프인데, 적설이 있었던 경우의 대부분 풍향은 280도 보다 낮게 나타났고 풍속은 5kts 이상이였다. 이 통계적 자료를 서울지역의 적설 유무 예보에 참고할 수 있을 것이다.

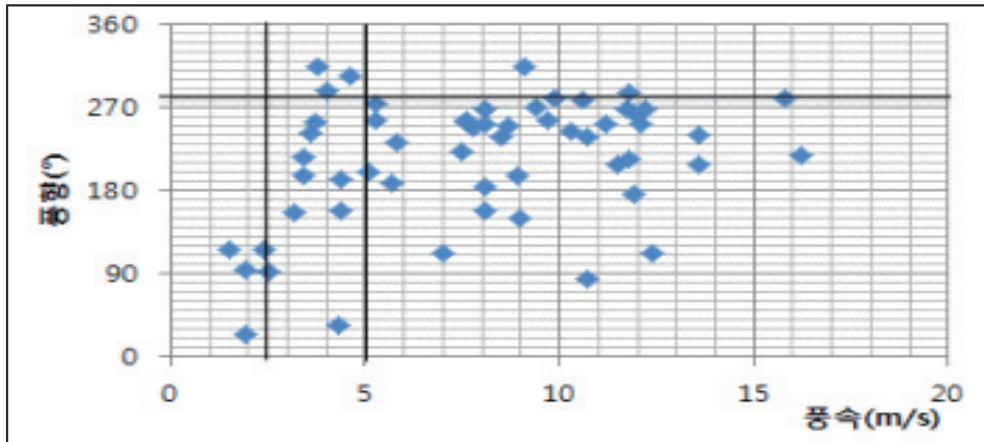


그림 1-15. 서울지역 적설 시 UM지역모델의 925hPa 풍향·풍속(2011~2016년)

다음은 풍속조건에 대해 따져보겠다. 온난이류형 강수는 서해안의 지형특성, 해안 온도선 분포 등에 의해 하층의 풍향조건에 상당히 민감하다는 것을 위에서 확인하였다. 그에 비해 풍속조건은 상대적으로 덜 중요하게 다뤄지지만, 어느 정도의 임계값은 분명히 존재한다(표 1-3, 표 1-4).

일반적으로 925hPa의 풍속이 10kts 이상이 되어야 구름대가 형성되었으나 남서류의 경우엔 5kts의 풍속에서도 가능했다. 850hPa의 경우 대부분 20~25kts의 풍속조건을 보였는데, 25kts 이상의 서풍이 불 경우에는 충청 또는 경기도 지역에 5cm이상의 적설을 기록하기도 하였다. 하지만 30kts 이상의 강풍에서는 바람이 증가하더라도 적설이 그에 비례하여 증가하지는 않았다.

표 1-3. 2017~2018년 겨울 기간 온난이류형 강수의 하층 바람과 적설

날짜	12.1	12.5	12.9	12.18	12.26	12.28	1.13	1.20	1.30	2.14
850hPa(kts)	북서 25	서 25	북서 25	서 25	북서 20	북서 25	북서 20	서북서 20	서 30	남서 45
925hPa(kts)	서 10	남서 5	서 10	남서 10	북서 10	북서 5	서 10	북서 10	서남서 20	남서 30
적설(서울,cm)	-	0.4	-	5.1	-	-	0.6	-	3.5	-

표 1-4. 2018~2019년 겨울 기간 온난이류형 강수의 하층 바람과 적설

날짜	11.20	11.27	11.29	12.13	12.17	12.18	12.19	12.25	1.21	2.12
850hPa (kts)	서북서 15	서 20	북서 30	서 30	북서 20	서 20	서 30	서북서 20	서북서 30	북서 20
925hPa (kts)	서남서 20	서 20	서북서 10	남서 15	서북서 20	서 20	서 20	서 15	서 30	서북서 15
적설(서울,cm)	비로 내림	-	날림	1.7	-	-	-	날림	날림	날림

Key Point!

1. 온난이류형 강수에서 하층고도의 풍향이 남서-서풍일 때 충분한 온난이류가 발생할 수 있고, 북서풍일 때는 강수 형성이 어렵다.
2. 925hPa에서 충분한 온난이류가 있다 하더라도 850hPa에서 풍향이 북서로 온난이류가 없다면 적설이 1cm 미만으로 그치고 강수구역도 충남, 전북으로 한정된다.
반면, 850hPa에서도 서풍이 불어 온난이류가 지원되면 850hPa까지 상승류가 관측되며 1~3cm의 적설이 가능해진다.
3. 통계적으로 서울의 경우 925hPa 풍향이 280°미만일 때에만 적설이 기록된다.
4. 풍속의 경우 925hPa는 10kts 이상, 850hPa는 20kts 이상일 때 강수가 발생할 수 있으며, 850hPa에서 서풍이 25kts 이상의 풍속으로 불 때에는 10cm까지의 적설도 가능하다.
그러나 풍속이 더 증가하더라도 적설이 풍속에 계속 비례하여 증가하지는 않는다.

1. 4. 4 중상층 대기의 하강류 존재 여부

온난이류형 강수에서는 해수온도, 925hPa 바람을 비롯한 하층의 대기 상태가 중요하게 작용한다는 것을 살펴보았다. 그러나 온난이류형 강수분석을 위해 하층 대기 상태에 집중하다 보면 대기 중상층에서 침강하는 공기를 놓치는 경우가 있다. 실제로 겨울철 강수에서는 중층대기에서 강한 하강 기류가 작용하여 대설이 약화되는 유형이 빈번하게 발생한다.

그 이유는 상층기압골이 발해만 기압골을 형성한 후 빠르게 진행하면, 발해만저기압이 경기만 인근에 작용할 때에 상층기압골은 이미 동해상으로 빠져나가게 되는데 이 때 그 후면으로 찬 공기가 침강하면서 하강 기류를 형성하기 때문이다(그림 1-16).

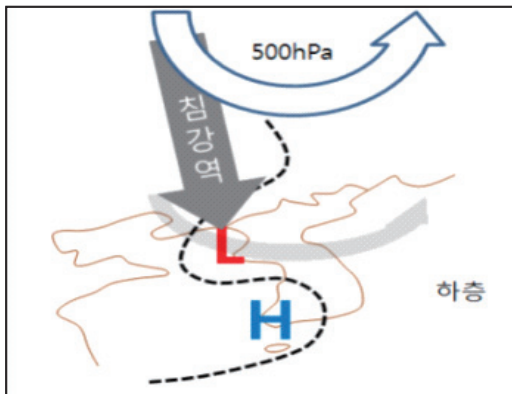


그림 1-16. 상층골 이동에 따른 침강역 모식도

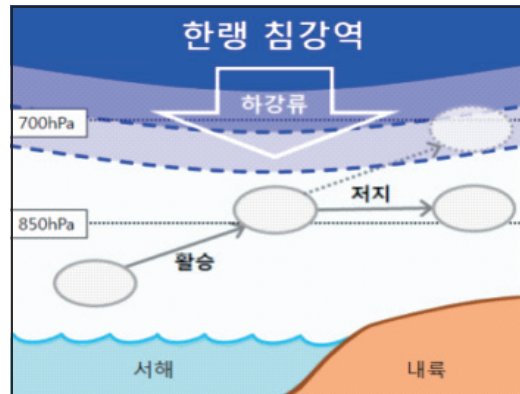


그림 1-17. 하강류에 의한 구름발달 제한 모식도

서해상의 따뜻한 공기가 cold pool과 작용하며 상승운동을 할 때 일반적인 대기라면 온도조밀역의 경사면을 따라 자연스럽게 상승운동을 하게 되고 이는 강수로 연결된다. 그러나 중층 또는 상층에서의 하강류가 지배적일 때는 하층에서의 상승운동이 하강 기류에 의해 제한되고 구름대가 더 발달하지 못한다(그림 1-17). 이런 경우 강수입자가 충분한 상승운동을 하지 못해 입자가 매우 작은 눈으로 떨어지게 되고, 그에 따라 강수량 또는 적설이 매우 적어진다.

2017년 12월 9일 사례를 살펴보면, 지상에서는 저기압이 뚜렷하게 나타나고 925hPa(그림 1-18)에서 남서류가 10kts 이상이므로 온난이류가 활발히 이루어질 것으로 예상할 수 있다. 그러나 이 사례의 경우 당시 최대 5cm까지 적설을 예보하였으나 실제로는 충남서해안 일부 지역에 0.5cm 미만의 매우 적은 적설만 기록했다(부록/사후분석 1-1 참고).

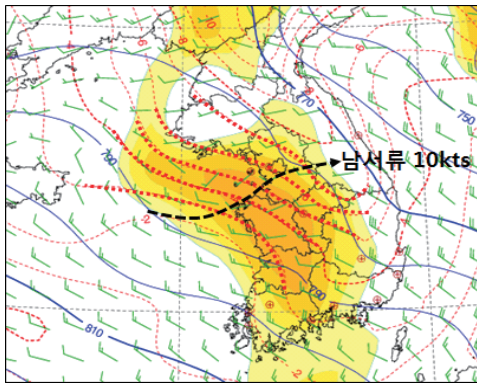


그림 1-18. 925hPa 상세바람장
(2017. 12. 9. 06:00)

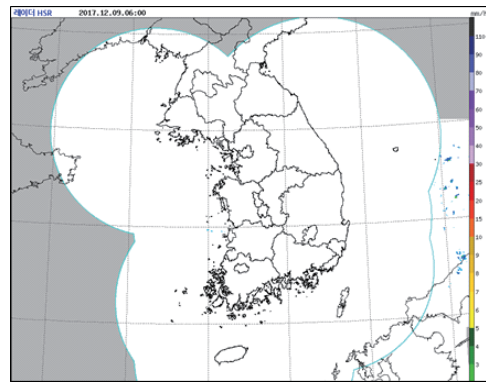


그림 1-19. 레이더 합성영상
(2017. 12. 9. 06:00)

이 당시 강수구름이 잘 발달하지 못한 이유는 대기중층의 하강류와 연관하여 설명이 가능하다.

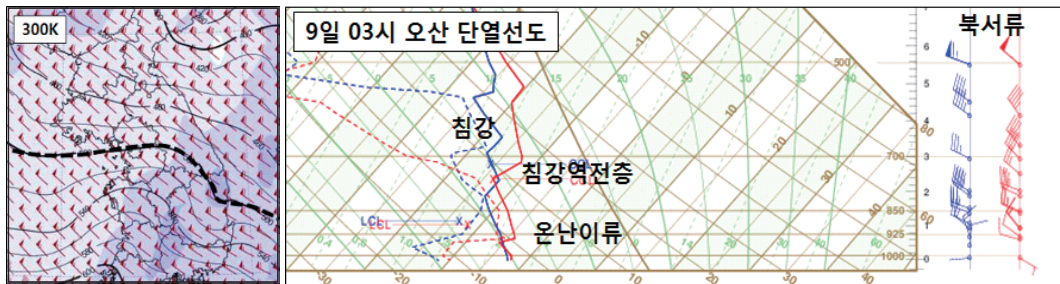


그림 1-20. 2017. 12. 9. 03:00의 (좌) 300K 등온위면, (우) 오산 단열선도 분석장

300K의 등온위면(그림 1-20)을 보면 낮은 기압에서 높은 기압으로 가로지르는 바람이 50kts 이상으로 형성되어 있다. 이것은 직관적으로 하강류가 강하게 나타남을 알 수 있다. 이러한 침강 운동은 단열선도(그림 1-20)에서도 나타나는데, 대기중층에 건조영역이 확대되면서 하층으로 침강역전이 발달하고, 온난이류의 층이 제한되고 있는 모습이 확인된다.

위처럼 중층 하강류와 관련한 과거 사례들을 분석해보면, 850hPa 이하 상승류에 500~700hPa 대기가 중립적일 땐 1~3cm 이상의 적설이 가능하지만, 500~700hPa에서 강한 하강류가 있을 경우에는 1cm 미만의 적설이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

Key Point!

1. 하층 대기조건을 만족하더라도 중상층 하강류 존재 시 강수강도가 매우 약해진다.
2. 500~700hPa 하강류가 강할 때는 1cm 미만의 적설이, 500~700hPa에 중립 또는 상승하는 기류가 존재할 때는 보다 많은 적설이 가능하다.

1. 4. 5 하층 강풍과 지형에 의한 강제상승 효과

앞에서 이야기했듯이 온난이류에 의한 강수는 해안에서 발생하지만, 해안선부근의 등온선 간격이 조밀하지 않은 경우에는 내륙에서 발달하기도 한다. 내륙까지 유입된 포화되지 않은 공기덩어리는 지형에 의한 강제상승으로 단열냉각 되면서 고도가 높은 경기동부 → 강원영서 → 강원산지 방향으로 이동하며 강수대가 점차 강화된다.

지형의 영향을 받기 위해서는 수평 풍속이 중요하게 작용한다. 수평으로 바람이 강하면 지형과의 충돌로 상승하는 효과가 커지고, 이에 단열냉각에 의하여 수증기가 응결되면서 강수량이 증가하게 된다. (그림 1-21, 1-22)

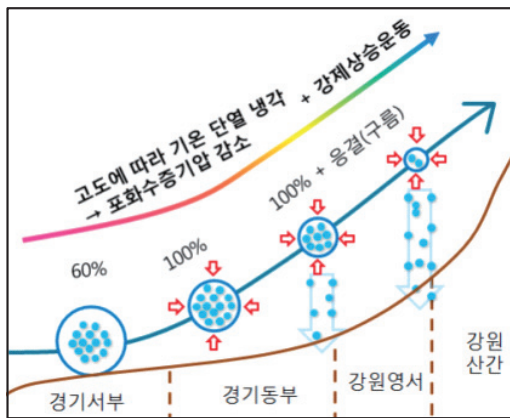


그림 1-21. 산간지역 강제상승에 의한 강수 모식도

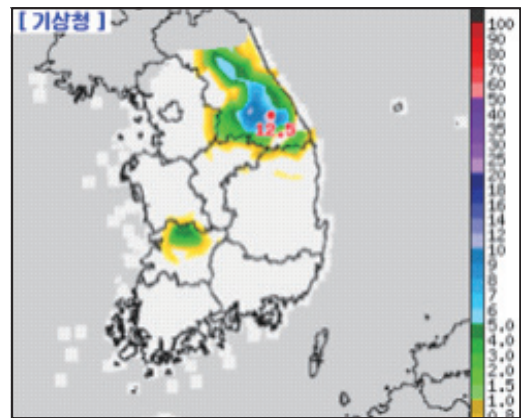


그림 1-22. 2016. 2. 8. 신적설 분포 (온난이류 사례)

이러한 효과를 충분히 받기 위해서는 백두대간에 수직인 바람이 가장 효과적이므로, 925hPa 또는 850hPa 바람이 서풍(또는 남서풍)으로 40kts이상 매우 강하게 불어야 한다.

그러나 이때 조심해서 분석해야 할 부분은 앞서도 언급한 중층의 대기조건이다. 대기중층에서 강한 역전층이 형성된다면 강제상승 운동을 방해하여 강수량이 제한적일 수 있다.

먼저 중층의 대기가 따뜻한 남서풍이 강하게 부는 경우, 또는 침강이 나타나는 경우를 고려해보겠다. 이 때 최하층의 바람은 지형의 강제상승효과로 냉각되며 습윤단열감률(겨울철은 기온이 낮고 대기가 건조해 약 $-9^{\circ}\text{C}/\text{km}$)에 가까운 형태로 기온이 급감한다. 반면에 중층의 대기에서는 온난이류가 지속적으로 이루어지거나 또는 침강에 의한 단열승온으로 인하여 중층의 대기온도가 높아지는 형태가 된다. 그러면 산 정상 온도도 냉각으로 인해 낮아지지만, 중층대기는 따뜻해지므로 마치 capping inversion(참모역전)과 침강역전이 동시에 나타나는 형태를 보인다. 그러면 역전층이 매우 강화된다.

따라서 백두대간의 높이를 약 1.5km까지로 본다면 1.5~3km 사이의 대기는 강한 역전층이 나타나 대기의 상승운동이 저지되기 때문에 낮은 하층운대만 형성되고 강수는 내리지 않게 된다.

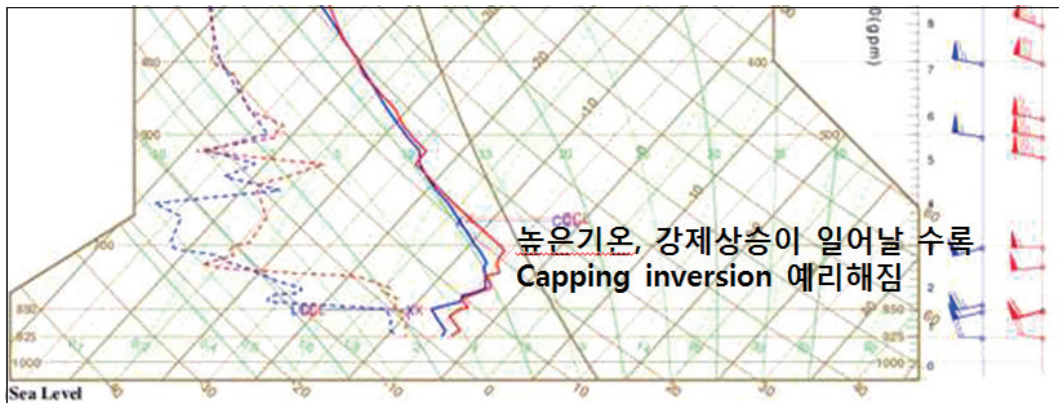


그림 1-23. 대관령 단열선도 (2018. 2. 14. 09:00)

2018년 2월 14일 사례(그림 1-23)를 보면 925hPa에서 서풍이 20kts, 850hPa에서 서남서풍이 60kts까지 매우 강하게 불었는데, 925hPa 기온은 낮은 반면에 700hPa 기온이 크게 오르면서 역전층이 강했고 이로 인해 구름대의 발달이 제한적이었다. 이때는 역전층에 의한 영향과 더불어 예상보다 수증기 공급도 적어지면서, 당시 2~7cm의 눈을 예보했으나 실제로는 눈 날림 수준에 그쳤다(부록/사후분석 1-5 참고).

Key Point!

1. 하층(925~850hPa)에 서풍 또는 남서풍이 30~40kts 이상으로 불 때 강제상승에 의한 강수가 발생하고, 최대 10cm내외 까지 많은 적설이 가능하다.
2. 대기 중층에 난기가 강하게 유입되면 산 정상부터 중층까지 강한 역전층이 형성되어 적설이 적을 수 있다.

1. 4. 6 Cold Pool의 강도

cold pool은 온난이류형 강수에서 중요한 요소이다. cold pool을 정량적으로 분석하기는 어렵지만 cold pool의 강도와 강수강도의 상관관계를 정성적으로 분석해 볼 수는 있다.

본 가이드스에서는 겨울 기간 동안 있었던 대표적인 온난이류형 강수 사례 10가지의 cold pool을 3차원 기상표출 시스템(Gloview)에서 연직단면으로 분석하였다.

경기만에서 강원도 방향으로 자른 연직단면을 보면(그림 1-24) 파란색 영역(260K미만 구역)이 서해안지역에 차 있을 때는 1~3cm 가량의 적설이 가능한 구름대가 발달하지만, 그렇지 않을 때는 구름대가 미약하거나 발달하지 않았다. 이를 정량적인 상관관계로 결론짓기에는 사례가 부족하지만 대략적인 강수강도를 가늠할 수 있다.

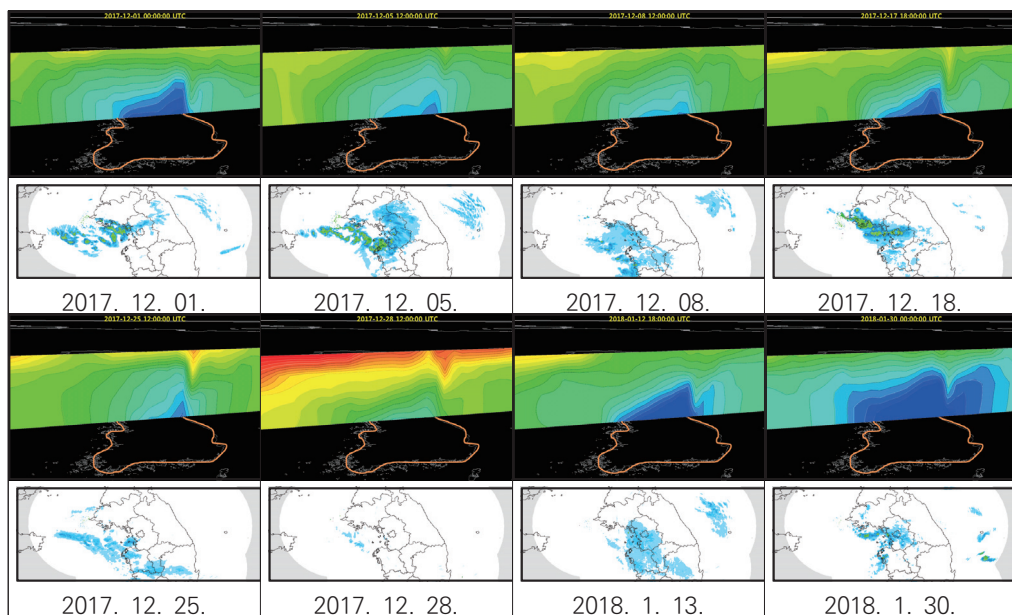


그림 1-24. 중부지방 연직단면도 온위(260~280K)

이러한 cold pool은 모델에서 양의 편차(warm bias)를 나타내면서 약하게 모의되는 경우가 많다. 따라서 모델에서 강수를 반영하지 못하거나 눈비 구분을 실패하여 예보가 빗나갈 수 있으므로 유심히 관찰하여야 한다(부록/사후분석 1-2 참고).

Key Point!

1. 260K 미만의 온위역이 서해상까지 가득 차 있을 때: 1~3cm 강도의 적설 가능
2. cold pool을 분석할 때, 겨울철 GDAPS에서 warm bias 경향을 보이는 것에 주의!

1. 5 온난이류형 강수 예보 시 주의사항

1. 5. 1 낮 동안에도 온난이류형 강수가 발생 할까?

전형적인 온난이류형 강수의 경우에는 일출 이후에 cold pool이 무너지면서 강수가 급격히 약화되는 것이 일반적이다. 따라서 10시~18시 사이에는 온난이류형 강수가 잘 나타나지 않는다.

그러나 몇 가지 조건이 갖추어지면 낮 시간대에 강수가 내리기도 한다. 먼저 아침 시간대에 cold pool이 서해상까지 팍 차 있을 정도로 매우 강한 경우는 경기만 지역으로 강한 강수대가 형성된다. 또한 낮 시간대 까지도 잔류한 cold pool이 일부 남아있게 된다.

이 강수대는 특별한 하강류가 없다면 소멸되지 않으므로 기류를 따라 수도권지역에 영향을 준다. 특히 이러한 경우 후면에 건조역이 침투하여 불안정을 가속화 한다면 5cm 이상의 적설도 가능하다(그림 1-25).

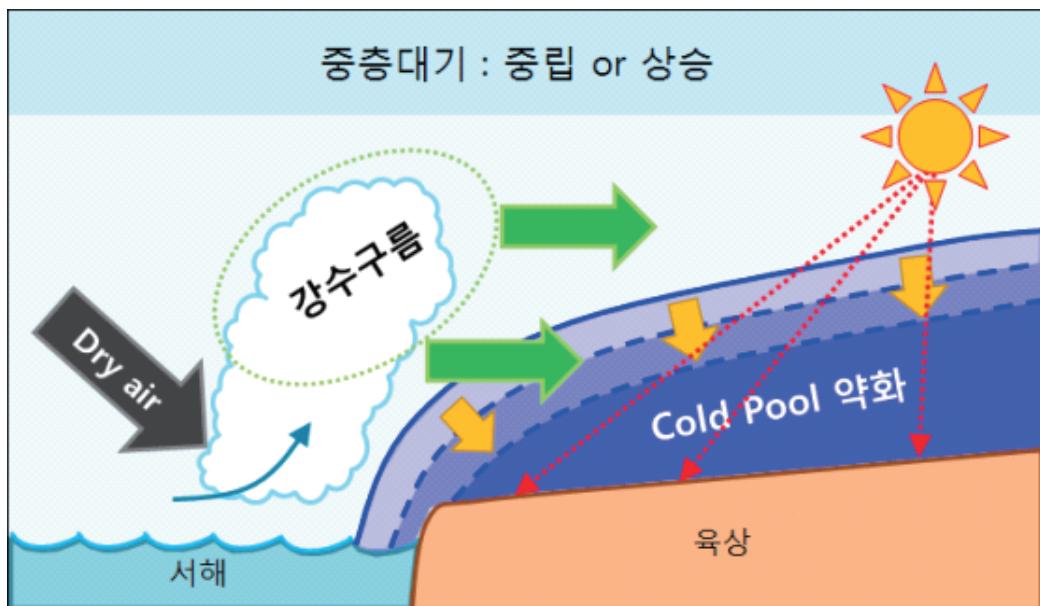


그림 1-25. 낮 동안에 발생하는 온난이류형 강수 모식도

2018년 1월 30일 사례에서 위와 같은 상황이 잘 나타났다. 당시 23일부터 서울의 아침 최저기온이 -10°C 이하로 떨어질 만큼 내륙에 매우 강한 cold pool이 형성되어 있었으며 하층 난기이류 등 다른 강수조건들도 만족하고 있었다. 이때 모델에서는 낮이

되면 cold pool이 무너지면서 강수가 내리기 힘든 구조가 될 것으로 예상하였고, 30일 오후 강수를 모의하지 않았다. 그러나 실제로는 모델보다 cold pool이 강해 해안가 온도조밀역이 강하게 나타났으며 강수대가 형성되어 내륙에도 강수가 내렸다(부록/사후분석 1-4 참고).

1. 5. 2 적설은 서울 → 경기동부 → 강원영서 → 강원산지 순서로 많아진다?

강수량 측면에서 온난이류형 강수의 집중구역은 주로 경기남부와 충청지역으로 형성된다. 그러나 기압골이 동반되거나 850hPa의 서풍이 강할 때에는 오히려 서울 → 경기동부 → 강원영서 → 강원산지 순서로 적설이 더 많을 것으로 예상하는 경우가 많다. 낮은 기온에 따른 수상당량비의 증가와 지형에 의한 강제상승 영향을 고려한 결과라고 해석 할 수 있다.

그러나 사례들을 살펴보면 실제로 그런 적설 분포를 나타낸 경우는 거의 없었다. 양평, 가평 등 경기동부에 적설이 많은 경우는 있었지만, 강원영서와 산간지역이 실제로 많은 적설을 기록하는 경우는 드물었다.

원인은 두 가지로 분석할 수 있다. 첫째로 서해안으로부터 공급되는 수증기가 대부분 서쪽부터 소모되기 때문이고, 두 번째는 온도조밀역의 경계가 경기동부까지 유입되는 반면 강원산지는 단열냉각에 의한 중층 역전층에 의해 오히려 구름생성의 억제효과가 있기 때문이다. 따라서 강원영서와 산지에서의 적설 예보를 관행적으로 많이 예보하는 것은 옳지 않다.

1. 6 온난이류형 강수 예보를 위한 흐름도

온난이류형 가이던스를 제시하기 위하여 강수 메커니즘에 작용하는 각종 기상요소와 예외 사례들에 대해 알아보았다. 이를 근거로 다음과 같이 온난이류형 강수 흐름도를 작성하였다.

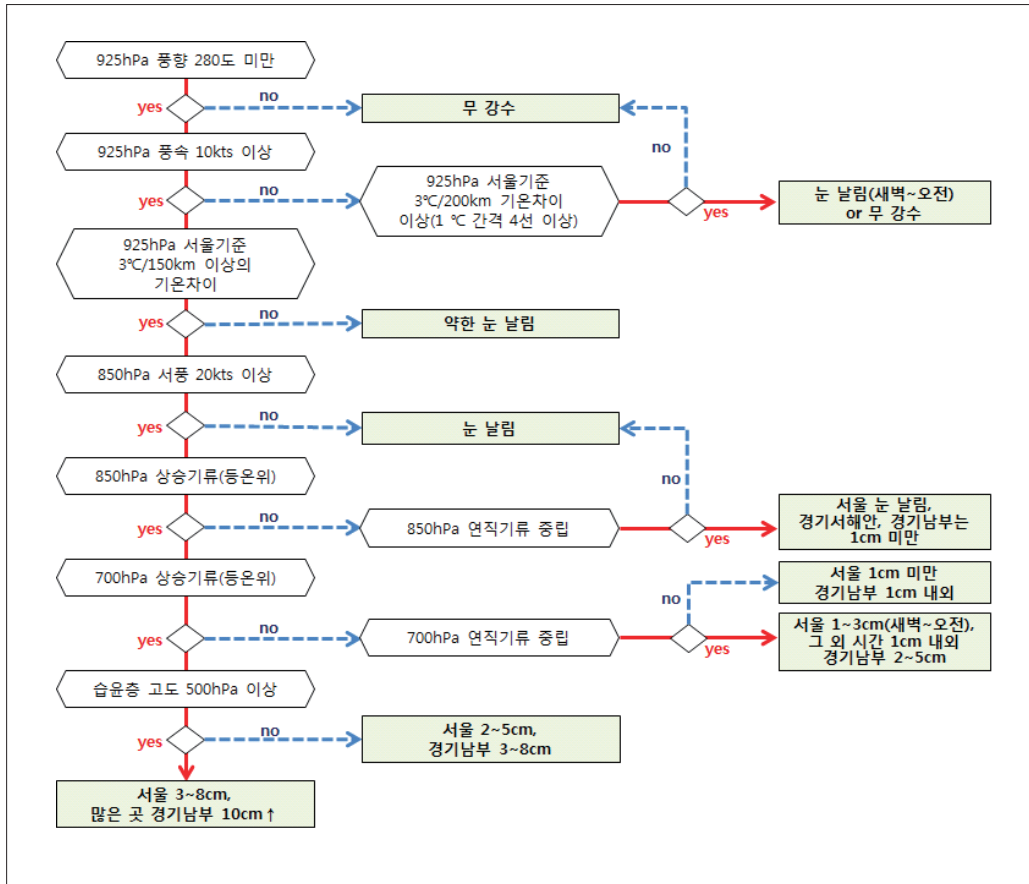


그림 1-26. 온난이류형 강수 예보를 위한 흐름도

위의 조건은 일반적인 온난이류형 강수일 때의 조건이며, 기압골을 동반하거나 시스템 정체 등 다양한 변수에 의해 강수량상은 얼마든지 달라질 수 있다.

따라서 예보를 할 때는 위 흐름도를 기준으로 삼되, 각 개별 사례에 대해 다시 세밀히 접근하여야 한다. 그 외에 다양한 변수로 틀릴 수 있는 사례에 대해서는 부록에 첨부한 사후분석 자료를 참고하면서 확인해 볼 수 있다.

참고문헌

1. 기상청, 2011: 손에 잡히는 예보기술 대설판단 가이드스 4.
2. 기상청, 2011: 예보관핸드북시리즈(1), 한눈에 보는 대설�개념모델
3. 기상청, 2011: 손에 잡히는 예보기술 5호, 등온위면 분석
4. 정재인, 박록진, 2013: 해수면온도 변화가 서해상 강설에 미치는 영향 연구
5. 우재훈, 2015: 2015년 2월 9일 중부지방 빙나간 강설 사례 분석
6. James R. Holton, Gregory J. Hakim: An introduction to dynamic meteorology

[부록] 온난이류형 강수 사후분석 목록

1. 사후분석 1-1 2017년 12월 9일 사례: '최하층 온난이류에 의한 중부지방 강수?'
2. 사후분석 1-2 2017년 12월 10일 사례: '발해만 저기압에 의한 수도권 예상보다 많은 적설'
3. 사후분석 1-3 2017년 12월 29일 사례: '발달하지 못하고, 내륙 깊이 유입되지 못한 온난이류형 강수'
4. 사후분석 1-4 2018년 1월 30일 사례: '낮 시간 동안 온난이류에 의한 수도권 강수?'
5. 사후분석 1-5 2018년 2월 14일 사례: '매우 강했던 남서풍과 온난이류? 하지만 강수는 없었다.'

계절 메모 가이드스

2. 발해만 기압골에 의한 온난이류형 강수



2. 발해만 기압골에 의한 온난이류형 강수

Why?

단순 온난이류형 강수와 별개로 발해만 기압골이 지원되면 강수대가 강화되거나 강수시간이 길어지는 등 여러 가지 달라지는 점들이 발생하는데, 이를 위한 예보 판단 기준을 제시하고자 한다.

2. 1 발해만 기압골을 동반한 경우의 온난이류형 강수

발해만 기압골의 경우 서해안에 발생하는 온난이류형 강수와 연관성이 크다. 발해만 저기압은 온난이류형 강수의 강도를 강화시키기도 하고, 온난이류 후면에 한랭전선역을 형성하여 추가적인 강수대를 만들기도 한다. 따라서 발해만 기압골의 특성을 이해하고, 발해만 기압골이 형성될 때 생기는 강수대 특성과 예보를 위한 흐름도를 제시하고자 한다.

2. 1. 1 발해만 기압골이 발생하는 이유

해수온도에서 언급하였듯이 발해만 기압골은 따뜻하고 마찰이 적은 발해만 인근으로 차고 건조한 상층골이 남하할 때 잘 발생하며 11월 하순에서 12월 중순까지 주로 발생한다.

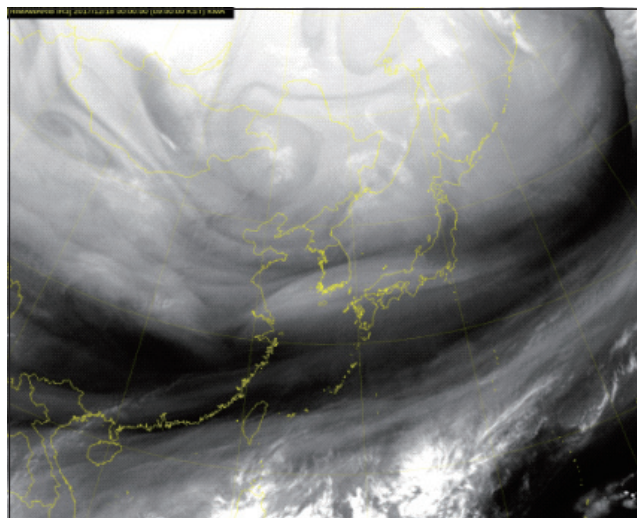


그림 2-1. 발해만 저기압이 발달할 때의 수증기 영상
(2017.12.18. 09:00 히마와리 수증기 영상 (6.2 μ m))

수증기영상(그림 2-1)에서 보면 몽골 동쪽에 중심을 둔 소용돌이와 그 중심을 따라 회전하는 건조역이 여러 겹으로 형성되어 있는 것을 볼 수 있으며, 그만큼 강한 회전력을 가지고 돌고 있음을 알 수 있다. 또한 우리나라 남부지역으로는 능 형태의 라인이 잡혀 있고, 따라서 산둥반도 인근으로 풍속이 점차 강화되는 streak이 나타날 수 있음을 알 수 있다. 한편 하층에서는 해수온도가 주변보다 따뜻하고 마찰도 적으므로, 상층부에서 하층으로 저기압성 흐름이 전이되면서 발해만 저기압이 형성될 수 있음을 알 수 있다.

이렇게 형성된 발해만 저기압의 경우 하층에서는 뚜렷하게 보이지 않지만, 850hPa 내지 925hPa의 고도에서 온도경도와 풍속의 차이가 뚜렷하게 나타나는 것을 통해 확인할 수 있다.

2. 2 온난이류형 강수에 미치는 발해만 기압골의 영향

2. 2. 1 발해만 기압골과 온난이류형 강수

단순 온난이류형 강수유형에 발해만 기압골이 동반되는 경우에는 남서류 강화에 따른 수증기공급 추가, 풍속 강화, 불안정의 증가를 일으켜 강수강도가 강화되고 강수 범위도 넓어지게 된다.

발해만 기압골에 의해 925hPa 또는 850hPa에서 남서류가 강화될 때에는 중부지방의 눈이 대설로 이어지는 데에 결정적인 요인이 된다. 남서류로 인하여 이류의 강도가 강해지는 점, 강수대를 남하시키기보다는 중부지방에 체류시키면서 강수 지속시간이 길어지는 점 등이 그 이유이다.

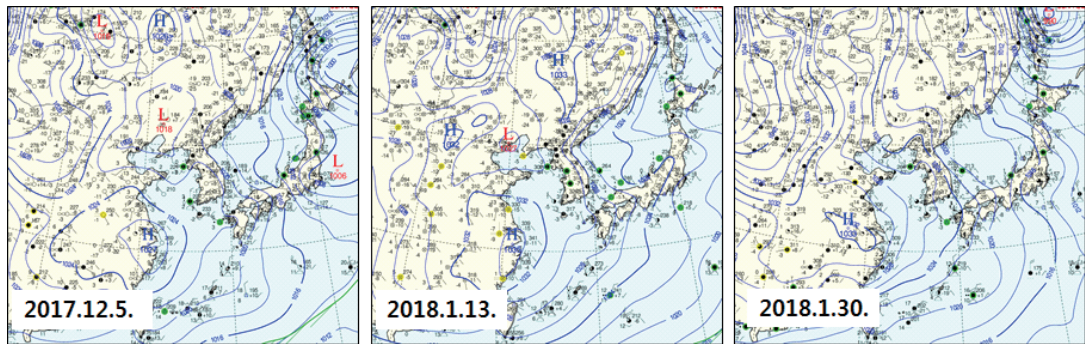


그림 2-2. 수도권 지역 5cm내외의 적설을 기록한 사례 지상 일기도

최근 수도권의 온난이류형 강수 유형에서 5cm내외의 적설을 기록하였던 사례 4개를 선정해보았다. (①2017.12.5., ②2017.12.18., ③2018.1.13., ④2018.1.30., 그림 2-2, 2-3). 네 사례의 경우 두 가지 공통점을 찾을 수 있는데, 첫째는 지상일기도에 서 남쪽에 고기압이 견고하게 버티고 있다는 점, 둘째는 발해만 저기압이 지상에서까지 보인다는 점이다. 특히 ②, ④번 사례의 경우 서울에 5cm 내외의 눈이 내렸던 사례인데 남서류가 15kts 내외로 불었다. ③번 사례의 경우는 남서류는 아니었지만 지속시간이 길어지면서 많은 눈이 내렸었다.

특히 2017년 12월 18일의 경우(그림 2-3) 온난이류에 의한 강수 이후 상층 한기 남하에 따른 발해만 저기압의 영향이 더해지면서 강수대가 전선대의 형태로 변하였고, 예상보다 많은 적설이 내렸다. 당시 서울경기 지역에 1~5cm의 적설을 예보하였으나 실제로는 4~10cm가 내렸다(부록/사후분석 2-2 참고). 이처럼 발해만 기압골이 동반될 경우 일반적인 온난이류형 강수 유형보다는 1단계 많은 강수량을 예보하여야 하고, 특별히 하강기류가 강하지 않으면 5mm내외의 강수를 보이는 경우가 일반적이다.

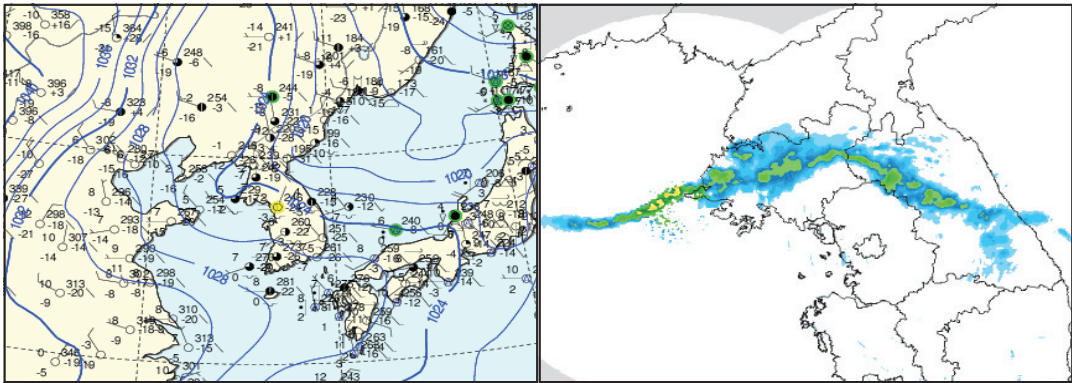


그림 2-3. 발해만 기압골이 동반된 온난이류형 강수 (2017. 12. 18. 15:00)

또한 발해만 저기압의 영향을 받으면서 남쪽에 고기압이 버티고 있고 상층 한기에 의해 불안정이 커지는 경우에는 강수량이 20mm 이상 폭발적으로 증가하기도 한다(부록/사후분석 2-1 참고).

2. 2. 2 발해만 기압골, 찬 공기 전면에서 강수대를 활성화

2월 이후에는 해수온도가 하강하고 내륙기온이 상승추세에 들면서 온도경도가 줄어들게 되고, 그에 따라 온난이류형 강수는 점차 약화된다. 혹은 Warm영역에서의 기류가 약하여 온난이류형 강수가 발생하지 않는 경우도 종종 생긴다. 그럴 때 발해만 기압골을 동반한다면 한랭이류역의 전면에서 강수가 강화될 수 있다.

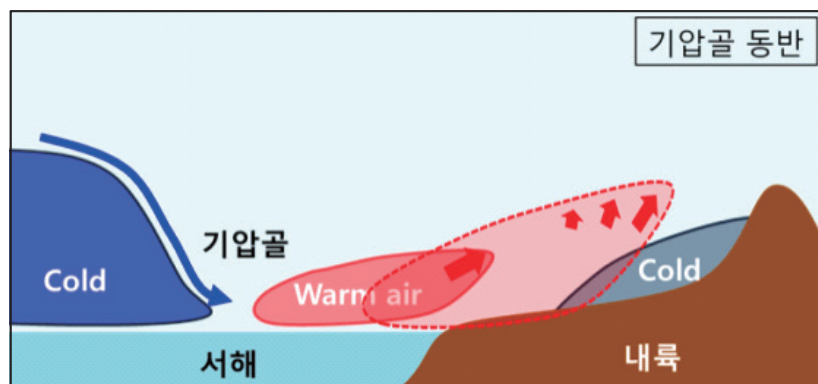


그림 2-4. 한랭역 지원에 의한 온난이류형 강수 모식도

위 모식도(그림 2-4)는 cold pool이 약하거나 Warm air의 이류가 약할 때, 그 후면에서 찬 공기가 하강이류하여 전면의 Warm air를 밀면서 더욱 상승시켜 강수를 유발하는 것을 보여준다. 이때 선결 조건으로는 Warm air를 유도할 850hPa 25kts 이상의 서풍기류와 서쪽지역의 하층 습윤역이 필요하다. 이러한 조건을 바탕으로 위의 메커니즘을 만들어 줄 요소들을 다음 절에서 점검해보고자 한다.

2. 2. 3 건조역의 지원

겨울철 반원 형태인 건조역의 남하는 전선대 강수 발달에 주요 원인이 된다. 전선의 전면에서 남서 또는 서풍의 습윤한 공기가 유입되고 건조역이 후면에서 침투하게 되면 전면에서 불안정해지면서 강수가 형성된다.

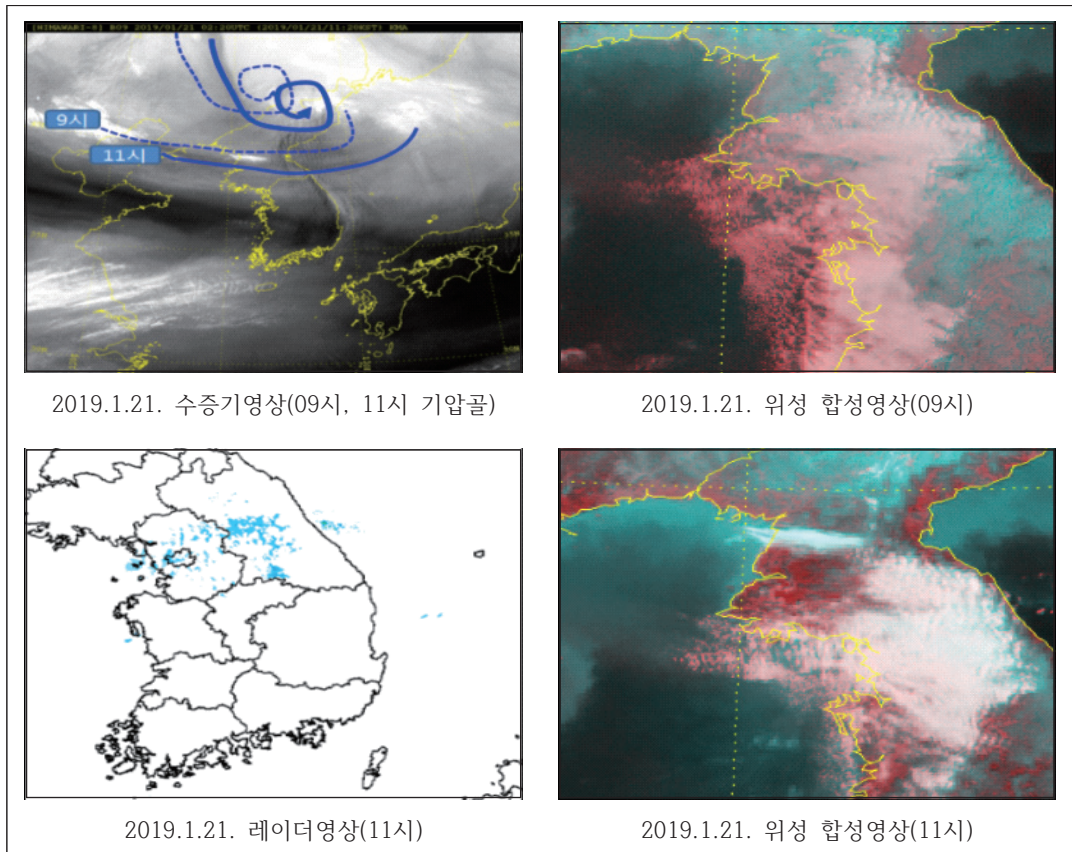


그림 2-5. 2019. 1. 21. 수증기영상, 위성 합성영상, 레이더영상

2019년 1월 21일 사례(그림 2-5)를 보면 이러한 특징이 잘 나타나는데, 건조역의 지원이 있기 전에는 온난이류가 약하여 하층운만 약하게 존재하였으나, 건조역이 접근하면서 전면대에 불안정이 강화되고, 이에 따라 구름대가 두꺼워지면서 강수가 일부지역에서 기록되었다.

또 다른 경우로, 건조역이 연속해서 통과하는 경우를 생각해보자(그림 2-6).

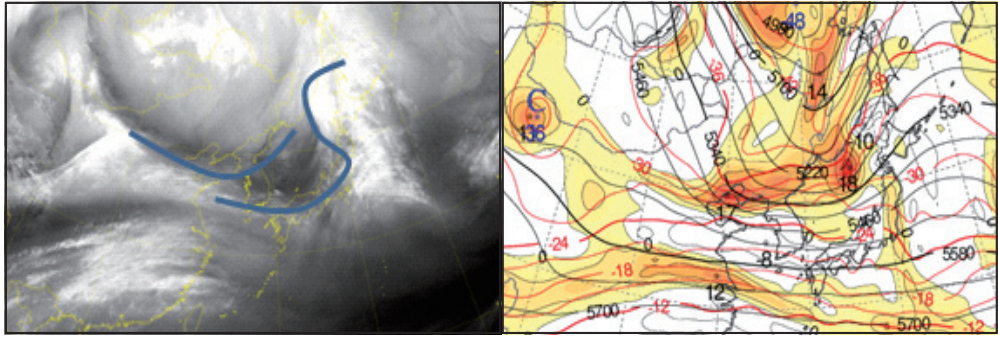


그림 2-6. 2019. 1. 15. 09시 수증기영상(좌)과 500hPa 일기도(우), 파란선은 dry line

이 사례의 경우는 상층에서 골이 연속해서 통과하고, 그에 따라 건조역이 연속해서 내려오는 것을 알 수 있다. 두 번째로 내려오는 건조역에는 발해만 기압골이 동반되어 있는데, 건조역과 건조역 사이에 약간의 습윤역이 들어오고 발해만 기압골이 지원되면서 강수가 내륙에서 형성되었다. 이때 강수량은 5mm 미만으로 충청과 강원영서에서 기록되었다.

2. 2. 4 850hPa의 한랭이류 영역 전면에 강수대 강화

온난이류에 의한 Warm air의 상승이 강화되기 위해서, 후면에서 찬 공기의 침강이 지원되어야 한다는 전제를 앞서 이야기 하였다. 이를 살펴볼 수 있는 척도로 850hPa 한랭역의 온도경도를 생각해 볼 수 있다. 건조역의 남하로 한랭건조한 공기의 깊이를 가늠해 볼 수 있다면, 850hPa의 경압성은 찬 공기영역의 기울기를 결정짓는다고 볼 수 있다. 앞 절에서 보인 그림 2-6 사례의 850hPa와 925hPa의 일기도를 살펴보자.

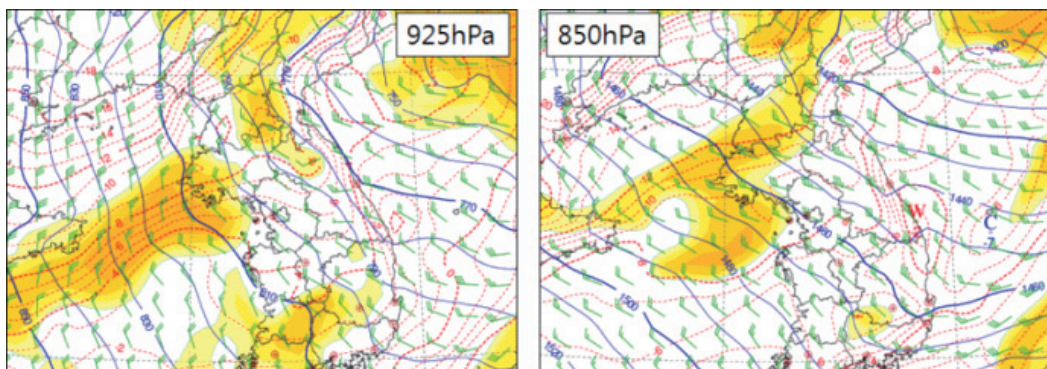


그림 2-7. 2019. 1. 15. 09시 925hpa와 850hpa 일기도

850hPa의 한랭 온도조밀역의 전면에 남서류가 특별히 나타나지 않는 특징을 보임에도 불구하고 강수가 존재하였던 이유는 후면으로의 경압성이 컸기 때문이다. 즉 이 사례

는 난기가 없었음에도 불구하고 후면에 강한 경압성(큰 기울기)과 건조역의 지원이 복합적으로 지원되었다고 볼 수 있다. 이 사례는 전면에 특별한 난기가 없기 때문에 한랭 온도조밀역의 임계값을 결정하는데 도움이 된다. 산둥반도에서 백령도 사이에 형성된 경압구역을 보면 약 150km에 4°C의 기온차이를 보인다. 전면에 난기가 뚜렷하지 않더라도 4°C의 온도경도 구역이 들어오면 강수를 유발할 수 있음을 의미하고, 만약 전면에 남서류가 강하게 유입된다면, 그에 비례하여 강수가 강해질 수 있음을 의미한다.

2018년 12월 13일 09시 사례(그림 2-8)는 난기와 한기의 균형이 잘 맞는 사례이다.

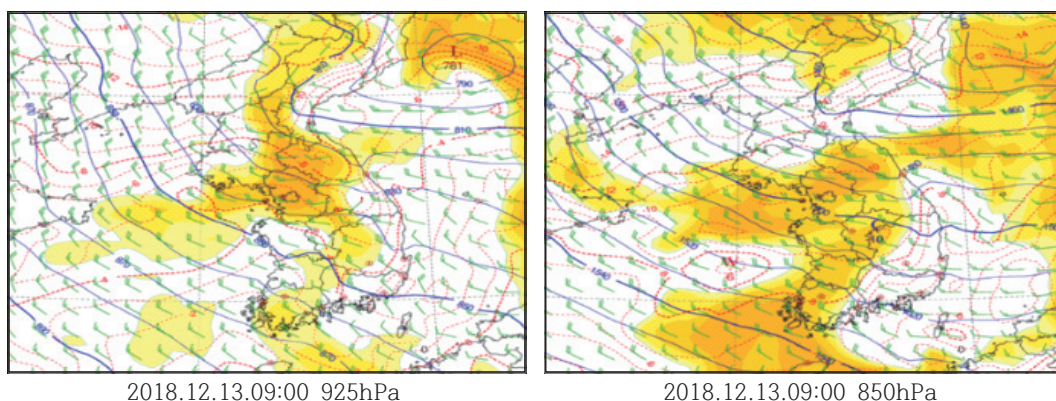


그림 2-8. 2018년 12월 13일 09시 925hpa와 850hpa 일기도

이 사례의 경우 925hPa에서는 저기압의 형태를 보여주며 서 또는 남서풍이 25kts로 불었고, 850hPa 후면에서는 약 3°C/150km의 경도가 있었다. 즉, 발해만 기압골의 850hPa에서는 서풍이 35kts로 불면서 온난이류에서의 강수까지 나타날 수 있는 조건이었다.

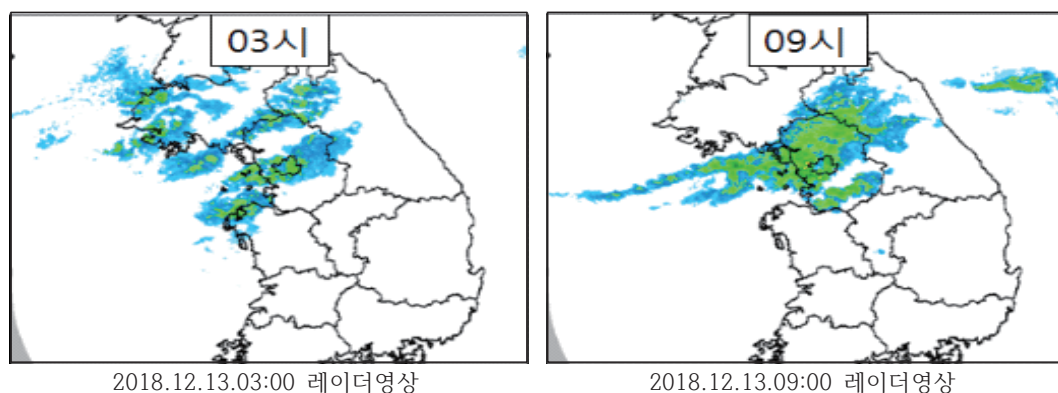


그림 2-9. 2018년 12월 13일 03시, 09시 레이더 영상

이 때의 레이더 영상(그림 2-9)을 보면 난역에서의 강수가 먼저 새벽시간대에 발생하고, 발해만 기압골이 지원되면서 한랭온도조밀역이 접근해 올 때 그 전면에서 전선대

의 모양을 나타내면서 강수대가 강화되었다.

정리하면 남서류가 매우 약하거나 없더라도 후면에 강한 한랭역이 동반되면 약한 강수를 기대할 수 있고, 하층 남서기류가 동반되고 발해만 기압골에 의해 경압구역이 뒤에서 동반된다면 충분한 강수량이 기록될 수 있음을 알 수 있다.

2. 3 발해만 기압골에서의 예보 흐름도

온난이류형 가이던스는 앞장에서 제시하였다. 그러나 온난이류의 강수조건에는 해당되지 않지만, 발해만에서 약한 기압골과 동반되는 강수가 있다. 이 강수메커니즘은 한랭전선의 전면에서 나타나는 특징이 있는데, 다음과 같이 예보에 활용할 수 있다.

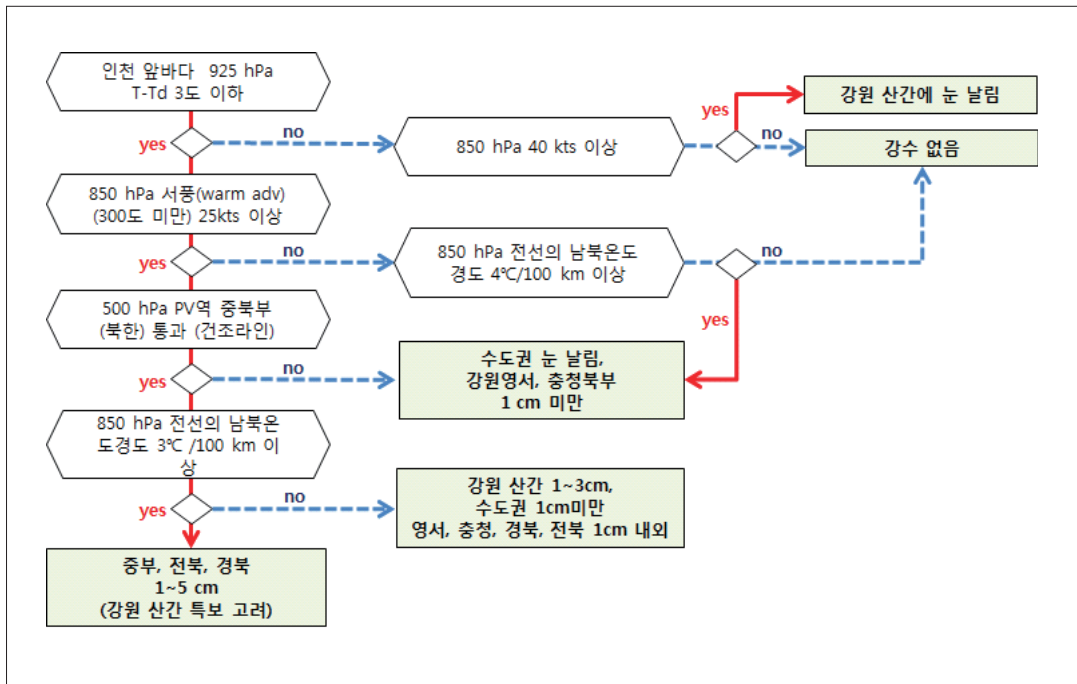


그림 2-10. 발해만 기압골에서의 예보 흐름도

┃ [부록] 발해만저기압형 강수 사후분석 목록

1. 사후분석 2-1 2017년 11월 25일 사례: ‘초겨울 이례적인 스콜라인 형성’
2. 사후분석 2-2 2017년 12월 18일 사례: ‘온난이류형 강수만 고려하면 안 된다고?’

거주 예비 가이드스

3. 호수 효과에 의한 서해안 강설기구 이해와 예보 활용



3. 호수 효과에 의한 서해안 강설 메커니즘의 이해와 예보 활용

Why?

호수 효과에 의한 서해안 강설 발생에 필요한 주요 요소인 해기차바람·취주거리가 왜, 어떻게 강설에 영향을 주는지에 대하여 알아보고, 대설 발생의 원인인 수렴이 서해안에서 발생하는 원리와, 그 영향에 대해서 이해하고자 한다.

3. 1 호수 효과에 의한 서해안 강설 정의

겨울철 서해안에 나타나는 강설은 대부분 호수 효과(lake effect)에 의한 메커니즘으로 나타나며, 우리나라에서 대설 발생 빈도가 가장 높은 유형이다(정성훈 등, 2006). 호수 효과에 의한 서해안의 강설은 11~1월 사이 자주 발생하는데, 찬 공기가 따뜻한 해수면 위로 이동하게 되는 시기이기 때문이다. 대륙고기압에 동반한 차고 건조한 공기가 상대적으로 따뜻한 서해상의 수면 위로 이동하면서 하층 대기가 불안정해지고(그림 3-1), 해상에서 대류운이 발달해 서해안으로 유입되면서 강설이 나타나게 된다.

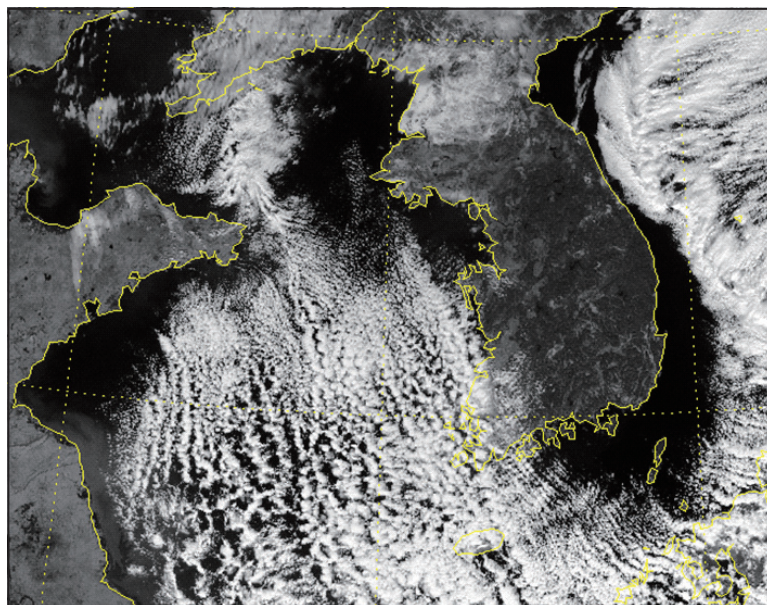


그림 3-1. 2017년 12월 8일 12시 천리안위성 가시영상
서해상으로 호수효과에 의한 대류운열이 발달한 모습

그림 3-1에서 따뜻한 서해상으로 북쪽의 찬 공기가 남하하면서 호수 효과에 의한 대류 운열이 서해상에 광범위하게 발달한 모습을 볼 수 있다. 이날 전라서해안으로 5cm 이상의 적설을 기록했다.

호수 효과에 의한 서해안 강설은 저기압에 동반한 전선성 강수와 같은 종관규모의 현상이 아닌 중규모 이하의 작은 대류 현상의 집합체로 나타난다. 따라서 수치모델에서는 해상도와 물리과정의 한계로 예측 성능이 떨어질 수밖에 없어, 모델에 의존하여 예보를 하는 것은 매우 위험하다. 결국 중규모 이하의 현상들은 강수 발생의 정확한 메커니즘 이해가 우선시 돼야 하므로 이러한 이해를 바탕으로 예보에 활용할 수 있는 방법을 찾아 보았다.

3. 2 호수 효과에 의한 강설 메커니즘

겨울철 대륙의 차고 건조한 공기가 상대적으로 따뜻한 해수면을 지나가게 되면 열과 수증기를 공급받게 되는데, 해수면 위를 긴 시간 이동할수록 해수면 부근의 대기는 더욱 온난 습윤해지고 하층 대기는 더욱 불안정해진다. 하층에서 대류와 함께 혼합이 일어나고 점차 혼합층이 깊어지면서 대류운이 발생하게 되는데, 긴 거리를 이류하는 동안 계속 되는 열과 수증기의 공급은 대류를 촉진시켜 구름을 높게 발달시킨다.

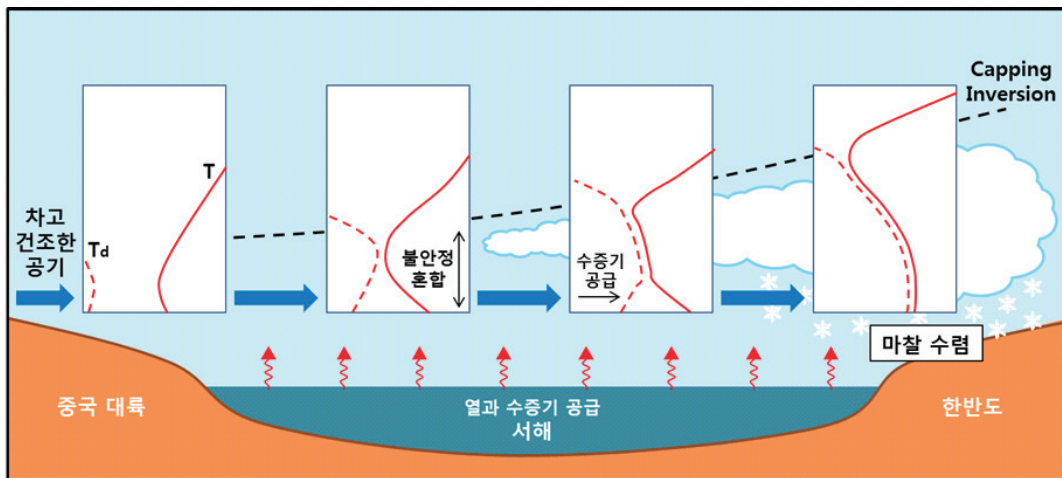


그림 3-2. 호수 효과(lake effect)에 의한 서해안 강설 발생 과정 모식도

차고 건조한 기단의 공기가 따뜻한 서해상을 지나면서 열과 수증기를 공급받아 하층대기가 불안정해져 대류운이 발달하는 과정을 보여줌

기류가 해수면을 지나 육지로 유입되는 지역에서는 마찰에 의한 수렴으로 상승기류를 유발시키고 구름은 더욱 강하게 발달해 많은 눈을 내리게 한다. 한편 대류와 혼합으로

인해 발달한 구름은 상부로 갈수록 단열냉각이 되므로 상부의 기온이 낮아져 그 위로는 ‘capping inversion(참모역전)’이라는 모자 쓴 형태의 기온역전 현상이 나타나게 되며, 이는 대류에 의한 구름의 발달을 하층으로 제한하게 된다.

따라서 서해의 수온이 높고 수면 위로 유입되는 공기가 차가워 그 차이가 클수록 하층 대기로의 열 공급은 더욱 커질 것이며, 서해상을 길게 이동할수록 많은 수증기 공급이 일어날 것이다. 또한 강한 바람은 하층 대기를 혼합시켜 열과 수증기 공급을 더욱 활발하게 해 불안정한 대기를 형성한다. 결국 이러한 일련의 과정들이 복합적으로 어우러져 대류운을 발달시켜 강설로 이어지게 되는 것이다.

3. 3 강설 판단 요소 I -해기차

3. 3. 1 강수 유무 판단

해수면온도와 대기온도의 차이인 해기차는 호수 효과에 의한 서해안형 강설을 판단하는 가장 중요한 요소이다. 만약 서해가 육지라면 해기차는 존재하지 않게 되고 호수 효과에 의한 강설은 나타나지 않을 것이다(이재근 등, 2018). 호수 효과에 의한 강설은 대류에 의한 상승운동으로 인하여 발생하는데, 상대적으로 따뜻한 해수면으로부터의 가열과 수증기 공급은 하층 대기의 불안정한 연직 기온감률로 나타나 대류를 촉진하게 된다. 따라서 해기차가 클수록 열이 빠르게 공급되고 그에 따라 하층 대기가 쉽게 불안정해져 강설 발생에 유리하게 된다.

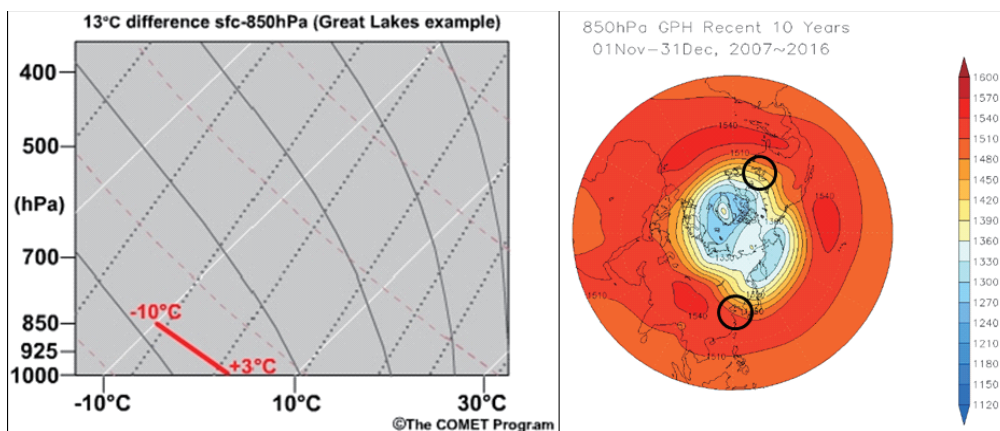


그림 3-3. (좌) 미국 오대호 지역에서 호수 효과 강설에 필요한 850hPa 해기차와 열역학선도 예시
건조단열감률 이상의 기온기가 필요함을 알 수 있음

(우) 2007~2016년 12월 북반구 850hPa 지위고도 평균장

북아메리카 오대호 지역보다 우리나라의 평균 지위고도가 더 높게 나타남

호수 효과 발생 지역으로 잘 알려져 있는 북아메리카 오대호(Great Lakes) 지역에서는 850hPa 기온과 수온의 차이가 13°C 이상이 될 때를 강설 발생 조건으로 판단한다(Niziol, 1987). 이는 그림 3-3의 왼쪽 열역학선도에서 알 수 있듯이 오대호의 수온과 850hPa 고도의 건조단열감률을 고려한 값으로 지리적 위치가 다른 우리나라에서는 기준 값을 조정할 필요가 있다. 그림 3-3의 오른쪽 그림은 2007~2016년 12월 기간의 북반구 850hPa 지위고도 평균장으로 검정색 동그라미로 표시한 북아메리카 오대호 부근의 지위고도와 서해의 지위고도 값은 확실히 다른 것을 알 수 있다. 서해상에서는 오대호보다 약 150gpm 정도 높은 지위고도 값을 보이므로 건조단열감률을 고려한 해기차는 분명히 오대호와와는 다른 결과로 나타날 것이다.

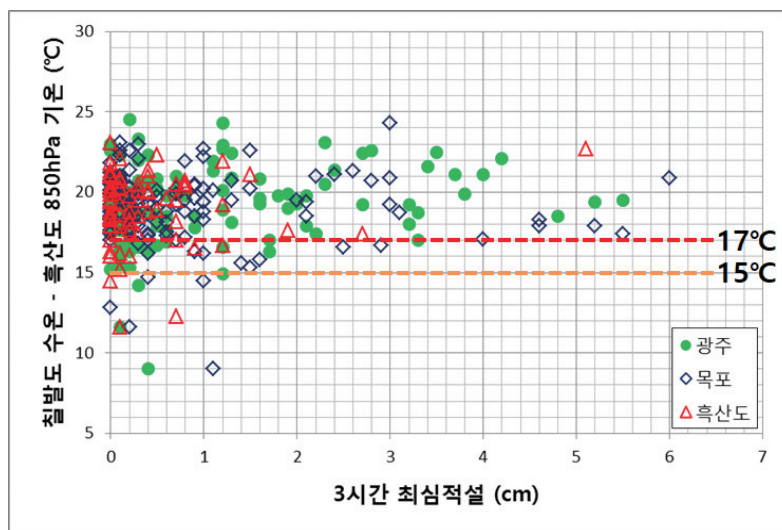


그림 3-4. 2003~2017년 겨울철(11월~2월) 호수 효과에 의한 서해안 강설 사례 중 칠발도-흑산도 850hPa 해기차와 광주, 목포, 흑산도의 3시간 최심적설 분포
15°C 이상에서 대부분 적설이 나타나며, 17°C 이상에서는 3cm/3hr 강도의 적설이 나타남

그림 3-4는 2003~2017년까지 15년 동안의 겨울철(11월~2월) 강설 사례 중 호수 효과에 의한 서해안 강설사례에서 칠발도 수온-흑산도 850hPa 기온의 해기차와 전라서해안의 주요 세 지점인 광주, 목포, 흑산도의 3시간 최심적설을 비교한 자료이다. 통계에 이용한 사례들은 흑산도의 00UTC, 12UTC 고층관측자료를 기준으로 850hPa과 925hPa의 풍향이 300° 이상인 사례를 서고동저 기압계의 풍향 조건으로 간주하고, 이 조건 하에서 흑산도, 목포, 광주 지점에서 3시간 최심적설을 기록한 총 327건의 사례를 호수 효과에 의한 서해안 강설 사례로 판단하였다.

12건을 제외한 나머지 315건의 사례는 모두 해기차가 15°C 이상일 때 적설이 발생한 것을 알 수 있으며, 결국 서해상에서의 해기차 기준 값은 오대호 지역의 기준 값인 13°C 보다 높은 결과로 나타났다. 겨울철 서해 부근의 850hPa 지위고도가 오대호 지역보다

높은 특징이 잘 반영된 결과라고 볼 수 있다.

한편, 기존 연구 결과들에 의하면 일반적으로 850hPa의 해기차가 클수록 강설 강도가 강해지는 것으로 알려져 있으나 그림 3-4의 통계자료를 보면 서해안에서는 해기차와 적설이 서로 비례하는 관계로 나타난다고 보기 어렵다. 그림 3-4에서 해기차가 15~17도에서는 해기차에 따라 적설이 늘어나는 선형적인 관계를 일부 보이고 있으나 그 이상에서는 선형적인 관계를 나타내지 않는다. 따라서 850hPa 해기차는 강수유무를 판단하는 데에는 결정적인 지표일 수 있으나 강수강도 판단 시에는 다른 요소들과 함께 고려해야한다.

3. 3. 2 강수 강도 판단

일반적으로 대류혼합층의 두께가 1km 이상일 경우에 호수 효과에 의한 강설을 발생시킬 수 있는 것으로 알려져 있으므로(Niziol, 1987), 앞서 살펴보았던 850hPa 고도의 해기차로 강수 발생 여부의 가능성을 판단하는 것은 적절한 방법이다. 하지만 강수강도가 강할 때에는 대류혼합층의 두께가 3km 이상 발달하는 경우도 있으므로 850hPa 고도의 해기차 만으로는 강수강도를 판단하기가 어렵다.

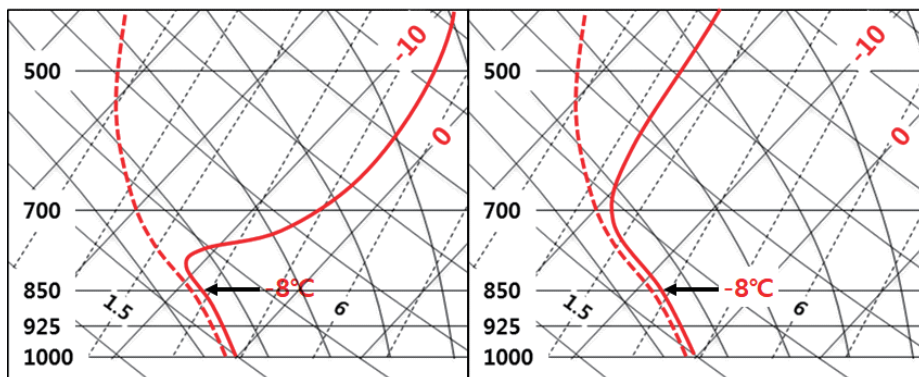


그림 3-5. 850hPa 기온과 해기차는 동일하나 포화의 깊이가 다른 두 가지 상황의 예
850hPa 해기차가 같아도 강수강도가 달라질 수 있는 상황임을 알 수 있음

그림 3-5에서 단열선도로 표현한 두 가지 상황을 비교해보자. 분명 둘 다 850hPa의 기온은 약 -8°C 로 동일하므로 해기차도 동일할 것이다. 하지만 포화의 깊이가 다르므로 강설이 있는 상황이라면 그 강도는 깊이가 더 깊은 오른쪽이 더 강할 것이다. 왼쪽의 경우 850~700hPa 사이 고도에서 역전층이 강하게 나타나 하층에서 발달하는 대류를 강하게 억제하게 된다. 반대로 역전층이 약한 오른쪽의 경우는 대류를 억제하는 방해 요소가 없어 700hPa 고도까지 대류가 깊게 발달 할 수 있는 조건이 된다. 결국 여기서 역전층의 여부와 강도에 따라 700hPa의 기온에 차이가 생기는 것을 알 수 있다.

그림 3-6은 앞서 850hPa 해기차 분석에 이용했던 2003~2017년 겨울철(11~2월) 327건의 호수 효과에 의한 서해안형 강설 사례들을 850hPa보다 높은 표준고도인 700hPa 고도와 해기차로 비교한 자료이다. 850hPa 해기차와 적설의 분포에서는 나타나지 않던 상관관계가 700hPa 해기차로 비교한 자료에서는 나타나고 있는데, 적설이 증가함에 따라 해기차의 하한 값도 선형적으로 증가하는 경향을 보여주고 있다. 예를 들어 해기차가 20°C 이하일 경우 3시간 최심적설이 2cm 이상 기록되기 어려워 대설 가능성은 낮아진다. 다시 말해 700hPa 해기차가 작을수록 많은 양의 적설이 나타나기 어려움을 알 수 있다(부록/사후분석 3-1 참고).

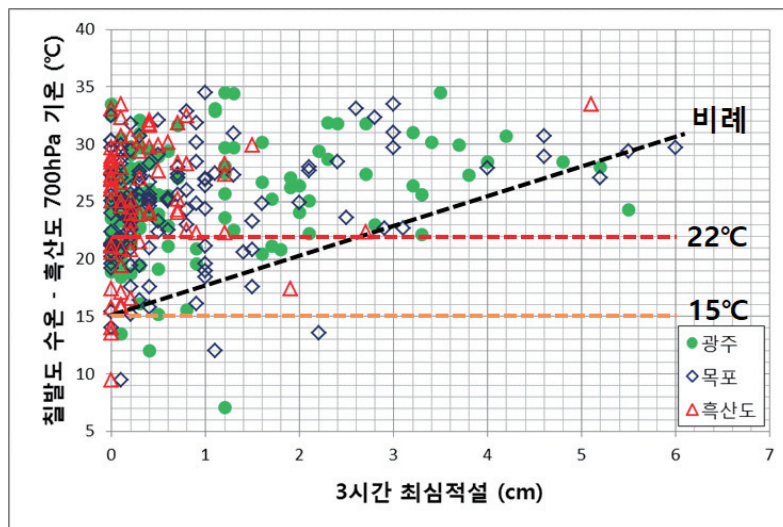


그림 3-6. 2003~2017년 겨울철(11월~2월) 호수 효과에 의한 서해안 강설 사례 중 칠발도-흑산도 700hPa 해기차와 광주, 목포, 흑산도의 3시간 최심적설 분포
15°C 이상에서 대부분 적설이 나타나며, 22°C 이상에서 3cm/3hy 강도의 적설이 나타남
해기차가 작아질수록 강한 강도의 적설이 나타나기 어려워짐

Key Point!

1. 서해안형 강설 발생에 필요한 850hPa 해기차는 15°C 이상이다.
2. 850hPa 해기차가 17°C 이상일 때 대설 발생 가능성 있다.
3. 강수강도는 850hPa 해기차보다 700hPa 해기차와 상관성 보인다.
4. 700hPa 해기차가 22°C 이상에서 대설 발생 가능성 있다.

3. 3. 3 기온이 낮으면 강설에 유리한가?

대기온도가 낮을수록 서해안 지역의 강설에 유리할까 불리할까? 기온이 낮을수록 대기 중에 포함될 수 있는 수증기의 양이 적기 때문에 강수량도 적어질 수밖에 없다. 일반적으로 여름철보다 겨울철의 강수량이 적은 이유이다.

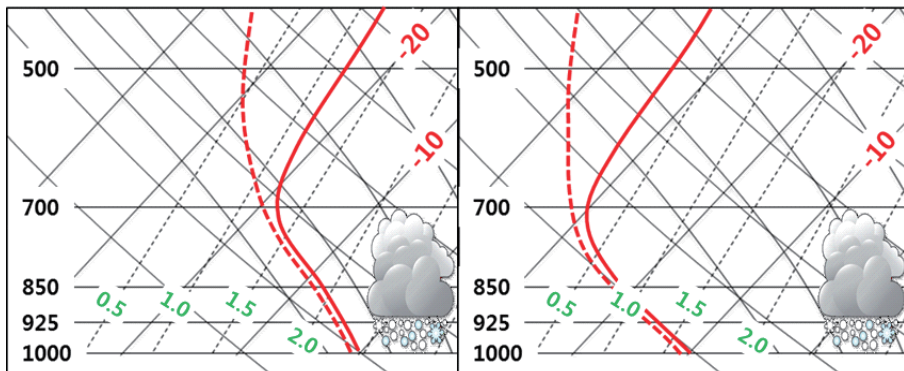


그림 3-7. 같은 두께로 발달한 구름이지만 기온의 연직 분포가 다른 두 경우
혼합비가 높은 왼쪽이 더 많은 수증기를 포함할 수 있어 많은 양의 강수에 유리함

마찬가지로 그림 3-7에서와 같이 동일하게 지상부터 700hPa 고도까지 포화된 경우를 가정해보자. 두 가지 모두 같은 두께의 발달한 구름에서 강설이 나타날 수 있는 구조인데, 왼쪽이 오른쪽보다 기온의 연직 분포가 대체적으로 10°C 정도 높게 나타나는 것에 차이가 있다. 단열선도 상에서 녹색 숫자로 표시한 검정색 파선은 등포화혼합비선으로 해당 온도에서 포함할 수 있는 수증기량의 절대 값을 나타낸다. 따라서 기온이 낮은 오른쪽의 경우는 포함할 수 있는 수증기량이 적어 강수량도 적어질 수밖에 없다. 참고로 -20°C의 공기는 -10°C의 공기보다 수증기를 절반 정도밖에 포함할 수 없다.

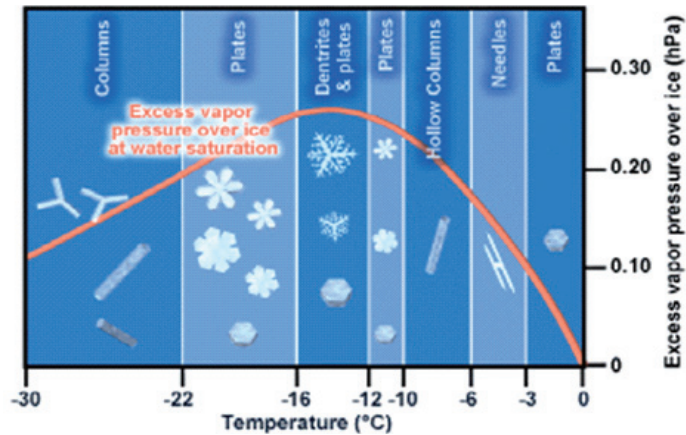


그림 3-8. 기온에 따른 얼음에 대한 수증기압 초과 값(hPa)과 눈 결정체 모양(출처: COMET)
 -22°C 이하의 낮은 기온에서는 큰 입자의 눈송이가 만들어지기 어려움

또한 그림 3-8에서와 같이 구름 내부의 기온이 매우 낮을 경우 얼음에 대한 수증기압 초과 값이 오히려 감소하게 되면서 빙정의 성장이 활발하게 일어나기 어렵게 된다. 따라서 그림에서 알 수 있듯이 -20°C 이하에서의 눈 결정체는 부피가 작은 육각기둥이나 나뭇가지 형태로 나타나므로 미세물리과정을 고려하더라도 강수량이 늘어나기에는 불리한 조건임을 알 수 있다.

3. 4 강설 판단 요소Ⅱ-바람과 취주거리

3. 4. 1 풍속

호수 효과에 의한 서해안형 강설의 발생 과정에는 해수면 위로 찬 공기가 이류가 되며, 이 때 강한 바람이 함께 동반되는데, 밀도가 큰 차고 건조한 공기가 이류 되기 때문에 하강기류를 형성하고 하층 대기를 쉽게 혼합시킨다. 이러한 과정에서 바람은 해수면에서 하층 대기로 열과 수증기의 전달을 활발하게 해 대기를 불안정하게 만들게 되는데, 특히 강한 풍속은 해수면으로부터의 잠열속(latent heat flux)을 증가시켜 수증기 공급의 주요한 역할을 하게 한다(이재근 등, 2018).

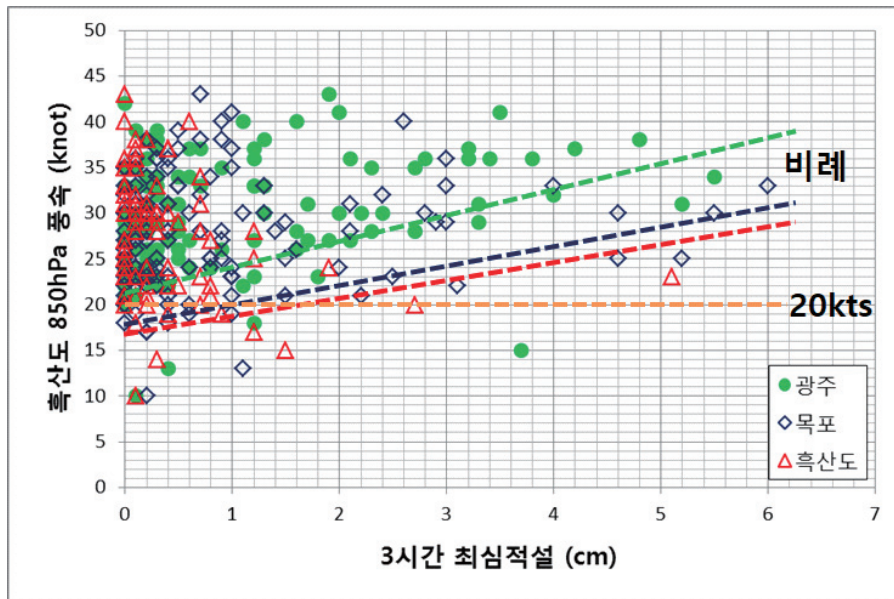


그림 3-9. 2003~2017년 겨울철(11월~2월) 호수 효과에 의한 서해안형 강설 사례 중
 흑산도 850hPa 풍속과 광주, 목포, 흑산도의 3시간 최심적설 분포
 20kts 이상에서 대부분 적설이 나타나며, 강한 강도에는 강한 풍속이 필요함을 알 수 있음

그림 3-9는 앞서 850hPa 해기차 분석에 이용했던 2003~2017년까지 겨울철(11~2월) 327건의 사례들을 흑산도의 850hPa 풍속과 3시간 최심적설의 분포로 나타낸 자료이다. 850hPa 풍속이 20kts 이상인 사례가 총 307건으로 93% 이상의 발생 빈도를 보여주고 있어 20kts 이상의 풍속은 강설 발생에 필요한 활발한 하층 대기 혼합의 조건인 것으로 판단할 수 있다. 참고로 그림 3-10의 사례에서 20kts 이하의 풍속에서는 구름대가 약화되는 모습을 볼 수 있다.

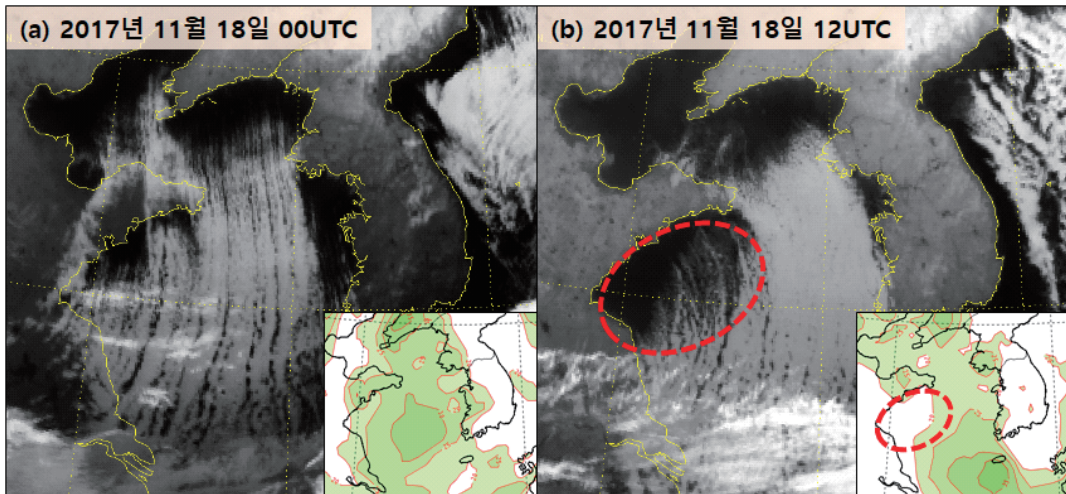


그림 3-10. 2017년 11월 18일 천리안위성 적외영상과 850hPa 등풍속선(20kts 이상 채색) 비교. (b)에서 붉은 점선으로 표시한 산둥반도 남쪽 구역은 850hPa의 풍속이 20kts 이하로 약해지자, 구름대도 점차 약화되는 모습을 보여줌. 이때 850hPa 해기차는 20℃ 이상으로 충분했음.

일반적으로 850hPa 풍속이 강할수록 많은 적설이 기록되는 경향이 있으며, 특히 섬지역인 흑산도에서 해안지역인 목포, 내륙지역인 광주로 들어갈수록 적설을 기록하기 위해서는 더 강한 풍속을 필요로 한다. 특히 그림 3-10에서 점선의 기울기를 보면 내륙인 광주에서 기울기가 가장 크게 나타나는데, 서해안형 강설이 내륙으로 강하게 유입되기 위해서는 더욱 강한 풍속이 뒷받침되어야 함을 알 수 있다. 광주의 경우 3시간 최심적설 2cm 이상인 사례 총 23건 중 18건이 850hPa 풍속 30kts 이상에서 나타났다(부록/사후분석 3-4 참고).

3. 4. 2 풍향

아무리 강한 풍속이 뒷받침 되더라도 구름대가 해안으로 들어오지 못한다면 강설은 나타나지 않게 된다. 앞서 그림 3-11의 (a) 경우처럼 하층이 북풍에 가까운 흐름에서는 서해안으로 구름대가 유입되지 못하는 경우가 발생한다. 결국 지리적인 특성 때문에 하층의 풍향에 따라 강설이 나타나는 지역이 달라질 수 있다.

그림 3-12는 앞서 850hPa 해기차 분석에 이용했던 2003~2017년 겨울철(11~2월) 327건의 서해안형 강설 사례들을 흑산도 850hPa 풍향과 3시간 최심적설로 비교한 자료이다. 세 지점 모두 풍향이 서풍에 가까울수록 적설이 늘어나는 경향을 보여주며, 도서인 흑산도와 해안인 목포의 경우 850hPa 풍향이 340° 이하일 때, 내륙지역인 광주는 330° 이하일 때 90% 이상의 강수빈도를 보인 것을 알 수 있다.

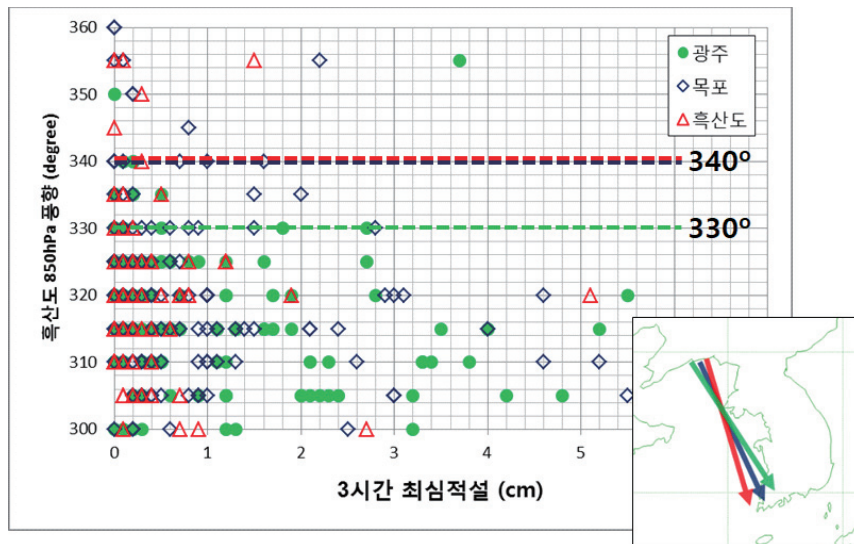


그림 3-11. 2003~2017년 겨울철(11월~2월) 호수 효과에 의한 서해안형 강설 사례 중 흑산도 850hPa 풍향과 광주, 목포, 흑산도의 3시간 최심적설 분포(점선은 90%이상 빈도를 보인 풍향)와 지점별 풍향에 따른 구름대 유입 경로 예시

3. 4. 3 취주거리

앞서 그림 3-2의 강수 발생 메커니즘에서 알아보았듯이 따뜻한 해수면 위를 지나가는 찬 공기는 긴 거리를 이동해야 충분한 열과 수증기를 공급받아 하층 대기를 불안정하게 만들 수 있다. 다시 말해 아무리 해기차가 크고 풍속이 강하다 해도 해수면을 이동하는 취주거리(fetch)가 충분하지 않다면 강설 발생이 어려울 수 있다. 예를 들어 지리적인 영향으로 웅진반도에 가로 막혀 북서풍의 취주거리를 충분히 확보할 수 없는 경기서해안 지역으로는 호수 효과에 의한 강설이 나타나지 못하는 이유이다.

강설을 유발할 수 있는 취주거리의 최소임계값은 80km이며, 일반적으로 160km 이상의 취주거리를 가져야 강설이 발생한다고 알려져 있다. 그림 3-12는 2018년 1월 26일 12시 천리안위성 가시영상으로 북쪽에서 찬 공기가 강하게 남하하면서 한반도 주변 해상에 해기차에 의한 대류운열이 광범위하게 발달한 사례이다. 노란색 화살표로 표시한 요동반도와 함경도 남쪽으로는 강설 발생 최소한의 취주거리인 80km 이상 떨어진 곳에서부터 대류운이 발달하기 시작하는 것을 알 수 있다.

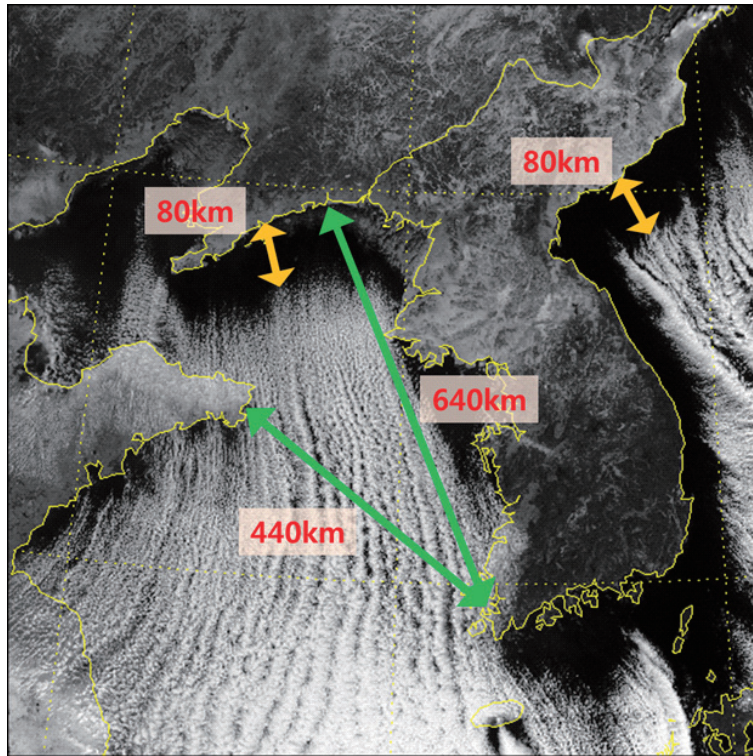


그림 3-12. 2018년 1월 26일 12시 천리안위성 가시영상,
80km 이상의 취주거리부터 구름열이 발생하는 것을 알 수 있으며,
목포의 경우 취주거리가 충분한 거리에 위치하고 있음

목포의 경우 요동반도에서부터 약 640km, 산둥반도에서부터 약 440km의 매우 긴 취주거리를 갖게 되므로 전라서해안은 강설 발생에 필요한 취주거리는 충분하게 확보하게 되므로 취주거리에 의한 강설 발생 여부는 크게 고민할 필요가 없다는 것을 알 수 있다.

그림 3-13은 2018년 1월 26일 09시 천리안위성 가시영상과 다렌, 백령도, 흑산도 지역의 GTS 고층자료 실황이다. 서해상에 위치한 대류운열은 마치 밧고랑과 같이 나란한 형태를 보이는데, 이것은 대류에 의해 상승하는 기류가 capping inversion(참모역전)에 막혀 더 이상 상승하지 못하고 수평으로 회전하는 대류 순환을 만들게 되면서 나타나는 전형적인 모습이다. 또한 남쪽으로 갈수록 운열의 폭이 두꺼워지는 것을 볼 수 있는데, 세 지점의 단열선도를 보면 북쪽에서 남쪽으로 갈수록 대류가 강해지면서 역전층의 고도가 높아지고 그로 인해 대류 순환의 규모가 커지면서 구름열 간의 폭도 두껍게 나타나게 되는 것을 알 수 있다.

결국 취주거리가 길수록 더욱 많은 열과 수증기를 공급받아 강한 대류운이 발달하게 되는 것이다. 참고로 백령도의 경우 요동반도와 취주거리가 약 200km 정도로 나타나 전라서해안보다는 상당히 짧은 취주거리를 갖게 된다. 그림 3-14는 2008~2012년 겨울철(11월~2월) 5년간 총 29건의 호수 효과에 의한 서해안형 강설 사례에서의 백령도 해기차

와 3시간 최심적설 분포이다. 3시간 최심적설 1cm 이상인 사례가 5건에 불과한 것을 보면 짧은 취주거리의 영향으로 열과 수증기의 공급이 적어 강한 강설이 발생하기 어려운 지리적 위치임을 확인할 수 있다.

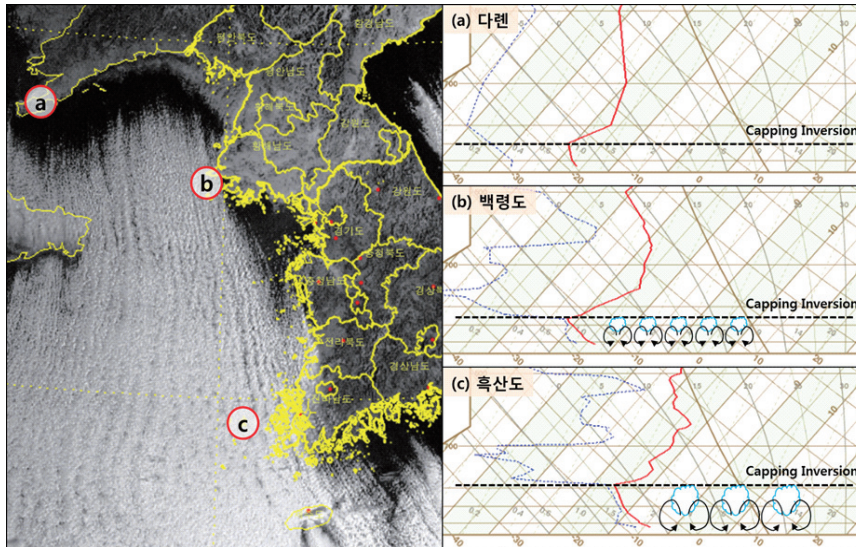


그림 3-13. (좌) 2018년 1월 26일 09시 천리안위성 가시영상
 (우) 다롄(a), 백령도(b), 흑산도(c)의 GTS 고층자료 실태
 (capping inversion(참모역전) 고도에 따른 대류 순환 규모 예시),
 취주거리가 길어질수록 대류가 깊어져 구름열의 깊이와 폭도 증가함을 알 수 있음

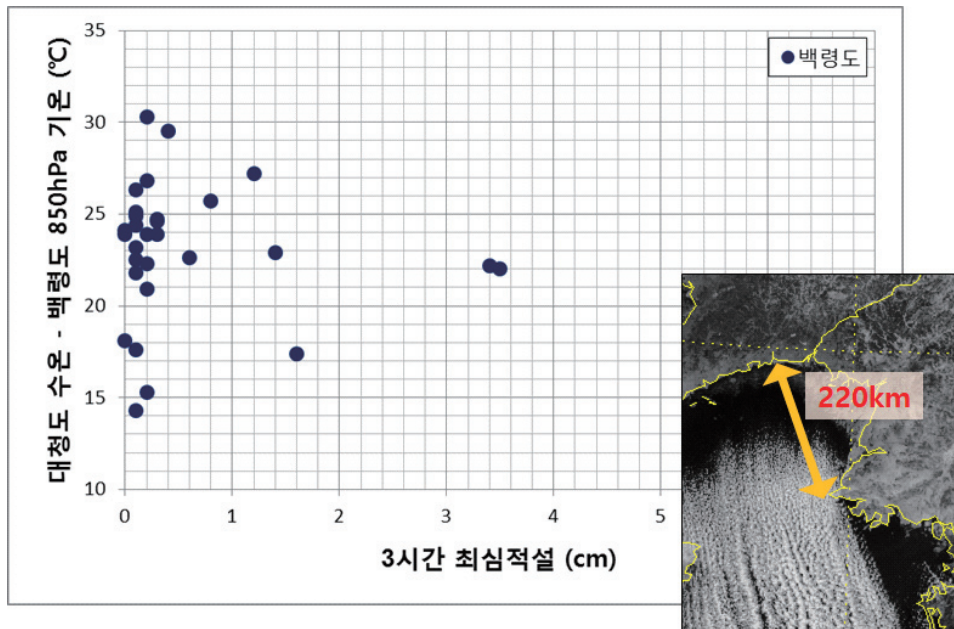


그림 3-14. 2008~2012년 겨울철(11월~2월) 호수 효과에 의한 서해안형 강설 사례 중, 백령도 850hPa 해기차와 3시간 최심적설 분포
취주거리가 충분하지 않아 대부분 1cm 미만의 적설만 기록됨

Key Point!

1. 850hPa 풍속이 20kts 이상일 때 강설 발생 가능성 높아진다.
2. 풍속의 강도가 강할수록 강수량도 증가한다.
3. 내륙의 경우 해안보다 강한 풍속이 필요하다.
4. 850hPa 풍향이 서해안은 340°, 내륙은 330° 이하일 때 강설 발생 가능성이 높다.
5. 취주거리가 길수록 강설에 유리하다.

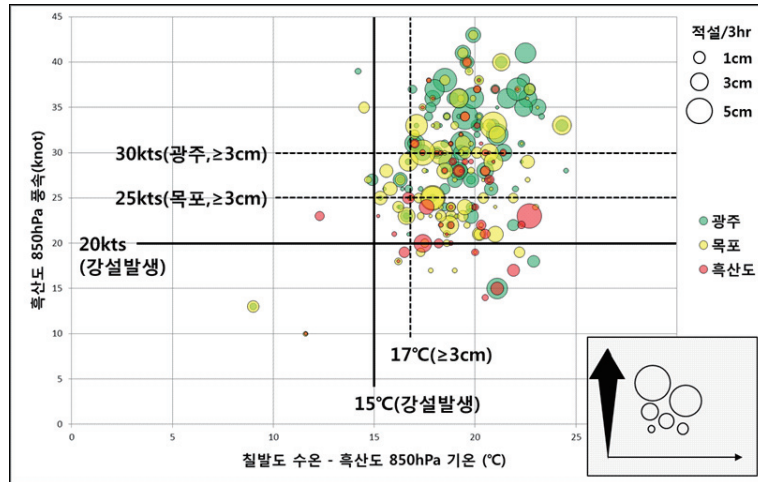


그림 3-15. 850hPa 해기차와 바람 통합 차트

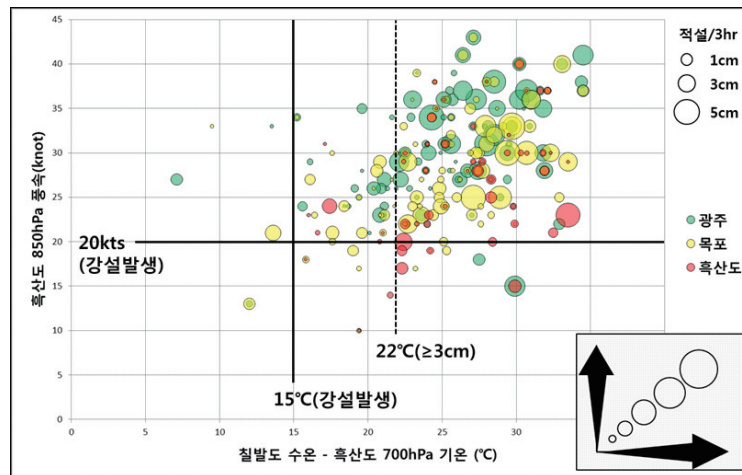


그림 3-16. 700hPa 해기차와 바람 통합 차트

지금까지 호수 효과에 의한 서해안 강설에 필요한 요소로 850hPa와 700hPa의 해기차, 그리고 850hPa의 풍속 조건에 대하여 알아보았으며, 이로 인해 강설 발생 조건을 유추할 수 있었다. 그림 3-15, 3-16은 지금까지 살펴본 강설 발생 조건들인 해기차, 풍속, 적설량의 관계를 하나로 통합한 그림이다. 그림 3-15는 850hPa 해기차와 풍속에 따라 적설량의 분포를 원의 크기로 나타냈다. 해기차 15°C, 풍속 20kts 이상의 2사분면에 대부분의 강설이 분포하며, 풍속이 증가함에 따라 큰 원의 분포가 많아진다. 흑산도 지점의 경우 도서 지역이기 때문에 강한 바람이 불 때 오히려 눈이 적설판에 쌓이지 않아 적설량이 감소하는 특징이 있음을 참고해야한다. 그림 3-16은 700hPa 해기차와 850hPa 풍속에 따른 강설의 분포를 나타냈으며, 마찬가지로 조건 값 이상인 2사분면에 대부분 강설이 분포한다. 850hPa 해기차 통합 차트와는 다르게 해기차와 풍속의 증가에 따라 적설량도 증가하는 그림으로 나타나므로, 강설의 강도는 700hPa 해기차와 850hPa 풍속이 연관이 있음을 알 수 있다.

3. 5 대설 판단 요소-수렴

3. 5. 1 서해안형 강설에서의 대설 유형

앞서 호수 효과에 의한 서해안형 강설 발생 메커니즘에서 보았듯이 서해안형 강설은 capping inversion(참모역전)의 영향으로 주로 하층에서 발달해 영향을 주는 강설 유형이다. 특히 역전층이 강할 경우 많은 양의 강설을 기대하기 어려운 것을 알 수 있다. 실제로 사례들을 살펴보면 전형적인 서해안형 강설 유형에서는 심각한 대설은 잘 나타나지 않는다. 기존 외국의 연구에서도 단순히 호수 효과에 의한 강설은 많은 양의 강설은 어렵고, 호수 효과에 의한 강설이 대설(heavy snowfall)로 이어지기 위해서는 반드시 수렴이 동반되어야 하는 것으로 알려져 있다.

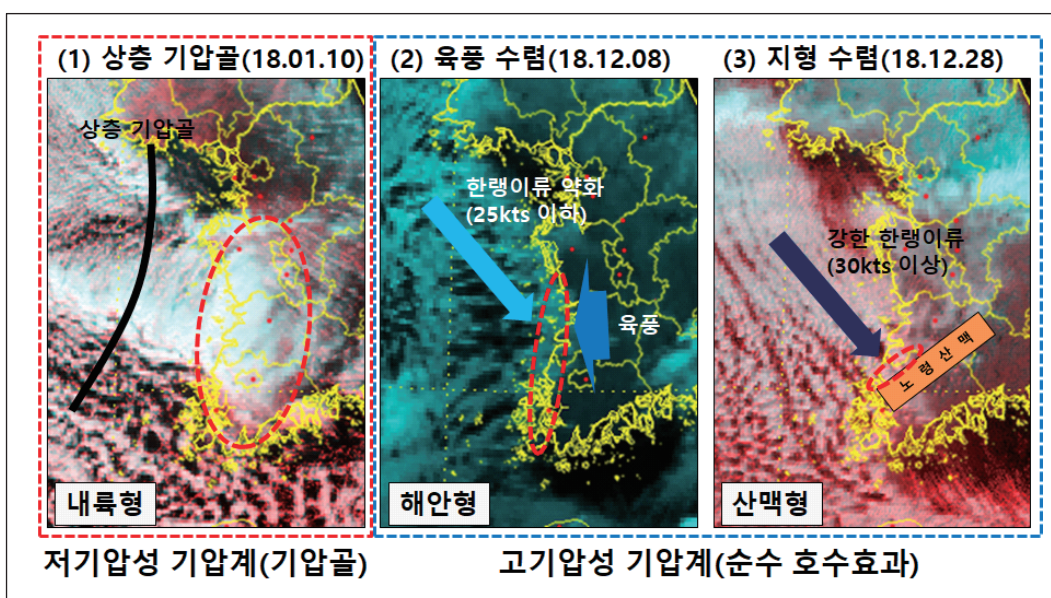


그림 3-17. 서해안형 강설 중 10cm 이상 대설이 가능한 세 가지, (1)상층 기압골 영향을 받는 저기압성 기압계(기압골)의 내륙형과, 고기압성 기압계에서 육풍과 지형 수렴의 영향을 받는 (2)해안형과 (3)산맥형으로 분류할 수 있음

우리나라에서 서해안형 강설에서 10cm 이상의 대설이 나타나는 사례들은 그림 3-17과 같이 크게 세 가지 유형으로 나눌 수 있으며, 모두 역학적인 강제 상승을 동반하는 경우이다. 첫 번째 상층 기압골 같은 경우는 말 그대로 상층의 강제력을 동반한 경우로 순수 호수 효과에 의한 강설이라고 보기는 어렵다. 두 번째 육풍 수렴과 세 번째 지형 수렴의 경우 모두 고기압성 기압계에서 순수 호수 효과에 의해 나타나는 대설 유형이며, 모두 수렴과 관련이 있다.

3. 5. 2 상층 기압골에 의한 대설(내륙형)

그림 3-18의 두 개의 위성영상을 보면 모두 해기차에 의한 구름열이 서해상을 뒤덮고 있는 공통점이 있다. 하지만 구름열의 회전 방향을 보면 왼쪽은 고기압성으로 흐르고, 오른쪽은 저기압성으로 흐르는 차이점이 있는 것을 확인할 수 있다. 즉, 왼쪽의 경우는 고기압성 기압계의 영향권에서 구름이 발달한 것이고, 반대로 오른쪽은 저기압성 기압계의 영향권에서 구름이 발달한 것이다.

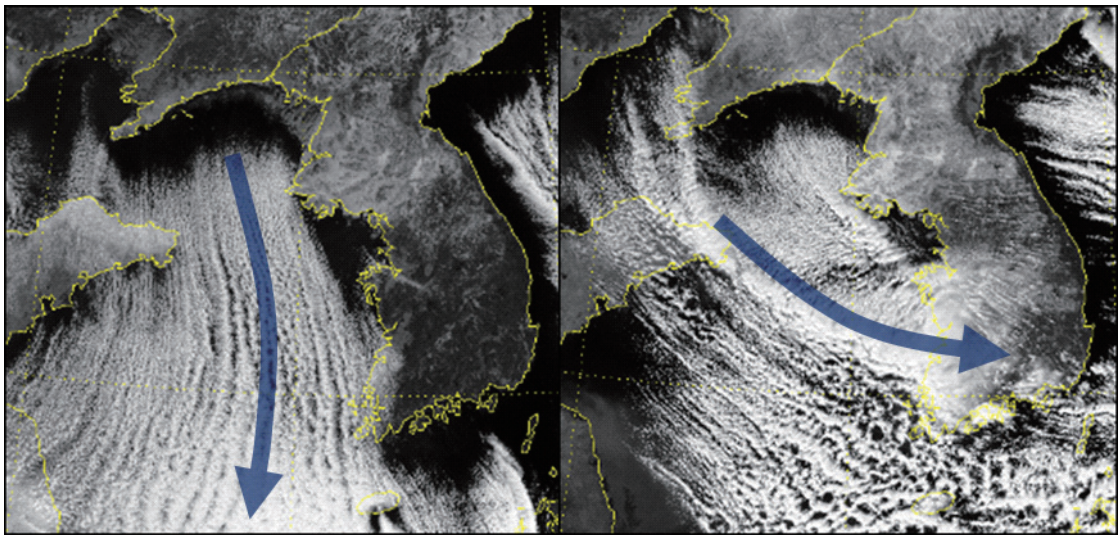


그림 3-18. 천리안 위성 가시영상 (좌) 2018년 1월 26일 12시, (우) 2018년 1월 10일 13시
왼쪽은 고기압성 회전, 오른쪽은 저기압성 회전으로 나타남

먼저 왼쪽과 같은 경우가 전형적인 순수 호수 효과에 의해 대류운열이 발달한 상황으로 capping inversion(참모역전)이 뚜렷해 대류가 억제되고 바람의 시어가 크지 않을 때 잘 나타나는 위성영상에서의 유형이다. 이런 경우는 대류가 하층의 일정 고도로 억제되기 때문에 강설강도는 상대적으로 약한 편이다.

반면, 오른쪽과 같은 경우는 호수 효과와 더불어 상층 기압골에 의한 강제력이 함께 영향을 준 사례로 순수 호수 효과에 의해 생긴 대류운열과는 다르게 화살표 부근으로 짙은 구름대가 발달한 것을 알 수 있다. 이 짙은 구름영역이 있는 곳으로 상층의 기압골 영향으로 기류의 수렴대가 나타난 것이며, 이러한 유형에서는 수렴에 의한 상승운동이 더해져 대류운이 폭발적으로 발달하고, 상층의 강제력까지 더해지면서 쉽게 10cm 이상의 적설로 이어질 수 있다. 특히 기압골의 영향을 받게 되므로 풍계가 서풍에 가깝게 눕게 되면서 대설 구역이 내륙까지 쉽게 유입되기 때문에 내륙으로 10cm 이상의 적설이 나타날 수 있는 대표적인 대설 유형이라 할 수 있다.

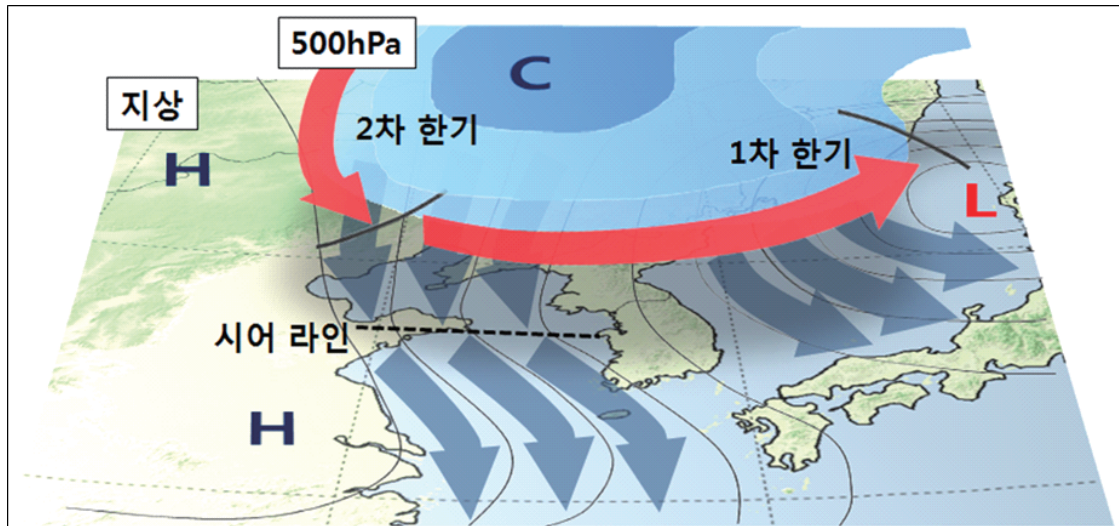


그림 3-19. 상층 기압골 영향으로 서해상에 기류 수렴이 형성되는 기압계의 모식도
1차 한기 통과 후 2차 한기가 남하하면서 해기차와 기압골의 효과가 동시에 나타나는 상황

겨울철 동아시아지역에서는 상층저지(blocking)에 의해 한기핵을 동반한 상층저기압이 절리(cut-off)되면서 기압계가 정체되는 경우가 많다. 절리된 저기압의 후면으로 찬 공기가 우리나라로 주기적으로 남하하는데, 이 때 2차 한기가 남하하는 경우 단파골의 영향으로 하층까지 시어역을 형성하면서 서해상에서 기류 수렴을 만든다. 상층 기압골의 지원을 받을 수 있는 전형적인 종관 기압계 상황이다. 일반적으로 그림 3-19에서 표현된 모식도와 같은 종관 기압계 상황에서 잘 나타나며, 그림 3-18의 오른쪽처럼 서해상으로 단일 띠의 수렴대가 형성되고 해안뿐만 아니라 내륙까지도 유입되면서 많은 눈을 내린다(부록/사후분석 3-2 참고).

상층 기압골 대설 유형의 경우 한기가 두 차례 이상으로 영향을 주기 때문에 기본적으로 강수의 지속시간이 길어진다. 뿐만 아니라 상층의 찬 공기 영향으로 700hPa 해기차도 커지고, 하층의 수렴, 상층의 강제력까지 대설이 발생하기 매우 유리한 조건이라고 할 수 있다.

3. 5. 3 지형 수렴에 의한 대설(산맥형)

지형 수렴에 의한 대설은 상층 기압골의 영향을 받지 않는 순수 호수 효과에 의해 발생하는 서해안형 강설 유형 중 하나로 쉽게 10cm 이상의 적설이 나타난다. 지형 수렴은 세 가지의 대설 유형 중 가장 단순한 원리로 설명이 가능한데, 그림 3-20의 오른쪽 모식도처럼 강한 바람이 높은 산맥에 부딪혀 강한 상승 기류가 나타나는 지형에 의한 강제상승 메커니즘 그 자체이다. 그림 3-20의 왼쪽 지형에서 알 수 있듯이 전라서해안으로 북

서풍이 강하게 유입될 경우 노령산맥에 막혀 풍상측인 영광, 고창, 정읍 지역으로 강한 수렴이 나타나기 유리한 위치인 것을 알 수 있다.

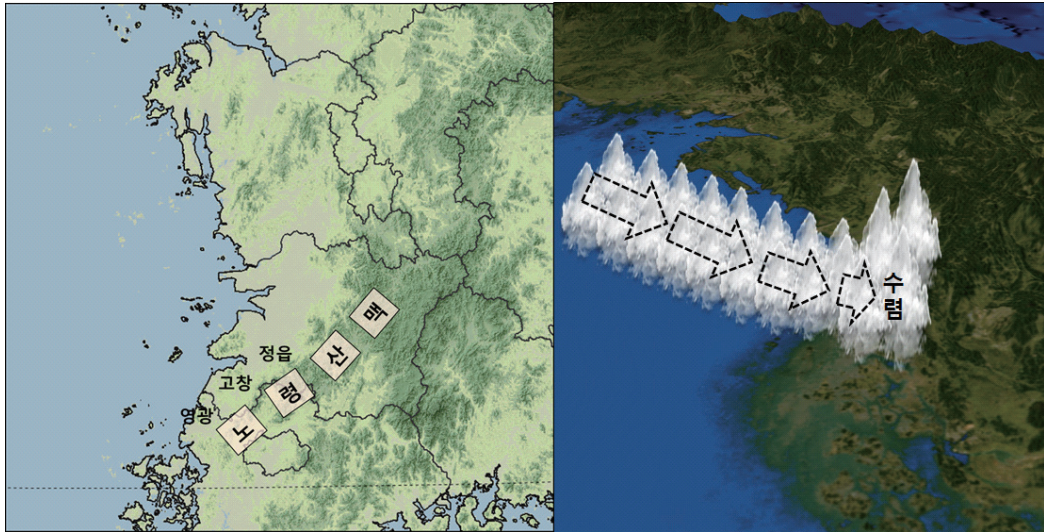


그림 3-20. 노령산맥 풍상측의 영광, 고창 정읍의 위치와 지형 수렴에 의한 구름대 발달 모식도

노령산맥으로 강한 기류가 유입되기 위해서는 하층(850hPa)의 종관적인 풍속과 기온의 구조는 그림 3-21의 왼쪽 모식도와 같이 강한 한랭기류의 축이 해안으로 유입되는 형태여야 한다. 가운데 그림은 고창과 영광에 20cm 이상의 적설을 기록했던 2018년 12월 28일 사례의 850hPa 유선과 강풍축을 나타낸 그림이며, 오른쪽 그림은 같은 날의 위성 합성영상이다. 실제로 해안으로 30kts 이상의 850hPa 강풍축이 위치하는 것을 알 수 있으며, 위성에서는 대류운열이 조직적으로 잘 발달한 모습을 보여준다(부록/사후분석 3-6 참고).

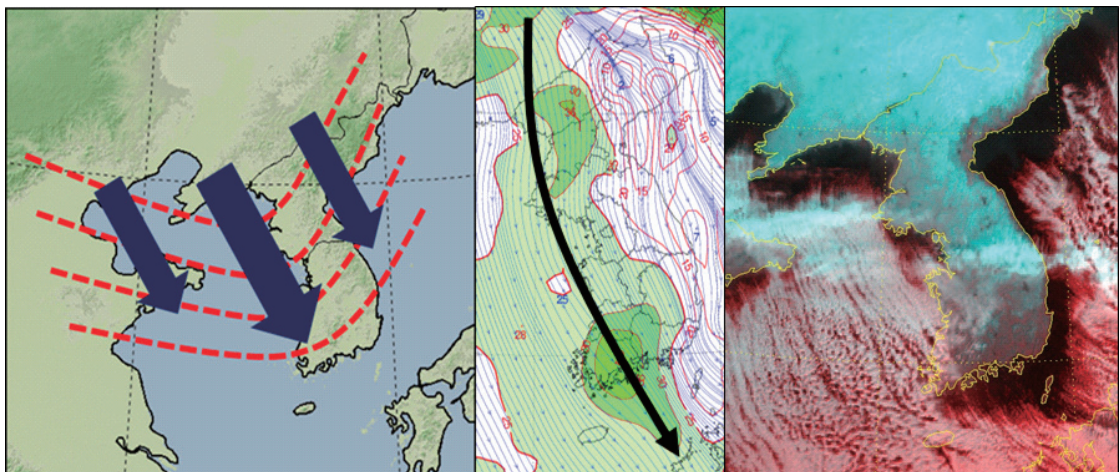


그림 3-21. 지형 수렴형 대설에 유리한 하층 강풍축과 등온선 모식도 (2018년 12월 28일 850hPa 유선장과 위성 합성영상) 강풍축과 온도골이 서해안으로 집중되면서 노령산맥 풍상측에 지형 수렴이 강해질 수 있는 상황

3. 5. 4 육풍 수렴에 의한 대설(해안형)

남북으로 긴 수렴대가 서해안에 정체하면서 대설을 유발할 때가 있는데, 바로 찬 내륙에서 해상으로 불어나가는 육풍이 발생하여 종관풍과 부딪혀 수렴대가 형성되는 경우이다. 먼저 육풍 수렴에 의한 대설 유형을 이해하기 위해서는 그림 3-24의 모식도와 같이 우리나라에서 발생하는 서해안형 강설의 과정을 전반과 후반으로 나눠서 생각할 필요가 있다.

그림 3-22의 왼쪽은 전반의 과정을 나타낸 모식도로 대륙고기압이 한반도로 확장을 하면서 서해상과 우리나라로 한랭이류가 강하게 일어나는 시기이다. 강한 한랭이류로 인하여 하층에서의 강한 바람과 온도골이 서해상과 한반도로 광범위하게 형성된 것을 알 수 있다. 전반의 경우는 앞에서 다룬 지형에 의한 대설이 발생하기 좋은 상황으로 육풍이 나타나기에는 어려운 조건이다.

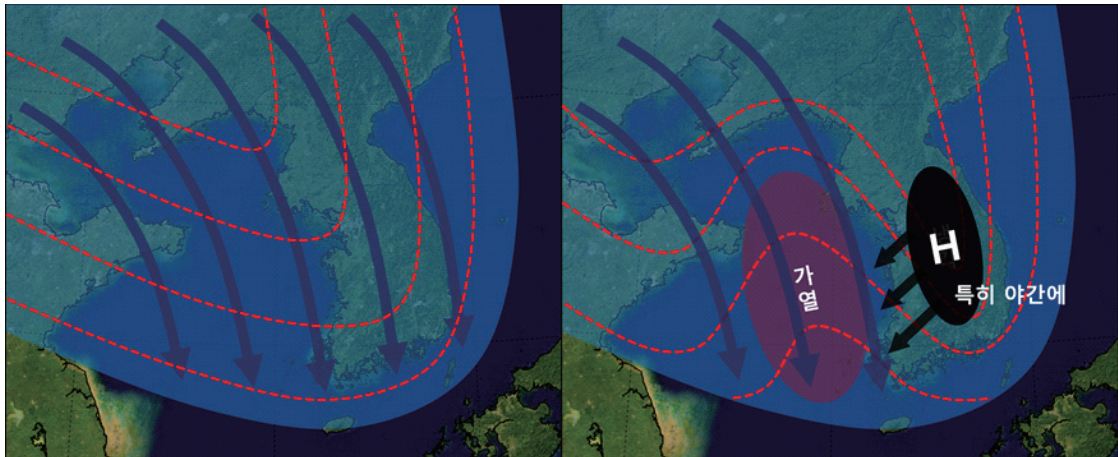


그림 3-22. 서해안형 강설이 발생할 때 전반(왼쪽)과 후반(오른쪽)의 지상 또는 하층의 모식도. 전반에는 서해상과 한반도로 강하게 한기가 남하, 시간이 지나면 해상은 따뜻해지고 내륙은 냉각되면서 온도구조가 달라짐.

시간이 지나 후반이 되면 바람이 점차 약해지고 그림 3-22의 오른쪽과 같이 따뜻한 서해상은 상대적으로 공기가 빠르게 변질되면서 육지인 한반도에 비해 온난해진다. 그러면 그림과 같이 서해상으로는 온도능이 발달하면서 서해안으로는 한랭이류가 더욱 약화되는 가운데, 반대로 육지에서는 이류됐던 한기가 축적되고 바람도 약해지면서 야간의 경우는 복사냉각 효과까지 더해져 서해상에 비해 기온이 크게 하강하여 온도골이 깊어진다. 상대적으로 육지에는 기온이 크게 하강하면서 국지고기압이 형성되고 고기압의 가장자리로 육풍 성분인 북동풍이 서해안으로 불게 되면서 종관풍인 북서풍과의 수렴대가 발생한다. 보통 이 수렴대의 위치가 서해안으로 자리 잡는 경우가 빈번해 서해안에 10cm 이상의 적설이 나타나게 되며, 경우에 따라서는 육풍이 너무 강해 수렴대가 해상으로 밀려나 오히려 적설이 기록되지 못하는 사례도 나타난다.

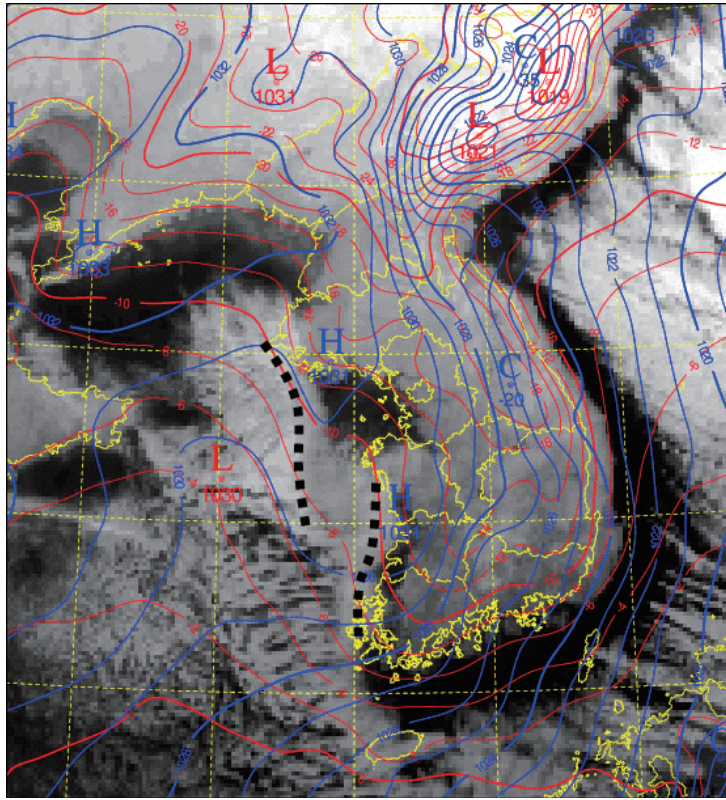


그림 3-23. 2018년 1월 24일 09시 한반도 기압(청색)/온위(적색)
분석장+적외영상과 수렴대(검정 점선) 표현

그림 3-23은 2018년 1월 24일 09시 한반도 분석장으로, 중첩한 위성영상을 보면 수렴대로 판단할 수 있는 대상의 구름대가 서해안에서 해상으로 밀려나 형성됐다. 후반의 모식도에서와 같이 서해상으로는 온도능이 나타나고 내륙으로는 온도골이 깊어지면서 해안으로는 온도경도가 조밀하게 나타나고 내륙으로는 강한 냉각에 의한 국지고기압의 축이 새롭게 발달한 것을 확인할 수 있다. 이 날 서해안으로 많은 곳은 10cm 이상의 적설을 예상했으나 강수대가 예상보다 빠르게 서해안을 벗어나면서 5cm 이하의 적설을 기록했다(부록/사후분석 3-3, 3-5 참고).

그림 3-24와 같이 북쪽에서 한기가 남하하면서 850hPa의 강풍대가 서해상에 형성될 때와 내륙으로 형성될 때 육풍 발생과 강도에 차이가 나타난다. 강풍대가 (a)와 같이 서해상으로 형성될 경우 온도골도 서해상이나 서해안으로 형성되면서 내륙의 찬 공기는 상대적으로 약해지고 육풍 성분도 약해진다. 전반적으로 서해상으로는 강한 북서풍의 지배를 받게 되면서 육풍과의 수렴대가 형성되기 어려운 조건이다. 반면에 (b)와 같이 강풍대가 내륙으로 형성될 경우 내륙으로 온도골이 형성되면서 찬 공기가 강하게 자리 잡고 해상과의 온도차는 더욱 커진다. 또한 서해상의 종관풍이 강하지 않아 해안으로 육풍과의 수렴이 유리해진다.

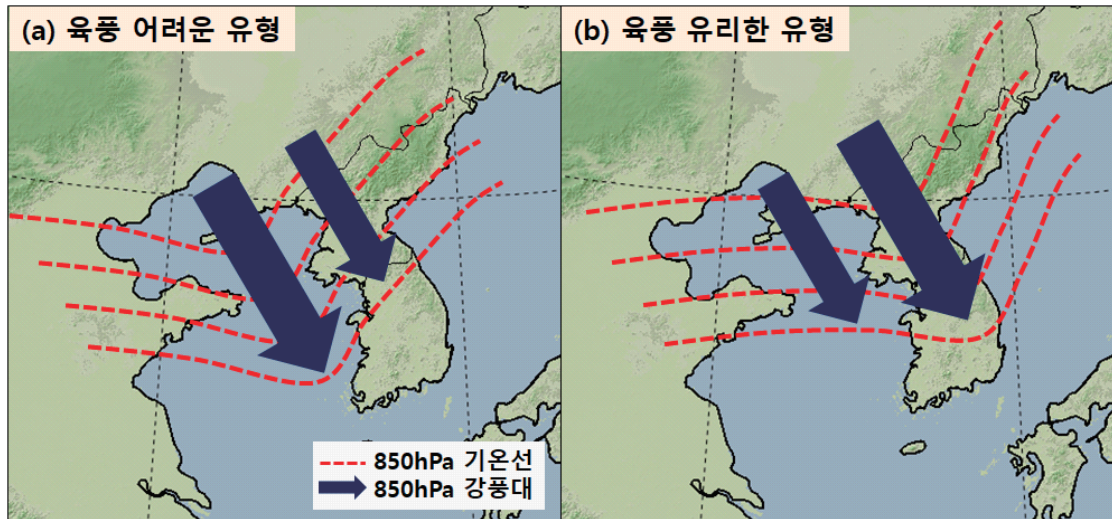


그림 3-24. 850hPa 등온선분포와 강풍대 위치에 따른 육풍이 어려운 유형(a)과 유리한 유형(b)

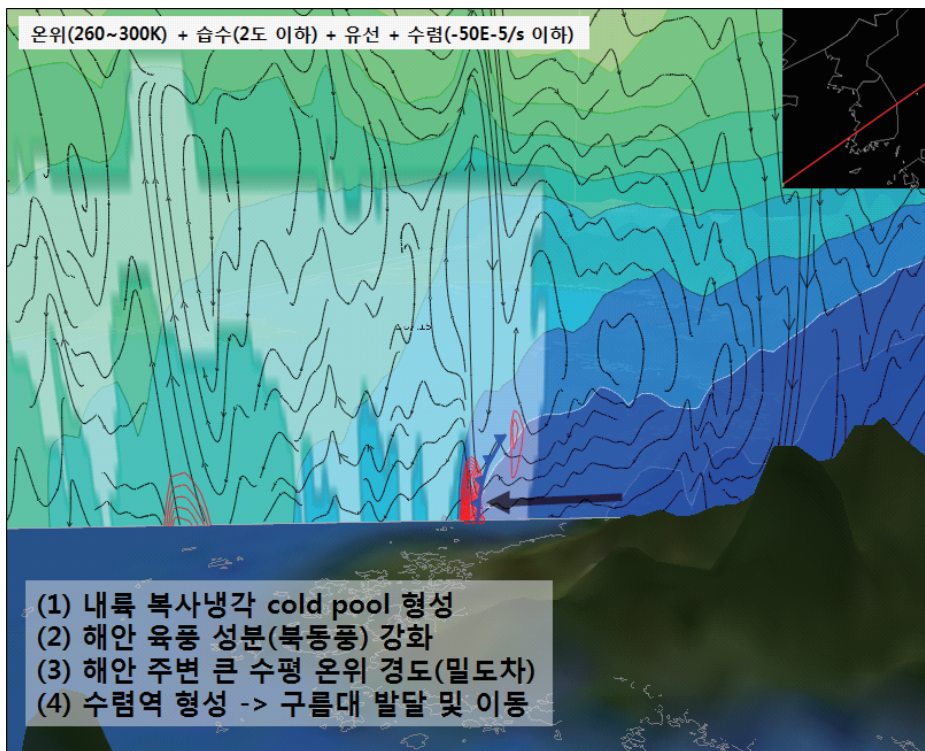


그림 3-25. 2018년 1월 24일 09시 UM국지모델 분석장의 Gloview를 이용한 온위(푸른색~연두색), 습수(투명한 흰색), 유선(검은색), 수렴 변수(붉은실선)의 연직단면 분석

그림 3-25는 2018년 1월 24일 사례의 강수를 비교적 잘 모의한 UM 국지모델 분석장을 이용하여 연직단면을 분석한 자료이며, 전라서해안에서 남서~북동 방향으로 잘라 연직으로 표현하였다. 결론적으로 서해안으로 지상 부근의 강한 수렴과 상승류가 나타나고,

이 부분에 하층으로 깊게 저습수역이 나타나 강수대가 발달한 모습을 보인다. 온위에서는 내륙 찬 공기 존재와 해안의 큰 수평 온도경도가 잘 나타나고 있고, 내륙에서 해안으로 동풍 성분이 불어나가는 것을 확인할 수 있다.

겨울이 되면 비열이 큰 해수보다는 육지가 빠르게 열을 빼앗기기 때문에 우리나라의 겨울철에는 서해상의 해수면온도보다 내륙의 기온이 낮은 경우가 일반적이다. 따라서 육풍 발생 가능성에 대해서는 항상 염두에 두어야 하며, 특히 내륙으로 강한 한기가 남하하고 야간의 복사냉각 효과가 더해질 경우에 더욱 주의해야 한다.

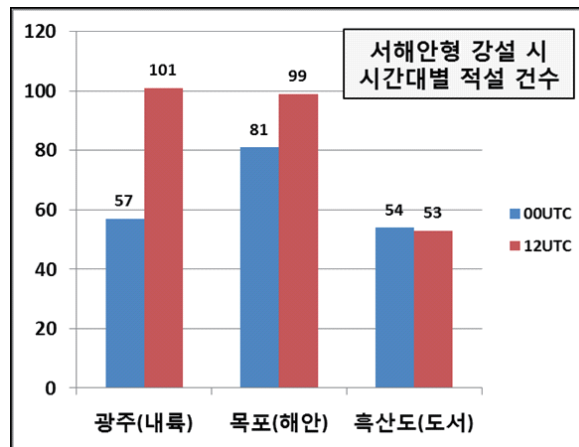


그림 3-26. 2008~2012년 겨울철(11월~2월) 시간대별(00/12UTC) 서해안형 강설의 지점별 적설 일수, 내륙인 광주 지점은 육풍 효과가 강한 00UTC 시간대에 적설 빈도가 절반으로 줄어듦

그림 3-26은 광주(내륙), 목포(해안), 흑산도(도서) 각 지점별 서해안형 강설 사례의 적설 건수를 00UTC와 12UTC의 시간대별로 나타낸 자료이다. 육풍의 영향이 미치지 못하는 흑산도의 경우 00UTC와 12UTC의 시간대별 차이가 거의 나타나지 않는데 반하여, 내륙인 광주의 경우 냉각 효과로 육풍이 강화되는 00UTC 시간대에 거의 절반 수준으로 건수가 감소하는 결과를 보여주고 있다.

Key Point!

1. 서해안형 강설에서 10cm 이상의 대설은 반드시 수렴을 동반해야 한다.
2. 상층 기압골형 대설은 내륙까지 광범위하게 영향을 준다.
3. 지형 수렴형 대설은 해안으로 강한 한랭이류가 나타날 때 발생 가능성이 높다.
4. 육풍 수렴형 대설은 한랭이류가 약화되는 강설 후반과 야간 시간대에 발생한다.

3. 6 서해안형 강설 판단을 위한 흐름도

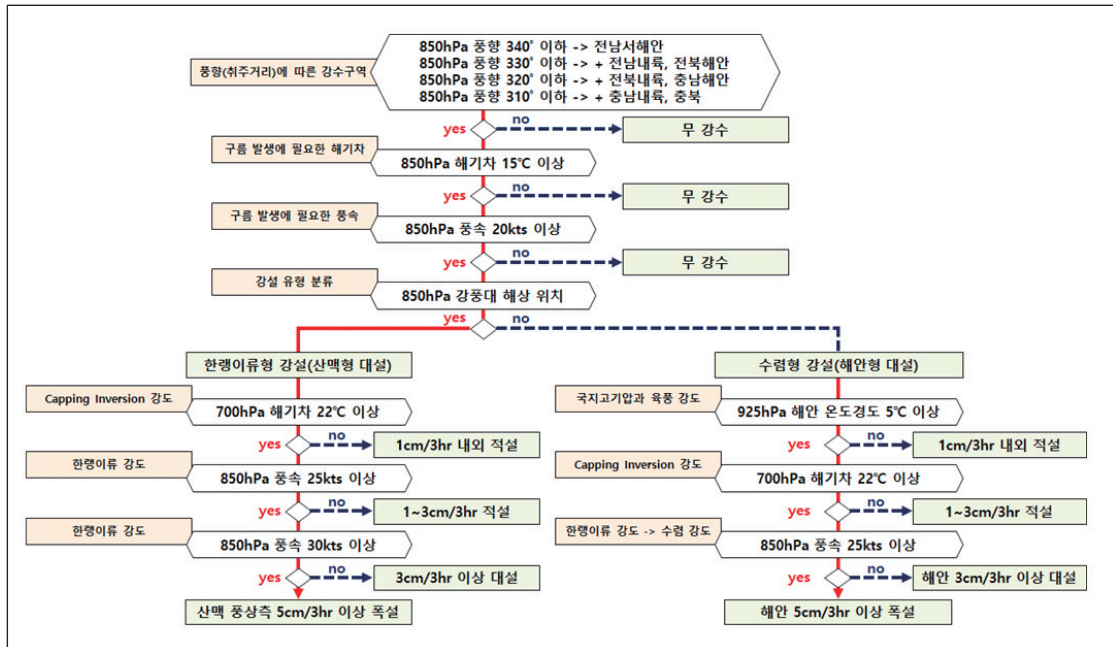


그림 3-27. 서해안형 강설 판단을 위한 흐름도

참고문헌

1. 이재근, 민기홍, 2018: 2016년 1월 23~25일에 발생한 서해안 대설 발달 메커니즘 분석. 대기, 28, 53~67.
2. 정성훈, 변건영, 이태영, 2006: 발생기구에 근거한 한반도 강설의 유형 분류. 대기, 16, 33~48.
3. Niziol, T. A., 1987: Operational Forecasting of Lake Effect Snowfall in Western and Central New York. Weather and Forecasting, 2, 310~321.

[부록] 서해안형 강수 사후분석 목록

1. 사후분석 3-1 2017년 11월 18~19일 사례: '2017년 겨울철 서해안 첫 적설 도입 실패'
2. 사후분석 3-2 2018년 1월 10일 사례: '기류 수렴 영향으로 20cm 이상 기록한 서해안 대설'
3. 사후분석 3-3 2018년 1월 23~24일 사례: '큰 해기차에도 불구하고 예상보다 적었던 서해안 강설'
4. 사후분석 3-4 2018년 1월 24~25일 사례: '북풍의 풍계에서 예상하지 못한 전남서해안 대설'
5. 사후분석 3-5 2018년 12월 8일 사례: '야간 육풍 강화로 해안 위주의 대설, 내륙은 강수 어려움'
6. 사후분석 3-6 2018년 12월 28일 사례: '강한 한랭이류와 불안정, 그리고 지형수렴에 의한 대설'

겨울 예보 가이드스

4. 북동기류에 의한 강수시스템 이해와 예보 활용



4. 북동기류에 의한 강수시스템 이해와 예보 활용

Why?

겨울철 동해안은 높은 해수면온도와 산악 지형의 영향으로 복잡한 강수 메커니즘을 보인다. 이에, 북동기류에 의한 강수 과정을 알기 쉽게 설명하고 모식도와 사례분석을 통해 정리한 가이드를 예보에 활용하고자 한다.

4. 1 북동기류 강수의 정의

영동지방으로 북동기류가 유입될 때는 안개, 저운, 강수, 강설 현상 등의 위험기상을 동반한다. 특히 겨울철 중국 북동지역에서 차가운 공기가 따뜻한 동해상을 지날 때 변질되면서 발달한 구름들이 영동지방에 폭설을 야기하기도 한다. 겨울철 영동지역은 동해상의 높은 해수면온도(서해상보다 2~4도 높음)와 태백산맥(평균 높이 900m 이상)의 지형적 영향을 동시에 받기 때문에 복잡한 강수 메커니즘을 보인다. 이에 고해상도 수치모델로도 예측하지 못하는 부분이 있어 예보관들이 많은 어려움을 겪고 있다.

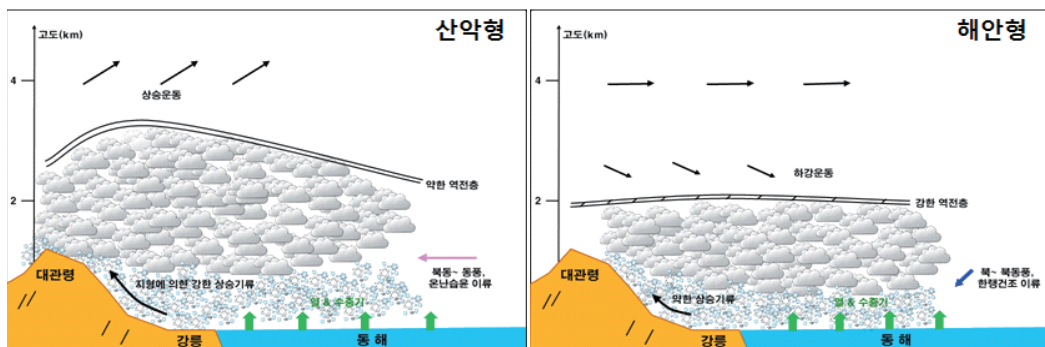
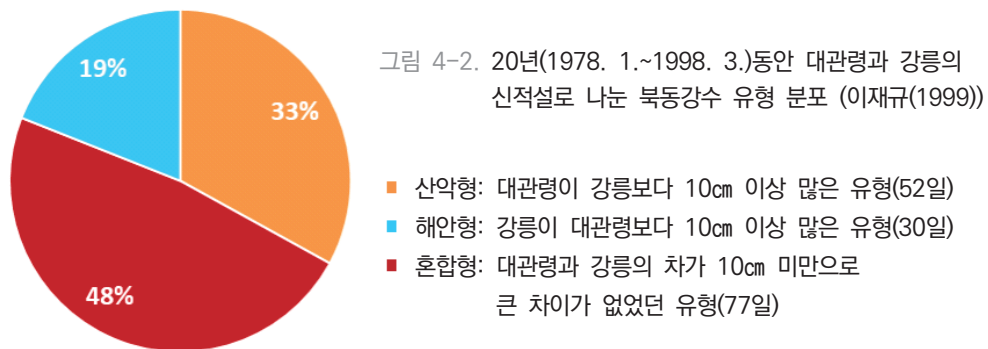


그림 4-1. 영동지방 강수 유형 모식도 산악형(좌), 해안형(우) (이재규(1999), 박정민(2016))

과거 연구에 의하면 겨울철(11월에서 이듬해 3월) 영동지방에 북동기류로 인해 발생하는 강수 유형은 3가지로 나눌 수 있다. 첫 번째로 그림 4-1의 왼쪽 모식도처럼 대관령이 강릉보다 강수량이 많은 산악형이다. 종관적인 강제력의 지원과 함께 동풍이 산맥을 타고 올라 구름을 더욱 발달시켜 산악지역에 많은 강수량을 기록하는 사례이다. 이때 역전층의 두께는 2km 이상으로 구름이 영서지방까지 넘어가기도 한다. 두 번째는

강릉이 대관령보다 강수량이 많은 해안형이다. 이때 종관 강제력은 약하고, 강한 역전층이 2km이내에 위치해 있어 산맥을 타고 오르는 기류가 약해 강수는 수렴대가 위치한 해안에 집중된다. 세 번째는 대관령과 강릉의 강수량에 큰 차이가 없는 유형이다.

그림 4-2에서 20년간 나타난 북동기류 유입 시 강수 유형의 통계를 보면 주로 산악형이 해안형보다 많은 것을 알 수 있다. 하지만 산악형인지 해안형인지 뚜렷하게 나눌 수 없거나 두 유형이 혼합되어 나타나는 경우가 약 50%를 차지하므로, 위 분류법을 통한 강수집중구역의 예측은 어려움이 많다.



4. 2 겨울철 북동기류에 의한 강수 예측의 3가지 어려운 점

겨울철 북동기류에 의한 강수 예측 시 어려운 부분 중 첫째는 강수 유무와 관련한 것이다. 해상에서 형성된 구름들이 영동 해안 쪽을 스치면서 강수를 내리기도 하지만 때로는 비슷한 종관상태에서 눈구름이 해안으로 상륙하지 못하고 해상에 머무르게 되어 강수가 오지 않는 경우도 있다.

두 번째는 강수형태를 판별하는 문제이다. 시기에 따라 북쪽에서 내려오는 찬 공기의 정도와 고도에 따른 연직 온도 분포 차이와 더불어, 태백산맥 동쪽사면에 나타나는 한기축적(Cold Air Damming, 이하 CAD) 현상과 해기차에 의한 대류혼합 등이 복합적으로 일어나면서 대기 최하층에서 기온감률 변화가 심해 강수형태가 매우 복잡하게 나타난다.

마지막으로 강수 집중 구역을 예측하는 부분이다. 이재규(1999)는 강릉지방에 강수량이 많은 경우를 해안형, 대관령에 많이 오는 경우를 산악형으로 구분했다. 하지만 강수 시스템이 뚜렷하게 나뉘지 않고 시스템의 이동에 따라 해안형과 산악형이 혼재되어 나타나는 경우가 많아서 하나의 시스템에서도 시간대별로 강수 집중구역이 다르다.

4. 3 눈구름이 동해안으로 들어올지 해상에 머물지?

4. 3. 1 북동기류 강수에 영향을 주는 기압배치

북동기류에 의해 구름대가 해안으로 유입될지 여부를 판단하기 위해서 강수가 잘 유입되지 않는 기압 배치의 형태를 아는 것이 도움이 된다. 겨울철 시베리아에서 발달한 대륙고기압(cP: continental Polar)이 남동진하면서 확장하는 경로와, 북동기류가 영동지방에 영향을 줄 시점에 고기압과 고기압 사이 골의 위치에 따라 2가지 형태로 나눌 수 있다.

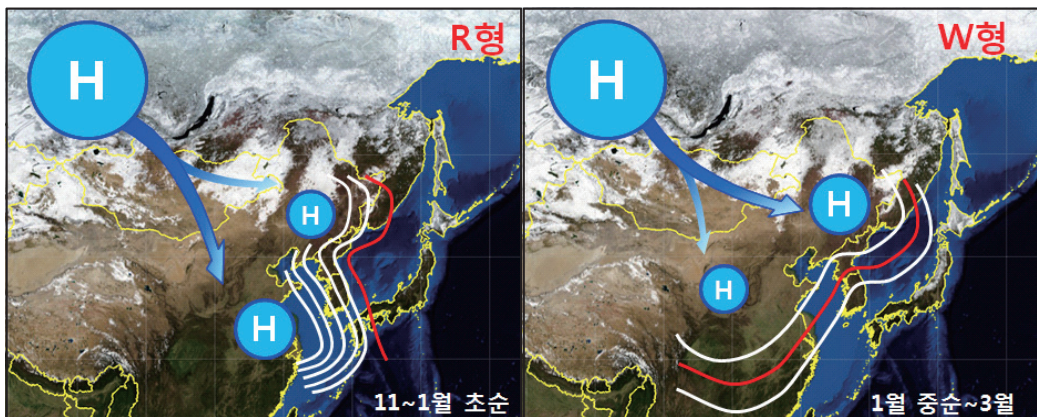


그림 4-3. 겨울철 대륙고기압 확장경로와 해면기압 형태
(좌)11~1월 초순 주 확장경로(파란색 굵은 화살표)와 R형 기압배치
(우)1월 중순~3월 주 확장경로(파란색 굵은 화살표)와 W형 기압배치

시베리아고기압(cP형태)은 11월부터 이듬해 3월까지 발달해 한반도에 영향을 주는 데, 시기에 따라 고기압의 주 확장경로가 변하며 그림 4-3과 같이 중국 중남부와 중국 북동부 두 경로로 확장한다. 겨울의 초중반(11월~이듬해 1월 초순)에는 주로 중국 중남부로 확장하면서 R형의 기압배치가 주로 나타난다. 이 시기에는 중국 중부에 강한 고기압 중심이 위치하면서 산둥반도에서 한반도까지 기압경도력이 강해 북서풍이 주를 이루고 서해안형(호수 효과) 강수가 주로 나타난다. 한편 북동기류와 서풍이 만나는 수렴대가 동해상에 주로 발생하면서 북동기류가 영동지방까지 영향을 끼치기 어려운 시기이다.

두 번째로 겨울의 중후반(1월 중순~3월) 시기에는 대륙고기압이 주로 중국북동부로 확장하면서 W형의 기압배치가 나타나며, 북동기류에 의해 영동지방에 영향을 주는 가장 전형적인 형태이다. 이 시기에는 중국 북동부의 고기압 중심값이 중국 중남부와 비슷하거나 그보다 강해 북동기류가 활성화 된다. 따라서 북동기류가 육지로 유입되면서 태백산맥의 지형적인 영향까지 더해져 영동지방에 강수가 내리기 좋은 기압배치이다.

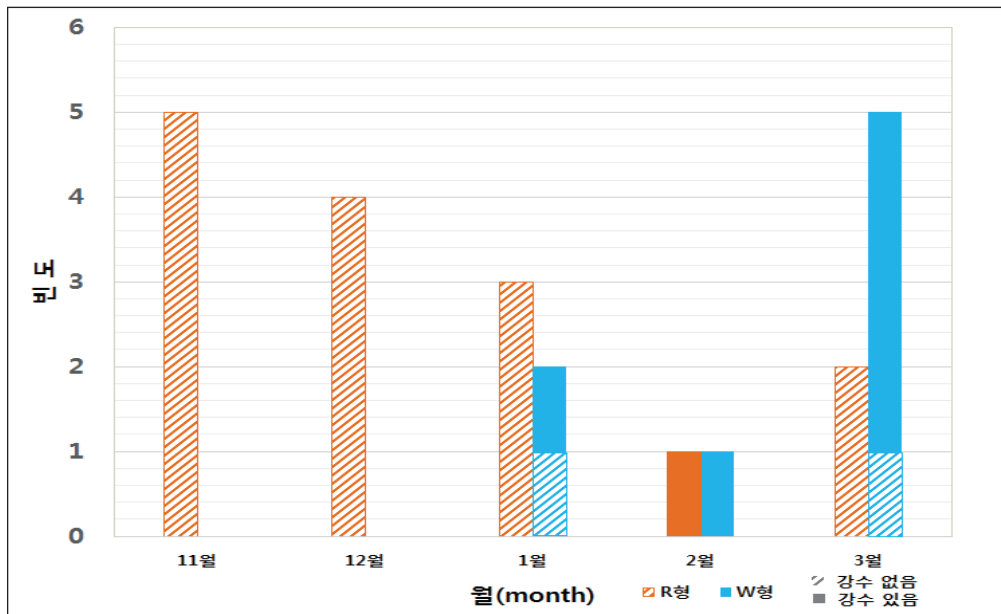


그림 4-4. 2017~2018년 겨울철 월별 해면기압 형태 분류와 강수 유무 빈도
(단색: 강수 있음, 빗금: 강수 없음, 주황색(R형), 파란색(W형))

그림 4-4는 2017~2018년 겨울철 북동기류가 한반도에 영향을 줄 시점에 나타난 지상기압배치를 월별로 두 가지 유형(R, W형)으로 나누고, 실제로 영동지방에 강수가 있었는지를 표시한 그림이다. 11~1월에 나타난 R형 기압배치에서는 동해안의 북동기류와 육지에서 부는 서풍류의 수렴대가 한 차례도 해안가로 접근하지 못했다.

한편 2017~2018년 겨울에는 없었지만, R형태의 기압배치라 하더라도 상층기압골 후면에서 강하게 침강하는 공기에 의해 중국북동부에서의 지상고기압도 함께 발달하면, 북동기류가 강화되면서 수렴대가 내륙으로 유입되어 강수량이 적지 않게 기록될 수 있다.

2017~2018년 겨울철 영동지방에서 북동기류에 의해 강수를 기록한 기압배치는 주로 W형이다. W형은 1~3월에 주로 발생했고 8사례 중 2사례를 제외하고는 모두 강수를 기록하였다. W형에서는 지상일기도 기압능 사이의 기압골의 위치와 925hPa 온도능의 위치에 따라 주 강수역을 찾을 수 있다.

그러나 W형 기압배치 하에서도 한기이류가 약할 때는 비가 오지 않는 경우도 있다 (2018년 1월 4일 사례).

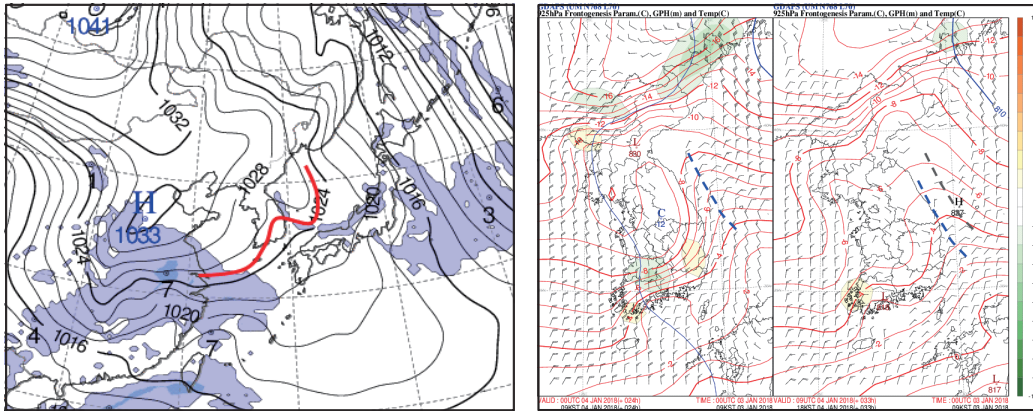


그림 4-5. UM 전구모델 예상장(3일 09시 발표)

(좌) 2018년 1월 4일 18시 해면기압, 3시간 누적강수량, ω 형 기압배치

(우-1) 4일 09시 925hPa 전선강도, (우-2) 4일 18시 925hPa 전선강도, 온도능(파란 점선)

2018년 1월 4일은 모델에서 북동기류에 의해 강수가 동해안에 진입할 것으로 예상했으나 실제로는 오지 않은 사례이다. 그림 4-5에서 지상기압 배치는 ω 형을 나타내고 있어 북동기류가 영동지방으로 유입되기에는 좋은 조건이다. 하지만 강한 고기압 중심이 산둥반도 서쪽에 위치하고 있어 동해상의 한기 이류가 약해 북동기류는 강하지 않고 오히려 서해안의 북풍이 강했다. 4일의 925hPa 전선강도 예상장에서는 9시 동해상에 위치한 온도능(파란 점선)이 15시 이후 동해안에 이를 것으로 예측하면서 강원 남부와 경북북부에 강수를 모의하였으나 실제 강수량상은 이와 달랐다.

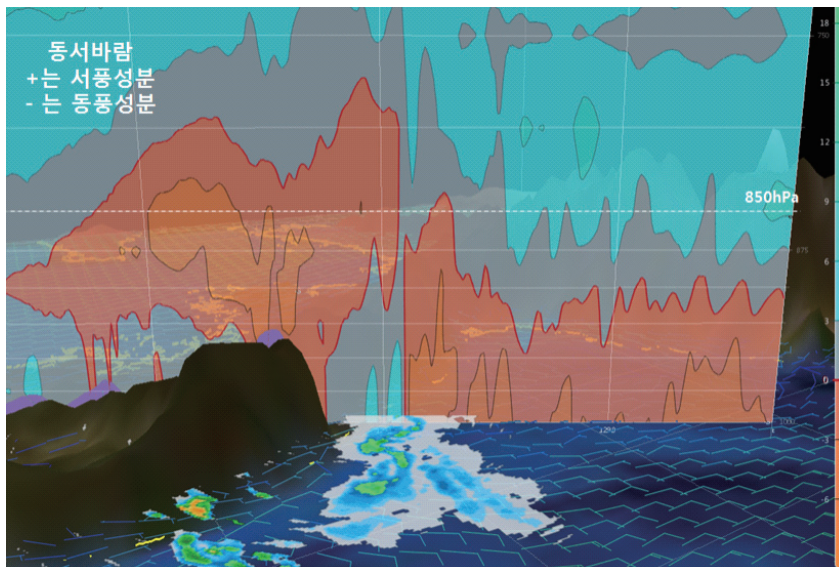


그림 4-6. 2018년 1월 4일 15시 UM 국지모델 분석장 동서바람 연직단면, 레이더영상 CMAX

그림 4-6은 4일 15시 UM 국지모델 분석장의 동서바람 연직단면과 레이더영상을 중첩한 것이다. 동서바람 연직단면에서 주황색 계통의 (-)영역은 동풍성분을, 파란색 계통의 (+)영역은 서풍성분을 나타낸다. 모델의 예상과는 달리 레이더영상에서 강수가 나타나는 지역은 동풍성분과 서풍성분이 교차하는 해상에 위치하고 있다. 이처럼 한기 이류가 강하지 않을 때에도 내륙에서 동해상으로 불어나가는 바람(서풍계열, 종관풍, 국지적인 육풍과 마찰풍이 결합된 바람)과 북동기류가 동해상에서 만나 구름을 발달시킬 수는 있지만 서풍계열의 바람이 더 강한 경우에는 들어오지 못한다.

Key Point!

1. (R형) 11~1월 초순 cP 확장 시 나타나며, 서해안의 기압경도가 동해안보다 강해 북동기류의 강수가 유입되기 어려운 기압 배치이다.
2. (ω 형) 1월 중순~3월 cP 확장 시 나타나며, 동해안의 한기 이류가 강해 북동기류 강수가 발달하며 유입되기 쉬운 기압 배치이다.

4. 3. 2 강수 유입과 육풍과의 상관관계

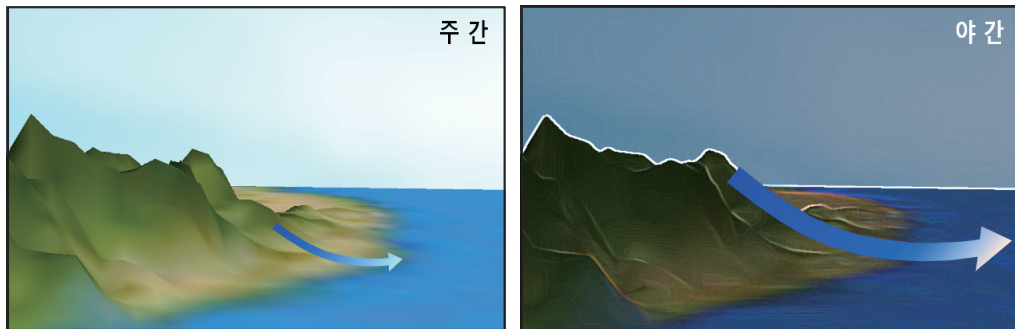


그림 4-7. 겨울철 영동지역에 나타나는 해륙풍(육풍)+산곡풍(산풍)의 일변화 모식도

겨울철에는 주간과 야간에 바다와 육지 사이에 부는 바람(해륙풍)의 양상이 여름철과 달라진다(그림 4-7). 겨울철에는 주간에도 육지의 기온이 해상보다 낮아 육풍이 분다. 야간에는 해수면 온도는 크게 차이가 없지만 육지는 더 냉각되어 육지와 해상의 기온차가 더 벌어지고 육풍은 강해진다. 특히 영동지방에서는 태백산맥에서 부는 산풍이 더해져 야간에 육풍의 효과가 가중된다.

따라서 겨울철 북동기류 유입 시에는 육풍이 종관풍(서풍 또는 북서풍)에 더해져 해안 근처에서 수렴대가 강화되어 강수량이 늘어나기도 하고, 때로는 강수대를 해상으로 밀어내는 힘이 커 해상에서 수렴대는 나타나지만 도달하지 못하는 경우가 발생하기도 한다.

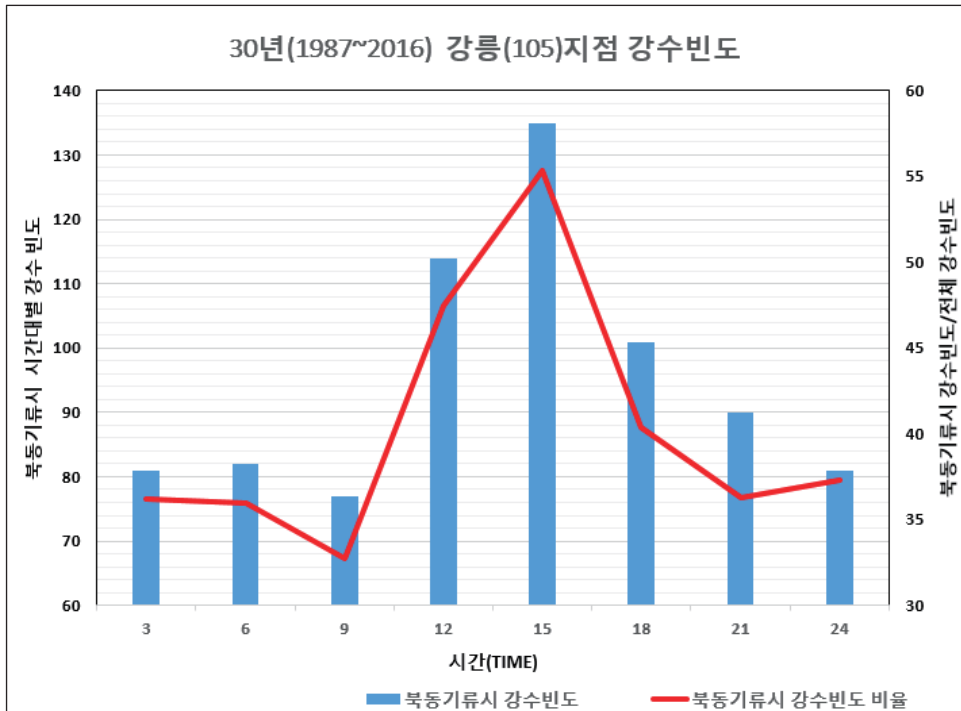


그림 4-8. 30년(1987~2016)간 겨울철(12~2월) 강릉(105)지점 북동기류 시 3시간 0.1mm 이상 강수빈도(파란색 막대)의 북동기류 시 강수일수 비율(빨간 실선)

그림 4-8의 파란색 막대그래프는 강릉지점(105)의 30년(1987~2017)간 겨울철(12~2월) 북동기류 유입 시 3시간 누적 강수량 0.1mm 이상을 기록한 빈도를 나타낸다. 여기서 북동기류에 의한 강수는 강릉지점의 평균 풍향 중 0~110°이거나 330~360° 사이의 바람을 기준으로 하였다(그림 4-9). 이는 동해상에 북동기류가 유입될 경우 마찰에 의해 풍향이 북서방향으로 휘는 효과와 국지풍의 효과를 반영하여 실제로 강릉지점에서 관측하는 풍향을 고려한 것이다.

전체 풍향에 대한 시간대별 강수빈도는 크게 차이가 없었으나 북동기류 유입 시의 강수빈도는 주간에는 높고 야간에는 낮았다. 이는 북동기류 시 강수빈도를 강수가 나타난 모든 경우의 수로 나눈 ‘북동기류 시 강수빈도 비율(빨간색 실선)’을 보면 더 뚜렷하게 나타난다. 특히 육지와 해상의 기온차가 가장 커 육풍이 강한 6~9시에 강수빈도 비율이 가장 낮고, 기온차가 가장 작아 국지적인 육풍이 약한 12~15시에 가장 높은 것을 알 수 있다. 즉, 북동기류에 의한 영동지방 강수는 주간에는 올 확률이 높고 야간에 낮다고 할 수 있다.

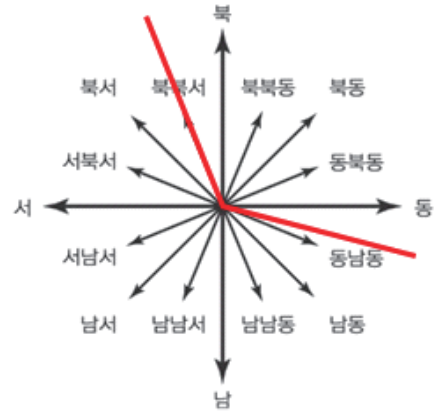
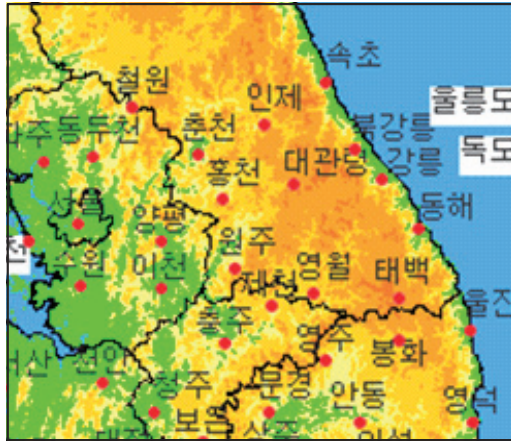


그림 4-9. (좌) 영동지방 지도, (우) 영동지방에 북동기류가 유입될 때 지상에서의 풍향 범위

겨울철 종관풍은 주로 서풍계열의 바람이 강하기 때문에 여름철처럼 중규모 해륙풍 순환이 정량적으로 나타나진 않는다. 하지만 30년간 북동기류에 의한 강수의 통계 자료를 이용하면 육풍의 일변화에 따라 해상에 위치한 수렴대가 유입될지 여부를 살펴볼 때는 도움이 된다.

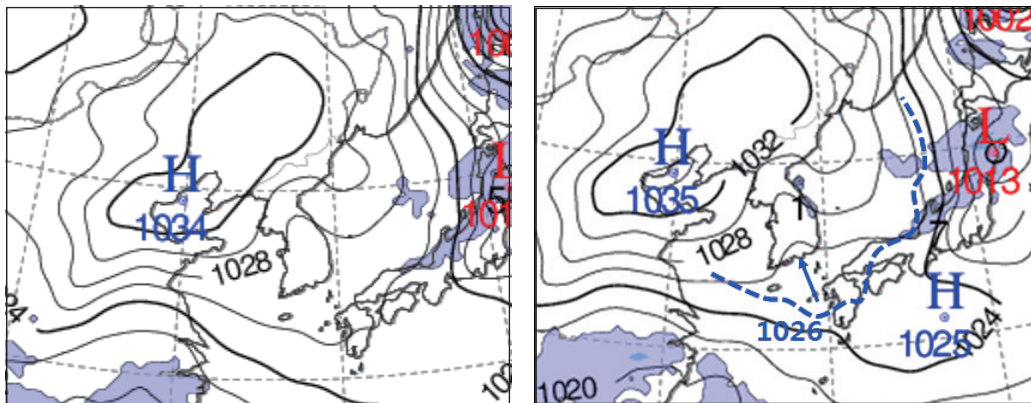


그림 4-10. (좌) 2018년 2월 24일 15시 해면기압 예상장(23일 09시 발표)
(우) 2018년 2월 24일 15시 해면기압 분석장, 파란색 점선은 (좌) 예상장의 1026hPa 등압선

그림 4-10의 UM 전구모델의 해면기압 예상장에서 발해만과 중국북동부에 위치한 대륙고기압의 위치는 모의하고 있으나 분석장과 비교했을 시 남쪽 기압골이 버티고 있는 것과 북쪽 고기압의 강도는 과소 모의하고 있다. 그림 4-11에서는 2월 24일 MODIS RGB 컬러영상과 CAPPI 레이더영상에서 해상의 수렴선(콤마형태) 형성을 잘 보여준다. 레이더 연직단면에서 눈구름은 2~4km까지 발달했다. 시선속도에서 2km 아래는 해안가로 접근(연두색은 시선속도<0, 노란색은 시선속도>0)하고 그 위층은 멀어지고 있으며 동풍 바람벡터를 따라 구름대는 해안으로 점차 접근할 것으로 분석할 수 있다. 실제 하층에서 동풍의 풍속은 강하지 않았지만 해상의 동풍과 해안 근처에서 마찰

에 의해 굴절된 바람과 육풍이 결합된 북서풍이 수렴하면서 모델 예상보다 구름이 발달했다. 그리고 육풍이 약화되는 낮에 북쪽 고기압이 확장하면서 동풍이 강화되어(산맥과 수직인 풍향) 수렴선(해안전선)이 동해안으로 유입되면서 강수가 나타났다(부록/사후분석 4-1 참고).

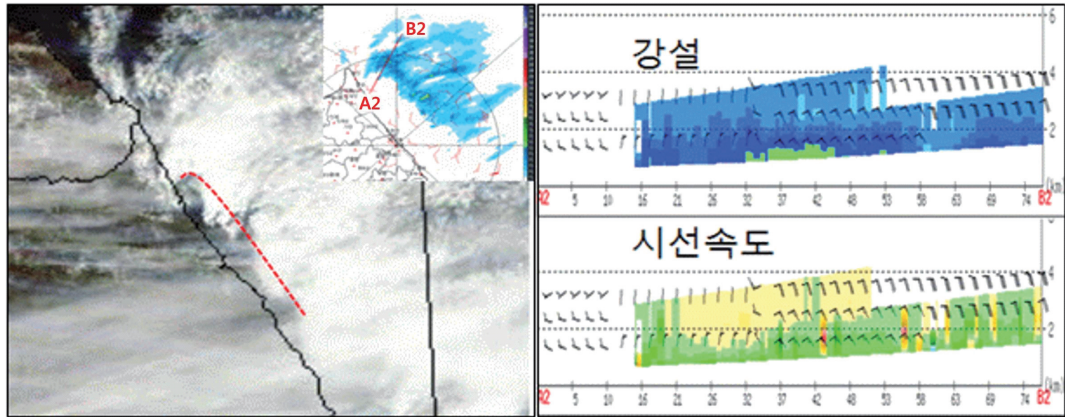


그림 4-11. (좌)2018년 2월 24일 11시 35분 위성영상(MODIS RGB)과 강릉레이더영상(CAPPI) (우상)레이더 강설 연직 단면(A2-B2), (우하)레이더 시선속도 연직 단면(A2-B2)

Key Point!

1. 야간에는 육풍과 산풍이 결합되어 육풍이 강화된다.
2. 주간에는 온도경도가 줄어들어 육풍이 약화된다.
3. 육풍이 종관풍(서풍류)과 결합되어 해상에서 수렴대를 강화시키는 역할을 한다.
4. 강한 종관풍(서풍류)과 결합 시 북동기류와의 수렴대가 해안으로 접근하지 못하게 하는 역할을 한다.

4. 4 눈으로 올까 비로 올까?

4. 4. 1 seeder-feeder 메커니즘 이해와 강수형태

Seeder-feeder 현상은 상층운에서 공급된 빙정이 하층운에서 빙결핵의 역할을 하면서 강수입자를 키우는 것을 말한다. Reinking and Boatman(1986)에 의하면 seeder-feeder 현상이 발생하기 위한 상층운과 하층운과의 최대 거리는 건조도에 따라 다르지만 약 1500m 정도이다.

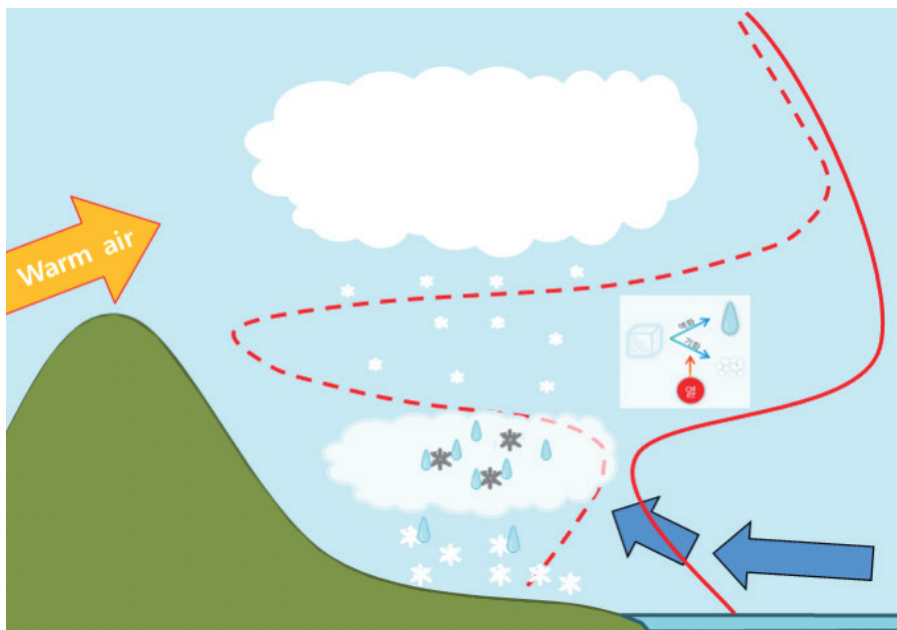


그림 4-12. seeder-feeder를 설명하는 모식도와 연직 기온 분포 (실선은 기온, 점선은 노점온도)

그림 4-12에서 보이듯, 주로 산악지형에서와 같이 상하층에 다른 메커니즘으로 발생한 구름이 연결되지 않고 분리된 상태에서는 상층운에서 내린 강수입자가 하층운을 지나면서 강수입자가 커지고 강수량이 늘어난다. 이 때 상층 기온이 -10°C 이하로 과냉각 수적보다 빙정이 많을 때는 주로 강수입자가 빙정으로 나타난다. 이 강수입자가 빙결핵 역할을 하면서 비교적 과냉각 수적이 많은 하층운 내에서 빙결성장이론에 의해 강수입자를 키우는 역할을 한다.

또한 상층운에서 빙정이 떨어지면서 구름이 없는 건조층을 지날 때 증발에 의해 주변 기온은 떨어진다. 궁극적으로 포화도는 높아지면서 하층의 역전층이 해소되기 때문에 구름이 하층에서 상층까지 발달할 수 있는 연직 기온 분포가 만들어진다. 이러한 미세물리과정은 모델이 예상하는 것보다 북동기류에 의한 강수 시스템을 발달시킬 수

있는 원인이다.

강수형태는 주로 하층운에서 지표까지의 연직 기온 분포에 의존하지만 seeder-feeder 사례에서는 상층에서 빙정이 공급되기 때문에 하층운만 있을 때보다 강수입자 중 빙정의 비율이 높아 모델이 예상하는 것보다 눈으로 내릴 가능성이 높아진다. 저기압이 남부지방으로 통과하는 유형에서 하층은 동풍 계열, 상층은 서풍 계열의 바람이 불 때 종종 나타난다.

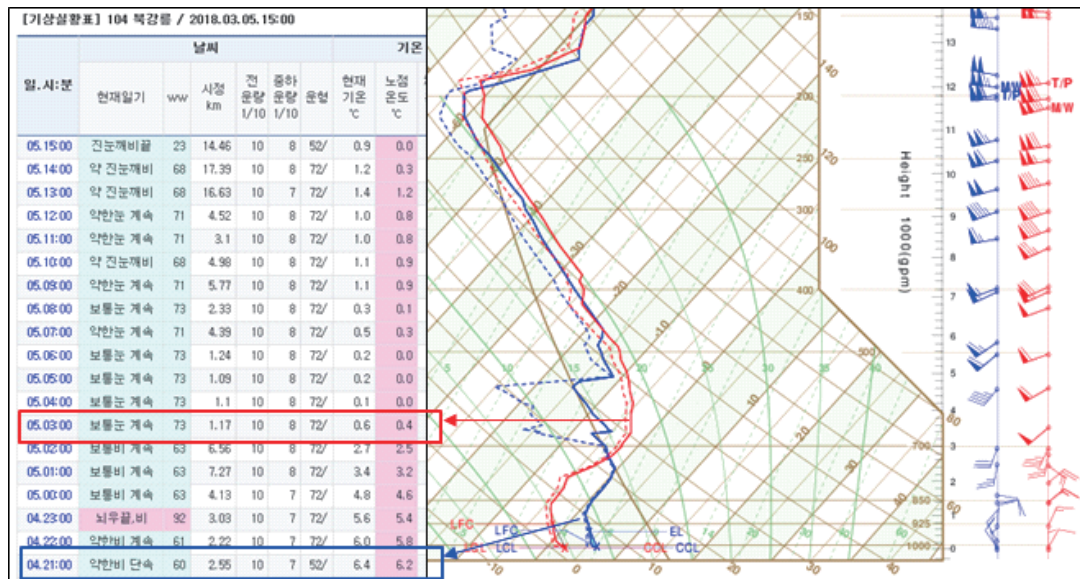


그림 4-13. (좌) 2018년 3월 4일~5일 북강릉 관측실황
(우) 북강릉 단열선도-파란색(4일 21시), 빨간색(5일 03시)

2018년 3월 4일 21시 북강릉 단열선도(그림 4-13 오른쪽, 파란색)를 보면 2km 이상 고도의 온난이류에 의해 발생된 상층 구름과 2km 이하 북동기류에 의한 하층 구름이 분리된 상태에서 강수가 시작되면서 seeder-feeder 시스템이 작동될 수 있는 조건을 만족했다. 당시 빙결고도가 2172gpm으로 높아 강수는 비로 시작되었으나, 3km 이상의 중상층운에서 떨어진 강수가 빙정핵 역할을 하며 하층 강수 구름의 발달을 지원하였고, 강한 강수로 인해 냉각이 가중되면서 강수형태는 빠르게 눈으로 바뀌었다.

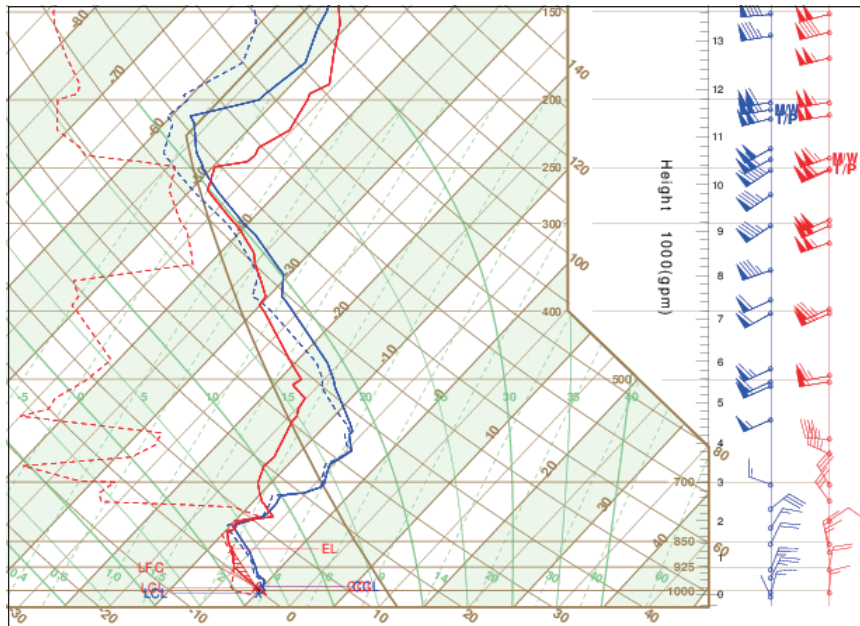


그림 4-14. 북강릉 단열선도, 파란색(2018년 3월 5일 9시), 빨간색(5일 15시)

그림 4-14를 보면 2018년 3월 5일 15시 3km 이상 고도에서 풍향은 북서풍으로 바뀌고 건조역이 유입되면서 강수는 하층의 북동기류에 의한 강수 시스템에 의해 약하게 유지되었다. 상층운에 의한 빙정의 지원이 사라지자 하층의 한기이류는 지속되어 2km 이하의 온도곡선은 전시간보다 더 왼쪽(0°C 이하로)으로 옮겨갔음에도 불구하고 진눈깨비로 내렸다. 구름을 만들 수 있는 구간이 $-10\sim 0^{\circ}\text{C}$ 이내로 과냉각 수적이 많이 분포하고 있고 해풍의 유입으로 계속해서 수증기가 공급되면서 습구온도가 약 1°C 이내임에도 불구하고 진눈깨비 형태의 강수가 내렸다(부록/사후분석 4-2 참고).

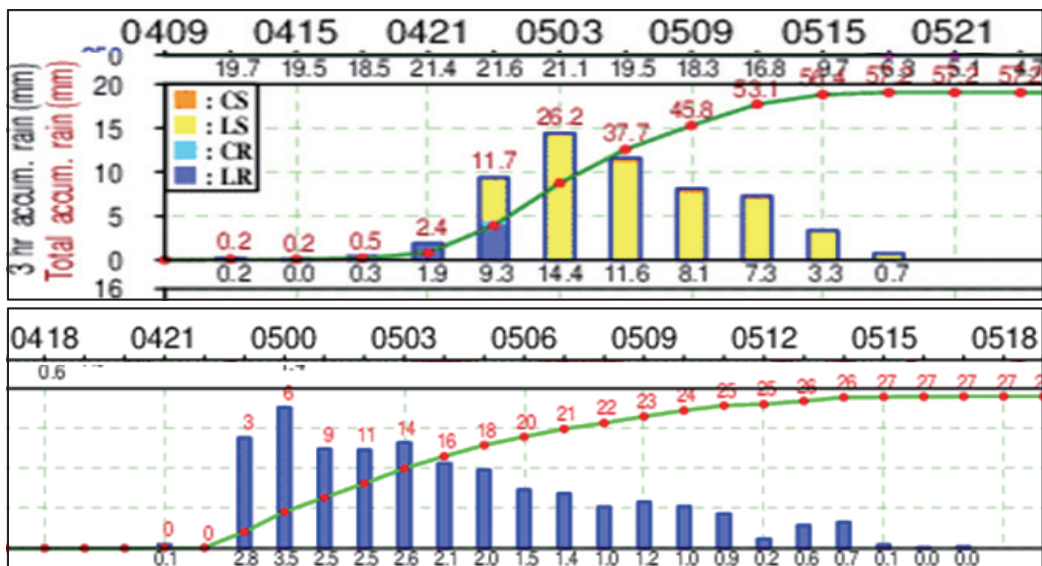


그림 4-15는 2018년 3월 4일 9시에 발표한 UM 전구모델과 국지모델 연직시계열에서 강수량과 강수형태를 모의한 것이다. 강수 형태만 고려했을 때 국지모델은 전구모델에 비해 정확도가 떨어진다. 이는 북강릉 관측지점의 위치는 128.86E인데 비해 국지모델의 북강릉 예측지점은 128.85E로 더 내륙에 위치하고 있고, 전구모델은 128.88E로 더 해상의 영향을 많이 받는 특성 때문이다. 북동기류의 강수 시스템에서는 강수 메커니즘이 시간에 따라 다르고 그에 따라 강수 형태가 달라지기 때문에 모델 자료를 활용하기 전에 모델의 특성을 파악하는 것이 필요하다.

Key Point!

1. Seeder-Feeder 효과란?

상하층 구름이 분리된 상태에서 상층운의 강수 입자가(빙정) 하층운을 지나면서 빙정핵 이론에 의해 강수입자가 커지고 강수량이 늘어나는 현상이다.

2. Seeder-Feeder 메커니즘에 의해 구름이 발달하면, 빙정의 비율이 높아져 하층운만으로 내릴 때보다 눈이 녹지 않고 지상에 도달할 가능성이 높아진다.

4. 4. 2 CAD(Cold Air Damming, 한기축적)의 의미와 역할

CAD(Cold Air Damming, 한기축적)는 대기 하층의 찬 공기가 지형에 의해 갇혀 발생하는 중규모 현상으로, 찬 공기가 갇히는 현상 뿐 아니라 찬 공기 위로 이동하는 기단의 역학에 영향을 주는 현상을 의미한다.

북반구에서 찬 공기의 근원이 되는 지상고기압은 주로 북쪽에 위치한다. 바람은 고기압 중심에서 시계방향으로 불어나가기 때문에 찬 공기는 주로 산맥의 동쪽사면에 부딪혀 쌓이게 되며, 더욱이 찬 공기는 밀도가 커 하층에 낮게 깔려 불기 때문에 큰 저항을 받는다. 우리나라에서는 태백산맥에서 잘 나타나며 영동지방에 CAD가 발생하게 된다. 이때 영동지방에서는 대부분의 경우에 종관규모 강제력(단파, 제트, 온난이류 등)이 더해져 상승운동을 만들고 강수로 이어진다.

영동지방에 CAD가 발생하는 첫 번째 원인은 앞서 언급한 한기이류이다. 중국 북동쪽에 위치한 지상고기압에서 시계방향으로 바람이 불 때 고기압의 남쪽으로 찬 공기가 이류 되는 상황에서 한기축적이 발생한다.

두 번째는 그림 4-16의 왼쪽 모식도에 나타나는 단열냉각에 의한 것이다. 고기압 중심에서 불어온 바람이 지형에 의해 상승하면서 단열적으로 냉각되는데 산맥에 의해 상승류가 감속될 때 CAD가 발달한다. 실제 대기의 기온감률이 건조단열감률보다 더 작다면 상승하는 공기는 주변보다 차가워져 더욱 안정해진다. 따라서 산맥의 사면을 타고 상승하는 공기는 속도가 줄어들어 쌓이게 된다.

마지막으로는 강수 현상이 동반될 경우 수적의 증발이나 빙정이 녹으면서 잠열을 소모하기 때문에 주변 온도를 떨어뜨리는 비단열 냉각에 의한 것이다(그림 4-16, 우).

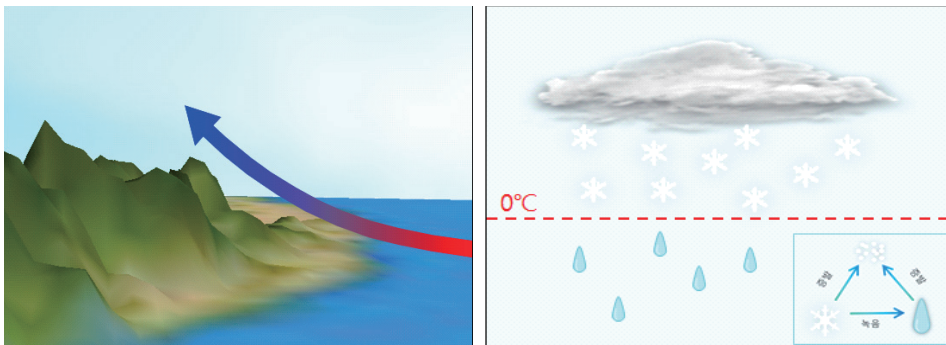


그림 4-16. (좌) 단열 냉각, (우) 비단열 냉각 모식도

영동지방에서 CAD가 발생하는 기본적인 역학은 그림 4-17에 설명하였다.

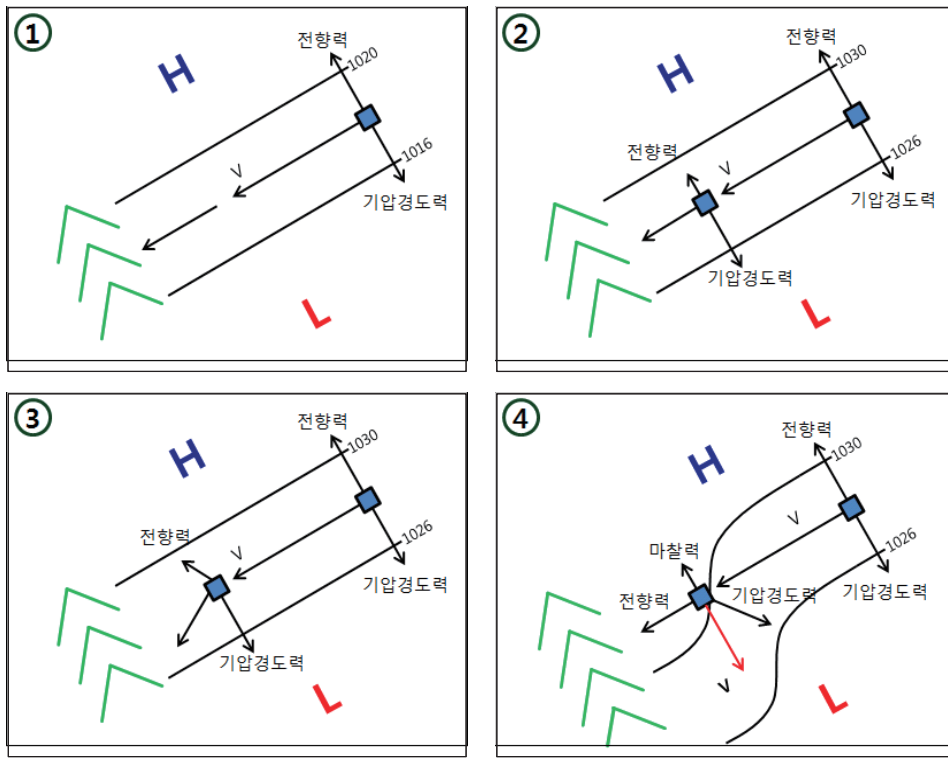


그림 4-17. 태백산맥 동쪽 사면으로 찬 공기가 쌓이는 기본적인 역학

①에서 북동기류가 태백산맥을 향해 불 때 지형에 의한 마찰이 있는 상황에서 프라우드 수(Froude number)¹⁾가 1보다 작다면 하층 바람은 산맥에 막혀서 감속된다. ②에서 풍속이 줄어들 때 전향력이 감소하고 기압경도력과 전향력간의 불균형이 발생한다. ③에서 기류는 기압이 낮은 쪽으로 휘어지게 되고, 찬 공기(북반구에서 북쪽의 고기압 가장자리에서 불어오는 바람은 남쪽에 비해 차가움)가 동쪽 사면에 쌓이게 되면서 중 규모 기압능(남쪽으로 오목한)이 발달한다. ④마찰에 의해 바람은 산맥과 평행하게 불면서 저기압 부근으로 등압선을 가로질러 회전하고 흐름이 비지균적으로 바뀌게 된다. 결국 한기 이류를 증가시키며 역전층을 강화해 장벽제트(barrier jet) 형성에 영향을 미친다.

Bailey et al(2003)은 CAD를 ‘지균조절과정’이라고 설명했는데, 바람이 산맥으로 접근할 때 사면을 타고 상승하는 단열냉각 된 공기의 축적이 지균풍을 줄이는 기압능을 만든다고 했다.

1) 임의의 유체 흐름에서 관성력에 대한 중력의 비로서 $Fr = U^2/Lg$ 로 정의된다. 여기서 U 와 L 은 속도와 길이의 특성 규모이고, g 는 중력가속도이다.

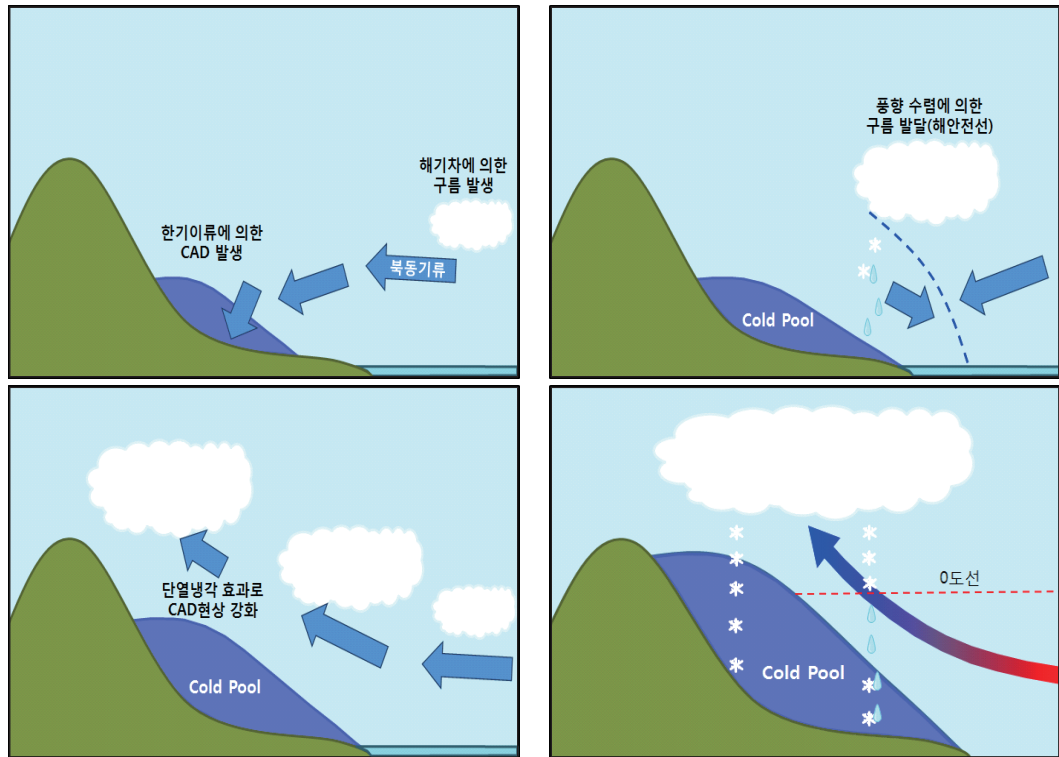


그림 4-18. 태백산맥 동쪽 사면으로 CAD가 발생하면서 강수가 일어나는 과정

그림 4-18은 태백산맥에 찬 공기가 축적되면서 해안전선이 강화되는 과정과, cold pool(CAD 현상으로 태백산맥 동쪽에 쌓이게 되는 찬 공기 덩어리)의 두께가 깊어지면서 그 위로 기류가 상승해 구름을 만들고 강수가 발생되는 과정을 보여준다.

사례를 통해 살펴보면 2018년 3월 15일은 저기압이 빠져나가고 후면으로 고기압이 확장하면서 동해안으로 급격하게 한기가 이류 되어 CAD가 뚜렷하게 나타났다. 그림 4-19는 당시 속초, 북강릉, 대관령 지점의 AWS 시계열 자료이다.

속초에서 16시경 풍향이 북풍으로 바뀌면서 기온이 급감하고 습도가 급격히 올라갔다. 기단이 바뀌면서 기압경도력이 커지고 풍속이 강해져 CAD가 시작되었다. 한 시간 후에 북강릉에서도 같은 현상이 발생했다. 한기축적이 강화되면서 2시간 내에 강수가 시작됐고 19시 이후로 속초 지점의 풍향이 북풍에서 동풍으로 바뀌고, 해안전선이 접근하면서 본격적인 강수가 시작됐다. 또한 동풍이 cold pool 위로 상승하면서 풍상측 산맥까지 구름이 발달하고 강수는 강화됐다.

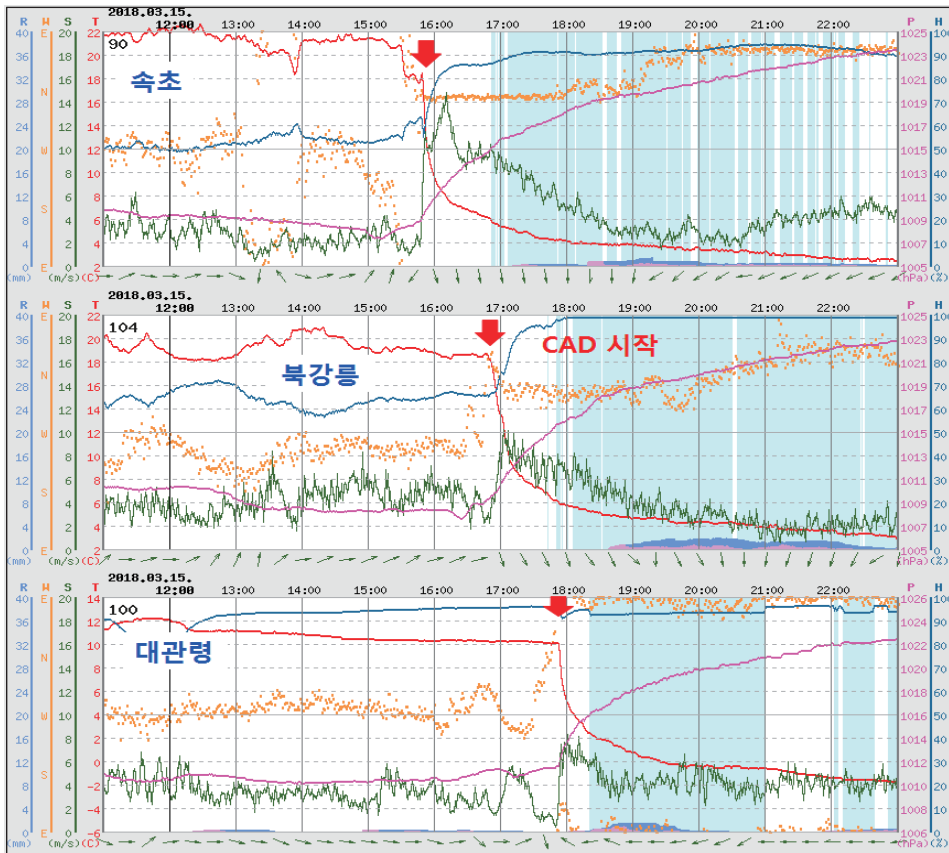


그림 4-19. 속초, 북강릉, 대관령 AWS 시계열

한편 CAD 발생 시에는 강수형태 예보에도 주의가 필요하다. 그림 4-20은 3월 16일 1시의 3시간 누적강수량과 시정·현천계에 나타난 일기현상이다. cold pool의 두께(한기가 쌓여있는 연직 깊이)가 깊은 대관령을 포함한 산간지역에는 눈이 왔지만 해안은 거의 비로 내린 것을 알 수 있다. 즉, CAD가 발생할 때는 연직 온도 분포에 따라 강수 형태를 예보하기가 매우 어렵다는 것을 알 수 있다(부록/사후분석 4-3 참고).

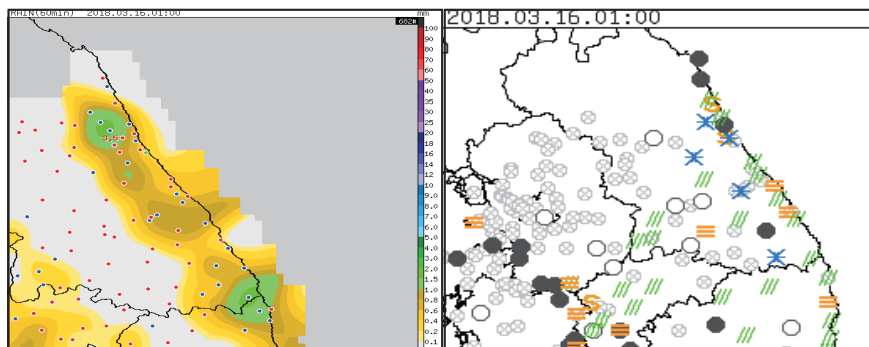


그림 4-20. (좌) 2018년 3월 16일 01시 3시간 누적강수량, (우) 시정·현천계 일기 현상

최근에는 수치모델의 해상도가 증가하면서 CAD 현상에 관한 수치 모의가 개선됐다. 하지만 고해상도 수치모델이라 하더라도 지형 묘사의 정확도가 떨어지기 때문에 1km 이하의 제한된 층에서 만들어진 찬 공기의 깊이와 강도를 정확히 분석하기는 어렵다. 또한 영동지방에서 AWS는 주로 해안이나 산을 중심으로 설치되어 있기 때문에 산 사면에서 한기가 축적되는 것을 관측하기는 어렵다.

더욱이 겨울철 강수의 경우 많은 부분이 온도에 따라 달라지기 때문에 북강릉 한 지점의 고층관측만으로는 분석하기가 어렵다. 특히 태백산맥의 정상에서 해안까지의 거리가 수십km에 불과하고, 수치모델의 해상도 또한 CAD를 포착하기에 충분하지 않기 때문에 CAD 현상이 영동지방에 어떠한 영향을 끼치는지는 더 많은 연구가 필요하다.

Key Point!

1. CAD란? 중국 북동쪽 고기압 확장 시 북동기류가 지형에 막혀 한기가 축적되는 현상
2. CAD는 한기이류, 상승에 의한 단열냉각, 비단열 냉각이 원인이다.
3. CAD가 강화되면 육풍이 강화되고 해안 수렴대를 발달시키는 역할을 한다.
4. Cold pool 위로 기류가 상승하면서 강수구름을 더욱 발달시킨다.
5. Cold pool의 두께에 따라 강수형태가 달라진다.

4. 5 동해안 강수의 유형 분류

4. 5. 1 극저기압형과 중규모저기압후면수렴형

예보관 핸드북(한상은, 2010)의 대설개념모델은 한대제트축을 기준으로 대설의 유형을 6가지로 나누었다. 이 중 동해안 강수를 유발하는 극저기압형과 동해안형에 대하여 상층 한기 중심의 위치 및 그에 따른 하층기압계의 위치와 형태에 따라 극저기압형은 2가지 강수 유형으로, 동해안형은 3가지 강수 유형으로 세분화하였다.

동해안 강수의 첫 번째 유형은 극저기압형으로, 중규모저기압의 발달위치와 영향을 미치는 범위에 따라 한대제트가 제주도 남쪽까지 남하하고 500hPa 절리저기압을 동반하는 극저기압(직접)형과 동해상에서 발생한 중규모 저기압의 후면으로 수렴선이 동해안을 통과 하면서 영향을 주는 중규모 저기압 후면 수렴(간접)형으로 나뉜다.

그림 4-21(좌)는 극저기압(직접)형의 모식도이다. 중·상층 대기의 매우 차가운 공기와 해양의 따뜻한 수온사이에 큰 온도차는 연직불안정대기를 유발하며, 이러한 상·하층 간 큰 온도차는 대설을 유발하는 가장 큰 원인으로 꼽힌다(한상은, 2010). 그림 4-21(우)는 중규모 저기압 후면 수렴(간접)형의 모식도이다. 한대제트가 남하할 때, 제트의 북쪽에 성층권으로부터 하강한 절리된 공기를 동반한다. 잠재소용돌이도가 큰 공기가 산둥반도에서 중부 이남을 거쳐 동해상으로 침강하면서 하층의 저기압성 회전을 강화시켜 동해상에 중 규모 저기압을 발달시킨다. 이 저기압 후면으로 동해안 지역에 한기가 남하함에 따라 동해안 강수가 발생할 수 있다.

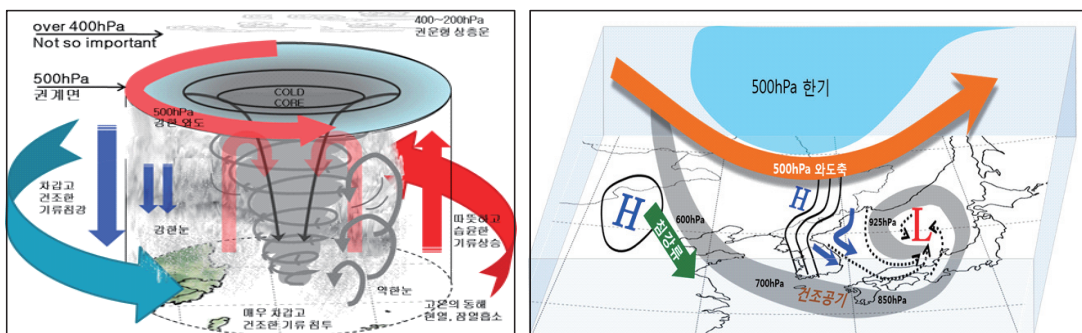


그림 4-21. 동해안 강수의 첫 번째 유형 (좌) 극저기압(직접)형, (우) 중규모저기압후면수렴(간접)형

극저기압(직접)형과 중규모 저기압 후면 수렴(간접)형은 중규모 저기압의 발달 위치와 영향을 미치는 정도에 따라 유형을 구분하기 때문에 발달 메커니즘은 큰 차이가 없다.

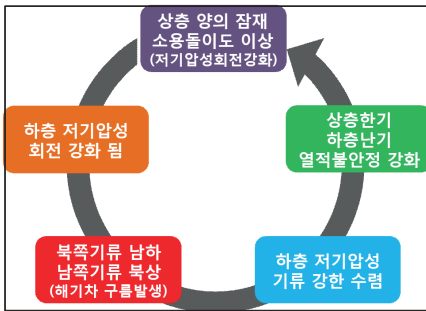


그림 4-22. 극저기압형 강수의 발달 과정

그림 4-22는 극저기압의 발달 메커니즘이다. 상층의 양의 잠재 소용돌이도 이상(anomaly)은 하층의 저기압성 회전을 유도하며 이 저기압성 흐름은 중국 북동쪽의 한기를 남하시키고 남쪽의 난기를 북상시킨다. 대륙의 한기가 남하하며 동해상을 통과할 때 해기차와 하층 저기압성 기류의 수렴으로 구름이 발달하는데, 특히 난기가 저기압성 회전을 하며 한기를 만나는 지역에서 바람이 가장 강하고 수렴이 강하게 일어난다.

해상의 따뜻한 공기와 상층의 매우 차가운 공기로 인한 열적불안정은 대류를 더욱 강화시킨다. 이 경우, 보통 겨울철 강수가 700hPa 이하에서만 발달하는 것과 달리 그림 4-23의 2017년 1월 20일 북강릉 단열선도에서 보이듯이 성층권 공기가 침강한 고도 바로 아래(역학적 대류권계면)까지 포화단열적으로 발달한다. 또한, 강한 대류성 강수가 발달하기 때문에 동해안 강수 중 유일하게 뇌전을 동반하기도 한다.

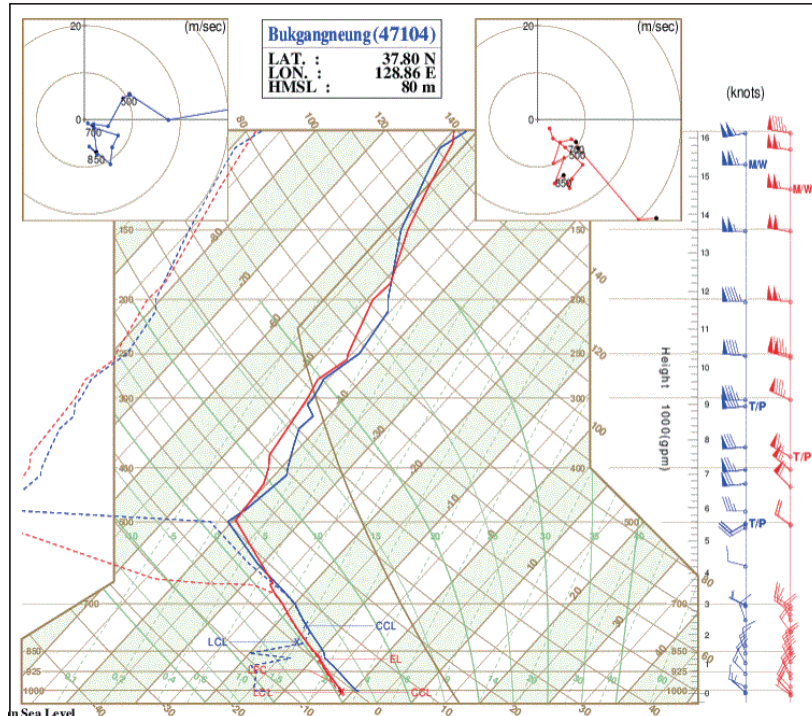


그림 4-23. 북강릉 단열선도 (2017년 1월 20일 09시(파란색), 15시(빨간색))

강수형태는 대기구조가 포화단열선을 따르기 때문에 습구온도 1.2°C 이하와 습구빙결고도가 200m 이하일 때 적설이 나타나고, 강수강도가 1mm/h 이상으로 강할 때는 상층의 차가운 공기를 비단열적으로 하강시키므로 하층 기온이 영상이더라도 기온이 급격히 하락해 눈으로 쌓일 수 있어 주의해야 한다.

강수량은 열적불안정도와 저기압이 얼마나 직접적으로 영향을 주는가에 따라 결정된다. 1000-500hPa 온도차와 700hPa 해기차가 클수록 대류 강도가 강화되고 강수량이 증가한다(그림 4-24). 그러나 저기압의 영향을 받는 시간에 따라 전체적인 강수량이 차이가 날 수 있기 때문에, 각 관측지점에서 받는 저기압의 영향 또한 고려해야 한다.

그림 4-25를 보면 극저기압형에 의한 바람은 1000~700hPa까지 고도별 풍향의 시어가 크지 않고, 500hPa의 한기 중심역을 동반하므로 중층에서는 바람이 약한 반면 하층에서는 수평 온도차로 925~850hPa 사이에서 강한 풍속이 나타난다. 또한 바람과 강수량과의 관계를 살펴보면 하층 바람의 풍속이 셀수록 강수량이 많은 경향을 보이며, 500hPa까지 저기압성 회전을 보이기 때문에 강수계가 영향을 줄 때는 주로 북동기류보다는 북서풍이 나타남을 확인할 수 있다. 만일 하층에서 북동풍이 나타난다는 것은 수렴선이 더 내륙 깊숙이 들어왔다는 것을 의미하므로 해안뿐만 아니라 산지까지 많은 강수량을 고려해야 한다.

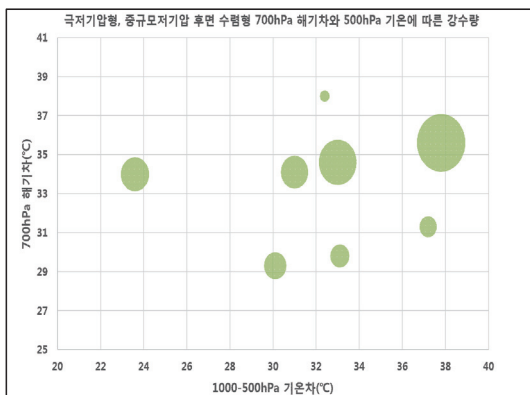


그림 4-24. 극저기압형에 의한 강수량(동심원 크기)과 1000-500hPa 기온차, 700hPa 해기차

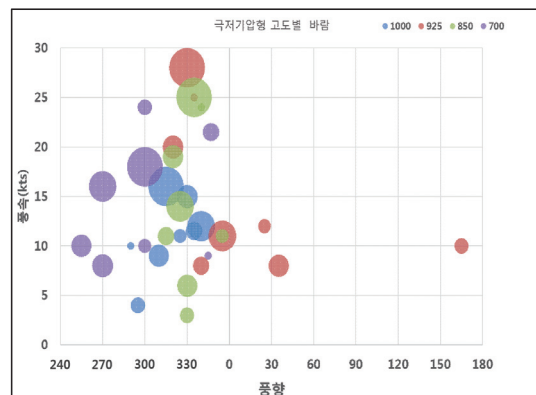
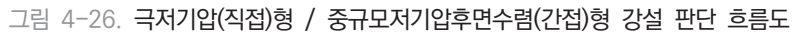


그림 4-25. 극저기압형에 의한 강수량(동심원 크기)과 북강릉지점 고도별 바람



4. 5. 2 북고 남저형(cP확장+남쪽저기압형,남쪽저기압형)

동해안 강수의 두 번째 유형은 북고남저형의 기압배치에서 나타난다. cP가 확장하는 가운데 남쪽저기압이 통과하는 유형과 단순히 남쪽저기압이 발달해서 통과하는 유형으로 나눌 수 있다(그림 4-27).

cP확장+남쪽저기압형에서는 상층의 한기핵이 홋카이도 쪽에 위치하고 후면의 침강류에 의해 중국북동부에 하층 고압부가 발달한 상황에서, 상해에서 규슈지방으로 저기압이 통과하면 우리나라는 북고남저형 또는 북서고남동저형의 기압배치를 이루게 되고 북동류에 의해 한기이류가 강화된다. 이와는 다르게 남쪽저기압형은 이미 고압부가 북한 지역과 동해안으로 위치한 상황에서, 상해 동쪽 해상에서 저기압이 발달해 동진할 때 저기압의 북동쪽으로 기압경도력이 강화되면서 강원영동과 경북북부 지역으로 동풍이 불게 되어 강수가 내리는 유형이다.

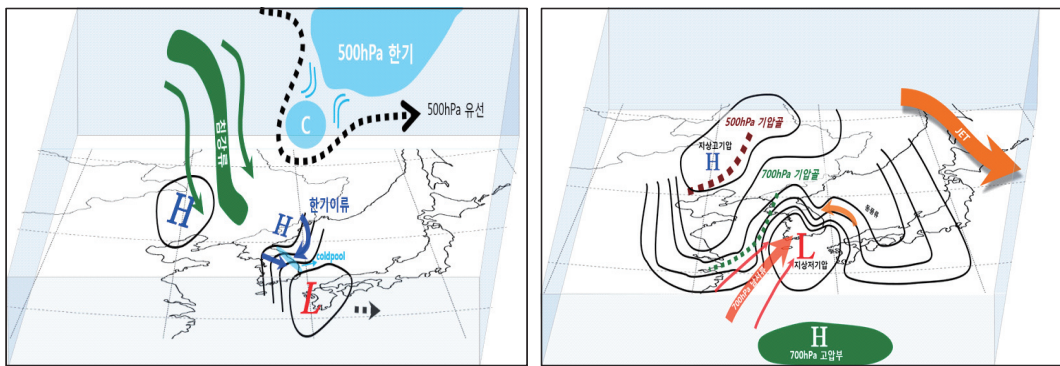


그림 4-27. 동해안 강수의 두 번째 유형 (좌) cP확장+남쪽저기압형, (우) 남쪽저기압형

두 유형은 그림 4-28과 같이 하층 한기이류의 강도와 태백산맥에 수직으로 부는 바람에 따라 구분 할 수 있다. 참고로 850hPa 해기차를 계산하기 위해 북강릉 지점 고층관측의 850hPa 기온과 비교적 해안가의 영향이 적고 한기가 동해상을 통과할 때 관측하는 동해부이 해수온도를 사용하였다.

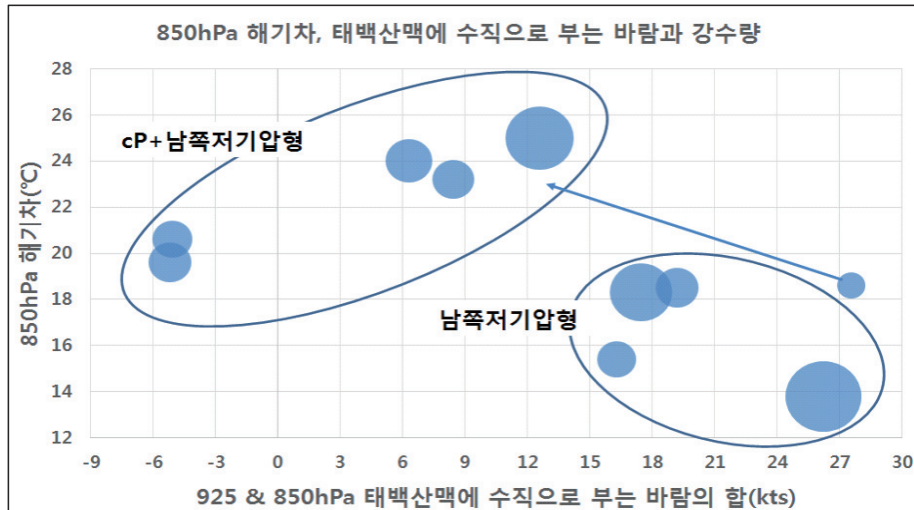


그림 4-28. 850hPa 해기차와 태백산맥(330도 방향)에 수직으로 부는 두 고도(925hPa, 850hPa) 바람의 합과 강수량(동심원의 크기)

cP확장+남쪽저기압형은 해기차가 크고 지형의 영향을 많이 받을 때 강수량이 많다. cP가 확장하면 함경산맥 북쪽으로 축적된 한기가 따뜻한 해상으로 이루어지기 때문에 850hPa 해기차가 19°C 이상으로 크게 나타난다. 강수량이 33.8mm로 가장 컸던 2016년 12월 14일에 해기차 또한 25°C로 가장 크게 나타났다.

또한 cP확장+남쪽저기압형의 강수구역은 산지보다 해안에 집중되어 해안형(이재규, 1999)에 가깝다. 그림 4-29에서 cP확장+남쪽저기압형에 의해 강수가 있을 때, 대관령(산지)의 강수량이 북강릉(해안)에 비해 50% 미만으로 적은 것을 확인할 수 있다.

강수구역이 산지보다 해안에 집중되는 원인은 하층의 풍속이 약하기 때문이다. 한기가 이루어지는 과정에서 한기가 해상을 지날 때 해상에서의 풍속은 강하나 육지에 도달하게 되면 마찰 등의 영향으로 풍속과 풍향이 변한다. 북강릉 지점의 바람 관측자료를 보면(그림 4-31), 850hPa 이하 하층에서 대체로 풍속이 강하지 않고 1000hPa의 풍향은 동풍류가 아닌 북서~북풍으로 나타난다. 또한, 남쪽 저기압의 북서쪽으로 골이 한 반도로 놓인 상황(그림 4-33)에서 태백산맥으로 불어 들어오는 동풍류는 국지풍, 마찰풍 등을 포함한 서풍류와 해안에서 수렴한다. 따라서 cP확장+남쪽저기압형은 수렴역이 주로 해안에 위치하고 있어 북강릉지점에서는 상승운동이 활발하기 때문에 하층 바람은 강하지 않게 나타난다(부록/사후분석 4-4 참고).

남쪽저기압형의 강수량은 해기차보다 저기압의 발달이나 저기압 중심과의 거리에 따른 바람의 강도와 지형의 영향을 많이 받는다. 그림 4-28에서 남쪽저기압형의 850hPa 해기차는 19°C 이하로 cP+남쪽저기압형에 비해 작지만 1.5km 고도 이하에서 태백산맥에 수직으로 부는 바람의 합은 오히려 더 크게 나타났다. 더 자세히 북강릉 지점의 고층바람자료를 비교해보면(그림 4-31, 그림 4-32), 남쪽저기압형은 cP+남쪽저기압형에 비해 1.5km 이하 고도에서 풍속이 15kts 이상으로 강하고 풍향도 동풍 성분이 강하다. 또한 700hPa에서는 남서풍의 영향을 많이 받음을 알 수 있다.

2018년 3월 8일의 사례를 통해 살펴보자. 지상일기도를 보면(그림 4-34), 한반도 북쪽에 고기압(한기)이 위치한 상황에서 비교적 따뜻한 저기압이 남쪽으로 통과하고 있다. 저기압에 의해 1.5km 고도 이하에서는 강한 풍속의 동~남동풍 계열의 바람이 불고 그 위 상공에서는 기압골 전면으로 남서풍 계열의 바람이 불면서 순전(veering)이 일어났다. 만약 이때 태백산맥 풍상측에 한기가 축적되었다면 불어 들어오는 남동풍이 한랭한 공기위로 상승하기 쉬워져 강수량이 늘어날 수 있고 강수형태도 눈으로 바뀌기 쉽다(부록/사후분석 4-2 참고). 따라서 이 사례에서는 그림 4-30에서 보는 것처럼 강수구역이 북강릉과 대관령이 강수량이 큰 차이가 없어 산지와 해안의 강수량은 구분되지 않는다. 하지만 2019년 4월 19일 사례와 같이 해안에는 비로 내리지만 800m 이상의 고도에서는 눈으로 쌓일 수 있기 때문에 강수량을 고려해서 습구온도와 925hPa 기온을 고려하여 적설을 예보해야 한다.

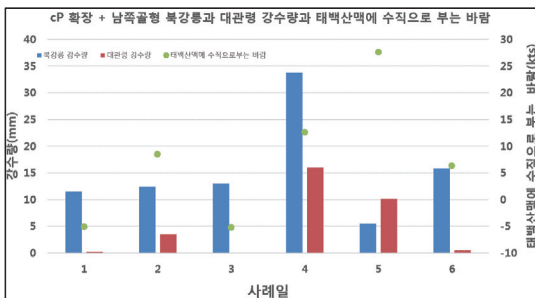


그림 4-29. cP확장+남쪽저기압형의 북강릉(파란색), 대관령(빨간색)의 강수량과 태백산맥에 수직으로 부는 바람의 합

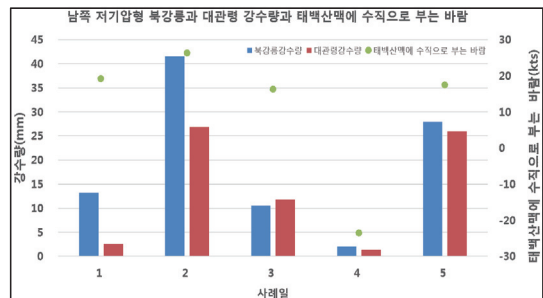


그림 4-30. 남쪽저기압형의 북강릉(파란색), 대관령(빨간색)의 강수량과 태백산맥에 수직으로 부는 바람의 합

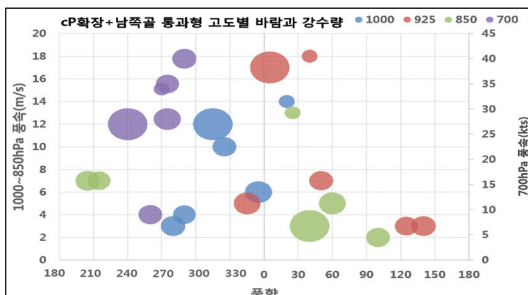


그림 4-31. cP+남쪽저기압형의 고도별 바람과 강수량(동심원의 크기)

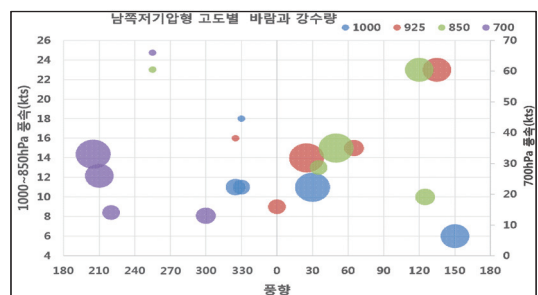


그림 4-32. 남쪽저기압형의 고도별 바람과 강수량(동심원의 크기)

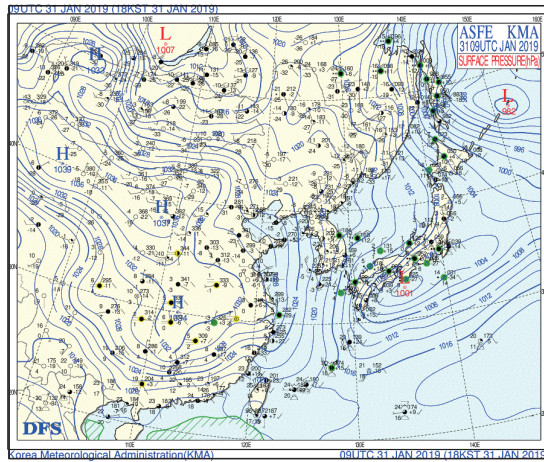


그림 4-33. 2019년 1월 31일 18시
지상일기도(cP확장+남쪽저기압형)

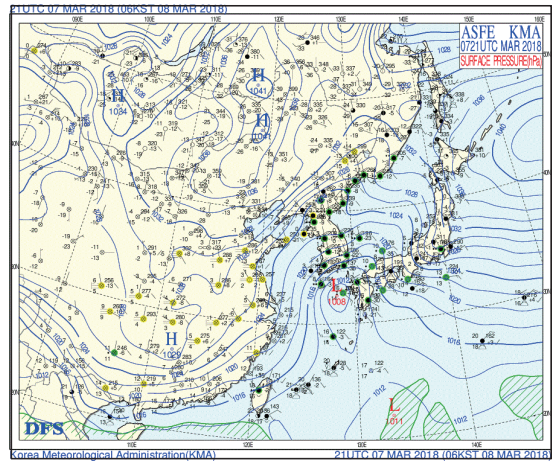


그림 4-34. 2018년 3월 8일 06시 지상일기도

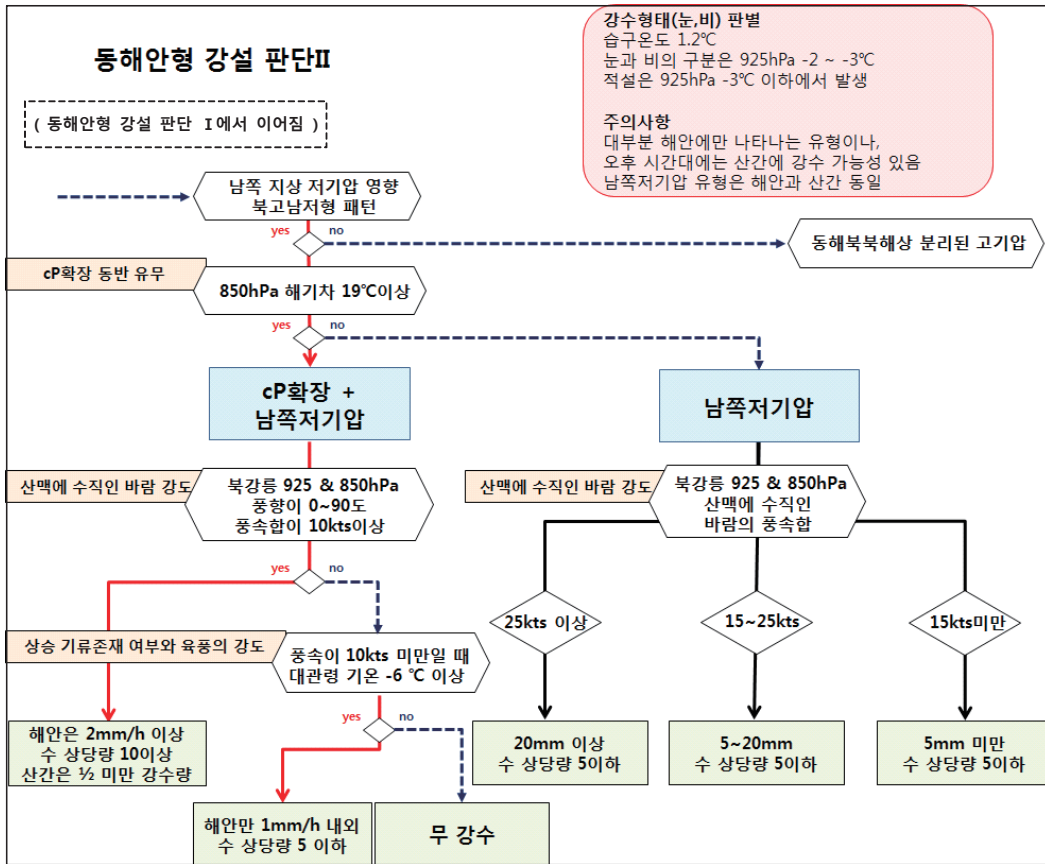


그림 4-35. cP확장+남쪽저기압형 / 남쪽저기압형 강설 판단 흐름도

4. 5. 3 단순 고기압확장형(cP확장형)

동해안 강수의 세 번째 유형은 남쪽으로 통과하는 저기압의 영향을 받지 않을 때 북쪽에서 대륙고기압 확장에 의해 동풍기류가 유입되어 내리는 유형이다.

이 유형은 남쪽의 저기압이 그림 4-36의 모식도처럼 일본 동쪽으로 멀리 위치하거나 그림 4-39의 일기도처럼 동중국해 해상의 약한 골 형태로 있어, 남쪽 골의 영향은 거의 받지 않으며 중국 북동쪽에서 확장하는 대륙고기압의 영향을 받는다. 따라서 925hPa과 850hPa에서 북동풍의 바람이 분다(그림 4-37).

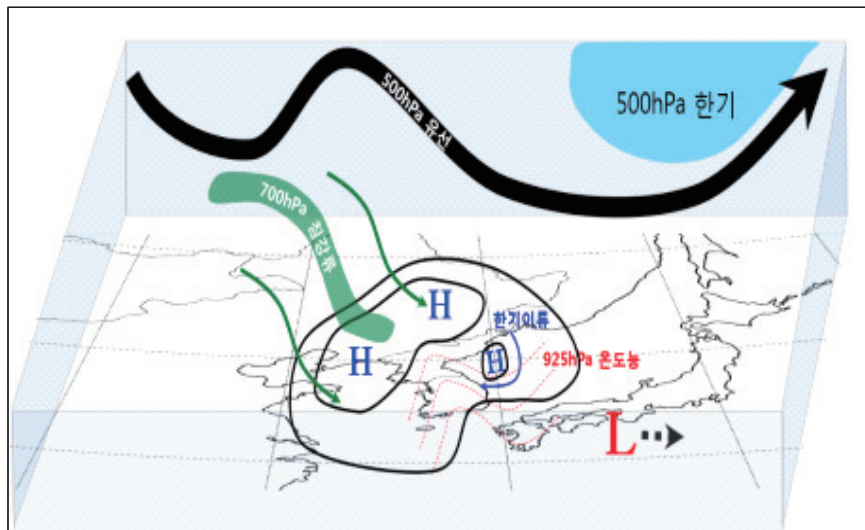


그림 4-36. 동해안 강수의 세 번째 유형 (cP확장형)

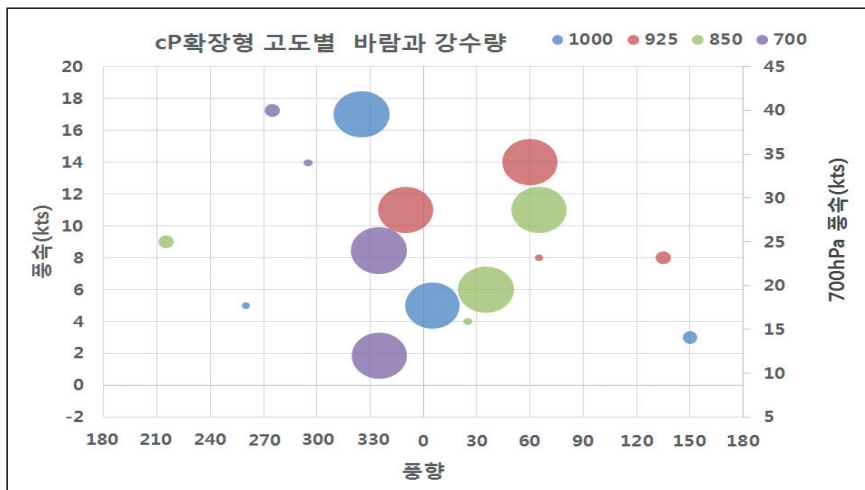


그림 4-37. cP확장형 사례의 고도별 바람과 강수량(동심원 크기)

cP확장형의 강수량은 해기차와 동해안으로 유입되는 하층 북동풍의 강도이다. 참고로, 북강릉 고층관측자료의 바람은 강수시 상승운동에 의해 약화되기 때문에, 동해안으로 유입되는 하층 북동풍(북동기류의 종관풍)의 강도는 동해부이에서 관측한 태백산맥에 수직으로 부는 바람을 사용하였다. 그림 4-38을 보면, 강수를 기록한 경우 850hPa 해기차는 19°C 이상으로 충분히 컸지만 강수량이 해기차와 비례하여 증가하지 않았다. 오히려 동해안으로 유입되는 종관풍의 강도가 강할수록 강수량이 증가했다. 이는 cP확장형이 앞서 극저기압형이나 남쪽의 저기압을 동반하는 유형과 다르게 종관적인 강제력보다는 지형에 부딪히는 기류의 상승에 의해 주로 강수가 발달하기 때문이다. 결론적으로 cP확장형에서는 해기차가 19°C 이상으로 충분히 크다면 주로 북동기류의 세기에 따라 강수량이 결정된다.

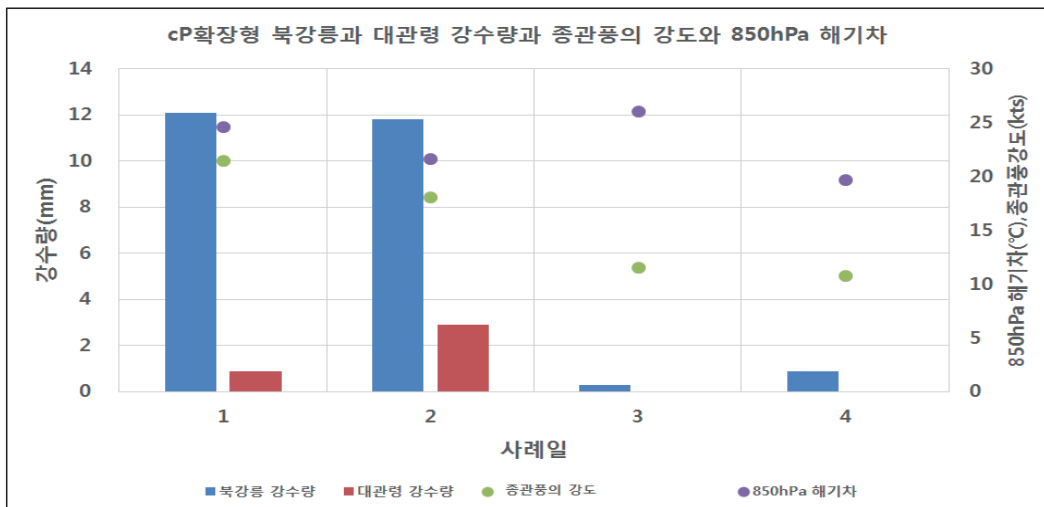


그림 4-38. cP확장형에 의해 북강릉과 대관령 지점에서 관측된 강수량과 850hPa 해기차, 동해상에서 유입되는 북동기류 종관풍 강도

특히 cP확장형은 국지풍의 영향을 많이 받기 때문에 강수 시각이 육풍이 강화되는 새벽 인지, 약화되는 밤인지에 따라 강수량이 달라질 수 있다. 2019년 2월 14일(그림 4-39, 부록/사후분석 4-5 참고)의 경우, 내륙의 기온이 많이 하강하는 새벽 시간에 북동기류가 유입되었다. 그러나 그림 4-40의 연직 단면에서처럼 육풍이 강하게 유지되면서 최하층에 서풍기류가 붙어 수렴역이 해상에서 발생하였고 강한 강수대가 북강릉으로 유입되지 않아 예상보다 강수량이 적었다. 낮이 되면서 육풍이 약화되자 동풍이 유입되면서 풍상측 산지에 약하게 눈이 내렸다. 만일 이 사례에서 동풍이 더 약하거나 서풍이 더 강할 경우 강수가 아예 없었을 수 있어서 육풍의 강도에 따라 강수가 오지 않은 사례에 대한 추가 연구가 보강 되어야 한다.

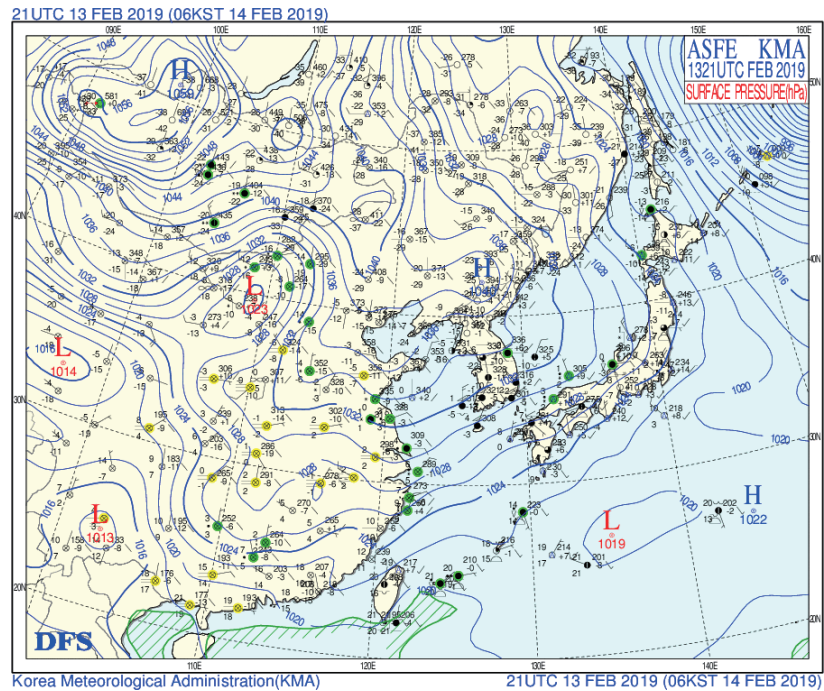


그림 4-39. 2019년 2월 14일 06시 지상일기도

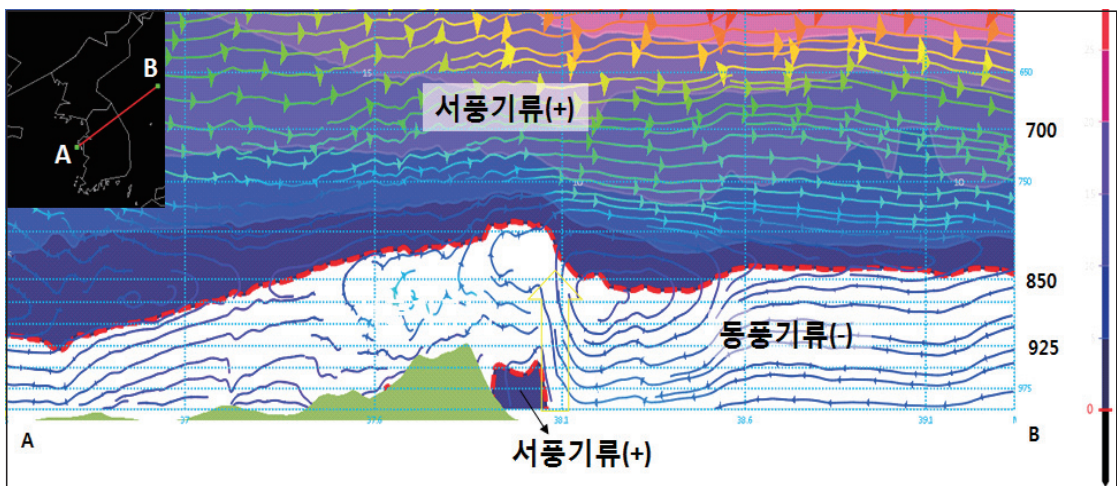


그림 4-40. 2019년 2월 19일 09시 동서/남북 바람 연직흐름도 분석장 (흰 영역은 동풍기류, 색칠된 영역은 서풍기류)

동해안형 강설 판단 III

(동해안형 강설 판단 II에서 이어짐)

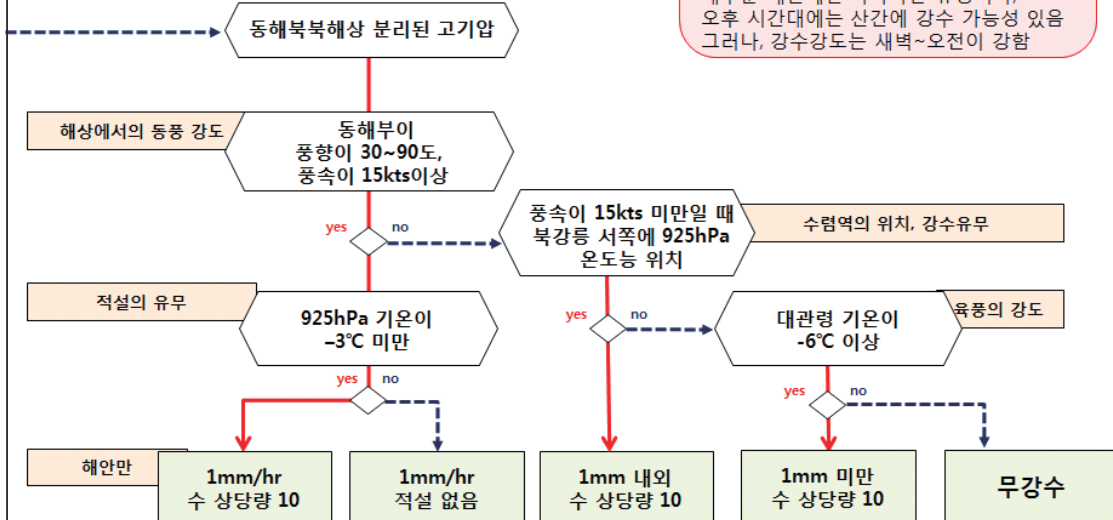


그림 4-41. cP확장형 강설 판단 흐름도

참고문헌

1. Alec S. Bogdanoff, 2006: Cold air Damming in the Appalachian Mountains
2. Bailey CM, hartfield G, Lackmann Gm, Keeter K, Sharp S. 2003. An objective climatology, classification Scheme, and assessment of sensible weather impacts for Appalachian cold-air damming. Weather Forecast 18: 641-661.
3. Douglas Schneider and Michael Moneyppenny, NOAA/National Weather Service Forecast Office Raleigh, North Carolina
4. 한눈에 보는 대설개념모델, 2011: 예보관 핸드북 시리즈 1. 기상청 예보기술팀.
5. 홍미래, 이재규, 2016: 수렴운이 해안선 안으로 진입하는 사례와 해안선 밖에 머무르는 사례에 관한 유적선 비교 연구, 한국 기상학회 가을학술대회 초록집
6. 이재규, 1999: 대관령과 강릉지역의 강설량 차이를 일으키는 종관 구조: 사례연구. J. Korean Meteor. Soc., 40(4), 369-380.
7. 조구희, 권태영, 2012: 영동지역 겨울철 강수와 연관된 산악효과와 해양효과, J. Korean Meteor. Soc., 22(1), 57-71.
8. 박정민, 강원지방기상청 예보과: 강원 영동지방 겨울철 기상분석 강수 예보

[부록] 동해안형 강수 사후분석 목록

1. 사후분석 4-1 2018년 2월 24일 사례: '저기압 통과 후 약한 북동풍에 의한 강원영동지방 강수'
2. 사후분석 4-2 2018년 3월 4~5일 사례: '저기압 남부지방 통과 시 강원영동지방에 많은 비(눈)이 온 사례'
3. 사후분석 4-3 2018년 3월 15~16일 사례: '북동기류에 의해 기온 급감하면서 영동지방에 내린 강수'
4. 사후분석 4-4 2019년 1월 31일 사례: '남쪽골통과 후 바로 cP 확장될 때 동해안은 대설 주의'
5. 사후분석 4-5 2019년 2월 14일 사례: '단순한 cP확장의 경우 강수시간과 육풍강도가 중요'

거주 예보 가이드스

5. 습구온도를 이용한 강수형태 예보



5. 습구온도를 이용한 강수형태예보

Why?

습구온도는 보존성이 강하여 쉽게 변하지 않으며, 흐린 날씨에서 강수대가 접근할 때 강수 형태를 판단하는데 중요한 지표이다. 실제 사례를 바탕으로 습구온도가 강수형태와 기온변화에 어떤 영향을 주는지 알아보고자 한다.

5. 1 습구온도의 정의

습구온도는 현재의 공기가 수증기 공급에 의해 포화되었을 때의 온도이다.

대기가 포화되지 않은 상태에서는 물이 증발한다. 물이 액체에서 기체로 증발할 때 열을 흡수하는데 이 열을 기화열이라고 하며, 이 증발과정을 통해 대기가 열을 빼앗기기 때문에 기온은 떨어진다. 따라서 100% 포화되지 않은 대기에서는 기온과 이슬점온도 사이에 습구온도가 위치한다.

물이 액체에서 기체로 바뀔 때 기화열은 약 540cal/g 이며, 고체에서 액체로 바뀔 때 용해열은 약 79cal/g 이다. 구름이 만들어지고 강수과정이 나타나는 지구 대류권에서 기화열은 용해열보다 중요하게 다루어진다. 높은 기온에서는 함유할 수 있는 수증기량이 많은데 반해 영하의 낮은 기온에서는 대기 중에 함유할 수 있는 수증기량이 극히 적기 때문이다.

5. 2 습구온도계의 원리

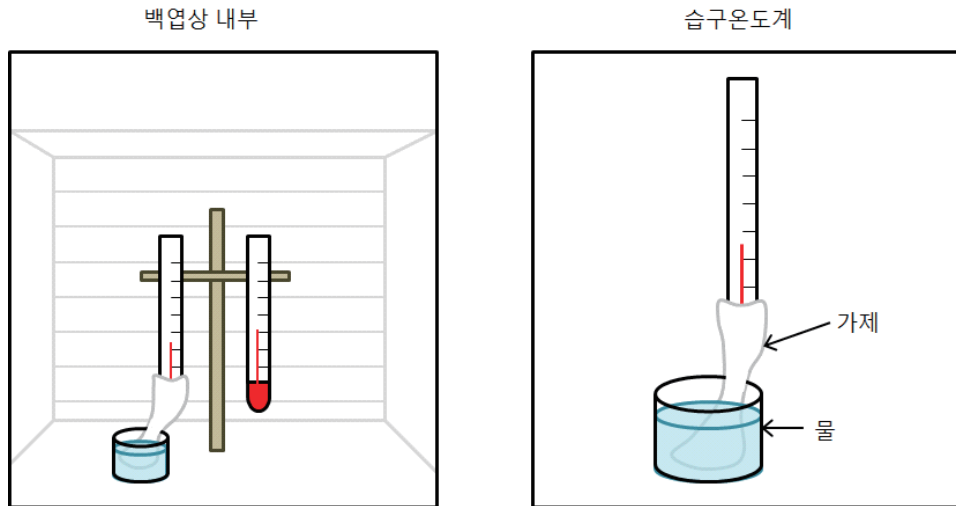


그림 5-1. 백엽상 내부의 습구온도계 모형 (좌) 백엽상 내부 (우) 습구온도계

그림 5-1과 같이 백엽상에 놓여있는 습구온도계를 생각해 보자. 이 습구온도계 하부에 위치한 물통은 물을 온도계에 공급해주고 있다. 공기가 건조한 상태라면 계속해서 증발이 일어날 것이며, 증발이 멈추기 위해서는 백엽상 내부의 공기가 포화상태에 이르러야 한다.

그러나 백엽상은 외부와 공기가 통하고 있기 때문에 완전한 포화상태에 이르지 못하고 끊임없이 일정한 증발이 일어날 것이다. 공기가 건조할수록 증발량이 많아 열을 많이 빼앗기므로 습구온도는 기온과 큰 차이가 나타난다.

5. 3 실제 대기에서는...

이런 원리를 실제 대기에서 생각해 보자.

백엽상에서 물의 공급원이었던 물통은 실제 대기에서 비를 포함하고 있는 구름으로, 물통에 연결된 가제는 구름에서 떨어지는 강수로 가정하자.

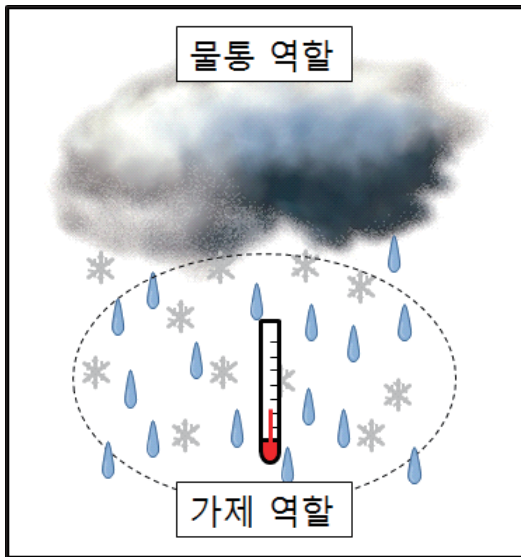


그림 5-2. 강수현상과 관련한 습구온도의 원리 모식도

그림 5-2와 같이 강수가 내리는 상황이라면, 물통의 역할을 하는 구름에서 가제의 역할을 하는 강수가 대기로 물을 계속 공급한다. 이 때, 건조한 대기에서는 강수가 내리면서 증발할 것이다. 강수가 내리기 시작하는 시점에는 대기가 건조한 상태이기 때문에 많은 증발이 일어나면서 기온이 급격히 떨어진다. 그러나 강수가 지속적으로 내리게 되면 상대습도가 100%에 가까워지면서 더 이상 증발이 발생하지 않아 기온의 변화가 없어진다.

이와 같이 빗방울이 구름에서 지표로 떨어지는 과정은 마치 습구온도에서 온도계 아래에 놓인 물통과 가제의 역할과 같다고 볼 수 있다

한편 강수가 있을 때, 증발과정에 의해 대기가 열을 빼앗기므로 기온은 떨어지지만 대기 중 수증기의 양은 증가한다. 따라서 처음 강수가 시작할 때는 기온과 이슬점온도의 차이가 클 수 있지만, 지속적으로 강수가 내려 대기가 포화되는 시점이 되면 결국 기온과 이슬점온도는 같아지게 된다.

앞서 말했듯이 기온은 강수 시 증발과정에 의해 크게 변화한다. 그러나 습구온도는 강수에 의한 증발율을 고려한 온도이다. 즉, 충분한 물 공급에 의해 포화된 상태를 가정한 온도이므로 외부로부터 열 공급이 없다면, 강수과정에서 습구온도는 대기가 건조한 상태든 습윤한 상태든 변하지 않는다.

5. 4 습구온도의 일 변동성

대기가 정체된 상태에서 외부와의 열 교환이 크지 않다면 습구온도는 큰 변동성이 없다. 그러나 맑은 날일 경우 태양 일사가 강하기 때문에 기온이 크게 상승한다. 이 때 상대습도에는 변화가 있겠지만 대기 중 수증기 양은 크게 변하지 않는다. 결국 기온이 상승하는 오전~오후에 기온 상승에 따라 습구온도 역시 상승하고, 반대로 오후에서 밤 시간에 기온이 떨어지게 되면 습구온도 역시 떨어진다.

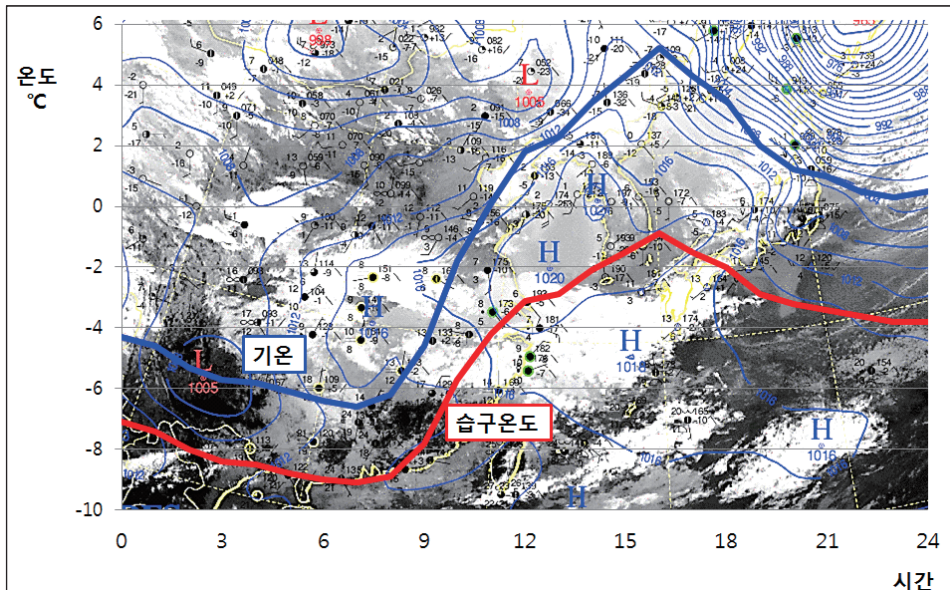


그림 5-3. 2018년 3월 2일 서울의 기온(파란색)과 습구온도(붉은색) 분포도, 바탕은 2일 12시(kst) 지상일기도와 적외영상

그림 5-3은 고기압의 영향 하에 맑고, 바람이 약한 날씨를 보이는 상황에서 기온과 습구온도의 일 분포를 보여준다. 습구온도는 기온과 비교 시 일 중 변화 폭은 작지만, 기온과 마찬가지로 이른 아침시간에 가장 낮고 오후에 가장 높다. 수증기의 양에는 변화가 없더라도 태양 일사 가열에 따른 기온의 변화는 습구온도의 변화를 나타내기 때문이다.

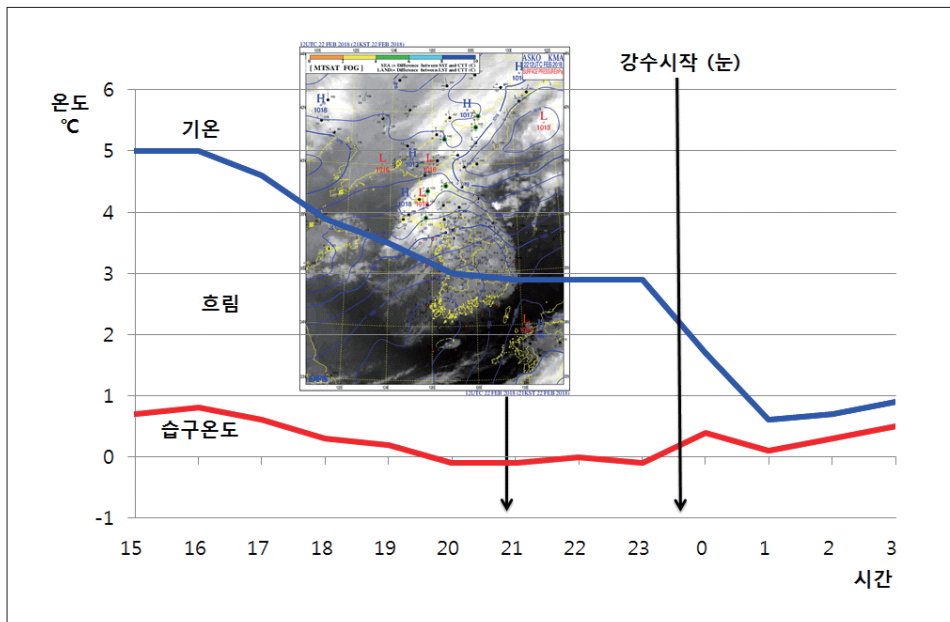


그림 5-4. 구름이 끼고 비(눈)가 내린 날씨의 기온과 습구온도 변화
(2018년 2월 22일 15시에서 23일 03시까지의 서울의 기온과 습구온도)

그림 5-4는 저기압의 영향을 받는 상황에서 습구온도와 기온의 변화를 보여주는 그래프이다. 구름이 덮여 있는 날씨에서는 가열과 냉각의 효과가 작기 때문에 기온의 변화 역시 크지 않고 따라서 습구온도의 변화도 크지 않다. 그러나 시간이 지나 강수가 시작되면 강수에 의한 증발이 발생하고, 이에 따라 기온은 점차 내려간다. 어느 정도 습도가 증가하면 증발율이 감소함에 따라 지표로도 강수가 떨어지게 된다. 그러나 습구온도의 경우에는 강수시작과 상관없이 큰 변화가 없다.

즉, 습구온도는 구름이 덮여 있고 강수가 내릴 수 있는 상황에서 변화가 작기 때문에 비가 올지 눈이 내릴지 강수형태를 판별하는데 효과적이다.

Key Point!

흐린 날씨에서 습구온도는 낮에 약간 올라가고 늦은 오후에는 약간 떨어지지만, 야간에는 유지되는 특징이 있다.

5. 5 강수형태 예측에 효과적인 요소

눈과 비를 구분하는 강수형태 예측에 가장 많이 활용해 왔던 요소는 빙결고도다. 빙결고도가 지표와 같으면 대기 전체가 영하의 기온이므로 당연히 눈이 내릴 것이다. 하지만 빙결고도가 지표보다 높으면 영상의 기온층이 어느 정도인지가 중요하게 고려되어 왔다. 또 온도와 관계된 층후(thickness)를 이용한 강수형태 판별도 많이 시도해 왔다. 그러나 이런 방법들은 큰 문제점이 있다.

첫째, 대기가 건조한 상태에서 강수가 시작되면 기온이 급격히 떨어지기 때문에, 강수가 발생하기 전, 발생시점, 지속된 후의 시점 등 시간변화에 따라 기온의 변동성이 크므로 빙결고도(0℃ 고도) 또한 급격한 변화를 보인다. 시시각각 변하는 기온을 기준으로 강수형태를 예측하는 것은 너무 많은 오차를 내포하는 것이다.

둘째, 강수가 나타나는 상황이라도 대기의 기온 구조는 불안정(상층으로 갈수록 기온이 급격히 감소) 또는 절대안정(상층으로 갈수록 기온이 오히려 올라가는 현상)의 형태가 모두 나타날 수 있다. 따라서 상황에 따라 빙결고도나 층후는 크게 달라질 수 있다. 심지어 변동성이 적은 편인 습구빙결고도 또한 표 5-1과 같이 눈과 비 구분에 활용하는 데 상당한 어려움이 있다.

표 5-1. 포화되었을 때의 빙결 고도인 습구온도 0℃의 고도에 따른 강수유형(중급 예보관 훈련기술서 2012)

습구 빙결 고도	강수유형
930m 이상	거의 대부분 강우, 강설은 드물
620-930m	대부분 강우, 강설은 기대 안됨
310-620m	지속적으로 비에서 눈으로 바뀜
300m 이하	대부분 강설, 다만 가끔 경미한 강우

이런 문제점을 최소화할 수 있는 것이 지상의 습구온도이다.

앞서 설명한 강수과정에서 생기는 급격한 기온 변화와 시스템별 기온 구조의 특징을 종합해서 고려할 때, 지상의 습구온도는 강수형태 판별에 매우 유용하다. 지상으로 공기의 이류가 크게 없는 상태라면, 습구온도는 포화되기 전까지 변동성이 작기 때문이다.

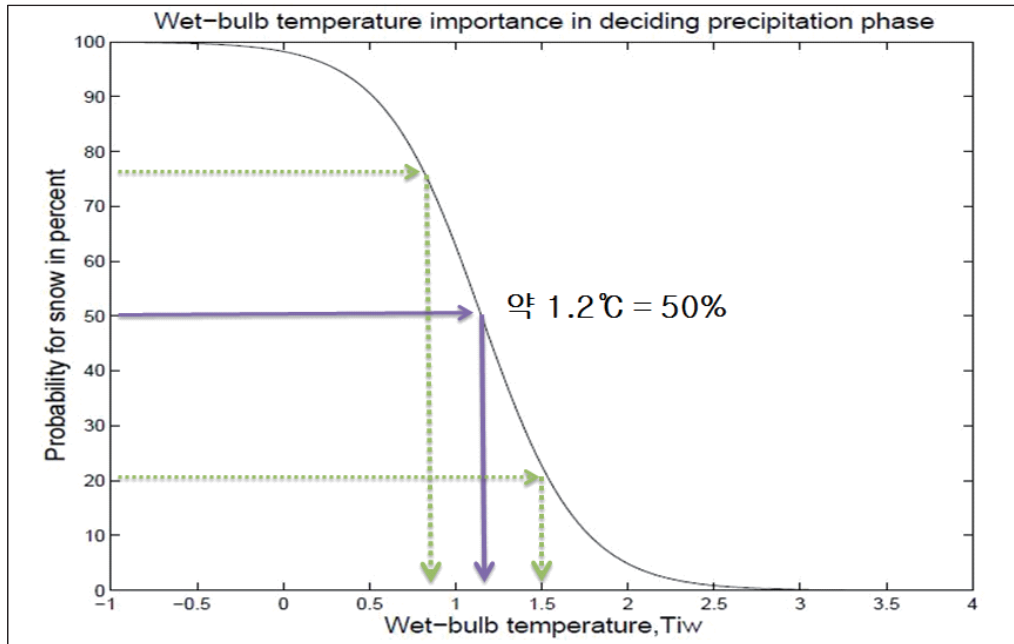


그림 5-5. 지상의 습구온도 분포에 따른 강설 확률(Häggmark and Ivarsson, 1997)

그림 5-5는 강수가 내리는 상황에서 지상의 습구온도에 따른 눈이 내릴 확률을 보여주는 그래프이다. 이 그래프에서 습구온도 1.2°C는 눈과 비가 내릴 확률이 각각 50%가 되는 기준온도이다. 습구온도를 1.2°C에서 위아래로 0.3°C씩만 변화시켜도, 0.9°C에서는 눈으로 내릴 확률이 약 80% 부근까지 이르는 반면 1.5°C에서는 비가 내릴 확률이 약 80%로 높아진다.

즉 습구온도는 1.2°C를 기준으로, 작은 온도변동에도 눈, 비 형태에 대한 확률이 민감하게 반응하므로 강수형태를 결정하는 변별력이 가장 큰 기상요소라고 할 수 있다.

2018년 11월 24일 사례에서 습구온도의 유용함이 잘 드러난다. 당시 모델이 예측한 서울의 단열선도에서 빙결고도는 1km 이상으로 높게 나타나 강수가 눈으로 내릴 것이라고 보기 어려운 구조였다. 그러나 모델예측 당시는 대기가 포화되기 전의 상태였고, 강수가 시작된 이후에는 포화된 상태를 보이며 빙결고도와 습구빙결고도가 모두 0m로 나타났다. 한편, 당시 하층에는 동풍이 불고 상층공기와 혼합되지 않으면서 등온대기구조를 보였으므로 층후 활용 역시 눈비구분에 적합하지 않았다. 그러나 23일 예보시점 당시 습구온도는 영하였기 때문에, 통계적으로 전일 14~15시 습구온도보다 다음날 아침 습구온도가 더 낮음을 고려했다면 새벽부터 오는 강수의 형태가 눈일 것임을 충분히 예상할 수 있었을 것이다(부록/사후분석 5-2 참고).

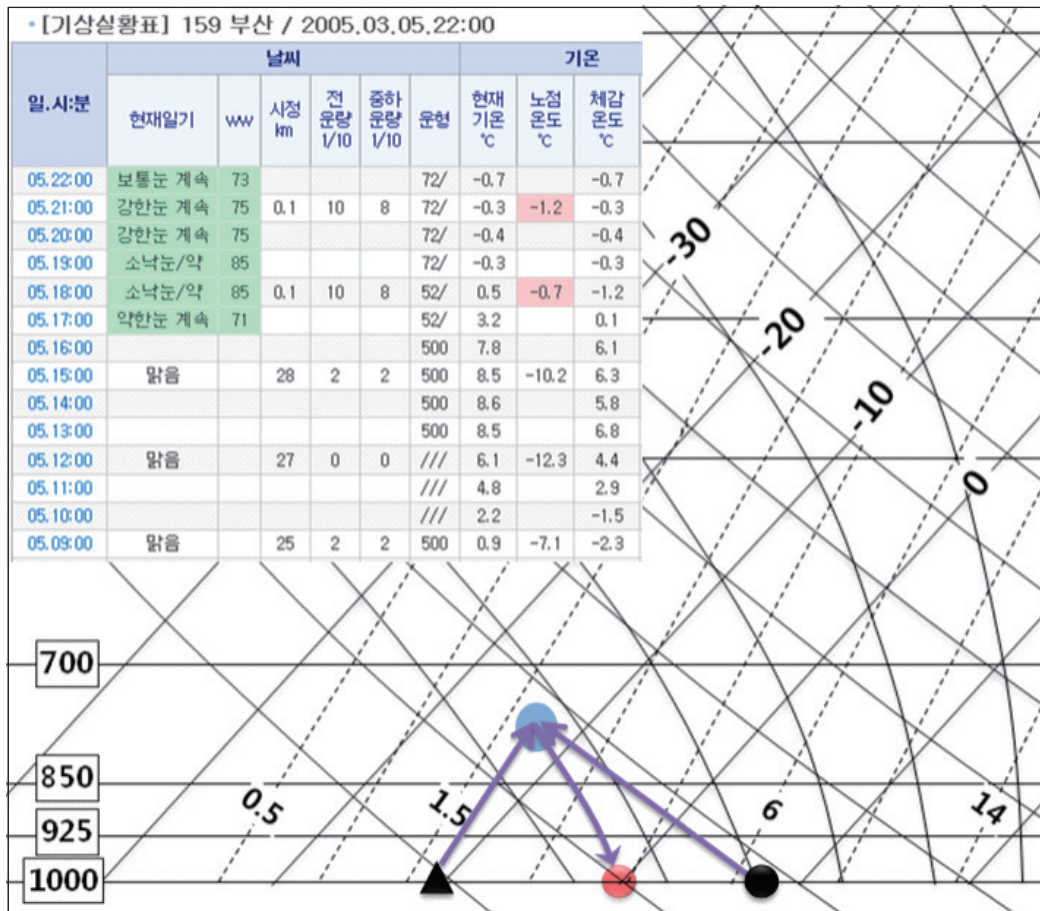


그림 5-6. 2005년 3월 5일 부산에 대설이 내린 사례로서, 15시에 관측한 기온과 이슬점 온도로부터 구한 습구온도 (약 0℃)의 위치-붉은색

그림 5-6은 습구온도를 활용한 눈 예보가 가능한 대표적인 사례를 보여준다. 2005년 3월 5일 늦은 오후부터 6일 아침까지, 평소 눈이 많이 오지 않는 부산 등 경남지역에 최대 40cm의 폭설이 발생했다. 그림 5-6의 왼쪽 상단의 관측 표를 보면, 강수가 내리기 약 1시간 전인 15시에 맑은 날씨에서 기온이 영상 8.5℃를 보이고 있다. 과연 이런 상황에서 레이더영상이나 위성영상을 참고하여 1~2시간 후에 내릴 강수가 눈이라고 예보할 수 있을까?

그러나 실제로 강수는 비가 아니라 눈으로 시작되었다. 17시 이전부터 눈이 내리기 시작했으며, 눈의 강도가 강해지고 상대습도가 90%를 넘어가면서 18시부터 기온은 습구온도 0℃와 같아졌다. 기온이 아무리 높아도 건조한 상태에서 습구온도가 낮으면 눈으로 내릴 수 있다는 것을 보여준 대표적인 사례였다.

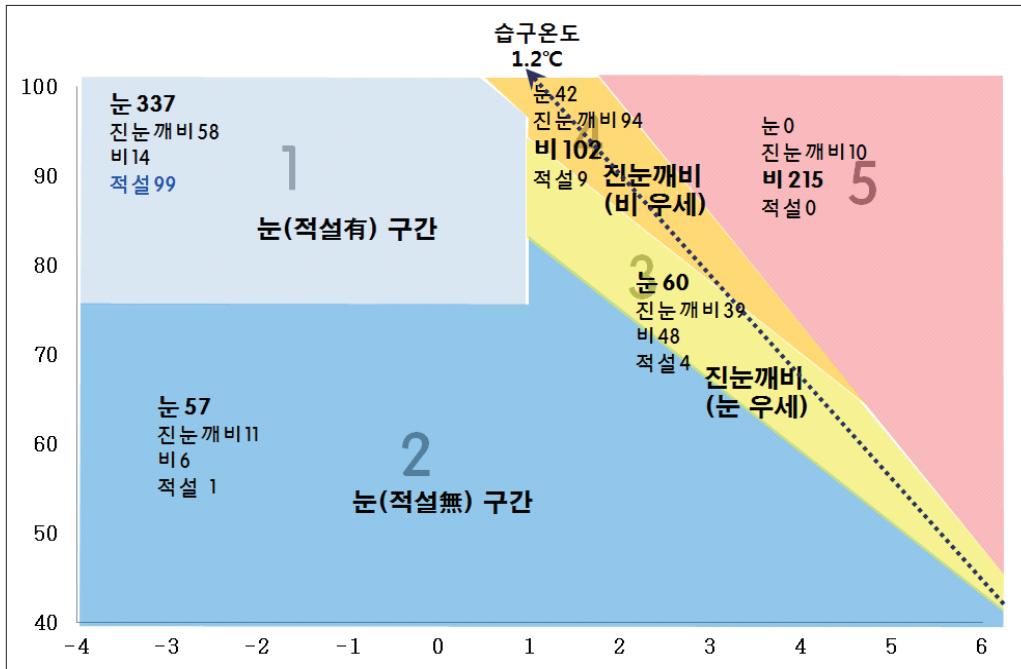


그림 5-7. 기온(x축)과 상대습도(y축) 분포에 따른 우리나라 강수형태.
 9년(2003~2011년)간 고층관측소 7개 지점을 대상으로 겨울철(12~3월) 강수형태를 구분한 자료
 (총 1212개 사례 중 눈은 877건, 진눈깨비는 54건, 비는 281건이 해당함)
 진눈깨비 구간 중 점선의 화살표는 습구온도 1.2°C를 의미함.

그림 5-7은 우리나라 겨울철 고층관측소 7개 지점에서 강수를 기록한 사례를 기준으로 강수형태를 구분한 그래프이다. 현재 현업모델에서 이 계산식을 이용하여 강수형태를 표출하고 있다. 우리나라 사례에서도 그림 5-7의 진눈깨비 구간에 습구온도 1.2°C가 위치하는 것을 알 수 있다.

Key Point!

습구온도 1.2°C는 눈과 비를 구분하는 기준이다.

5. 6 강수에 의한 기온 하강 예측

낮에 갑작스러운 소나기가 내릴 때, 기온이 급격히 하강하는 것을 경험해 본 적 있을 것이다. 대기가 건조한 상태라면 기온에 비해 습구온도는 많이 낮기 때문이다. 이런 특징을 활용하면 강수 발생 시에 기온이 얼마나 하강할 지 예측할 수 있다.

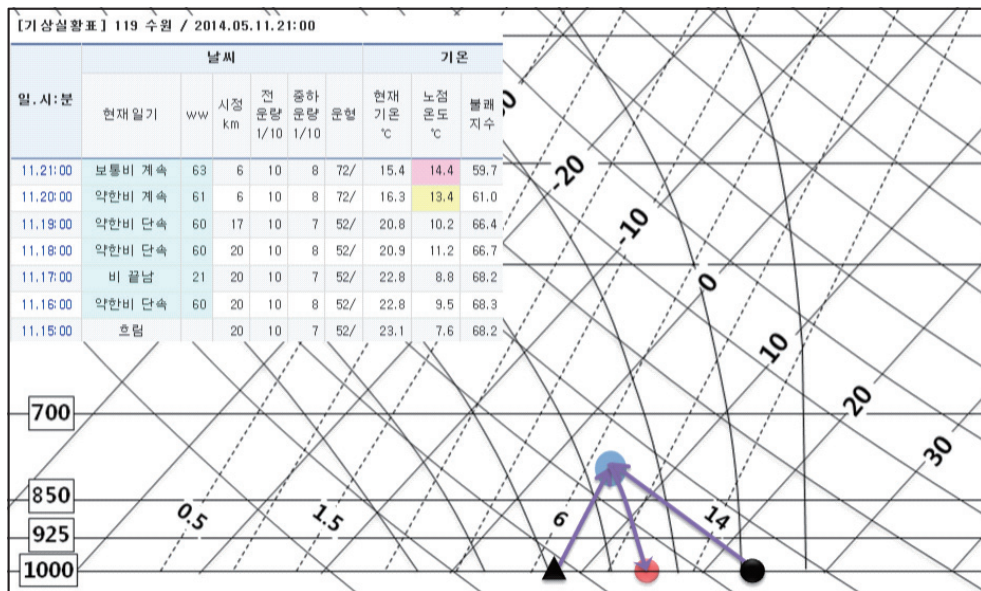


그림 5-8. 2014년 5월 11일 수원에 비가 내린 사례로서, 15시에 관측한 기온과 이슬점 온도로부터 구한 습구온도(약 15°C)의 위치(붉은색)

그림 5-8은 강수가 내리기 전인 15시에 기온과 이슬점온도를 이용하여 구한 습구온도가 약 15°C임을 보여준다. 16시 이전에 비가 내리기 시작하면서 기온은 떨어지고 이슬점온도는 증가한 것을 볼 수 있다. 이후 비가 강해지면서 21시에 기온은 약 15°C로 습구온도와 비슷해졌다. 이때, 이슬점온도도 14.4°C로 습구온도와 비슷해지는 것을 알 수 있다.

기온과 이슬점온도의 차이가 큰 건조한 대기에서 강수가 내릴 때, 기온은 급격히 떨어지게 되므로 예측하기 어렵다. 그렇지만 위와 같이 습구온도의 특징을 활용하면 기온이 어느 정도 떨어질 지 가늠할 수 있으므로, 상대습도가 거의 100%에 다다른 시점을 기준으로 기온 예보에 활용하면 적중률을 높일 수 있다.

5. 7 습구온도 활용 시 주의사항

5. 7. 1 강한 강수에 의한 습구온도 하강

강수가 있을 때 습구온도의 변화는 작다. 그렇지만 강수가 지속되어 어느 정도 포화에 이르게 되면 더 이상 증발과정이 일어나지 않아 습구온도에 변화가 나타날 수 있다.

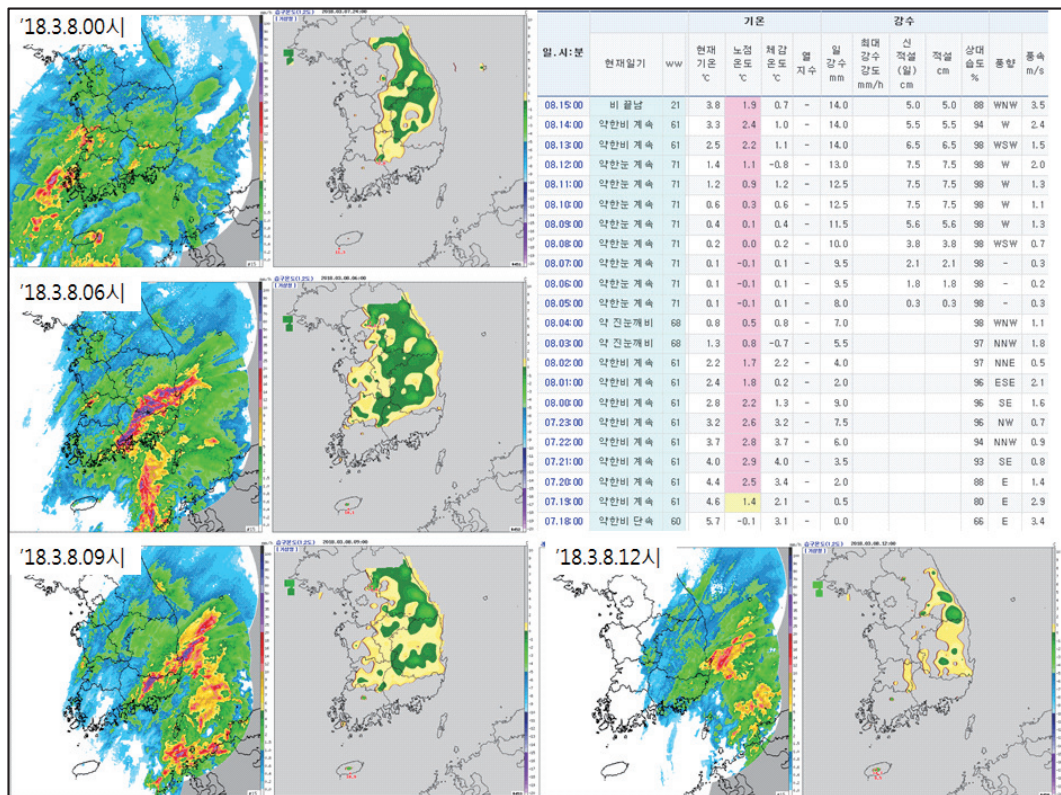


그림 5-9. 2018년 3월 8일 대구지역 레이더 영상과 습구온도 분포(1.2°C 이하 채색) 및 매 시각 관측 결과

그림 5-9는 대구에 대설(최심신적설 7.5cm)이 발생했던 2018년 3월 8일 실황 자료이다. 3월 8일 00시에 강수대가 접근할 때, 경북지역을 중심으로 지표부근에 cold pool (찬 공기 영역)이 위치하여 낮은 습구온도를 보여주고 있지만, 대구를 포함한 경북 남부지역은 비 구역에 위치해 있다.

실제 대구에서 8일 2시까지 비를 관측하였다. 습구온도가 1.2°C 이하가 된 3시부터 비가 눈으로 바뀌고, 이후 6시에 강한 강수대가 유입되면서 습구온도는 0°C 부근

을 나타냈다. 상대습도는 강수가 내리면 95% 이상이 되기 때문에 기온과 습구온도의 차이는 거의 없다고 볼 수 있는데, 강한 강수대가 들어오면서 기온과 함께 습구온도가 하강하였다. 12시에는 강수대가 약화되면서 습구온도도 올라가는 모습이 보인다.

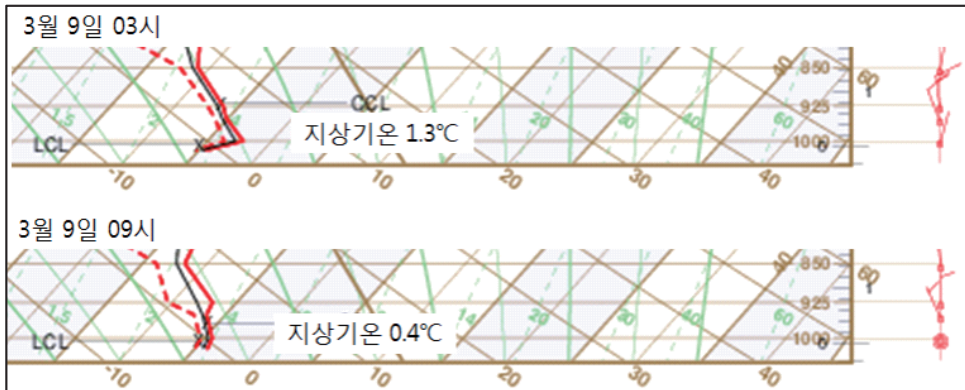


그림 5-10. 그림 5-9에서 보여준 대구지점의 2018년 3월 8일 강수사례에서 3시(위)와 9시(아래) GDAPS 단열선도 초기장

그림 5-10은 강수가 내리기 시작한 3월 8일 3시 대구지역 GDAPS 예측모델의 초기장 단열선도와 강한 강수가 지속되고 있는 시각인 9시 초기장의 단열선도를 각각 보여준다.

초기장이지만 모델값이기 때문에 약간의 차이가 있다. 실제 관측한 3시 대구의 기온은 1.3°C, 상대습도는 97%이기 때문에 기온과 이슬점온도, 습구온도는 모두 같다고 가정하자. 이 때 상층의 습구온도를 살펴보면 거의 포화된 상태에서 포화단열감률과 비슷한 온도 기울기를 보여준다. 한편 9시 단열선도를 살펴보면 925hPa 아래층으로 온도 기울기가 3시에 비해 줄어든 것을 볼 수 있다. 지표부근 대기에서는 등온선과 비슷한 기울기의 등온구조를 보여준다. 850hPa과 925hPa 기온은 3시와 9시에 큰 차이가 없지만, 강수과정에 의해 지상과 지표부근의 기온이 하강한 것을 볼 수 있다. 습구온도는 상대습도가 90%를 넘는 준 포화된 상태에선 증발과정이 거의 없기 때문에 강수 강도에 따라 지상의 기온이 하강할 수 있음을 보여준 사례이다.

특히 수평적으로 온난이류의 유입이 어려운 내륙지방에서 강한 강수가 내릴 것으로 예상될 경우나 레이더에서 강한 강도의 예코가 접근해 오고 있으면, 강한 강수와 함께 상층의 찬 공기가 단열 상승이 없는 상태로 지상으로 하강하는 비단열과정(non-adiabatic process)이 발생할 수 있음을 유의해야 한다.

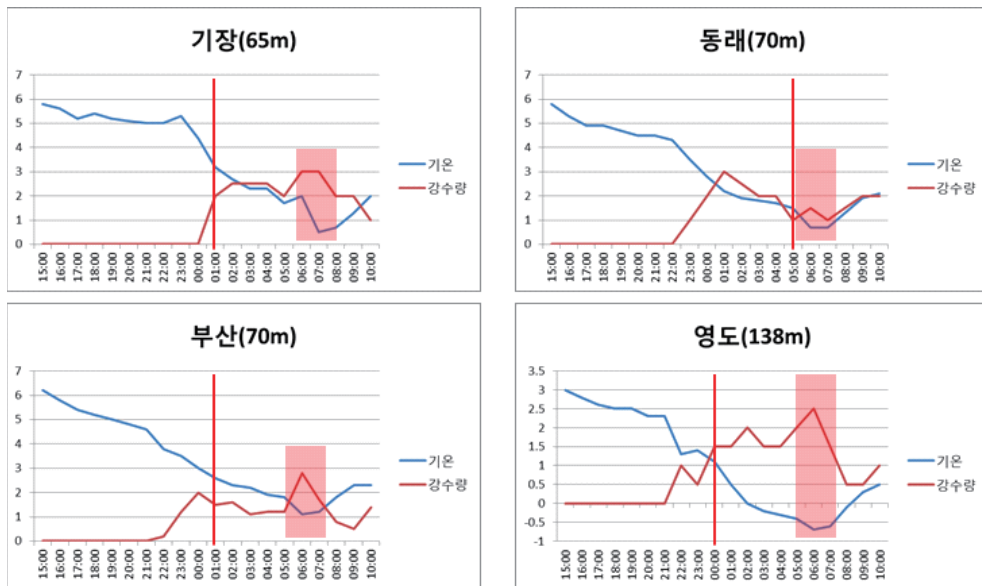


그림 5-11. 부산 주요지점별 2018년 3월 20일 15시~21일 10시까지 매 시각 기온, 강수량 분포도
(붉은색 수직선: 강수가 시작되는 시점으로서, 상대습도 90% 이상을 나타내기 시작한
시각 / 붉은색 사각형 구간: 강수가 증가된 시각)

그림 5-11은 2018년 부산에서 이례적으로 3월말에 눈을 관측한 사례이다. 강수는 3월 20일 밤부터 시작되었고, 처음에 강수형태는 비로 내렸다. 각 그래프에서 붉은색 직선은 강수가 시작되는 시각을 의미하며, 상대습도가 90%를 넘어서는 시점을 표시한 것으로, 21일 새벽부터 대부분의 지역이 거의 포화되었다는 것을 알 수 있다. 또한 붉은색 직선 이후 시간대는 상대습도가 90%를 넘었기 때문에 기온과 습구온도는 거의 비슷하다고 볼 수 있다. 옅은 붉은색으로 채색된 사각형 구간은 21일 6~7시로서, 강수강도가 강해지면서 기온이 하강한 모습을 볼 수 있다. 특히, 이 구간은 부산의 대부분 지역에서 기온이 1°C 이하로 내려가 눈이 올 수 있는 기온대로 접어든 것을 볼 수 있다. 기온이 1°C 이하이기 때문에 습구온도는 0°C 부근이므로 눈이 올 확률이 높은 구간이며, 실제 이 시각에서 강수는 비에서 눈으로 혹은, 진눈깨비로 바뀌어 내렸다. 내리는 강수가 증발하지 않는 포화된 대기에서는 시간당 1mm 이상의 강도로 강수가 나타날 경우 습구온도가 하강할 수 있다. 특히, 강수 강도가 강할수록 기온과 습구온도의 하강율은 더 커지므로 강수형태가 비에서 눈으로 바뀌거나, 쌓이지 않던 눈이 급격하게 적설로 나타날 수 있음을 유념해야 한다.

5. 7. 2 해상에서 온난이류 유입에 의한 습구온도 상승

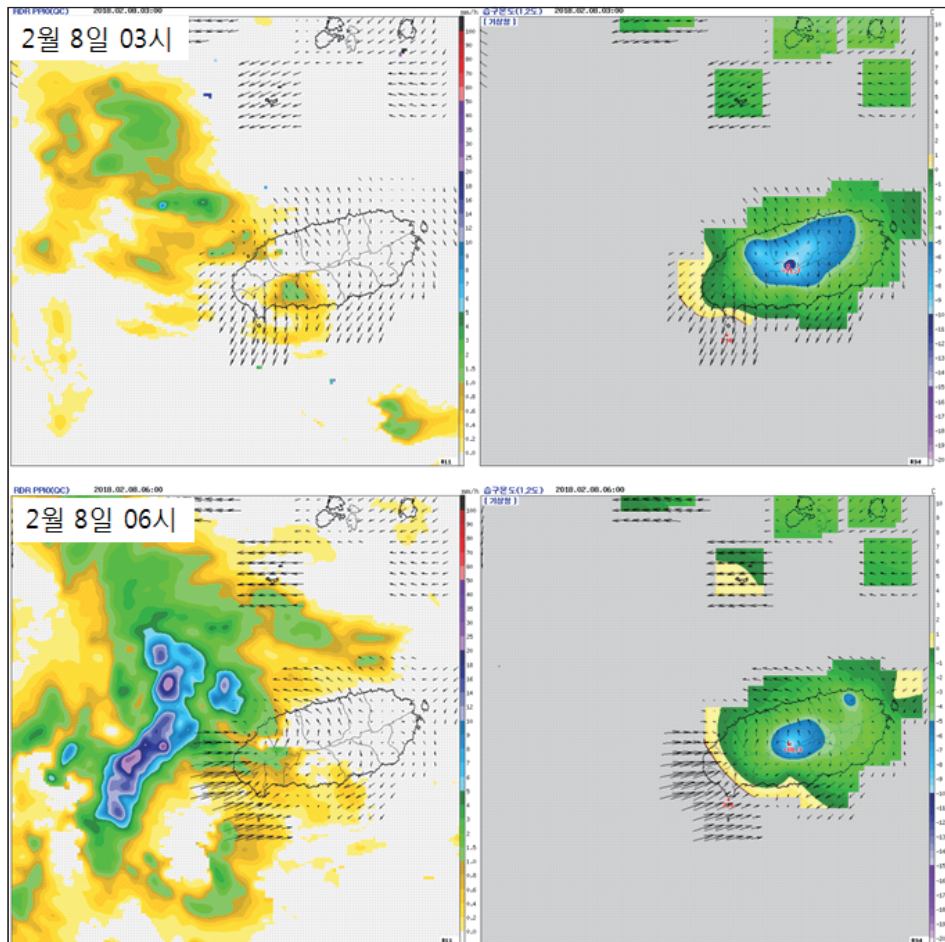


그림 5-12. 제주지역 대설 발생 사례인 2018년 2월 8일 3시와 6시의 레이더영상(왼쪽)과 습구온도 1.2℃ 이하(채색구역) 분포도

해안지역은 앞에서 설명한 강한 강수에 의해 습구온도가 하강하는 것과 다른 현상이 나타나기도 한다. 포화된 상태에서 강수가 내리는 경우 해상으로부터 따뜻한 공기가 유입되면, 증발이 없는 상태이기 때문에 외부의 열이 유입되면서 기온과 습구온도는 같이 올라간다. 이때는 내리던 눈이 비로 바뀔 수 있음을 고려해야 한다. 사례로 보면, 2018년 2월 8일 3시에 제주지역으로 강수대가 접근해 왔다. 이 때 제주 전 지역이 습구온도 1.2℃ 이하로 눈이 올 수 있는 상황을 나타냈다. 그러나 6시 경에 강한 에코가 제주도 서쪽으로 접근해 오면서 해상에서 육상으로 부는 서풍이 강화되었다. 겨울철 해상에서 해안으로 유입되는 공기는 육지보다 상대적으로 높은 해수면 온도로 인해서 기온을 상승시킬 수 있다. 실제로 그림 5-12에서 나타난 바와 같이 6시에 제주도 서쪽지역은 습구온도가 1.2℃보다 높아졌고 강수형태는 비로 나타났다.

그러나 이 사례에서 제주도 서해안을 제외한 대부분 지역은 큰 온도 상승이 없는 상태에서 5cm 이상의 많은 눈이 내렸다. 해상에서 유입되는 포화된 따뜻한 공기는 상대적으로 차갑고 건조한 육지의 고립된 공기덩이와 비교하여 상대적으로 가볍기 때문에 내륙으로 이동하면서 하강하지 않고 상승운동이 일어난다. 따라서, 중규모계에서 해풍이 유입되는 해안에서 가까운 거리의 육상까지만 지표 대기에서 기온과 습구온도의 상승이 나타난다. 반면, 바다에서 유입되는 기류와 거리가 먼 제주도 내륙이나 제주시가 위치한 북쪽으로는 습구온도의 큰 변화가 나타나지 않았다. 해안과 내륙의 지형적 특징과 가벼운 공기의 연직 상승운동으로 지표부근의 공기와 혼합이 이루어지기 어려운 상황을 동시에 고려해야 하는 것을 보여준 대표적 사례였다(부록/사후분석 5-1 참고).

5. 7. 3 종관시스템 계에서 강한 온난이류 유입에 의한 습구온도 상승

앞서 설명한 바와 같이, 해륙풍 순환과 같이 해안에서 10km 이내의 내륙으로만 해풍의 유입에 의한 습구온도 상승이 나타나는 것이 일반적이지만, 예외인 경우도 있다.

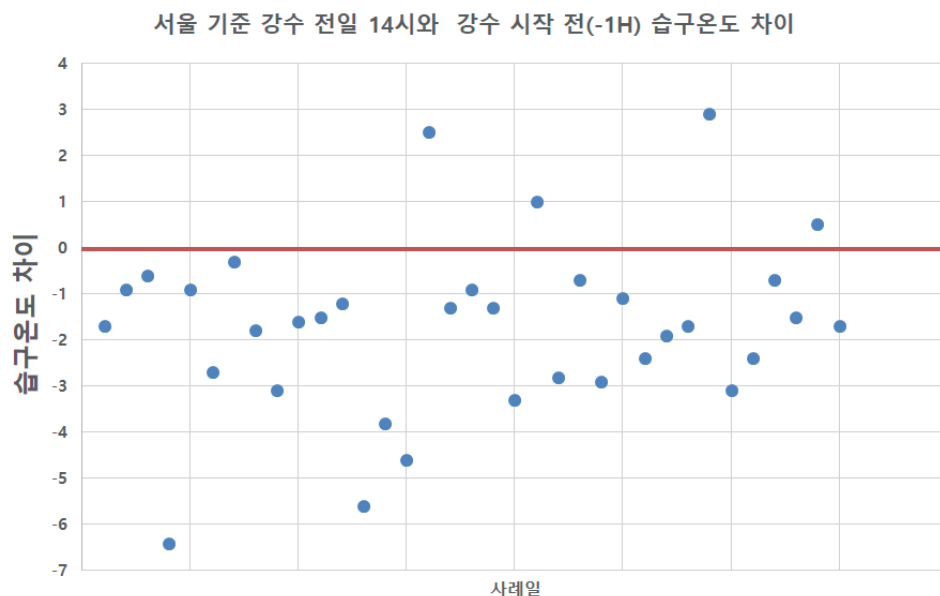


그림 5-13. 3년간(2016~2018년) 겨울철(12~3월) 서울지역에서 강수 전일 14시와 강수 시작 1시간 전 습구온도의 차이를 나타낸 분포도. 붉은 색의 직선은 습구온도의 차이가 없는 0을 의미함

그림 5-13은 서울 지점의 강수사례에서 강수가 시작되기 전날 최고 기온이 나타날 수 있는 14시의 습구온도와 강수가 나타난 날의 1시간 전 습구온도의 차이를 비교한 자료이다. 최고 기온이 기록되기 직전 시간인 14시에서 다음날 강수가 시작되기 직전

까지 대부분 사례에서 습구온도가 하강한 것을 볼 수 있다. 평균적으로 약 1~2℃ 정도의 습구온도 하강이 관측되었다. 이 분포도는 낮에서 야간으로 갈수록 기온하강에 따른 습구온도의 하강 율을 의미한다. 해상에서 온난이류의 서풍이 유입되더라도 서울의 습구온도는 야간시간대에 상승하지 않는다는 것을 보여준다. 해상에서 유입되는 따뜻한 공기는 서울부근에 냉각된 찬 공기를 밀어내지 못하기 때문이지만 구름이 유입되는 시간에 따라 다른 결과가 나타나는 경우도 있다.

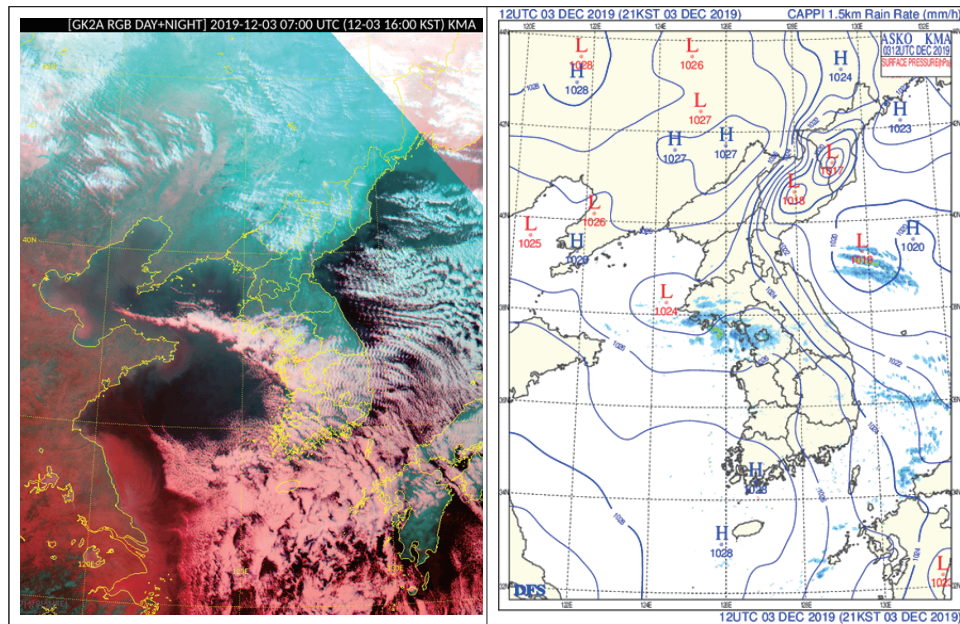


그림 5-14. (좌) 2019년 12월 3일 16시 위성영상 (우) 같은 날 서울부근에 강수가 있었던 21시 지상일기도+레이더 중첩장. 지상저기압 중심이 서한만에서 백령도로 이동하면서 저기압 중심의 남쪽으로 서~남서풍의 풍계에서 온난이류에 의한 구름대가 오후부터 지속적으로 유입되고 있음을 의미함

그림 5-14는 2019년 12월 3일 밤에서 4일 새벽 사이 서울과 수도권에 강수형태를 눈으로 예보했지만 대부분 비가 내렸던 사례이다. 왼쪽의 12월 3일 16시 위성영상에서 서해상에서 만들어진 하층운이 서울과 수도권에 유입되면서 오후에 최고기온을 기록한 이후 야간에도 기온하강이 거의 나타나지 않았다.

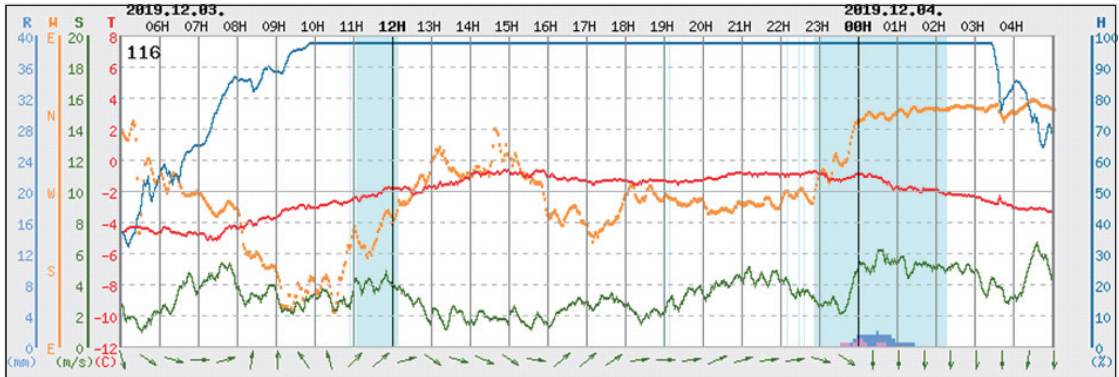


그림 5-15. 관악산 레이더 관측소의 3일 05시부터 4일 05시까지의 기상관측 시계열. 가장 위에 그려진 파란색의 그래프는 상대습도를 의미하며, 3일 10시부터 100%로 포화되었음. 붉은색 그래프는 기온을 의미하며, 포화된 이후에도 14시까지 기온이 상승하였고, 이후 유지되는 특징을 보였음

그림 5-15의 해발고도 625m에 위치한 관악산 레이더에서 관측된 기상자료를 보면, 가장 위에 표시된 파란색의 상대습도 그래프에서 3일 오전 10시부터 100%의 상대습도를 기록하였다. 공기가 포화될 경우 더 이상 증발에 의한 기온하강이 나타나지 않기 때문에 이 시점부터는 이류에 의해서 온도변화가 나타난다. 붉은색의 기온 시계열에서 10시 이후에도 14시까지 지속적으로 기온이 상승했다. 14시 이후 기온은 -1°C 부근을 유지하다가 강수가 강해지면서 자정을 전후로 서서히 하강한다.

저기압의 남쪽은 온난이류가 발생하는 곳이고, 특히 겨울은 서해상의 높은 해수온도에서 이류되는 따뜻한 공기가 지속적으로 내륙에 유입된다. 맑은 날씨였다면 오후 이후 복사냉각에 의해 지표의 기온이 하강하여 이류되는 따뜻한 공기는 상승기류와 함께 상층으로 이동하지만, 이번 사례와 같이 하층운이 덮인 상태에서는 복사냉각 효과가 없기 때문에 지표의 냉각과정에 따른 차가운 공기괴(cold pool)가 생성되지 않는다. 구름이 덮인 상태에서 강수형태 판별은 625m 고도의 관악산 관측소와 같이 주변 지형의 영향을 덜 받는 높은 고도에 위치한 관측소의 습도와 기온변화를 주목하여 지상 기온과 강수형태 예보에 참고해야 한다.

실제 서울 관측소의 지상 기온은 12월 3일 오후 14시부터 자정까지 3.5°C 부근을 유지하였으며, 강수가 기록된 21시에서 다음날(4일) 01시 까지도 변화가 없었다. 이에 따라 3일 9시에 생산한 UM 전구모델에서 12시간 후인 3일 21시에 예측한 서울 기온은 눈이 내릴 수 있는 -0.5°C 를 예상하여 실황과 -4°C 의 큰 편차(bias)를 보였다. 그림 5-16과 같이 강수예코가 유입된 3일 21시에 중부지방 대부분이 큰 음의 편차를 보여 모델에서 예상한 강수형태와 다르게 대부분 지역에서 비가 내렸다.

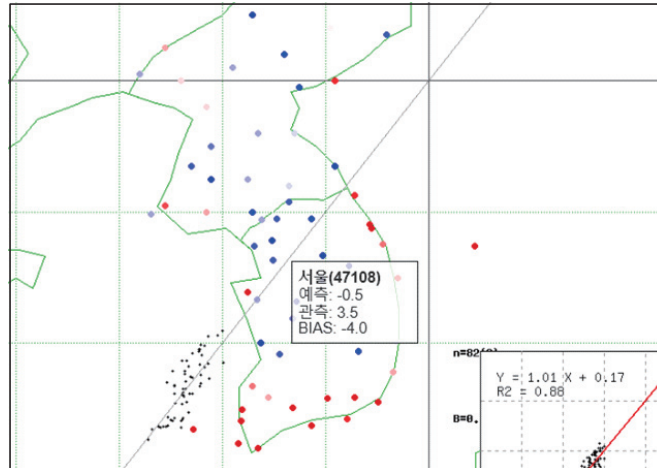


그림 5-16. UM 전구모델 기온 예측과 실황 관측 자료와의 편차로, 붉은색은 모델예상이 실제 기온보다 높게 예측한 것, 파란색은 모델예상이 실제 기온보다 낮게 예측한 것을 의미함. 해당 시각은 2019년 12월 3일 21시 자료이며, UM 전구모델 예측은 3일 9시에 생산한 12시간 후 예측자료를 실황과 비교한 것임

야간에 복사 냉각 효과가 있는 경우에도 지표에서부터 강한 온난이류에 의해 습구온도가 전일 14시 보다 다음날 강수가 있었던 새벽에서 아침사이 2°C 이상 큰 폭으로 상승한 2개의 예외 사례가 있다(그림 5-13에서 가장 위에 분포한 2개의 사례).

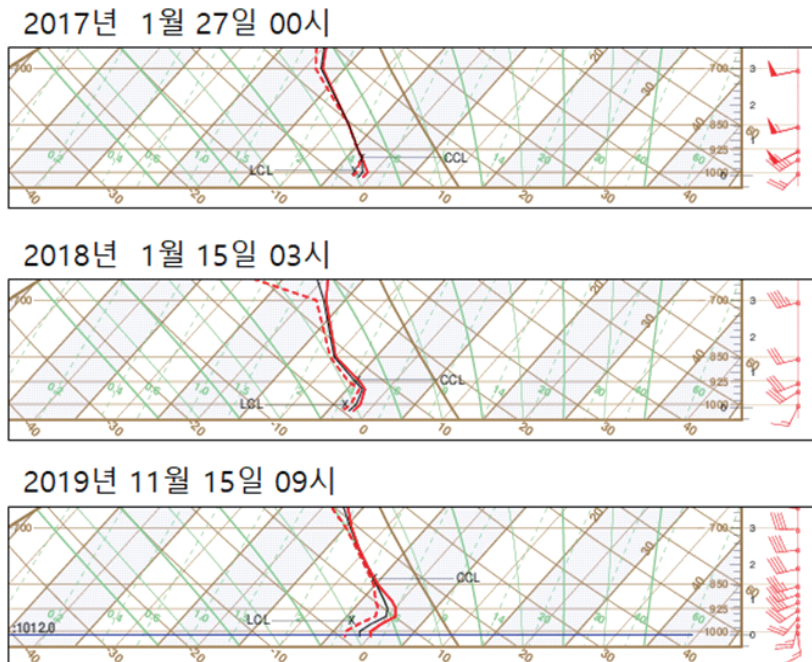


그림 5-17. 그림 5-13의 분포도에서 예외적으로 습구온도가 2°C 이상 상승한 2개의 사례(위에서부터)와 2019년 11월 15일 3°C 상승한 검증 사례(아래)의 서울지역 GDAPS 단열선도로서, 각 시각은 모델 초기장 혹은, 최단시간 예상 자료임

그림 5-17은 그림 5-13에서 보여준 2°C 이상 큰 폭으로 습구온도가 상승한 2개의 예외 사례의 서울 단열선도를 보여준다. 위에서부터 2개의 사례 중 2018년은 2.9°C의 습구온도 상승이 나타났고, 2017년은 2.5°C의 상승이 나타났다. 이 2개의 사례에서 공통된 특징이 보인다. 925hPa 고도에서 남서풍이 30kts 이상의 강풍이 불었고, 지상에서도 남풍의 바람이 관측되었다. 즉, 지상에서부터 상층까지 강한 온난이류의 기류 유입이 나타났음을 의미한다. 작은 규모에서 발생하는 온난이류는 경기만에서 서울로 서풍의 기류를 유입시켜 눈구름 대를 발달시키지만, 가벼운 성질의 이 온난 공기는 차가운 지상의 공기 껍을 타고 상승운동이 일어나기 때문에 강수 전일에 비해 지상의 습구온도가 상승하지 않는다.

가장 아래의 2019년 11월 15일 사례에서도 지상에서부터 상층까지 시계방향으로 풍향이 순전하는 온난이류가 나타났으며, 925hPa 고도에서 30kts의 강한 남서풍이 나타났다. 그림 5-18의 지상일기도에서 남해상에 고기압과 서해상의 저기압과의 강한 기압경도력으로 서해상에서 내륙으로 남서풍 계열의 강한 바람이 유입되고 있음이 보인다. 따라서, 지상에서 온난공기가 유입되기 위해서는 이와 같은 남고북저의 일기도 패턴이 나타났을 때, 전일에 비해 습구온도가 상승할 수 있음을 알 수 있다. 또한 925hPa 고도에서 30kts 이상의 강풍도 습구온도가 상승하는 하나의 척도가 될 수 있다.

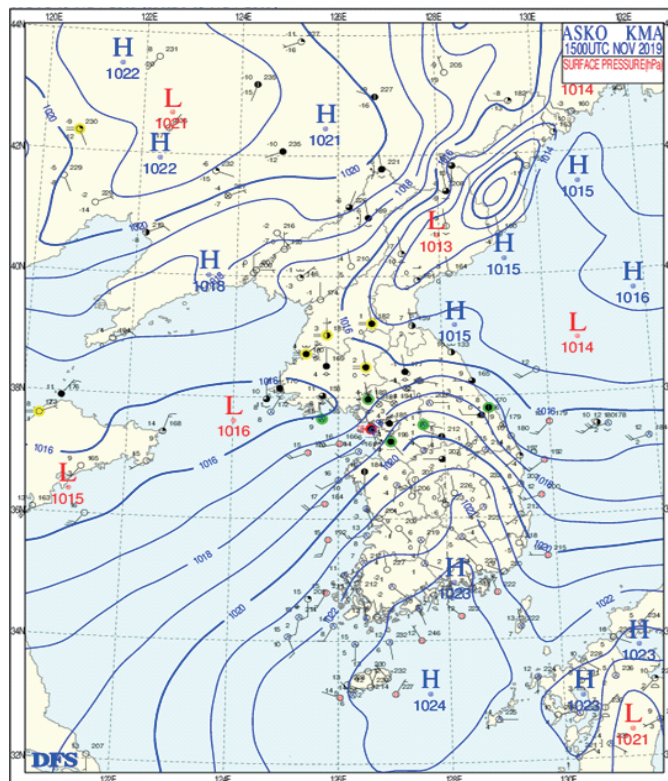


그림 5-18. 2019년 11월 15일 09시 한반도 지상일기도

Key Point!

1. 준 포화된 상태(상대습도 95% 이상)에서 시간당 강수량이 1mm를 초과할 경우 습구온도와 기온은 하강한다. 내륙에서는 이런 특징이 더 뚜렷하다.
2. 강수강도가 강할 경우, 925hPa 기온과 지상의 기온이 같아질 수 있다.
3. 강수강도가 강하더라도 해안지역은 해상에서 따뜻한 기류가 유입될 경우, 포화된 상태에서 기온과 습구온도가 올라 눈에서 비로 바뀔 수 있다.
해안에서 10km 이상 떨어진 지역은 기온과 습구온도의 상승이 없음에 유의해야 한다.
4. 서울·수도권에서 새벽~아침시간에 발생하는 온난이류형 강수의 경우,
 - 1) 야간에 구름이 없는 복사냉각과정이 발생했을 때
전일 14시의 습구온도보다 당일 아침의 습구온도가 1~2℃ 낮게 나타남
 - 2) 전일부터 하층운이 덮여, 야간에 복사냉각과정이 발생하지 않았을 때
구름에 의해 모델예측과 큰 기온차이가 발생할 수 있음.
→ 주변지형에 영향을 받지 않는 높은 고도에 위치한 관측소의 습도와 기온변화에 주목
5. 강수가 내리는 상황에서 내륙에서 습구온도가 상승하는 경우는 지상에서도 남풍계열의 종관 풍이 나타날 때이며, 이 때, 925hPa 고도에서 30kts 이상의 강한 하층제트가 관측된다.

참고문헌

1. 손에 잡히는 예보기술. 2012: 대설분석 및 예측 126-155p.
2. Häggmark, L., Ivarsson, K-I. 1997: 'MESAN Mesoskalig analys', SMHI RMK Nr. 75, 21-28.
3. Matsuo, T., Sasyo, Y. 1981: 'Non-Melting Phenomena of Snowflakes Observed in Sub saturated Air below Freezing Level', Journal of the Meteorological Society of Japan. 59, 26-32. rk. Weather and Forecasting, 2, 310-321.

[부록] 습구온도를 활용한 강수형태판별 사후분석 목록

1. 사후분석 5-1 2018년 2월 8일 사례: '제주도 강수 눈비 판별 오차에 따른 대설'
2. 사후분석 5-2 2018년 11월 24일 사례: '온난이류 강수의 눈비 구분의 실패'

겨울 여보 가이드스

6. 실황분석 가이드스



실황분석의 필요성

실황분석이란, 현재의 기상현상을 파악한 뒤 왜 이러한 현상이 나타났는지 그 원인을 분석하고 앞으로 어떻게 진행될 것인지 예상하는 일련의 모든 과정을 말한다. 또한 현재 상황과 모델 결과물을 비교하여 차이점을 분석하고 그 오차를 수치모델 자료에 반영하여 예보에 활용하는 과정이기도 하다.

우리는 예보를 생산하기까지 『관측 - 실황분석 - 수치모델자료 분석 - 예보 생산 - 통보』의 단계를 거치는데, 수치모델자료를 분석하기에 앞서 실황분석이 반드시 선행되어야 한다. 만약 이 과정을 거치지 않는다면 수치모델의 오차를 예보에 그대로 반영하게 되어 예보를 변동해야 할 때 유연하게 대처하기 어려우며 예측 실패의 가능성도 커지게 된다.

실황분석의 방법



STEP 1

실황 파악

위성, 레이더 등 다양한 관측 자료를 이용하여 우리나라 주변에서 나타나고 있는 기상현상들을 파악한다.



STEP 2

메커니즘 분석

GTS 전문 분석 등을 통해 현상의 원인 및 우리나라에 영향을 줄 수 있는 시스템의 메커니즘을 찾는다. 개념 모델을 이용하여 각 기상현상을 발달/약화시키는 요소를 찾는다.

이를 바탕으로 예보 시나리오를 작성한다.



STEP 3

실황과 모델 간 차이 인식

수치모델이 모의하는 구름과 강수의 메커니즘을 분석하고 실황과 비교하여 차이를 정량적으로 찾는다.



STEP 4

실황분석 적용

수치모델에 실황분석 오차를 적용하여 최종적으로 예상 시나리오를 수정한다.

6. 실황분석 가이던스

6. 1 실황분석의 중요성

기상 예보가 완성되기까지 일반적으로 『관측 - 실황분석 - 수치모델자료 분석 - 예보 생산 - 통보』의 단계를 거친다. 이 단계에서 알 수 있듯이 흔히 예상장이라 부르는 수치모델 자료를 분석하기에 앞서 현재 나타나고 있는 기상현상부터 제대로 파악해야 다음을 내다볼 수 있다.

실황분석이란 무엇일까? 단순히 현재의 상황만 파악하면 되는 것일까? 실황분석이란 현재의 기상현상을 파악한 뒤 왜 이런 현상이 나타났는지 원인을 분석하고 앞으로 어떻게 진행될 것인지 예상하는 일련의 과정을 말한다. 더 나아가 현재의 상황과 수치모델 예상장을 비교하여 차이점을 분석하고 그 오차를 반영하여 예보에 활용하는 과정이기도 하다. 만약 이 과정을 거치지 않는다면 수치모델 자료가 어떤 오차를 안고 있는지 파악하지 못한 채 예보에 그대로 반영하게 된다.

시스템이 우리나라에 가까워질수록 실황분석에 중점을 두는 것은 예보 정확도를 높이는 데 크게 기여한다. 더불어 예보관의 예보 기술을 향상시킬 수 있는 중요한 작업이기도 하다.

6. 2 실황분석 방법과 절차

6. 2. 1 실황분석의 방법

실황분석에서 가장 중요한 것은 메커니즘 분석이다. 우리나라에 영향을 줄 시스템에 대해 3차원적으로 개념모델을 분석하는 것으로 시스템을 이끄는 메커니즘을 알아야 어떤 요소를 집중적으로 분석해야할지 판단할 수 있다.

실황을 분석하기 위해서는 다양한 관측 자료와 모델 산출물을 이용한다. 다양한 자료를 실황분석에 이용하는 것은 단순한 현상 파악에서 벗어나 시야를 확장할 필요가 있기 때문이다. 위성이나 레이더 영상에 나타나는 구름과 에코를 보고 ‘현상이 어디에 있다’에 그치지 않고 ‘왜 생겼는지’ 메커니즘을 분석해야한다. 원인을 알고 나면 현상을 발달시키거나 약화시킬 요소가 무엇인지 드러나고 최종적으로 그 진행 경향을 예측할 수 있게 된다.

우리가 주목해야 할 현상의 위치와 시간 규모에 따라 실황분석에 활용할 수 있는 자료는 달라진다. 기상현상이 우리나라에 접근하기 직전이거나 이미 나타나고 있는 상태라면 위성, 레이더, GTS 자료 외에도 AWS, 고층관측자료, 연직바람관측자료 등 다양한 관측 자료를 이용하여 발달 상태와 진행 상황 등을 분석할 수 있다. 또한 이 현상이 어떤 메커니즘으로 발달한 것인지도 설명할 수 있다.

1~2일 후 우리나라에 영향을 줄 것으로 예상되는 시스템이 있다면 위성과 레이더, GTS 자료를 이용하여 현재 시스템이 위치한 지역의 실황을 분석함으로써 앞으로의 이동 방향과 발달 경향을 감시할 수 있다. 다시 말해, 시스템의 메커니즘을 파악하고 어떤 요소가 시스템을 발달 또는 약화시키는지 분석해야 할 것이다. 또한 이 시스템이 우리나라에서는 어떤 과정에 의해 강수나 다른 기상현상을 일으키는 지도 알아야 한다.

수 일 내에 발달하여 우리나라에 접근할 것으로 예상되는 시스템에 대해서는 활용할 수 있는 자료가 많지 않다. 아직 시스템이 뚜렷하게 발달하지 않은 상태일 것이며 변동 가능성도 크기 때문이다. 따라서 위성 영상과 GTS 전문 분석을 통해 전체적인 흐름을 파악하고 시스템을 발달시킬 요소가 존재하는지 분석하여 추후 어떤 요소를 감시해야 하는지 판단해야 한다.

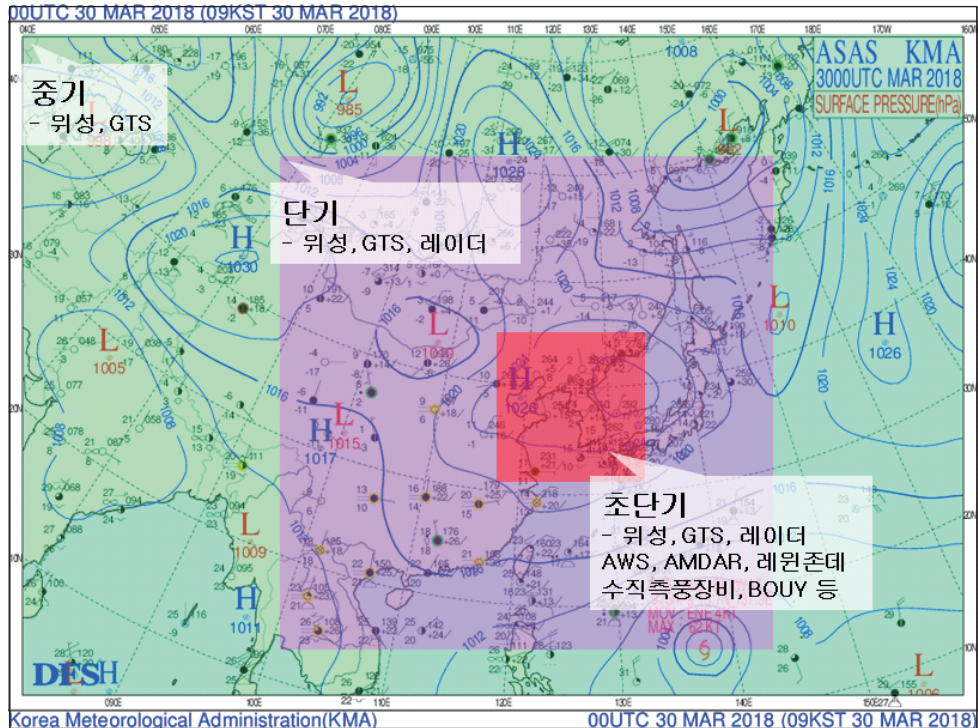


그림 6-1. 시간 및 공간 규모에 따라 실황분석에서 활용할 수 있는 관측 자료

6. 2. 2 실태분석의 종류

실태분석에서 가장 많이 활용하고 또 반드시 분석해야하는 관측 자료에 대해 무엇을 어떻게 분석해야하는지 간단한 예시와 함께 살펴보자.

① 위성 영상

수증기, 적외, 합성 영상 등의 위성 영상을 이용해 상층 대기의 흐름과 건조역(암역)의 위치, 우리나라 주변에 분포하고 있는 구름의 종류와 발달 정도를 파악할 수 있다. 구름이 발달한 메커니즘을 분석하고 모델이 실태를 잘 반영하고 있는지 비교한다. 이를 종합해 구름의 발달, 약화, 이동 등 앞으로 진행될 상황을 예측한다. 특히 위성 영상에 나타나는 구름과 건조역은 3차원 구조로 해석해야 한다.

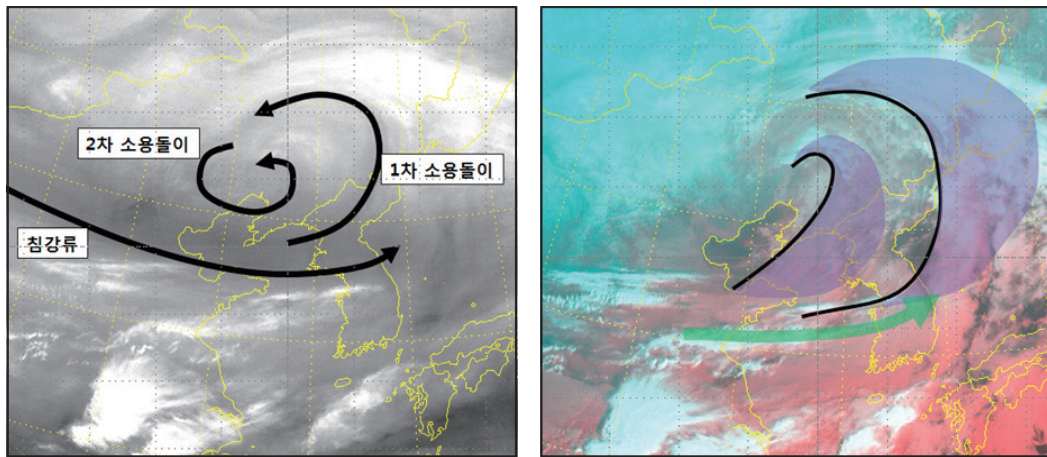


그림 6-2. 2019년 2월 15일 09시 히마와리 수증기 영상(좌)과 천리안 합성 영상(우). 상층 저리저기압을 따라 찬공기가 남하하고(수증기 영상의 소용돌이) 그 전면에는 한랭전선에 의한 구름대가 형성되어 있다(합성 영상).

그림 6-2는 2019년 2월 15일 09시에 관측한 히마와리 수증기 영상과 천리안 합성 영상이다. 수증기 영상을 보면 중국북동지방에서 역회전하고 있는 저리저기압의 흐름을 볼 수 있다. 저리저기압을 따라 단파골이 주기적으로 통과(1차, 2차 소용돌이)하고 있는데, 단파골 후면으로 차고 건조한 공기가 침강하는 것이 암역으로 나타났다.

한편 천리안 합성영상에는 동해상과 서한만 부근으로 두 개의 다층운대가 보이는데 구름대의 후면이 칼로 자른 듯이 나타나는 것으로 보아 상층의 차가운 공기가 침강하면서 상대적으로 따뜻한 공기가 상승하여 발달한 한랭전선에서 나타나는 구름대임을 알 수 있다. 1차 소용돌이가 통과하면서 발달한 구름대는 동해상으로 이동하여 영향을 벗어난 상태이나, 2차 소용돌이에 의해 구름대가 발달하고 있으므로 앞으로 2~3시간

후 중부지방은 다시 영향을 받을 것으로 보인다. 그러나 차고 건조한 공기가 후면에서 밀고 있으므로 빨리 통과할 것으로 예상할 수 있다.

② 레이더 영상

레이더 영상을 통해 현재 강수대의 위치와 분포를 파악할 수 있다. 이 때 단순히 위치만 파악하기 보다는 우리나라로 강수대가 접근하고 있거나 영향을 주고 있는 경우에 강수대가 어떻게 발달한 것인지 분석하고 강수대의 위치와 강도, 이동 방향 등을 파악한 뒤 이를 수치모델 예상장과 비교한다. 강수 발달 메커니즘 분석과 수치모델 비교를 통해 현재의 강수대가 추후 발달할 것인지 또는 약화될 것인지, 어디로 이동할 것인지 예상할 수 있다. 여기에서도 위성과 마찬가지로 **강수 발달 메커니즘을 아는 것이 가장 중요하다**. 메커니즘 분석을 위해서는 레이더 영상뿐만 아니라 다른 관측자료, 분석 일기도 등을 활용할 수 있다.

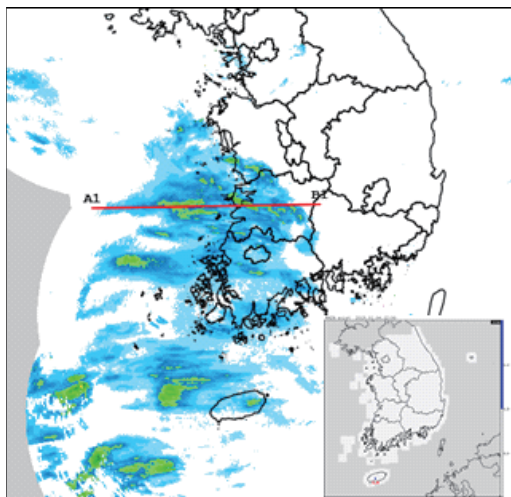


그림 6-3. 2019년 1월 4일 12시 레이더 합성영상과 AWS 강우감지 분포도. 제주도와 전라도에 에코가 관측되나 강우감지는 되지 않는다.

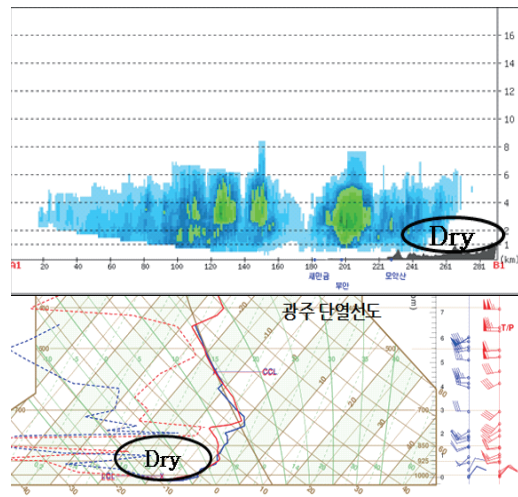


그림 6-4. 1월 4일 12시 레이더 연직 단면(상)과 09시 광주 단열선도(하). 850hPa 이하에 건조층이 있는 것으로 보아 중층에 떠 있는 에코이다.

그림 6-3은 2019년 1월 4일 상해 부근의 저기압이 발달했을 때의 레이더 영상이다. 상해 부근에 위치한 저기압의 온난역에서 발달한 강수대가 남서풍을 따라 전라도까지 유입되었다. 그러나 AWS에는 강우감지가 되지 않았는데 그 원인을 알기 위해 에코의 연직 단면과 광주의 단열선도를 보았다. 두 자료를 통해 하층에 건조역이 있는 것을 알 수 있다. 즉 상해 부근 저기압에 동반된 중층운이 먼저 유입되면서 나타난 에코인 것이다. 하층이 건조하기 때문에 강수 현상이 나타나지 않지만 하층까지 포화되는 시점, 850hPa 저습수역이 유입될 때에는 강수가 시작할 것이라고 예측 할 수 있다.

③ GTS 전문 분석

GTS 관측 자료를 직접 묘화하면서 분석하는 방법이다. 먼저 동아시아 지역에서 관측한 6시간/12시간 강수량 자료를 통해 강수대가 분포하고 있는 위치와 발달 상태를 파악한다. 이를 수치모델이 모의하고 있는 강수 분포와 비교하여 차이점을 찾아낸다. 수치모델이 잘 모의하지 못하는 강수에 대해서도 GTS를 통해 알 수 있다. 다음으로 09시와 21시 GTS 전문을 이용해 고도장과 온도장을 묘화하여 기압계를 파악하고 기상현상의 원인을 분석한다. 수치모델 예상장보다 세밀하게 묘화함으로써 앞으로 영향을 줄 시스템의 발달 메커니즘을 자세히 분석할 수 있다. 이 때 시스템의 발달 또는 약화 요소도 찾는다. 저기압이 동반하고 있는 습윤역, 강풍대 등의 분포와 강도도 파악하여 수치모델과 비교한 뒤 그 차이를 예보에 반영한다.

GTS 전문을 묘화할 때는 중요 시스템이 위치한 곳이나 시스템의 발달과 약화에 영향을 주는 요소가 위치한 곳을 집중적으로 분석하는 것이 좋다. 결국 시스템의 메커니즘을 잘 알아야 효율적으로 분석할 수 있다.

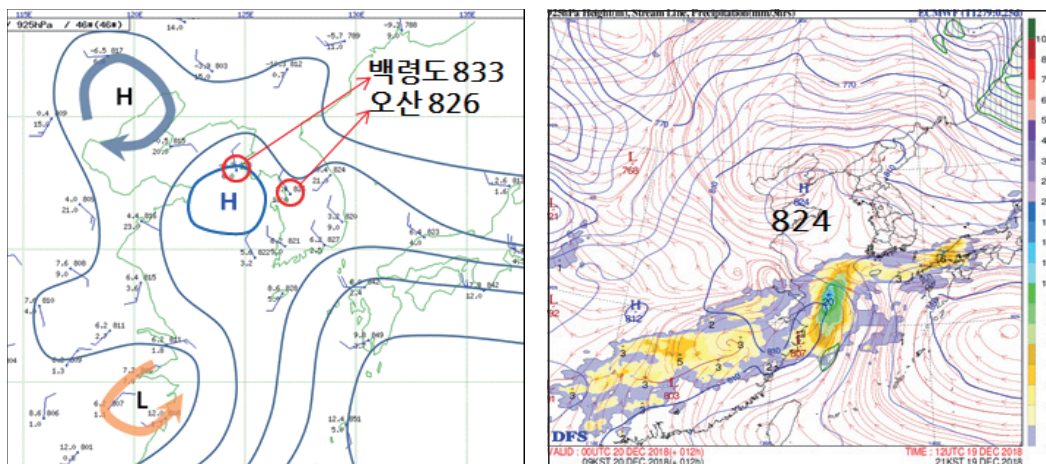


그림 6-5. 2018년 12월 20일 09시 925hPa GTS(좌)와 ECMWF의 925hPa 예상장(+12h)(우). 발해만 부근의 고기압은 예상보다 남동쪽에 있고 세력도 강하여 남쪽 강수대가 북상하는 것을 저지한다.

그림 6-5는 남쪽 저기압에 의한 강수대의 북상 여부를 예측하기 위해 925hPa의 GTS 전문을 분석한 것이다. 수치모델과 달리 북쪽 고기압이 발해만 북서쪽과 산둥반도 남동쪽으로 분리되어 있고 특히, 아래에 있는 고기압의 중심은 모델보다 남동쪽에 위치해 있다. 백령도와 오산의 지위고도(gpm) 관측값과 예상장의 중심값을 보면 고기압의 세력도 모델보다 강하다는 것을 알 수 있다. 즉 실황에서 분석한 고기압은 남쪽 강수대의 북상을 예상보다 강하게 저지하고 있다. 따라서 수치모델은 남해안까지 비가 내릴 것으로 모의하고 있으나 북쪽 고기압으로 인해 북상하지 못할 것이다.

④ 모델예측성능 진단

선진예보시스템의 예·특보 가이드스에서 제공하는 자료로 기온, 풍속, 습도 등에 대해 수치모델의 편차를 정량적으로 나타내준다. UM 뿐만 아니라 ECMWF의 편차도 확인할 수 있다. 수치모델을 기준으로 실황과의 편차를 계산하기 때문에 양의 편차는 실황값이 수치모델 예상값 보다 작다는 것이고(모델 과대모의), 음의 편차는 실황값이 수치모델 예상값 보다 크다는 것(모델 과소모의)을 의미한다.

모델예측성능 진단을 통해 시스템을 발달시키거나 약화시키는 요소들을 분석할 수 있다. 예를 들어 기압골을 강화시키는 골 후면 한기의 강도를 분석하거나, 한기가 축적되어 지면에 형성되는 cold pool의 강도 또는 남쪽 저기압 발달과 연관되는 중국남부지방의 남서류 강도 등에 대해 모델과 실황의 편차를 통해 파악할 수 있다. 따라서 모델 편차를 통해 강수 발달에 대한 정보를 얻기 위해서는 강수 메커니즘에 대한 이해가 반드시 선행되어야 한다.

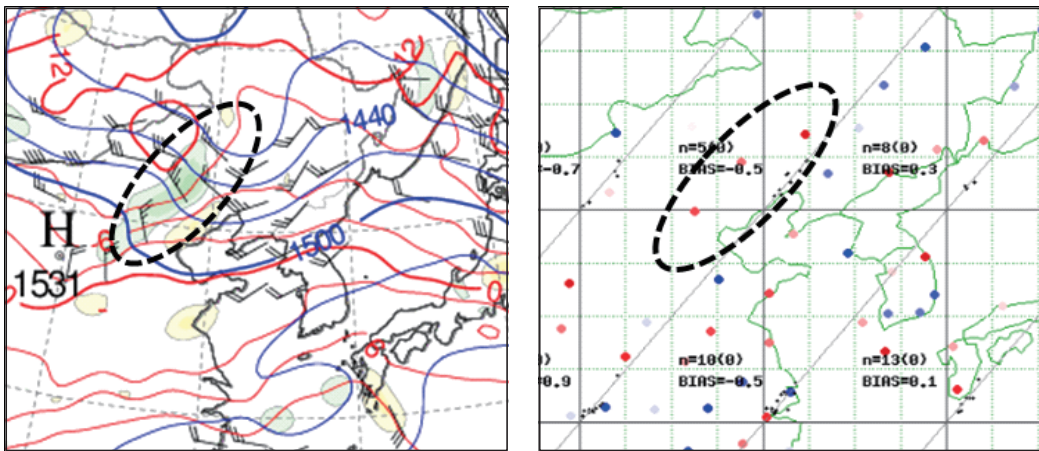


그림 6-6. 850hPa 기온, 고도 예상장(+12h)(좌)과 850hPa 풍속에 대한 모델 편차(우). 발해만 북서쪽에 있는 기압골 후면에서 부는 북서풍이 예상보다 약하므로(양의 편차) 기압골도 모델보다 약하게 형성되어 있다.

그림 6-6(좌)의 850hPa 고도 예상장을 보면 발해만 북서쪽에 기압골이 있는 것을 알 수 있다. 기압골 전면에는 남서풍이, 기압골 후면에는 북서풍이 불고 있고 또한 온도골도 후면에 위치하고 있다. 이때 수치모델 편차(그림 6-6 우)를 보면 북서풍이 관측되는 세 지점에서 양의 편차가 나타난다. 이는 모델이 예상하는 것보다 실제 풍속이 약하다는 것(모델 과대모의)을 의미한다. 기압골이 발달하려면 골 후면에서 한기가 강하게 남하해야 하는데 북서풍이 모델 예상보다 약하게 불고 있으므로 기압골 역시 예상보다 발달하지 못한 상태임을 알 수 있다. 따라서 강수대도 모델이 모의하는 것보다 약화되거나 뒤에서 미는 힘이 약하므로 크게 남하하지 못할 것으로 예상할 수 있다.

⑤ UM/ECMWF/KIM 모델 비교

UM과 ECMWF, KIM이 모의하는 결과물이 다른 경우가 많다. 특히 상층 기압골의 위치와 강도 또는 지상 예상장의 강수 영역, 저기압의 이동 경로와 속도 등이 다를 때에는 무슨 모델을 기준으로 예보를 해야 할 지 고민이 될 수밖에 없다. 이 때 UM과 ECMWF, KIM을 실황과 각각 비교함으로써 어떤 모델이 실황과 더 유사한지, 강수 메커니즘을 더 논리적으로 모의하고 있는지 등을 분석하여 보다 신뢰성이 높은 모델을 선정할 수 있다.

이 과정을 수행하기 위해서는 먼저 각각의 수치모델이 현상을 어떻게 모의하고 있는지, 시스템을 어떻게 진행시키고 있는지 분석해야한다. 뿐만 아니라 **수치모델에서 모의하는 구름과 강수의 역학적인 해석도 반드시 필요하다**. 이러한 과정을 먼저 거친 다음 실황을 잘 반영하고 있는지 비교하는 단계로 넘어간다.

⑥ 그 외 다양한 관측 자료 이용

앞서 설명한 자료 외에도 연직바람관측장비(윈드 프로파일러), 고층관측자료(레인 존데), 자동기상관측자료(AWS), 낙뢰관측자료 등 COMIS와 선진예보시스템에서 제공하는 다양한 산출물을 이용하여 실황분석을 할 수 있다. 또한 통합기상분석시스템을 이용하여 관측 자료와 수치모델 자료를 중첩시켜 직접 비교해 볼 수도 있고 중국 관측 지점의 예상단열선도 또한 이용할 수 있다. 상황에 따라 효율적으로 자료를 취사선택하여 실황분석에 활용하도록 하자.

6. 3 실황분석에 기반한 예보

6. 3. 1 실황분석을 이용한 단기예보 업무 절차

수치모델이 발달하면서 방대한 자료들이 쏟아지고 있다. 예보관은 한정된 시간 안에 많은 자료들을 똑같이 다룰 수 없기 때문에 어떻게 효율적으로 이용하느냐가 예보 기술에 중요한 축이 되었다. 그러나 수치모델에만 의존해서는 안 된다. 자칫하면 균형을 잃고 예보관의 의견과 일치하는 모델 자료만 선택하여 편향된 시각을 가질 수 있기 때문이다. 또한 수치모델이 예측하지 못하는 현상이 발생할 경우 현상에 대한 메커니즘을 이해하기 어려울 뿐만 아니라 적절하게 대응하기 힘들어진다. 이것이 실황분석을 중심으로 한 현상의 이해가 바탕이 되어야 하는 이유이자 더 나아가 예보 업무의 절차로 활용해야 하는 이유이다.

실황분석에 기반한 예보를 위해 가장 먼저 해야 할 일은 관측 자료를 이용해 우리나라 주변의 기상현상을 파악하는 것이다. 기상현상이 어떻게 발달한 것인지 메커니즘을 분석하고 이를 수치모델 자료와 비교한다. 실황과 수치모델 간에 차이가 나타난다면, 이러한 차이점이 우리가 주목해야 할 시스템에 어떤 영향을 주게 될 지 예상한다. 실황 분석을 바탕으로 예상 시나리오를 작성하는 것이 실황분석의 최종 단계이다.

단계 1. 실황 파악 - 우리나라 주변의 기상 현상을 파악

현재 일어나고 있는 우리나라 주변의 기상 현상을 파악하고 단시간 혹은 1~2일 내에 우리나라에 영향을 줄 현상이 있다면 위성, 레이더 등 다양한 관측 자료를 이용해 분석하고 감시한다. 단순히 현재의 상황만 파악하는 것이 아니라 시간적, 공간적인 변화와 추이도 분석하고 수치모델과 비교해서 모델이 실황을 잘 반영하고 있는지 파악한다. 특히 위성 영상에 존재하는 구름과 건조역(암역)은 3차원 구조로 해석해야 한다.

단계 2. 메커니즘 분석 - 기상현상의 원인 분석

기상 현상의 원인 및 메커니즘을 분석한다. 단계 1에서 파악한 기상현상은 무엇에 의한 것인지, 앞으로 영향을 줄 현상은 어떤 메커니즘에 의해 발달할 것인지 위성영상, GTS 분석(등고선, 등온선 묘화) 등 관측 자료를 바탕으로 3차원적인 구조를 찾는다. 메커니즘을 알게 되면 추후 발달할 것인지 약화될 것인지, 어디로 이동할 것인지 예측할 수 있게 된다. 현상의 변화가 클 때에는 현재뿐만 아니라 이전 시간대도 분석하여 발달 타이밍, 속도, 이동 경로 등을 알아본다. 단계 1에서 단계 2까지 이르는 동안 수치모델은 관여하지 않으며, 실황분석만으로 1차적인 예보 시나리오를 작성한다.

단계 3. 실황과 모델 간 차이 인식 - 수치모델의 분석

수치모델은 주요 기상현상과 앞으로 영향을 줄 시스템에 대해 어떻게 모의하고 있는지 시간적, 공간적, 양적으로 검토한다. 실황분석과 수치모델을 비교하여 차이점을 파악한다. 시스템을 이끄는 요소에 대해 수치모델과 GTS 분석 자료를 비교하거나 수치모델 편차 등을 이용하여 차이를 정량적으로 확인한다. 실황과 모델을 비교하기 위해서는 수치모델이 예측하고 있는 구름과 강수의 역학적 해석이 반드시 선행되어야 한다.

단계 4. 실황분석 적용 - 실황분석을 바탕으로 예상 시나리오 작성

실황과 수치모델 간에 나타난 오차를 반영한다. 수치모델 결과를 보정하여 단계 2에서 작성한 예보 시나리오를 수정한다. 시스템의 특징에 기반한 역학적 기상요소를 중심으로 유사사례를 찾아 제2, 제3의 시나리오를 준비한다. 다중 시나리오를 준비하는 것은 시스템의 변동 가능성을 고려하여 변경이 필요한 경우 즉시 대응하기 위함이다.



그림 6-7. 실황분석을 이용한 예보 업무의 절차

6. 3. 2 실황분석을 이용한 중기예보 업무 절차

위와 같은 과정을 중기예보에 적용한다면 내용은 약간 달라질 것이다. 활용할 수 있는 관측 자료가 적고, 수일에 걸쳐 우리나라에 접근하는 동안 변동이 크기 때문에 실황분석은 더욱 어려운 작업이다.

단계 1. 실황 파악 - 전체 흐름 파악 및 관심 대상 찾기

우리나라 주변의 기상현상 뿐만 아니라 수증기 영상이나 상층 일기도를 통해 전체적인 대기의 흐름을 파악한다. 수 일 내에 발달하여 우리나라에 영향을 줄 것으로 예상되는 대상을 찾는다.

단계 2. 메커니즘 분석 - 관심 대상의 발달 요소와 메커니즘 분석

관심 대상이 위치한 곳에서 상층 한기 덩어리, 상층 제트와 같이 시스템을 발달시키

는 요소가 있는지, 시스템이 발달하기 위해 어떤 조건이 갖추어져야 하는지 구조와 특징을 분석한다. 또한 관심 대상이 우리나라에 접근한다면 어떠한 메커니즘으로 강수와 같은 기상 현상을 유발할 것인지 파악한다.

단계 3. 실황과 모델 간 차이 인식 - 수치모델의 분석

관심 대상이 위치한 곳의 고도장, 온도장, 강풍대 등을 수치모델 예상장과 비교한다. 즉, 단계 2에서 분석한 시스템이 발달하기 위한 조건을 모델이 어떻게 모의하고 있는지, 수치모델은 어떤 메커니즘으로 시스템을 발달시키는지 분석하고 실황 자료와 비교한다.

단계 4. 실황분석 적용 - 실황분석을 바탕으로 예상 시나리오 작성

실황과 수치모델 간에 나타나는 오차를 반영하여 수치모델 결과를 보정한다. 실황분석을 토대로 시스템의 발달 타이밍 및 앞으로 감시해야할 요소에 대해 시나리오를 작성한다.

모든 예보 업무가 위 절차에 꼭 맞아 떨어지는 것은 아닐 것이다. 분석해야 할 대상과 시간에 따라 관측 자료와 수치모델 자료를 유연하게 선택해야한다. 이러한 작업은 메커니즘 분석이 철저히 이루어지지 않으면 진행이 어렵게 된다. 시스템의 메커니즘을 알아야 어느 시점에, 어떤 자료를 보고, 무엇을 분석할지 비로소 그림이 그려질 것이다.

이러한 실황분석은 항상 수행되어야하며 각 시스템의 특징을 참고하여 어떻게 진행하고 있는지 파악하기 위해 수시로 점검해야한다.

6. 3. 2 지역의 역할

실황분석은 예보를 위해 선행해야하는 필수 과정으로 종관 규모의 시스템을 이해하는 작업이다. 현재 나타나고 있는 기상 현상, 우리나라에 영향을 줄 것으로 보이는 시스템의 구조와 특징을 파악하고 흐름을 이해하는 것이다. 그러나 지역의 예보관은 종관 규모의 시스템이 각 지역에 어떤 영향을 주는지에 대한 시나리오를 예상해야한다. 일차적으로 종관 규모 시스템을 이해한 후 그 시스템에 의해 지역적으로 나타나는 중규모 또는 국지 현상에 대한 감시와 분석이 추가되는 것이다.

그러나 종관 규모에서의 실황분석만 수행하거나 중규모/국지규모에서의 실황분석만 수행해서는 안된다. 국지현상이라 하더라도 종관장의 지배를 받기 때문에 실황분석에 있어 종관 규모의 분석을 소홀히 할 수 없다. 반대로 종관 규모에만 집중하면 지형, 국지풍의 영향 등 시스템을 국지적으로 강화 또는 약화시키는 요소들을 놓치게 된다.

앞서 소개한 실황분석 절차에 따라 시스템이 지역을 통과하는 시간, 변화 경향, 지역적 특성을 고려하면서 각 지역의 연구 결과도 활용하여 예상 시나리오를 작성해야 한다.

다음 절에서는 2018~2019년 겨울철 강수 사례를 통하여 각 단계별로 실황 분석이 어떻게 이루어지는지 소개하도록 하겠다.

6. 4 실황분석 사례

6. 4. 1 기압골에 의한 강수 사례(2019년 1월 12일 사례)

2019년 1월 12일 강수 예보에 대해 하루 전인 1월 11일 실황분석을 한 사례로 수치모델은 1월 10일 21시 생산 자료를 이용하였다.

수치모델은 상해 부근으로 500hPa 약한 기압골이 통과하면서 하층의 불안정을 유도하고, 대만 부근에서 발달한 지상 저기압이 제주도 남쪽 해상을 통과하며, 제주도와 남부지방에 강수를 모의하였다.

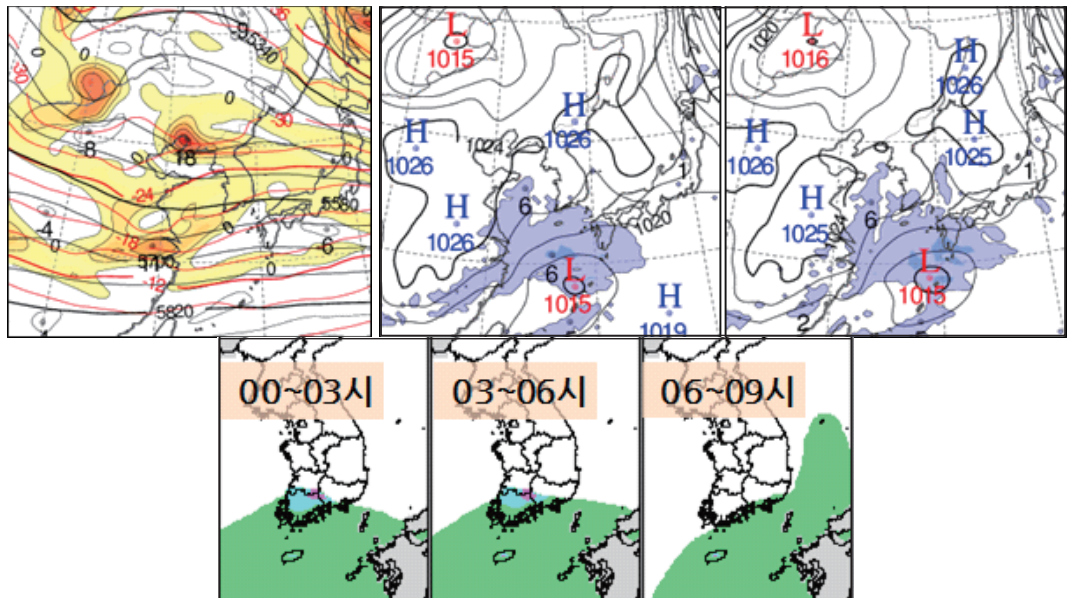


그림 6-8. 2019년 1월 12일 03시 500hPa 예상장(+30h)과 03시, 06시 지상 예상장(상)과 11일 05시 발표 동네예보 강수 분포도(하). 모델은 제주도 남쪽 해상을 지나는 저기압 주위로 넓은 강수대가 분포하여 전남까지 영향을 주는 것으로 모의하였다.

(단계 1. 실황 파악) 위성 영상과 중국의 강수량(GTS) 확인 후 지상예상장과 비교

2019년 1월 12일 제주도 남쪽 해상을 지나갈 것으로 예상되는 저기압이 현재(11일) 중국 내륙에서 얼마나 강수를 발달시키고 있는지 파악하기 위해 GTS 자료를 살펴보았다. 2019년 1월 11일 09시 GTS 전문에 관측된 6시간 강수량을 보면 강수량은 적지만 강수영역이 중국남부지방에서부터 산둥반도 남쪽까지 광범위하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 히마와리 위성(가시) 영상에서도 넓은 구름대의 분포가 뚜렷하게 보인다.

그러나 1월 10일 21시에 발표된 수치모델의 지상 예상장에는 상해 부근과 그 서쪽 내륙으로만 강수를 모의하고 있다. 수치모델이 모의하는 강수영역과 실제 강수영역에 큰 차이가 있는 것을 알 수 있다.

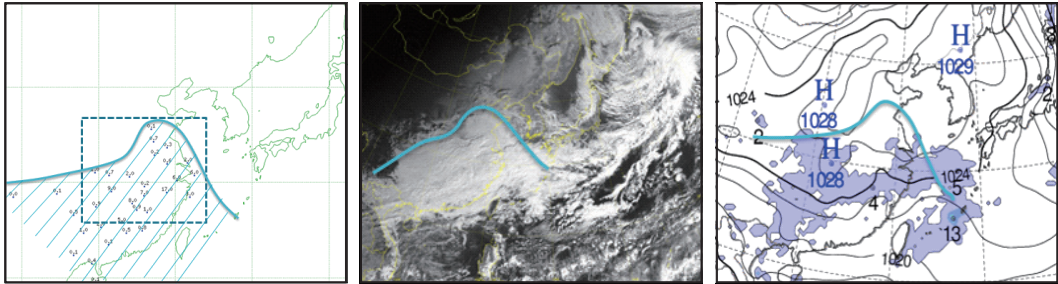


그림 6-9. 2019년 1월 11일 09시 6시간 강수량 실태(GTS) 그림 6-10. 2019년 1월 11일 09시 하마와리 위성(가시) 영상 그림 6-11. 2019년 1월 11일 09시 UM 지상 예상장(+12h)

⇒ 지난 6시간 동안 GTS에 강수량이 기록된 지역은 UM 지상 예상장이 모의한 영역보다 넓게 나타났다.

(단계 2. 메커니즘 분석) GTS 분석을 이용한 현상의 원인 찾기

모델이 모의하는 것 보다 넓은 영역에서 강수가 나타난 원인을 알기 위해 700hPa GTS 전문을 분석하였다. 먼저 12시간 전인 1월 10일 21시의 700hPa를 묘화하였다 (그림 6-12). 산둥반도 서쪽과 몽골 남쪽으로 각각 기압골이 그려지는데, 산둥반도 서쪽의 기압골은 깊은 형태로 후면에 한기(온도골)를 동반하고 있어 기압골의 발달을 지원하고 있었다. 기압골 전면인 산둥반도 서쪽~상해 부근으로 기압능도 있어 하층의 고기압을 강화시킬 수 있을 것으로 예상하였다.

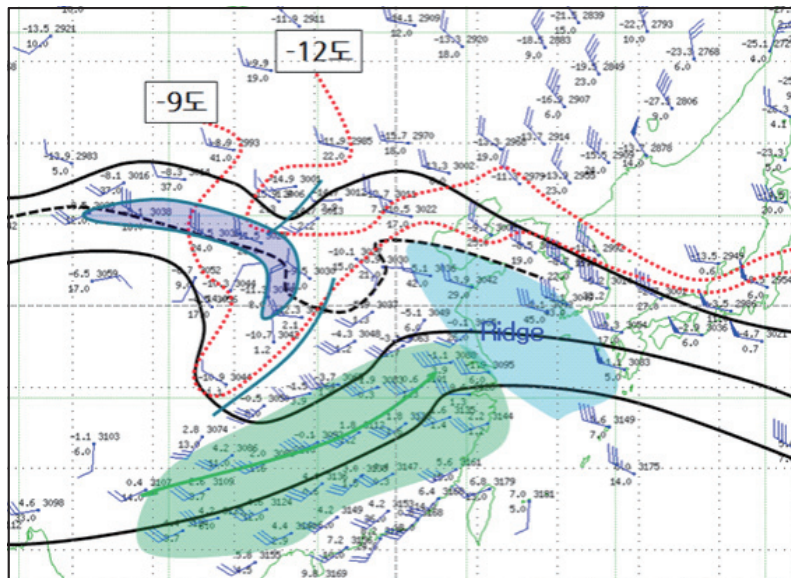


그림 6-12. 2019년 1월 10일 21시 700hPa GTS. 산둥반도 서쪽에 온도골을 동반한 기압골이, 전면에는 기압능이 있다.

그 다음 1월 11일 09시 700hPa GTS를 분석하여 12시간 동안 어떤 변화가 있었는지 보았다(그림 6-13 좌). 몽골 남쪽의 기압골은 빠르게 이동하였고 산둥반도 서쪽의 기압골은 온도골에서 떨어져 나온 한기가 후면에 계속 존재하면서 기압골의 세력이 유지되고 있었다. 700hPa 기압능은 동진하여 서해상에 자리하고 있었다. 한편 기압골 전면(중국남부~산둥반도 남쪽)에 강풍대가 형성되어 있는데, 12시간 전과 비교하여 풍속이 강해지고 강풍 영역도 확장하였음을 알 수 있다.

1월 11일 09시 지상 GTS(그림 6-13 우)를 묘화해보면 대만 부근에 지상 저기압이 있는데 이것이 모델이 모의한 남쪽 저기압이다. 한편 서해상에서 일본 남동쪽 해상까지는 700hPa 기압능에 의해 발달한 지상 고기압이 강하게 버티고 있다. 이 견고한 고기압에 막혀 남쪽 저기압은 북상하기 어렵다. 따라서 모델이 모의하고 있는 남부지방의 강수는 남쪽 저기압에 의한 것이 아니다.

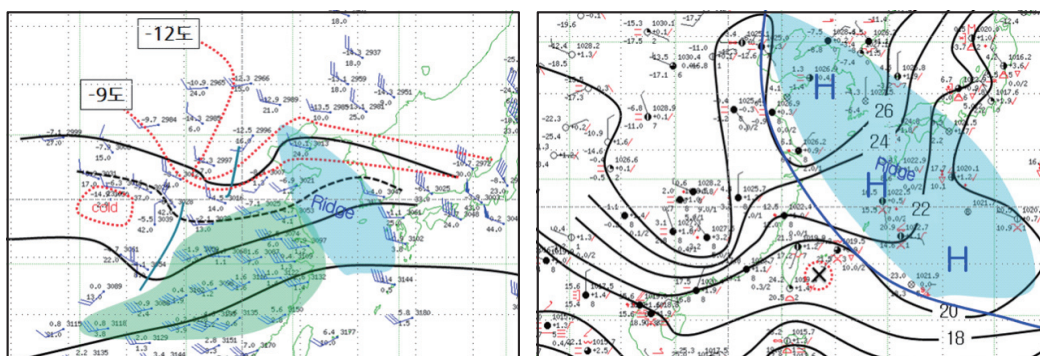


그림 6-13. 2019년 1월 11일 09시 700hPa GTS(좌)와 지상 GTS(우) 분석. 산둥반도 서쪽의 기압골은 여전히 한기를 동반하고 있다. 한편 서해상에서 일본 남동쪽 해상까지 고기압이 견고하게 버티고 있어 대만 부근의 지상 저기압은 북상하기 어렵다.

(단계 3. 실황과 모델 간 차이 인식) 모델과 실황의 차이를 확인

모델은 산둥반도 서쪽 기압골의 강도를 전일부터 계속 과소모의하고 있는 경향을 보였다. 선진예보시스템에서 제공하는 모델과 실황 간 700hPa 풍속 편차도를 보면 기압골 후면(북서풍 영역)으로 음의 편차가 나타나는데 이것은 실황의 풍속이 모델 예상보다 더 강하다는 것을 의미한다. 기압골 후면으로 예상보다 강한 북서풍이 불고 있으므로 기압골은 모델이 모의하는 것보다 발달할 수 있음을 시사한다. 반대로 모델은 700hPa 기압골에 의한 강수를 약하게 모의하고 있었다.

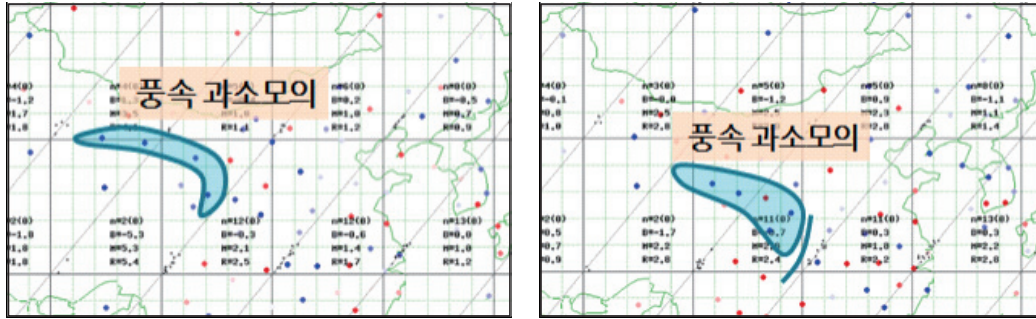


그림 6-14. 2019년 1월 10일 21시 700hPa 풍속 모델 편차(좌)와 11일 09시 700hPa 풍속 모델 편차(우). 모델은 12시간 전부터 산둥반도 서쪽 기압골 후면의 북서풍을 약하게 모의하고 있다. 즉, 700hPa 기압골은 모델 예상보다 강하게 발달하였다.

(단계 4. 실험분석 적용) 수치모델에 실험분석 오차를 적용하여 예상 시나리오 작성

위의 실험분석을 종합해보면 모델보다 넓게 나타나는 중국내륙의 강수대는 산둥반도 서쪽의 700hPa 기압골에 의한 것이고 모델은 이 기압골을 과소모의하고 있었다. 기압골 후면의 한기이류를 실제보다 약하게 모의하면서 기압골 전면에 발달해 있는 강수대를 모의하지 못하였다. 한편, 대만 부근의 지상저기압은 서해상~일본 남쪽 해상에 있는 고기압에 막혀 북상하지 못할 것임을 알 수 있었다.

따라서 12일에 예상되는 강수는 남쪽 저기압이 아니라 서쪽 중층 기압골에 의한 것이므로 예보보다 강수영역을 확장시켜야 할 것이다(부록/사후분석 6-1 참고).



그림 6-15. 2019년 1월 12일 실험분석을 반영한 수정 시나리오

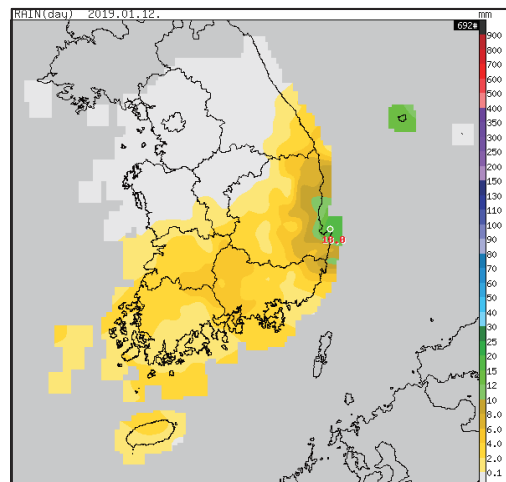


그림 6-16. 2019년 1월 12일 일강수 분포 결과

6. 4. 2 남쪽 저기압에 의한 강수 사례(2019년 1월 19~20일 사례)

2019년 1월 19~20일에 예상되는 남쪽 저기압에 의한 강수를 예보하기 위해 이틀 전인 1월 18일에 실태분석을 실시하였다. 수치모델은 1월 17일 21시 발표된 자료를 이용하였다.

이 사례의 문제점은 UM과 ECMWF이 모의하는 강수영역이 다른 것이었다(그림 6-17). UM은 충청도와 경상북도까지 강수대가 북상하는 반면, ECMWF는 전북과 경남까지만 강수를 모의하였기 때문이다. 따라서 어떤 모델을 기준으로 예보해야 할 지 실태분석을 통해 판단하였다.

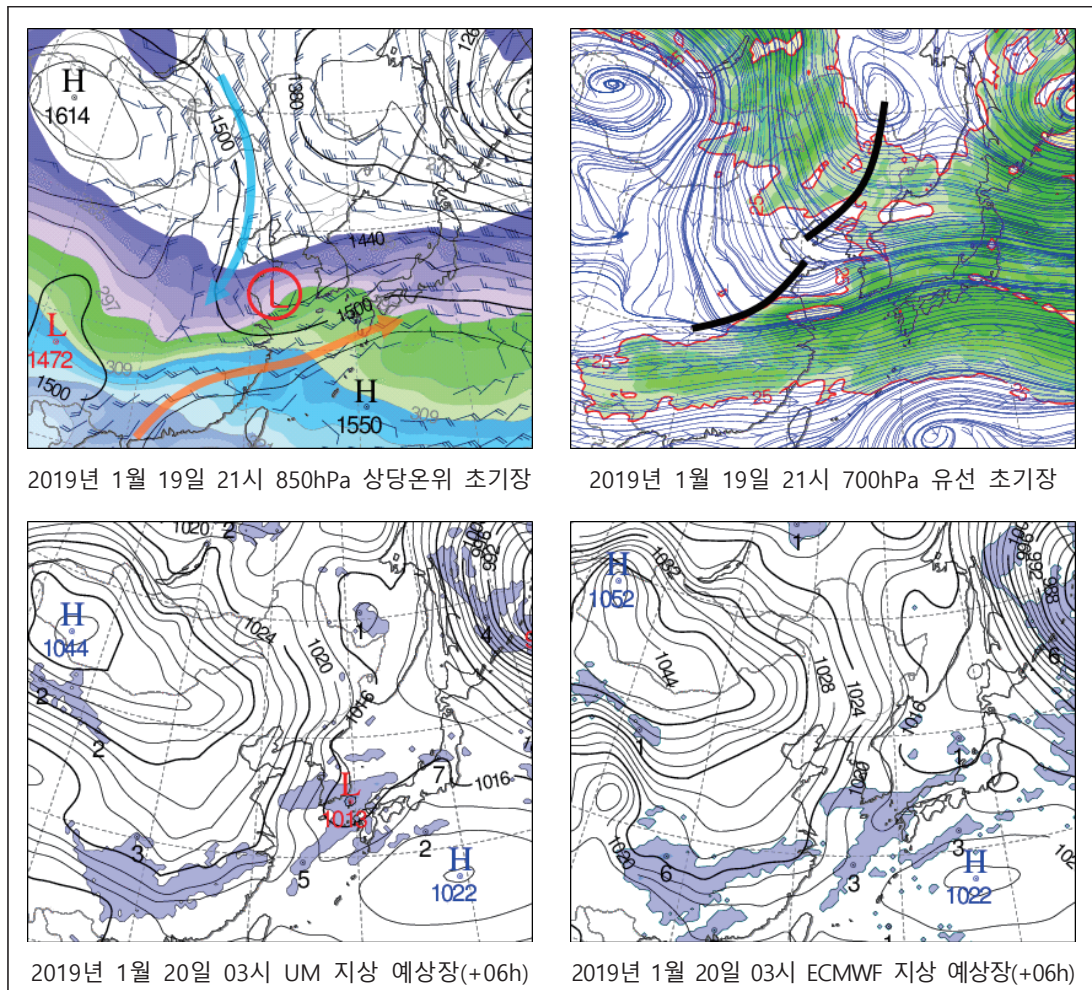


그림 6-17. 2019년 1월 19~20일 강수 예상일기도. 상해 부근에서 다가오는 저기압에 의한 강수를 UM은 충청도~경북까지, ECMWF는 전라도와 경남에만 강수를 모의하였다.

(단계 1. 현황 파악) 위성 영상 분석을 통한 기압계 파악

수증기 영상(그림 6-18)을 보면 산둥반도 서쪽에 기압능이 있어 기압능 전면 하강 기류가 쌓이는 상해 부근에 하층 고기압이 발달하고 있음을 알 수 있다. 우리나라에는 북서풍의 하강기류가 지배하고 있으며, 이 흐름을 따라간다면 몽골 남동쪽과 바이칼 호 북쪽의 단파골은 우리나라로 남하하기보다는 중국북동지방으로 흘러갈 것으로 보인다. 한편, 시베리아 기압능 전면에서 남하하는 찬 공기는 하층에 쌓이면서 대륙고기압을 발달시키는 역할을 한다. 상층 기압계에는 우리나라에 영향을 줄 단파골 등의 요소가 없으나 상해 부근의 하층 고기압과 확장하는 대륙고기압 사이의 한난경계역에서 강수가 발달한다. 즉, 상층의 지원 없이 하층에서 발달하는 강수 시스템이다.

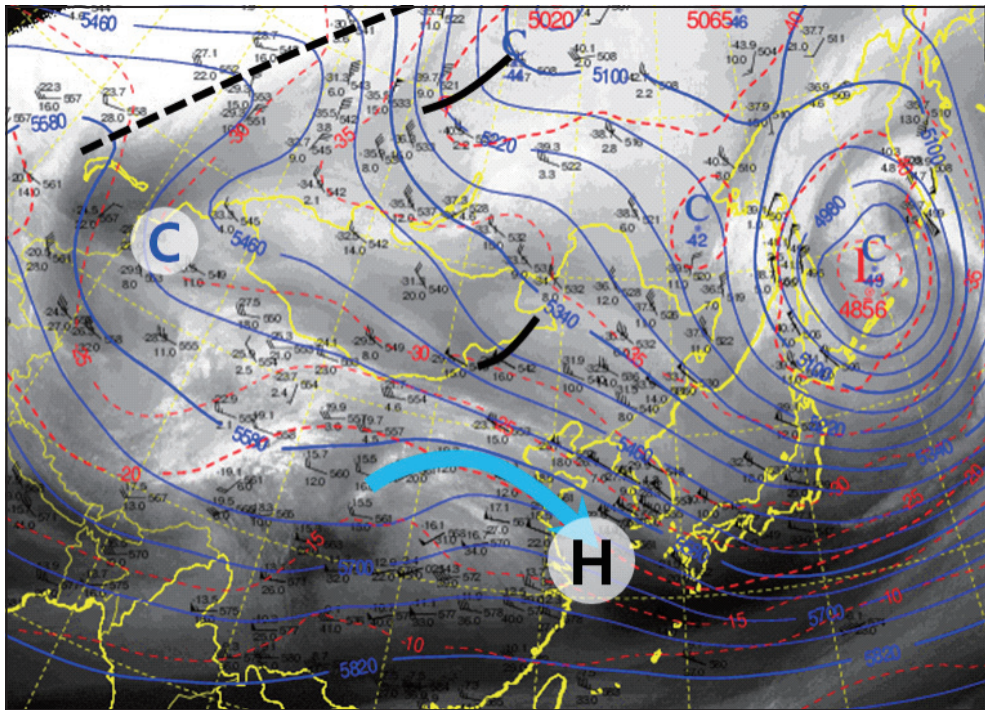


그림 6-18. 2019년 1월 18일 09시 수증기 + 500hPa 분석장

(단계 2. 메커니즘 분석) GTS 분석을 이용한 현상의 원인 찾기

2019년 1월 18일 09시 850hPa GTS(그림 6-19, 우)를 분석하였다. 산둥반도 남쪽에는 온도능이, 그 후면에는 온도골이 그려졌다. 하층의 온도 불연속면에서 저기압이 발달하는 구조임을 알 수 있다. 즉, 북서쪽에서 확장하는 대륙고기압의 차가운 북풍과 남쪽의 이동성 고기압 가장자리를 따라 유입되는 따뜻한 남서풍이 만나는 한난경계역에서 하층 저기압이 형성되는 것이다. 또한 700hPa GTS(그림 6-19, 좌)에도 중국내륙에 온도능을 동반한 기압능이 발달해 있고 이 온도능을 향해 40kts 이상의 남서풍이 강하게 불고 있었다. 기압능 후면에는 온도골과 함께 기압골이 그려지면서 하층 저기압은 700hPa 기압골의 지원을 받아 발달할 것으로 보았다.

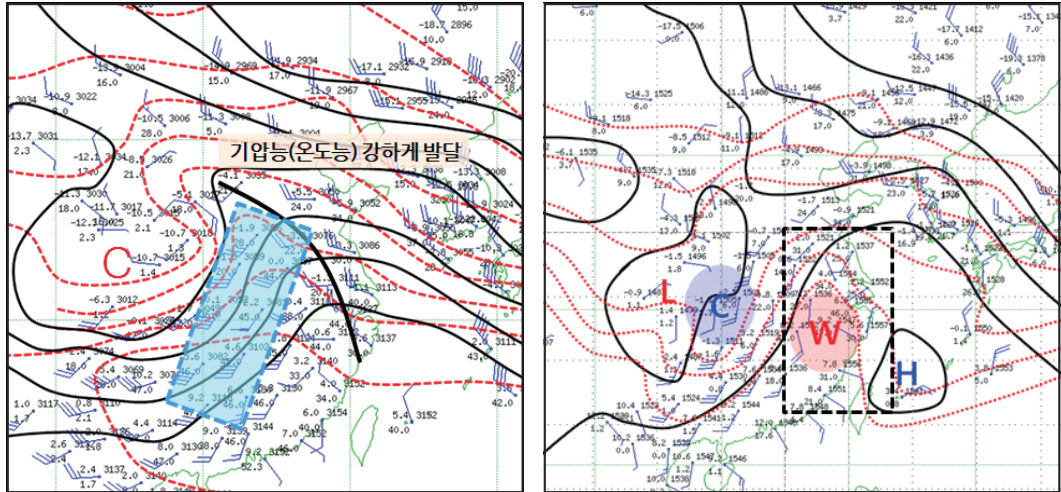


그림 6-19. 2019년 1월 18일 09시 700hPa GTS(좌)와 850hPa GTS(우) 분석

(단계 3. 실황과 모델 간 차이 인식) 수치모델과 실황의 차이를 확인

중국내륙에 형성된 난역에서 불고 있는 700hPa 남서풍의 풍향과 풍속에 대해 모델과 실황을 비교하였다. 풍속은 음의 편차인 것으로 보아 모델이 예상하는 것보다 남서풍이 강하게 불고 있었다. 그에 따라 기압능(온도능)도 강하게 발달해 있고 남쪽 기압골에 의한 강수대도 강한 남서풍을 타고 북상할 가능성이 높아 보였다. 풍향은 모델이 모의하는 것보다 180°에 가까운 것을 알 수 있는데(그림 6-21), 이는 700hPa 난역에서 남풍 성분이 강해졌다는 것을 의미한다.

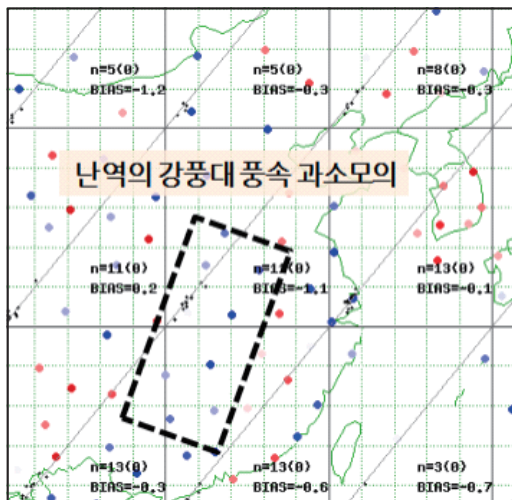


그림 6-20. 2019년 1월 18일 09시 700hPa 풍속 모델 편차. 음의 편차는 남서풍이 예상보다 강하게 불고 있는 것을 의미한다.

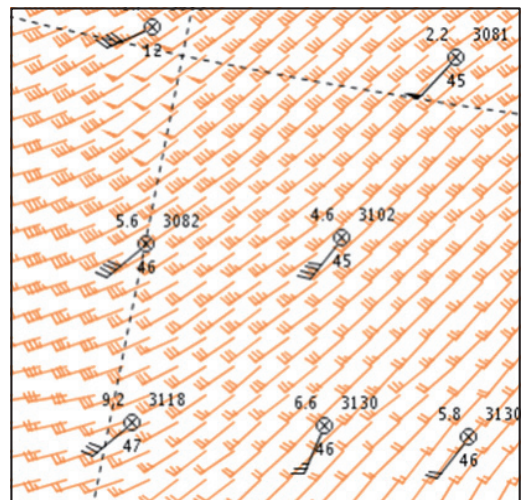


그림 6-21. 2019년 1월 18일 09시 700hPa 바람 모델-관측 중첩. 실황(검은색)의 바람은 모델 예상(주황색)보다 남풍 계열로 기울어져 있다.

850hPa 기온에 대한 모델 편차도 살펴보았다. 온도능 영역에 음의 편차가 있는 것으로 보아 모델 예상보다 기온이 높은 상태임을 알 수 있다. 반면 온도골 영역은 양의 편차로 기온이 모델 예상보다 낮았다. 온도 불연속면에서의 온도경도가 모델이 모의하는 것보다 크게 형성됨으로써 저기압이 예상보다 빨리 발달하여 한반도로 접근할 것으로 분석할 수 있다. 또한 850hPa의 난역에도 남풍이 예상보다 강하게 불고 있어 남쪽 기압골 강수대의 북상 가능성을 뒷받침해주며 접근 속도도 빨라질 가능성을 내포하고 있다.

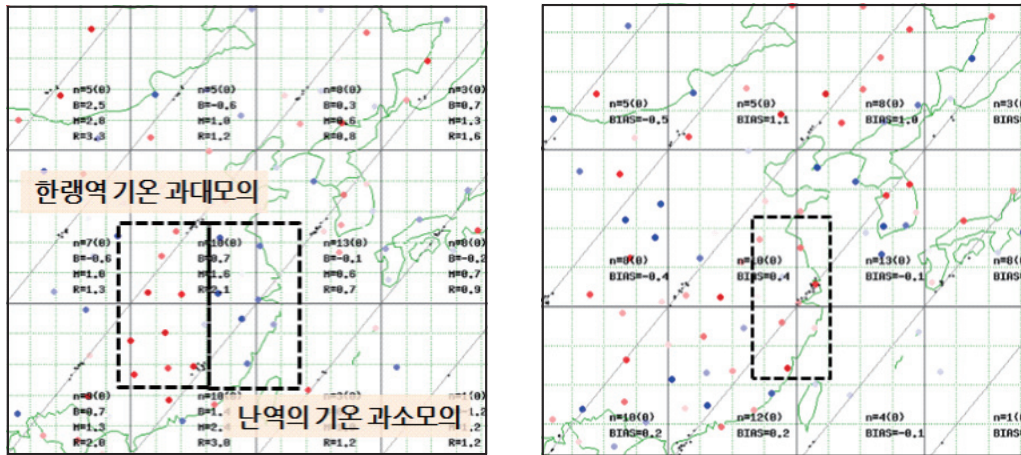


그림 6-22. 2019년 1월 18일 09시 850hPa 기온 모델 편차(좌), 풍속 모델 편차(우)

(단계 4. 실태분석 적용) 수치모델에 실태분석 오차를 적용하여 예상 시나리오 작성

위의 분석 내용을 바탕으로 수치모델에 실태분석 오차를 적용하여 다음과 같은 예상 시나리오를 작성할 수 있다. 중국 남부의 온도능이 모델 예상보다 강하게 형성되어 있는 것으로 보아 난역이 이미 많이 북상해 있는 상태이다. 또한 난역의 풍속도 예상보다 강하고 남풍 성분이 더 강화되어 있다. 따라서 강한 남서풍을 따라 강수대가 더 북상할 가능성이 크므로 강수영역을 기존 예보보다 확대해야 할 것이다.

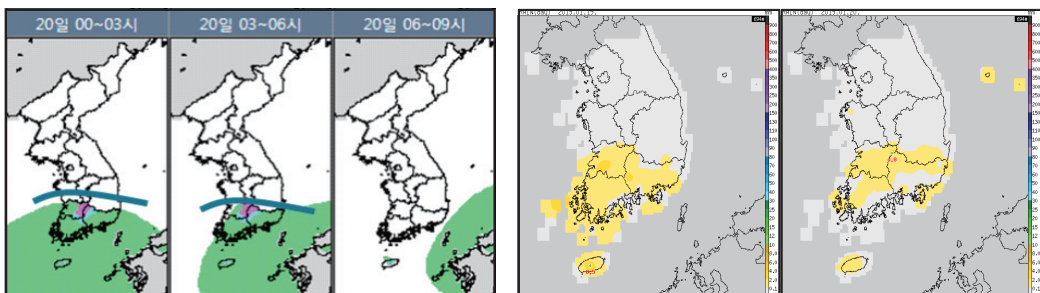


그림 6-23. 2019년 1월 20일 실태분석을 반영한 수정 시나리오(좌)와 19~20일 일강수 분포(우)

6. 4. 3 남쪽 저기압 강수(2018년 12월 20일 사례)

북한지방으로 약한 기압골이 통과한 후 산둥반도 남쪽에서 기압골이 접근할 때, 남쪽 기압골에 의한 강수대가 어디까지 북상할 것인지 예상하기 위해 하루 전인 12월 19일 실태분석을 하였다. 수치모델은 2018년 12월 18일 21시 모델을 기준으로 분석하였다.

북쪽 기압골이 먼저 통과하기 때문에 기압골 후면의 북서풍이 강하게 남하하면 강수대의 북상을 저지할 것이고 반대로 남쪽 기압골을 견인하는 전면의 남서풍이 강하게 분다면 강수대가 북상할 수 있음을 염두하여 분석하였다.

(단계 1. 실태 파악) 위성영상 및 중국 GTS 강수량 확인

2018년 12월 19일 12시에 관측된 적외 위성영상에 몽골 남동쪽으로 남하한 건조역에 의해 구름대가 약하게 형성되어 있는 것이 보였다. 더불어 12월 19일 09시 GTS에 관측된 6시간 강수량 자료에도 몽골 남동쪽에 약한 강수량이 기록되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 한편 중국내륙~산둥반도 남쪽에는 다층운대가 분포해 있다.

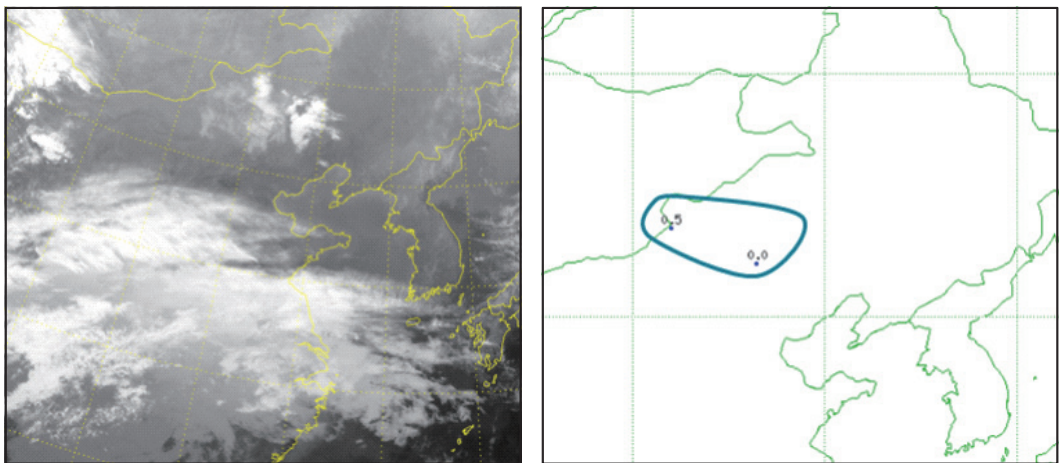


그림 6-24. 2018년 12월 19일 12시 적외 영상(좌)과 12월 19일 09시 GTS 6시간 강수량(우). 몽골 남동쪽에 약한 구름대가 형성되어 있고 6시간 강수량도 기록하였다.

(단계 2. 메커니즘 분석) GTS 분석을 이용한 현상의 원인 찾기

몽골 남동쪽에 약한 구름대가 발달하여 강수량이 기록된 이유는 무엇일까? 500hPa GTS를 묘화해보니 몽골 남동쪽에 온도골을 동반한 기압골이 그려졌다. 이 기압골에 의해 발달한 강수대임을 알 수 있다. 수치모델은 이 강수를 모의하지 않았다.

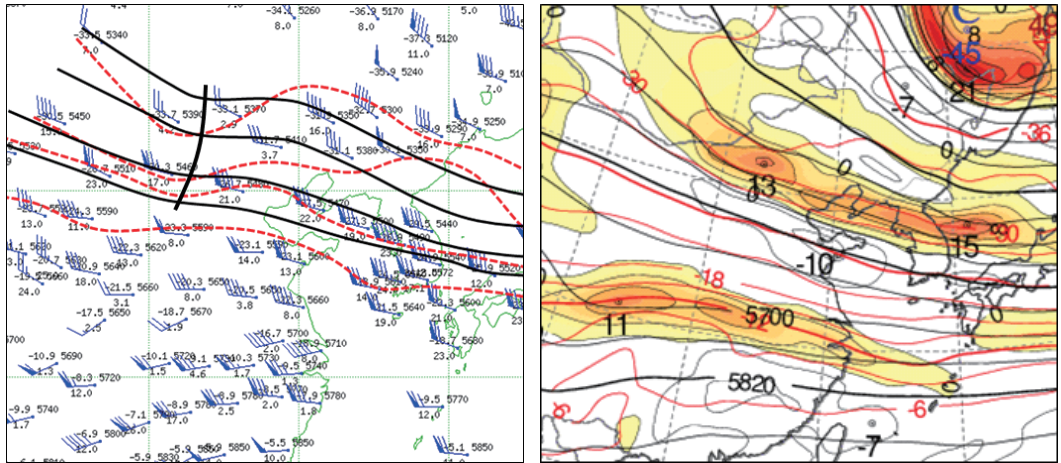


그림 6-25. 2018년 12월 19일 09시 500hPa GTS 분석(좌)과 09시 500hPa 예상장(+12h)(우). 몽골 남동쪽에 모델 예상보다 발달한 기압골이 있다.

(단계 3. 실황과 모델 간 차이 인식) 모델과 실황의 차이를 확인

앞서 남쪽 강수 영역에 영향을 주는 요소는 북쪽 기압골 후면의 북서풍과 남쪽 기압골 전면의 남서풍이라고 하였다. 북쪽 기압골의 발달 가능성을 분석하기 위해 500hPa의 GTS와 모델 예상장의 온도선을 비교하였다. 온도골이 예상보다 뚜렷하게 형성되어 있는 것을 알 수 있다(그림 6-25). 500hPa 기온에 대한 수치모델 편차는 기압골 전면에서 음의 편차, 후면에는 양의 편차로 나타났다(그림 6-26, 좌). 즉 모델 예상보다 기압골 전면의 기온은 높고, 후면은 낮았다. 기압골 발달을 돕는 후면의 한기가 예상보다 강하다는 것은 기압골이 깊어지면서 북쪽의 기류가 우세하다는 것을 의미한다. 또한 산둥반도~한반도까지 불고 있는 북서풍에 대해 모델의 풍속 편차가 음의 값이 나타나는 것으로 보아 북서풍이 예상보다 강하게 불고 있었다.

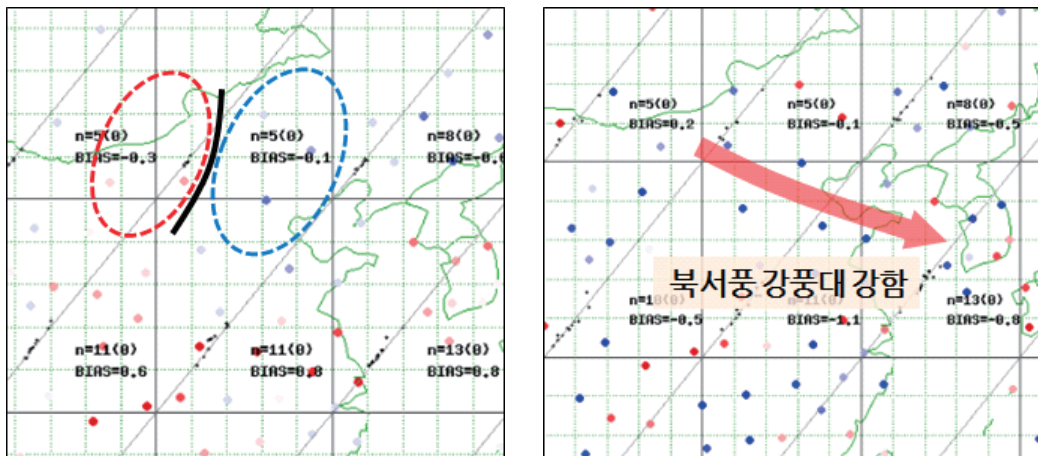


그림 6-26. 2018년 12월 19일 09시 500hPa 기온(좌)과 풍속 편차(우). 기압골 전면의 기온은 모델보다 높고 후면의 기온은 낮다. 기압골이 예상보다 발달하였고 북서풍도 강하게 불고 있다.

북쪽의 기류가 강한 것은 위성영상에서도 확인할 수 있었다. 수치모델의 적외모의영상에는 산둥반도에서 우리나라까지 구름을 그리고 있는 반면, 단계 1에서도 보았던 19일 12시 적외영상에는 구름이 관측되지 않았다. 기압골 전면의 강한 북서풍으로 인해 상층운대가 소산된 것이다.

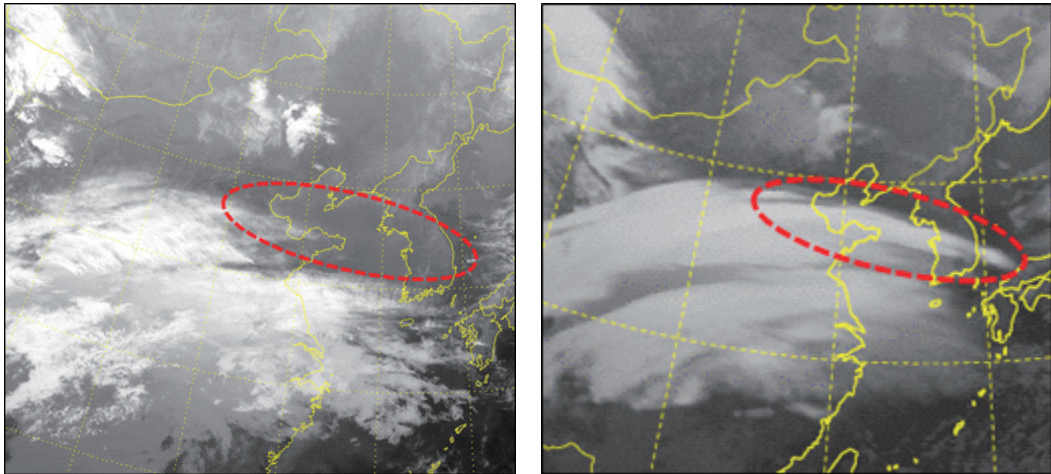


그림 6-27. 2018년 12월 19일 12시 위성 적외영상(좌)과 모델 모의영상(+15h)(우). 산둥반도~한반도에 걸쳐있을 것으로 예상했던 구름이 소산된 것으로 보아 북서풍이 강하게 불고 있다.

한편, 북쪽 기압골 후면에서 남하하는 찬 공기가 하층에 쌓이면서 고기압이 형성되는데 이 고기압의 세력은 남쪽 기압골이 북상하는 것을 저지하는 역할을 한다. 북쪽의 하층 고기압 가장자리에 있는 베이징의 단열선도(그림 6-28)를 모델과 비교해보았다. 700hPa 이하 고도의 북서풍은 수치모델이 모의한 것보다 더 강하게 불고 있었다. 즉, 모델 예상보다 고기압이 강하게 형성되었다.

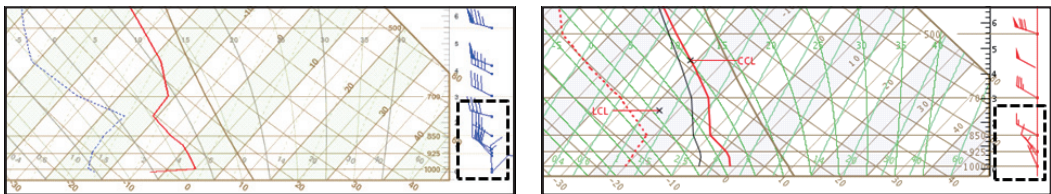


그림 6-28. 2018년 12월 19일 09시 베이징 GTS 단열선도(좌)와 예상 단열선도(우). 고기압 가장자리의 북서풍이 예상보다 강하게 불고 있다.

남쪽 저기압 전면에 형성되는 850hPa 하층제트(남서풍)의 풍속이 실황과 모델에 차이가 있는지 보았다. 수치모델에 대한 850hPa 풍속 편차는 뚜렷하지 않았다(그림 6-29). 즉, 남쪽 저기압을 북상시킬 요소가 확실하지 않았다. 반면 몽골 남동쪽에서 우리나라에 이르는 북서풍은 모델 예상보다 강하게 나타났다.

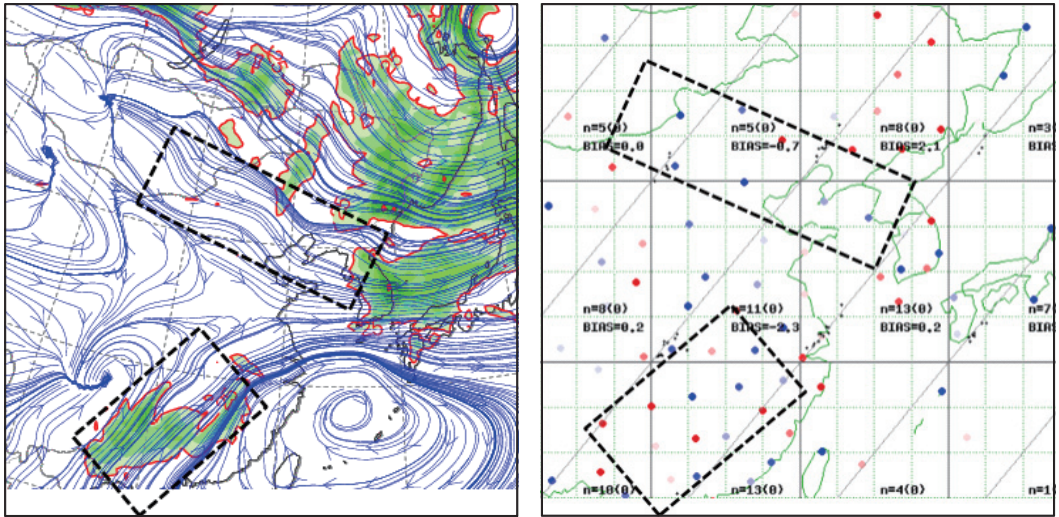


그림 6-29. 2018년 12월 19일 09시 850hPa 유선 예상장(+12h)(좌)과 850hPa 풍속 모델 편차(우). 남쪽 저기압 전면의 남서풍은 모델과 큰 차이가 없으나 몽골~한반도에 불고 있는 북서풍은 예상보다 강하게 불고 있었다.

(단계 4. 실태분석 적용) 수치모델에 실태분석 오차를 적용하여 예상시나리오 작성

남쪽 기압골을 발달시키고 북상을 강화시키는 요소인 하층 제트는 모델과 실태에서 편차가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 그러나 북쪽 기압골을 발달시키는 후면의 한기는 예상보다 강하게 남하하고 있었다. 북쪽골이 통과한 후 후면에 형성되는 고기압의 세력이 강한 것이다. 전체적으로 북쪽 기류가 강하게 나타나고 있기 때문에 남쪽 기압골에 의한 강수대는 북상하기 힘들 것으로 보아 남부지방의 강수는 남해안에만 제한적으로 예상하였다.

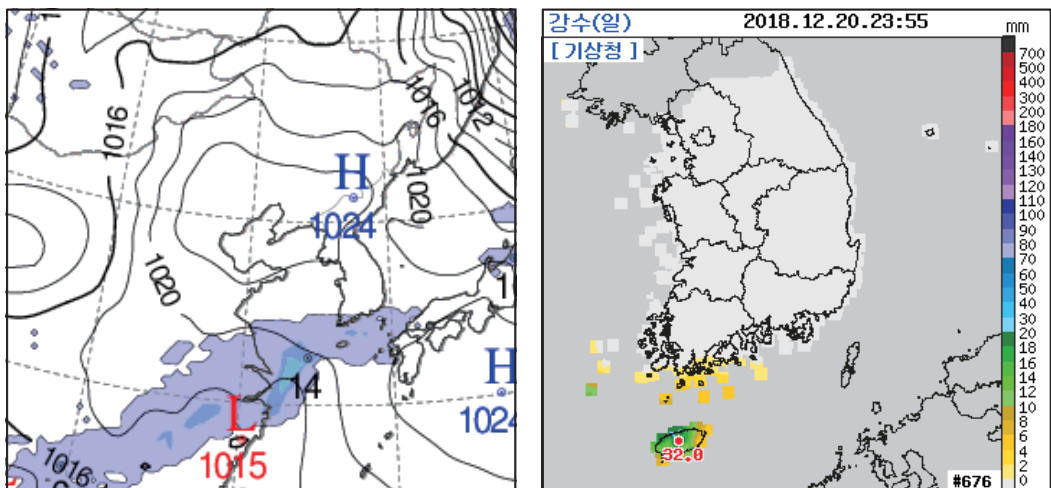


그림 6-30. 2018년 12월 20일 지상 예상장(좌)과 일강수 분포(우)

겨울 예비 가이드

부 록

겨울철 유형별 사후분석



목 차

1. 온난이류형 강수	146
1-1 2017년 12월 9일 사례	147
1-2 2017년 12월 10일 사례	151
1-3 2017년 12월 29일 사례	156
1-4 2018년 1월 30일 사례	160
1-5 2018년 2월 14일 사례	164
2. 발해만저기압형	169
2-1 2017년 11월 25일 사례	170
2-2 2017년 12월 18일 사례	174
3. 서해안형 강수	177
3-1 2017년 11월 18일 사례	178
3-2 2018년 1월 10일 사례	183
3-3 2018년 1월 23일 사례	188
3-4 2018년 1월 24일 사례	193
3-5 2018년 12월 8일 사례	197
3-6 2018년 12월 28일 사례	200
4. 동해안형 강수	203
4-1 2018년 2월 24일 사례	204
4-2 2018년 3월 4일 사례	209
4-3 2018년 3월 15일 사례	215
4-4 2019년 1월 31일 사례	220
4-5 2019년 2월 14일 사례	224
5. 습구온도를 활용한 강수형태판별	228
5-1 2018년 2월 8일 사례	229
5-2 2018년 11월 24일 사례	234
6. 실태분석	238
6-1 2019년 1월 12일 사례	239
7. 그 외 유형	241
7-1 2018년 2월 22일 사례	242
7-2 2018년 1월 15일 사례	248
7-3 2018년 1월 16일 사례	252
7-4 2018년 1월 22일 사례	257
7-5 2018년 3월 8일 사례	261
7-6 2019년 1월 30일 사례	267
7-7 2019년 2월 27일 사례	270

1. 온난이류형 강수

최하층(925hPa) 온난이류에 의한 중부지방 강수?

- 850hPa 이류가 없고, 중층 하강류 있다면 강수량 급감! -

1. 예보와 실황은?

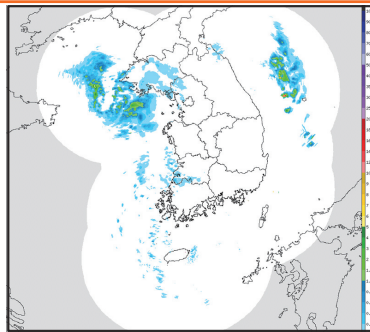
예보 (12월 8일 17시 발표)	실황
<ul style="list-style-type: none"> ▶ 예상 강수량 <ul style="list-style-type: none"> - 경기남부, 충청도, 전북: 5mm 내외 - 서울, 강원영서남부, 전남: 5mm 미만 ▶ 예상적설 <ul style="list-style-type: none"> - 충청도: 1~5cm - 전북: 1~3cm - 경기남부, 서울, 강원영서남부, 전남: 1cm 내외 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 강수량 <ul style="list-style-type: none"> - 충남서해안, 전북 5mm 미만 ▶ 적설 <ul style="list-style-type: none"> - 충남 1cm 미만, 전북 1cm 내외

최심신적설 (cm)

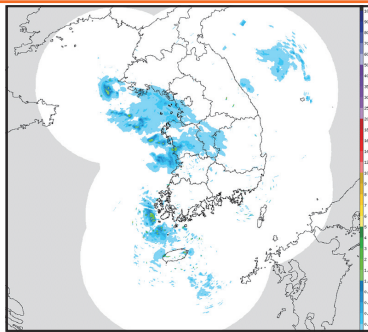
충청 단양 0.4 태안 0.5 홍성 0.3 보령 0.5

전북 새만금 1.0 줄포 0.4

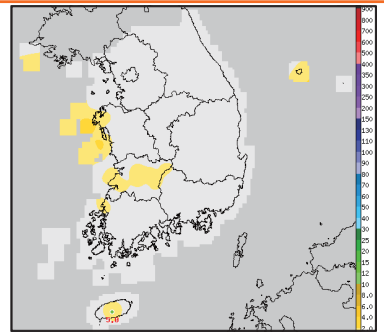
- 8일 오후부터 백령도 인근 해상으로 온난이류에 의하여 발달된 구름대 형성
- 강수대는 남동진하면서 세력이 점차 약화되었음



12월 8일 18시 레이더 영상



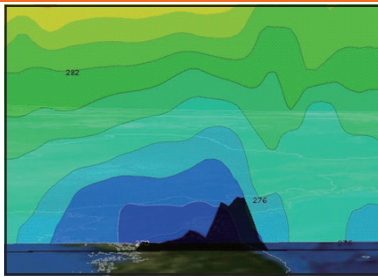
12월 9일 00시 레이더 영상



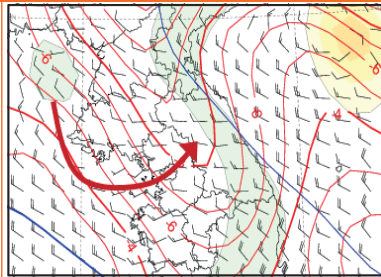
12월 9일 일강수량 분포

2. 강수메커니즘은?

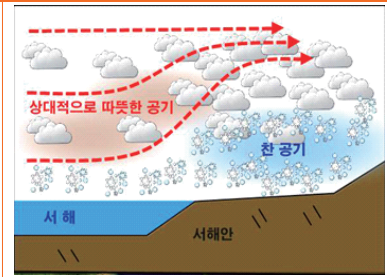
- (한기축적) 한반도 지역은 12월 7~8일 사이에 cP(시베리아고기압)의 영향을 받아 한기가 축적됨
- (하층 난기이류) 서해상으로 점차 난기이류가 형성되며 경압성이 높아지지만 전체적으로 풍속이 약하고 하층(925hPa)에서만 난기이류가 나타남
- 다만, cold pool이 강한 가운데 지상 저기압이 발달하며 서풍류가 남서류로 휘는 형태이기 때문에 강수 강도가 5mm내외는 가능할 것으로 예측



12월 8일 21시 중부지방 cold pool



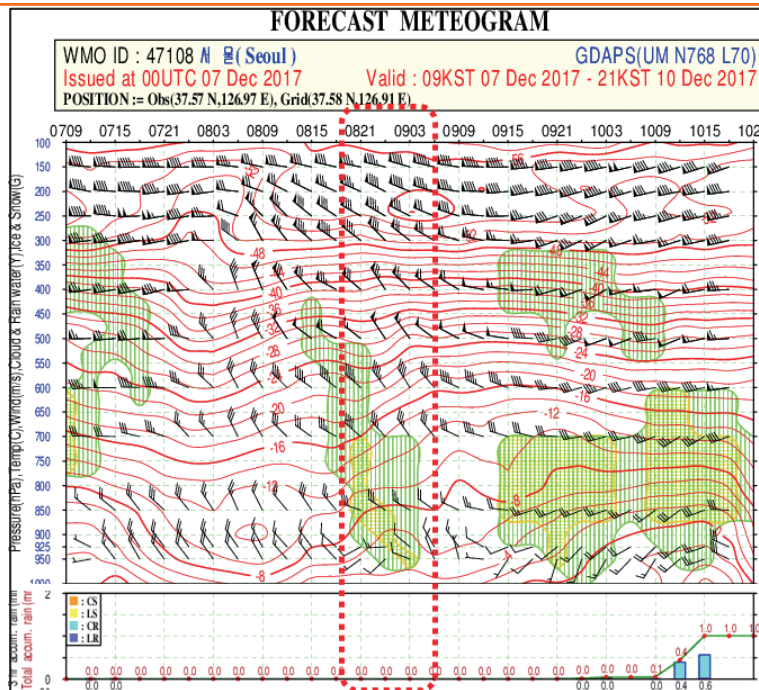
12월 8일 21시 925hPa 상세 바람장



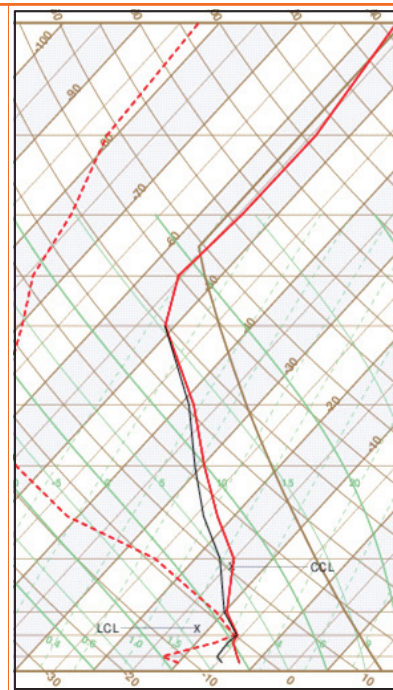
메커니즘 모식도

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

- 서울, 대전 등 해안에서 거리가 떨어진 곳은 0.2mm내외의 매우 약한 강수를 모의하였고 보령·서산 등 충남해안을 중심으로 2~3mm의 강수를 모의
- 내륙은 하층(925hPa 이하) 대기를 건조하게 예측, 해안은 지상부터 포화되는 것으로 모의

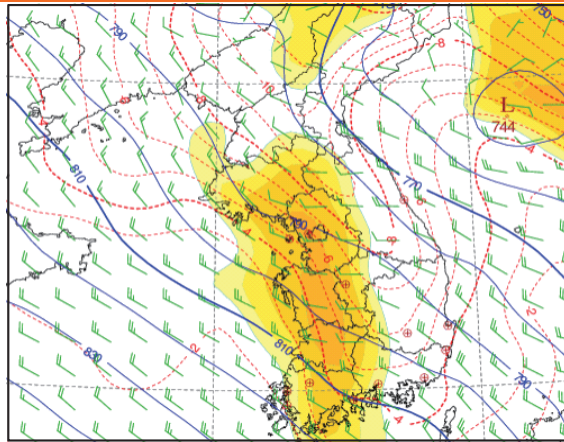


12월 7일 09시 서울 연직시계열

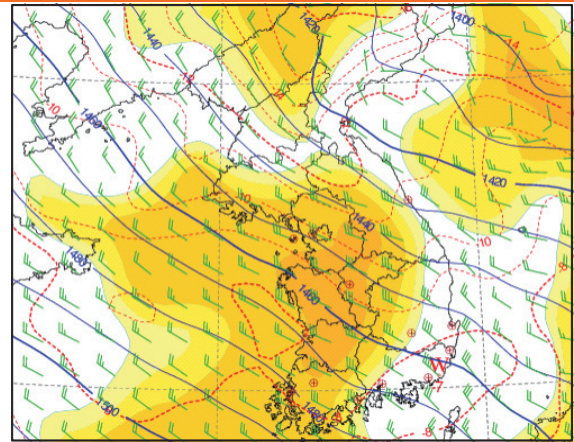


12월 9일 00시
서울 예상단열선도

- 925hPa 고도에서는 동서(서해안에서 내륙 방향)로 강한 온도경도가 나타나고 기류도 내륙 쪽으로 휘어 들어가면서 충분한 온난이류가 발생하는 것으로 모의
- 850hPa에서도 북서~남동 방향으로 기울어진 온도선들이 경도를 이루고 있지만 풍향이 온도선과 나란한 형태를 보이며 1.5km부근에서 이류가 단절된 형태를 보임



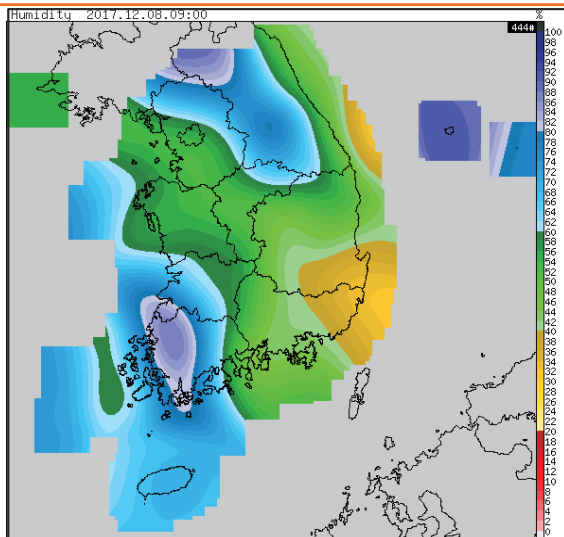
9일 00시 925hPa 상세바람 예상장



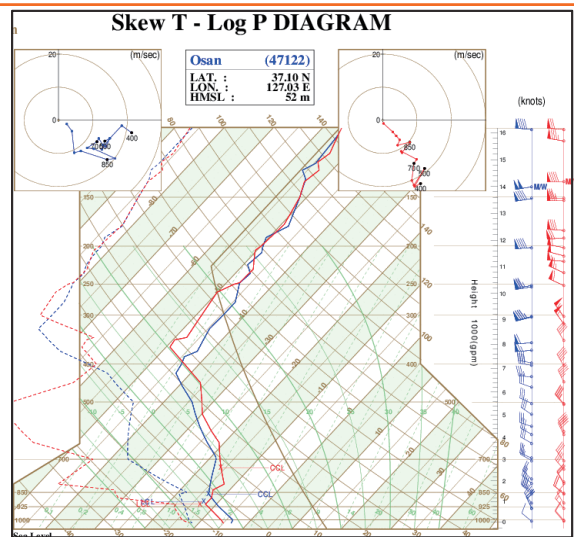
9일 00시 850hPa 상세바람 예상장

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면...

- 해상에서 발달한 구름대가 내륙에서도 세력 유지가 가능할지 검토했더라면
 - 전일(12월 8일) 09시 925~850hPa 층이 매우 건조한 점, 수도권의 지상 습도가 약 50%인 점 등 대기 하층의 건조도를 체크했더라면
 - ⇒ 하층의 건조함을 포화시키기 위해서는 구름대가 3km이상 발달해야함

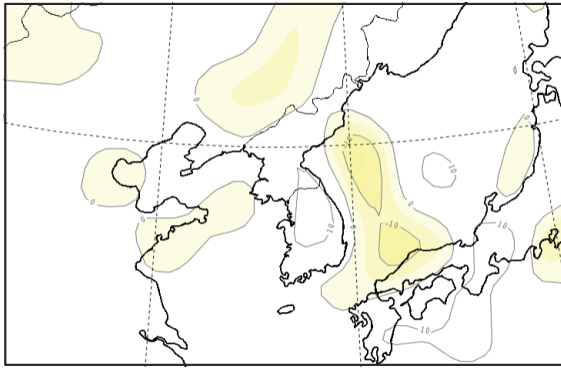


8일 09시 지상 습도 분포도

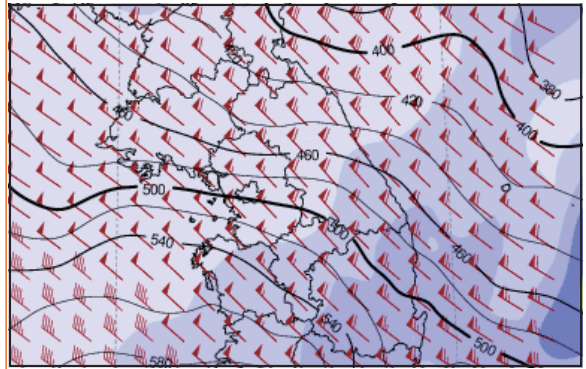


8일 09시 오산 단열선도

- 중층에 구름 발달을 방해하는 요인이 있는지 확인했더라면
 - 850hPa에 온난이류에 의한 상승역이 있는지 또는 중층에 하강류가 있는지를 체크해야 함



8일 21시 850hPa 상승속도



09일 03시 300K 등온위면

5. 향후 유사유형 시 고려해야 할 것은?

- 온난이류 강수는 하층에서 작동하지만, 중층 지원여부가 강수량의 관건!
 - 850hPa 상승류와 직결되는 850hPa 온난이류 유무 점검
 - ⇒ 925hPa의 온난이류만으로는 구름대가 높게 발달하기 어렵고, 내륙 유입도 약함
 - 상층골 이동에 따른 중층 하강류 유무 점검
 - ⇒ 골 후면의 침강역에서는 구름의 상승을 억제하여 강수 강도가 약해짐

발해만 저기압에 의한 수도권 예상보다 많은 적설

- 아침기온이 하강하는 추세 + 예상보다 약한 저기압 -

1. 예보와 실황은?

예보 (12월 9일 17시 발표)	실황
<ul style="list-style-type: none"> ▶ 예상 강수량 <ul style="list-style-type: none"> - 서울, 경기도, 강원영서: 5~10mm - 강원영동, 충청도, 전라도, 경상도(동해안 제외), 제주도: 5mm 내외 ▶ 예상 적설 <ul style="list-style-type: none"> - 경기동부, 강원영서: 3~10cm, - 충북북부, 경북북부내륙, 제주산지: 1~5cm - 서울, 경기도(동부 제외), 전북동부내륙, 경남북서내륙: 1cm 내외 	<ul style="list-style-type: none"> - 10일 새벽~오전에 난기가 이류 되면서 서울의 강수형태를 눈/비로 예상하였으나, 눈으로 시작하면서 예상보다 적설 증가

최심신적설 현황(cm)

서울.경기 서울 4.3 동두천 11.0 양평 9.5 하연 7.0 의정부 6.5 파주 5.3 구리 3.5 이천 2.5
강원영서 화천 11.5 양구 7.5 인제 6.5 북춘천 6.3 대화 5.0 철원 3.6 홍천 3.0 원주 1.4 영월 0.4
강원영동 미시령 7.0 진부령 4.5 어흘리 0.5 대기리 0.5 태백 0.0
충북북부 제천 1.5 단양 0.0 음성 0.0 수안보 0.0
전북북쪽 남원 1.0 경북북동 석포 0.5

- 12월 10일 04시경 중부 서해안부터 저기압 전면에서 온난이류에 의해 강수 시작
- 온난이류 강수대가 남동진하고 저기압 후면에서 한기가 남하하면서 전선에 의한 강수대가 다시 발달하여 15시경 중부지방을 통과

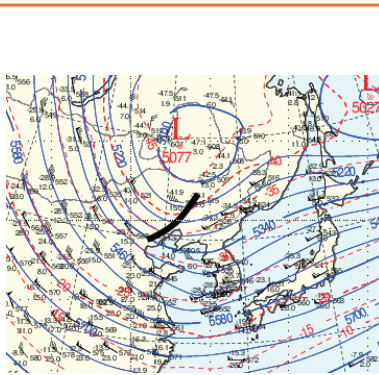
10일 03~06시	10일 06~09시	10일 09~12시	일.시:분	현재일기	ww	시정 km	전 운량 1/10	중하 운량 1/10	운형	현재 기온 ℃
			10.18:00	맑음		20	1	1	500	2.0
			10.17:00	구름맑음		10.61	8	8	500	3.6
			10.16:00	비 끝남	21	6.22	9	9	500	5.4
			10.15:00	약한비 단속	60	7.15	10	7	52/	6.7
			10.14:00	박무	10	3.25	4	4	500	4.2
			10.13:00	박무	10	2.3	8	8	500	3.3
			10.12:00	비 끝남	21	2.45	10	7	51/	2.3
			10.11:00	약한비 계속	61	1.37	10	8	72/	0.9
			10.10:00	약 진눈깨비	68	1.43	10	8	72/	0.5
			10.09:00	약한눈 단속	70	3.05	10	8	52/	0.2
			10.08:00	약한눈 단속	70	3.78	10	8	52/	-0.2
			10.07:00	약한눈 계속	71	1.21	10	7	72/	-0.4
			10.06:00	보통눈 계속	73	0.91	10	7	72/	-0.5
			10.05:00	약한눈 계속	71	1.78	10	7	72/	0.3

12월 10일 강수 예상 분포도

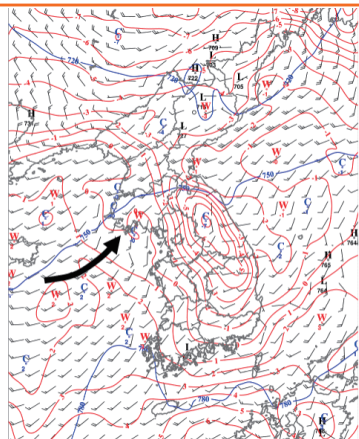
12월 10일 서울 관측소 기상 실황

2. 강수메커니즘은?

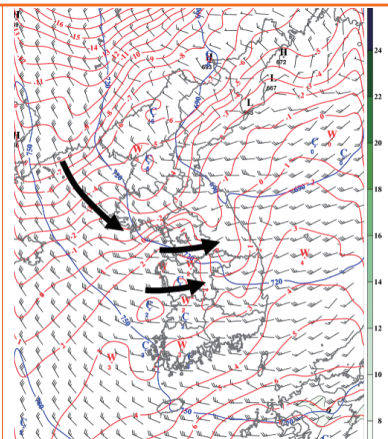
- **(발해만 저기압 전면 온난이류)** 500hPa 상층 기압골의 지원을 받아 발해만에서 지상 저기압이 발달하고 저기압 전면에서 남서풍의 난기 유입. 발해만 저기압과 일본 남동쪽 고기압 사이에서 남서풍 강화됨(850hPa 30kts, 925hPa 30kts)
- **(내륙 cold pool 형성)** 밤사이 내륙을 중심으로 기온이 하강한 가운데 난기 유입(해안선을 따라 온도조밀역 형성). 찬 공기 위를 따뜻한 남서풍이 타고 오르며 강수대 발달
- **(저기압 후면 한기 남하)** 저기압이 발해만에서 북한지방을 지나 동해북부해상으로 이동하고 그 후면에서 북서풍을 타고 한기 남하. 상대적으로 따뜻한 공기를 찬 공기가 파고 들면서 한랭전선에 의한 강수 발생



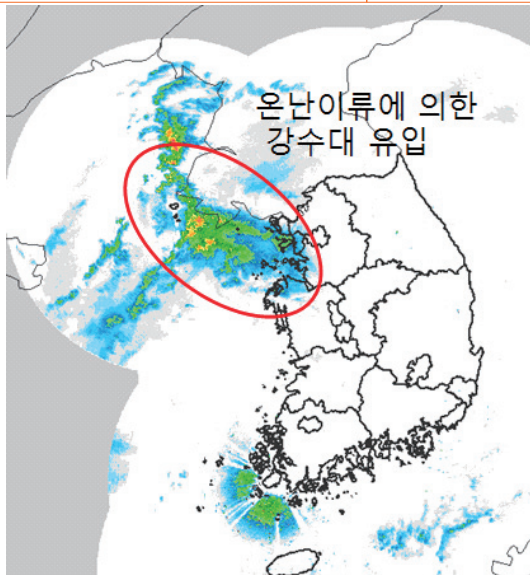
12월 10일 09시 500hPa 분석장



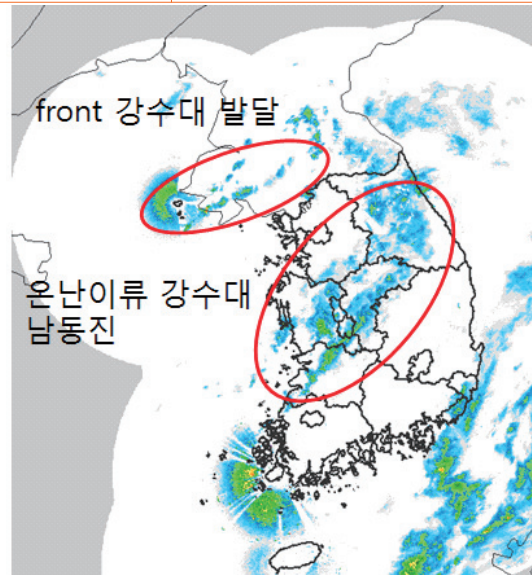
12월 10일 03시 925hPa
VDAPS 고도,기온,비습,바람



12월 10일 15시 925hPa
VDAPS 고도,기온,비습,바람



12월 10일 04시 레이더 영상

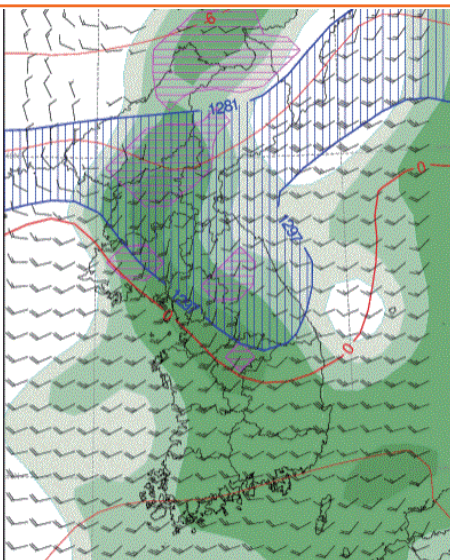


12월 10일 12시 레이더 영상

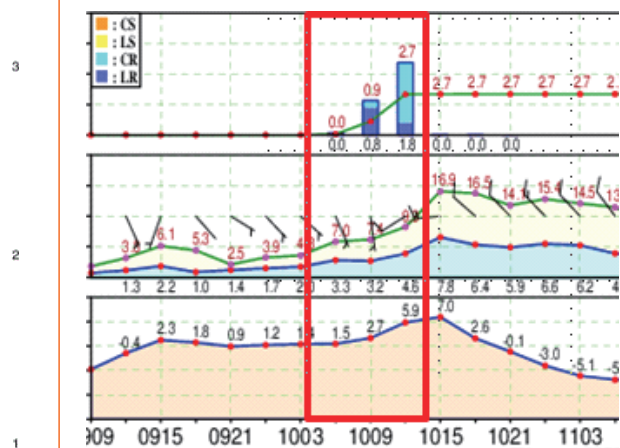
- **(강수피크)** 저기압 후면 한기이류가 예상보다 약하게 나타남. 오히려 내륙의 cold pool 이 예상보다 강하게 형성되면서 온난이류에 의한 강수가 더 발달

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

- 발해만 저기압 전면에서 온난이류로 인해 발생하는 강수와 저기압 후면에서 남하하는 한기에 의한 강수를 잘 모의함. 강수 피크는 온난이류에 의한 강수보다 저기압 후면 한기가 남하하면서 전선이 형성될 때 발생할 것으로 예상
- 눈비 판별을 위한 1000-850hPa 층후 예상장에서 강수가 시작될 것으로 예상되는 10일 06시(9일 09시 모델 기준)에 눈/비 혼재구역 경계선인 1297선이 서울 북동쪽에 걸치면서 경기 북부와 동부, 강원도는 눈/비, 서울을 비롯한 경기 남부는 비 형태로 모의
- 925hPa 0°C 등온선은 경기남부와 충북북부에 위치하지만, 낮까지 난기이류(925hPa 남서풍 30kts)가 지속되면서 기온이 상승하여 서울에는 적설이 쌓이기 힘들 것으로 예상. 기온이 낮고 산맥에 의한 강제 상승효과가 있는 강원영서를 중심으로 적설 모의



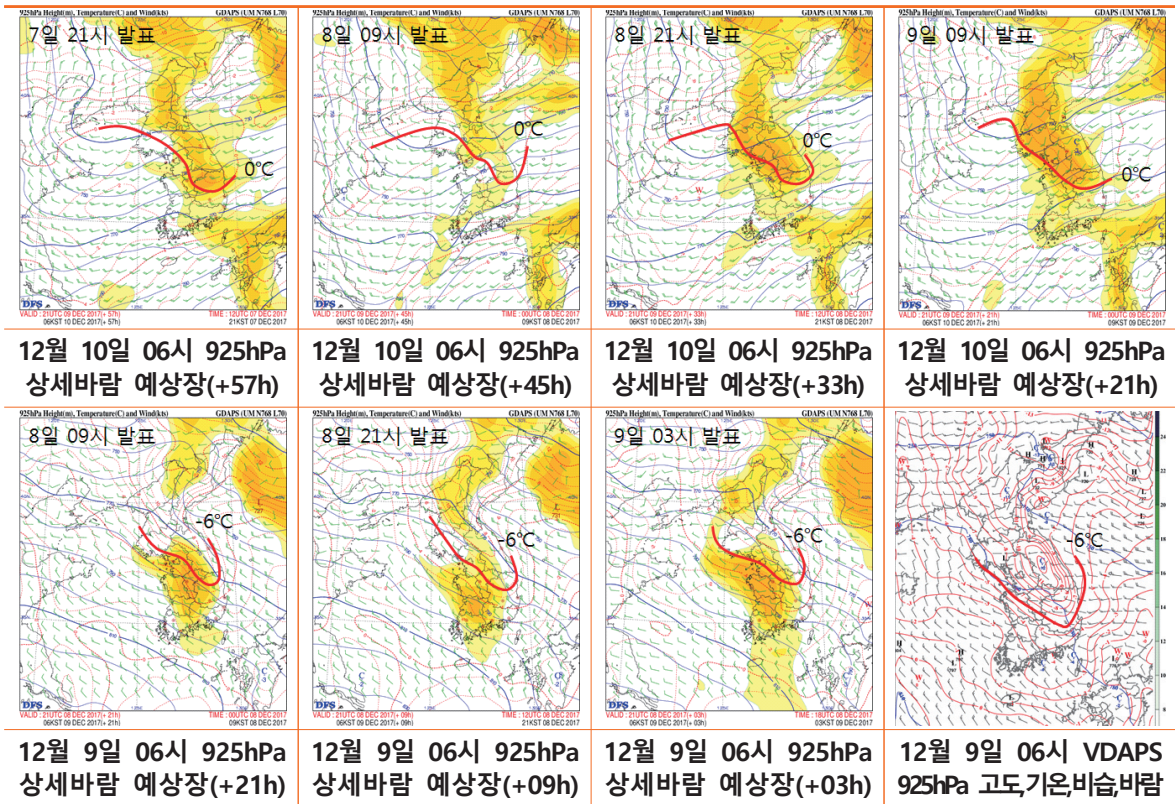
12월 10일 06시 1000-850 층후 예상장



12월 9일 09시 서울 연직시계열 예상장

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면...!

- **cold pool이 강화되는 경향을 놓치지 않았더라면**
 - 10일 06시 925hPa의 0°C선 위치가 전 모델에 비해 점차 남하하는 경향을 보이고 있었음
 - 특히, 전일(9일) 아침최저기온이 모델 예상보다 낮게 형성되었고 최근(12월 3일, 12월 6일)에 발생한 온난이류 강수 사례에서도 모델이 하층의 cold pool을 잘 모의하지 못하는 경향이 나타남
 - ⇒ 아침최저기온에 대한 모델의 warm bias가 존재하고 온난 이류에 의한 강수를 잘 모의하지 못하는 경향
 - ⇒ 10일 아침최저기온도 모델 예상보다 낮게 나타나면서 cold pool이 예상보다 강하게 형성됨

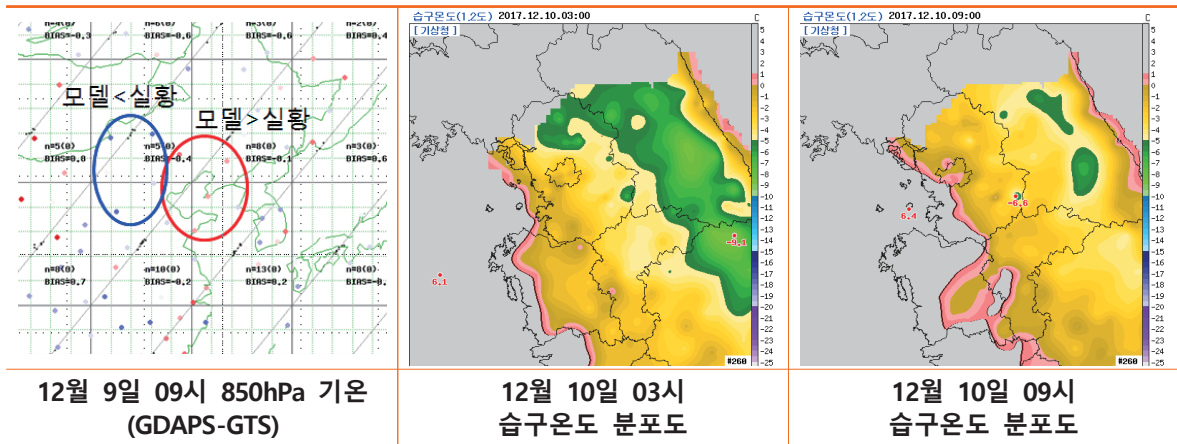


● 저기압 전면 난기 유입 강도

- 발해만 북서쪽에 있던 기압골이 예상보다 약하게 발달하였음(850hPa를 기준으로 기압골 전면의 온난이류와 후면의 한랭이류가 모델 예상보다 약함)
- 9일 09시를 기준으로 850hPa 기온에 대해 GDAPS 예상장과 GTS 분석장을 비교해보면, 기압골 전면의 온난이류가 예상보다 약하고(실황 기온이 모델 예상보다 낮음) 기압골 후면의 한랭이류도 모델에서 모의하는 것보다 약한(실황 기온이 모델 예상보다 높음) 것을 알 수 있음
 - ⇒ 아침최저기온이 예상보다 낮은 상태에서 저기압 전면 난기 유입도 약해 지상 기온 상승에 한계
 - ⇒ 저기압 후면의 한랭이류도 약해 한랭전선 강수도 예상보다 약할 가능성 시사

● 습구온도 실황을 놓치지 않았더라면

- 눈/비 판별에 기준이 되는 습구온도 1.2°C 선의 분포를 통해 강수형태와 적설의 초단기적 실황 대처 가능
- 강수 시작 직전인 10일 03시 습구온도 1.2°C선이 서해안에 위치하고 내륙은 대부분 습구온도 0°C 이하의 분포를 보이면서 서울, 경기도에는 눈으로 시작될 가능성 있었음
- 09시 이후에 기온이 오르면서 습구온도도 1.2°C 이상 영역 확장하기 시작



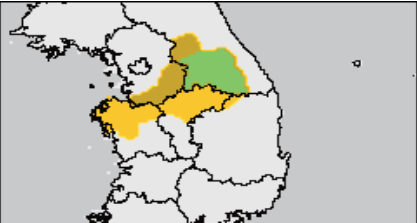
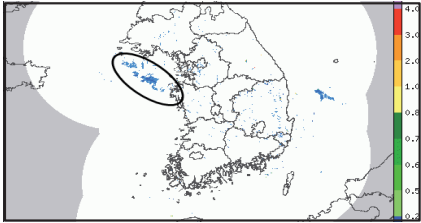
5. 향후 유사유형 시 고려해야할 것은?

- 이번 사례는 아침최저기온, 저기압 전면의 난기이류와 후면의 한기이류 강도에 대해 과대모의 하면서 강수형태와 강수피크 시점에 오차를 보였음
- 저기압에 의한 강수 예상 시 실황과 모델의 비교를 통해 저기압의 발달 정도와 이동 속도 및 경로 등의 변동 가능성을 유추할 수 있으므로 최근 사례를 통한 모델의 경향과 실황분석을 통하여 모델의 오차를 분석하는 것이 중요함

발달하지 못하고, 내륙 깊이 유입되지 못한 온난이류 강수

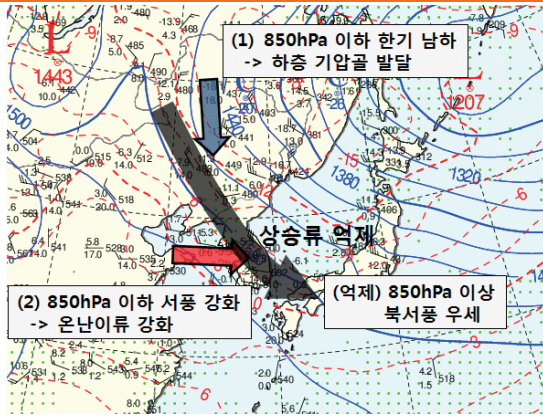
- 기압골 발달 여부와 기류 상승 억제 요인을 고려했다면 -

1. 예보와 실황은?

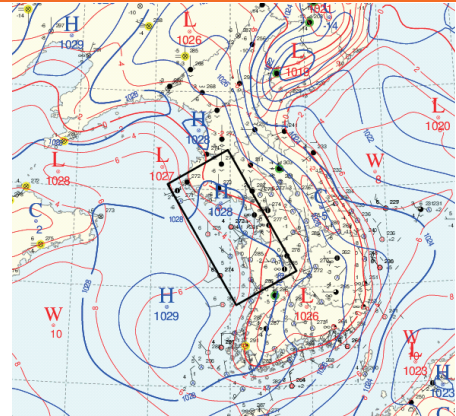
예보 (12월 28일 17시 발표)	실황
<ul style="list-style-type: none"> ▶ 예상 강수량 <ul style="list-style-type: none"> - 경기남부, 강원영서, 충청북부, 경북북부내륙 : 5mm 미만 ▶ 예상 적설 <ul style="list-style-type: none"> - 경기남부, 강원영서, 충청북부, 경북북부내륙 : 1~3cm 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 일부 충남서해안을 제외한 중부지방과 전라북도에 빗방울 또는 눈 날림 - 수도권, 강원영서 눈 날림. 충남 태안군 0.5mm 강수량 기록. 그 밖 빗방울 ▶ 주 강수대는 경기만 서쪽에 위치. 남동진하면서 점차 약화
	
29일 00~06시 예상적설	29일 00시 레이더 강설영상

2. 강수메커니즘은?

- **(하층 기압골 형성)** 우리나라 북쪽으로 상층기압골이 통과하면서 850hPa -12℃ 이하의 하층 찬 공기가 남하하여 약한 하층 기압골이 형성됨
- **(온난이류 강화)** 북쪽에 하층 기압골이 형성되면서 중부지방에는 서풍이 20kts 이상으로 강화되고 내륙에 있는 찬 공기의 영향으로 온도경도가 강화됨. 즉 온난이류 강화로 인해 상승기류가 발생
- **(온도경도구역 해상에 위치)** 구름대가 28일 밤늦게 유입되면서 내륙에 cold pool이 형성되기에 충분. 하층 온도경도 구역이 경기만 부근에 위치하면서 주 강수역도 해상에 위치함

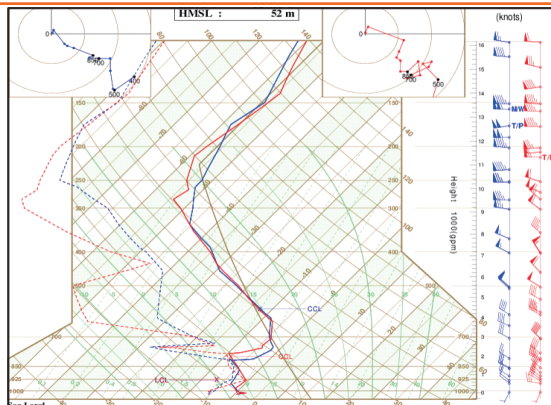


12월 28일 21시 850hPa 일기도와 주변 기류 모식도

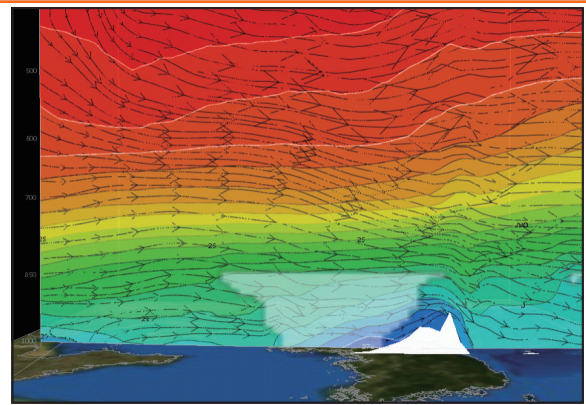


12월 29일 03시한반도 분석장

- (한반도 주변 상승류 억제) 850hPa 이상 상층으로 북서풍의 하강류가 지배하고 온위가 급격하게 상승하는 열적으로도 매우 안정된 대기
- (낮은 수상당량비) 오산의 850hPa 기온 -5.3°C , 습윤층의 기온 $-10\sim 0^{\circ}\text{C}$ 의 분포로 빙정이 성장하기에 다소 불리한 조건



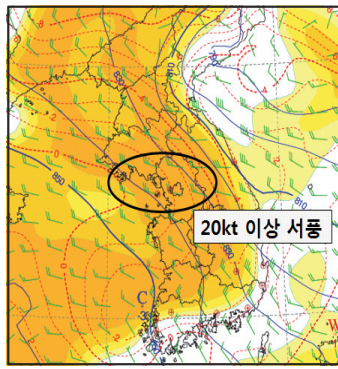
12월 29일 03시 오산 단열선도



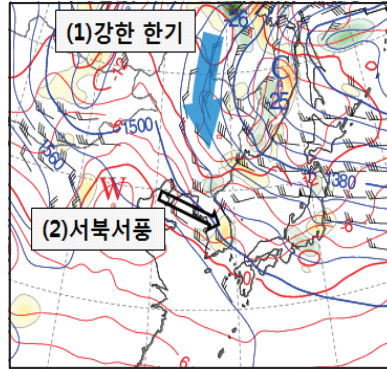
12월 29일 03시
온위+유선+습수 연직단면(초기장)

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

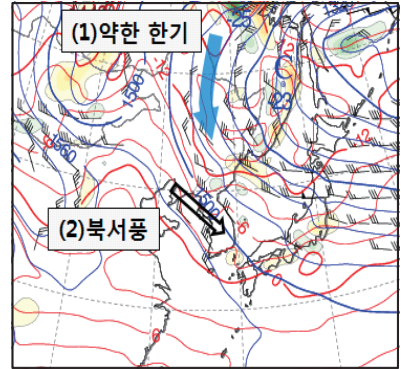
- (모델 예상) 상세바람장을 보면 925hPa 부근으로 서풍에 가까운 풍계 모의. 내륙까지 925hPa 25kts 이상의 서풍류의 강풍대를 모의하면서 내륙까지 온난이류 예상
- (실태) 실제 오산 단열선도에서 925hPa 부근에는 북서풍에 가까운 풍계로 나타남
- (원인) 북쪽에서 남하하는 한기가 예상보다 약해 중부지방의 하층 풍계가 북서풍에서 서풍으로 크게 늙지 못함. 850hPa 예상장과 초기장을 비교해보면 한기의 이류의 강도에 따라 중부지방의 풍계가 다르게 나타남을 알 수 있음
- 주 강수대는 해상에 위치하고 내륙에는 약화된 구름대가 유입되면서 눈 날림



12월 29일 03시 925hPa
상세바람장(+18H)



12월 29일 03시 850hPa
예상장(+18H)



12월 29일 03시 850hPa 초기장

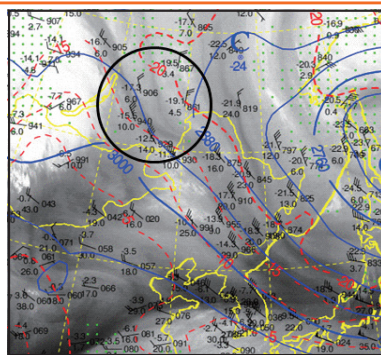
4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면...

● 수치모델과 실황을 비교하여 오차를 반영했더라면

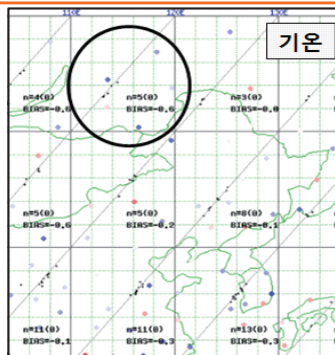
- 전일(28일) 09시 바이칼호 동쪽에는 건조역(수증기 영상)이 위치하고 700hPa 층으로 찬 공기가 남하하면서 풍속이 강해지고 있었음
- 당일(29일) 바이칼호 동쪽 지역의 700hPa 기온과 풍속을 각각 모델 초기장과 GTS 실황 자료로 비교해보면 기온은 음의 편차, 풍속은 양의 편차가 나타나는데 이는 모델이 실황보다 더 기온이 낮고, 풍속은 강한 상태로 모의를 시작하고 있는 것임

⇒ 실제 한기 남하는 예상보다 약해질 수 있음을 고려

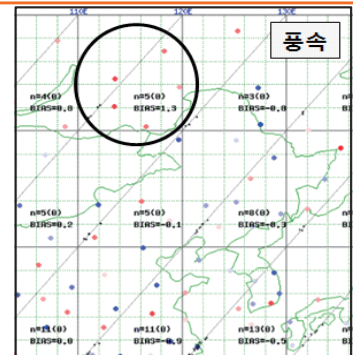
⇒ 따라서 하층 기압골 형성이 어려워져 중부지방의 풍계가 서풍으로 강화되기 어려울 가능성을 고려해야함



12월 28일 09시 700hPa 분석장



12월 29일 09시 700hPa GDAPS(초기장)vsGTS 편차



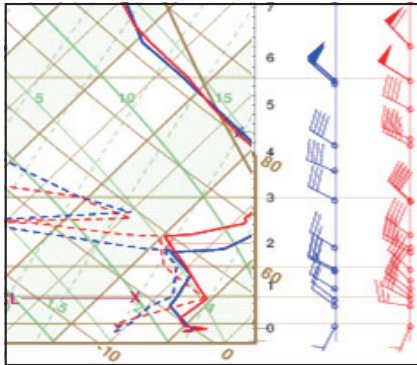
● 구름의 미세물리 과정을 고려했더라면

- 눈 구름대의 기온 분포에 따라 눈 결정체의 모양과 크기가 달라질 수 있고, 이에 따라 수상당량비와 적설에 차이가 나타나게 됨
- 구름층의 기온이 $-20^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$ 사이에 분포할 경우 빙정이 가장 활발히 함박눈 형태로

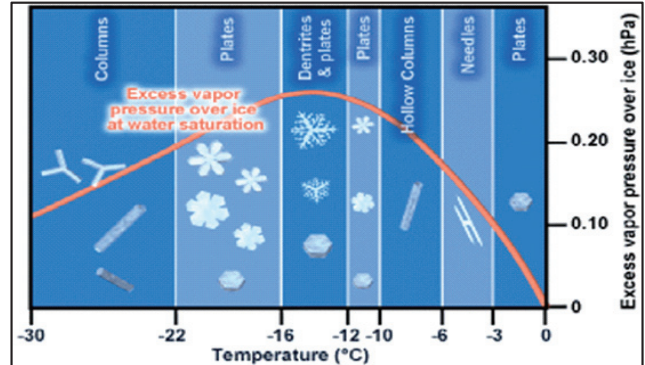
성장할 수 있음

- 이번 사례의 경우 구름층이라 할 수 있는 단열선도 상의 포화층이 800~2000m 부근에 존재하고, 기온은 $-10^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$ 사이에 분포하고 있어 눈 결정체의 크기와 모양이 상대적으로 작은 형태로 성장하는 조건

⇒ 적설 예보 시 수상당량비가 작을 수 있음을 고려해야함



12월 29일 03시 오산 단열선도



기온별 얼음에 대한 수증기압 초과값과 눈 결정체 모양

낮 시간 동안 온난이류 에 의한 수도권 강수?

- cold pool 해소, 건조역 발달 등 실황감시가 필수! -

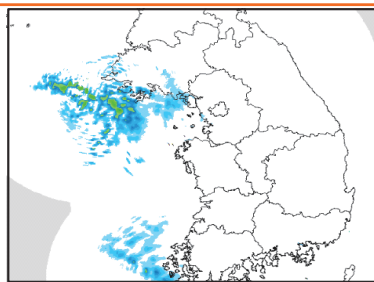
1. 예보와 실황은?

예보 (1월 30일 05시 발표)	실황
<ul style="list-style-type: none"> ▶ 예상 강수량 <ul style="list-style-type: none"> - 강원영동, 경북동해안: 5mm내외 ▶ 예상 적설 <ul style="list-style-type: none"> - 강원영동: 3~10cm - 경북동해안: 1~5cm 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 강수량: 5mm미만 ▶ 적설: 서울·경기 · 강원영서 1~5cm

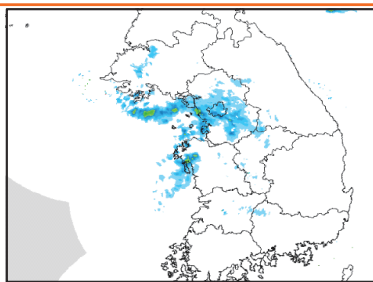
최심신적설 (cm)

서울경기 서울 3.5 남양주 5.0 구리 3.8 양평 3.0 양주 2.0 하남 2.0 과천 1.9 광릉 1.7 인천 1.6
 강원영서 인제 4.5 양구 4.0 대화 4.0 북춘천 3.6 면온 3.5 화천 3.4 기린 3.3 홍천 3.0 대관령 2.5
 강원영동 미시령 1.0 대기리 1.0 임계 0.5
 충청북도 제천 2.5 단양 0.0
 경상북도 석포 3.5 금강송 2.1 봉화 0.5 수비 0.5

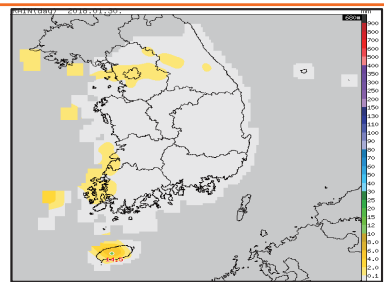
- 새벽부터 아침까지는 전형적인 온난이류의 형태로 경기만 중심 강수대 형성
- 낮 동안 이 강수대는 건조역 침투에 따른 풍속 강화로 점차 수도권으로 유입



1월 30일 09시 레이더 영상



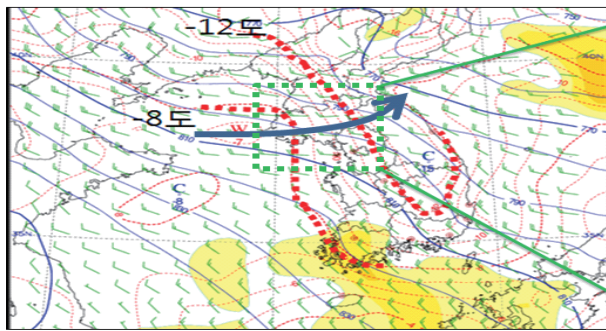
1월 30일 15시 레이더 영상



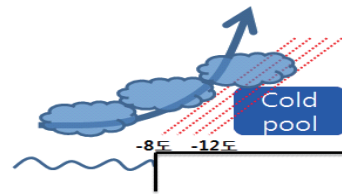
1월 30일 누적강수량

2. 강수메커니즘은?

- (cold pool 형성) 23일부터 서울의 아침최저기온이 -10°C 이하로 떨어질 만큼 내륙에 매우 강한 cold pool이 형성되어 있었음
- (하층 난기 이류) 지상 고기압이 우리나라 남쪽으로 배를 내밀면서 난기가 해상에서 내륙으로 이류
- (상층 한기 남하+하층 풍향 변화) 925hPa에서 850hPa까지 폭넓게 난기이류가 있는 가운데 상층 한기가 발해만으로 남하할 때(30일 12시) 925hPa 풍계가 남서로 바뀌면서 서울까지 강수가 가능한 구조를 보임



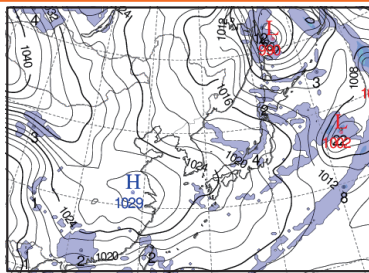
연직구조



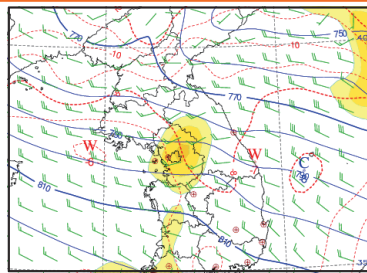
백령도 인근의 강수 메커니즘 분석 → 925hPa 온난이류(30일 09시)와 연직운동 모식도

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

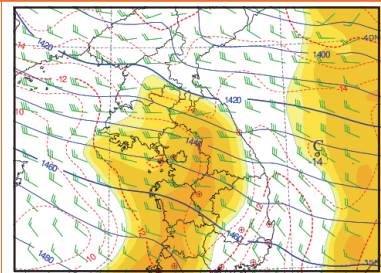
- 925hPa 서남서풍 20kts, 850hPa 서풍 30kts가 불 것으로 모의하며 두 층에서 모두 온난이류가 발생 할 것으로 예상. 이는 온난이류 강수 조건을 만족함(온난이류 강수 조건은 아래 참고 설명을 참조)
- 그러나 낮이 되면서 cold pool이 무너져 강수가 내리기 불가능한 구조가 될 것으로 예상
- 수치모델은 30일 오후 강수를 모의하지 않음



1월 30일 15시
해면기압, 누적강수량



1월 30일 15시
925hPa 상세바람장



1월 30일 15시
850hPa 상세바람장

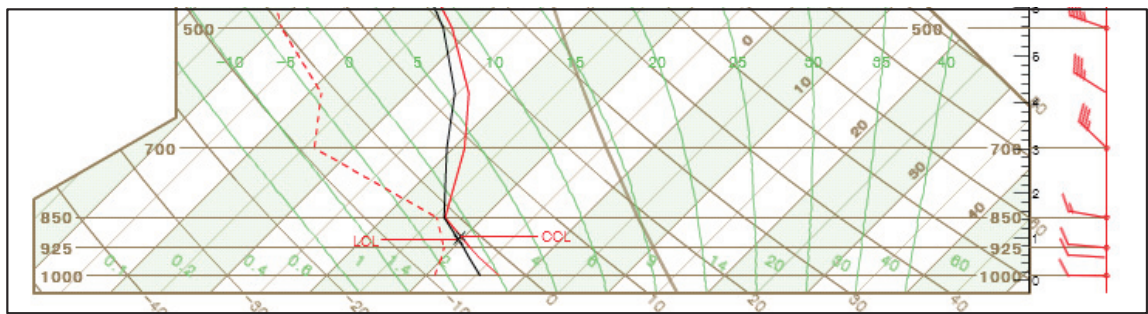
※ 모델은 왜 강수를 모의하지 못했을까?

겨울철에 전형적인 온난이류 강수가 발생하기 위해서는 ①하층 고도(약 1.5km 이상의 난기 이류와 ②해상에서의 수증기 공급, 그리고 ③내륙의 cold pool, 이 세 가지 조건이 필요한데, 이 조건이 모두 만족될 때 1~5cm 가량의 적설을 보인다. 특히 경기만 인근에 925hPa 남서풍이 예측된다면 수도권 지역에도 적설이 관측되는 것이 일반적이다.

그러나 이번 사례의 경우 모델에서 ①의 조건은 충분히 예측되었으나, ②와 ③의 조건 예측이 미흡했던 것으로 보인다.

조건 ②의 경우 백령도와 경기만 인근의 해수온도(1~2°C)가 낮으므로 해상으로부터 수증기 공급이 원활하지 못 할 것으로 모델이 예측한 것으로 추측되나 실제 해상에서는 강수대가 원활히 발생하였음을 알 수 있다.

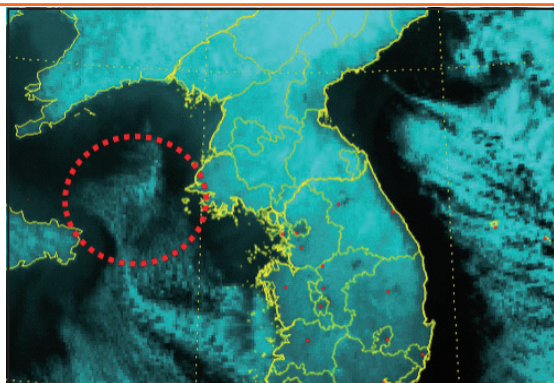
조건 ③cold pool의 경우 낮 시간이 되면서 기온이 오르기 때문에 급격히 약화가 되는데, 특히 모델에서는 cold pool을 실제보다 약하게 모의하는 경향이 있기 때문에 낮 시간대 온난이류 강수에 대해서는 더욱 모델에서 시그널을 주지 못하는 특징을 보인다.



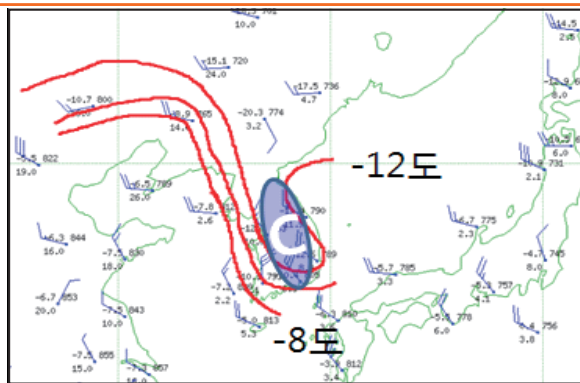
< 백령도 앞바다 인근의 단열선도 (30일 09시) >

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면...! → 상황에서 적극적 대처 필요!

- 백령도 인근 해상에서 이미 강수대가 매우 발달한 상황을 감지했어야
 - 30일 03시 경 동한만 인근에서 하층운대 발달 시작. 모델은 925hPa이 건조한 것으로 예측하였으나 이미 포화된 상태였음
 - 하강류가 강하지 않은 이상 발달한 눈 구름대는 내륙으로 진입할 수 있음을 고려
- 모델보다 cold pool이 매우 강해 해안가 온도조밀역이 매우 강했음!
 - 오산, 면온(강원영서)의 고층 관측자료를 보면 925hPa 기온이 모델보다 2°C 낮음
 - 이로 인하여 서해안지역 온도장이 모델보다 매우 조밀하였음

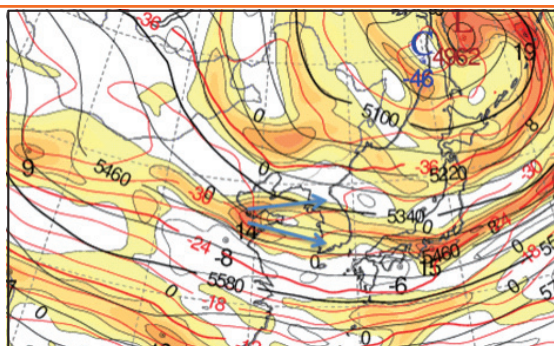


1월 30일 03시 위성 합성영상

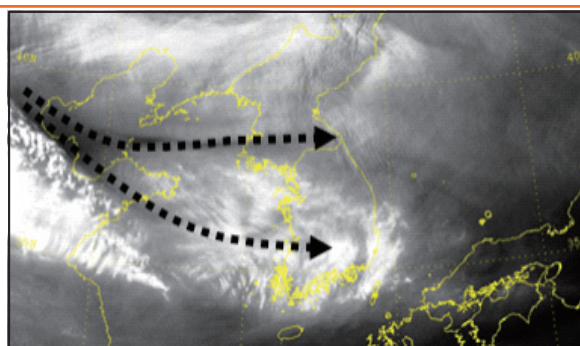


1월 30일 09시 925hPa GTS분석

- Vorticity streak에 동반된 건조역을 추적하여 하층 시스템 강화를 예측했더라면
 - 분리된 건조역이 침투하면서 불안정이 커져 강수대를 강화하였음
 - 이 건조역은 vorticity streak과 잘 일치, 면밀한 감시 추적이 필요했음



1월 30일 09시 500hPa 기온과 상대와도



1월 30일 15시 히마와리 수증기 영상

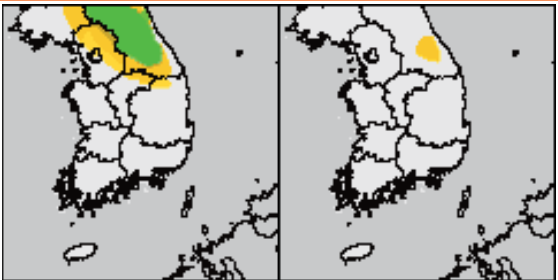
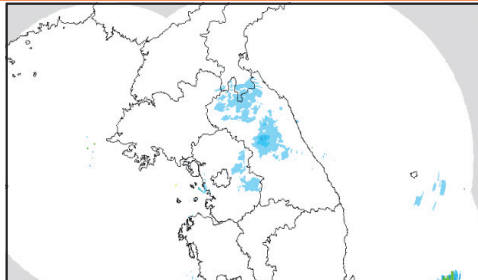
5. 향후 유사유형 시 고려해야 할 것은?

- 모델이 예측하지 않은 온난이류 강수, 실황을 확인하고 또 확인하고
 - 해상의 하층운을 추적 및 감시, 모델의 하층 포화도 예측은 틀리는 경우가 많음!
 - 건조역 침투에 따른 강수 활성화 여부를 검토해야함

매우 강했던 남서풍과 온난이류? 하지만 강수는 없었다

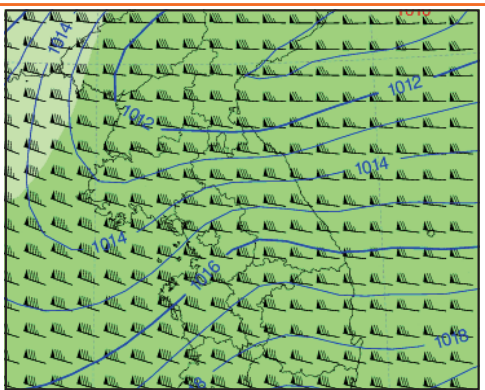
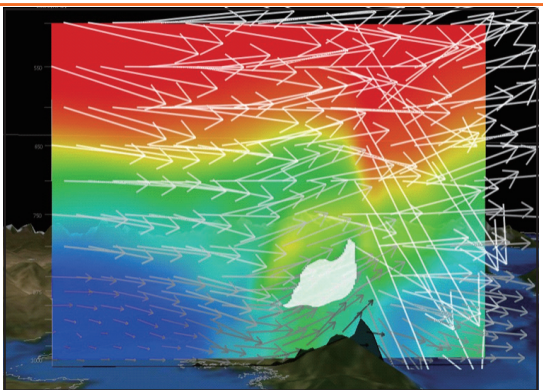
- 대기의 건조도와 역전층을 고려했더라면 -

1. 예보와 실황은?

예보 (2월 13일 17시 발표)	실황
<ul style="list-style-type: none"> ▶ 예상 강수량 <ul style="list-style-type: none"> - 강원산지: 5mm 내외 - 서울, 경기도(남부 제외), 강원도(산지 제외), 충북북부, 경북북부내륙: 5mm 미만 ▶ 예상 적설 <ul style="list-style-type: none"> - 강원산지: 2~7cm - 강원도(산지 제외): 1~5cm - 경기도(남부 제외), 충북북부, 경북북부내륙: 1~3cm 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 강원영서 눈날림, 그 외 지역 강수 없음 (13일 17시 예보보다 매우 약함) - 14일 06시 경기만으로 약한 예코가 유입되었으나, 강원영서에 유입되며 약화
	
2월 15일 예상강수량 (좌)06~12시, (우)12~18시	2월 14일 09시 실황 레이더 영상

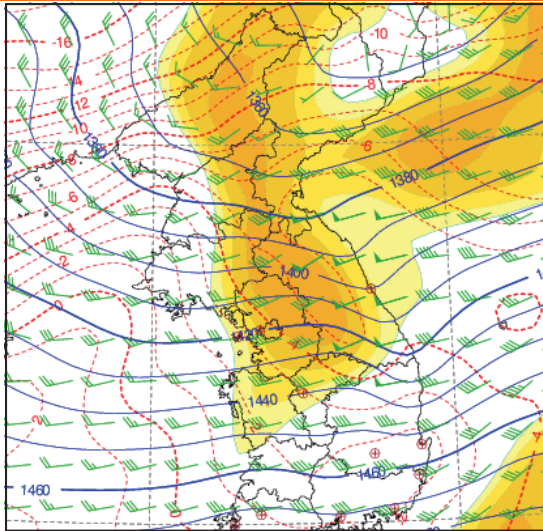
2. 강수메커니즘은?

- 우리나라 남쪽에 이동성 고기압이 정체한 가운데 북쪽 저기압이 PV역을 따라 발달하며 기압경도가 강화됨, 이에 따라 강한 남서풍이 불면서 활발한 온난이류가 나타남
- 중부지방의 가강수량(TPW)이 5~10mm로 나타남. 이 가강수량 대부분이 온난이류와 지형에 의한 강제상승으로 강원산지에서 대부분 탈락되어 강수량으로 연결 예상

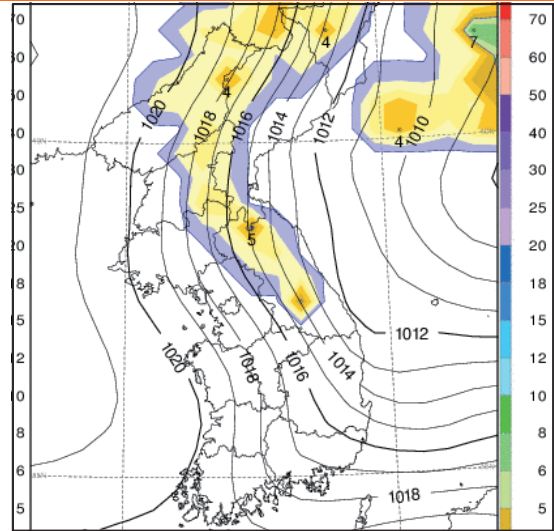
	
2월 14일 09시 가강수량	2월 14일 06시 중부지방 연직단면 분석장

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

- 925~850hPa에서 남서류가 강원도 지역으로 40~60kts로 매우 강할 것으로 예측
- 강원영서와 산간을 중심으로 1~3cm의 적설을 예측

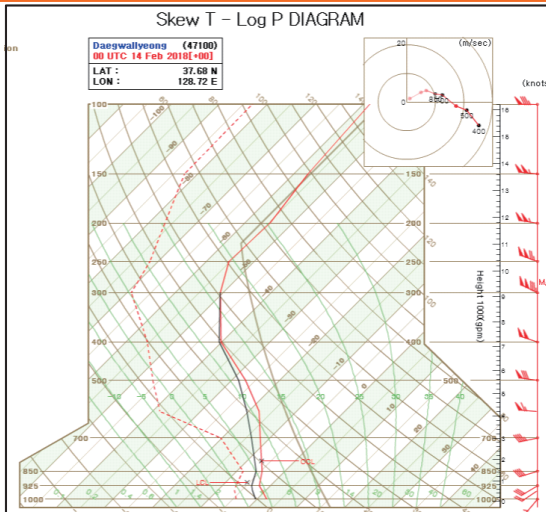


2월 14일 09시 850hPa 상세바람장

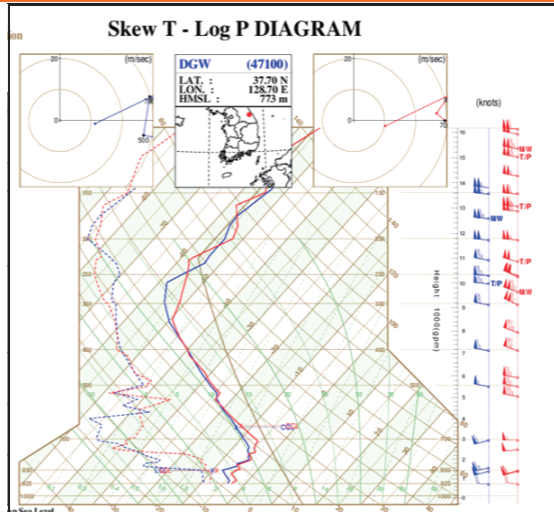


2월 14일 수상당량비 적용 총 누적적설

- 14일 09시 대관령 단열선도의 분석장과 실제 관측자료를 비교해보면 두 개의 큰 차이점이 있음을 알 수 있는데 첫째, 관측자료의 대기상태가 매우 건조하다는 것과 둘째, 700hPa 기온이 분석장 보다 높아(분석장 -12°C , 관측자료 -6°C) 강한 안정층이 형성되어 있다는 것임



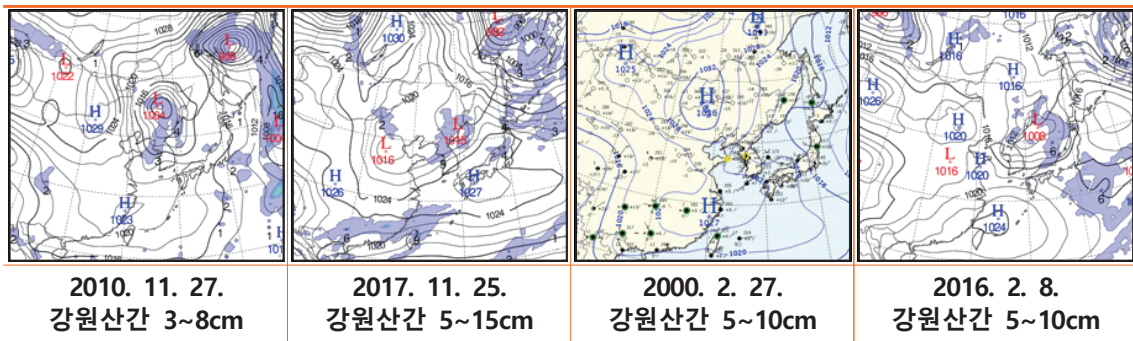
2월 14일 09시 대관령 단열선도 분석장
(위도 37.7 경도 128.7)



2월 14일 09시 대관령 단열선도 관측자료

※ 예보 당시, 강원산간에 10cm까지의 대설을 예측한 근거는?

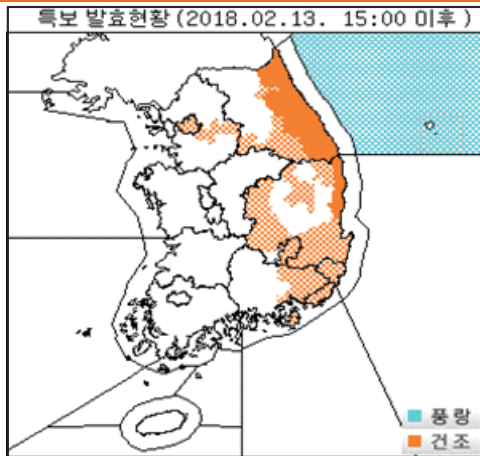
모델에서 1mm 미만의 강수를 예측하였음에도 불구하고 강원산간에 10cm까지의 적설을 예측했던 이유는 4가지의 유사사례를 근거로 하였다. 남서류가 매우 강하게 불었던 사례를 선정하기 위해 오산 고층관측자료를 이용하여 925hPa 남서풍 30kts 이상, 500hPa 서~서북서풍 60kts 이상의 조건으로 검색하였다. 유사사례로 선정한 사례일은 11월 사례 2가지(2010.11.27., 2017.11.25.)와 2월 사례 2가지(2000.2.27., 2016.2.8.)로 총 4가지 사례였는데, 11월 사례의 경우 해상에서부터 강수대가 발달하는 형태를 보였지만, 2월 사례는 주로 내륙에서 발달하는 형태를 보였다. 하지만 공통적으로 강원산간에는 최대 10cm의 적설을 기록하였던 점에 착안하였다.



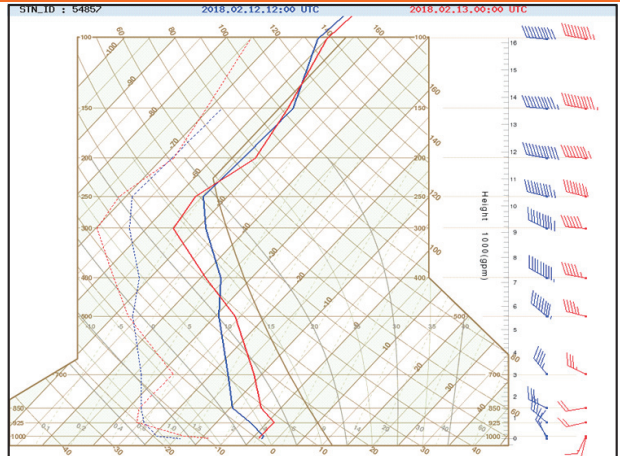
4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

● 수증기 공급원이 어디 있나요? 대기 건조도를 체크하였다면

- 인천, 덕적도 부이 관측자료를 보면 해수 온도가 1~2℃로 매우 낮은 상태(해상에서의 잠열 방출이 극히 제한적)로 최하층의 수증기 공급이 어려운 조건에서 내륙은 이미 건조 경보가 발표되어 있을 정도로 건조한 상태였음
- 강풍대가 유입되는 중국지역의 단열선도를 살펴보면 폭넓게 건조역이 위치하고 있음을 알 수 있음. 따라서 수증기가 우리나라로 공급되지 못하는 형태였음

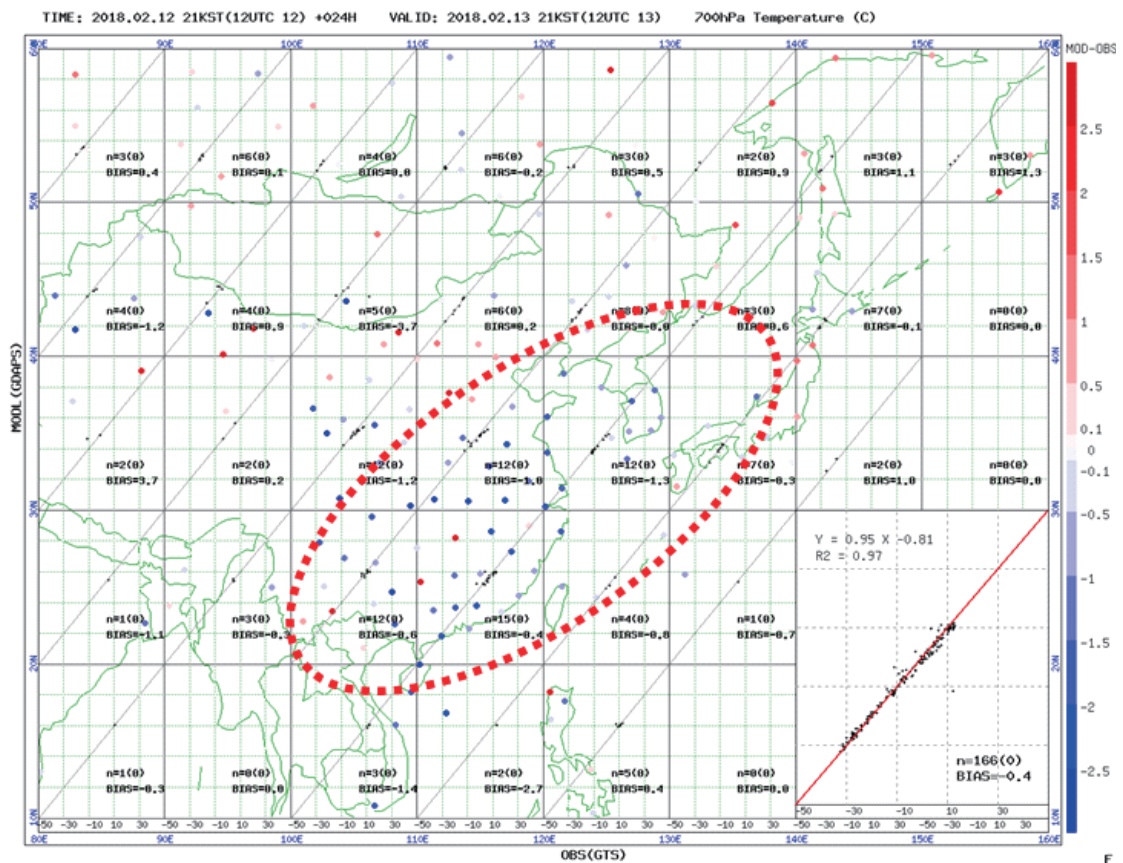


2월 13일 15시 특보 상황



2월 13일 09시 청다오 단열선도 분석

- 수치모델과 실황 기온 오차를 고려하여 대기구조를 고려했다면
 - 700hPa의 기온에 대해 모델 예측이 실황보다 매우 낮은 형태를 보였음. 즉 중국내륙에서부터 우리나라로 유입되는 중층 대기가 모델 예상보다 더 온난하고 강하게 유입되었음. 이는 앞서 이야기 하였던 대관령 단열선도 실황에서 확인이 가능함



700hPa의 12일 12UTC 모델예측과 13일 00UTC 실황과의 오차

- 700hPa에서 모델이 예상한 것 보다 난기가 강하게 들어온 상태에서 850hPa 이하의

고도에는 오히려 강제 상승에 의한 단열과정으로 기온이 더 낮은 형태. 이로 인하여 발생한 강력한 안정층은 구름대의 발달을 저지하였음

5. 향후 유사유형 시 고려해야 할 것은?

- **강제상승으로 인한 강수는 하층 수증기의 실황 감시가 중요**
 - 중국으로부터의 수증기 유입 여부, 해상에서의 수증기 공급 여부, 육상의 건조도 실황 등 하층 수증기 면밀한 검토 필요
- **대기 중층의 역전층 형성 가능성 검토**
 - 모델과 실황과의 오차를 살펴 역전층의 강화 가능성 확인

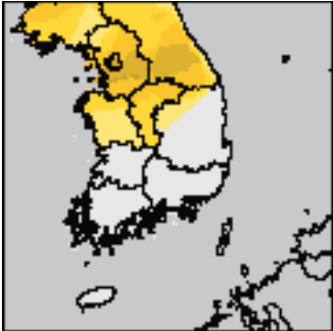
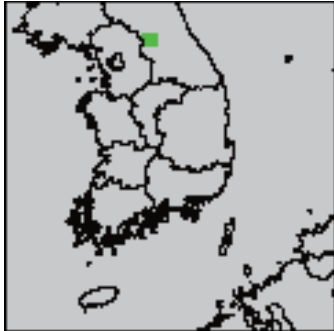
2. 발해만저기압형

초겨울 이례적인 스콜라인 형성

- 남쪽고기압 버티는지 분석했으면 -

1. 예보와 실황은?

● 예보(24일 17시 발표)

예상강수량	예상적설
 <ul style="list-style-type: none"> - 서울, 경기도, 강원영서: 5~10mm - 강원영동, 충청도, 경북북부: 5mm 내외 	 <ul style="list-style-type: none"> - 강원산지: 3~10cm - 강원영서: 1cm 내외

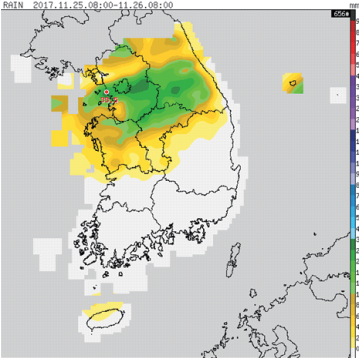
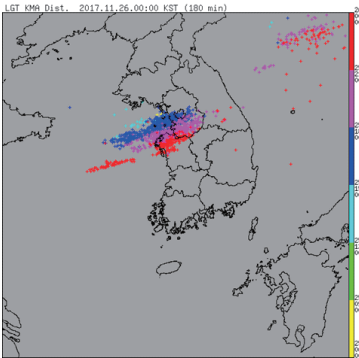
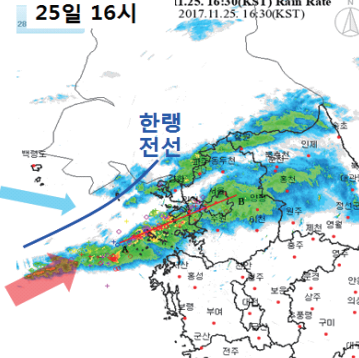
● 실황

- ▶ 중부지방 5~30mm(인천33.5mm, 서초32.5mm, 광명32.0mm)
- 25일 오전 중부지방 5mm미만 약한 강수 시작
- 25일 오후 서해상에서부터 스콜라인형태의 대류셀 강수예코(예코탑 8km) 시간당 10km로 느리게 동남동진, 인천 시간당 20mm(16시 43분)
- 서해상에서부터 서울, 경기지역의 라인형태 강한 낙뢰

최심신적설 현황(cm)

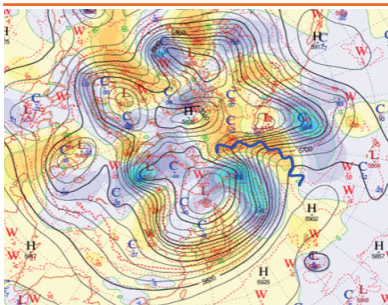
경기 신서 0.5 하면 0.5 의정부 0.0

강원 대관령 17.6 스키점프 15.8 사북 9.4 대화 9.0 내면 6.0 면온 5.5 진부령 2.5 미시령 2.5

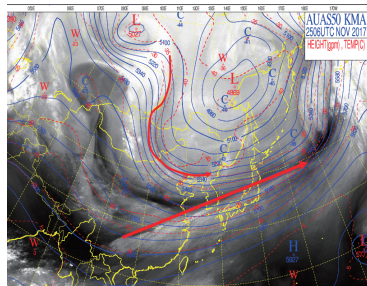
		
1월 23일 21시 레이더 영상	1월 23일 21시 위성 영상(합성)	1월 23~24일 신적설 분포

2. 강수메커니즘은?

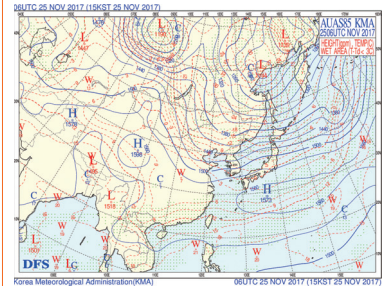
- **(500hPa북반구 대기 정체)** 베링해 블로킹(180E)이 위치해 있어 그 후면으로 대기 정체. 발해만부근 기압골 남하
- **(극제트 남하)** 몽골 서쪽에서 남부지방 아열대제트 아래로 건조역 침투(온도조밀, 시어와도 발달)한 상황에서 시베리아에서부터 바이칼호, 몽골, 발해만을 따라 극제트(한기) 남하. 500hPa -30°C 위치
- **(하층제트 형성)** 일본 남쪽해상에 위치한 고기압 가장자리에서 남서류 강화되면서 중부 지방으로 50kts의 강한 서남서풍 유입



25일 15시
500hPa북반구

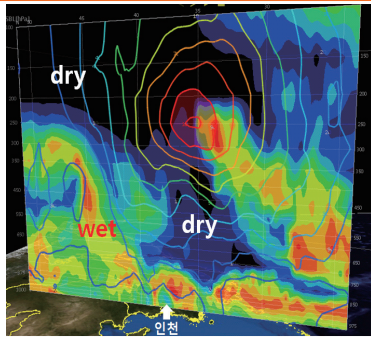


25일 15시
500hPa분석장+수증기영상

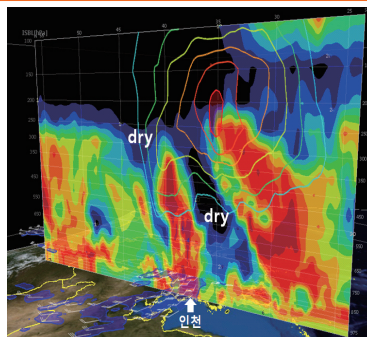


25일 15시 850hPa 분석장

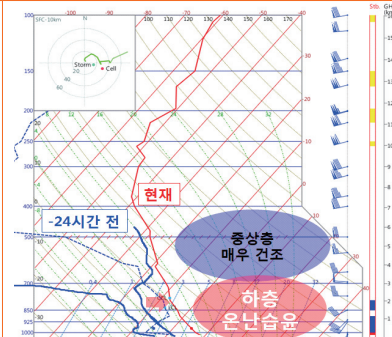
- **(연직불안정 강화)** 24일 21시 아열대 제트 아래로 건조공기 침강. 중부 지방 매우 건조한 상태에서 25일 15시 극제트 남하. 남쪽 건조역 버티면서 그사이에 하층제트(50kts) 강화
 - 850hPa 기온 24일 15시 -11.5°C → 25일 15시 -3.1°C
 - 8°C 상승(Td 10°C 상승) ⇨ 불안정도 강화



24일 21시 등풍속, 상대습도
연직단면 분석장



25일 15시 등풍속, 상대습도
연직단면 분석장

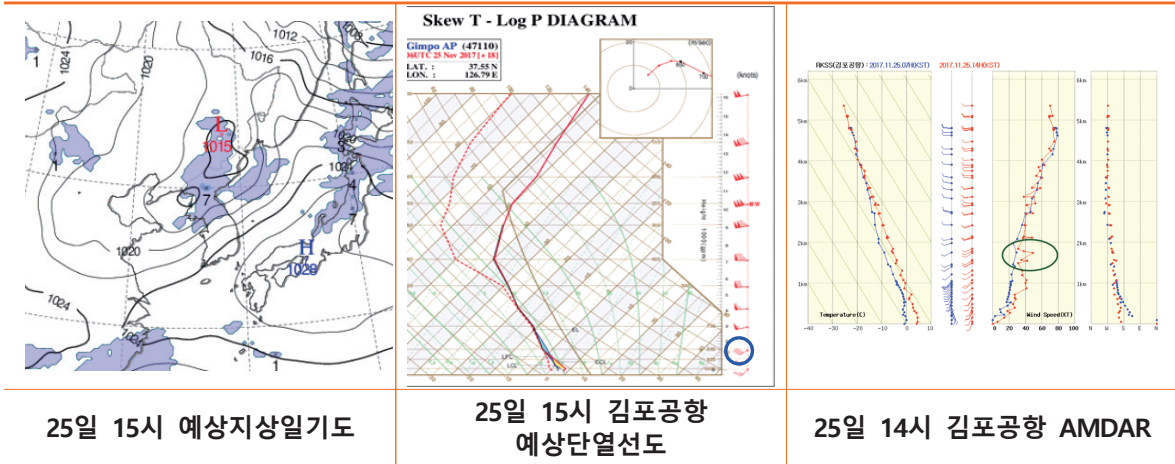


25일 15시 오산 단열선도
(-24시간과 비교)

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

- **(모델예상)** 한랭전선 전면 온난구역에서 5mm미만의 약한 강수 모의. 15시 김포공항 850hPa 40kts 예상
- **(실황 김포 AMDAR)** 14시 850hPa 50kts로 4km 이하에서 온난이류가 강해지며 불안정

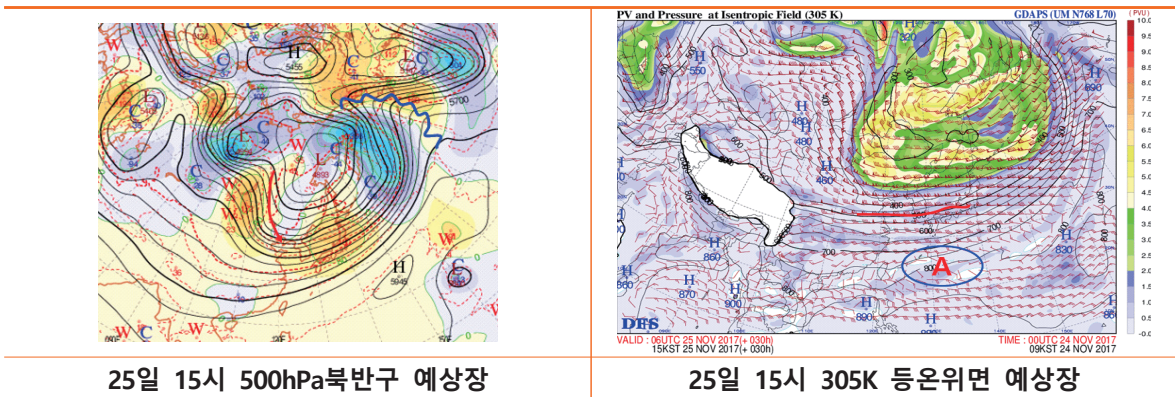
도 증가



4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면...

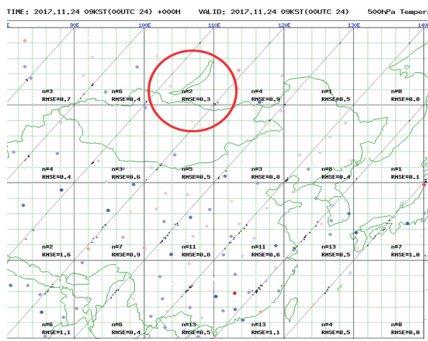
● 남쪽고기압 강화

- 25일 15시 극제트 남하함에도 남쪽 고도장 상승
- 산둥반도 남쪽에서 동중국해쪽으로 하강류 형성되면서 고기압성 순환 강화, 남쪽 고기압 가장자리에서 남서류 강화 되면서 고도장 북상
- ⇒ 하층제트 강화 및 강수지속시간 길어짐

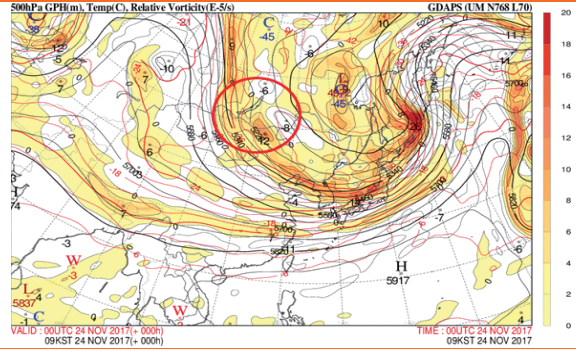


● 수치모델과 실황 오차

- 500hPa 바이칼호 부근 기온 모델이 기온을 더 높게 모의하여 실제로는 기온이 더 낮음 이에 따라 상층기온이 더 낮게 형성
- ⇒ 상하층 불안정에 의한 강수량이 많아짐

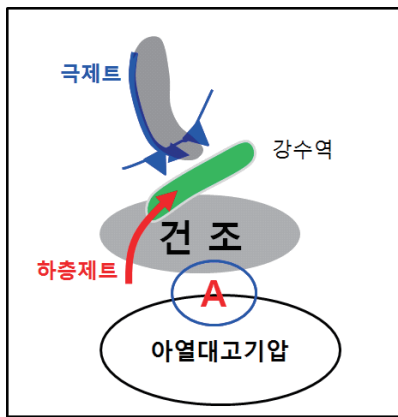


500hPa UM전구모델과 관측자료 기온 차

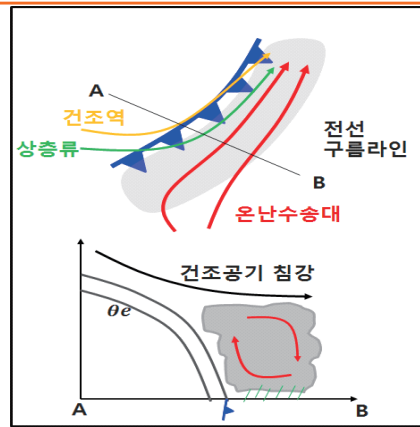


UM전구 500hPa 예측 초기장

5. 향후 유사유형 시 고려해야 할 것은?



500hPa UM전구모델과 관측자료 기온 차



UM전구 500hPa 예측 초기장

- 수치모델에서 하층제트 강도를 약하게 모의. 또한 500hPa온도를 모델이 실황보다 높아 불안정이 약했으며, 이에 따라 강수량을 적게 모의
- 몽골 서쪽에서 남부지방 아열대제트 아래로 건조역이 침투하면서 남쪽고기압 강화 유지 + 극제트 남하에 따른 한기 유입으로 중부지방 불안정에 의한 지속적인 강수현상 발생하였으므로 남쪽고기압이 강화여부에 분석해야할 필요가 있음

온난이류 강수만 고려하면 안 된다고?

- 온난이류 강수 + 발해만 저기압의 영향 -

1. 예보와 실황은?

예보 (12월 17일 17시 발표)	실황
<ul style="list-style-type: none"> ▶ 예상 강수량 <ul style="list-style-type: none"> - 중부지방(강원동해안 제외), 전북북부, 경북북부 : 5mm 내외 ▶ 예상 적설 <ul style="list-style-type: none"> - 경기동부, 강원영서: 2~7cm - 서울.경기서부, 충북북부: 1~5cm - 전북북부, 경북북부: 1cm 내외 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 강수량: 5mm 내외 ▶ 적설: 서울경기 4~10cm, 강원영서, 충청 1~5cm

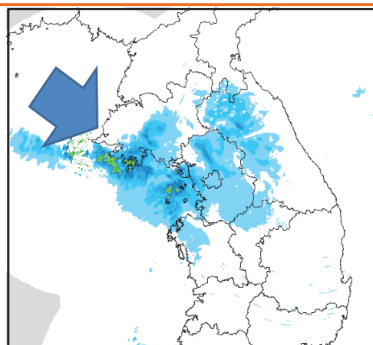
최심신적설 (cm)

서울경기 양평 10.5 남양주 5.9 서울 5.1 인천 4.1

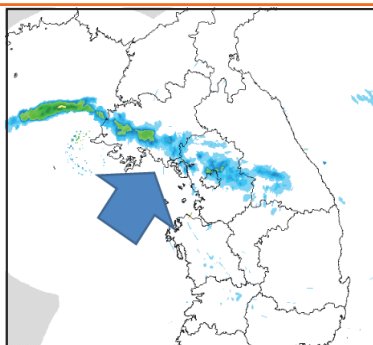
강원영서 문막 5.0 평창 3.5

충청북부 제천 4.0

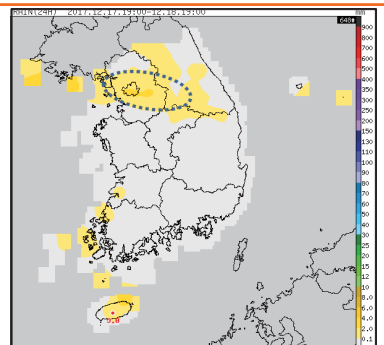
- 새벽부터 아침까지는 전형적인 온난이류의 형태로 강수가 시작되었음
- 10~12시 발해만 저기압의 영향으로 강수밴드는 전선대로 변환되고 저기압성 회전을 보이면서 서울.경기 지역에서 강수가 정체하는 형태를 보임



12월 18일 03시 레이더 영상



12월 18일 12시 레이더 영상

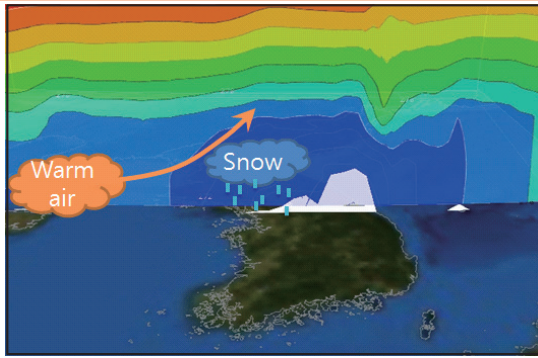


12월 18일 누적강수량

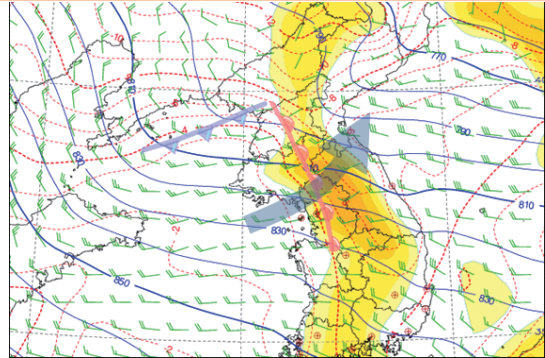
2. 강수메커니즘은?

- (925hPa 온난이류) 한반도 지역에 한기가 강하게 축적된 가운데, 우리나라 남쪽으로 고기압이 배를 내밀면서 그 가장자리로 925hPa에서 온도조밀역인 서해안으로 난기가 유입
- (850hPa 강한 서풍) 850hPa 난기이류는 약하나, 서풍이 강하게 불면서 경기북부까지 강수대 유입
- (발해만 저기압 발달) 강수대는 동남동진(온난이류의 유형임)하였으나 발해만에 지상저기압이 발달하면서 온난이류형 강수대는 점차 전선대의 형태로 변하여 얇은 띠 모양이 되었음. 남쪽에는 고기압이 버티고 있었기 때문에 발해만 저기압이 회전하며 강수대가

다시 북상하였고 이는 일반적 온난이류 유형에서는 나타나지 않음



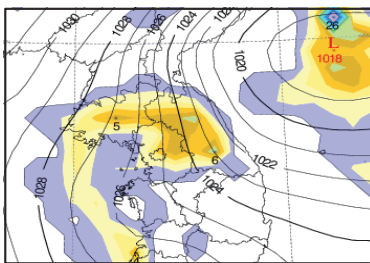
중부지방에 강하게 형성된 cold pool(17일 21시)과 하층에서 유입되는 난기이류 충돌에 의한 강수메커니즘



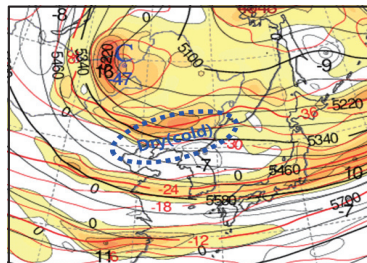
12월 18일 03시
발해만 저기압에 의해 발달한 전선대

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

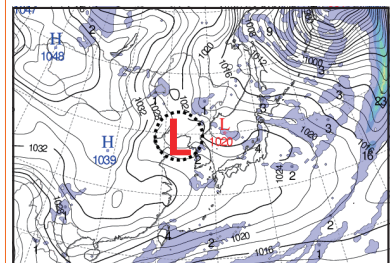
- 중부지방의 강설량은 1~5mm(환산 값) 예측, 경기동부와 강원영서에 집중
- 500hPa에서 건조역을 동반한 vorticity streak 남쪽으로 발해만 저기압이 발달함과 동시에 남쪽 고기압은 버티는 형태를 보임



총 누적 강설량(18일 까지)

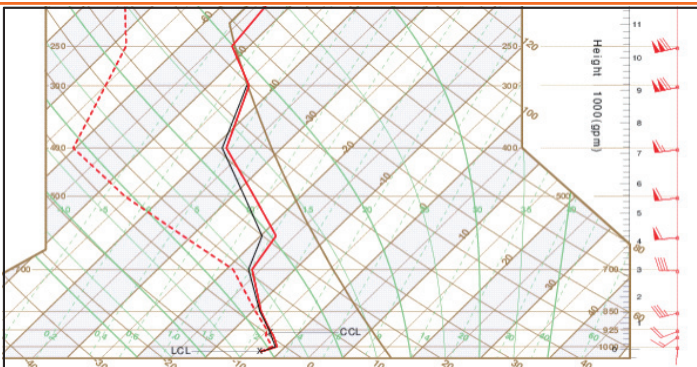


12월 18일 06시
500hPa 기온과 상대와도

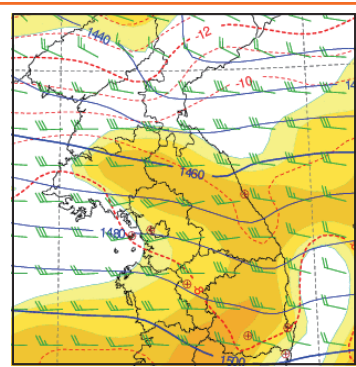


12월 18일 06시 지상
해면기압/강수 예상도

- 춘천 예상단열선도에 나타나는 포화층의 온도가 -10°C 이하이므로 과냉각수적이 발달할 수 있는 구조를 모의
- 850hPa 상세바람예상장도 서남서풍의 바람이 25~30kts로 불 것으로 예측하였음



12월 18일 15시 춘천 예상단열선도



12월 18일 15시
850hPa 상세바람장

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

- 상층 한기 남하로 인한 발해만 저기압의 발생과 그 영향을 고려하였는가

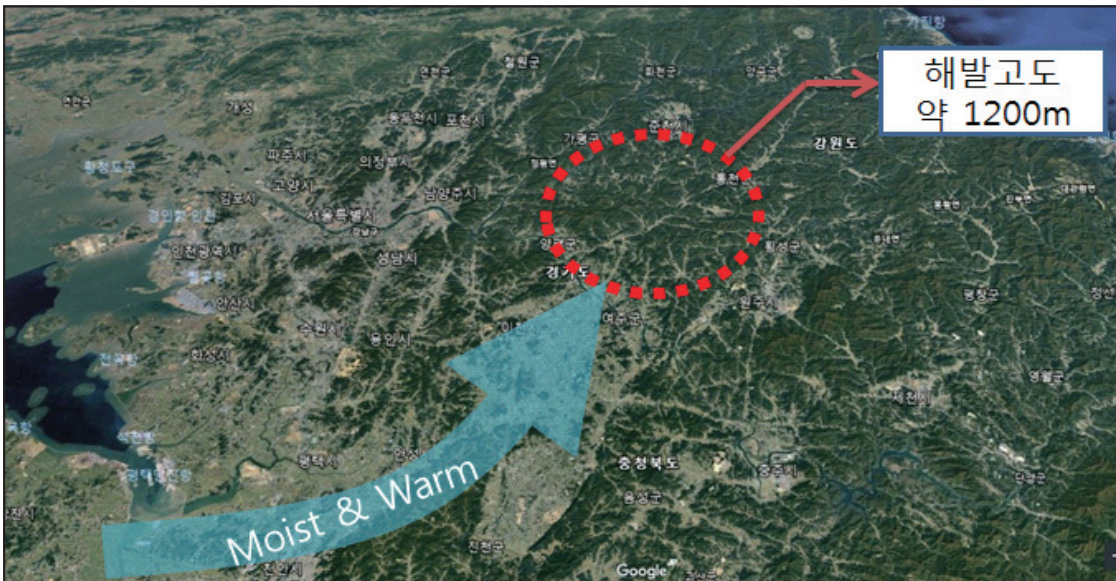
- 온난이류에 의한 강수 이후 상층 한기 남하에 따른 발해만 저기압의 영향이 바로 이어지는 형태
- 남쪽의 하층 고기압이 버티면서 발해만 저기압이 회전, 온난 강수대가 오히려 북동진하여 중부지방에서 정체됨

- 온도 연직구조에 따른 수상당량비를 고려했는가

- 포화층의 온도가 -10°C 이하로 떨어지며 수상당량비가 커질 수 있는 점을 고려

※ 양평지역에 많은 적설이 기록된 이유는?

겨울철 수도권 지역에서 바람이 휘면서 남서류로 유입되는 경우에는 경기만 또는 서해로부터 따뜻하고 습윤한 공기가 고도가 낮은 지형을 타고 유입되기에 유리하며 양평지역 북동쪽에 위치한 용문산(1,157m)에 기류가 부딪히면서 강수량이 증폭된다.



5. 향후 유사유형 시 고려해야 할 것은?

- 발해만에 한기를 동반한 단파골이 통과하는지 면밀히 검토

- 12월 해수온도 조건($7\sim 8^{\circ}\text{C}$)에서는 500hPa의 단파골 통과시 발해만 저기압이 잘 형성
- 발해만 저기압이 영향을 주게 되면 저기압성 회전에 의해 강수밴드가 북동진하며 중부 지방에 집중

- 지형에 따른 강수 집중구역 발생과 수상당량비 고려

- 850hPa에서 남서류가 불 때에는 경기동부 지역의 풍상측으로 강수량이 집중
- 발해만 저기압형 유형에서는 단열선도의 구조에 따라 수상당량비가 20이상으로 크게 나타날 수 있음을 고려

3. 서해안형 강수

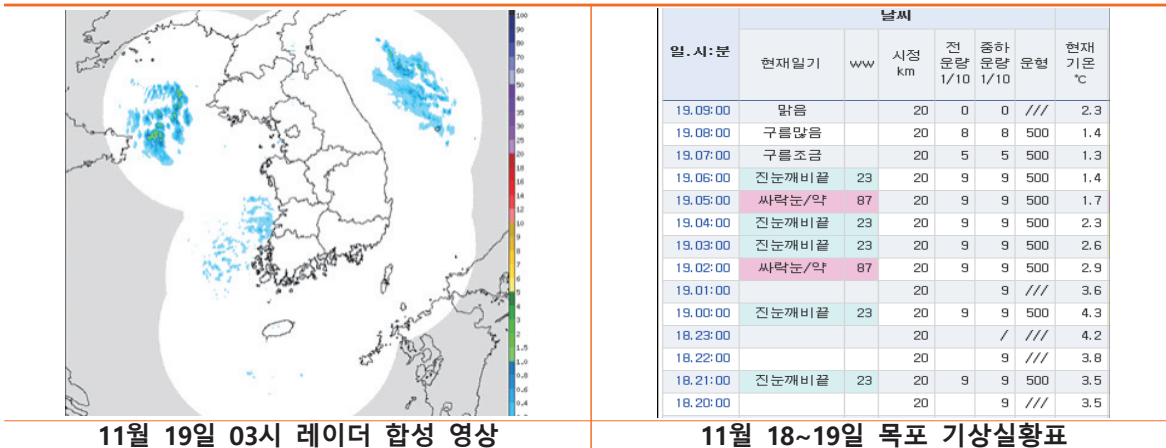
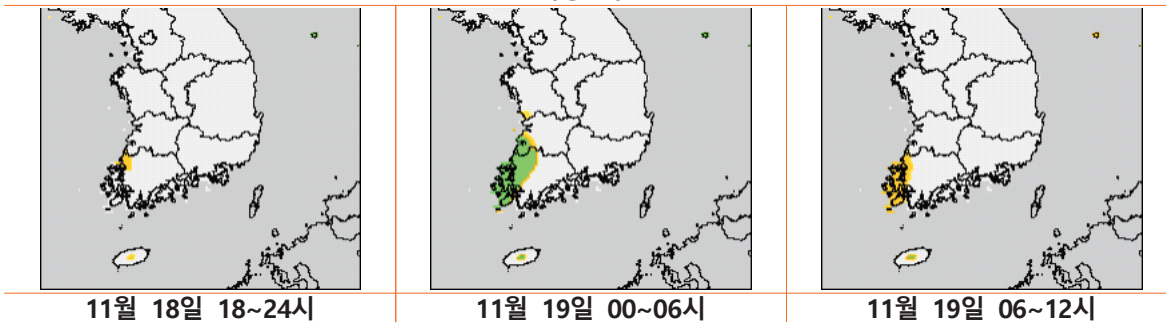
2017년 겨울철 서해안 첫 적설 도입 실패

- 해기차 뿐만 아니라 이류 약화와 안정도도 고려했어야 -

1. 예보와 실황은?

예보 (11월 18일 17시 발표)	실황
<ul style="list-style-type: none"> ▶ 예상 강수량 <ul style="list-style-type: none"> - 울릉도.독도: 5~10mm - 전라서해안, 제주도, 서해5도, 충남해안, 전남내륙: 5mm 미만 ▶ 예상 적설 <ul style="list-style-type: none"> - 울릉도.독도: 2~5cm - 전라서해안, 제주도산지: 1~3cm - 서해5도, 충남해안, 전남내륙: 1cm 내외 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 23일 밤부터 24일 새벽사이 서해안 지역에 눈 또는 진눈깨비 날림 - 서해남부해상으로 약한 강수예고 나타났으나 해안과 내륙으로 접근하면서 약화 - 목포 실황을 보면 눈 또는 진눈깨비가 산발적으로 날렸으며, 지상기온이 2~4℃로 다소 높았음

예상 적설

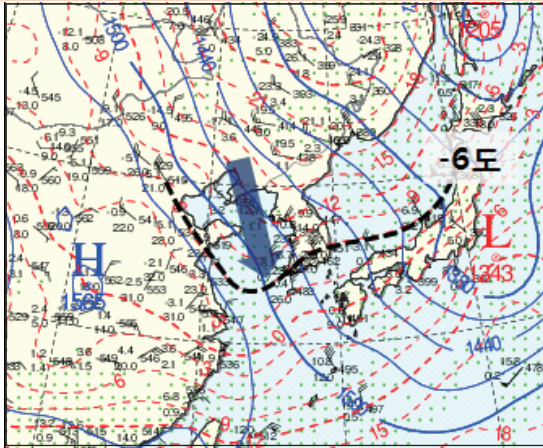


2. 강수메커니즘은?

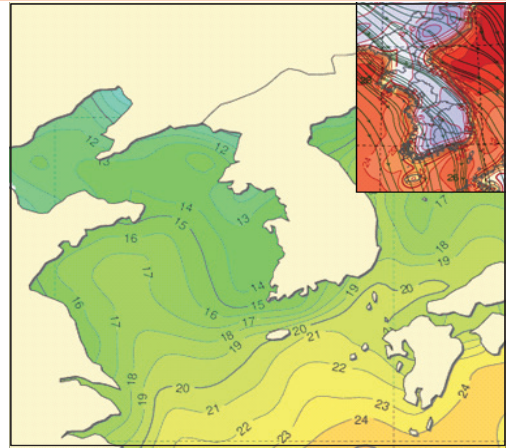
- (큰 해기차) 850hPa 분석장을 보면 서해상으로 북북서풍 20kts 이상의 강풍대와 함께 온도골 형성되면서 한기 남하. 한기 자체가 크게 강하진 않았으나 시기적으로 수온이 높아 서해남부해상의 해기차가 22℃ 이상으로 크게 나타남. 큰 해기차로 불안정한 기온감률이

형성되고 해상으로부터 열과 수증기가 공급되면서 대류 활성화

- **(풍속)** 서해상으로 850hPa 20kts 이상의 강풍대와 함께 등온선을 가로지르는 한랭이류가 나타나면서, 하층 대기를 혼합시켜 해상으로부터 열과 수증기 공급을 더욱 활발하게 촉진시킴

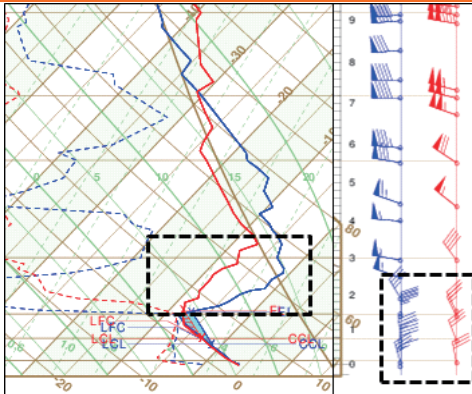


11월 18일 21시 850hPa 분석장

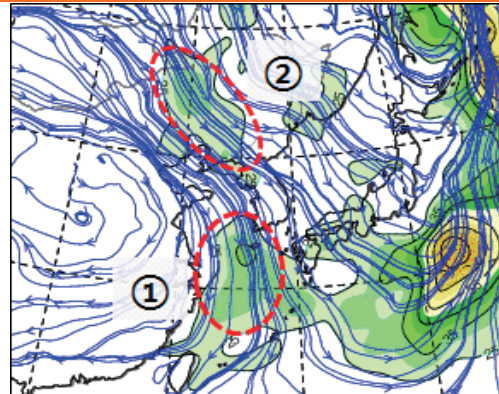


11월 18일 09시 해수면 온도분포
11월 18일 21시 850hPa 해기차

- **(큰 안정도)** 흑산도 단열선도를 보면 850hPa 이하로는 큰 해기차와 강풍에 의한 혼합으로 불안정하나 850hPa 이상에는 강한 역전층이 존재하여 안정된 대기가 형성되면서 대류를 억제하는 효과
- **(풍향)** 850hPa 유선에서 서해남부해상의 강풍대(①)에 동반되는 풍향이 북풍에 가깝게 형성되어 있어 발달한 대류운들이 내륙까지 들어오기는 어려운 조건. 중국북동지방 부근의 강풍대(②)를 따라 다시 한기가 남하하나 강풍축이 내륙을 향하고 있어 해상에서 구름대를 다시 발달시키기 어려운 형태



11월 18일 21시 흑산도 단열선도



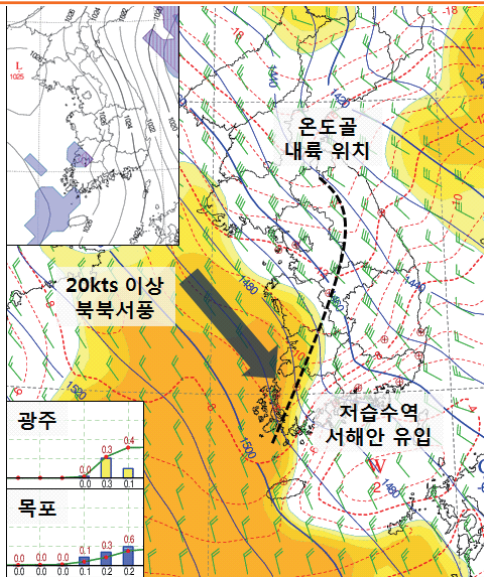
11월 18일 21시 850hPa 유선

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

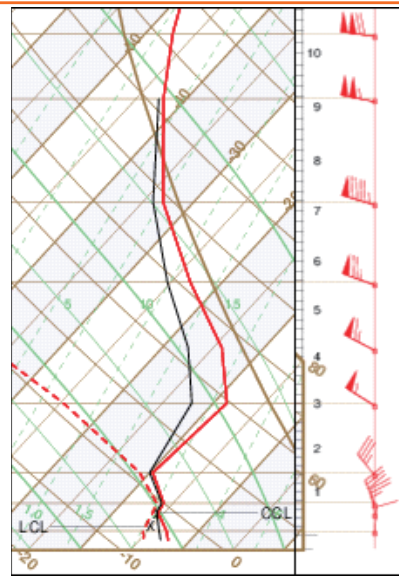
- **(모델 예상)** 19일 새벽 전라서해안으로 1mm 이하의 강수를 광주는 눈, 목포는 비로 모의함. 850hPa 20kts 이상의 북북서풍 바람과 함께 저습수역도 내륙까지 유입되는 것으로 모의함. 다만 중국북동지방에서 다시 남하하는 한기의 축이 북한으로 향하면서

850hPa의 온도골이 내륙으로 형성되어 상대적으로 해상의 한랭이류 강도는 약하게 나타남

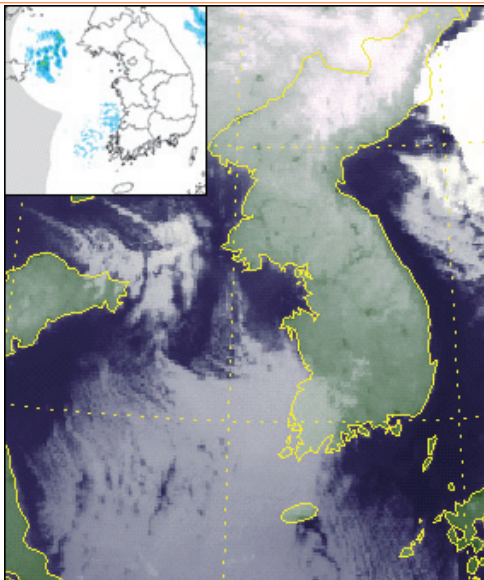
- **(실태)** 모델의 예상대로 하층의 풍계가 북북서풍으로 조금 기울면서 구름대는 전라내륙까지 유입되었으나 위성영상에서의 구름대를 보면 대류운열의 형태가 무너지고 약화된 형태로 유입. 결국 강수는 약화되고 산발적인 강수로만 감지됨
- **(원인)** 850hPa의 온도골 축이 내륙으로 이동하면서 해상의 한랭이류 강도가 약해지고 대류운 발달도 급격하게 약화되면서 해안과 내륙으로는 구름대만 흘러서 유입됨. 더불어 850hPa 이상의 강한 역전층으로 인해 대류는 더욱 억제되었고, 내륙의 한기 영향으로 해안으로는 지상에 북동풍이 불어 대기가 건조해져 구름대를 더욱 약화시킴



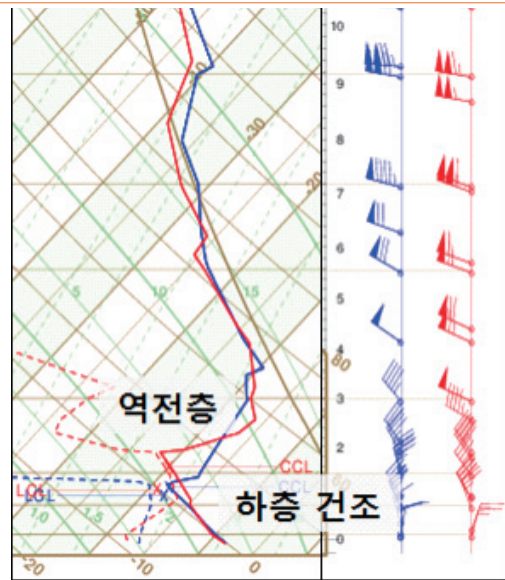
11월 19일 03시 850hPa 상세바람장+강수량



11월 19일 03시 광주예상단열선도



11월 19일 03시 위성 적외영상



11월 19일 03시 광주 단열선도

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

- **강한 역전층 효과를 고려했더라면**

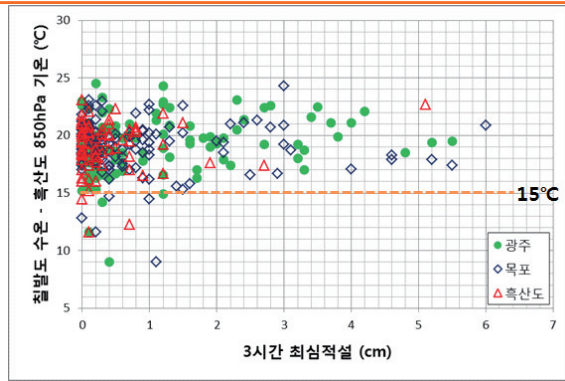
- 호수 효과 강설 과정에서 capping inversion(참모역전)의 형태의 역전층이 존재하는 것은 일반적인 현상이지만 그 강도가 하층까지 강하게 형성될 경우 상승하는 공기를 억제하는 효과가 생기게 됨
- 많은 양의 적설이 기록되려면 850hPa 보다는 더 높이 대류운이 발달해야하므로 결국 그 이상(850hPa 이상) 고도의 기온분포가 안정도를 결정한다고 볼 수 있음
- 아래 그림에서 보듯이 850hPa 해기차보다는 발달하는 대류운을 고려한 700hPa 해기차에서 적설과의 상관성이 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있음

⇒ 따라서 **850hPa 이상으로 역전층이 매우 강하게 예상되는 경우 대류 억제에 의해 강수가 약화될 수 있음을 고려해야함**

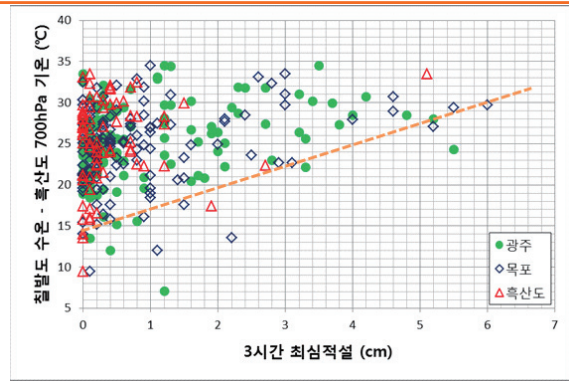
- **서해안에 북동풍 강화에 따른 강수 약화 가능성을 고려했더라면**

- 18일 서해상에 위치했던 온도골이 19일 새벽에는 중국북동지방에서 다시 남하하는 한기 영향으로 내륙에 위치하게 됨
- 내륙에는 야간 복사냉각 효과까지 겹쳐 한기가 쌓이고 국지적으로 고압대가 형성되면서 내륙에서 해상으로 불어나가는 육풍 성분이 강해져 서해안에서 북동풍으로 나타남
- 결국 지상부근의 대기를 건조하게 만들어 유입되는 구름대를 더욱 약화시킴

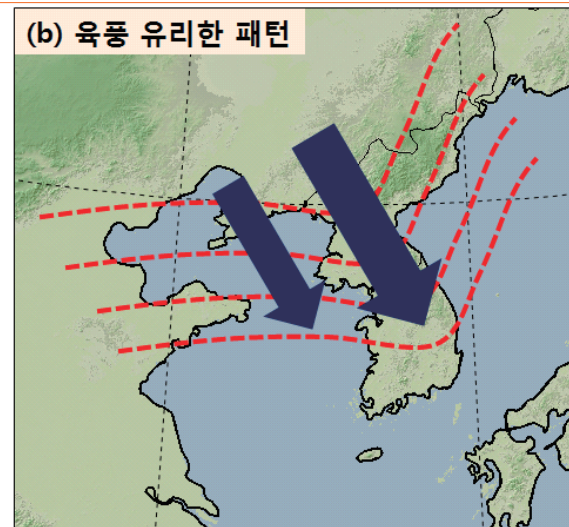
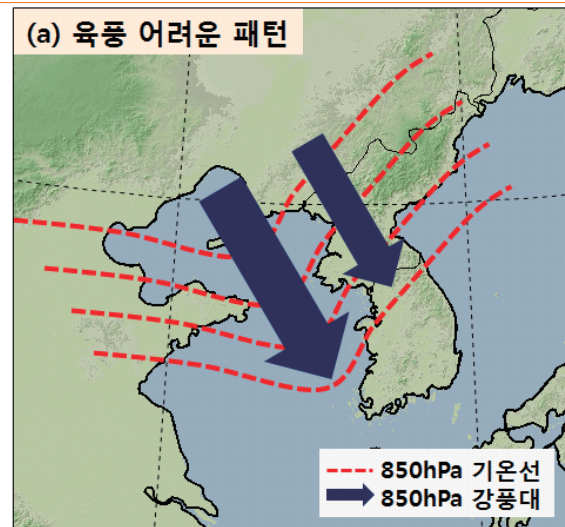
⇒ **내륙으로 온도골이 강화되는 유형에서는 해안의 강수 약화 가능성을 고려해야함**



서해안형 강설 사례 중
850hPa 해기차와 3시간 최심적설 분포



서해안형 강설 사례 중
700hPa 해기차와 3시간 최심적설 분포



850hPa 강풍대(온도골) 위치에 따른 유형 차이

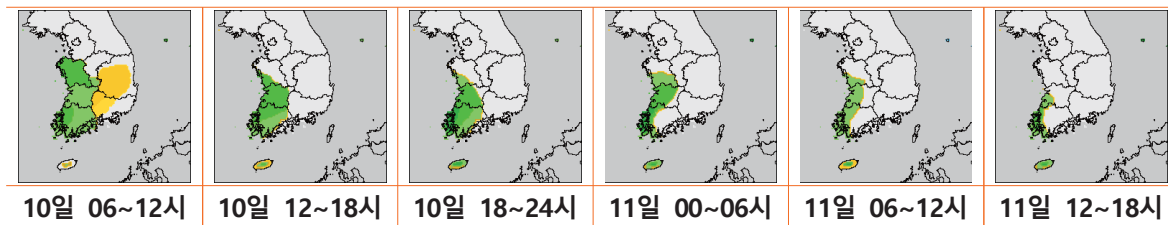
기류 수렴 영향으로 20cm 이상 기록한 서해안 대설

- 10cm 이상 서해안 대설에 반드시 필요한 기류 수렴 효과 -

1. 예보와 실황은?

예보 (1월 10일 05시 발표)	실황
<ul style="list-style-type: none"> ▶ 예상 강수량 <ul style="list-style-type: none"> - 울릉도·독도, 제주도: 5~30mm - 충남, 전라도: 5~10mm - 서해5도, 충청남부, 경상내륙: 5mm 내외 ▶ 예상 적설 <ul style="list-style-type: none"> - 울릉도·독도, 제주도산지: 10~30cm (많은 곳 50cm 이상) - 충남, 전라도: 5~15cm (많은 곳 전북, 전남서해안 20cm 이상) - 제주도(산지 제외): 2~7cm - 서해5도, 충청남부, 경상내륙: 1~3cm 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 10~11일 계속해서 서해안과 일부 내륙으로 강수대 영향 - 한기가 지속적으로 남하하면서 서해상에 대류운이 계속 발달하여 서해안과 전라내륙에 영향 - 기류가 수렴되는 곳에 강한 강수대가 발달하였고 내륙까지 많은 적설을 기록함 ▶ 전라서해안에 20cm 이상의 적설 기록, 일부 내륙에도 많은 적설 기록 - 강수 구역과 강수량 모두 모델에서 잘 예측됨

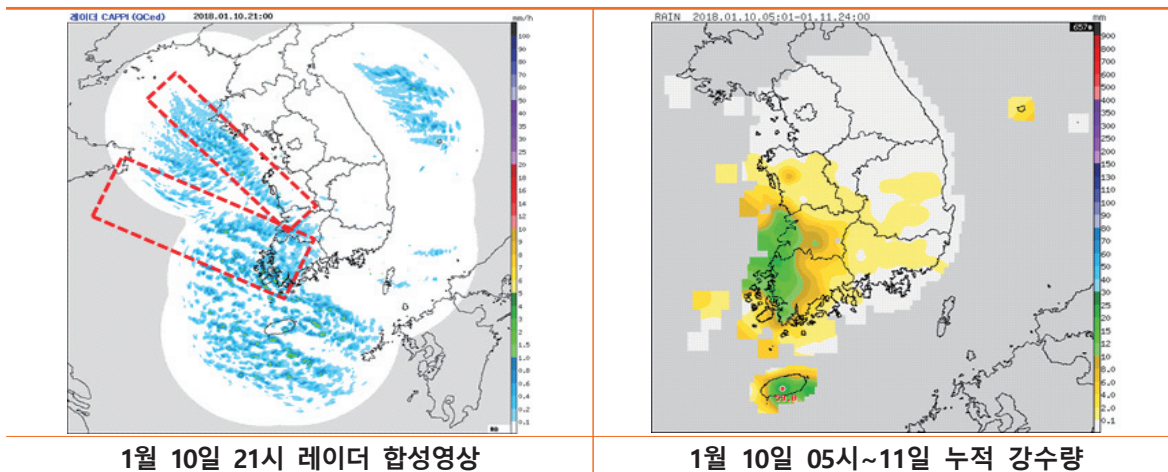
예상 적설



최심신적설 현황(cm)

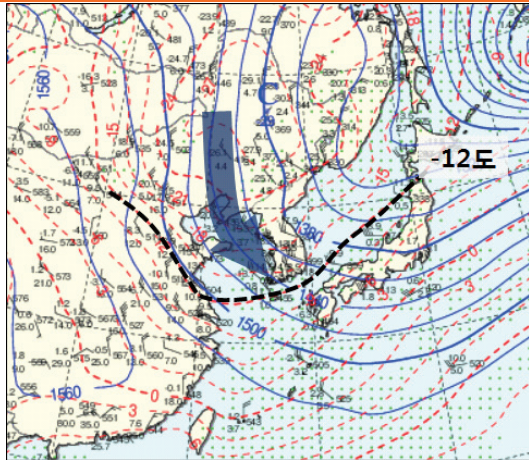
전라북도 새만금 27.7 부안 19.0 고창 18.0 김제 14.8 전주 9.5

전라남도 영광 22.0 함평 20.2 무안 17.8 목포 16.9 광주 13.6 해남 9.5

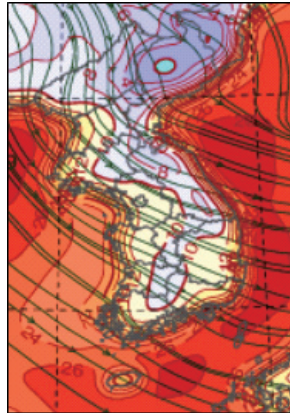


2. 강수메커니즘은?

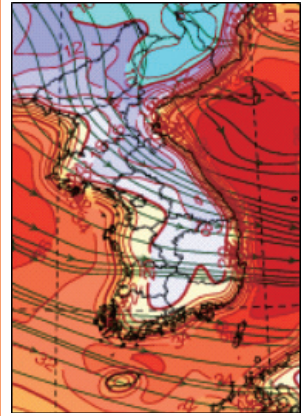
- **(큰 해기차와 강한 풍속)** 1월 10일 21시 850hPa 분석장을 보면 한기가 강하게 남하하여 전일(9일) 21시에는 중부지방에 있던 -12°C 선이 제주도에 위치하면서 서해남부해상의 850hPa 해기차가 22°C 이상을 보이며 하층 대기가 불안정해짐. 서해상으로 북서풍 30kts 이상의 강풍대가 광범위하게 형성되고 해상으로부터 열과 수증기가 활발하게 공급되면서 대류 혼합층이 강화되어 대류운 발달에 유리
- **(불안정)** 연해주 부근으로 상층 절리저기압이 정체하면서 상층까지 강한 한기의 영향을 받아 불안정이 큼. 서해남부해상으로 700hPa 해기차가 32°C 이상 나타나면서 850hPa 이상의 고도에서 대류 억제 효과가 적어 대설이 발생할 가능성이 높음. 광주 단열선도에서 역전층이 약하고 대류 혼합층이 4km로 매우 깊게 나타남
- **(기류 수렴)** 아래 모식도와 같이 우리나라 북쪽으로 상층 절리저기압이 정체할 경우 저기압 후면을 따라 한기가 주기적으로 남하를 하게 되며, 1차 한기 남하 후 2차 한기가 남하하면서 상층 단파골이 발달하고 하층에는 시어역이 형성되어 기류의 수렴이 발생
 - 10일 15시와 21시 광주 단열선도의 하층 바람을 보면 전 시간에 비해 서풍에서 북서풍으로 풍향 변화가 생겨 시어역이 통과했음을 알 수 있음. 이러한 기류 수렴은 상승류를 강화시켜 더욱 강한 강수로 이어지고, 시어역 전면의 서풍류가 강화되면서 수렴대가 내륙으로 유입되어 적설이 늘어나는 경우가 빈번하게 나타남



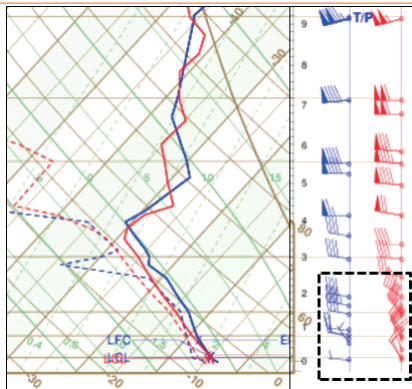
1월 10일 21시 850hPa 분석장



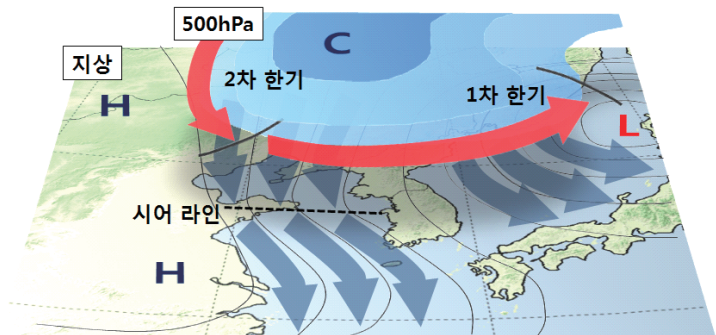
1월 10일 850hPa 해기차



1월 10일 700hPa 해기차



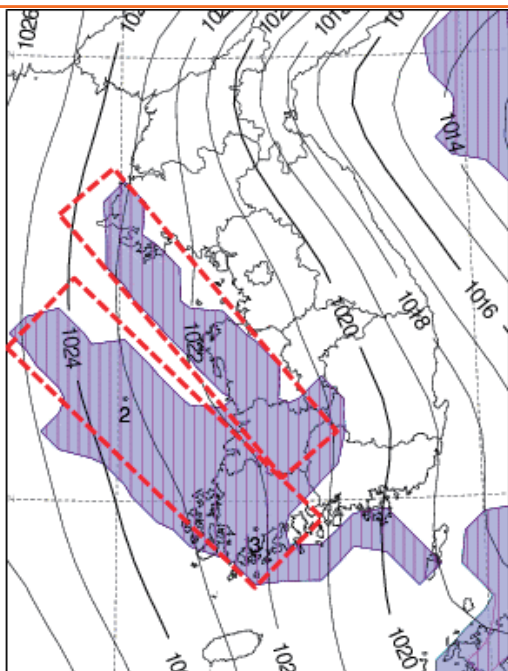
1월 10일 15시/21시 광주 단열선도



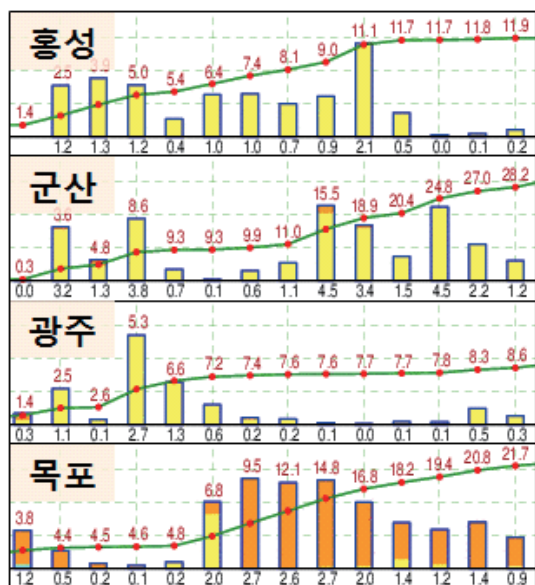
2차 한기 남하로 서해상의 기류 수렴 형성 모식도

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

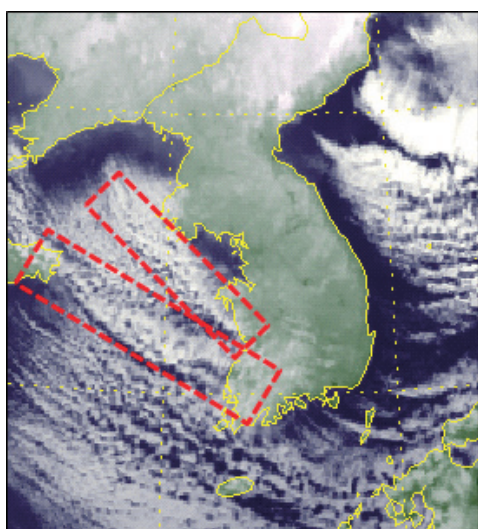
- **(모델 예상)** 9일 12UTC 발표된 모델의 강수 예상도를 보면 기류 수렴으로 예상되는 서해상에서 내륙으로 긴 두 개의 밴드형 강수대를 모의함. 지점별 강수량을 보면 대부분 10cm 이상의 강수량을 예상하고 있으며 전라서해안 지역으로는 20cm 이상의 많은 눈을 모의함
- **(실험)** 모델에서 기류 수렴으로 보았던 두 개의 밴드형 강수대가 위성에서도 비슷한 위치에 두 개의 강한 구름대로 나타났으며 내륙까지 유입. 강수량 분포에서도 나타나듯이 강수량과 강수지역도 모델에서 예상했던 범위를 크게 벗어나지 않은 것을 알 수 있음
- **(원인)** 모델에서 강수분포의 형태나 강수량의 특징들이 잘 표현이 된 것으로 판단되며, 2차 한기에 의한 기류의 수렴 효과로 강수가 강화되는 효과를 전구모델이 잘 모의하는 것으로 볼 수 있음



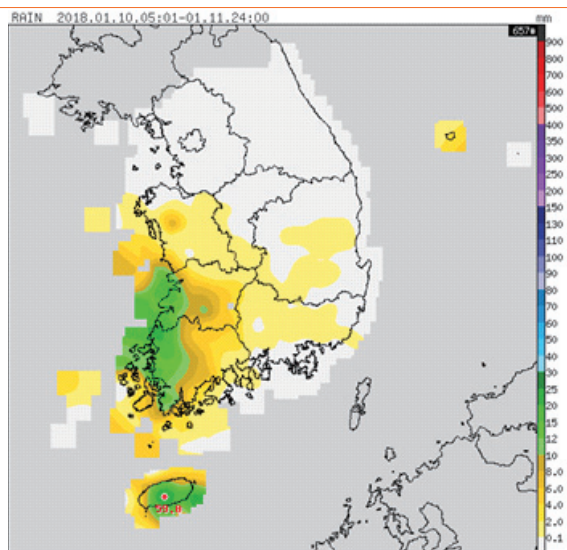
1월 10일 21시 한반도 강수예상도



1월 10일~11일 지점별 강수량 시계열



1월 10일 21시 위성 적외영상



1월 10일 05시~11일 일강수량 분포

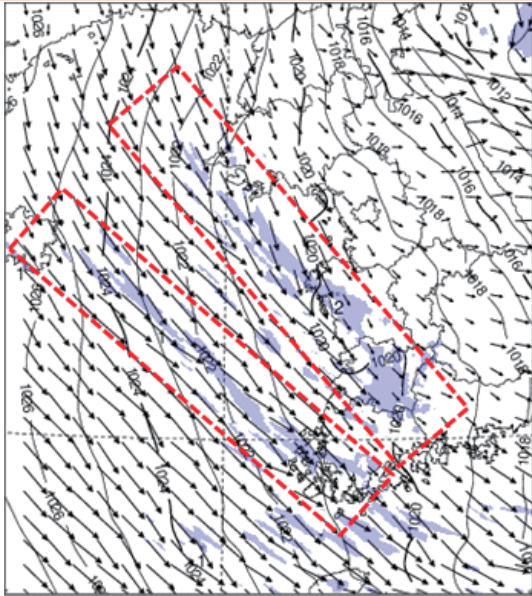
4. 그 때 이것이 중요했다...

● 2차 한기가 남하할 가능성 고려

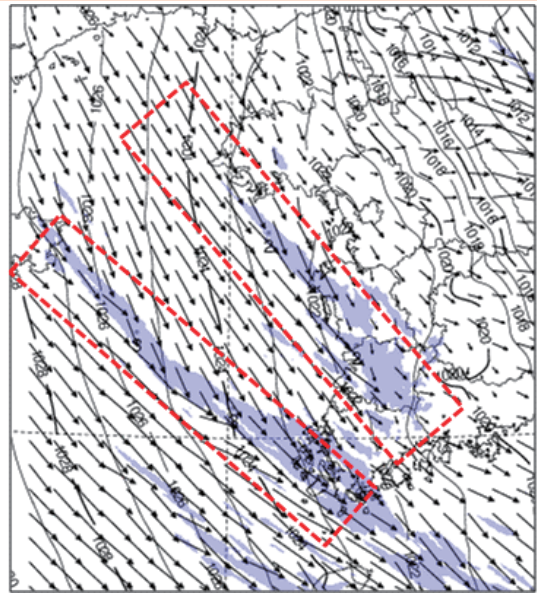
- 우리나라 북쪽으로 상층 저리저기압이 정체하는 종관적인 기압계가 예상될 시 2차 한기가 남하할 가능성을 염두
- 2차 한기의 규모와 강도가 강하다면 전면으로 기류 수렴이 발생할 가능성이 높음
- 이러한 기류의 흐름과 강수의 발달이 수치모델에서 어느 정도 모의가 되므로 참고가 필요함

● 수치모델을 참고하자

- 아래 그림은 기류 수렴으로 전라서해안에 20cm 이상 적설이 기록되었던 대설 사례에서의 국지모델 강수예상장(24시간 전)임. 두 사례 모두 기류 수렴에 의한 두 개의 밴드형 강수대를 모의하고 기류의 수렴도 잘 나타나고 있음
- 따라서 기류 수렴의 발생 가능성은 수치모델을 통해 어느 정도 판단이 가능하다고 볼 수 있음. 다만 강수의 양적인 측면에서는 모델의 정확성이 낮으므로 해기차, 풍속, 안정도 등을 참고하여 예상 적설을 산정할 필요가 있음



2018년 1월 10일 21시(+24h) LDAPS 강수 예상도



2014년 12월 17일 09시(+24h) LDAPS 강수 예상도

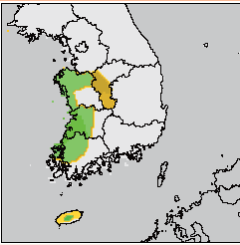
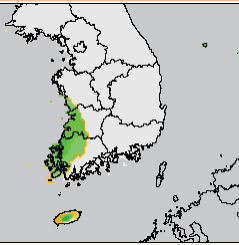
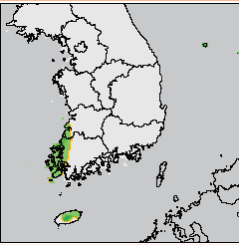
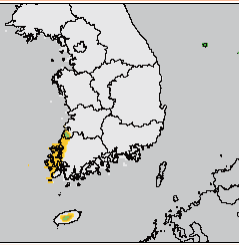
큰 해기차에도 불구하고 예상보다 적었던 서해안 강설

- 수치모델이 과소모의 하는 육풍 영향 고려했으면 -

1. 예보와 실황은?

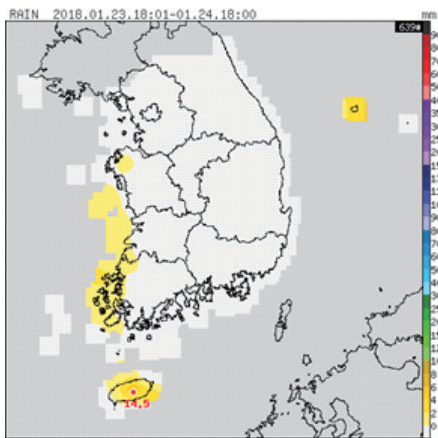
예보 (1월 23일 17시 발표)	실황
<ul style="list-style-type: none"> ▶ 예상 강수량 <ul style="list-style-type: none"> - 제주도, 울릉도.독도: 5~10mm - 충청도, 전라도(남해안 제외), 서해5도: 5mm 내외 ▶ 예상 적설 <ul style="list-style-type: none"> - 제주도산지, 울릉도.독도: 5~15cm - 전라서해안: 2~7cm(많은 곳 10cm 이상) - 충남서해안, 전라내륙, 제주도(산지 제외), 서해5도 : 1~5cm - 충청내륙: 1cm 내외 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 24일 새벽 전라서해안 위주 적설, 아침에는 강수대 해상으로 빠져나감 - 군산 3.4 고창 1.0 영광 5.0 무안 5.0 목포 2.3 등 전라서해안 위주 적설 - 24일 새벽 서해안에 북동풍(육풍)에 의한 수렴대 형태로 강수대 발달함. 점차 북동풍이 우세해지면서 04시 이후로는 강수대가 해안에서 해상으로 빠져나감 - 24일 오후까지 예상했던 전라서해안의 강수는 새벽부터 빠르게 종료

예상 적설

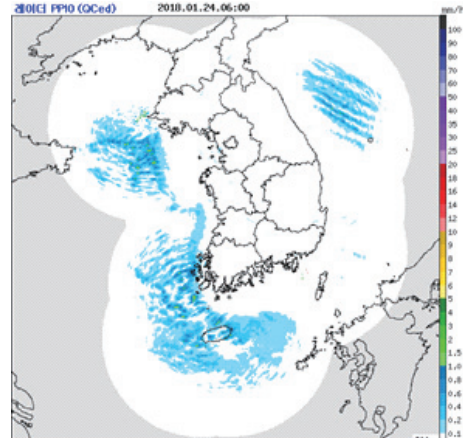
			
1월 23일 18~24시	1월 24일 00~06시	1월 24일 06~12시	1월 24일 12~18시

최심신적설 현황(cm)

전라북도 새만금 3.2 고창 1.0
 전라남도 흑산도 5.2 영광 5.0 해제 5.0 무안 3.5 진도 3.3 목포 2.3 함평 1.1
 충청남도 아산 3.1 서산 1.8 홍성 1.0 예산 0.9 태안 0.5 당진 0.5



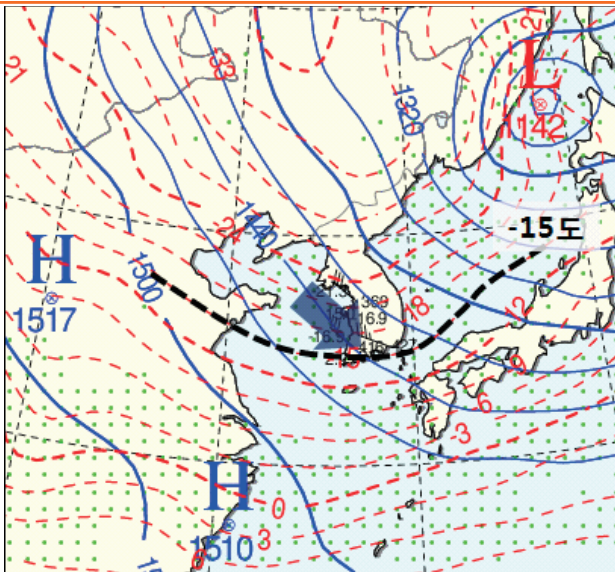
1월 23일 18시~24시 누적 강수량



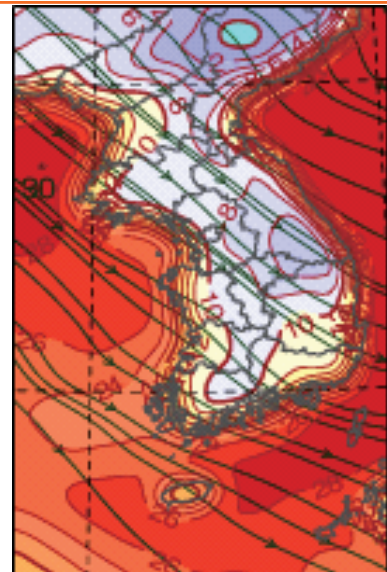
1월 24일 06시 레이더 합성영상

2. 강수메커니즘은?

- **(강한 한기 남하와 해기차)** 전일(23일) 03시에는 중부지방에 있던 850hPa -15°C 선이 남해안까지 남하하면서 서해중부해상에 22°C 이상의 해기차 구역이 광범위하게 형성. 해수면으로부터 현열과 수증기가 활발히 공급되면서 하층의 불안정 강화
- **(충분한 바람)** 서해안 지역에 850hPa 20kts 이상의 북서풍이 지속되면서 강수 발생 가능성이 높은 상태. 일부 내륙으로도 강수대 영향 줄 수 있는 종관적인 조건 만족

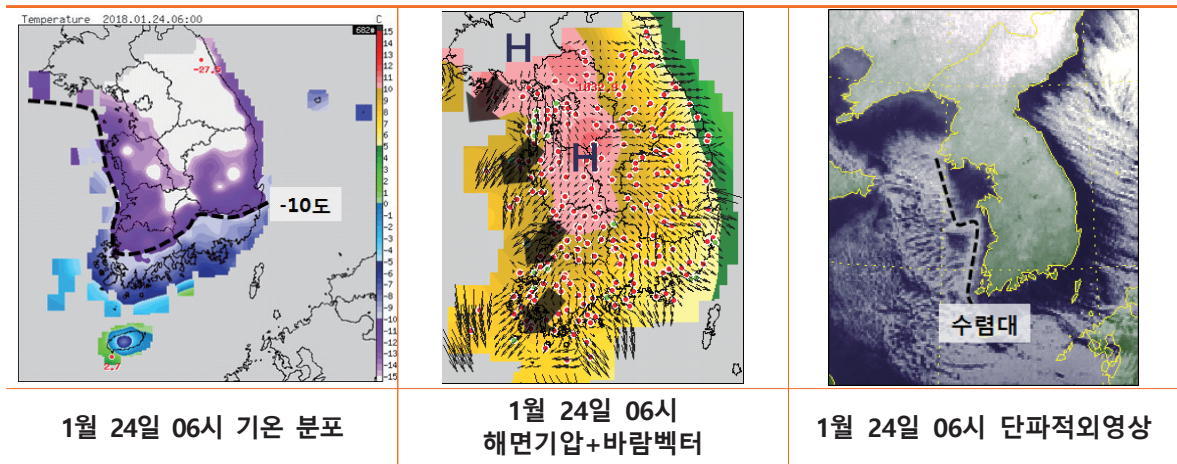


1월 24일 03시 850hPa 분석장



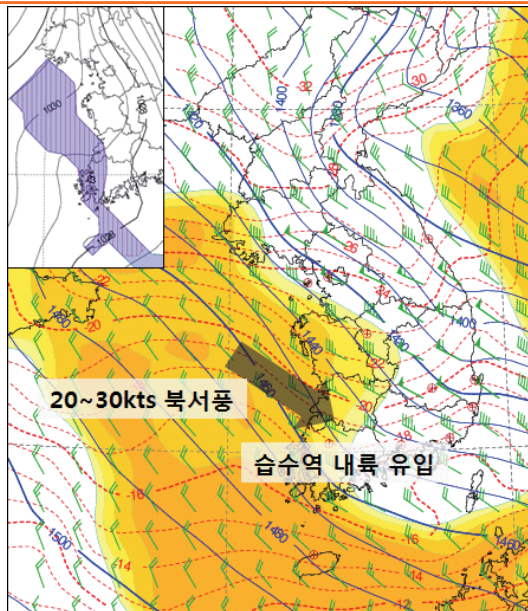
1월 24일 03시 850hPa 해기차

- **(국지풍과 수렴대 형성)** 밤사이 내륙에는 복사냉각으로 인해 -15°C 이하 구역이 광범위하게 나타나고 남부지방과 서해안지역도 -10°C 선 이하의 분포를 보임. 강한 cold pool 영향으로 내륙에 국지고기압이 형성되면서 서해안에는 북서풍의 종관풍이 아닌 북동풍의 국지풍(육풍)이 강화되어 해안 근처에 수렴대 형태의 강수대가 형성
- **(국지풍 강화)** 북동풍이 강하게 불고 수렴대가 점차 해상으로 물러나며 강수 종료

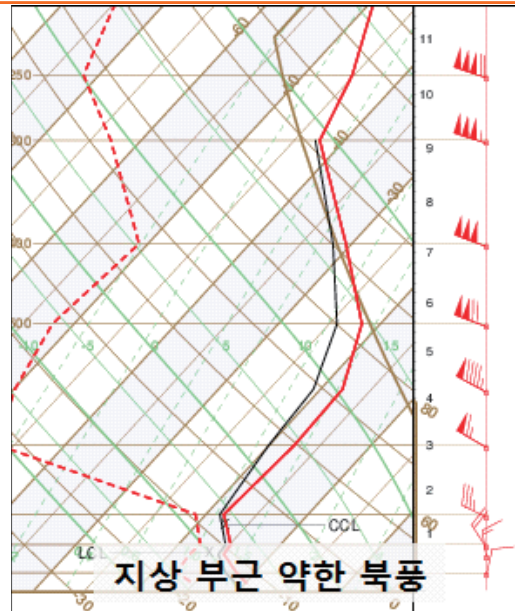


3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

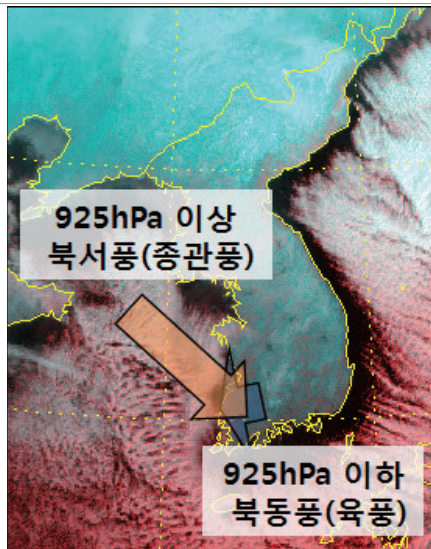
- **(모델 예상)** 전라서해안에 지속적인 강수 모의. 850hPa 20kts 이상이고 330° 이하인 북서풍과 습수역을 내륙까지 모의. 다만 온도골이 내륙에 위치하면서 경압성은 약화. 광주 예상단열선도는 지상 부근으로 15kts 이하의 약한 북풍 성분을 모의함
- **(실황)** 850hPa 층에는 모델 예상대로 북서풍이 탁월하게 나타났으나 925hPa 이하 층에서는 예상보다 북동풍 성분이 강하게 나타나 수렴대가 해상으로 빠르게 빠짐
- **(원인)** 내륙의 복사냉각으로 인해 강화된 국지고기압 세력을 모델이 과소 모의. 즉 925hPa 이하의 북동풍을 약하게 모의하면서 모델은 강수 구역과 저습수역이 서해안뿐만 아니라 일부 내륙까지도 영향을 줄 것으로 예측



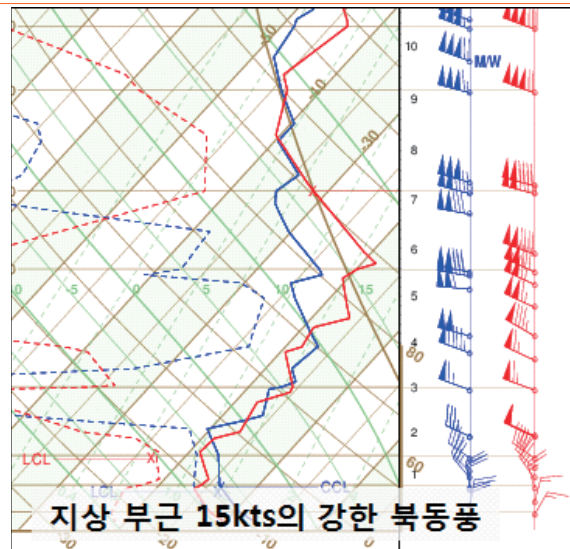
1월 24일 09시(+24h) 850hPa 상세바람장+강수량



1월 24일 09시(+24h) 광주 예상단열선도



1월 24일 09시 합성위성영상



1월 24일 09시 광주단열선도

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면...

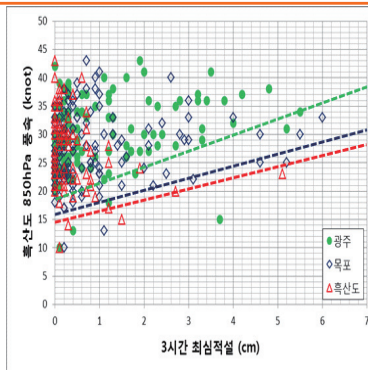
● 충분히 강한 풍속이 필요하다는 것을 알았더라면

- 호수 효과 강설에서 강한 바람은 대류 혼합 과정에 필요한 필수적인 요소
- 아래 통계 그래프와 같이 해상에 850hPa 풍속이 20kts 이상으로 불어야 강수가 발생하는 데에 유리하며 서해안 대설로 이어지기 위해서는 25kts 이상, 내륙까지 대설이 발생하려면 30kts 이상이 서해상에 불어야 함
- 이번 사례에서는 24일 새벽에 850hPa 25kts 이상의 강풍대가 내륙에 형성되고 서해상에는 강풍대가 존재하지 않아 풍속이 약해 활발한 대류 혼합이 어려워 대설로 이어지

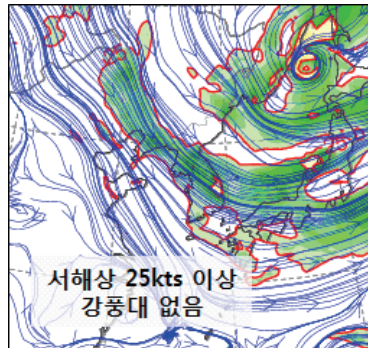
기 힘든 조건이었음

● 온도골의 위치와 그에 따른 북동풍 강화 여부를 고려했더라면

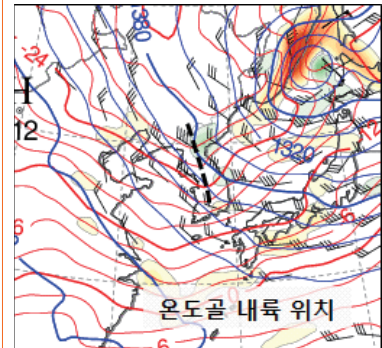
- 850hPa의 강풍대가 내륙에 위치함에 따라 온도골도 해상이 아닌 내륙에 형성됨
- 상대적으로 내륙에 더 강한 한기가 쌓이고 야간 복사냉각 효과까지 더해져 지상 고압대가 발달. 내륙에서 해상으로 불어나가는 육풍 성분이 가미되면서 북동풍이 강화
- ⇒ 해상에 강풍대가 없어 해상에서 육지로 불어 들어가는 바람이 상대적으로 강하지 않고 온도골이 내륙에 위치할 경우에는 서해안에 육풍으로 인한 북동풍이 강화되면서 강수대가 해상으로 물러날 가능성이 있음을 고려해야함



서해안형 강설 사례에서
850hPa 풍속과 적설 관계



24일 03시 850hPa 유선 예상



24일 03시 850hPa 기온 예상

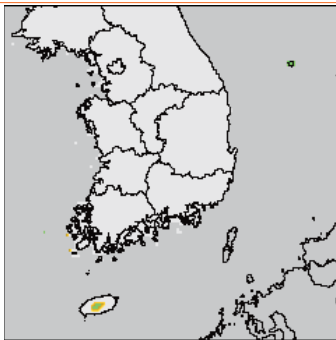
북풍의 풍계에서 예상하지 못한 전라서해안 대설

- 강설 발생 기본 조건인 큰 해기차와 강한 풍속 -

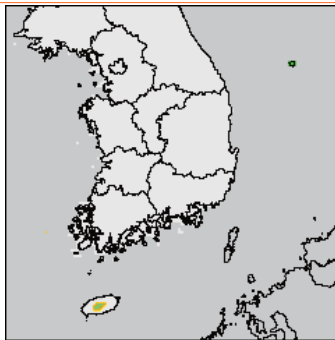
1. 예보와 실황은?

예보 (1월 24일 17시 발표)	실황
<ul style="list-style-type: none"> ▶ 예상 강수량 <ul style="list-style-type: none"> - 울릉도.독도: 5~10mm - 제주도산지: 5mm 내외 ▶ 예상 적설 <ul style="list-style-type: none"> - 울릉도.독도: 5~15cm - 제주도산지: 1~5cm - 충남서해안과 전라서해안 25일 아침까지 눈 날림 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 전라서해안으로 5cm 이상의 적설 기록되면서 24일 밤 대설주의보 발표

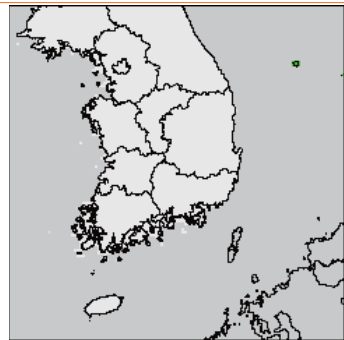
예상 적설



1월 24일 18~24시



1월 25일 00~06시

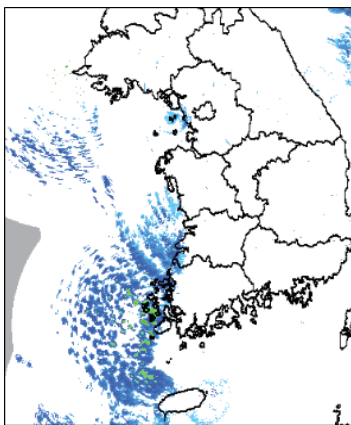


1월 25일 06~12시

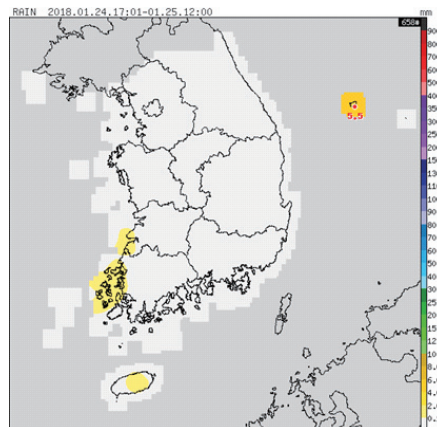
최심신적설 현황(cm)

전라서해안 영광군 7.5 압해도 5.9 해제 4.5 목포 2.6 진도군 2.2 새만금 1.2 고창 0.5 흑산도 0.5

- 서해상의 대류운 약해지지 않고 25일 아침까지 전라서해안에 영향



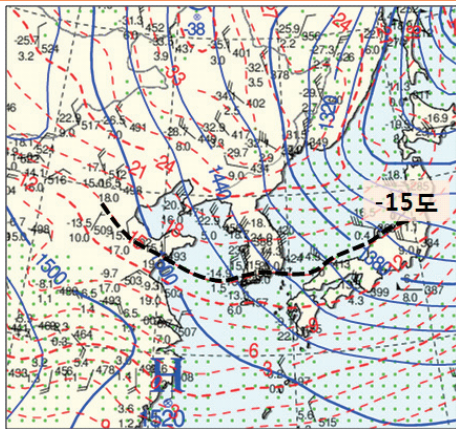
1월 25일 00시 레이더 강설영상



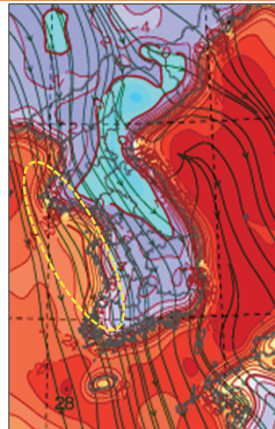
1월 24일 17시~25일 12시 누적강수량

2. 강수메커니즘은?

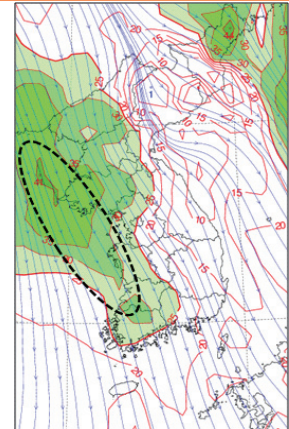
- **(큰 해기차)** 850hPa -15°C 선이 남해안까지 남하할 정도로 강한 한기가 내려오면서 서해상에 22°C 이상의 해기차 형성. 충남앞바다 부근도 20°C 이상의 해기차가 나타나면서 불안정 강화
- **(강한 풍속)** 해기차 20°C 이상으로 충분한 가운데 해안 근처로 850hPa 30kts 이상의 강풍대 축 형성. 비록 북북서풍의 풍계에서 웅진반도 남쪽은 상대적으로 취주거리가 짧게 나타나지만 큰 해기차에 강한 풍속까지 받쳐주면서 대류운이 발달할 수 있는 충분한 열과 수증기가 공급되고 대류 혼합이 활발하게 일어남



1월 24일 21시 850hPa 분석장

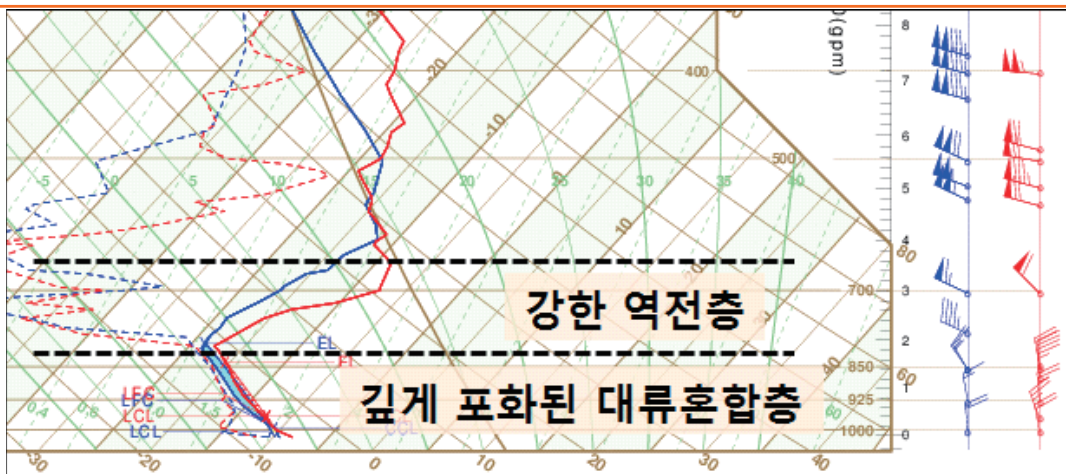


1월 24일 21시 850hPa 해기차



850hPa 유선(강풍대)

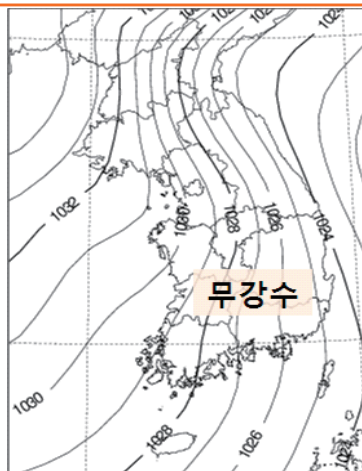
- **(강한 안정층)** 흑산도 단열선도를 보면 850hPa 이상에 강한 역전층이 존재해 대류를 억제하기 좋은 조건이나 역전층 아래 고도에서 깊게 포화된 형태의 대류 혼합층이 매우 뚜렷하게 나타남. 결국 대류 억제가 강한 조건임에도 불구하고 큰 해기차와 강한 풍속의 영향으로 제한된 하층 안에서 활발한 대류가 일어나면서 강설로 이어짐



1월 24일 21시 흑산도 단열선도

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

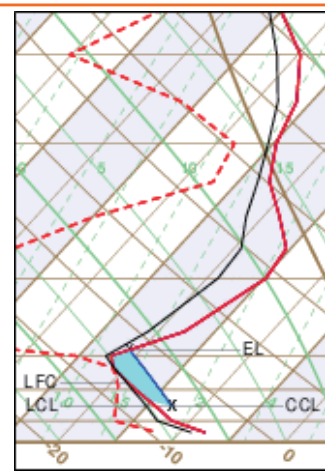
- **(모델 예상)** 24일 00UTC 발표 모델에서 24일 밤부터 25일 아침 사이 일부 전남서해안에 약한 강수를 모의. 그 외 서해안 지역에는 강수를 모의하지 못함. 850hPa 상세바람 장에는 북북서풍의 풍계에서 취주거리가 긴 일부 전남서해안에만 저습수역의 경계가 걸리고, 상대적으로 취주거리가 짧은 웅진반도 아래 구역은 건조한 상태로 나타남
- **(실황)** 위성영상에서 보면 광범위한 구름대의 긴 취주거리 구역이 예상보다 동쪽까지 나타났고, 특히 짧은 취주거리 구역에서 대류운열이 발달하여 전북서해안까지 직접적으로 영향을 줌
- **(원인)** 짧은 취주거리 구역에도 강설 발생에 충분히 큰 해기차와 강한 풍속, 160km 이상의 취주거리를 모두 충족하여 강설로 이어지게 됨. 흑산도 단열선도를 비교해보면 모델 예상에서도 불안정에 대한 조건은 충분히 만족했으나 실황과는 다르게 대류 혼합층의 형태로 나타나지 않은 차이점이 있음



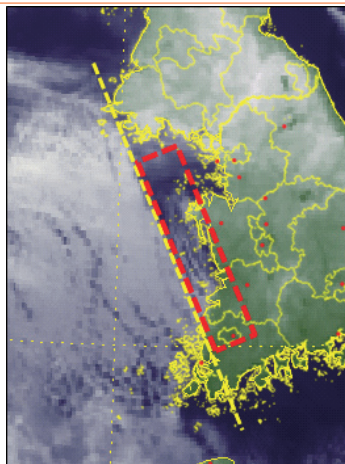
1월 25일 00시
한반도 강수예상도



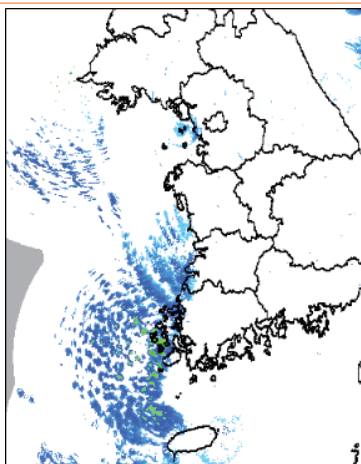
1월 25일 00시
850hPa 상세바람 예상장



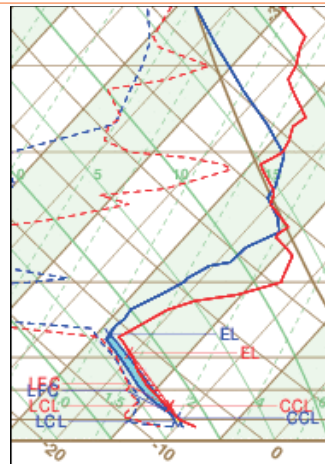
1월 24일 21시
흑산도 예상단열선도



1월 25일 00시 위성 적외영상



1월 25일 00시 레이더 강설영상



1월 24일 21시 흑산도 단열선도

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

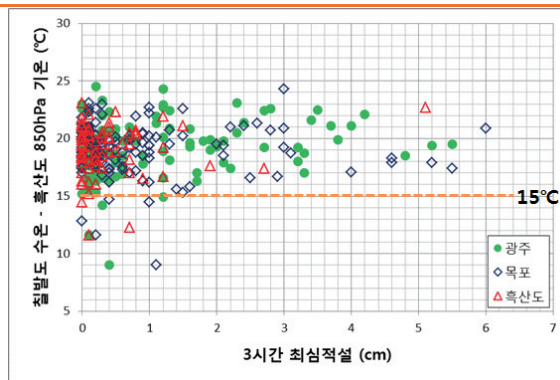
● 강설 발생의 기본 요소를 충족하는지 판단했더라면

- 아래 그림은 서해안형 강설 발생에 필요한 기본 요소인 해기차와 풍속에 대한 적설 분포임. 850hPa 해기차가 15°C 이상이고 풍속이 20kts 이상일 경우 강설 발생 가능성이 있음
- 이번 사례와 같이 해기차가 20°C 내외이고 풍속이 30kts 이상일 경우 많은 적설이 발생할 가능성이 크다는 것을 알 수 있음
- 일반적인 강설 발생 취주거리 조건은 160km 이상

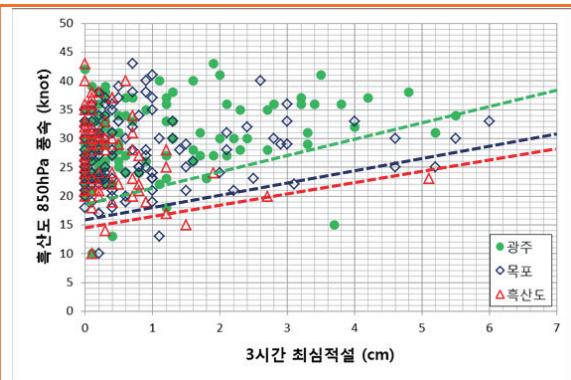
⇒ 모든 조건을 충족하므로 강수 도입을 고려해야할 필요

● 철저한 실황감시가 중요

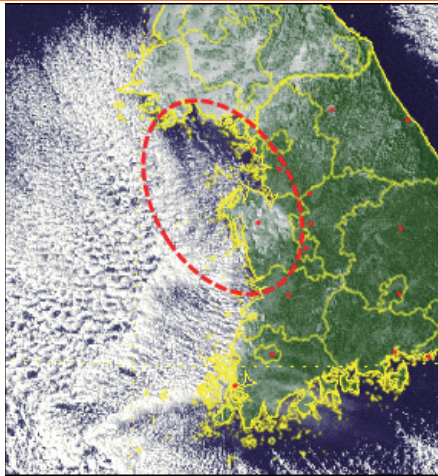
- 24일 16시 위성영상을 보면 취주거리가 짧은 경기만에서도 대류운이 나타나고 있어 해기차가 매우 크고 풍속이 충분히 강한 상황임을 짐작할 수 있음
- 이러한 실황을 보이는 상황에서 850hPa 유선 예상도에 나타나는 강한 한기의 강풍축이 취주거리가 짧은 구역에 형성되는 점을 고려한다면 대류운이 계속 유지되거나 좀 더 발달할 가능성이 있으므로 강수 도입 고려해야할 필요



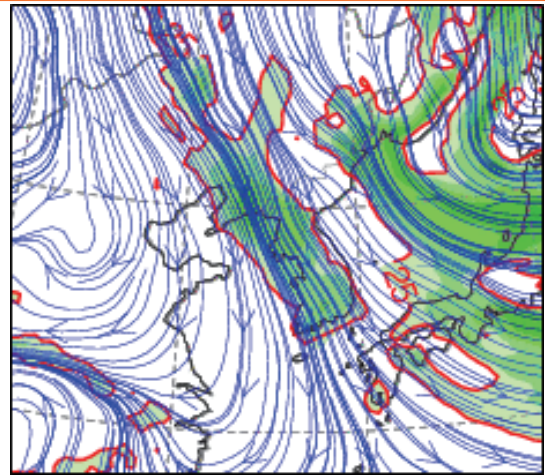
850hPa 해기차와 적설 분포



850hPa 풍속과 적설 분포



1월 24일 16시 천리안 위성 가시영상



1월 25일 00시 850hPa 유선 예상장

서해안형 강설

- 야간 육풍 강화로 해안 위주의 대설, 내륙은 강수 어려움 -

1. 예보는 어떻게 발표되었나? → 눈과 비가 섞이면서 적설이 적을 것

예보(12월 7일 17시 발표)

- 충남서해안, 전라서해안 : 2~7cm(많은 곳)
- 전북서해안과 전남북부서해안 10cm 이상)
- 충남내륙, 전라내륙 : 1~5cm

실황(12월 7~8일)

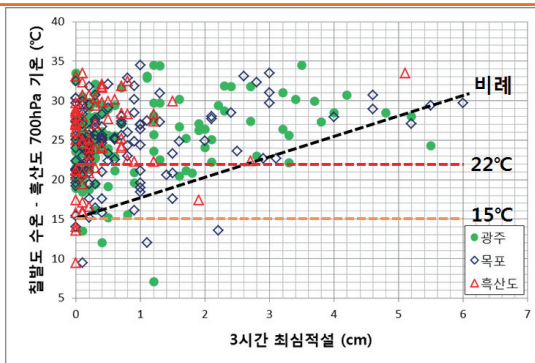
- 충남서해안, 전라서해안 : 2~7cm(많은 곳 새만금 14.6cm)
- 충남내륙, 전라내륙 : 눈 날림

2. 쟁점 사항은?

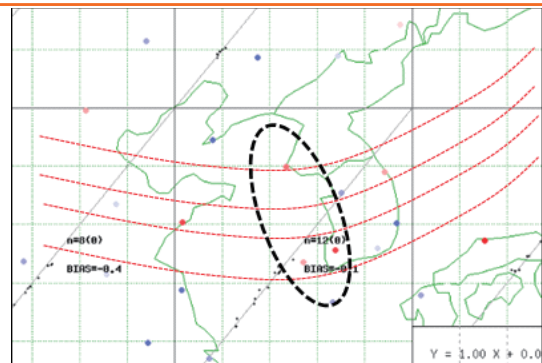
- 쟁점1) 700hPa 한기가 강하다. 강수는 예상보다 더 발달할 수 있다.
- 쟁점2) 콜드풀이 강하다. 야간 육풍 강화로 내륙은 강수가 어려울 것이다.

3. 주요 분석내용

- 쟁점1) 700hPa 한기가 강하다. 강수는 예상보다 더 발달할 수 있다.



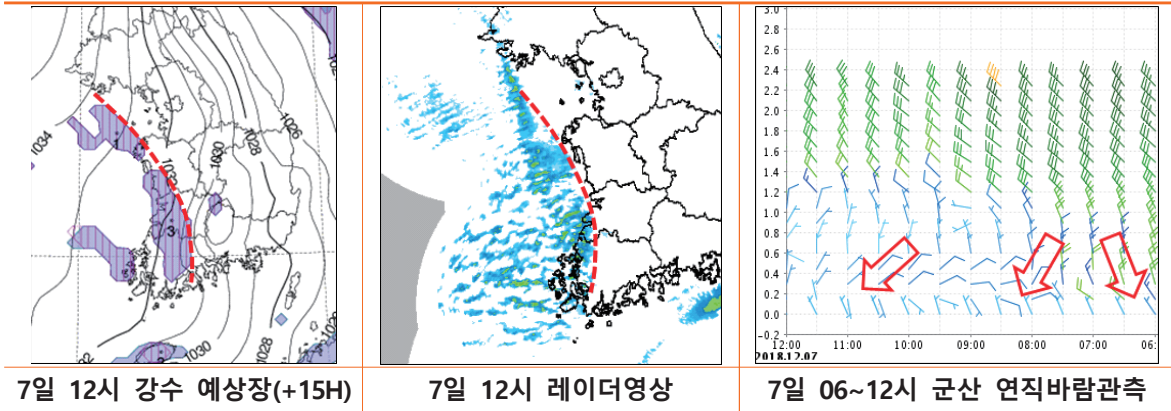
700hPa 해기차와 적설 통계 자료



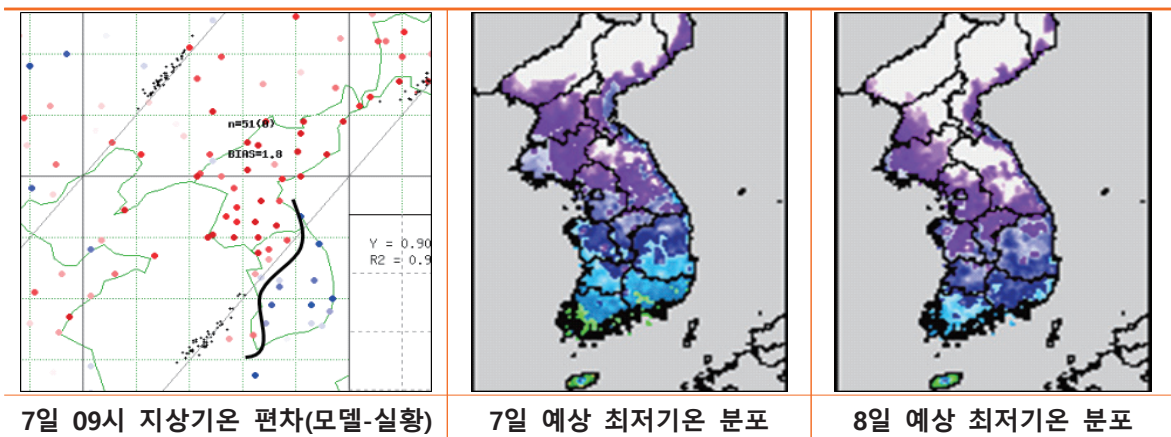
7일 09시 700hPa 기온 편차(모델-실황)

- 서해안형 강설의 경우 대류를 억제하는 역전층의 고도가 850hPa 이상에서 형성되므로 강수의 강도는 700hPa 해기차와 상관성이 있음
- 모델에서 예상하는 서해상의 700hPa 해기차는 22도 이상으로 대설 가능성 있음
- 700hPa 실황에서 서해상으로 남하한 한기의 강도가 모델보다 강하게 나타남
- 따라서, 모델 예상보다 700hPa 해기차가 커 강수가 더 발달할 수 있겠음
- ▶ 실제 육풍과의 수렴에 의한 강수대가 강하게 발달했다.
 - 고창, 군산, 무안, 영광 등 전라서해안 지역으로 5cm 이상의 대설 기록
 - 특히, 군산(새만금)에는 육풍과의 수렴대가 정체하면서 14.6cm의 적설 기록

- **쟁점2) 콜드풀이 강하다.** 야간 육풍 강화로 내륙은 강수가 어려울 것이다.



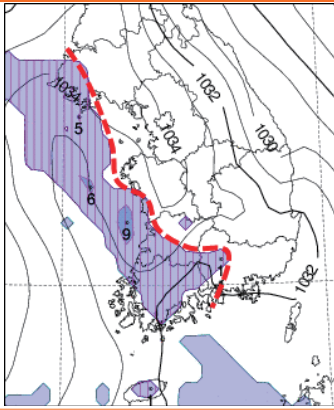
- 분석 당일이었던 7일 오전에도 해기차에 의한 서해안에 강설이 나타나고 있었으나 당초 모델의 예상보다 강수역이 서쪽으로 많이 밀려나있었음
- 군산 연직바람관측 자료를 보면 아침부터 북서풍이 북동풍으로 전환, 육풍 강화
- 해상에 한랭이류가 악화되거나 내륙에 한기가 축적될 시 육풍의 영향 고려 필요



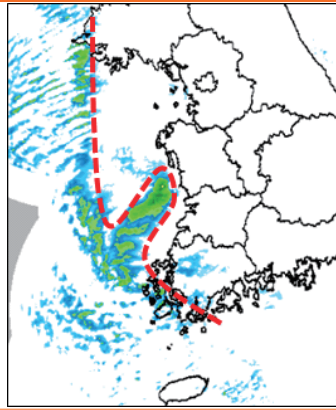
- 7일 아침에는 지상기온이 중부지방까지 양의 편차를 보이며 실제 한기가 강했음
- 8일 예상되는 최저기온이 7일보다 더 크게 하강하면서 더 강한 콜드풀이 예상됨
- 콜드풀이 강화되는 8일 새벽부터 오전에는 모델 예상보다 강수대가 서쪽으로 축소될 가능성 높음
- 육풍이 강화되면서 수렴에 의한 강수대가 주로 해안으로 형성되고 빠져나가겠음
- 따라서, 내륙은 해안보다 강수 가능성이 낮아 강수역과 적설 축소 필요

▶ **실제 내륙에는 적설이 없었고 눈 날림만 관측됐다.**

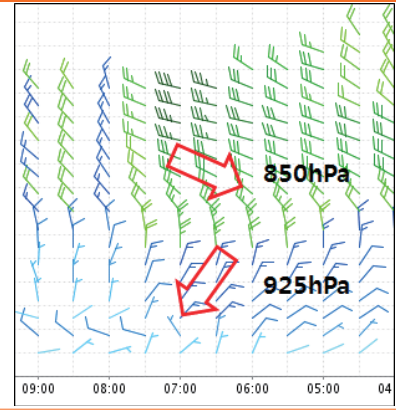
- 8일 새벽~아침 모델에서는 내륙까지 강수영역을 모의했으나 실황에서는 해안에만 영향을 주었고, 09시에는 해상으로 빠져나감
- 군산 연직바람관측 자료에서 850hPa에서는 북서풍이 강하게 불었으나 925hPa 고도 이하에서는 북동풍이 강하게 불면서 수렴대는 더욱 서쪽으로 밀려나게 됨
- 결국, 적설은 해안지역으로만 기록이 됐고, 내륙은 눈 날림만 관측되었음



8일 09시 강수 예상장(+24H)



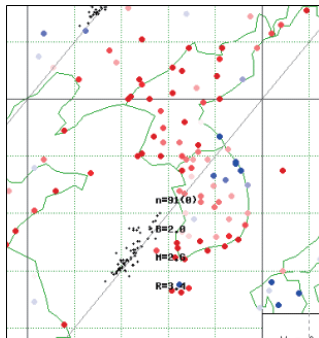
8일 09시 레이더영상



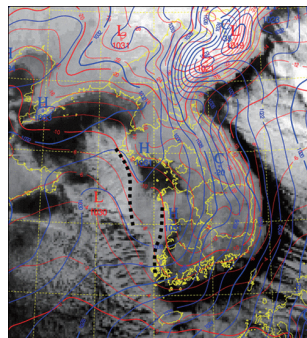
8일 04~09시 군산 연직바람관측

▶ **콜드풀이 강할 때, 내륙은 강수 가능성이 낮다.**

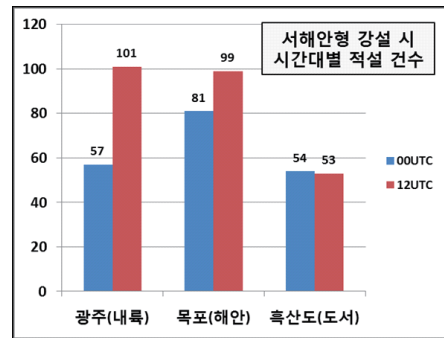
- 예상했던 대로 전날(7일)보다 8일의 최저기온은 더 하강했으며, 모델에서의 09시 지상 기온 오차는 전날보다 더 광범위하게 남부지방까지 나타남
- 해상은 점차 온난하게 변질되면서 온도능이, 내륙은 야간 복사냉각 효과까지 더해지면서 온도골이 강화, 내륙에 국지고기압 발달, 육풍 성분인 북동풍 강화
- 결국, 육풍 영향이 예상될 때 내륙은 강수 가능성이 낮으며, 통계 자료에서도 광주(내륙)의 경우 콜드풀이 약한 12UTC보다 콜드풀이 강한 00UTC에 강수 빈도가 절반 가까이 낮은 것을 알 수 있음



8일 09시 지상기온 편차
(모델-실황)



8일 09시 한반도
지상분석장



서해안형 강설 시
시간대별 적설 건수

서해안형 강설

- 강한 한랭이류와 불안정, 그리고 지형수렴에 의한 대설 -

1. 예보는 어떻게 발표되었나?

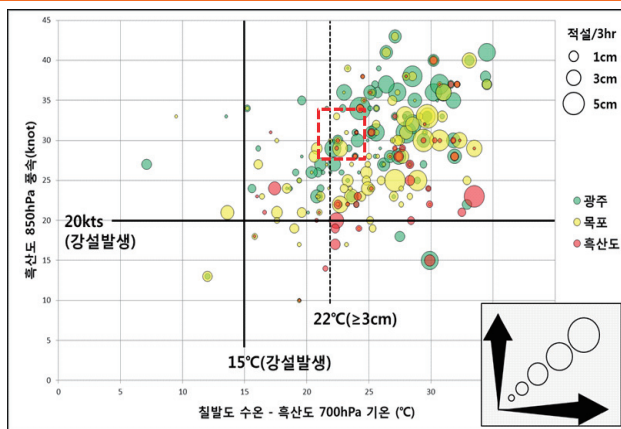
예보(12월 27일 17시 발표)	실황(12월 27~28일)
- 전라서해안 : 2~7cm	- 전라서해안 : 3~10cm(많은 곳 고창 24.5cm)
- 충남서해안, 전라내륙 : 1~3cm	- 충남서해안, 전라내륙 : 2~7cm

2. 쟁점사항은?

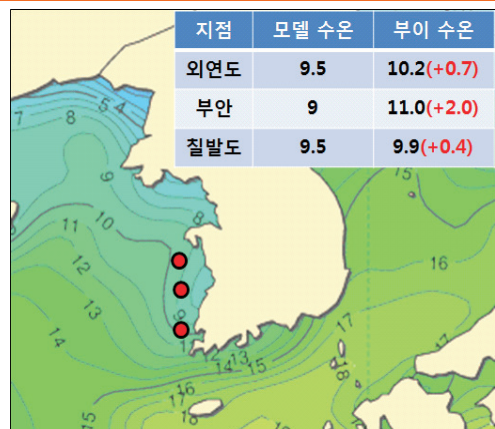
- **쟁점1)** 700hPa 해기차와 850hPa 풍속이 강하다. 대설 가능성 매우 높아진다.
- **쟁점2)** 하층의 이류가 매우 강하다. 지형적인 영향과 내륙까지도 적설 늘어난다.

3. 주요 분석내용

- **쟁점1)** 700hPa 해기차와 850hPa 풍속이 강하다. 대설 가능성 매우 높아진다.



700hPa 해기차와 850hPa 풍속 통계 자료



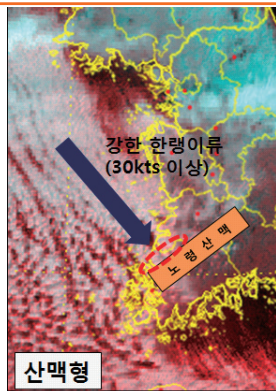
27일 09시 모델과 부이 수온 비교

- 700hPa 해기차는 역전층의 대류 억제와 관련이 있고, 850hPa 풍속은 하층 수증기 공급으로 불안정도와 관련이 있어, 값이 클수록 대설 가능성은 높아짐
- 모델에서 예상하는 700hPa 해기차는 22도 이상, 850hPa 풍속은 30kts 이상으로 통계적으로 광주까지 대설의 가능성이 매우 높음(빨간색 박스 범위에 해당)
- 특히, 모델에서 분석된 서해상의 수온보다 부이의 수온이 0.5~2.0도 정도로 더 높게 나타나 실제 700hPa 해기차는 더 커질 수 있음
- 따라서, 대설 조건을 충분하게 만족시키므로 예상 적설 상향 필요

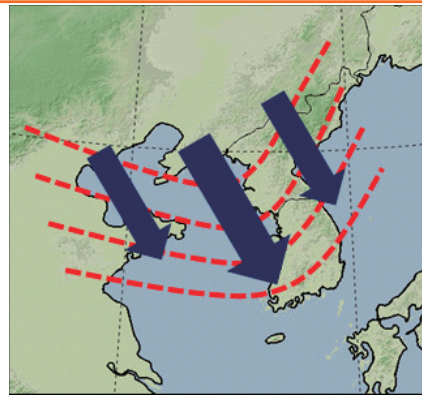
▶ 실제 예상 적설보다 많은 양의 적설을 기록했다.

- 전라서해안 뿐만 아니라 전라내륙과 충남으로도 5cm 이상 대설이 나타난 지역이 많았으며, 일부 내륙(광주, 나주)에는 10cm 이상의 적설 기록

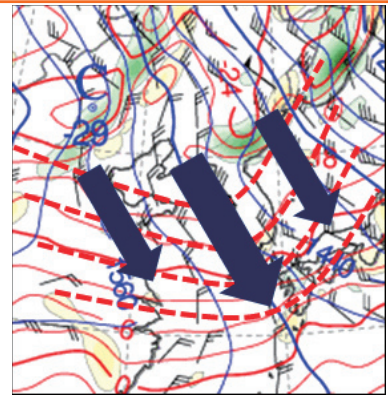
● **쟁점2)** 하층의 이류가 매우 강하다. 지형적인 영향과 내륙까지도 적설 늘어난다.



산맥형 대설 모식도

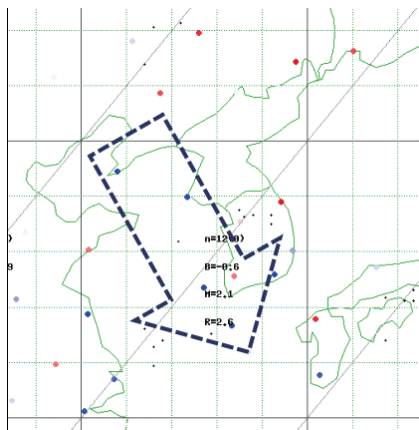


산맥형 대설에 유리한
850hPa 구조

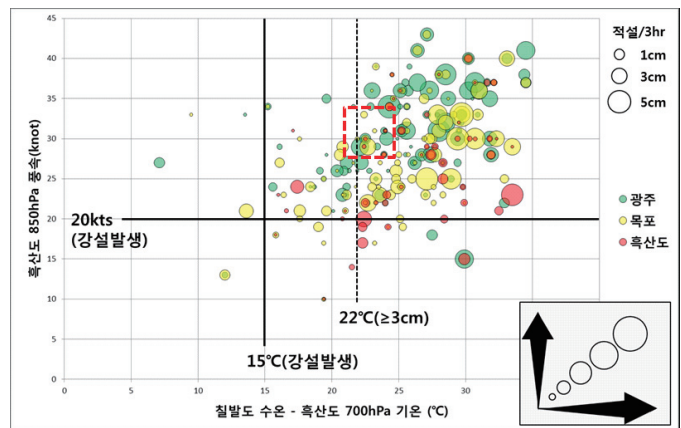


28일 03시 850hPa 예상장

- 28일은 서해상에서 전라서해안으로 강한 한랭이류가 나타나는 유형으로 노령산맥 풍상측의 지형적 강제상승으로 인한 산맥형 대설(10cm 이상)을 고려해야함
- 또한, 강풍축과 온도골이 서해상에서 서해안을 축으로 나타나는 경우에 한랭이류형 강설과 산맥형 대설의 발생이 유리해짐(육풍의 영향이 없음)
- 모델에서 예상되는 850hPa의 강풍축과 온도골은 모두 서해상에서 서해안으로 형성되어 있고, 풍속도 30kts 이상으로 산맥형 대설에 최적화된 조건임



27일 09시 850hPa 모델 풍속 편차

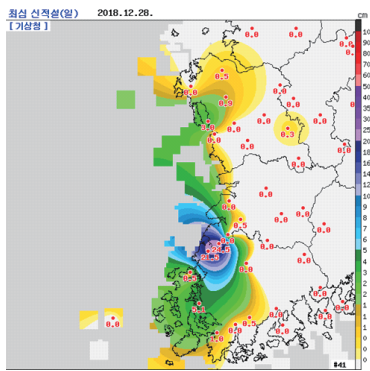


700hPa 해기차와 850hPa 풍속 통계 자료

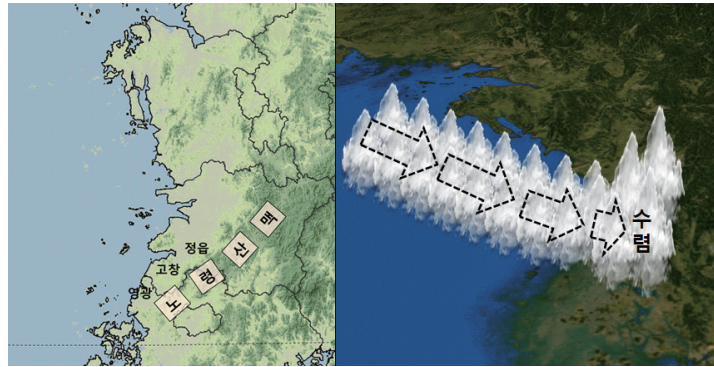
- 하층의 강풍대가 형성된 서해상 관측 지점들(다렌, 백령도, 흑산도)의 27일 09시 850hPa 모델 풍속 편차가 음의 편차로 나타나, 실제 하층 풍속이 더 강한 상황
- 산맥형 대설의 영향을 받는 지역(고창, 영광)으로는 10cm 이상의 대설 가능성 매우 높아, 예상 적설 상향 필요

- 한편, 통계 자료를 보면 내륙인 광주의 경우 30kts 이상의 풍속에서 대설 가능성이 매우 높아지는 것을 알 수 있음
- 따라서, 내륙 지역까지도 대설 가능 구역을 확대할 필요

▶ 실제 풍상측 지역으로 20cm가 넘는 적설 기록, 내륙에도 10cm 이상 기록됐다.



28일 최심신적설 분포



노령산맥의 분포와 지형수렴 모식도

- 산맥 풍상측 지역인 고창과 영광에 각각 24.5cm, 21.5cm의 적설을 기록하면서 전형적인 산맥형 대설 유형의 결과로 나타남
- 또한, 광주(광산)와 나주에도 10cm 이상의 적설을 기록하면서 강한 풍속이 내륙까지 발달한 구름대를 유입시킨 것을 알 수 있음

4. 동해안형 강수

저기압 통과 후 약한 북동풍에 의한 강원영동지방 강수

- 북동기류 방해받지 않으면 약해도 강수 내려 -

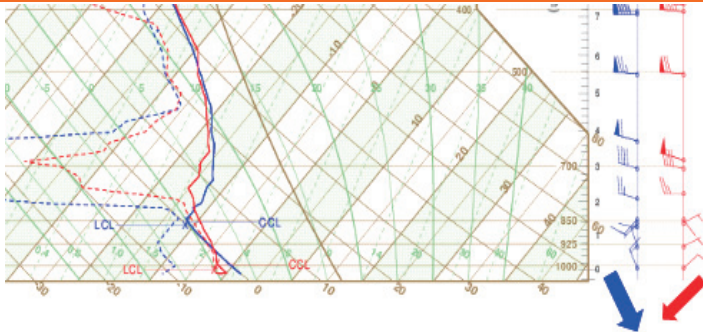
1. 예보와 실황은?

예보(2월 23일 17시 발표)	실황(12월 27~28일)
강원영동지역 강수예보 없었음	- 강수량: 강원영동 5mm 내외, 경북북서 1mm미만, - 적설: 강원영동 5cm내외

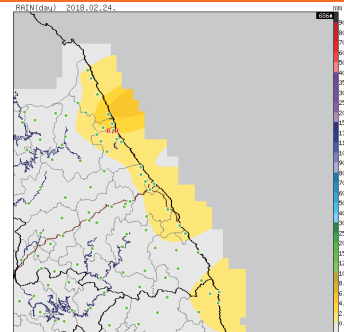
최심신적설 현황(cm)

강원영동 설악동(L) 3.2, 미시령(C) 6.5 속초(L) 4.7 청호(L) 4.8 양양(C) 2.5 북강릉 0.6

- 강한 cP(대륙고기압)가 중국북동부로 확장하는 전형적인 영동 강수유형은 아님
- 해안 전선이 형성되면서 동풍을 타고 해안과 태백산맥 동쪽 사면 위주로 강수 기록



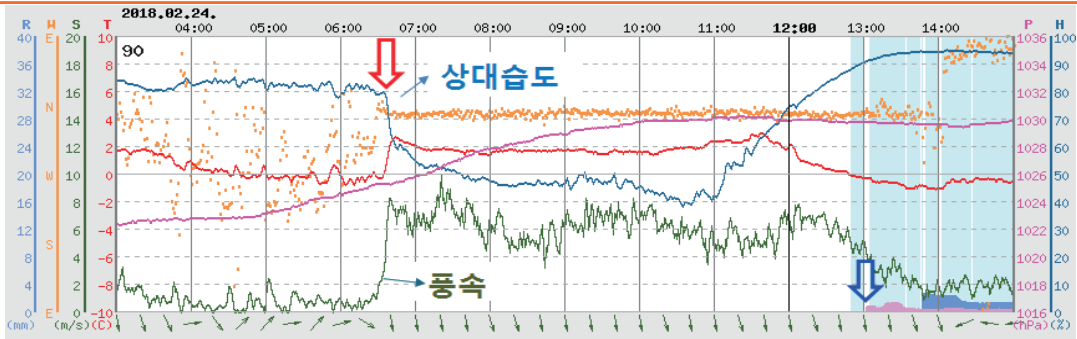
2월 24일 15시 속초 단열선도(푸른색 12시, 붉은색 15시)



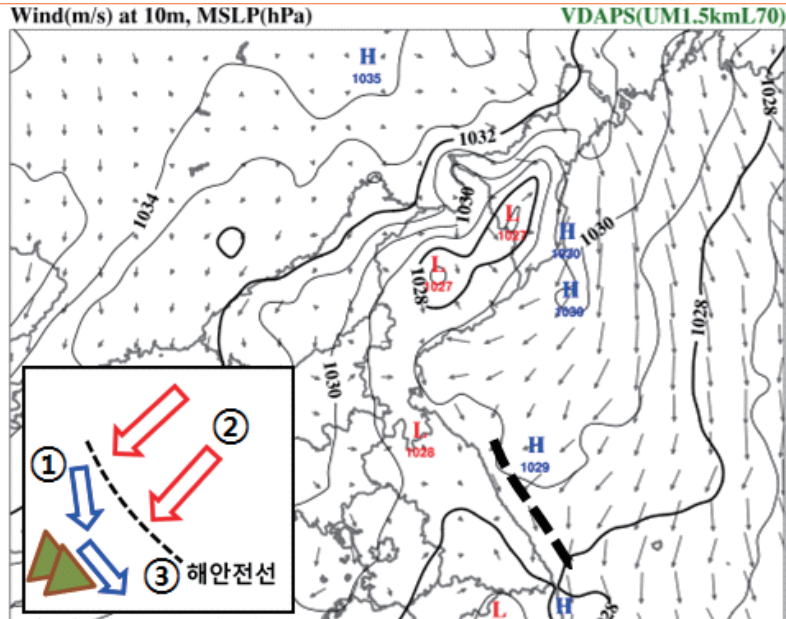
강수분포 모식도

2. 강수메커니즘은?

- **(강수전)** 저기압 후면으로 북쪽의 건조 공기가 해안선을 따라 남하(①) 이 때 동해안 지상 바람은 북북서풍, 개마고원 남동쪽으로 고기압 가장자리를 따라 한기 남하(②)
- **(구름발달)** 해기차에 의해 해상에서 구름 발생 + ① 기류와 ② 기류가 수렴하는 동해안 근처에서 구름대 발달함(해안전선,③)



2월 24일 속초 AWS 시계열

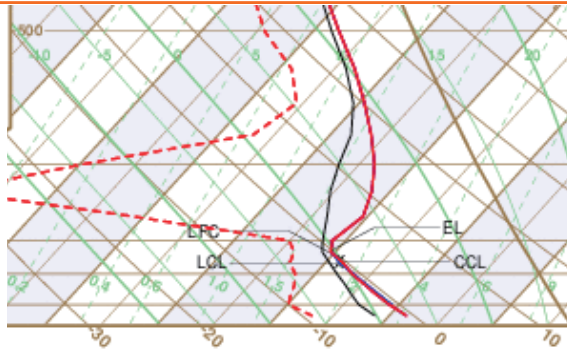


2월 24일 11시 VDAPS 해면기압, 바람, 해안전선 형성과정 모식도

- (강수시) 해안의 북북서풍은 점차 약화되고 기압능이 남하하면서 해상의 발달한 구름대는 동풍(북동에서 동풍으로 시계방향 회전)을 타고 해안과 태백산맥 동쪽사면에 강수를 기록함. 이 때 동해안의 지상 바람은 약한 북풍~동풍
- (강수종료) 고기압이 확장하면서 강한 바람 축이 남하하는 방향으로 강수 구름도 남하하지만 해기차와 풍향 시어도 점점 줄어들어 구름은 강수를 기록할 정도로 발달하지 못함

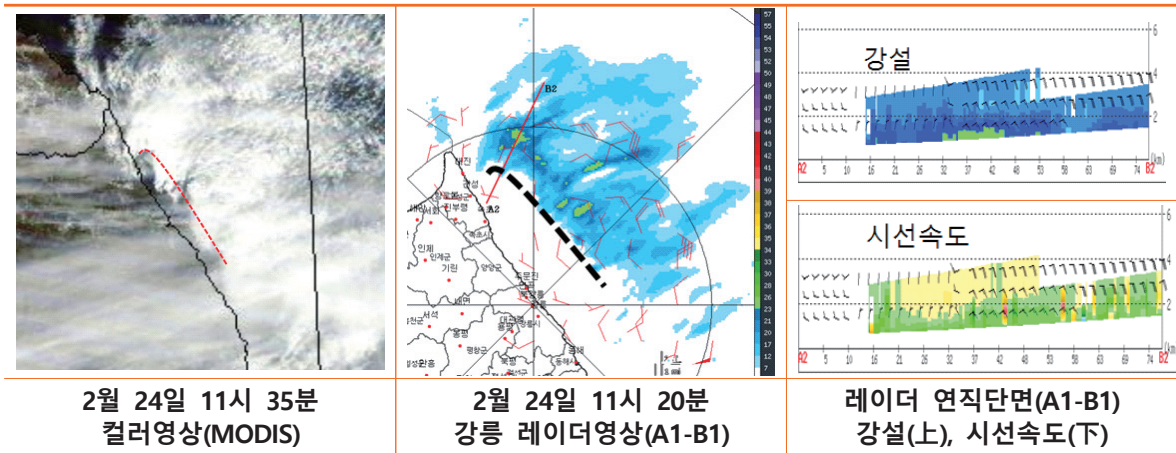
3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

- GDAPS 해면기압 예상장에서 발해만과 중국북동부에 위치한 대륙고기압의 위치는 모의하고 있으나 남쪽 기압골이 버티는 것과 북쪽 고기압의 강도는 과소 모의함
- 속초 예상단열선도의 850hPa부근까지 기온이 건조단열적으로 상승하는 것으로 보아 해기차에 의해 대기가 혼합되면서 발생한 구름은 적외 모의영상에서 모의가 되고 있으나, 해상에서 발생하는 수렴대는 모의하지 못하고 있어 하층은 건조하고 강수는 없는 것으로 모의



- 동해상에서 발달한 구름대의 이동 추이를 파악 했었더라면

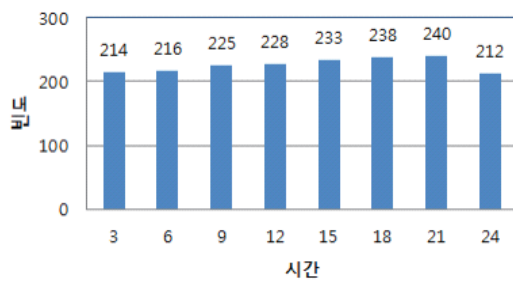
- MODIS RGB 컬러영상에서 해상의 구름이 콤마 형태로 수렴 라인(해안전선)이 형성되어 있음을 확인
- CAPPI 레이더영상에서도 해상의 바람 시어역 부근에서 구름이 발달했음을 볼 수 있음
- 레이더 연직단면에서 눈 구름은 2~3km까지 발달했으며 시선속도에서 2km 이하는 해안가로 접근(연두색은 시선속도<0, 노란색 시선속도>0)하고 그 위층은 멀어지는 것을 확인할 수 있는데, 동풍 바람벡터를 따라 구름대는 해안으로 점차 접근할 것으로 분석할 수 있음
- 24일 15시 해면기압 분석장을 보면 북쪽 고기압은 W형태로 분포하고 있고 기압골은 한반도 중심에 위치해 서풍의 영향은 적을 것으로 판단하여 해상의 구름대가 접근하는 것을 방해하는 요인은 적음



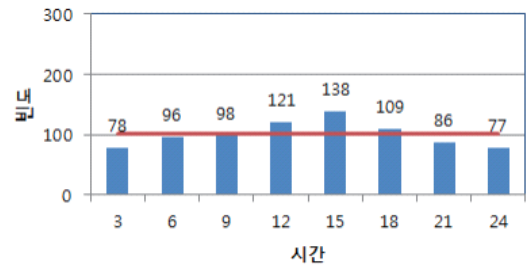
5. 향후 유사유형 시 고려해야 할 것은?

- 겨울철 동해안 육풍의 일주기를 고려했다면

- 지난 30년간(1987년~2016년) 강릉(105)의 3시간 강수빈도를 통계분석 해보면 시간대 별(3시간 간격)로는 비슷하나 북동류가 유입될 때는 주간(9~18시)에 강수빈도가 높고, 야간에는 강수빈도가 낮음을 알 수 있음
- 겨울철 육지는 기온이 낮고 해상은 기온이 높아 여름철과 반대로 밤에는 육풍이 강하고, 낮에는 온도경도가 줄어들어 육풍이 약함
- 특히 강원영동은 해상과 산지가 수십 km 이내에 붙어 있어 육풍이 산곡풍의 일주기와도 결합되어 복합적인 중규모 순환이 발생
 - ⇒ 주간에 육풍이 약화 되면서 해상에서 발생된 눈 구름대가 해안으로 접근하기 용이하므로, 동해안 강수 시 주간에 강수가능성이 높을 수 있음을 유의



30년(1987~2016) 겨울철 강릉(105)지점
3시간 강수 빈도



30년(1987~2016) 겨울철 강릉(105)지점
NW~E 유입시 3시간 강수 빈도

4-2 2018년 3월 4일 사례

저기압 남부지방 통과 시 강원영동지방에 많은 비(눈)이 온 사례

- 태백산맥 동쪽 사면에 한기 축적 시 강원영동지역 강수량 증가 -

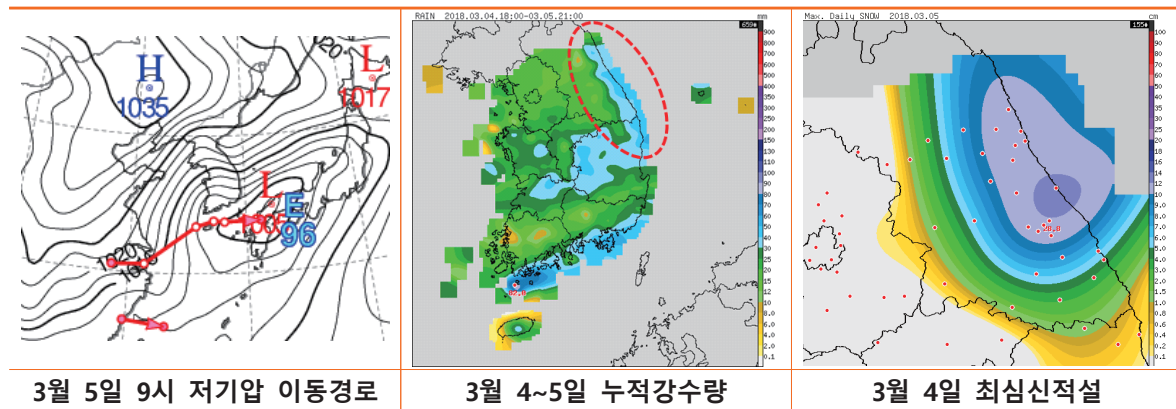
1. 예보와 실황은?

예보(3월 3일 17시 발표)	실황
<ul style="list-style-type: none"> ▶ 예상 강수량 <ul style="list-style-type: none"> - 강원영동, 충청도, 남부지방, 제주도: 20~60mm (제주도산지와 남부 80mm이상) - 서울.경기도, 강원영서, 서해5도: 10~40mm ▶ 예상 적설 <ul style="list-style-type: none"> - 강원영동, 경북북동산지: 5~20cm(강원산지 30cm이상) - 강원영서, 경북북부(산지 제외), 울릉도.독도: 2~7cm - 경기동부, 충북북부: 1~3cm 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 강수량 <ul style="list-style-type: none"> 강릉 50.0 북강릉 41.5 속초 38.0 울진 46.3 진부령 41.5 설악동 46.0 대관령 26.8 삼당령 45.5

최심신적설 (cm)

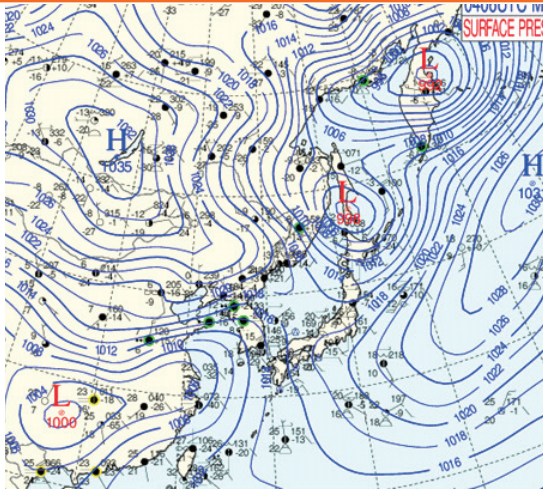
강원산지 진부령 33.0 미시령 28.0 대관령 18.1 설악동 15.4 오색 12.6
 강원동해안 북강릉 8.0 속초 6.4 간성 6.0 현내 6.0 청호 4.6 임계 5.0

- 4일 밤부터 5일 낮까지 강수는 이어졌지만 적설은 5일 00시에서 09시 사이에 집중되었음. 특히 해안가는 9시 이후로 적설이 없었음

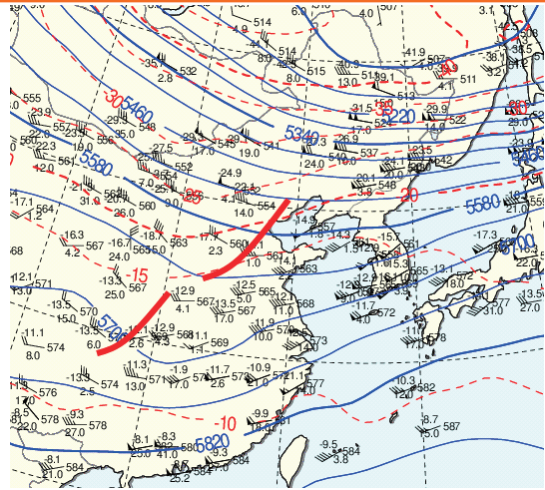


2. 강수메커니즘은?

- **(북고남저)** 일본 동쪽해상에 위치한 고기압과 대륙고기압 사이에서 기압골이 발달. 상층 골의 지원을 받으면서 상해 북동쪽 해상을 거쳐 동중국해를 지나 우리나라 남부지방으로 진출. 한반도는 점차 북고남저형 기압배치 하에서 기압경도 강화
- **(한기축적)** 지상저기압의 북동쪽으로 중국북동지방에서 확장하는 고기압으로부터 한기가 이류. 태백산맥 동쪽 사면에 막히면서 한기가 쌓이기 시작(CAD: Cold Air Damming) 하고 산맥을 타고 기류가 상승하면서 단열냉각효과로 인해 cold pool은 점차 강화
 - 속초, 북강릉 AWS 시계열 자료에서 북풍이 불면서 습도가 높아지고 기온이 떨어지는

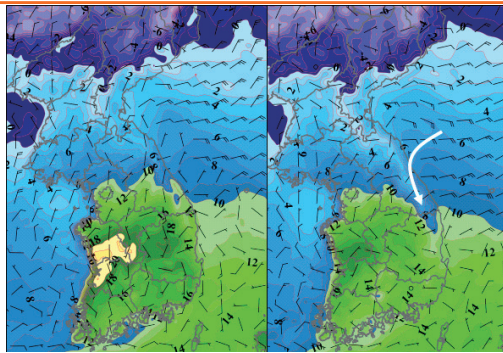


3월 4일 18시 해면기압(2hPa)

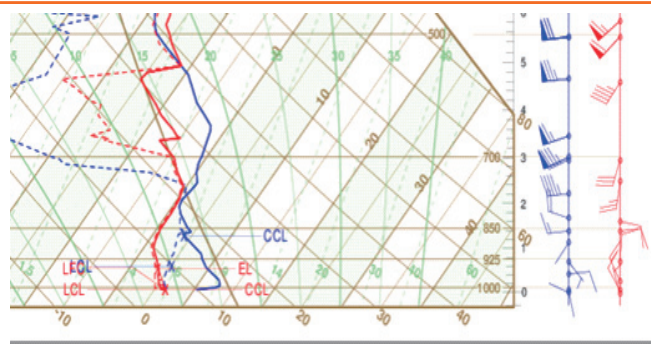


3월 4일 21시 500hPa 일기도

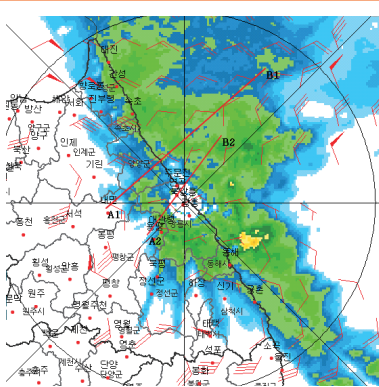
- **(강수시작)** 산맥과 평행한 바람(북북서)과 동해상에서 불어오는 북동류 사이에서 형성된 해풍전선이 하층 지향류(북동류)를 타고 해안으로 밀려오면서 강수가 시작됨
 - 4일 21시 북강릉 단열선도를 보면 925hPa 이하 고도에는 북북서풍이 불고 있고 3km 고도까지는 포화되어 있지만 3~5km 사이에 구름이 없어 하층운과 상층운이 연계되지 않음을 알 수 있음
 - 4일 22시 20분 레이더 영상에서 해상에 구름대가 있는 것을 확인할 수 있음. 높이 5~6km까지 발달한 구름이 분포하고 있으며 시선속도나 강수에코 단면에서 붉은색 파선을 경계로 2km 이하 고도에서 발달한 구름대가 해안으로 접근하고 있음. 강릉 AWS 시계열을 보면 21시 이후로 본격적인 강수가 시작되는 것을 알 수 있음



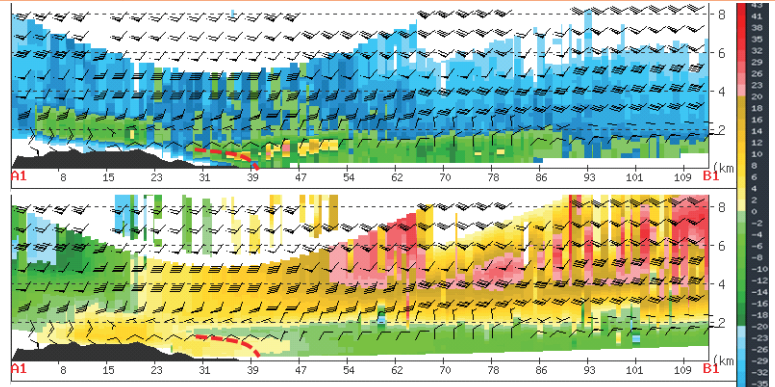
VDAPS 바람,기온 분석장
(좌) 3월 4일 15시, (우) 4일 18시



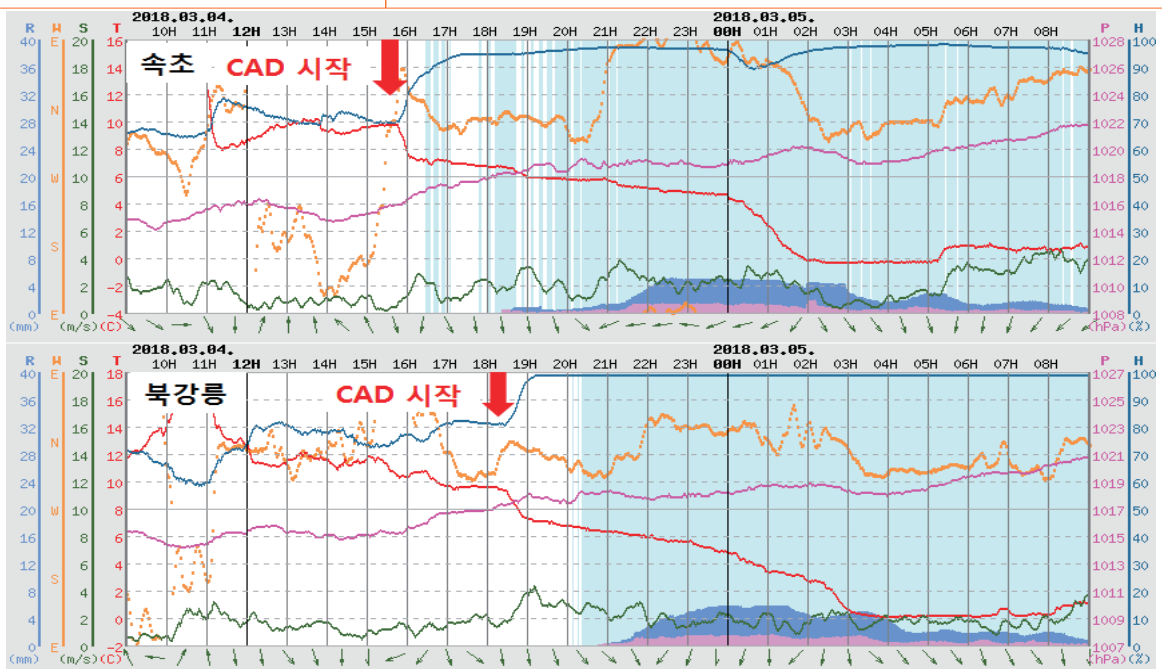
3월 4일 21시 북강릉 단열선도



3월 4일 22시 20분
강릉 레이더영상(A1-B1)



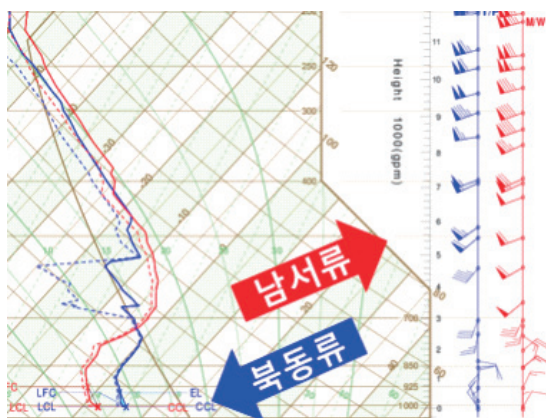
3월 4일 22시 20분
(상)강수예코 단면, (하)시선속도 단면, (좌)시선속도 범례



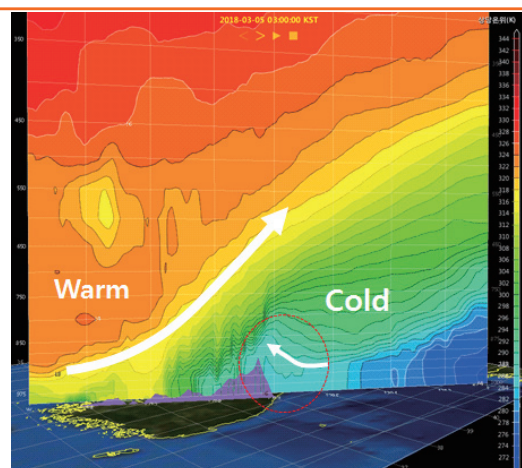
3월 4~5일 AWS 시계열 (상)속초, (하)북강릉

- (강수집중) 남부지방에 위치한 온난벨트를 타고 상승하는 구름대와 해상에서 유입된 저온 다습한 공기가 cold pool을 타고 상승하면서 결합해 강하게 발달함

- 5일 3시 북강릉 단열선도에서 3km를 경계로 6시간 전에 비해 한기이류와 난기 이류가 뚜렷하게 나타나고 있어 CAD가 강할 때 나타나는 전형적인 연직프로파일을 보여주고 있음. SRH도 1024로 매우 높게 나타나 연직 시어에 의한 강한 상승류가 존재함을 알 수 있음
- KLAPS 상당온위 연직단면을 보면 습윤공기가 등온위면을 타고 남부지방에서 북동쪽으로 급격히 상승하고 태백산맥 동쪽 사면에 있는 cold pool위로 북동기류가 상승해 coupling이 일어나는 것을 알 수 있음

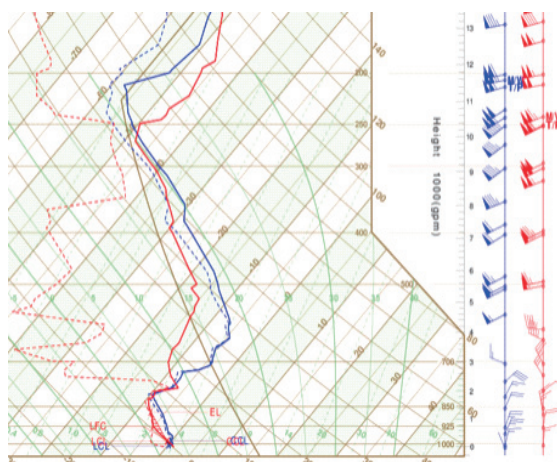


3월 5일 3시(푸른색 선 4일 21시)
북강릉 단열선도

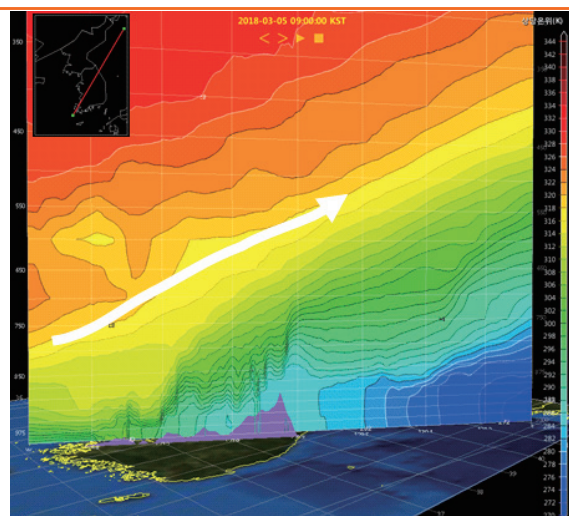


3월 5일 3시 KLAPS 분석장
상당온위 연직단면도

- (강수약화) 저기압 통과 후 한기이류가 약화되면서 cold pool은 점차 해소되고 해기차에 의해 발생한 구름에만 영향을 받기 때문에 강수는 강하지 않음
- 5일 15시 KLAPS 분석장 850hPa 이하 고도에서 해기차에 의해 발생한 구름대(상당온위가 연직으로 일정한 층)가 해안가로 유입되면서 강도는 강하지 않고 강수형태는 비와 눈이 혼재되어 내림



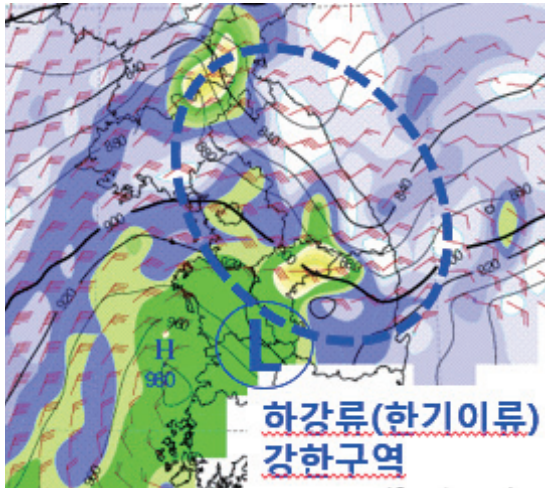
3월 5일 15시(푸른색 선 5일 9시)
북강릉 단열선도



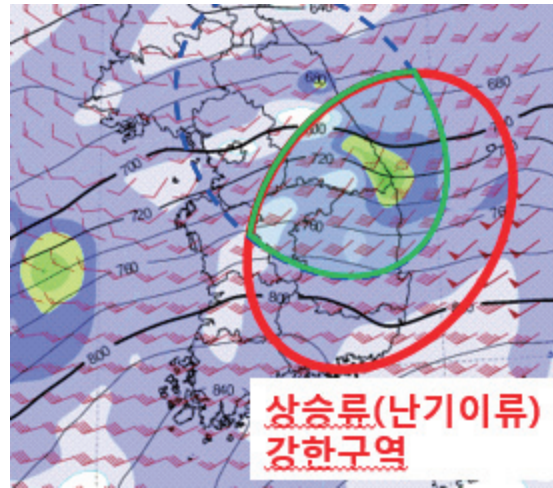
3월 5일 15시 KLAPS 분석장
상당온위 연직단면도

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

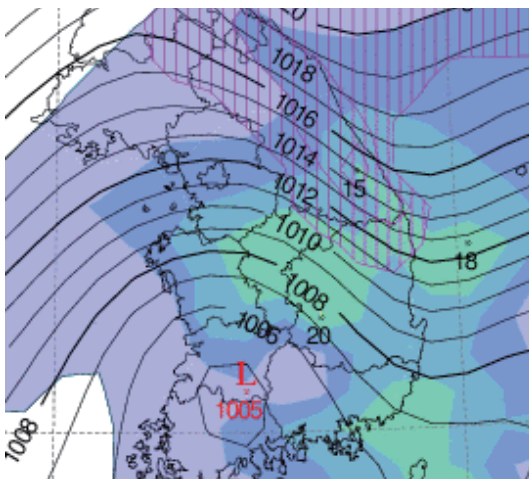
- 285K 등온위면 분석장에서 한기이류가 강한 구역과 300K 등온위면에 나타나는 난기이류가 강한 구역이 중첩되는 지역에 강수가 많이 모의되었고 실험도 강수가 많이 왔음
- 종관규모 운동에서는 비교적 CAD와 관련된 강수가 잘 모의됨



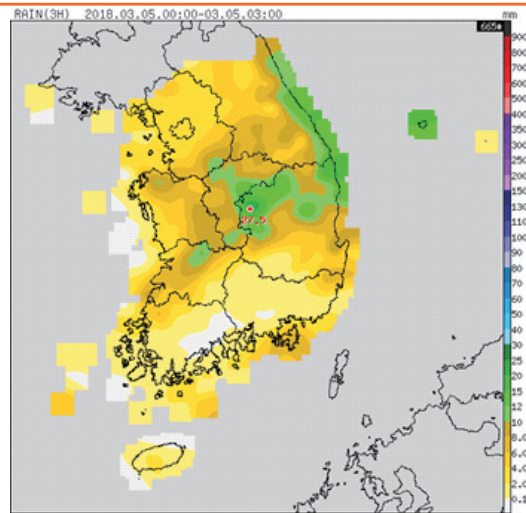
3월 5일 3시 등온위면 285K



3월 5일 3시 등온위면 300K



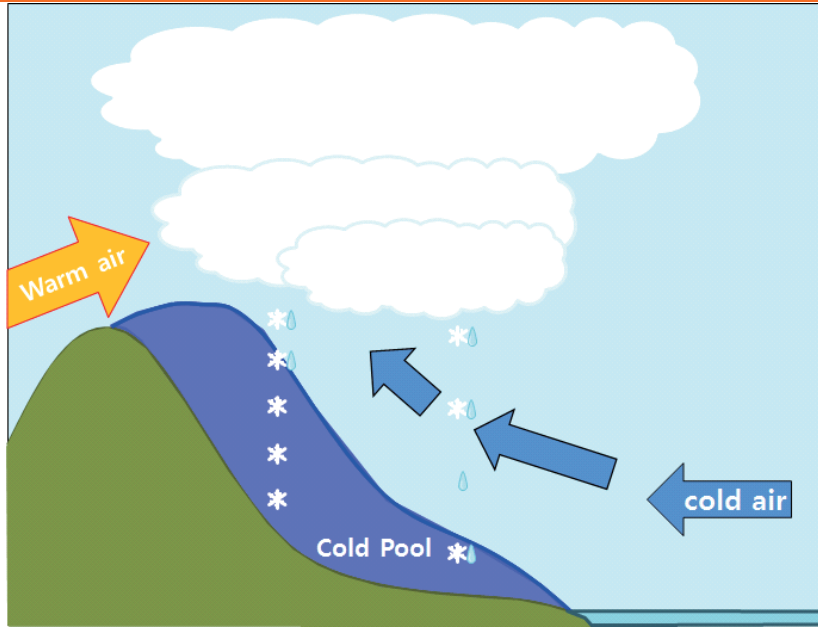
3월 5일 3시 3시간 누적강수량(+18h)



3월 5일 3시 3시간 누적강수량

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

- cold pool의 깊이에 따른 강수형태를 고려했다면
 - 온난다습한 공기가 상승하면서 만들어진 과냉각수적과 빙정이 섞인 강수입자가 태백산맥 동쪽 사면에 떨어지면서 CAD 구역을 통과하기 때문에 강수 형태가 눈과 비로 혼재되어 내림. 고도가 높은 지역(한기 축적이 깊은)에는 강수가 대부분 눈으로 내리지만 고도가 낮은 해안으로 갈수록 눈과 비가 혼재되어 내릴 수 있음



cold pool이 가장 강할 때 구름이 발달과 고도에 따른 강수형태(강수집중)

5. 향후 유사유형 시 고려해야 할 것은?

- 강수 메커니즘 분석을 통해 규모에 맞게 분석하며 수치모델 자료를 적용해야 함
 - 강수 시작 시 중규모 해안전선에서 발생한 구름대에 의해 강수가 내렸고 한기이류가 시작되는 단계이기 때문에 비로 내렸음
 - 강수 집중 시에는 저기압 중심이 남부지방을 지나면서 종관 강제에 의해 발달한 구름들과 cold pool 위로 흐르는 난기 활승에 의한 구름이 결합되면서 강수량이 늘어났음. cold pool을 지나면서 눈으로 올 가능성도 높아짐(seeder-feeder 현상, 종관규모 운동과 결합 시 전구모델이 모의를 잘 함)
 - 강수가 약화 시에는 주로 북동기류에 의한 강수로 기온선은 남하하지만 해상에서 대류 혼합에 의해 발생한 낮은 구름으로 인해 강수 형태가 눈으로 내리기는 어려웠음(국지 모델이 모의를 잘 함)
- ⇒ 종관규모 시스템에 따른 CAD는 정확도가 비교적 높지만 강수 메커니즘에 따라 국지모델과 전구모델을 활용하여 정확도를 높일 수 있고, 규모에 따라 강수의 발달과 형태가 달라 질 수 있음

북동기류에 의해 기온 급감하면서 영동지방에 내린 강수

- 6시간 만에 기온 17°C 하강하면서 산간에 눈, 동해안 비 -

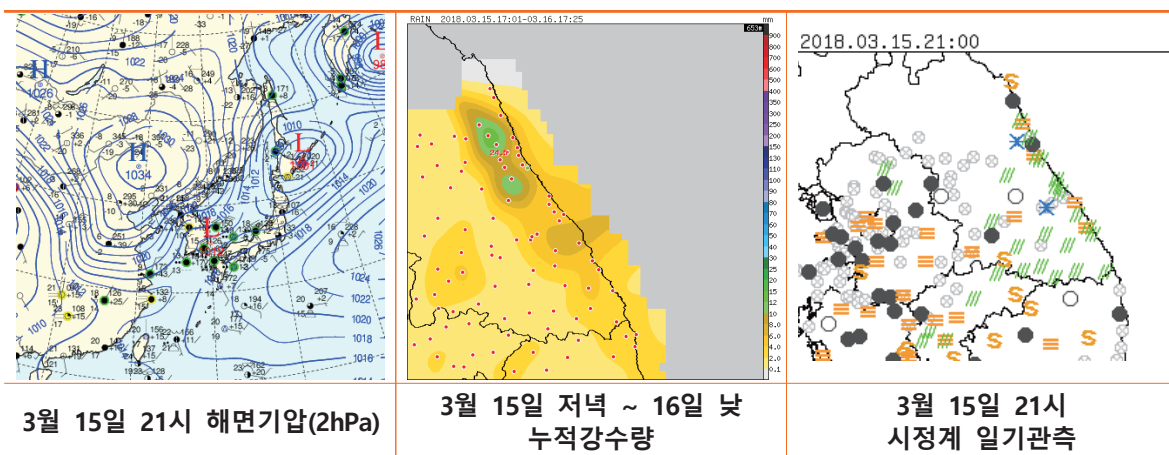
1. 예보와 실황은?

예보(3월 15일 17시 발표)	실황
<ul style="list-style-type: none"> ▶ 예상 강수량 <ul style="list-style-type: none"> - 강원영동: 5~20mm - 경북: 5mm 내외 ▶ 예상 적설 <ul style="list-style-type: none"> - 강원산지: 2~7cm - 강원동해안, 경북북부: 1~3cm 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 강수량 (17시 이후) <ul style="list-style-type: none"> 북강릉 5.5 속초 2.8 울진 3.4 미시령 24.0 진부령 10.0 대관령 5.9 삼당령 5.5 임계 3.5

최심신적설 (cm)

강원산지 미시령 8.0 대관령 7.4 진부령 6.1 스키점프 4.1 용평 3.5 대گیری 3.5 임계 2.5

- 강수량은 예상범위 내로 왔지만, 강수지속시간과 강수형태에서 예보와 달랐음
- 15일 21~16일 3시에 강수가 집중되었으며 산간에는 눈, 해안에는 비로 내림

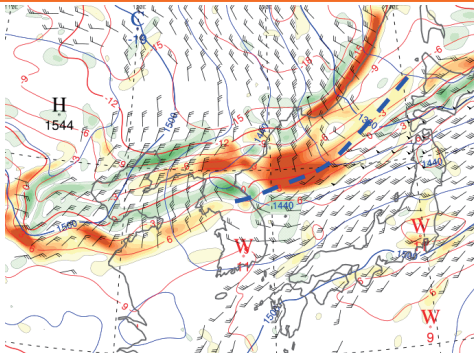


2. 강수메커니즘은?

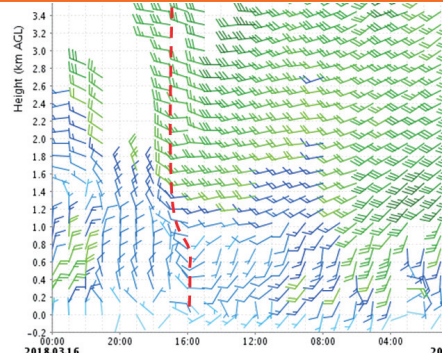
- (강수시작) 해안전선이 유입되기 전 종관강제력(단파골, 한랭전선)에 의해 강수가 시작됨
 - AWS 시계열에서 15일 18시 전후로 속초, 북강릉, 대관령(강수 지속)에 강수가 시작됨을 알 수 있음
 - 15일 파주 수직측풍장치에서 16시 전후로 전선이 통과하는 것을 볼 수 있고, 18시 LDAPS 850hPa 전선강도 자료에서 한반도에서 홋카이도까지 길게 늘어진 한랭전선이 통과하는 것을 확인할 수 있음
 - 레이더 영상(16시 30분, 18시 30분)을 통해 전선과 관련된 강수 구름이 동남동진하는 것을 확인함으로써 강원영동의 강수는 단파골이 통과하면서 전선상에서 시작된 것임

을 알 수 있음

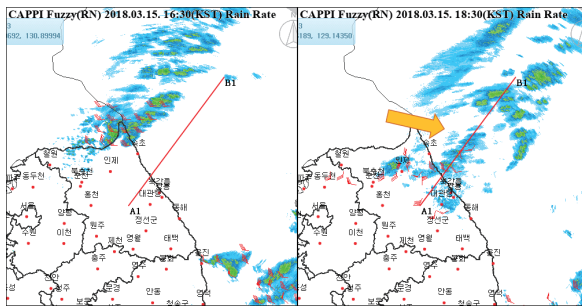
- **(한기축적)** 낮 동안 지속되었던 남서류가 급격히 북동기류로 바뀌면서 태백산맥의 동쪽 사면으로 강한 한기가 이루어졌고, 동시에 한랭전선면에서 강수가 내리기 시작하면서 강수입자가 증발하고 빙정이 녹는 비단열 냉각에 의해 CAD(Cold Air Damming, 한기축적)가 일어남
 - 속초, 북강릉, AWS 시계열 자료에서 서풍 계열의 바람이 불다가 북풍으로 풍향이 바뀌면서 기온이 급격히 떨어지고 습도가 높아지는 시각부터 CAD가 시작되며 온도차에 의해 풍속이 증가함을 알 수 있음, 대관령은 고도가 높아 마찰력에 의한 풍향의 변화가 적어 18시 이후에 동풍으로 바뀜



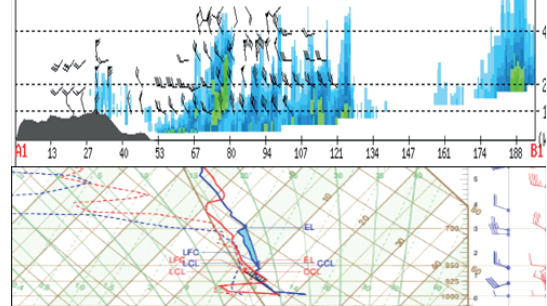
3월 15일 18시 850hPa 전선, 바람,기온 예상장



3월 15일 파주 수직측풍장치

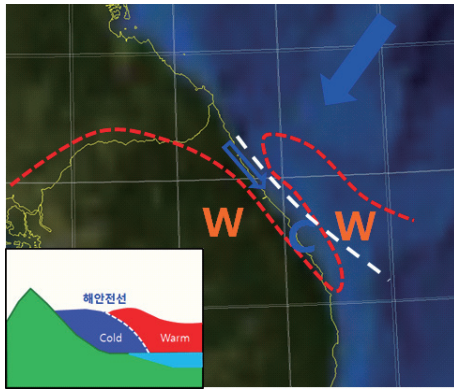


3월 15일 레이더 CAPPI 합성영상
(좌)16시 30분, (우)18시 30분

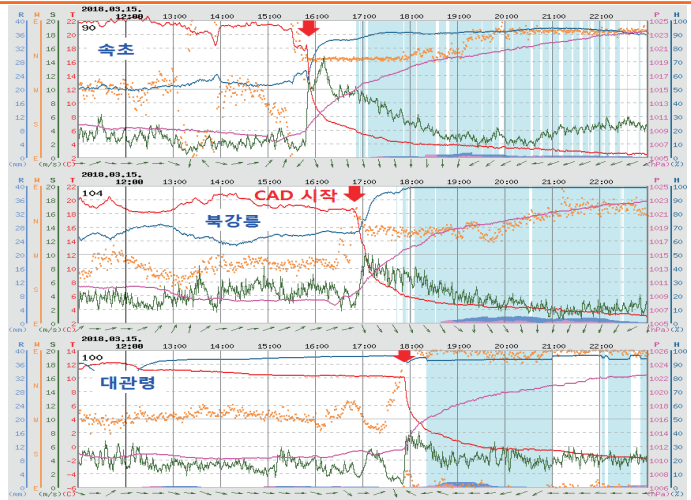


(상)3월 15일 18시 30분 A1-B1 단면도,
(하)3월 15일 18시 강릉시 보광리 단열선도

- **(해안전선 강화)** 태백산맥 동쪽 사면에 축적된 한기와 해상의 온난한 공기 사이에서 해안전선이 형성되며, 이는 지상이나 925hPa 온도능 서쪽에 위치함

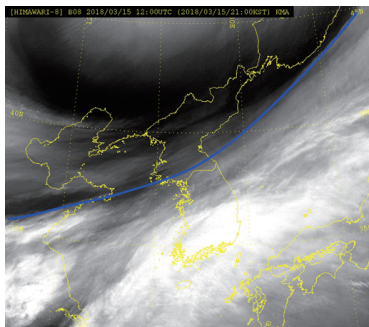


동해안 CAD 형성시 해안전선
평면 모식도와 단면도(하)

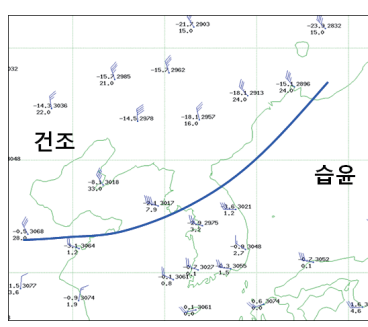


3월 15일 AWS 시계열
(상)속초, (중)북강릉, (하)대관령

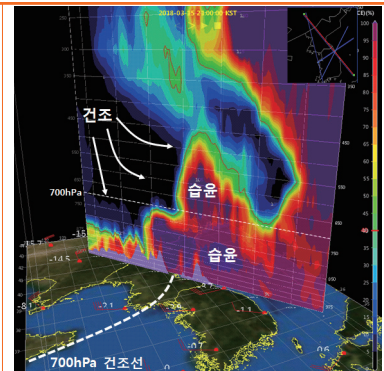
- (강수집중) 종관적인 강제(중층 단파굴, 건조역 침강)력이 지원하고 해안전선이 접안하면서 구름대가 발달, 해안>산간을 순서로 많은 강수량을 기록함
 - 15일 21시 수증기영상과 GTS 700hPa 분석장에서의 건조라인과 LDAPS 상대습도 연직단면의 건조역이 중국북동부에서 강원영동 쪽으로 남동진하면서 전면의 상승을 지원하고 있음
 - LDAPS 상당온위를 중첩한 연직 흐름과 상대습도 80%이상 연직단면 자료에서 해안전선이 접안하여 해안 근처에서 상승 흐름이 강했고, cold pool 위를 온난한 공기가 상승하면서 상층과 이어져 풍상측 산맥에서 많은 강수를 기록함. AWS 60분 누적 분포도에서도 해안에서 강했던 강수가 점차 산맥으로 이동하는 것을 볼 수 있음



3월 15일 21시 수증기영상
(히마와리 CH8)

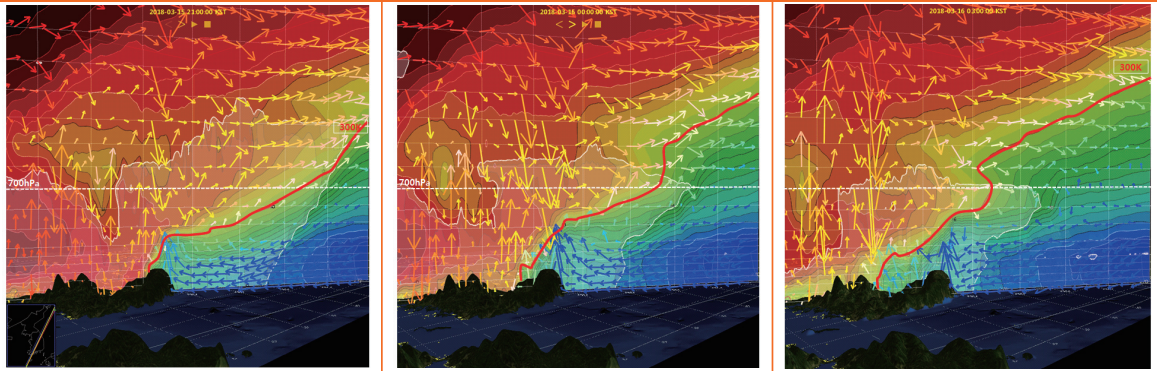


3월 15일 GTS 700hPa 분석장



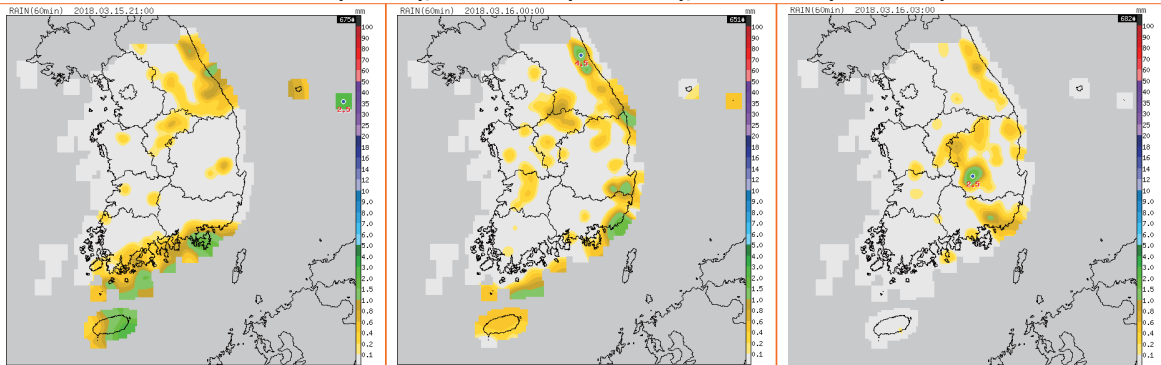
3월 15일 21시 LDAPS
상대습도 연직단면, GTS
700hPa

- (강수약화) 상층의 지원이 약화되고 건조역이 오히려 강수를 억제하는 역할을 하게 되면서 한기 이류가 점차 약해지고 CAD가 해소, 강수는 약화됨
 - 16일 03시 LDAPS 상당온위를 중첩한 연직흐름과 상대습도 80%이상 연직단면 자료에서 상당온위선이 산 정상과 나란하게 나타나고 해안가에는 대류 혼합으로 인해 상당온위선이 2km까지 일정. cold pool은 약화되고 있음



LDAPS 분석장/예상장 상대습도 연직단면(80%이상), 연직 흐름도(상당온위 중첩), 상당온위 연직단면

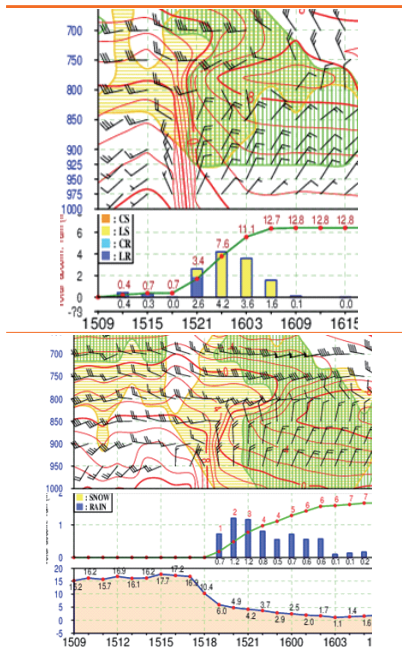
15일 21시(분석장), 16일 00시(+3예상장), 16일 03시(+6예상장)



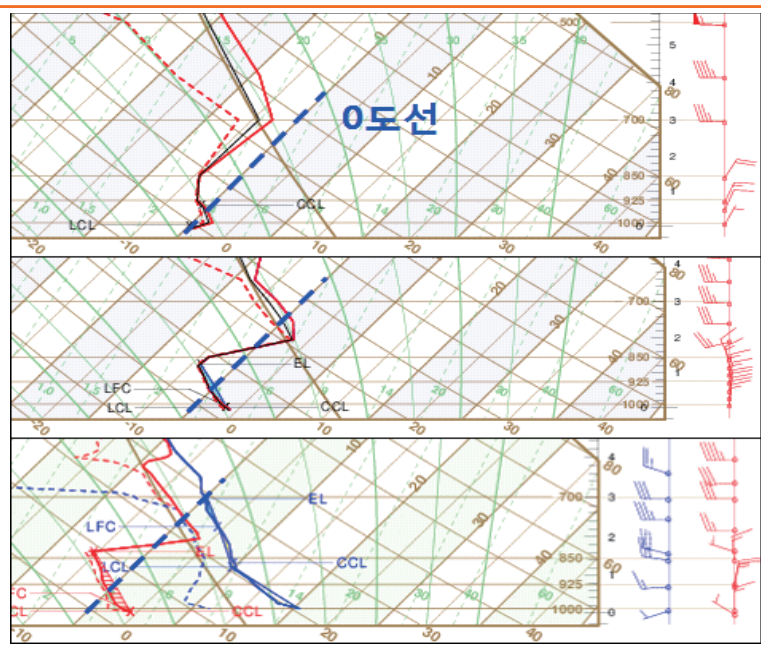
AWS 60분 누적강수 분포도 15일 21시, 16일 00시, 16일 03시

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

- 북강릉 연직시계열에서 풍향이 북동풍으로 바뀌면서 기온이 급격히 떨어지고 강수가 시작되는 것으로 모의하고 있음
- GDAPS에서는 21시부터 강수형태가 비에서 눈으로 바뀌는 것으로 모의되고 있지만 LDAPS는 계속 비를 모의하고 있음
- 15일 9시에 예상한 21시 북강릉 단열선도를 보면 GDAPS에 비해 LDAPS가 2km 부근과 지상 부근에 기온이 영상으로 나타나는 온도 프로파일과 바람을 잘 모의하고 있음



북강릉 연직시계열(15일 9시 발표)
(상)GDAPS, (하)LDAPS



3월 15일 21시 북강릉 예상/실황 단열선도(15일 9시 발표)
(상)GDAPS, (중)LDAPS, (하)실황

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

● 극단적인 역전층을 뚫을 수 있을까

- 중층의 한기지원이 없는 상태에서 850hPa 이하 고도에서 급격히 한기가 이루어지면서 1.5km~3km 까지는 극단적인 역전층을 이루고 있음
- 강수량이 늘어나기 위해서는 해기차에 의한 구름대가 1.5km 이상으로 발달하거나 상층 지원이 강해야하나 16일 00시를 기준으로 전 시간에는 상층 지원이 강했고 이후에는 해기차(850hPa 해기차)가 커지긴 했지만 겨울철만큼 크지 않은 상황에서 대류가 강하지 않아 주 강수는 16일 00시에 왔음

5. 향후 유사유형 시 고려해야 할 것은?

● 해안과 산악의 강수 메커니즘에 따른 강수형태 판별

- 해안의 강수메커니즘은 해안 전선이 접안하면서 내린 강수와 상층의 지원이 결합되어 발생 됨. 따라서 강수 집중 시간일 때는 강수량이 많지 않고 해안에서 불어오는 공기의 영향을 받는 구간이 존재하므로 눈보다는 비가 내릴 가능성이 높음
- 산악에서의 강수메커니즘은 CAD 영역 위쪽으로 해상에서 유입되는 비교적 온난한 공기의 상승과 상층의 지원이 결합되어 발생됨. 따라서 해풍의 영향을 적게 받고 공기의 상승으로 인해 단열냉각효과가 발생하고 떨어지는 강수입자가 cold pool을 통과하므로 강수형태는 눈으로 내릴 가능성이 높음

동해안형 강수

- 남쪽골통과 후 바로 cP 확장될 때 동해안은 대설 주의-

1. 예보는 어떻게 발표되었나? → 예보와 분석보다 적설이 많았던 사례

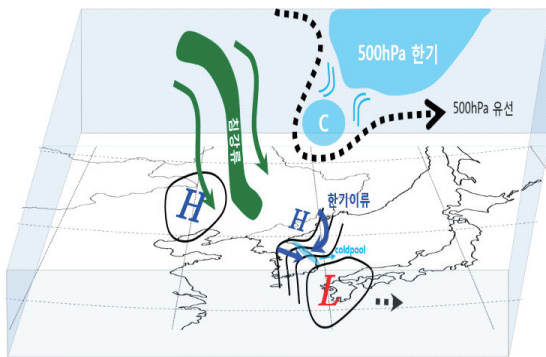
1월 30일 17시 예보	실황
<ul style="list-style-type: none"> - 강원영동,경북: 5~10mm(3~8cm) - 강원영서남부: 5mm 미만(1cm내외) - 경북북부내륙: 5mm 미만(1~5cm) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 적설 - 강원동해안 5~20cm, 경북 1cm미만 ▶ 강수량 5~20mm, 경북 5mm미만 - 주문진 17.8, 양양 17.4, 북강릉 17.1, 설악동 9.2, 동해 4.1, 삼척 6.8, 미시령 11.3, 진부령 2.1, 금강송 0.2

2. 쟁점사항은?

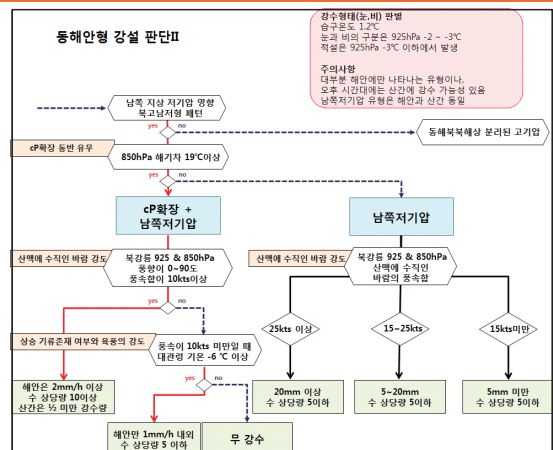
- 쟁점1) 강수메커니즘은 무엇인가?
- 쟁점2) 강수량은 왜 많이 내렸을까?
- 쟁점3) 강수 집중 구역은 해안인가 산간인가?

3. 주요 분석내용

- 쟁점1) 강수 메커니즘은 무엇인가?



강수메커니즘 모식도



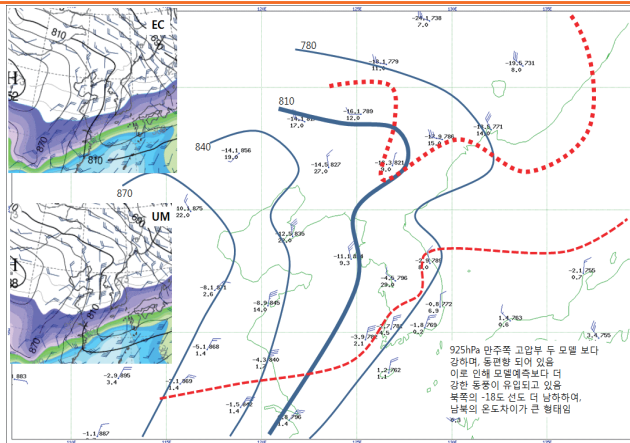
동해안형 강수II 판단 흐름도

- 상층의 한기 축은 만주에서 동쪽으로 빠져 있고 중국북동부에서 동해안으로는 상층 침강류에 의해 하층 고압부가 발달할 때,
- 동시에 상해에서 규슈지방으로 저기압이 통과하면 우리나라는 북고남저형(또는 북서고 남동저형)의 기압배치가 됨

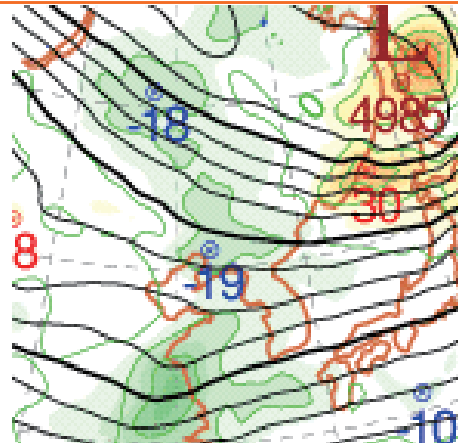
- 동해안은 기압경도력이 강화되어 북동류에 의해 한기이류가 강화됨
- 저기압의 영향을 강하게 받을 때는 850hPa까지 북동기류가 유입되면서 산맥에 수직으로 부는 바람의 강도에 따라 많은 강수량 기록될 수 있음
- 바람이 약할 때에도 925hPa 이하로 한기이류가 나타나지만 925~850hPa은 남쪽 저기압의 영향으로 북동에서 남동풍으로 veering 일어나면서 한기 위로 난기가 활승하여 강수가 나타날 수 있음

● **쟁점2) 강수량은 왜 많이 내렸을까? (부분적중)**

- 1월 31일 09시 북반구 500hPa 고도증분에서 24시간 전 모델이 예상한 것보다 중국 북동부지역으로 고도장이 하강하였음
- 함경산맥 북쪽으로 쏟아지는 중상층 침강류가 예상보다 강해 하층(925hPa)의 고기압이 모델보다 강하게 발달하였음



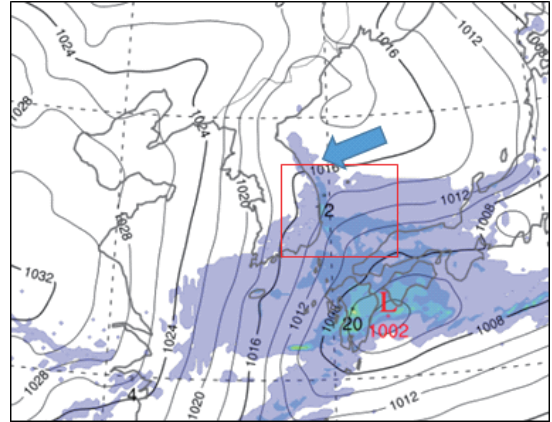
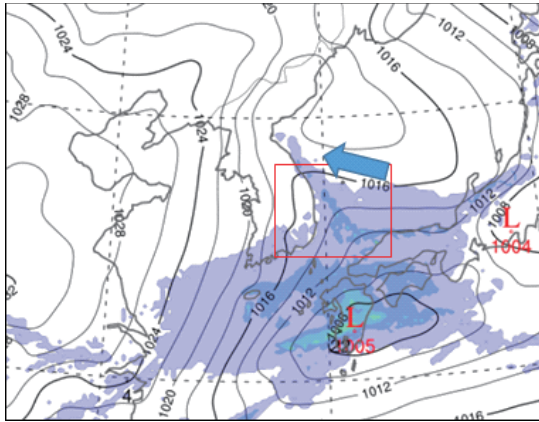
1월 31일 09시 925hPa GTS 묘화,
GDAPS와 ECMWF 925hPa 예상



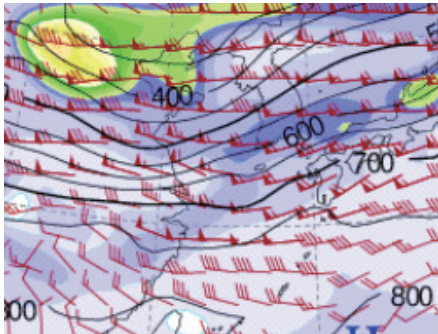
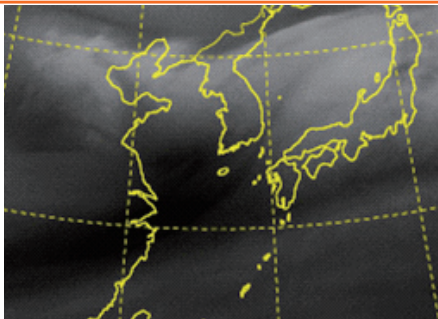
1월 31일 09시 500hPa 고도증분

▶ **북고남저형일때는 남쪽저기압의 발달도 고려되어야...**

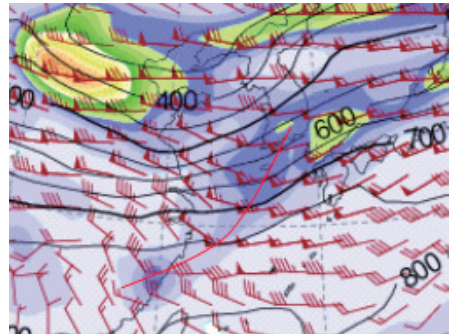
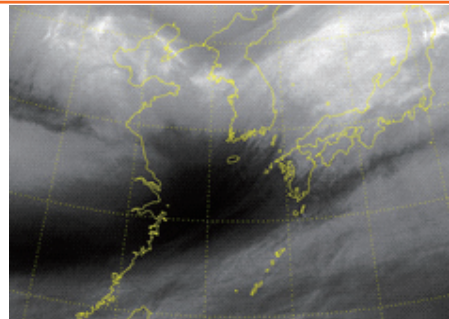
- 북고남저형의 유형에서는 남쪽골의 발달과 위치에 따라 동해안으로 남하하는 한기의 강도와 산맥에 수직되어 부는 바람의 방향이 결정됨
- 31일 15시 수증기영상에서 제주도 남쪽으로 암역 라인이 모델에 비해 뚜렷이 나타남
- 300K 등온위면 분석장에서 상해 동쪽으로 침강류가 강화되면서 골이 깊어지고 양의 잠재와도가 증가해(중상층의 저기압성 회전 증가) 지상 저기압 발달을 지원함
- 남쪽 저기압이 예상보다 발달(1005hPa=>1002hPa)하고 북상함에 따라 남북으로 기압경도력이 강화되어 북동기류는 더 강하게 유입됨



1월 31일 18시 LDAPS 해면기압, 누적강수 예상장(+33h/+03h)

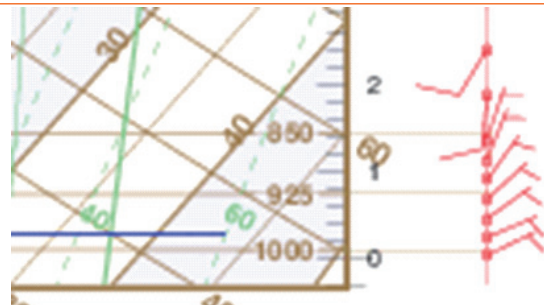
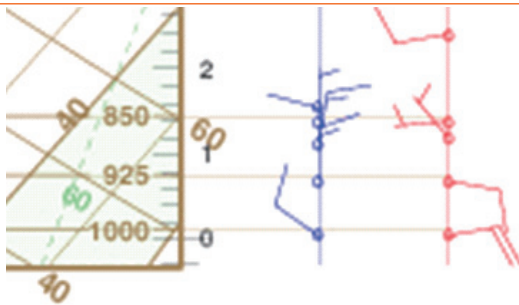


1월 31일 15시 GDAPS 수증기 구름모의영상과
등온위면 300K 예상장(+30h)



1월 31일 15시 수증기영상과
등온위면 300K 분석장(+00h)

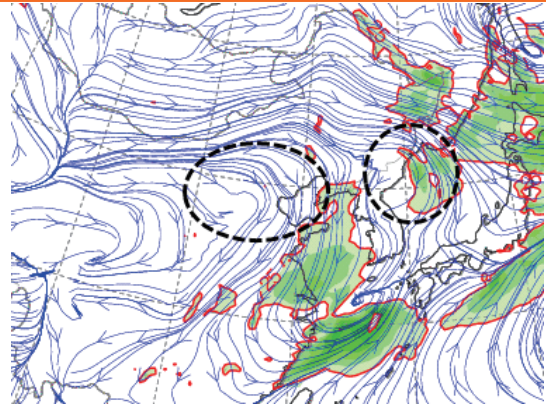
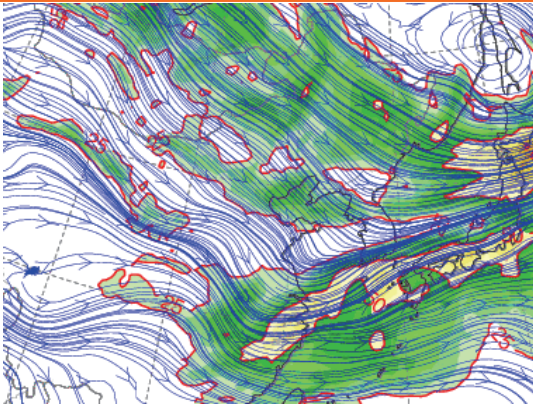
- 실황에서 속초 고층자료 1000hPa 바람의 풍속이 20kts로 모델보다 10kts 이상 강하게 나타났음



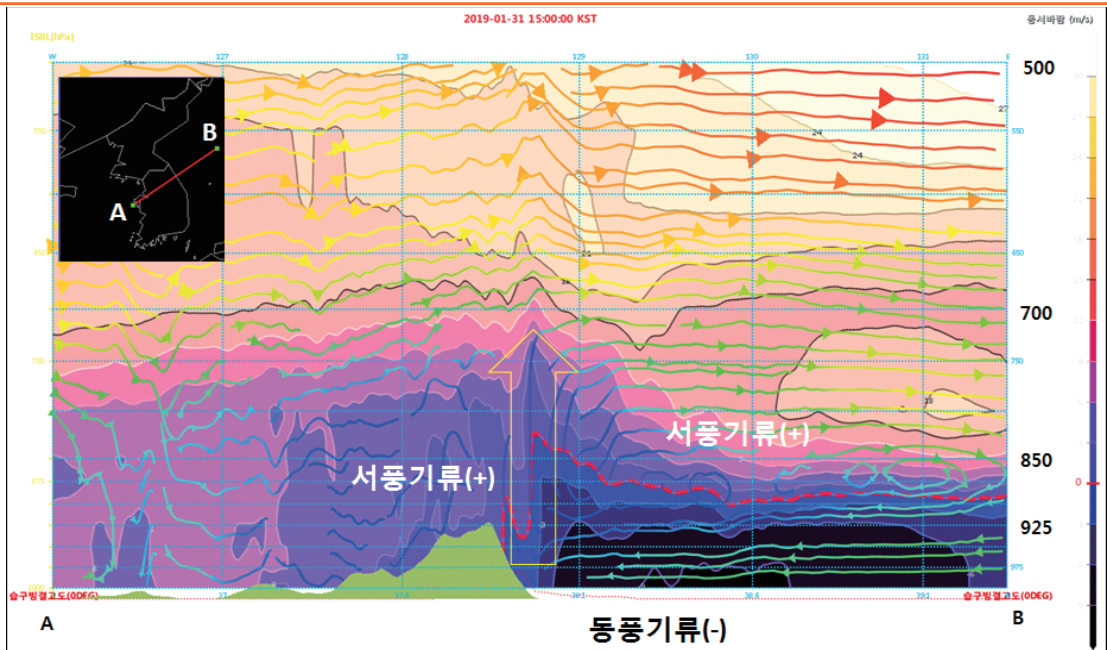
1월 31일 12시 속초 단열선도(모바일관측) / 속초 예상단열선도 (+3hr)

● **쟁점3)** 강수 집중 구역은 해안인가 산간인가?

- cP 확장할 경우 상층의 침강류에 의해 하층 고압부가 발달할 때는 강한 침강류의 위치에 따라 하층 고압부 발달 경로가 달라짐
- 700hPa 북서풍의 강풍대가 있는 곳의 하층인 발해만 서쪽과 개마고원 북동쪽으로 하층 고압부 형성되면서 강한 북풍기류가 동해안과 서해안으로 남하함
- 지상 기압계는 P형태로 수렴역이 해안에 형성되는 해안형 강수 형태가 나타남
- 남쪽저기압으로 인해 북서류와 북동기류가 만나는 골이 깊어지면서 수렴지역 중심으로 강수가 강하게 나타남



1월 31일 09시 700hPa과 925hPa 분석장



1월 31일 15시 동서바람, 동서/남북바람 연직흐름도 연직단면 분석장(+00h)

- 연직단면에서 빨간색 점선을 기준으로 검정색 계열의 동풍기류와 보라색 계열의 서풍기류가 동해안에서 수렴하면서 산악지역보다 해안(양양,북강릉,주문진)에 강수가 더 강했음

동해안형 강수

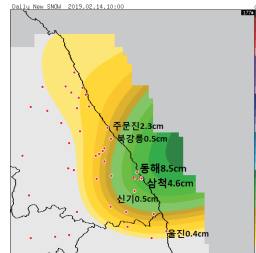
-단순한 cP 확장형의 경우 강수시간과 육풍 강도가 중요-

1. 예보는 어떻게 발표 되었나? → 예보와 분석보다 적설이 적었던 사례

2월 13일 17시 예보

- ▶ 강수량
 - 강원동해안과 산지: 5~10mm
 - 경북북동산지, 경북북부동해안 5mm 미만
- ▶ 적설
 - 강원동해안과 산지: 5~10cm 많은곳 15cm이상
 - 경북북동산지, 경북북부동해안 1~5cm

14일 실황



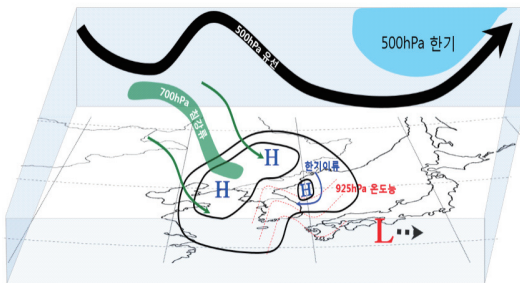
- ▶ 적설
 - 동해 8.5cm
 - 삼척 4.6cm
 - 주문진 2.3cm
 - 북강릉 0.5cm
 - 울진 0.4cm

2. 쟁점사항은?

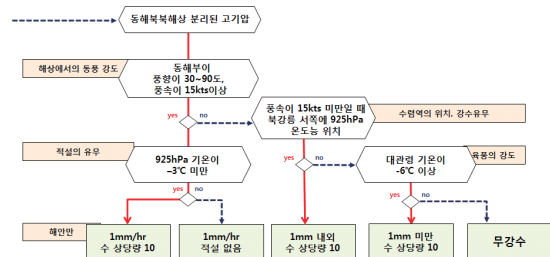
- 쟁점1) 강수 메커니즘은 무엇인가?
- 쟁점2) 수렴대는 어디에 형성될까?

3. 주요 분석내용

- 쟁점1) 강수 메커니즘은 무엇인가?



강수 메커니즘 모식도(단순 고기압 확장형)

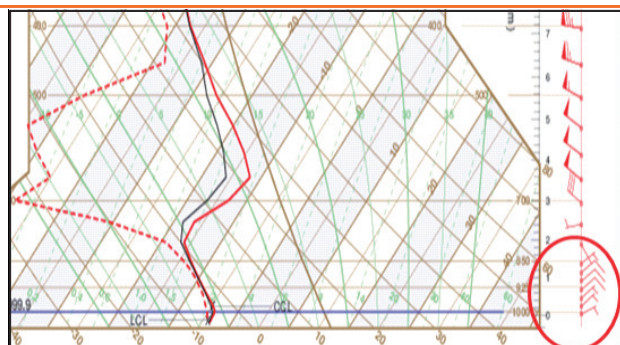


동해안형 강수Ⅲ 판단 흐름도

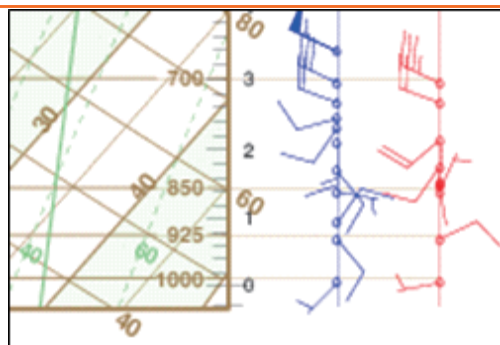
- 상층의 한기 축은 동쪽으로 빠져 있고, 남쪽 저기압도 빠져나간 후 우리나라 북서쪽에서 고압부가 확장될 때,
- 상층 기압골 후면으로 침강류에 의해 고압부의 강도가 결정되나, 남쪽에 저기압이 없어서 단순히 cP 확장만으로는 북동기류가 강하지 않음
- 주로 해안에서의 수렴역에서 강수가 내리고 산간까지 많은 강수가 내리기 어려움
- 북동기류가 약할 때에는 강수 시점에 따라 내륙에서 산풍과 결합된 육풍이 불어 강수가 해안에 불지 못하는 경우가 있음
- 북동기류의 강도와 육풍의 강도에 따른 수렴대 위치 분석이 중요

● **쟁점2) 수렴대는 어디에 형성될까?**

- 2월 14일 06시 북강릉 예상단열선도에서 하층의 850hPa까지 북동기류가 유입되는 것으로 예상되었고, 풍향은 60도로 태백산맥에 수직하게 바람이 불어 수렴이 형성되어 내륙으로 유입될 것으로 분석함. 기온도 낮아 수상당량비도 적지 않을 것으로 판단하여 적설이 많을 것으로 예상함
- 실제로 1000hPa에서는 서풍이 관측되었고 925hPa 바람도 예상보다 시계방향으로 돌았음



2월 14일 06시 GDAPS 북강릉 예상단열선도(+21h)

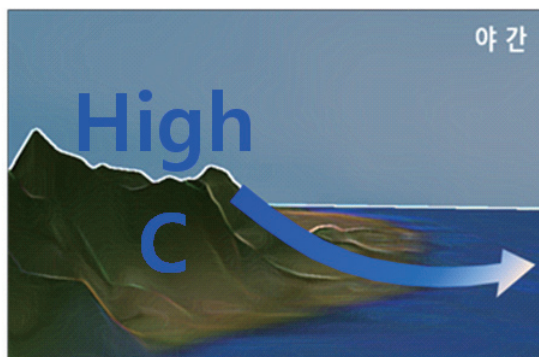
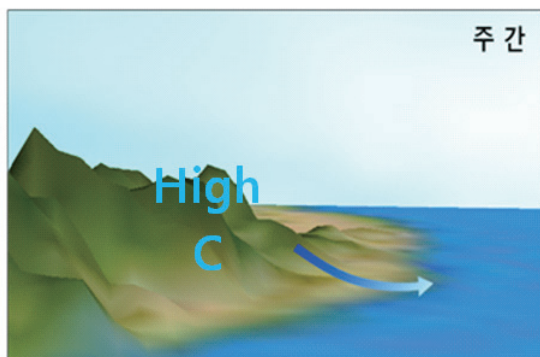


2월 14일 09시 북강릉 단열선도

4. 무엇을 더 고려했어야 했나?

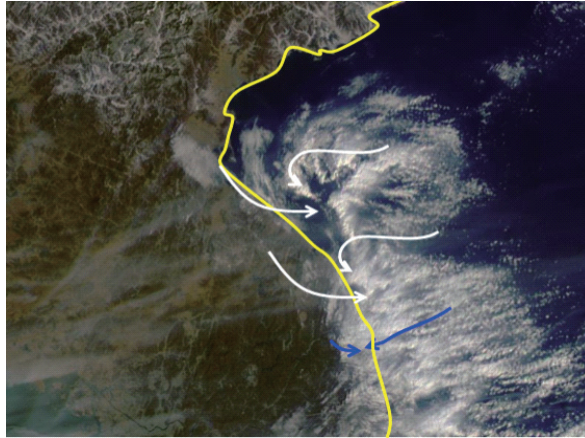
● **내륙에 기온이 많이 떨어질 때는 육풍의 강도를 고려해야 함**

- 단순히 고기압 확장형의 경우 한반도는 고기압권에서 한기이류와 복사냉각에 의한 기온하강이 크며, 특히 새벽시간의 경우에는 산풍과 육풍이 더해져 비교적 강한 서풍류의 바람(태백산맥에서 해안으로 불어나가는 바람)이 지상부근에서 해상으로 불어 나감



겨울철 강원영동 육풍의 일변화

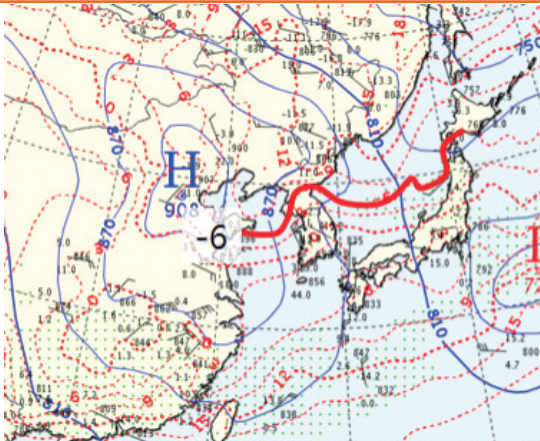
- 14일 10시 천리안 고시(GOCI)영상에서 원산만과 강릉 앞바다에서 저기압성으로 구름이 수렴하고, 남쪽으로는 구름이 내륙으로 유입되어 눈이 내리는 것을 확인할 수 있음
- 상대적으로 기온하강이 큰 북쪽산맥에서는 해상으로 불어나가는 바람이 더 강해 동풍류와의 수렴대가 내륙으로 유입되지 못하지만,
- 남쪽(동해 부근)은 그 반대로 북동기류가 북쪽보다 약간 강하고 육풍은 더 약해 수렴대가 해안으로 유입될 수 있어 적설이 발생함



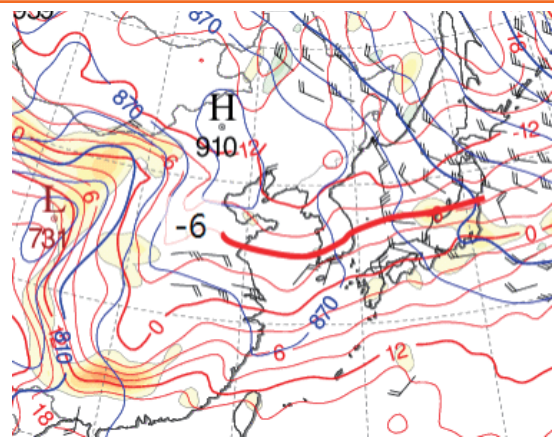
2월 14일 10시 천리안 GOCI 영상

● 유사사례는 육풍이 강하지 않았음

- 2009년 3월 1~2일 사례는 이번 사례와 마찬가지로 단순히 고기압이 확장하면서 동해상으로 북동기류가 유입된 사례임
- 해수면기온은 크게 차이 나지 않는 상황에서 대관령(내륙)의 기온이 -2.5 도로 이번보다 10 도가량 높았고, 동서 간에 기온차이가 크지 않아 해안에서 북동기류가 그대로 유입됨
- 유사사례에서는 북동기류가 내륙까지 유입되면서 하층수렴으로 인해 강수대가 발달



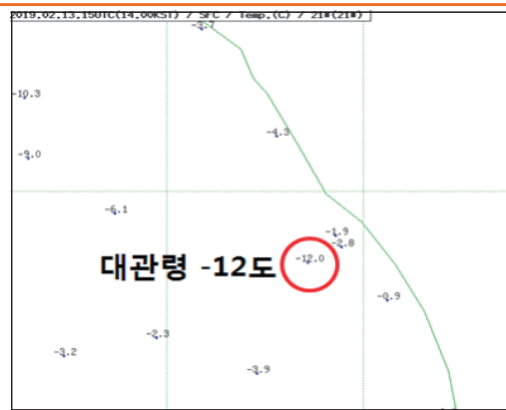
2009년 3월 1일 21시 925hPa 분석일기도



2019년 2월 13일 21시 925hPa 분석장(+0h)



2009년 3월 2일 00시 지상기온



2019년 2월 14일 00시 지상기온



2009년 3월 2일 00시 지상바람

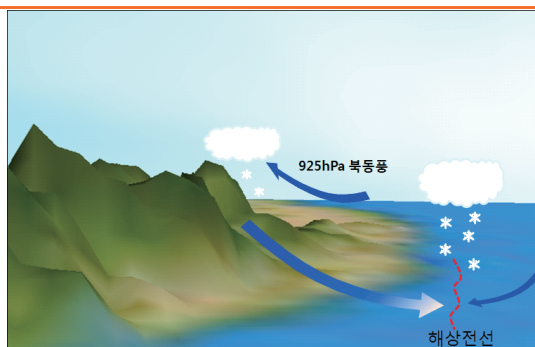


2019년 2월 14일 00시 지상바람

- 하층 수렴대가 유입되지 않은 상황에서 925hPa 북동기류 유입은 약한 강수만
 - 14일 새벽에는 육풍이 강해 수렴대가 해상에서만 머물렀고, 낮이 되면서 육풍이 약화되었으나 약한 수렴대는 여전히 해안가에 위치함. 고기압이 떨어져 나가면서 925hPa 고도에서 동풍이 불기 시작할 때 태백산맥의 풍상측에 구름이 약하게 발달하면서 적설이 기록됨



북동기류가 약하고 육풍이 강할 때 해안에 불지 못하는 수렴대



하층 수렴대는 유입되지 못할 때 925hPa 이상 고도에서 북동기류가 유입될 때

5. 습구온도를 활용한 강수형태판별

제주도 강수 눈비 판별 오차에 따른 대설

- 상층 기압골의 빠른 이동을 고려했다면 -

1. 예보와 실황은?

예보(2월 7일 17시 발표)	실황
<ul style="list-style-type: none"> ▶ 예상 강수량 <ul style="list-style-type: none"> - 전남해안, 제주도: 5mm 미만 ▶ 예상 적설 <ul style="list-style-type: none"> - 전남해안, 제주도산지: 1~5cm - 제주도(산지 제외): 1cm 내외 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 서해남부해상에서 연직으로 4km까지 발달한 강수대가 남동진하면서 전남해안과 제주도에 유입되어 새벽부터 오전까지 강수를 내림

최심신적설 현황(cm)

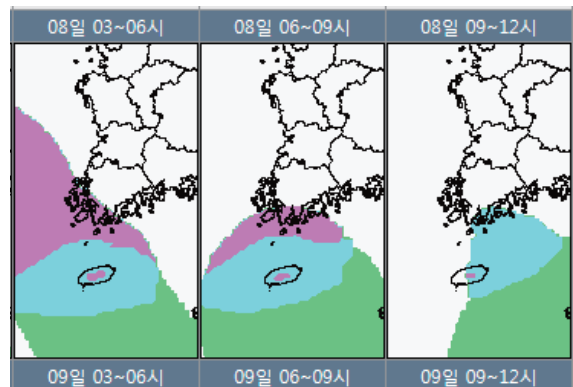
전남 흑산도 1.0

제주 유수암 11.2 제주 5.4 서귀포 5.0 아라 4.3

- 대설주의보: 제주도산지, 제주도남부, 제주도북부(2월 8일 7시 30분 발표/발효) 제주도 동부, 제주도서부(2월 8일 8시 발표/발효)
- 강수시종 시간은 잘 예보되었음, 산지를 제외한 제주도의 강수형태를 비/눈으로 예상 하였으나 눈으로 내리면서 예상 적설보다 많은 적설이 발생함

일.시:분	날씨						기온		
	현재일기	ww	시정 km	전 운량 1/10	중하 운량 1/10	운형	현재 기온 ℃	노점 온도 ℃	체감 온도 ℃
08.12:00	진눈깨비끝	23	15.3	7	7	500	4.2	0.6	1.5
08.11:00	약 진눈깨비	68	7.61	9	9	200	3.1	1.4	0.6
08.10:00	약한눈 단속	70	6.02	9	9	200	1.5	0.6	-0.5
08.09:00	보통눈 계속	73	5.84	9	9	200	1.1	0.2	-1.4
08.08:00	보통눈 계속	73	1.1	9	9	200	0.6	-0.4	-1.5
08.07:00	약한눈 단속	70	11.25	9	9	200	0.7	-2.0	-1.4
08.06:00	소낙눈 끝	26	20	10	10	52/	0.7	-3.5	-1.7
08.05:00	소낙눈/약	85	17.77	8	8	200	0.6	-2.9	-0.9
08.04:00	소낙눈/약	85	12.09	8	8	200	0.2	-3.3	-3.0
08.03:00	구름조금		20	3	3	500	-0.7	-4.0	-3.0

2월 8일 제주 기상 실황표



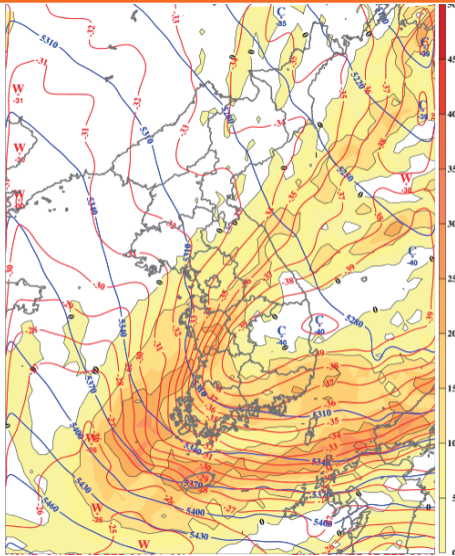
2월 8일 예상 강수형태(2월 7일 17시 발표)

2. 강수메커니즘은?

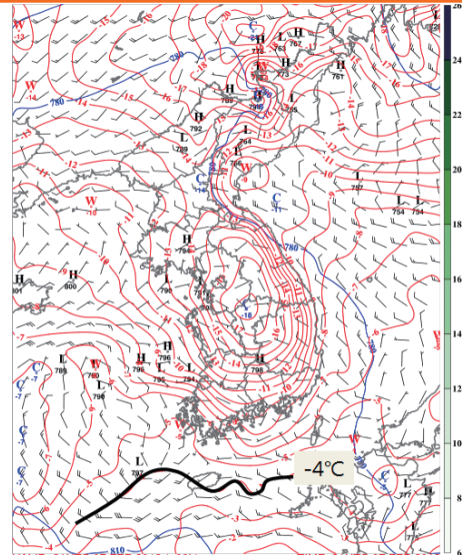
- (상층 한기 지배) 중국북동지방에 중심을 둔 500hPa 절리저기압이 2월 3일(D-5)부터 정체하며 역회전하면서 계속해서 상층 한기(남해안 -35℃ 등온선 위치)를 끌어내리고 있었음
- (찬 공기 내에서 더 찬 공기 남하) 2월 7일(D-1) 500hPa 절리저기압의 중심이 중국북동지방에서 연해주 부근으로 이동하면서 발해만 북서쪽에 있던 한기 중심이 -40℃ 이하인

온도골을 동반한 기압골이 전남서해안으로 남하. 절리저기압에 의한 상층 한기가 빠져나가지 못한 상태에서 더 차가운 공기가 남하하면서 불안정을 더욱 강화시킴

- **(상층 기압골 빠른 이동)** 상층 기압골 북쪽에 기압능이 발달하면서 기압골은 썰기모양으로 발달. 기압골 후면의 한기이류가 강해 이동 속도가 빠르고 회전력이 강함. 지상 저기압보다 빨리 남하하면서 제주도 부근에 근접했을 때는 이미 폐색전선이 발달하는 단계
- **(제주도 부근 약한 난기이류)** 폐색전선이 발달하면서 온난역이 축소되어 남서풍이 925hPa 10~20kts, 850hPa 10~20kts로 약함. 따라서 제주도는 저기압의 온난역에서 제한적으로 남서류가 유입되면서 하층의 기온이 크게 오르지 못함



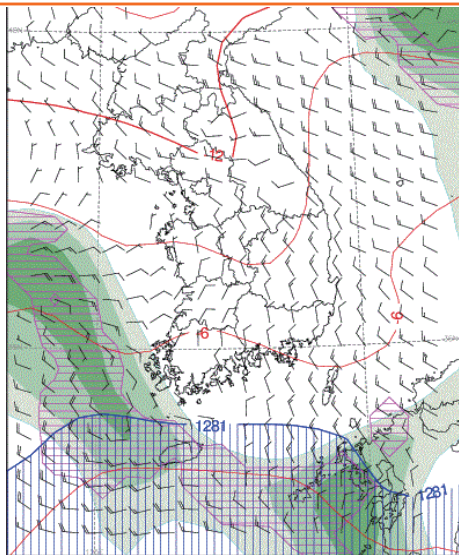
2월 8일 06시 500hPa VDAPS 분석장



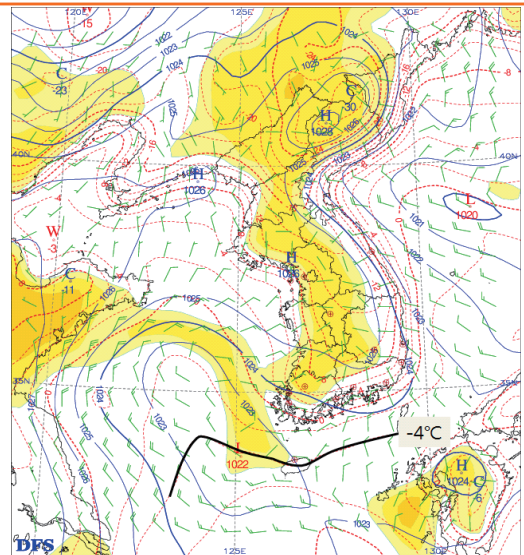
2월 8일 06시 925hPa VDAPS 분석장

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

- **(강수형태 판별)** 눈비 판별을 위한 1000-850hPa 층후 예상장에서 눈/비 경계선 (1281-1297)의 북쪽 한계인 1281선이 제주남쪽해상에 위치해 있다가 저기압이 점차 접근하면서 저기압 전면의 난기 이류로 인해 전남해안까지 북상하면서 눈비 혼재 구역에 계속 들어있는 것으로 모의

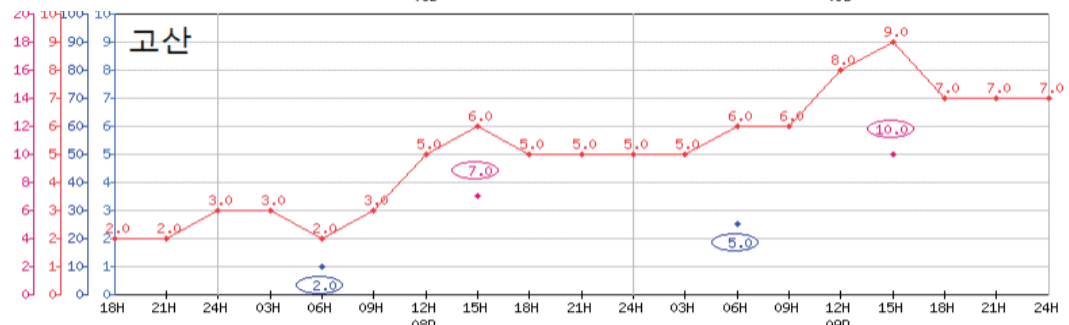
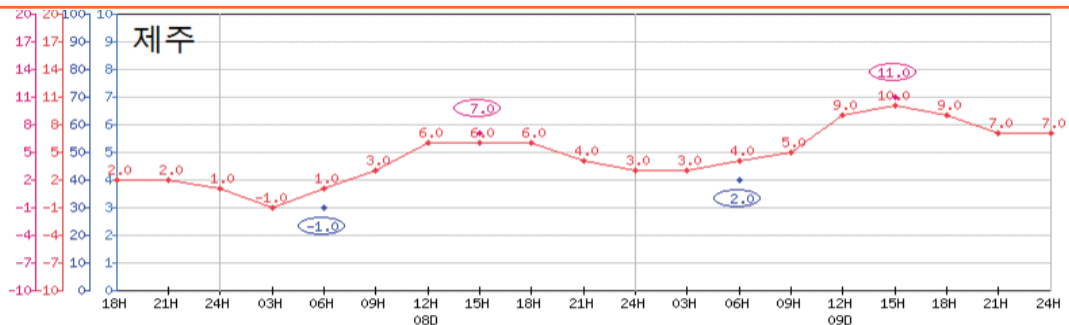


2월 8일 06시(+21h) 1000-850hPa층후 예상장



2월 8일 06시(+21h) 지상 상세바람 예상장

- **(GDAPS 하층 기온)** 2월 7일(D-1) 500hPa 절리저기압이 연해주로 이동하고 대륙고기압의 중심이 중국 상해부근으로 남하하면서 하층에 난기가 유입되어 기온이 상승할 것으로 예상. 제주도의 925hPa의 기온은 $-2^{\circ}\text{C} \sim -4^{\circ}\text{C}$ 사이의 분포를 보이나 925hPa 이하에서 난기가 유입되면서 지상기온이 영하권으로 상승할 것으로 예상하였음(925hPa의 기온선은 7일 21시에 -4°C 선이 제주도에 걸쳐 있다가 8일 12시 저기압 전면에서 -2°C 이 제주남부해안까지 북상)
- **(MOS 아침최저기온)** 전일 17시 BEST MOS가 생산한 제주지역의 8일 아침최저기온 가이던스는 제주 -1.0°C , 고산 2.0°C , 유수암 -3.0°C , 선흘 -3.0°C , 한림 -1.0°C 등 제주서부 일부 지역을 제외하고 영하권을 모의하고 있었음



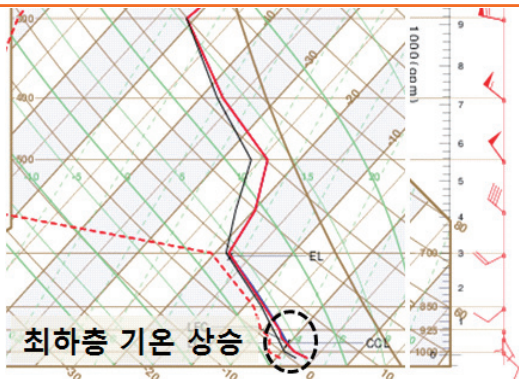
2월 7일 17시 가이던스 BEST MOS 예상 8일 아침최저기온(상 제주, 하 고산)

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

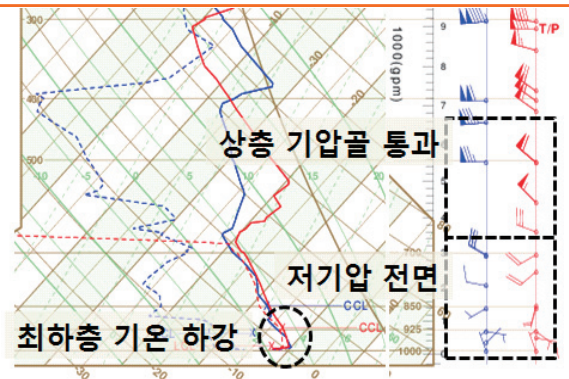
● 저기압 전면 하층 온난이류의 강도

- 상하층이 한기에 갇힌 상태에서 더 차가운 공기가 남하하며 저기압이 발달한 구조로 이미 상하층의 기온이 낮은 상태였음
- 남쪽에 고기압이 받치고 있지 않아 중국내륙에서부터 강한 난기가 유입되거나 저기압 전면에서 남서풍을 강화시킬 수 있는 기압배치가 아닌 오로지 저기압성 회전에 의해서만 남서풍이 유입되었던 구조
- 단열선도에서 볼 수 있듯이 상층 기압골은 이미 통과한 뒤에 중층 이하 기압골이 뒤따르는 상태로 저기압이 더 이상 발달하지 못하고 온난역이 축소되고 있었음

⇒ 저기압 전면에서 유입되는 남서풍의 취주거리가 짧고 풍속이 약해(850hPa, 925hPa 10~20kts) 온난이류로 기온을 상승시키기에 한계가 있었음



2월 8일 09시 제주 태풍 센터 예상단열선도



2월 8일 09시 제주 태풍 센터 단열선도

● 아침최저기온 모의 경향

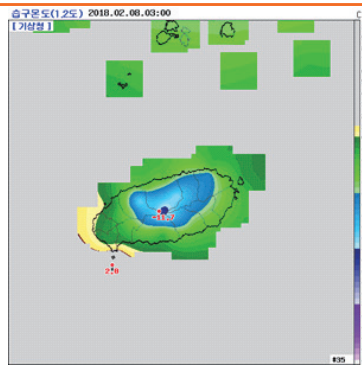
- 제주 예상단열선도에 나타나는 기온의 연직구조는 925hPa 이하에서 기온이 증가하는 형태로 FL고도가 315m에서 나타날 것으로 모의하였으나 2월 8일 09시에 태풍센터에서 관측된 단열선도에는 최하층에서 기온이 오히려 하강하는 구조를 보이며 영하권을 유지하였음
- 지면 근처에서 기온이 하강한 것은 3~7일 사이 내린 적설이 남아있어(제주 7.6cm) 밤 사이 지표 근처에 한기역을 형성하였고 이를 해소할 정도로 남풍이 강하게 불지 않았기 때문임
- 또한 BEST MOS는 제주지역의 아침최저기온을 영상권으로 모의하다가 사례일에 다가올수록 영하권으로 내려가는 경향을 보였음. 실제 아침최저기온도 BEST MOS보다 낮게 나타남
- ⇒ 지면에 적설이 남아 있고, 저기압 전면에서 난기이류를 모의할 때 warm bias가 존재하는 점은 하층 기온을 높게 예측하는데 마이너스 요인으로 작용

● 습구온도를 이용한 초단기 실황 대처

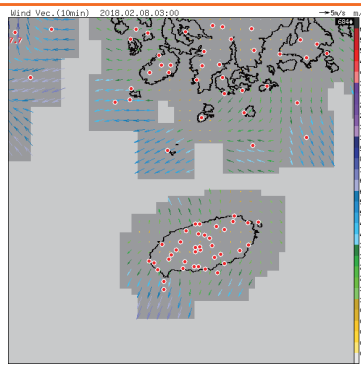
- 강수대가 제주도로 접근할 무렵 습구온도 실황을 통해 초단기적 대처가 가능했음
- 8일 02시 습구온도 분포를 보면 제주도는 습구온도 1.2℃ 이하를 보이고 있었으며 강

수대가 서쪽 해안에 접근한 03시에도 습구온도는 오르지 않고 1.2℃ 이하를 유지하고 있었음. 이 때는 저기압 전면의 남서풍이 유입되기 전, 육풍이 불고 있었으므로 습구온도가 오르기 쉽지 않은 상태였고 낮은 습구온도로 인해 강수형태는 눈이 될 것임을 알 수 있음

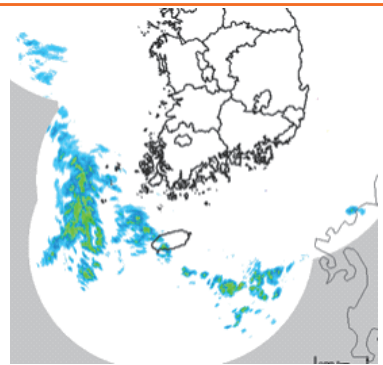
- 남서풍이 본격적으로 유입되는 06시에 난기의 영향을 직접적으로 받는 제주도 남서쪽 일부지역에만 습구온도가 1.2℃ 이상으로 오름



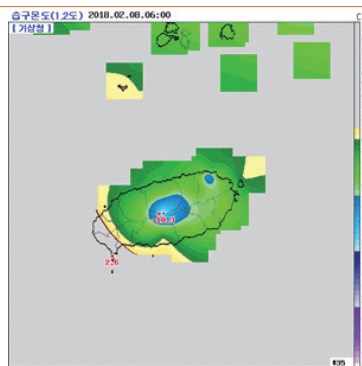
2월 8일 03시 습구온도



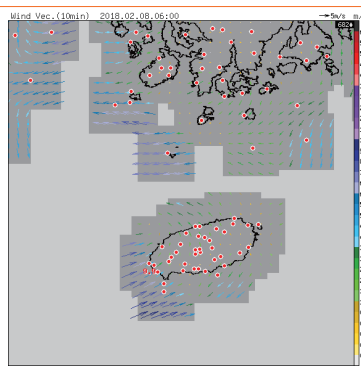
2월 8일 03시 AWS 바람



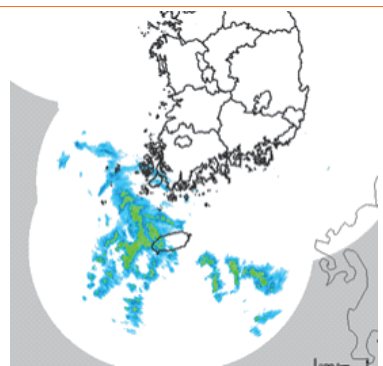
2월 8일 03시 레이더 영상



2월 8일 06시 습구온도



2월 8일 06시 AWS 바람



2월 8일 06시 레이더 영상

온난이류 강수의 눈비 구분의 실패

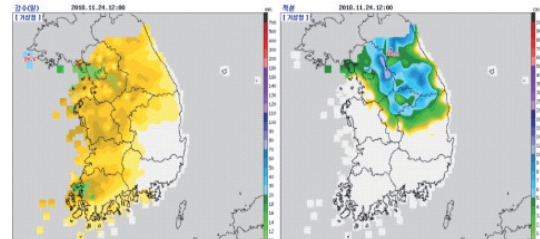
- 습구온도 변화에 대한 이해 필수 -

1. 예보는 어떻게 발표되었나? → 눈과 비가 섞이면서 적설이 적을 것

23일 17시 발표 예보

- ▶ 예상 적설(24일)
 - 강원영서와 산지, 북한: 3~8cm
 - 경기동부, 경북북부: 2~5cm
 - 서울, 경기도(경기동부 제외), 충북북부: 1~3cm
- ▶ 예상 강수량(24일)
 - 중부지방(강원동해안 제외), 경북북부, (23일부터)서해5도, 북한: 5~15mm
 - 강원동해안, 남부지방(경북북부 제외), 울릉도, 독도: 5mm 내외

24일 실황



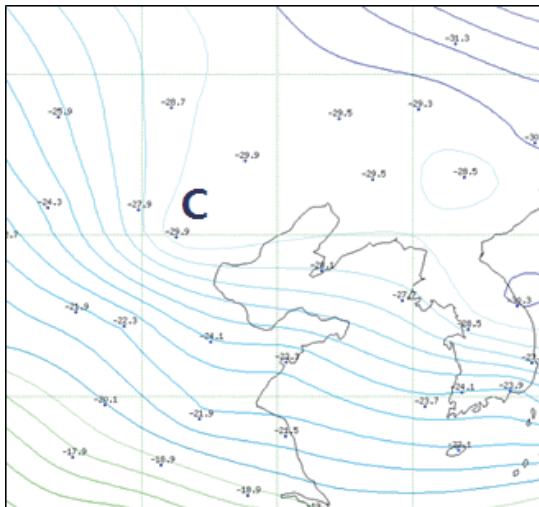
- 강수량 5~15mm, 적설 5~15cm

2. 쟁점사항은?

- **쟁점1)** 단순 온난이류형 강수의 강도를 보이는가, 극저기압 형태를 보이는가?
- **쟁점2)** 눈비를 어떻게 구분할 것인가?

3. 주요 분석내용

- **쟁점1)** 단순 온난이류형 강수의 강도를 보이는가, 극저기압 형태를 보이는가?



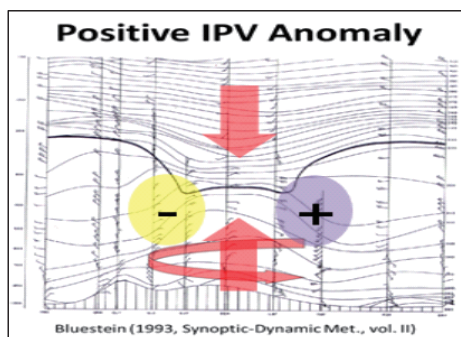
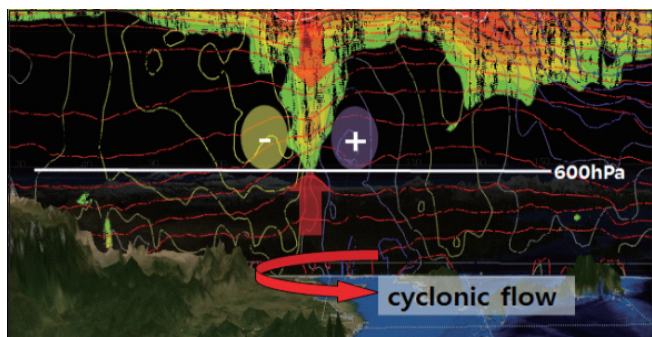
23일 21시 500hPa GTS 기온



23일 09시 해수면온도

- 소용돌이의 규모는 작았으나 중심의 한기는 500hPa -30도로 낮은 상태 유지
- 발해만과 서해상의 수온이 12도 이상으로 500hPa과의 기온차가 40도 이상 차이

- 특히 야간에는 냉각에 의해 발해만과 그 주변 육지의 온도차이로 하층 경압성 발생
⇒ 열적으로 해상에 극저기압 발달에 유리한 조건



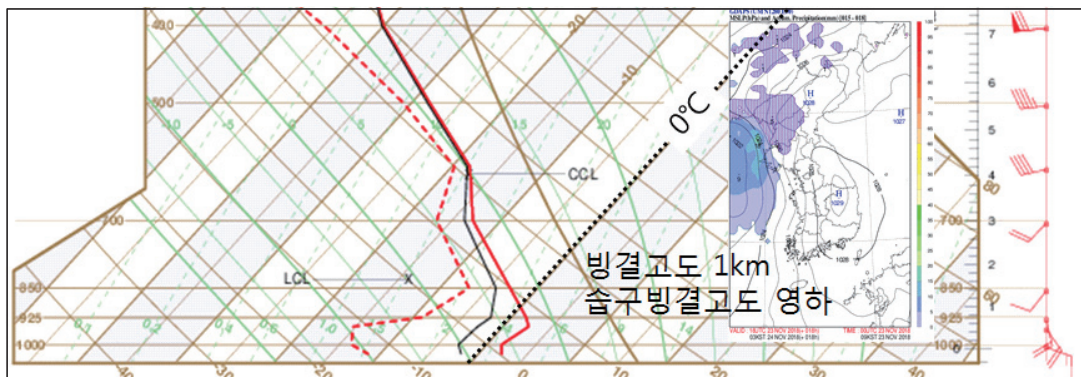
23일 21시 예상장(+12H),
PVU(>2.0,채색)+온위(빨간색)+남(노란색)북(보라색)풍속

PV아노말리 개념모델

- PVU 2.0 이상이 600hPa 까지 혀를 내밀듯이 하강
- PVU 전면의 강한 북풍, 후면에 강한 남풍 ⇒ 강한 저기압성 소용돌이
- 상층의 높은 온위(성층권) 하강, 하층은 온위면 팽창 불안정
⇒ 극저기압 형태로 발달, 일반적인 온난이류형 강수보다 강수량과 강수강도 강함

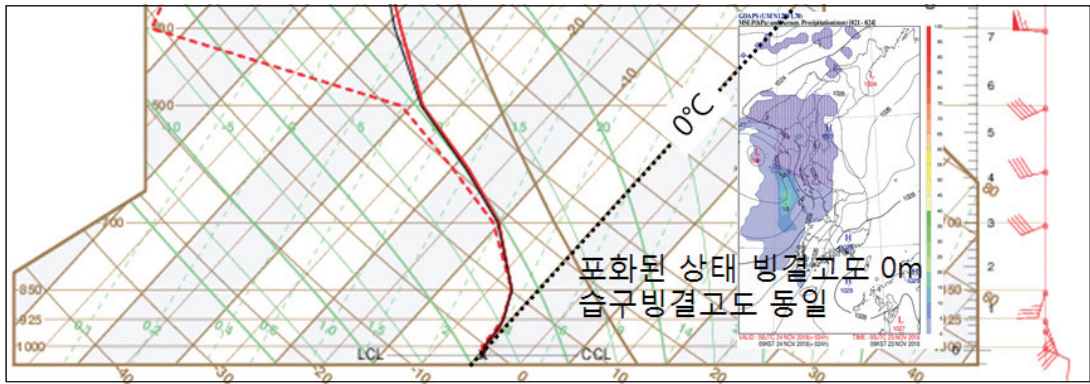
● 쟁점2) 눈비를 어떻게 구분할 것인가?

- ① 온난이류형 유형에서 빙결고도를 눈비 구분에 활용할 수 없는 이유



23일 09시 모델이 예측한 24일 03시(강수시작 전) 단열선도

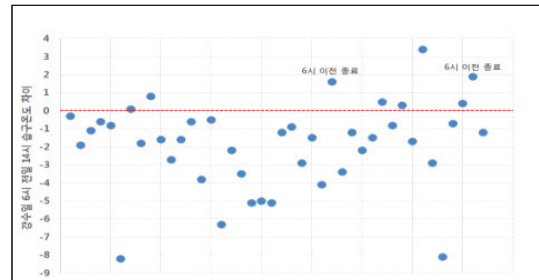
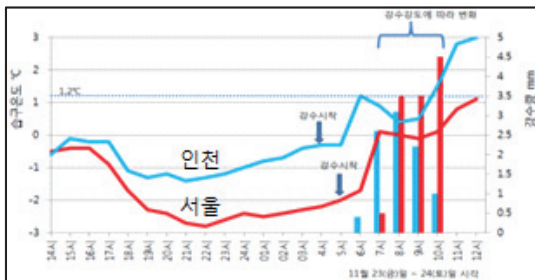
- 전일 모델에서 예측한 서울의 단열선도를 보면 빙결고도가 1km이상으로 높아 눈으로 보기 어려운 구조이나, 이것은 포화가 되기 전의 상태이며, 포화도에 따라 기온 값이 달라지므로, 실황 대처 측면에서는 눈비구분에 활용이 어려움



23일 09시 모델이 예측한 24일 09시(강수시작 시) 단열선도

- 강수가 시작 되고 난 이후에는 포화된 상태를 보이면서 빙결고도 및 습구 빙결고도가 동일하게 0m로 나타나는 것을 확인 가능
- 하층에는 동풍이 부는 등 상층공기와 혼합되지 않으면서 등온층의 역전층을 보임 따라서 층후를 활용하는 것도 눈비구분에 적합하지 않음
- 눈 미세물리과정을 고려하면 대기 상층부에서는 deposition과 accretion이 잘 일어날 수 있는 온도 구조를 보이고 있으므로 함박눈 형성 가능

② 그렇다면 실황에서 습구온도를 눈비에 어떻게 활용할 것인가?



- 낮 시간 이후 23일 밤까지 기온하강으로 인해 습구온도 하강(서울 약 -2.5°C)
- 지표부근이 건조한 상태에서 24일 아침에 강수가 시작되고, 시작단계에서 수증기가 공급되며 일시적으로 습구온도 상승($+2\sim+3^{\circ}\text{C}$)하여 0도 내외 유지
- 6시 이후 강수가 지속되는 10시까지 습구온도가 유지되면서 계속해서 눈 구역(습구온도 0°C 내외) 유지
- 통계적으로 전일 14~15시 습구온도보다 다음날 아침 습구온도가 더 낮음
- 강한 강수가 있으면 상층 한기 남하로 인해 0.5~1도의 습구온도 하강할 수 있음
- 따라서 이 사례에서는 23일 예보 시점 당시 습구온도가 영하였음을 감안하면, 새벽부터 오는 강수의 형태가 눈일 것임을 예상 가능함

4. 무엇을 더 고려했어야 했나?

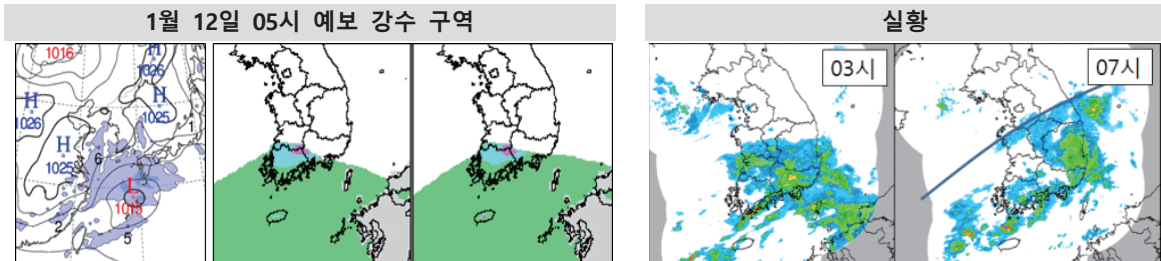
- 극저기압 형태로 발달 여부 고려
 - 상층(500hPa)의 찬공기와 따뜻한 해수온도의 열적조건(40도 이상)과 PVU 2.0이상 구간의 남하로 극저기압 형태로 발달, **일반적 온난이류 보다 강수량 급증**
- 하층의 대기구조와 습구온도 특성 이해
 - 난기가 강하지만 하층은 찬 공기가 갇혀있는 등온대기 형태이므로, **빙결고도 보다는 습구빙결고도 또는 습구온도를 활용하여 눈비 구분을 하여야 함**
 - 내륙의 경우 전날 14시의 습구온도 보다 다음날 아침시간에 습구온도가 더 높기 어려우며, 강수가 강할 경우 0.5~1도의 습구온도 하강이 발생함을 고려해야 함

6. 실황분석

남쪽골은 속임수, 진짜는 서쪽 기압골

- 정확한 메커니즘의 이해가 필수! -

1. 예보는 어떻게 발표되었나?

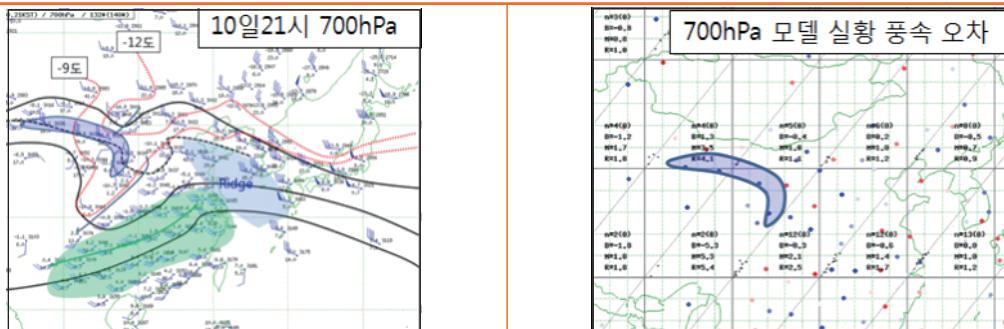


2. 쟁점사항은?

- 쟁점1) 강수메커니즘이 정확하게 무엇인가?
- 쟁점2) 중층 기압골이 깊은가? 깊다면 어떤 일이 벌어질까?

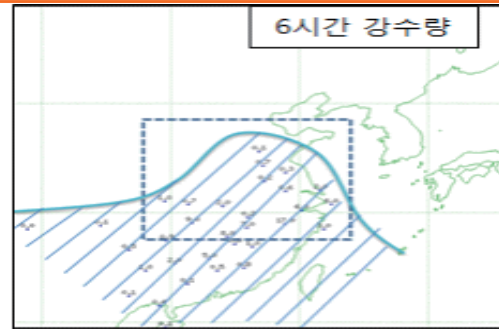
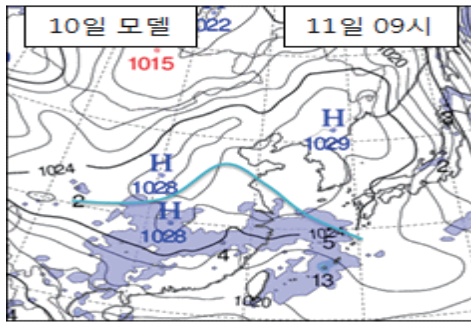
3. 주요 분석내용

- 쟁점1) 강수메커니즘이 정확하게 무엇인가? 남쪽골은 북위 30도 밑으로 지나는데..



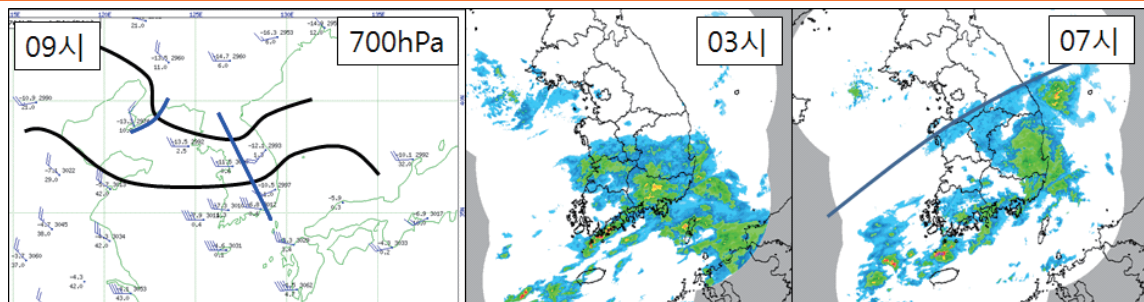
- 지상저기압은 북위 30도 밑으로 통과할 것으로 보임. 남쪽 저기압의 북방한계선은 중심으로부터 약 550km이므로, 강수북방 한계선이 제주도를 넘기 어려움
 - 700hPa의 GTS분석을 해보면 골이 매우 깊고, 그 후면에 한기이류가 모델보다 강하게 나타나고 있으므로, 골이 계속해서 깊어 질 것으로 예상 할 수 있음
 - 골 전면으로 강풍대가 형성되어 있고, 그 강풍라인을 따라 강수역이 형성
 - 골이 깊어지다 보니 전면으로 능이 형성, 대만인근 위치한 하층의 남쪽골은 더욱 북상하기 어려워짐
- ⇒ 따라서 우리나라에 유입되는 강수의 메커니즘은 남쪽저기압이 원인이 아니라, 서쪽에서 접근하는 중층기압골에 의한 강수로 이해해야 함!

- **쟁점2)** 700hPa 기압골이 깊어지다 보니.. 실황에서 오차가 감지되기 시작



- 10일 21시 모델에서 예측한 결과와, 11일 09시 실제 GTS에서 관측되는 강수영역이 다르게 나타나고 있음
- 이 강수구역은 남쪽골로 설명할 수 없음→ 강수메커니즘이 서쪽골임을 다시 증명
- 가이던스를 고려하면 1cm내외의 적설이 예측 가능했으나, 실제로는 눈날림
- 따라서 모델이 예측한 것 보다 강수가 북상할 가능성이 높음

▶ 실황에서 나타난 특징



- 700hPa 골 위치, 전면인 포항, 북강릉에서 20kts내외의 남서류 관측
- 강수의 북방한계는 충청~강원남부 까지 북상하였음(예상보다 높음)
- 강수량 : 경북동해안 5~20mm, 그 외 5mm 내외
- 적설 : 강원남부, 경북 2~7cm, 경남북서내륙 1cm내외, 전북 1~3cm

4. 무엇을 더 고려했어야 했나?

- **정확한 메커니즘의 이해**
 - 남쪽저기압의 위치는 북위30도 미만에 위치하고, 반면에 서쪽기압골은 깊은 것으로부터 강수 메커니즘을 서쪽기압골로 판단했어야 함
- **실황에서의 모델과 오차를 예보에 반영 필요**
 - 700hPa의 서쪽기압골의 후면으로 모델이 강풍을 과소모의 했으므로 골은 깊어질 것임
 - 중국남부에서 6시간 강수실황이 예상보다 북편한 것을 감안하여 강수예보를 남부지방에서 충청~강원 권역까지 북상시켰어야 함

7. 그 외 유형

대류불안정에 의한 중부지방 강수

- 겨울철에도 낙뢰를 동반한 대설 가능! -

1. 예보와 실황은?

예보 (2월 21일 17시 발표)	24일 실황
<ul style="list-style-type: none"> ▶ 예상 강수량 <ul style="list-style-type: none"> - 강원영서: 5mm 내외 - 서울.경기도, 충청도, 전라도, 경상내륙: 5mm 미만 ▶ 예상 적설 <ul style="list-style-type: none"> - 강원영서: 2~7cm - 서울.경기도, 충청도, 전북, 경북내륙: 1~5cm - 전남동부내륙, 경남북서내륙: 1cm 내외 	<p>22일 오후에는 중부지방 상하층 불안정에 의한 대류성 강수 발달, 22일 밤부터 기압골의 영향</p>

최심신적설 현황(cm)

수도권 서울 4.1 강화 2.5 인천 2.9 동두천 6.8 수원 1.7 양평 6.0 의정부 5.0 이천 4.0 파주 2.7
 충청도 단양 4.5 보은 2.0 추풍령 1.8 옥천 3.0 제천 4.0 청주 0.5 충주 1.6 수안보 4.0 금산 5.5
 강원도 해안 7.7 양구 4.0 영월 5.2 원주 5.0 북평 7.5 북춘천 7.6 횡성 8.5 진부령 4.7 미시령 3.0
 경상도 봉화 6.0 상주 3.4 영주 2.5 김천 0.7 거창 1.1 해인사 1.0
 전라도 무주 11.0

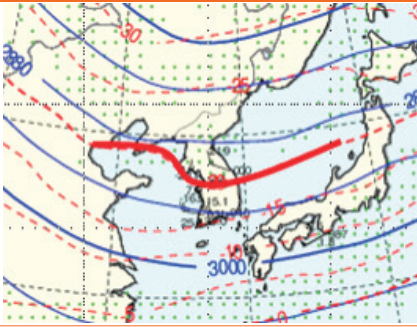
- 22일 밤~23일 새벽 기압골 통과 시 수도권에는 뇌전을 동반한 강설 발생
- 기압골이 통과하기 전(22일 오후) 중부지방에는 눈이 날리면서 강원영서에 2cm 이하의 적설 기록
- * 대화 1.5 먼은 1.5 안흥 2.0 청일 1.0 횡성 1.0 진부 0.5 용평 0.0

2월 22일 15시 레이더 영상	2월 22일 24시 레이더 영상	2월 23일 00시 40분 낙뢰 영상

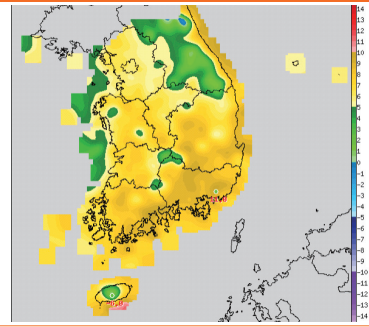
2. 강수메커니즘은?

<22일 오후>

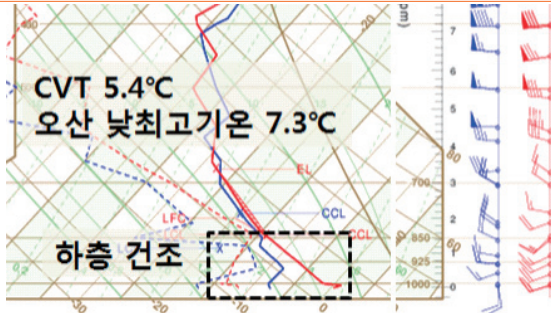
- **(700hPa 온도골)** 500hPa 단파골은 발해만 북서쪽에 위치한 가운데 700hPa의 온도골이 중부지방을 통과하면서 상하층의 불안정을 강화시킴
- **(지면 가열)** 고기압 영향으로 맑은 상태에서 지면 가열로 인해 지상기온이 상승, 중층 한기+지면 가열로 상하층간 열적 불안정이 강화
 - * 서울 15시 예상단열선도 CVT 5.4°C, 춘천 15시 예상단열선도 CVT 5.7°C
 - * 서울 낮최고기온 5.4(12시 12분), 춘천 낮최고기온 5.3(13시 28분)
- **(하층 건조)** 중국중북부내륙이 건조한 상태이므로 중국내륙의 고기압 가장자리를 따라 우리나라로 유입되는 서풍은 건조함. 850hPa 이하 하층이 건조하고 지상 부근의 바람도 강해(남서풍 15kts) 강수가 지속되지 못하고 발달과 소멸을 반복하며 적설이 많이 쌓이기 어려운 조건이었음. 다만 지대가 높아 낮 기온이 낮게 형성된 강원영서 일부 지역 위주로 적설이 기록됨



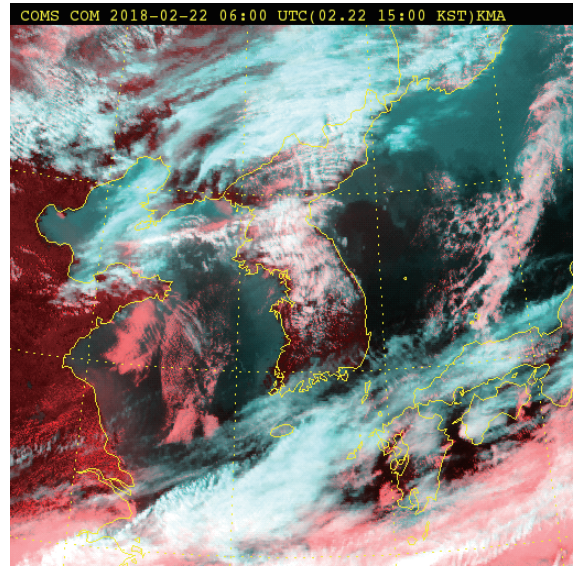
2월 22일 15시 700hPa 분석장



2월 22일 낮 최고기온 분포도



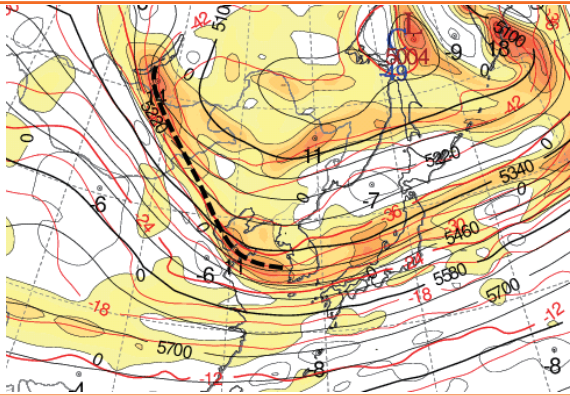
(상)2월 22일 15시 오산단열선도
(하)2월 22일 15시 850hPa 습수 초기장



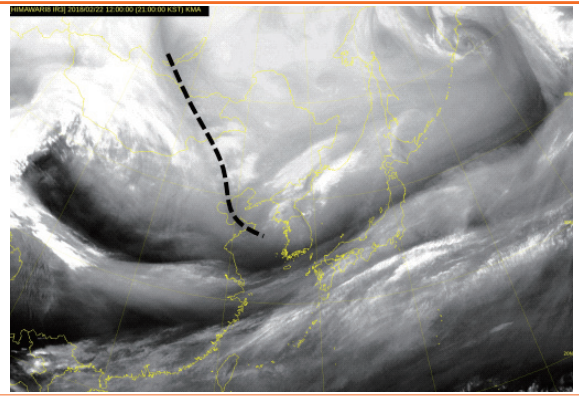
2월 22일 15시 위성 합성영상

<22일 밤~23일 아침>

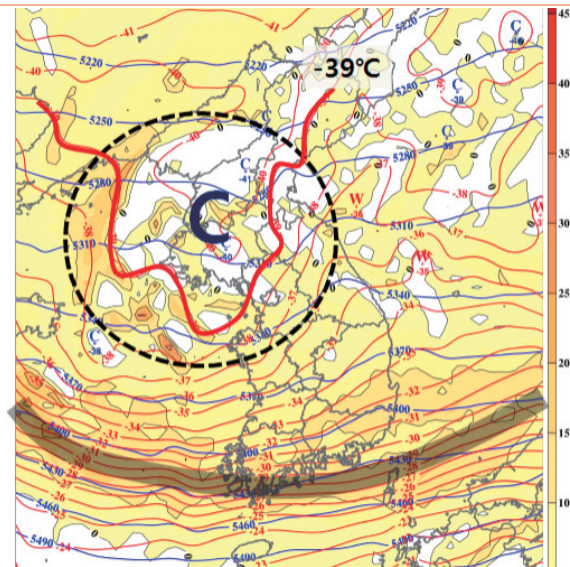
- **(상층 한기+건조역)** 산둥반도에 있던 500hPa의 vorticity streak를 동반한 상층 기압골이 접근하여 중부지방을 지나면서 지상 저기압 발달을 지원. vorticity streak를 따라 건조역이 침투하고 상층 한기가 남하하면서 상하층의 불안정을 강화시킴
- **(하층 난기+수증기 유입)** 기압골 전면에서 서풍이 850hPa 30kts, 925hPa 30kts 이상으로 강하게 불면서 난기와 수증기가 유입
- **(열적 불안정)** 낮 동안 가열되었던 지면과 하층 온난이류가 나타나는 상태에서 중부지방은 상층 한기의 중심에 들게 되면서(500hPa -39°C선 중부지방 통과) 상하층 기온차가 커져 열적 불안정까지 더해짐
- **(상승기류 발달+불안정 증가)** 위에서 언급했듯이 하층에 강한 온난이류가 나타나는 가운데 상층에는 한랭건조한 공기가 침투하면 상승기류가 유발되어 구름이 높게 발달하고 상하층 사이의 온도차에 의해 불안정도가 커지면서(SSI(850-500)지수 1.6, LI(925-500)지수 1.6) 낙뢰가 발생할 가능성이 증가함



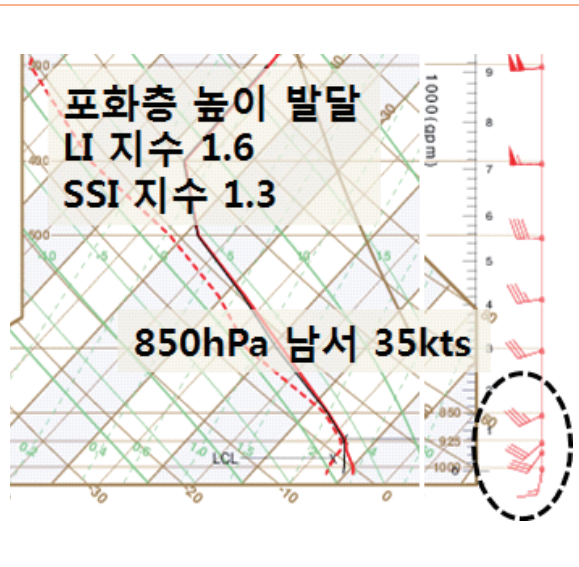
2월 22일 500hPa 초기장



2월 22일 히마와리 수증기 위성영상



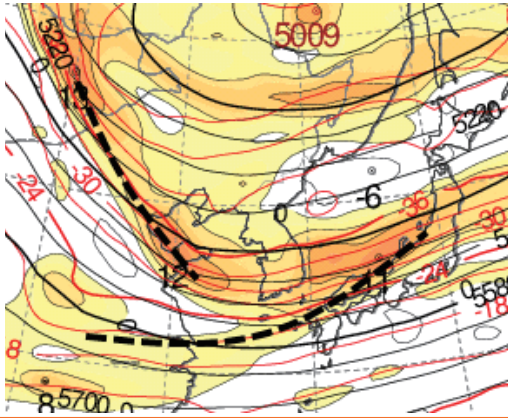
2월 22일 21시 VDAPS 500hPa 고도,기온,와도



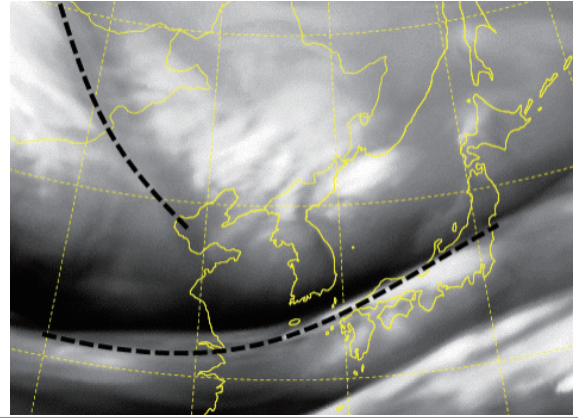
2월 23일 00시 서울 예상단열선도(+03h)

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

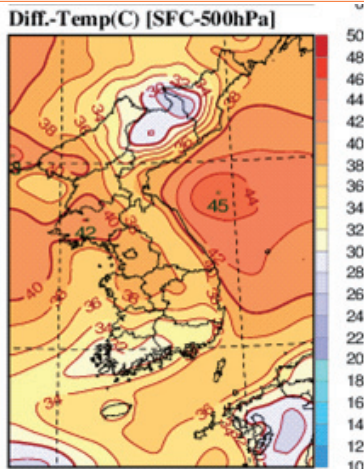
- 500hPa 기압골이 산둥반도에서 중부지방을 통과하면서 북한지방에 있던 -36°C 등온선이 중부지방까지 남하하고 기압골에 동반된 vorticity streak는 남부지방을 지나면서 중부지방은 한기역내에 위치
- 하층에는 기압골 전면에서 서남서풍이 850hPa 30~40kts, 925hPa 25~30kts로 불면서 하층제트가 발달하여 강한 온난이류
- 22일 낮에는 경기북부와 강원영서북부에 하층 기온이 상승하며 상하층 온도차에 의한 열적 불안정 강수를 잘 모의하였고, 22일 밤부터는 건조역을 동반한 상층 기압골이 접근하고 하층에는 남서풍이 강하게 불면서 다시 강수대가 발달할 것으로 모의
- 수도권과 강원영서에 SSI(850-500) 3 이하, 내륙 대부분 SRH 300이상(원주 부근 463)으로 대류 불안정을 모의함



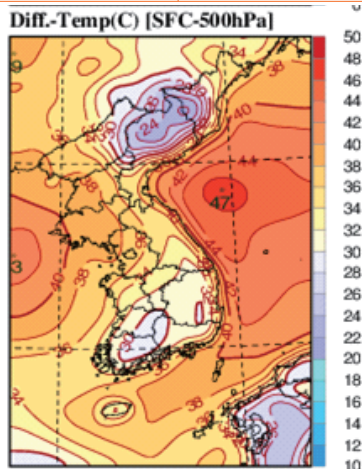
2월 22일 21시 500hPa 와도 예상장(+36h)



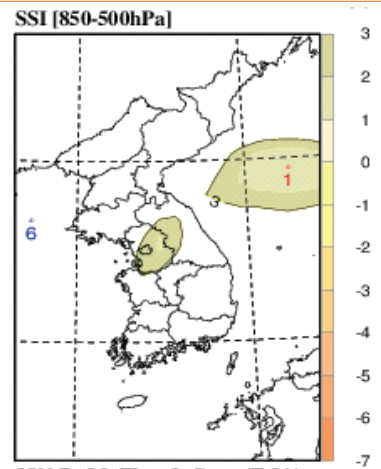
2월 22일 21시 RDAPS 수증기 모의 영상(+36h)



2월 22일 15시(+30h)
상하층 기온차(500hPa-지상)



2월 22일 21시(+36h)
상하층 기온차(500hPa-지상)



2월 23일 00시
SSI(850-500hPa)

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

● 상하층 대류 불안정에 의한 낙뢰 발생 조건 검토

- 500hPa 층에서 온도골과 온도조밀역이 통과하는 시점에 850hPa(850hPa 이하 하층에는 서남서풍 30kts로 불면서 온난이류가 있는 상태)과 500hPa 사이의 기온차가 38°C로 가장 큼
- 상층 한랭건조한 공기가 침투하고 하층에는 온난이류가 나타나면서 상승기류가 발달. 구름이 높이 발달하고 대류 불안정이 큰 상태
- 서울 기준 23일 00시 SSI(850-500) 지수 2.2, LI(925-500) 지수 2.1 TTI 60 으로 강한 불안정 모의(21일 09시 모델 기준)

⇒ 상하층 기온차가 크고 불안정도 증가, 500hPa까지 상승기류 존재

- 22일 낮 열적 불안정에 의한 눈날림

- 850hPa, 925hPa에 남서풍의 난기가 이루어지고 낮 동안 지면이 가열되면서 기온이 상승하는 것을 고려

⇒ 850hPa 이하 하층이 건조하여 850hPa부터 지상까지 건조단열적으로 기온 상승(낮 최고기온이 CVT 온도만큼 상승)

- 22일 낮부터 500hPa 한기로 인해 상하층 온도차가 30°C 이상 커지기 시작

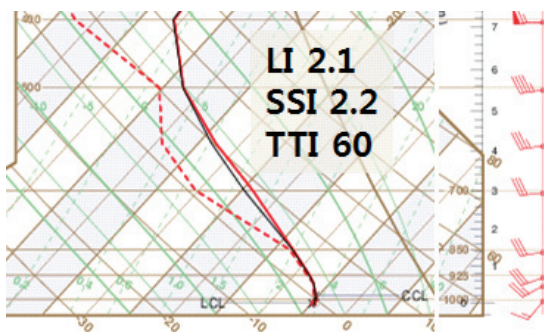
⇒ 대류 불안정 발생

- 21일 09시 바이칼호 부근의 500hPa 기온 실황을 살폈더라면

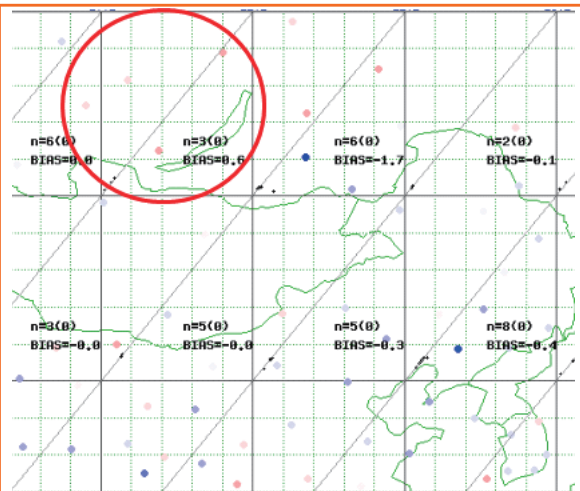
- 21일 09시 바이칼호 부근의 단파골이 22일 중부지방을 통과할 것으로 예상

- 바이칼호 부근의 500hPa 기온 실황이 모델 예상보다 더 낮은 상태

⇒ 한기가 모델 예상보다 강하게 남하할 가능성이 있음. 불안정 강화



2월 23일 00시 서울 예상단열선도(+39h)

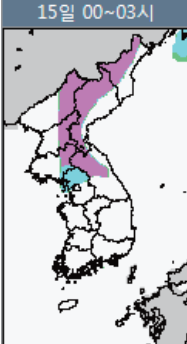
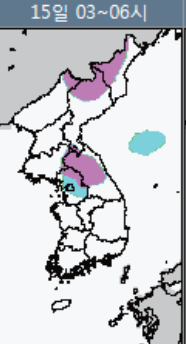
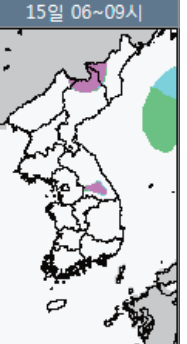
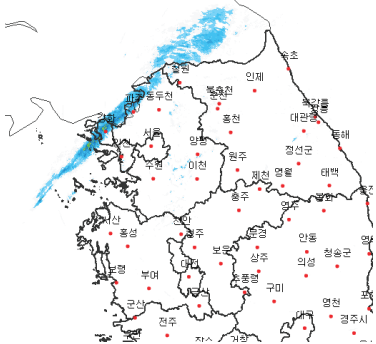


2월 21일 09시 500hPa 기온 GDAPS-GTS

하층 시어역에 의한 중부지방 예상보다 약한 강수

- 하층의 건조한 남서풍 유입을 고려했다면 -

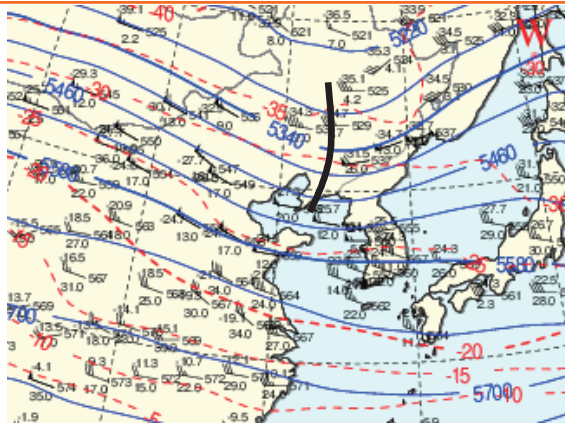
1. 예보와 실황은?

예보 (1월 14일 17시 발표)	실황
<ul style="list-style-type: none"> ▶ 예상 강수량 <ul style="list-style-type: none"> - 서울.경기도, 강원영서: 5mm 미만 ▶ 예상 적설 <ul style="list-style-type: none"> - 경기동부: 1cm 미만 - 강원영서: 1~3cm 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 예보보다 한타임 늦은 15일 새벽~아침 하층 시어역 통과하면서 약한 강수 - (강수시점) <p>15일 00시~03시 사이 경기북부, 강원영서북부에 강수가 시작할 것으로 예보하였으나 04시 이후 한랭전선 형태의 강수대 유입</p> - (강수형태) <p>경기북동부와 강원영서에 눈, 그 외 서울.경기도는 눈/비가 내릴 것으로 예상하였으나 약한 비 또는 눈날림의 형태로 내리면서 적설 기록하지 않음</p>
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>15일 00~03시</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>15일 03~06시</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>15일 06~09시</p>  </div> </div>	<div style="text-align: center;">  </div>
단기예보 분포도(1월 14일 17시 발표)	1월 15일 04시 레이더 영상

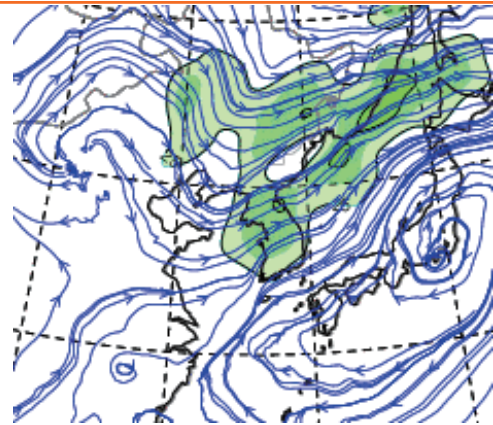
2. 강수메커니즘은?

- **(약한 상층지원)** 중국북동지방에 500hPa 기압골이 통과하나 기압골에 의한 강수대는 주로 북한지방을 지나며 우리나라에 직접 영향을 주지 않고 기압골 후면의 한기이류도 약해 지상 저기압이 크게 발달하기 힘든 구조
- **(하층 건조한 공기 유입)** 남동쪽 고기압 가장자리를 따라 850hPa 이하에서 남서풍을 타고 난기 유입이 전일(14일)부터 지속된 상태이나 중국내륙이 건조하여 하층 남서기류에 의한 수증기 유입은 제한적인 상황
- **(하층시어)** 남고북저형(중국북동지방 저기압과 일본큐슈 부근 고기압) 기압배치로 등압선 간격이 조밀해지며 기압골 전면에서 남서풍이 850hPa 25~35kts, 925hPa 25~30kts로 강화됨. 하층에는 난기가 유입되어 있는 가운데 중국북동지방을 지나는 저기압 후면에서 한기가 남하하면서 북서-남서 시어역(한난 경계)에서 강수대 발달. 난기가 이류 될 때

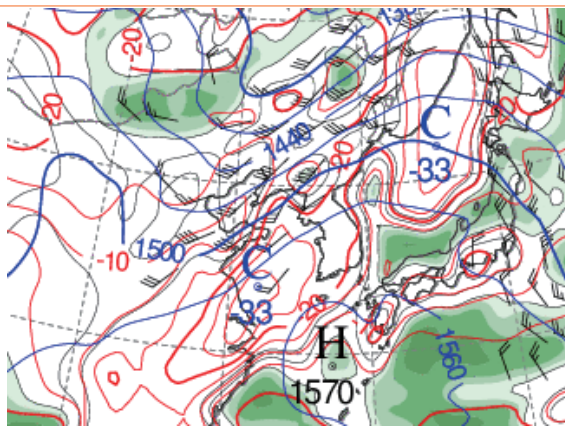
가 아닌 한기가 남하하며 하층 시어역이 통과할 때 강수가 발생하였으나 수증기 유입이 원활하지 못하여 약하게 발달함(좁고 얇은 형태)



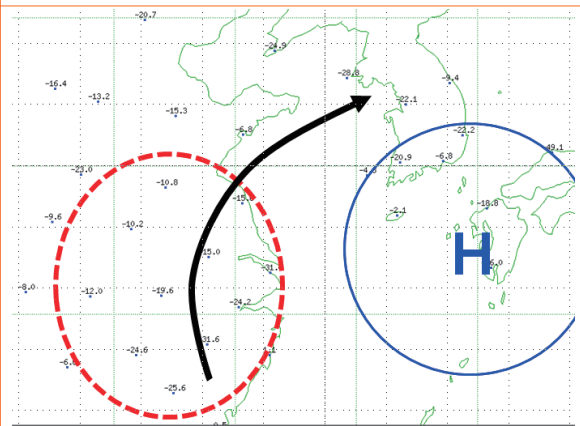
1월 14일 21시 500hPa 분석장



1월 14일 21시 850hPa 유선



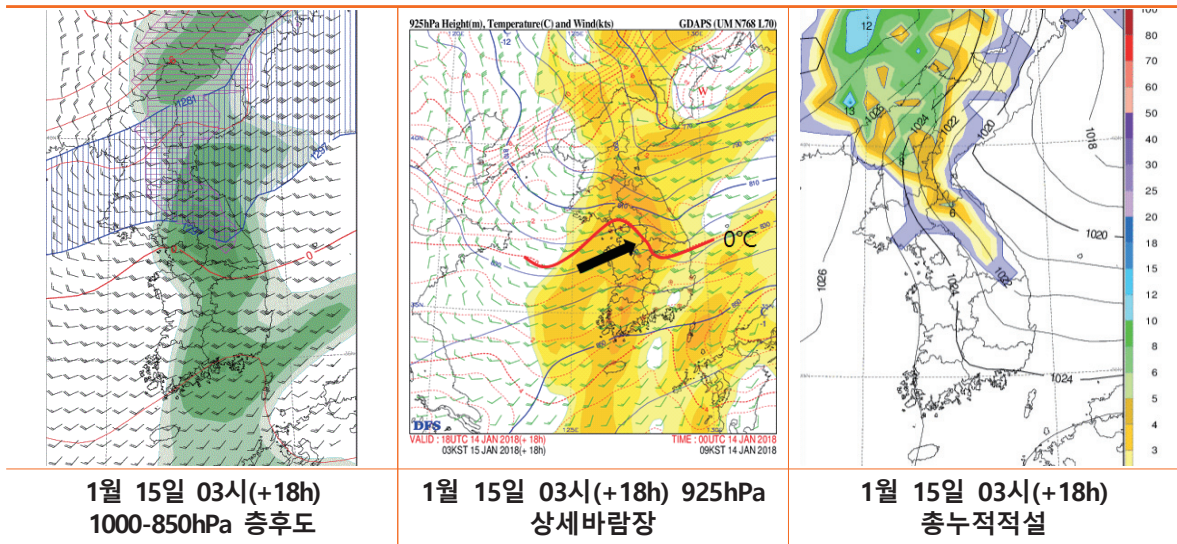
1월 14일 09시 850hPa 습수 초기장



1월 14일 09시 GTS 850hPa 이슬점 온도

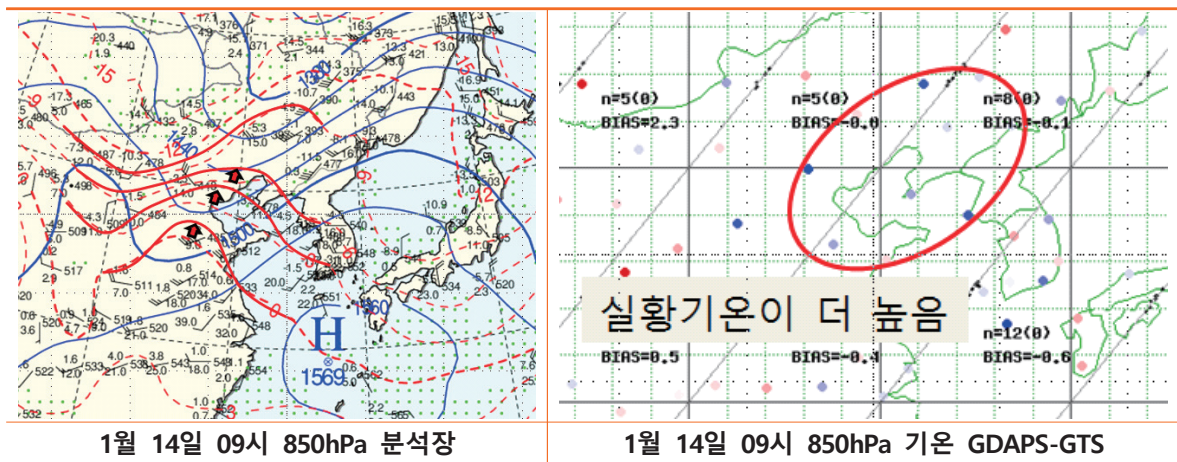
3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

- **(하층제트 유입)** 몽골 남동쪽에 있는 500hPa 기압골은 14일 저녁~15일 새벽 중국북동지방을 지나면서 우리나라에 직접적인 영향을 주기 어려운 위치였으나 남고북저의 기압 배치로 기압경도력이 강화되어 기압골 전면에서 남서풍이 강화되는 것으로 모의 (850hPa 남서풍 35~40kts, 925hPa 남서풍 30~35kts)
- **(850hPa 이하 포화도)** 해상이나 중국내륙으로부터의 수증기 유입이 원활하지 않은 상태에서 기압골 전면의 850hPa 이하 하층 온난이류역에서 내륙의 찬공기와 만나 포화되는 것으로 모의(서울 예상 강수량 0.1mm, 춘천 예상 강수량 1.2mm)
- **(강수 형태)** 925hPa 0°C 등온선은 15일 00시~03시 사이 경기동부와 강원영서남부를 지나고, 1000-850hPa 층후도에서도 눈/비 혼재구역의 남방 한계선인 1297선이 남해안에서 점차 북상하면서(14일 낮부터 난기이류에 의해 기온이 상승) 경기북부와 강원영서 중북부만 눈/비 혼재구역에 드는 것으로 모의하였음



4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

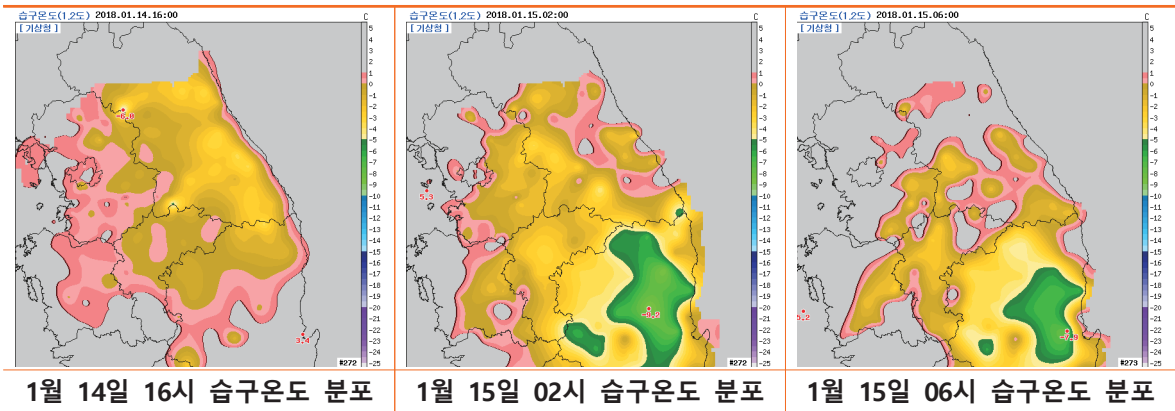
- 지상 저기압 전면 난기이류와 후면 한기이류의 강도
 - 14일 09시 상황에서 나타난 발해만 북서쪽의 난기이류가 모델이 예상하는 것보다 강했고, 기압골 후면의 한기이류는 예상보다 약했음
 - ⇒ 한남 경계역에서 발생하는 강수대의 남하가 예상보다 늦어질 수 있음을 인지
 - ⇒ 강수대의 남하가 늦어질수록 건조한 공기가 유입되는 시간이 늘어남



- 925hPa 이하에서 나타나는 온난이류
 - 기압골의 전면에서 드는 15일 새벽에는 남서풍이 더욱 강화(925hPa 30kts) 되면서 야간의 기온 하강을 저지 할 수 있음을 고려
 - ⇒ 925hPa 기온이 0°C라 하더라도 그 이하 층의 강한 온난이류로 인해 지상 기온이 영상권 유지

- 습구온도 실황을 살펴보았더라면

- 저기압이 통과하기 전부터 남쪽 고기압 가장자리에서 건조한 남서풍이 지속적으로 유입되면서 기온과 습구온도가 증가
- 저기압이 접근하는 14일 야간에도 전면에서 남서풍이 강화되면서 습구온도가 오히려 증가하는 경향을 보임



5. 향후 유사유형 시 고려해야 할 것은?

- 강수 시작 시점은 늦었지만 4일 전 예상장부터 기압계와 기온분포가 일관되게 모의되었던 사례임
- GDAPS 모델 예상장에도 경기북부, 경기동부, 강원영서의 925hPa의 기온이 0°C 이하이지만 그 이하층에서 나타나는 온난이류로 인해 지상 기온이 영상으로 유지되는 것으로 나타나고 있었음
- 포화층이 850hPa 이하에서 형성되어 두껍지 않고 하층시어역에서 발달한 강수는 925hPa 기온이 0°C 이하라 하더라도 그 이하층의 온난 이류로 인해 강수형태가 변할 수 있는 점 감안

북쪽골 + 남쪽골, 중부지방 적설 발생 시점 오차

- 강수발생의 메커니즘을 고려했다면 -

1. 예보와 실황은?

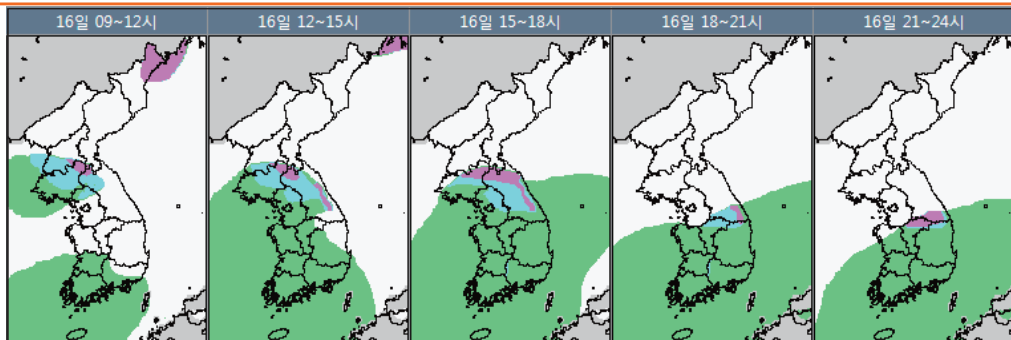
예보 (1월 15일 17시 발표)	실황
<ul style="list-style-type: none"> ▶ 예상 강수량 <ul style="list-style-type: none"> - 남해안, 제주도: 10~40mm - 남부지방(남해안 제외): 5~20mm - 서울, 경기도, 강원도, 충청도: 5mm 미만 ▶ 예상 적설 <ul style="list-style-type: none"> - 강원영서: 1~3cm - 경기북부 및 동부, 충북북부, 경북북부내륙: 1cm 내외 	<p>16일 북쪽 기압골이 지나며 경기북부 및 동부 눈/비 1cm 내외, 강원영서 눈/비, 강원산지 눈 1~3cm 적설을 예상하였으나 → 북쪽 기압골에 의한 강수는 산발적 빗방울로 나타났고 17일 새벽 남쪽 기압골에 의해 적설 발생</p>

최심신적설 현황(cm)

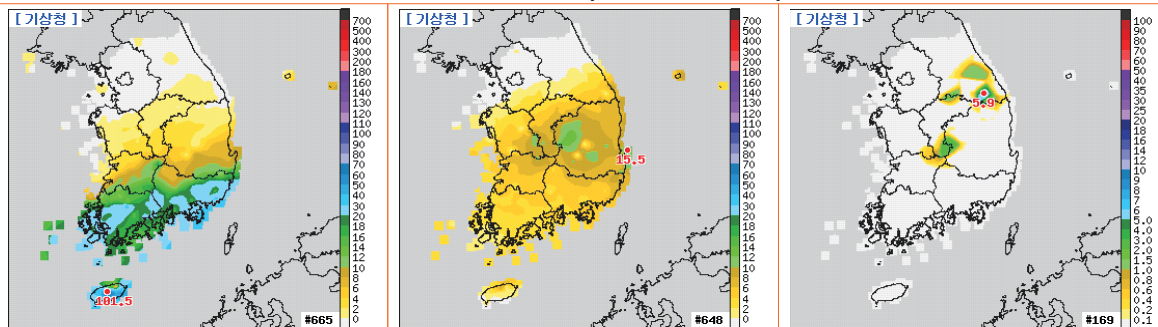
충청 추풍령 2.9 금산 0.5

강원 면온 6.5 사북 6.3 내면 3.5 서석 3.0 대화 2.0 안흥 2.0 태백 2.0 대관령 1.2 횡성 0.5

경상 석포 3.5



예상 강수 분포도(15일 17시 발표)

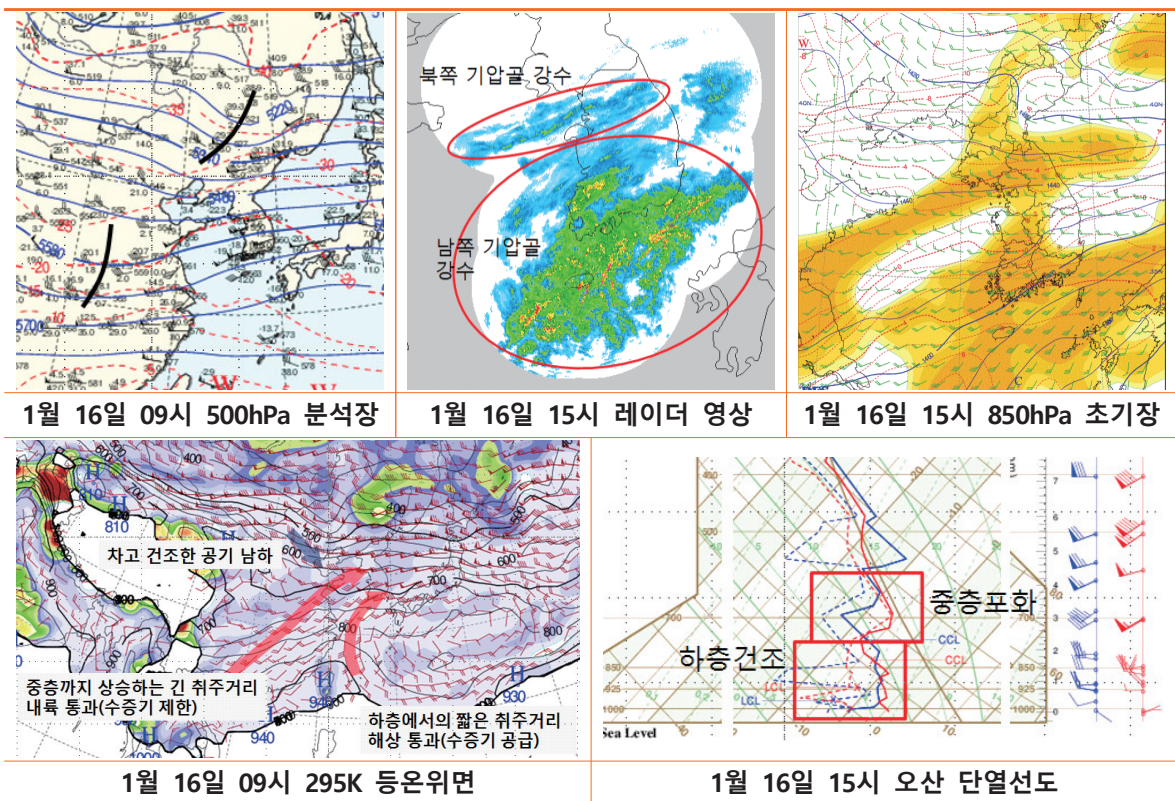


일 강수량(좌 16일, 우 17일)

신적설분포도(17일 11시)

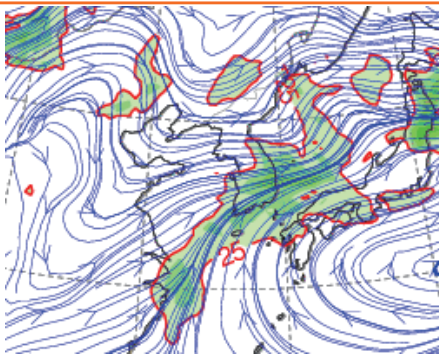
2. 강수메커니즘은?

- **(북쪽 기압골 통과 후 남쪽 기압골 접근)** 중국북동지방으로 500hPa 기압골이 먼저 통과한 후 중국 상해부근에서 남쪽 기압골이 접근하면서 중부지방의 강수메커니즘과 남부지방의 강수메커니즘이 분리
- **(남쪽 기압골 강수)** 일본남쪽해상 고기압과 상해부근 저기압 사이에 기압경도력이 강화되면서 발달하는 하층제트(850hPa 남서풍 30kts, 925hPa 남서풍 25kts)에 의해 발생하는 온난역 강수. 남쪽 고기압 가장자리의 강풍역을 따라 해상에서 수증기가 공급. 하층제트가 수렴되는 남해안과 제주도에 강수 집중
- **(북쪽 기압골 강수)** 중부지방에는 취주거리가 길지만 건조한 중국 내륙을 통과하는 남서류가 유입(수증기가 포함된 남서기류는 남부지방으로 유입되어 중부지방에는 수증기 공급이 제한적)되는 상태에서 북쪽 기압골 후면의 한기가 남하하면서 한난경계에서 폭이 좁고 약한 강수대가 발달
- 북쪽 기압골이 먼저 통과하지만 남쪽 기압골 전면에서 하층제트가 발달하면서 강수대가 먼저 유입

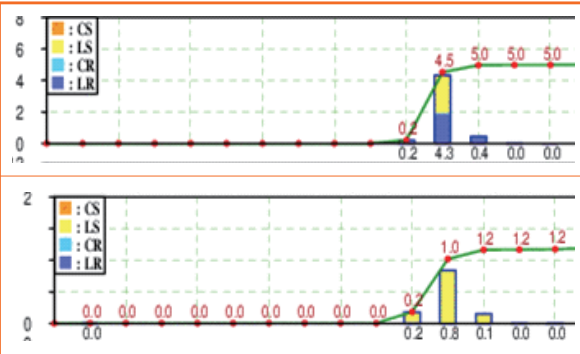


3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

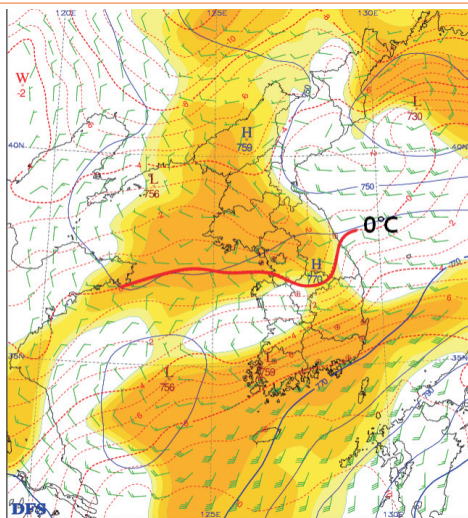
- **(남쪽 기압골 전면 하층제트 발달)** 남쪽 기압골 전면에서 남서풍의 하층제트(850hPa 30~35kts, 925hPa 25~30kts)가 발달하여 16일 새벽 전남남해안부터 강수 시작. 지형적인 영향으로 하층제트의 수렴대가 형성되는 제주도와 남해안을 중심으로 30~40mm의 많은 강수량 모의
- **(북쪽골에 의한 중부지방 강수)** 16일 오전에는 북쪽 기압골의 영향으로 중부지방에도 강수 시작(16일 낮 전국으로 강수가 확대되는 것으로 모의). 중부지방의 강수는 북쪽 기압골이 남쪽 기압골보다 먼저 접근하여 중국북동지방을 통과하면서 기압골 전면의 남서풍이 925hPa 10kts 이하로 약하게 나타남. 기압골 통과 후에는 후면에 하강기류가 지배하면서 남쪽 기압골에 의한 강수대는 북상하기 어려울 것으로 예상함
- **(중부지방의 강수형태)** 낮에는 남해상에서 동진하는 고기압의 가장자리를 따라 남서풍이 지속적으로 유입되면서 기온이 상승하여 강수형태는 대부분 비로 예상. 그러나 16일 오후에 북쪽 기압골이 통과하면서 850hPa에서 한기이류가 나타나고 925hPa 기온이 0°C이하로 떨어지는 강원영서와 경기북부 및 동부, 충북북부, 경북북부내륙에는 적설을 모의함



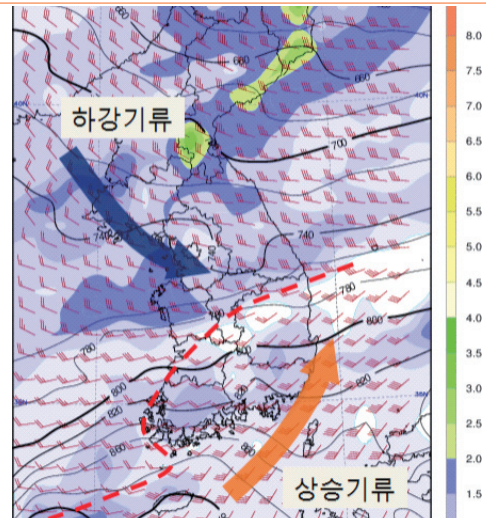
1월 16일 09시(+24h) 850hPa 유선 예상장



연직시계열 강수량(상 이천, 하 춘천)



1월 16일 15시(+30h) 925hPa 상세바람 예상장



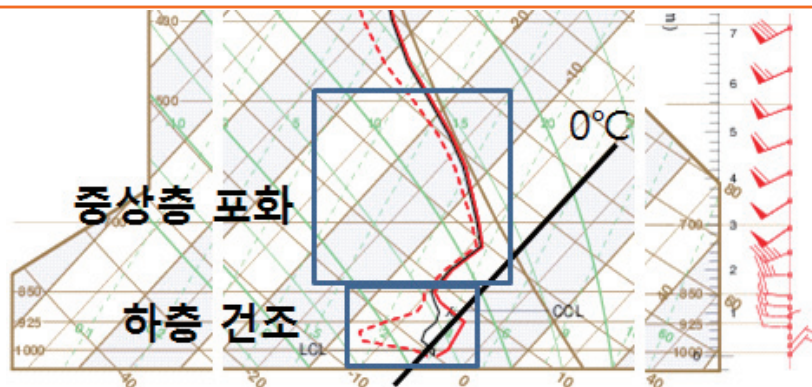
1월 16일 18시(+33h) 290K 등온위면 예상장

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

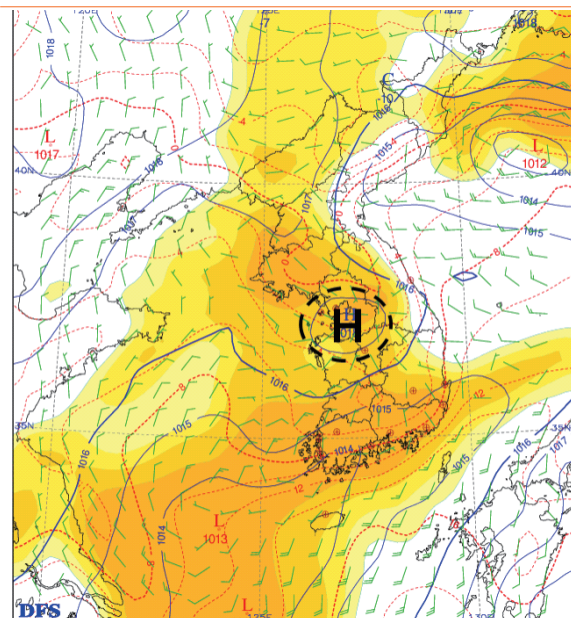
- 중부지방의 중층운에 의한 강수대 약화

- 중부지방으로 중층운이 유입되고 1km 이하 하층에는 영상의 기온을 보이면서 건조역이 분포
- 중층에서 낙하하는 강수입자가 하층의 온난 건조역을 지나면서 증발할 가능성
- 16일 낮까지 중부내륙에 국지 고기압이 버티는 상태에서 북쪽 기압골 전면의 난기이류와 후면의 한기이류가 강하지 않아 기압골에 의한 강수대는 남하하면서 약화될 가능성이 있었음

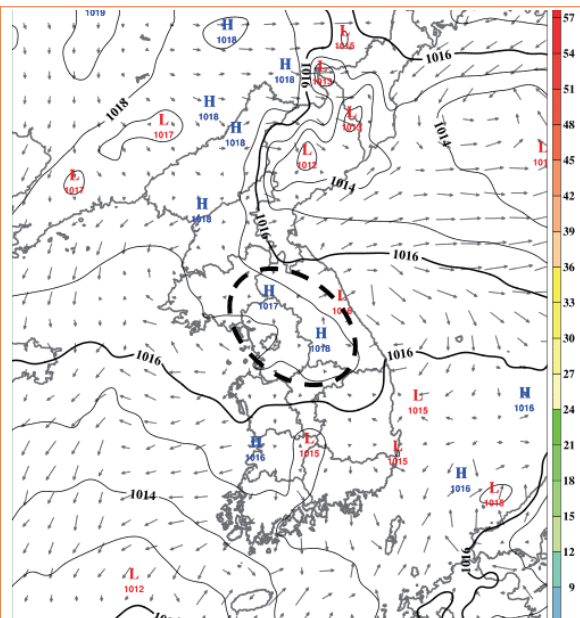
⇒ 북쪽 기압골의 약화로 인해 남쪽 기압골이 예상보다 북상하는 결과



1월 16일 15시(+30h) 오산 예상단열선도



1월 16일 15시(+30h) 지상 예상장

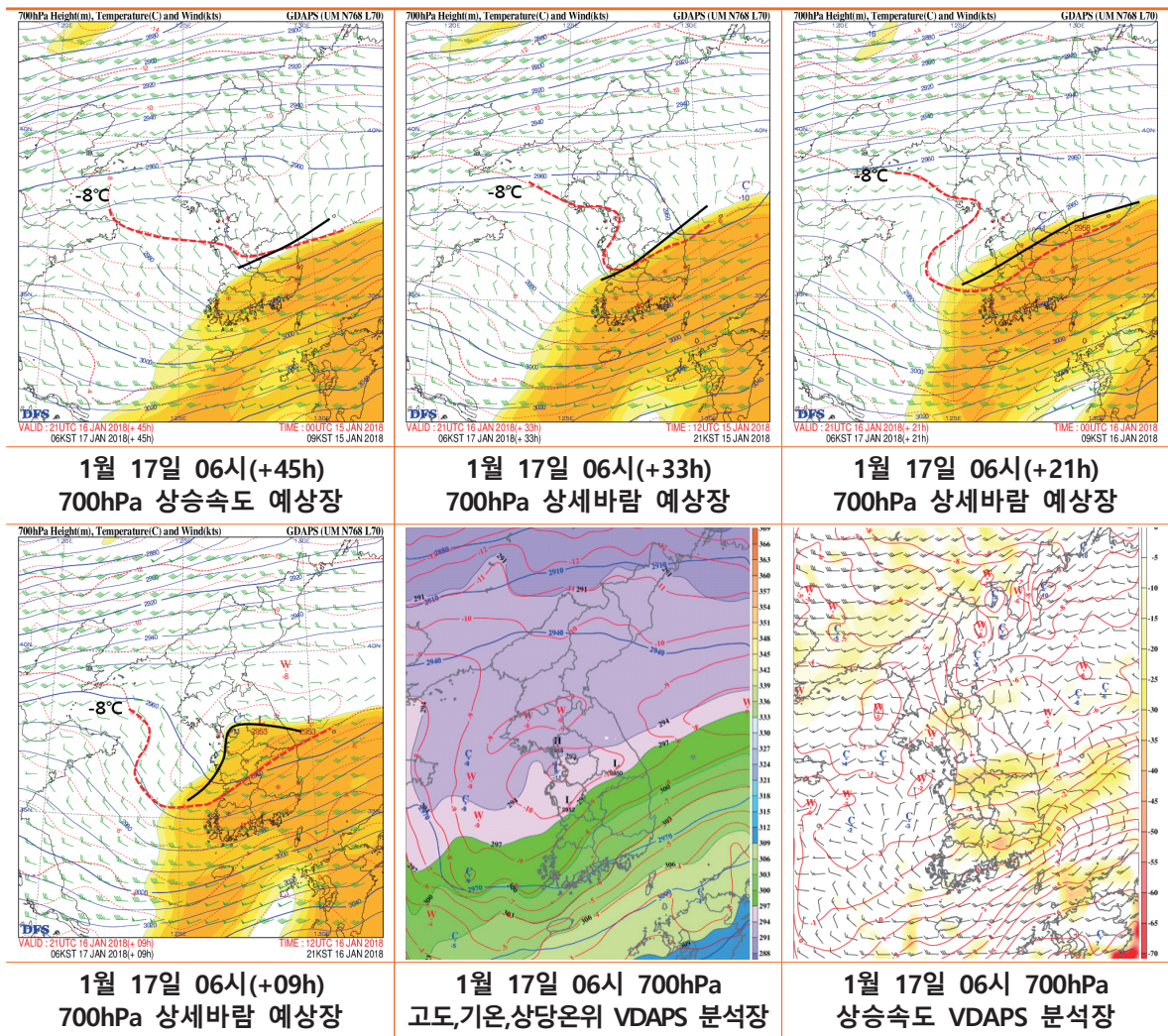


1월 16일 15시 VDAPS 해면기압, 바람 분석장

- 중상층 기압골의 위치 변화 경향

- 남쪽의 지상 저기압이 대한해협으로 빠져나가더라도 중상층 기압골의 중심은 중부지방에 계속 남아있으면서 중층의 상승기류를 유도함

- 예측 시간이 다가올수록 중층 기압골이 더 강해지고 이동은 느려지는 경향을 보임
 - ⇒ 중층 기압골이 예상보다 느리게 빠져나가고 중심이 강해지는 경향
 - ⇒ 북쪽 기압골 후면에서 건조한 북서풍이 유입될 것으로 예상했던 17일 아침까지 중층 기압골 전면에 있으면서 경기남부와 강원남부에 남서풍 계속 유입



5. 향후 유사유형 시 고려해야 할 것은?

- 북쪽 기압골과 남쪽 기압골의 영향을 같이 받을 경우 수증기 유입 경로에 따른 강수 메커니즘 분석이 중요(남쪽 기압골 북상 여부를 분석)
- 지상 저기압이 빠져나가더라도 중상층에 남아있는 기압골의 강도 및 위치 추적에 대한 분석 필요

한랭중관 저기압에 의한 중부지방 중심의 강수

- 저기압은 어디로 지나가는지, 이동경로 변동성 중요 -

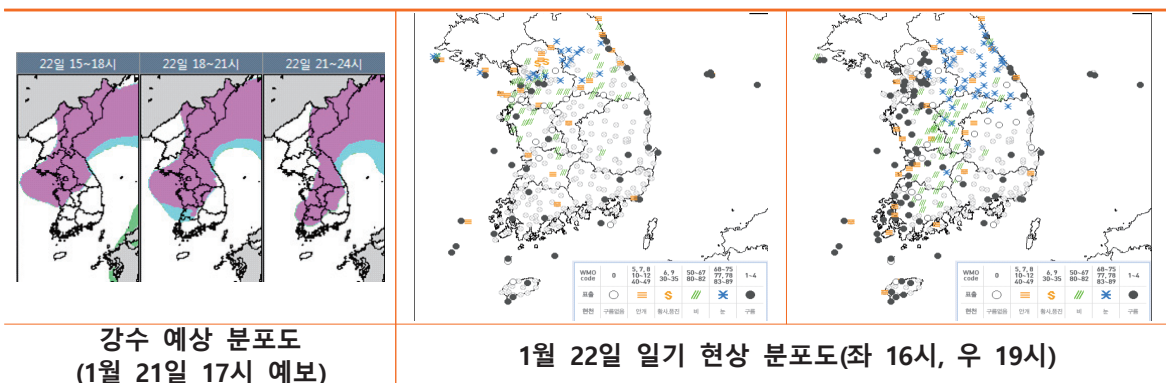
1. 예보와 실황은?

예보 (1월 21일 17시 발표)	실황
<ul style="list-style-type: none"> ▶ 예상 강수량 <ul style="list-style-type: none"> - 전국: 5mm 내외 - 제주도: 5~20mm ▶ 예상 적설 <ul style="list-style-type: none"> - 강원도(동해안 제외): 3~8cm - 서울, 경기도, 충청도, 제주도산지, 강원동해안: 2~5cm - 전라도, 경남서부내륙, 경북내륙: 1~3cm 	<p>충청도와 전라도의 강수형태를 눈으로 예보하였으나 → 대부분 비로 내리면서 예보보다 적은 적설 기록</p>

최심신적설 현황(cm)

수도권 동두천 9.5 신서 6.5 파주 6.0 하면 5.0 의정부 4.5 양평 2.0 남양주 1.4 서울 1.0
충청도 제천 2.0 수안보 1.0 청주 0.4
강원도 (내륙) 면온 14.0 대화 12.0 철원 7.8 북평 6.0 평창 5.5 북춘천 5.0 인제 4.5 안흥 4.5
(산지) 미시령 17.0 스키점프 8.3 진부령 7.9 대관령 7.0 진부 7.0 태백 5.0 용평 5.0
(동해안) 양양 7.0 속초 6.4 북강릉 5.1 간성 5.0
경상도 석포 7.5 수비 4.0 봉화 3.0 영주 0.5

- 충청이남 지역의 강수가 비로 시작되었기 때문에 한랭전선으로 인해 일부지역의 강수 형태가 비에서 눈으로 바뀌었어도 적설이 쌓이기 힘들었음
- 강원영서의 강수형태는 잘 예보했으나 산지와 일부 내륙에 예보보다 많은 눈(10cm 이상) 이 기록됨

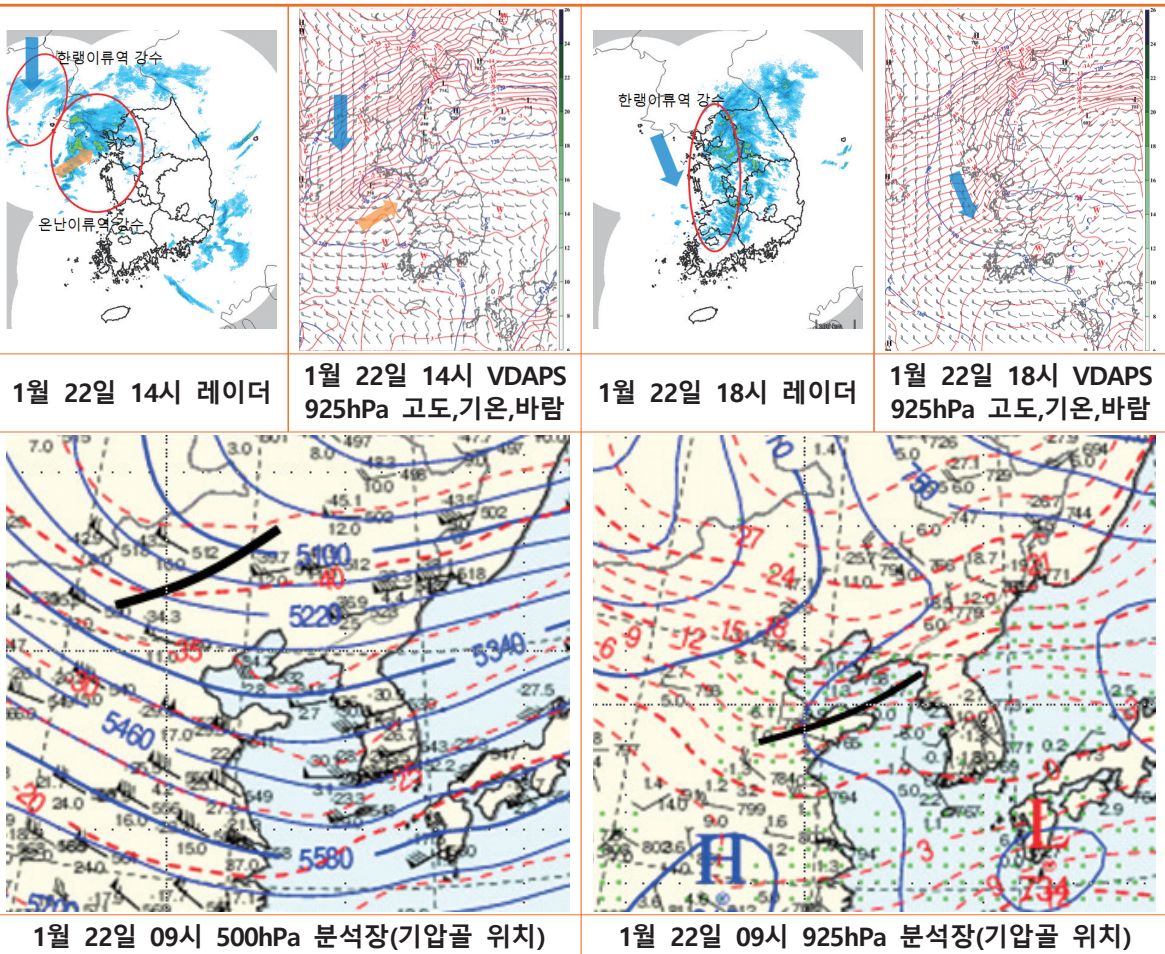


2. 강수메커니즘은?

- (한랭중관저기압 통과) 500hPa 강한 양의 와도역의 지원을 받는 한랭중관저기압이 산둥 반도에서 동진하여 경기북부를 통과. 저기압 전면에서 남서풍의 온난이류에 의해 발달한 강수대가 유입되었다가 저기압 후면에서 남하하는 한기에 의해 하층 시어역에서 강

수대 발달. 그러나 상층기압골 후면의 한기 이류가 약하고 저기압을 받쳐주는 고기압이 남쪽에 존재하지 않아 저기압 세력을 유지하는데 불리함

- **(기압골 연직구조)** 상하층간 기압골의 위치가 멀어 즉, 남북방향으로 기압골의 기울기가 완만한 형태로 기압골 후면의 한랭이류가 약해 지상 저기압이 크게 발달하기 힘든 역학적 구조. 특히 한랭이류에 의해 강수가 내릴 때는 상층의 지원이 거의 없는 상태이므로 하층 시어(북서풍-남서풍)역에 의해서만 발생
- **(강수형태)** 저기압 중심이 경기북부를 지나면서 중부지방까지 남서풍이 원활하게 유입되어 온난역에 들면서 대부분 비로 내림. 그러나 수도권과 강원도는 남서풍의 풍속이 925hPa 10kts로 약하고 925hPa 기온이 영하권이어서 대부분 눈의 형태. 저기압 후면에서 한기가 이류될 때 기온이 떨어지면서 충청도와 전라도의 강수형태도 차츰 눈으로 바뀜

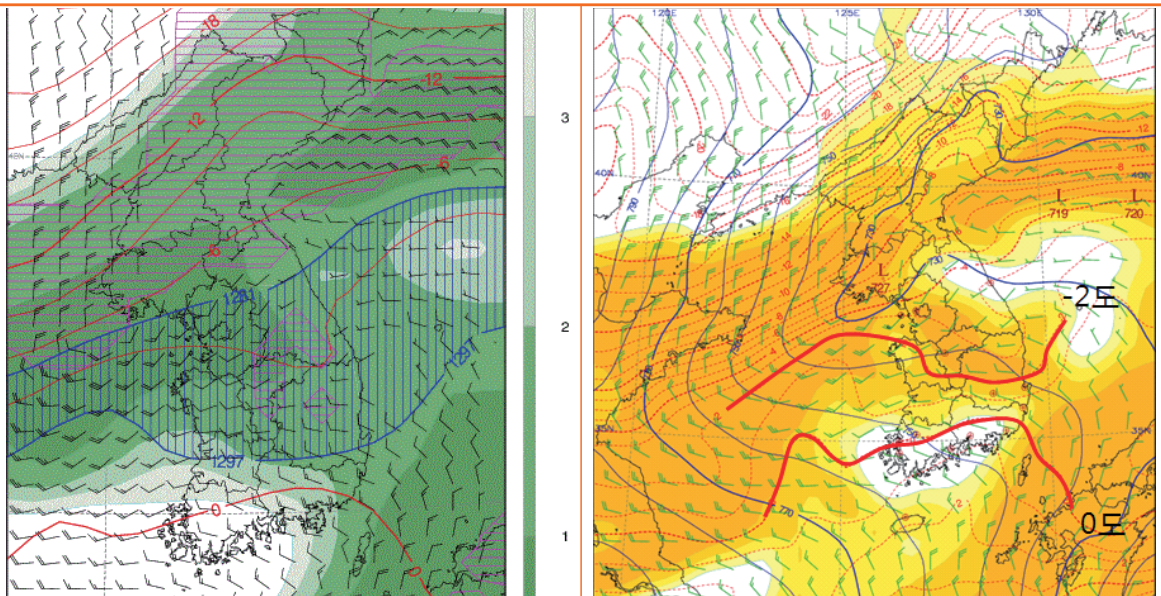


3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

- **(저기압 발달)** 500hPa 단파골의 지원을 받아 지상 저기압 발달. 저기압 전면에서 남서풍이 유입(850hPa 20~30kts, 925hPa 15~25kts)되는 온난이류역에서 강수가 시작된 후 저기압 후면의 강한 한기이류(850hPa 25~30kts, 925hPa 25~30kts)로 인해 한랭전선이

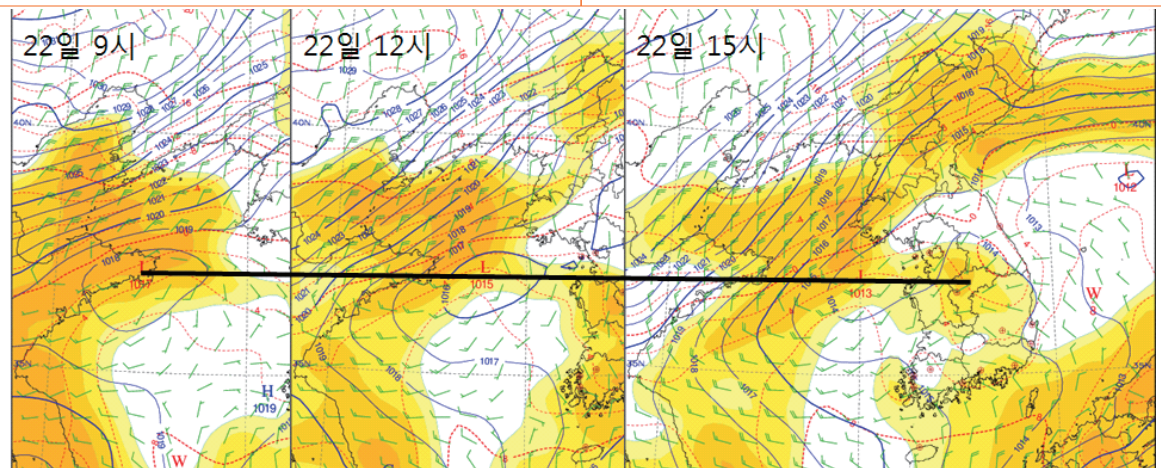
발달하면서 강수 종료

- **(강수 형태)** GDAPS 상세바람예상장에서 925hPa 0°C선이 남해안에 위치하면서 하층 기온이 낮게 형성되고 1000-850hPa 층후 예상장에서도 남부지방을 제외한 대부분 지역이 눈/비 혼재구역에 들어있는 것으로 모의. 한랭전선이 통과하면서 남부지방의 강수형태도 비에서 눈으로 바뀌면서 강수 종료될 것으로 모의
- **(저기압 이동 경로)** 산둥반도 - 서해상 - 경기남부로 이어지는 저기압 이동경로를 모의하여 저기압 전면에서 온난이류의 영향을 받는 지역이 충청이남으로 제한됨



1월 22일 15시 1000-850hPa 층후도

1월 22일 15시(+30h) 925hPa 상세바람예상장

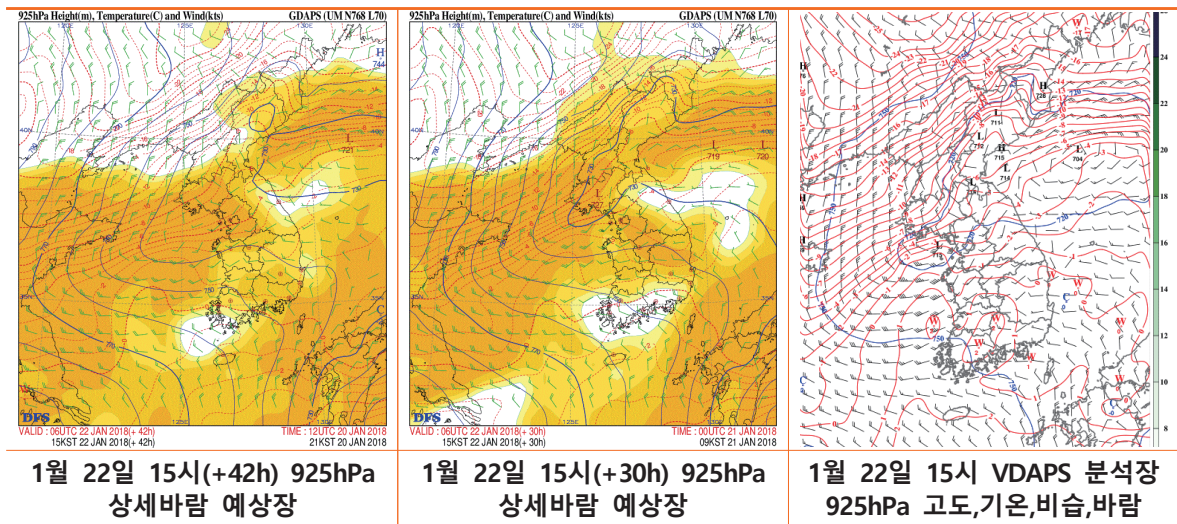


1월 22일 지상 상세바람 예상장(21일 09시 모델)

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면...

- 모델 발표 시간에 따른 저기압 이동경로의 변화 경향을 살펴봤더라면
 - 지상 저기압이 모델 예상보다 약간 북상하여 지나면서(경기남부 통과 예상 → 경기북부 통과) 중부지방의 난기 유입이 원활해짐

- 925hPa 상세바람 예상장에서 저기압 중심을 경기남부에서 경기북부로 점차 북상시키는 경향을 보이고 있었음
- 서울 및 경기남부와 충청북부에는 온난이류에 의해 하층 기온이 영상을 유지하면서 강수가 비로 시작하여 적설이 적었던 반면, 기온이 낮게 유지되어 눈으로 내린 경기북부와 강원산지에는 강제상승 등 지형적인 영향과 원활한 온난이류에 의해 예상보다 적설이 증가



5. 향후 유사유형 시 고려해야 할 것은?

- 저기압의 이동 경로에 따라 온난역의 영향을 받는 영역도 달라짐
- 특히 저기압 전면에서 925hPa과 지상 사이에 나타나는 온난이류로 인해 강수의 상변화가 일어날 수도 있는 경우에는 온난역의 북상여부를 살펴야함

남해상을 지나는 저기압에 의한 남부내륙 적설

- 저기압의 이동 속도 및 경로 변화를 주시했다면 -

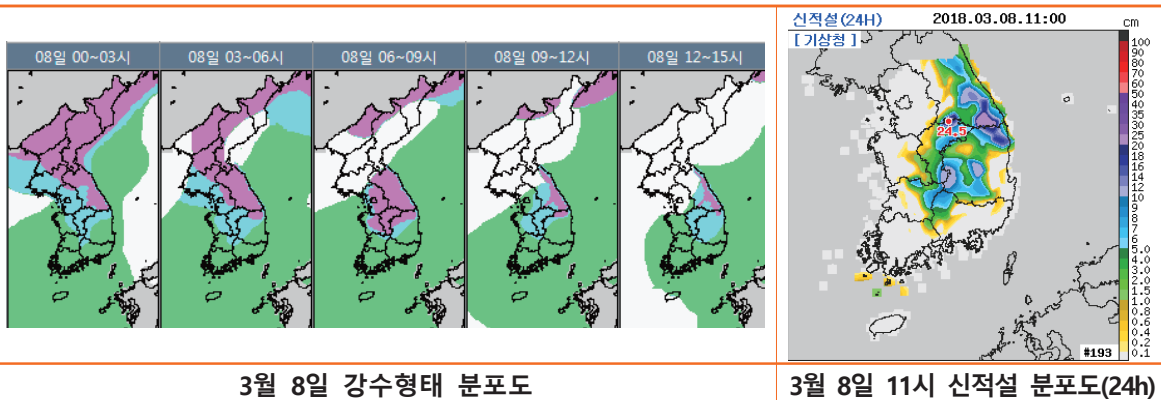
1. 예보와 실황은?

예보 (3월 7일 05시 발표)	실황
<ul style="list-style-type: none"> ▶ 예상 강수량 <ul style="list-style-type: none"> - 제주도, 전남, 경남 : 20~60mm(많은 곳 제주도 산지, 경남남해안 80mm 이상) - 전북, 강원동해안, 강원산지, 충청도, 경북 : 10~40mm - 서울·경기도, 강원영서(산지 제외): 5mm 내외 ▶ 예상 적설 <ul style="list-style-type: none"> - 강원산지, 강원동해안, 경북북동산지: 5~10cm (많은 곳 강원산지 20cm 이상) - 강원영서(산지 제외), 충북, 경북북부: 2~5cm - 경기동부, 경북남부내륙, 경남북서내륙, 전북북동내륙, 제주도산지: 1cm 내외 	충청이남 내륙에 예상보다 많은 적설 기록

최심신적설 현황(cm)

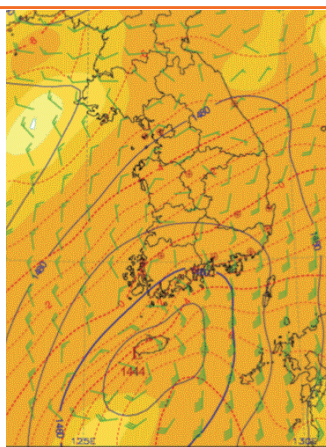
충청도	괴산 12.0	추풍령 11.7	수안보 9.5	제천 8.0	단양 7.2	옥천 4.4	세종금남 3.0	금산 2.5	
강원영서	사북 26.2	면온 14.5	대화 8.5	해안 8.1	안흥 5.5	북평 4.5	평창 3.5	기린 3.2	양구 3.0
강원영동	태백 25.5	임계 20.5	용평 19.5	대기리 17.0	스키점프 13.9	대관령 13.5	미시령 12.0		
경상도	석포 23.6	수비 17.6	군위 11.4	김천 11.0	봉화 10.0	거창 9.7	성주 9.0	대구 7.5	
전라도	무주 9.0	장수 7.5	진안 6.0	김제 1.4	고창군 0.4	전주 0.2			
제주도	어리목 0.8								

- 3월 8일 7시 30분 대구 대설주의보 발표
- 남부내륙은 비로 시작해 눈/비로 바뀌어 이어질 것으로 예상하였으나 눈으로 내리면서 적설 증가

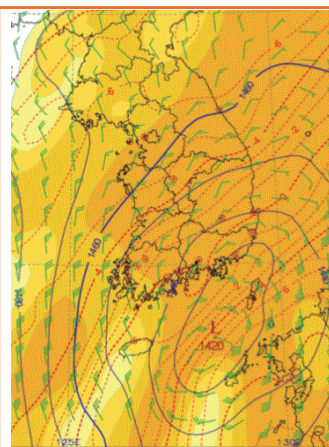


2. 강수메커니즘은?

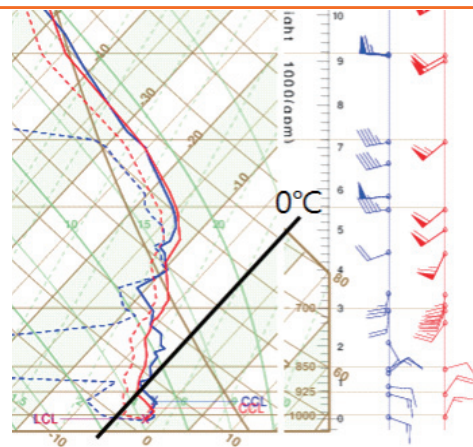
- **(상층 지원)** 중국 중부내륙에 있는 500hPa 단파골의 지원으로 상해부근에 있던 하층 기압골이 북동진하면서 제주도 남서쪽 해상에서 지상 저기압으로 발달. 상층까지 남서풍이 불면서 상승기류가 발달하여 포화층이 두껍게 발달
- **(저기압 전면 하층제트 유입 제한)** 남쪽 저기압과 일본 동쪽 고기압 사이에서 기압경도력이 증가하면서 하층 제트가 발달하여 850hPa 남풍이 30~40kts로 강하게 불면서 수증기가 공급됨. 그러나 하층제트는 남해상에 위치하며 남부지방에 유입되지 못함
- **(하층 북동풍 유입)** 상층까지 난기가 이루어지는 가운데 하층 저기압 북쪽 사면에는 850hPa 이하 고도에서 북동~동풍이 불면서 강한 연직시어에 의해 상하층 공기가 활발히 혼합됨. 특히, 하층 저기압이 대한해협으로 빠져나갈 때 저기압 북쪽에 해당하는 동해안 지역으로 북동풍이 불면서 한기가 유입되고 이때 강수 피크가 나타남
- **(남부내륙 강수형태)** 8일 새벽 저기압이 제주도 남쪽해상을 통과하면서 남부내륙까지 전면의 강한 남서풍이 유입되지 못하고 바람이 약하게 불면서 기온이 하강하여 강수형태가 비에서 눈으로 바뀜



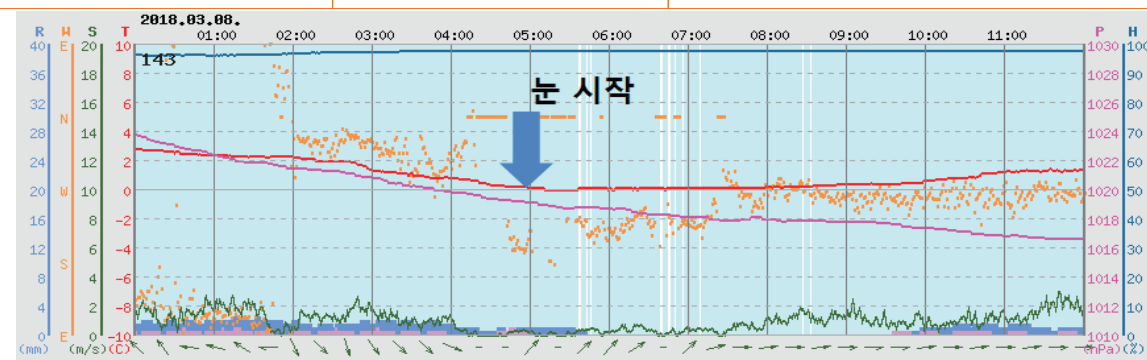
3월 8일 03시 850hPa
상세바람장 초기장



3월 8일 09시 850hPa
상세바람장 초기장



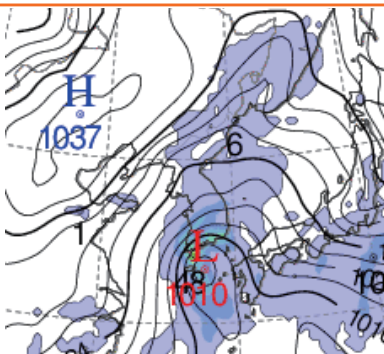
2월 7일 21시 흑산도 단열선도



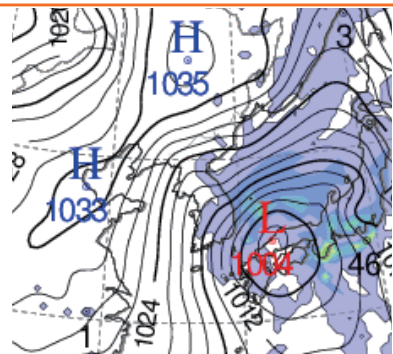
3월 8일 대구 시계열

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

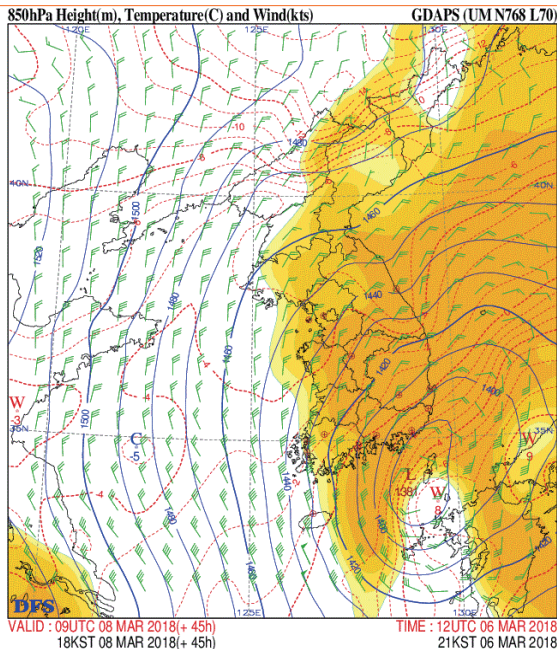
- 지상 저기압이 8일 새벽 제주 서쪽해상으로 접근하여 8일 밤 대한해협으로 이동. 저기압 전면 850hPa, 925hPa에서 남동~남풍이 45~50kts로 강하게 불면서 수증기 공급이 활발한 남부지방에 강수가 집중되고 난기 유입으로 인한 기온 상승으로 강수 형태는 주로 비 또는 비에 가까운 눈/비가 될 것으로 예상함
- 8일 새벽 대구 강수형태의 경우 700hPa 이상 고도에서 남서풍이 40kts로 불면서 난기가 이루어지는 가운데 850hPa 이하에는 동풍계열의 바람이 불면서 강한 연직시어에 의해 대기가 혼합되어 925hPa 이하의 기온이 0°C 이상인 연직 구조를 모의
- 강수 피크는 저기압이 대한해협으로 이동하여 저기압의 북쪽 사면에 북동풍이 850hPa 20~35kts로 유입되면서 한기가 파고드는 8일 오후가 될 것으로 예상. 그러나 북동풍이 불면서 동해안을 중심으로 기온이 하강하지만 등온선에 나란하게 유입되면서 한기 이루는 강하지 않아 지상 기온은 영상으로 유지될 것으로 예상



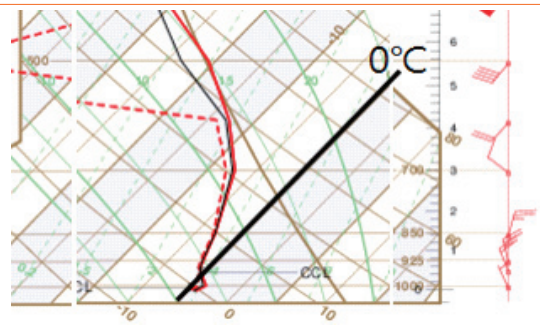
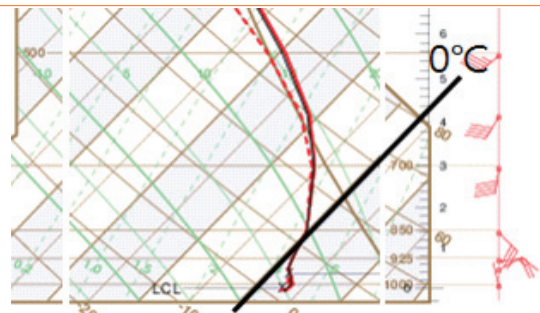
3월 8일 09시(+36h) 지상 예상장



3월 8일 21시(+48h) 지상 예상장



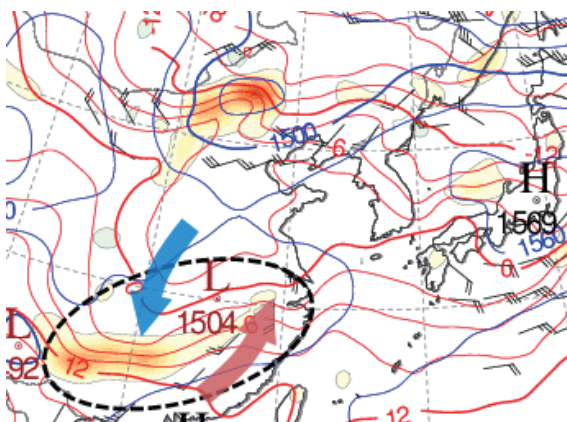
3월 8일 18시(+45h) 850hPa 상세바람 예상장



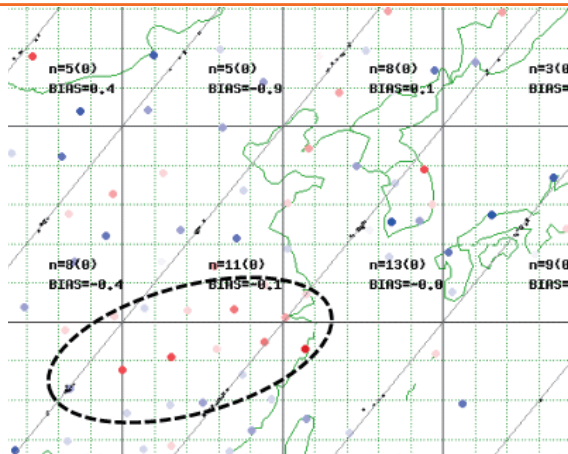
(상) 3월 8일 06시(+21h) 대구 예상 단열선도
(하) 3월 8일 18시(+33h) 대구 예상 단열선도

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

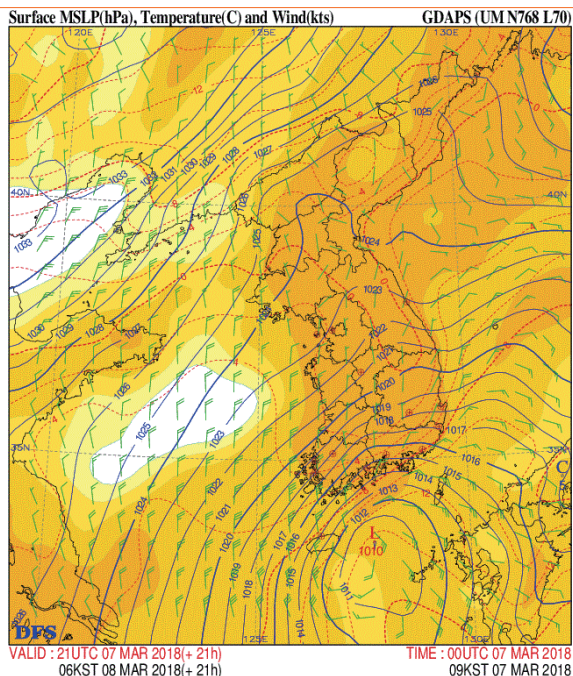
- 저기압 이동 속도가 빨라지는 경향을 실험분석을 통해 알았더라면
 - 남쪽 골의 이동속도가 모델 예상보다 빠르고 이동 경로도 모델이 모의했던 것보다 더 남쪽으로 쳐짐(제주도 남쪽해상을 통과하면서 북동진)
 - 저기압이 남하하면서 난기가 모델이 모의했던 만큼 남부지방까지 강하게 유입되지 못하고 하층에 북동풍이 불면서 한기 유입. 즉 기온이 예상했던 것보다 낮음
 - 모델 예상장을 통해 8일 오후라고 예상했던 강수 피크(저기압 북쪽에서 북동풍이 불며 한기가 유입되는 시점)가 8일 아침에 나타남
 - ⇒ 8일 아침 예상보다 강한 강수가 내리면서 기온이 하강
 - ⇒ 영하층 고도에서 형성된 눈이 FL고도를 지나며 녹아 비로 바뀌면서 융해열을 흡수하여 주변 대기의 기온이 하강
 - 3월 7일 09시 실험분석을 통해 중국남부내륙의 온도조밀구역에 저기압 전면 난기 이류는 약하고 후면의 한기 이류는 강해 모델 예상과는 다르게 남쪽 저기압이 빠르게 이동하고 북상이 예상보다 어려울 것을 알 수 있음



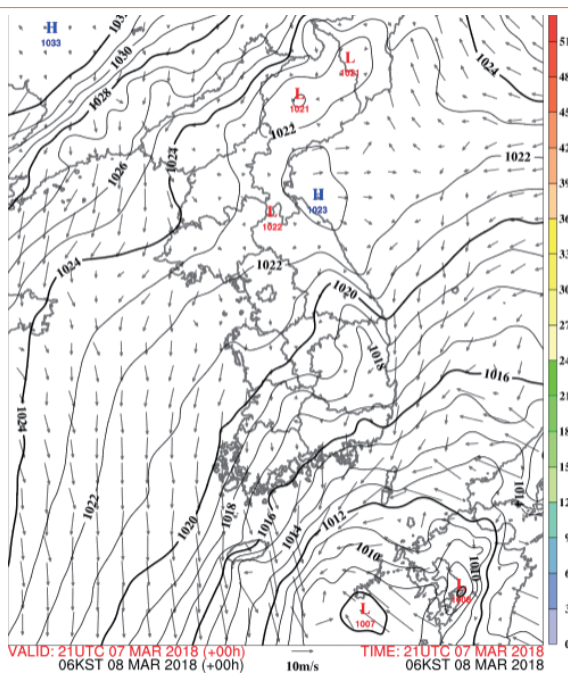
3월 7일 09시 850hPa 전선, 고도, 기온 초기장



3월 7일 09시 850hPa 기온 GDAPS-GTS



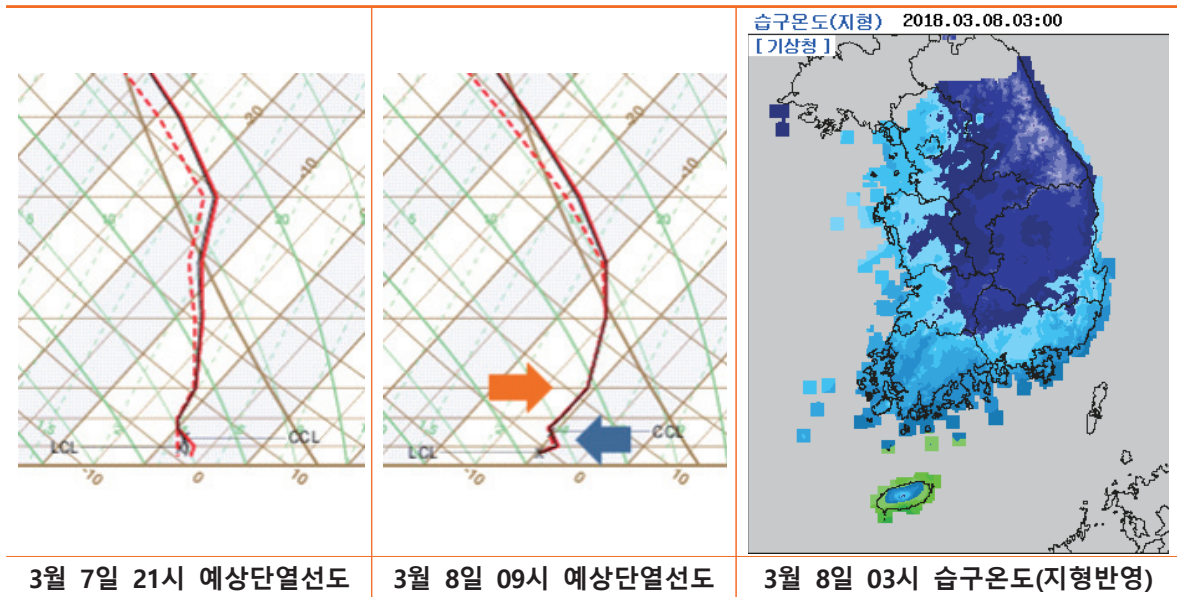
3월 8일 06시 지상 상세바람예상장



3월 8일 06시 VDAPS 해면기압, 바람

● 습구온도를 통한 실황 대처

- 강수 유입 전 습구온도의 실황 분포를 통해 강수 형태 예측 가능
- 강수가 시작되면서 850hPa에는 하층제트가 강화되어 기온이 오르지만 지상에서는 영하층에서 내리던 눈이 비로 바뀌면서 융해열에 의해 주변 대기 기온이 하강
 - ⇒ 하층의 기온도 영하권에 도달하면서 강수형태가 눈이 될 가능성 시사
 - ⇒ 8일 새벽 습구온도도 영하를 보이고 있었음



5. 향후 유사유형 시 고려해야 할 것은?

- 강수의 비단열 과정 시 모델의 예상단열선도가 잘 모의하지 못하는 경향을 보이므로 강수형태의 변화가 예상될 때는 저기압의 이동경로에 따른 난기 유입의 강도, 하층 기온의 변화 등을 고려해야함. 또한 습구온도의 실황 감시를 통해 초단기적인 대응도 필요

북쪽 기압골 통과 후 남쪽 저기압, 중층 난기 유입으로 인한 강수 - 하층이 건조한 줄 알았는데 -

1. 예보는 어떻게 발표되었나?

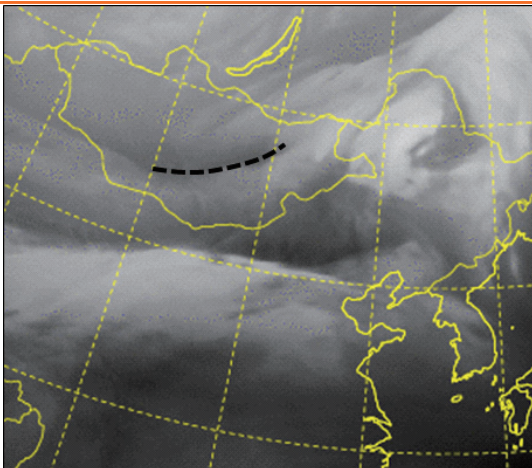
2019년 1월 29일 17시 발표	실황
<ul style="list-style-type: none"> ▶ 예상 강수량 <ul style="list-style-type: none"> - 제주도: 10~40mm - 남해안: 5~20mm - 남부지방: 5~10mm - 충북남부: 5mm 미만 ▶ 예상 적설 <ul style="list-style-type: none"> - 제주도산지: 5~15cm - 남부지방, 제주도: 1~5cm - 충북남부: 1cm 내외 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 강수량 <ul style="list-style-type: none"> - 제주도: 10~30mm - 남해안: 5~20mm - 남부지방: 5~10mm - 충청남부: 5mm 미만 ▶ 적설 <ul style="list-style-type: none"> - 제주도산지: 5~15cm - 남부지방: 1~5cm(지리산, 덕유산 부근 5~10cm) - 충청남부: 1~3cm

2. 쟁점사항은?

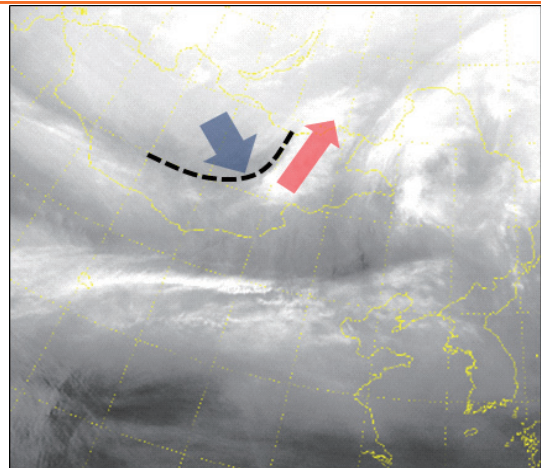
- 쟁점1) 남쪽 저기압 강수 구역은 어디까지?
- 쟁점2) 남부지방의 대설 가능성?

3. 주요 분석내용

- 쟁점1) 남쪽 저기압에 의한 강수 구역은 어디까지?



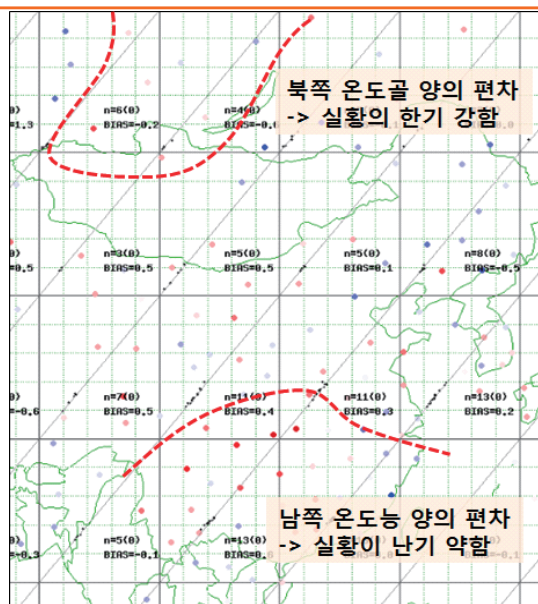
1월 29일 09시 수증기 모의 영상



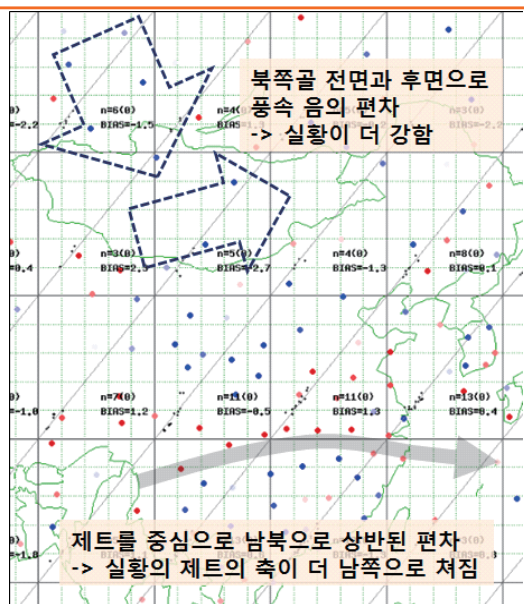
1월 29일 09시 히마와리 수증기 영상

- 북쪽 기압골 통과 후 남쪽 기압골이 접근하므로 700hPa 남서기류(남쪽 기압골 전면이 자 남쪽 고기압 가장자리)와 북서기류(북쪽 기압골 후면)가 수렴되는 곳에서 강수 발달 예상

- 북쪽 기압골이 먼저 통과한 후에 700hPa 이하 층으로 북서기류 남하
⇒ 강수역 북상을 저지하는 역할
- 전일(29일) 09시를 기준으로 수증기 모의 영상보다 북쪽 건조역 더 깊게 남하
⇒ 모델 예상보다 기압골 깊어지면서 북쪽 한기가 강하게 남하할 것으로 예상
- 북쪽의 한기는 예상보다 강하게 남하하고 남쪽의 고압부는 예상보다 쳐져 있어 받쳐주는 힘이 약했음 ⇒ 강수역 크게 북상하지 못할 것으로 예상

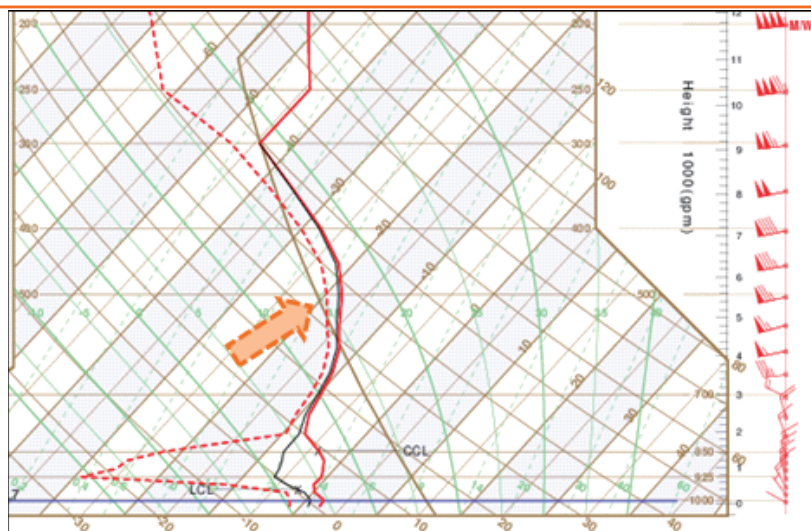


1월 29일 09시 500hPa 모델 기온 편차



1월 29일 09시 500hPa 모델 풍속 편차

● 쟁점2) 남부지방의 대설 가능성?



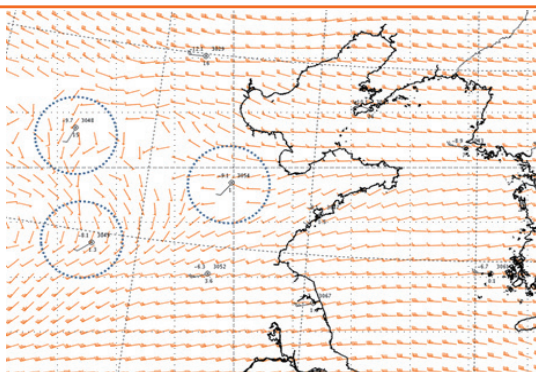
1월 31일 09시 대구 예상 단열선도

- 눈이 잘 발달할 수 있는 구간(-12°C~-16°C)에 포화층이 형성되나,
- 700hPa 이상에서는 난기가 유입되지만 하층에는 북서풍이 불면서 건조

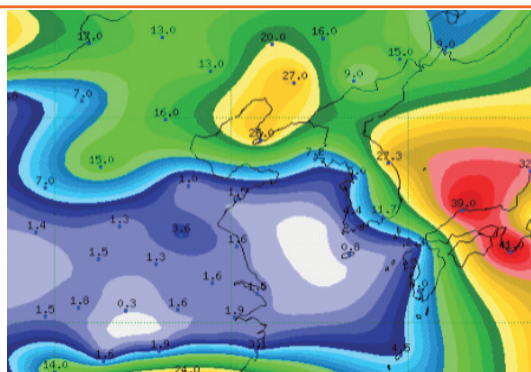
- 또한 남쪽 기압골 전면에서 유입되는 700hPa 층의 난기가 모델 예상보다 약한 것으로 판단 ⇒ 강수형태는 눈이지만 하층이 건조하므로 고도가 높은 산지 위주로 적설이 쌓일 것으로 예상하였음

4. 무엇을 더 고려했어야 했나?

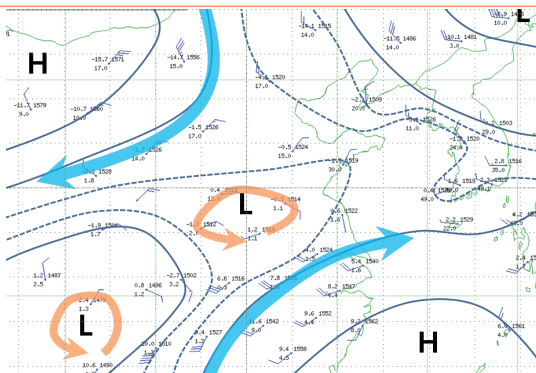
- 남서풍 유입 영역 복상
 - 당일(30일) 09시 GTS를 통해 산동반도 부근에서 700hPa 남서풍이 불고 있는 것을 확인 → UM 모델이 예상한 것보다 복상한 영역에서 남서풍 유입 → 700hPa 기류가 수렴되는 곳이 예상보다 북쪽에서 나타날 가능성
- 하층 수증기 공급
 - 당일(30일) 09시 700hPa 습수역은 산동반도까지 형성되어 있으며 850hPa 하층 습수역도 산동반도 남부까지 분포되어 있음
 - 남쪽 고기압 가장자리의 남서류와 북서쪽 대륙 고기압 가장자리의 북동류 사이에서 하층 저기압성 회전이 발달
 - 남부지방은 하층 저기압 전면에서 북동풍이 유입되면서 건조역 남하 저지
 - ⇒ 하층 저기압에 동반된 습수역이 유입되면서 중층부터 하층까지 눈이 형성되기에 좋은 조건 갖추



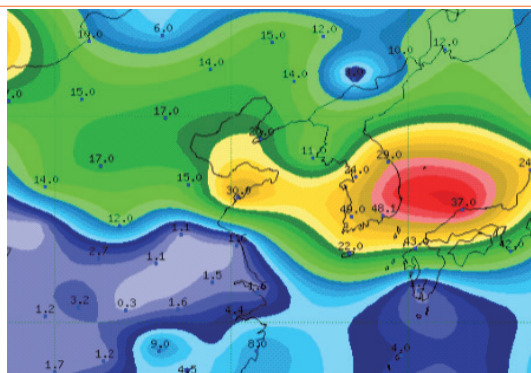
1월 30일 09시 700hPa 풍향 비교(UM-GTS)



1월 30일 09시 700hPa GTS 습수



1월 30일 09시 850hPa GTS 분석

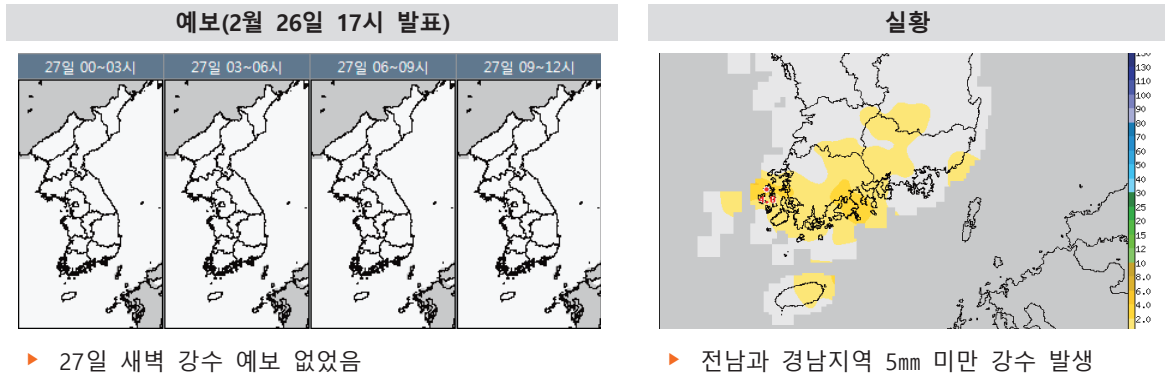


1월 30일 09시 850hPa GTS 습수

예보하지 않았던 남쪽 저기압 강수

- 수증기 영상을 통한 실황분석을 했더라면 -

1. 예보는 어떻게 발표되었나?

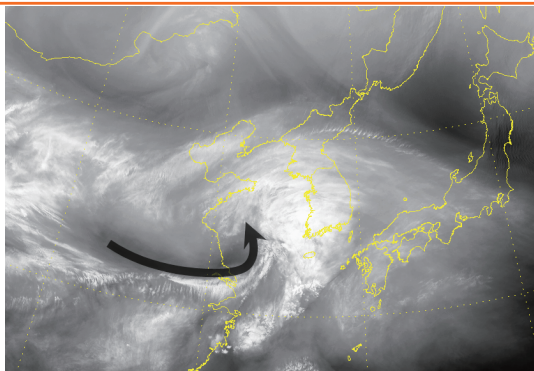


2. 쟁점사항은?

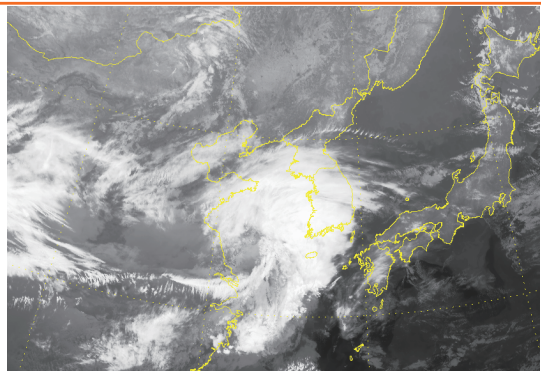
- 쟁점1) 27일 새벽 강수 발생 원인은?
- 쟁점2) 예보에 없었던 강수, 실황에서 알 수 없었나?

3. 주요 분석내용

- 쟁점1) 27일 새벽 강수 발생 원인은?



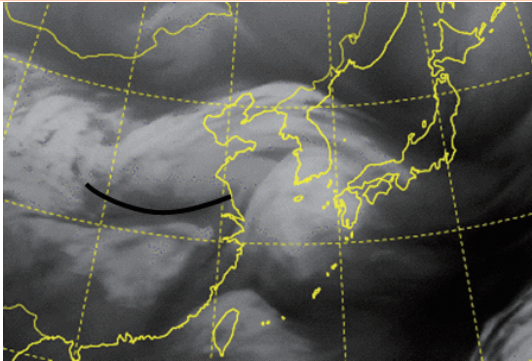
2월 27일 00시 히마와리 수증기 영상



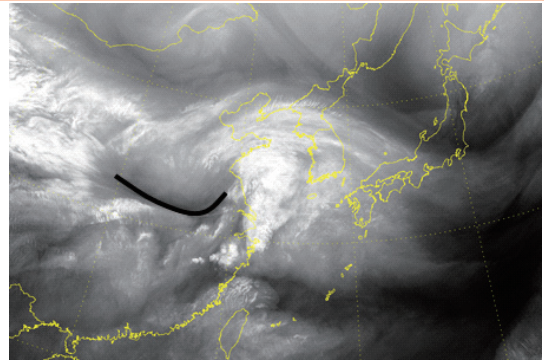
2월 27일 00시 히마와리 적외 영상

- 상해 서쪽에 상층 기압골+서해상에 기압능 발달
- 기압골 후면에 동반된 건조역이 말려들어가면서 콤마형의 구름대 발달
- 전일(26일 09시 모델) 예상장에서는 서해상과 동해상에 고기압이 위치하면서 27일 새벽에는 남쪽 저기압에 의한 강수가 유입되지 않을 것으로 모의

● **쟁점2)** 예보에 없었던 강수, 실황에서 알 수 없었나?

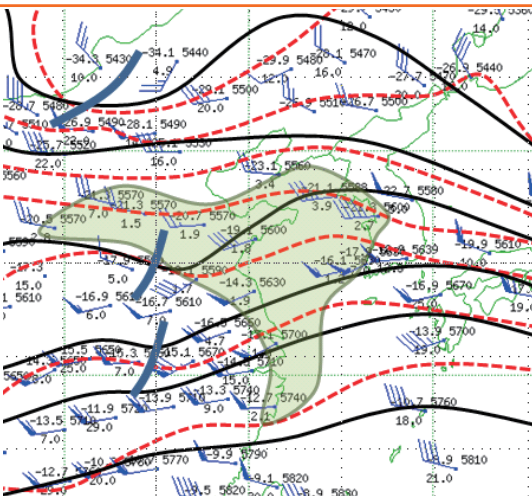


2019년 2월 26일 21시 모델 예상장(+12h)
(위) 수증기 (아래) 적외영상

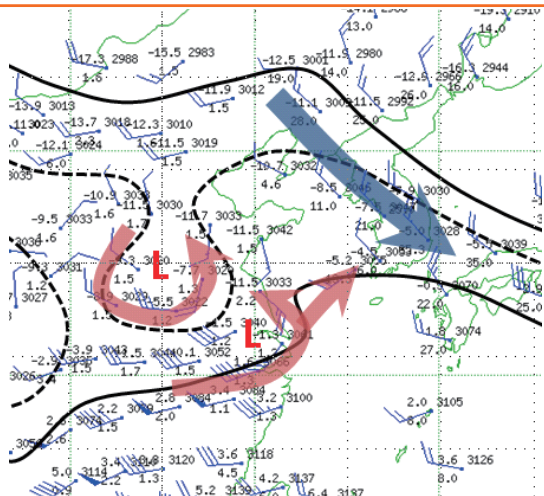


2019년 2월 26일 21시 히마와리 위성 영상
(위) 수증기 (아래) 적외영상

- 26일 21시 히마와리 위성의 수증기 영상과 UM 모델 수증기 예상장을 비교해보면 상해 서쪽 기압골 후면의 건조역이 예상보다 깊게 유입되고 있는 것을 알 수 있음 ⇨ 모델 예상보다 기압골 발달한 상태
- 기압골이 발달하면서 전면의 구름대도 예상보다 발달
- 우리나라 대부분은 서쪽 기압능 전면에서 북서기류의 하강류가 나타나지만 흑산도에는 상해부근 기압골 전면의 남서기류(700hPa)가 유입됨



2월 26일 21시 500hPa GTS 분석장

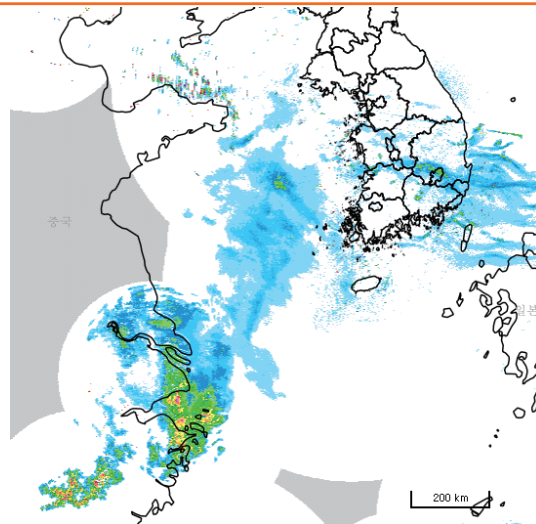


2월 26일 21시 700hPa GTS 분석장

- (500hPa GTS 분석) 상해 서쪽뿐만 아니라 산둥반도 서쪽에도 기압골이 존재하고 있음을 확인
- (700hPa GTS 분석) 산둥반도 서쪽 저기압 후면의 침강 공기가 상해 부근 기압골 후면으로 유입됨 ⇨ 건조 공기가 예상보다 깊게 유입되면서 전단이 말려들어가는 형태로 발달함

4. 무엇을 더 고려했어야 했나?

- 실황분석을 통한 초단기 예보
 - 26일 21시 레이더 영상에서 서해상과 상해 부근에 이미 에코가 나타나고 있었고 수증기 영상에도 건조역이 예상보다 깊은 형태를 보이면서 전면의 구름대가 발달하고 있음을 사전에 감지 할 수 있었음



2월 26일 21시 한중일 레이더 영상

- 아열대 제트에 동반되어 있는 남쪽 기압골의 경우 동서 흐름이 강해 건조역 전면에서 구름대가 강하게 발달하지 못하고 빠르게 흘러갈 것으로 예상했음
- 그러나 이번 사례와 같이 뒤따르는 기압골이 남쪽 기압골 발달을 돕는다면 모델 예상보다 건조역이 깊게 유입되면서 콤마형 구름까지도 발달할 가능성이 있다는 사실을 고려해야 할 것임

겨울 예보 가이드스

부 록

업무매뉴얼 요약

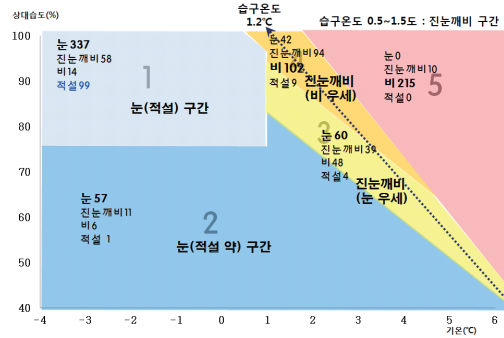
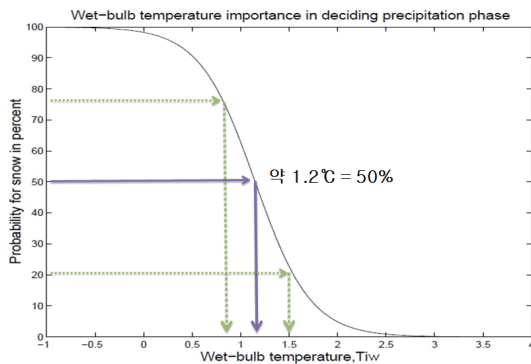


강수형태 판별 순서

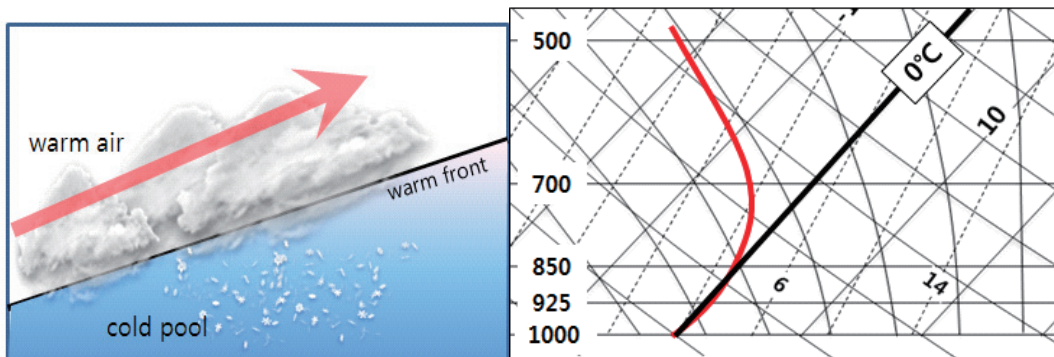
□ 종관규모 : 1000-850hPa 층후선도를 이용한 광역적 구분

층 후	기준 gpm	gpm 간격
1000-850hPa	1281(눈), 1297(비)	16gpm
1000-700hPa	2762, 2810	48gpm
1000-500hPa	5237, 5357	120gpm

□ 중규모 : 습구온도(1.2°C)를 이용한 지역별 강수형태 구분

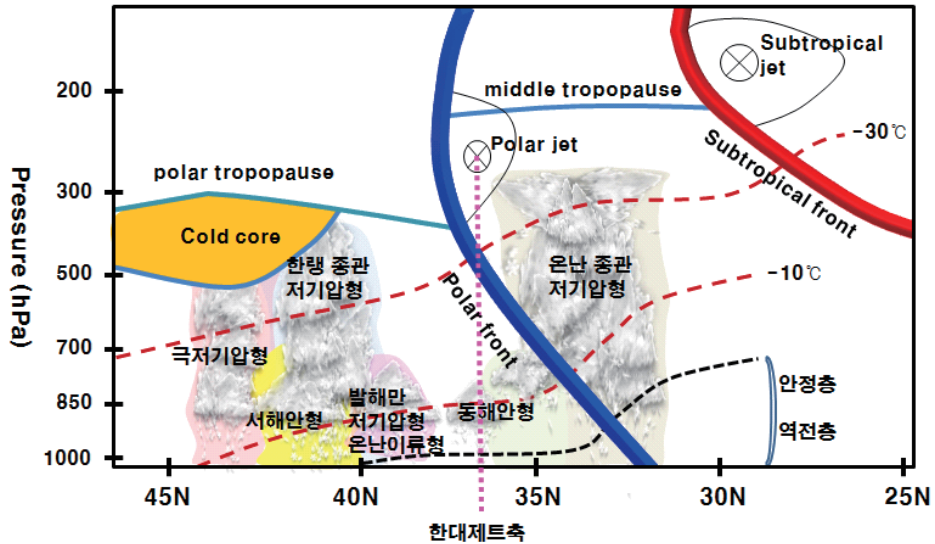


□ 남쪽으로 지상저기압 통과시 구분(925hPa 0~1°C, 850hPa 0°C)
층후선도에서 비 구역에서 눈이 오는 경우 있음

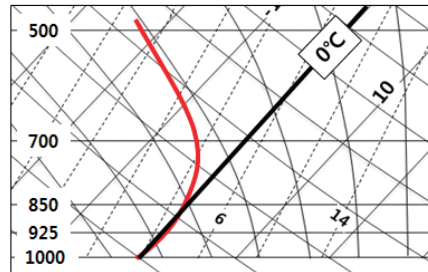
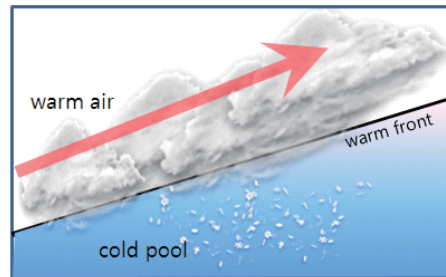
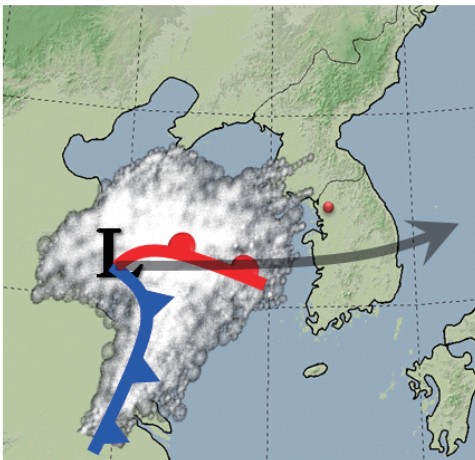


시스템별 강수형태 판별

유형별 강수형태 구분 방법



1. 발달한 저기압 : 지상 저기압 중심이 관측소 남쪽을 통과하는 경우

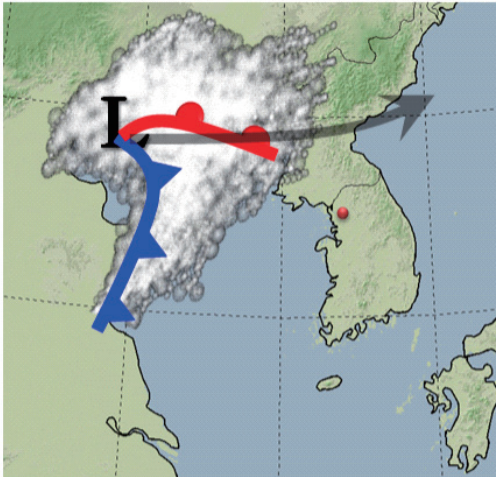


내륙에 찬 공기가 고립된 상태에서,
상층의 난기가 유입됨에 따라
지상과 850hPa 구간에 역전층 or 등온층이 나타남
눈과 비를 구분하기 어려움

- 눈, 비 판단 기준 -

925hPa 0~1°C, 습구온도 1.2 °C, 850hPa 0°C
중후선도: 비 기준에서 눈 관측(참고 불가)
강수직전 빙결고도가 1km 부근에 형성되기도 함
단, 습구빙결고도는 200m 이하여야 함

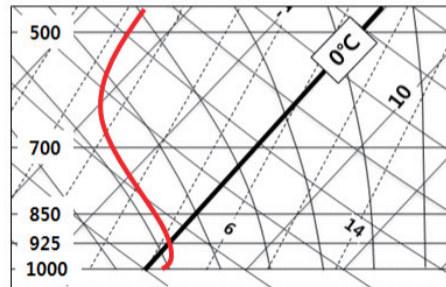
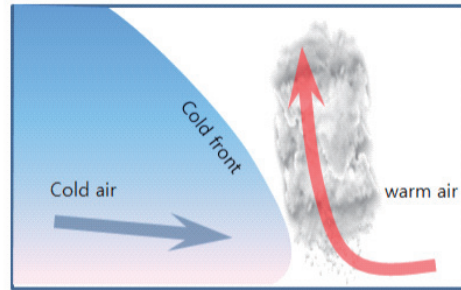
2. 발달한 저기압 : 지상 저기압 중심이 관측소 북쪽을 통과하는 경우



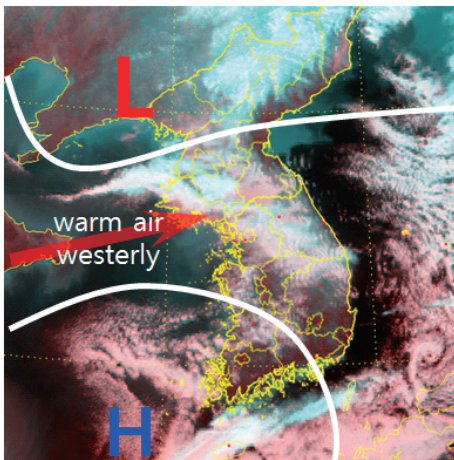
한랭전선이 접근함에 따라
지상과 하층대기에서 난기가 유입되어
지상과 700hPa 구간에 기온감율이 크다
눈과 비를 구분하기 용이하며, 비가 대부분이다

- 눈, 비 판단 기준 -

눈, 비 판단 기준: 1000-850(700) 중후선도
925hPa 0°C: 영하의 기온에서도 비(참고 불가)
빙결고도는 500m 이하여야 함



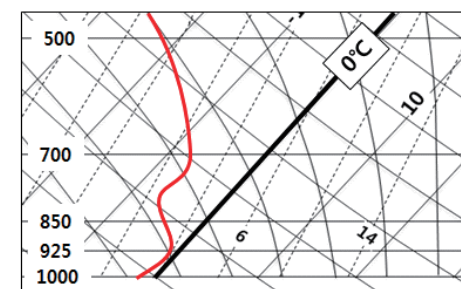
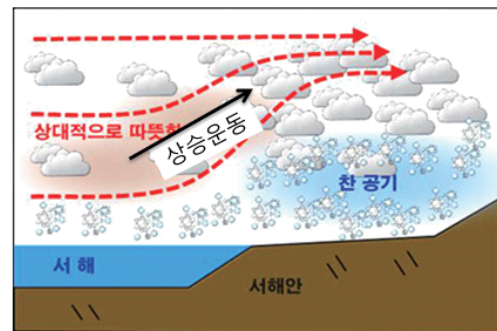
3. 온난이류형(발해만기압골) : 지상 저기압 중심이 관측소 북쪽을 통과하는 경우



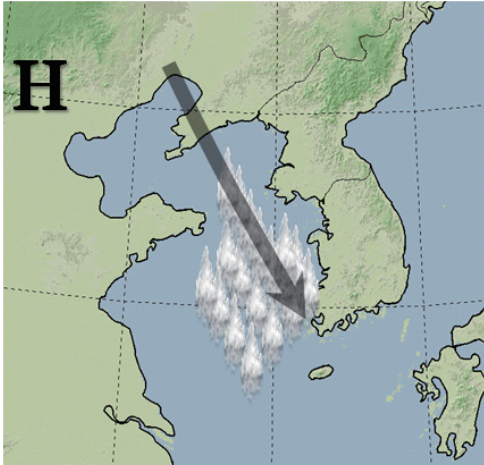
주로 기온이 낮은 새벽에서 오전에 발생
해기차에 의해 생성된 구름이 서풍류를 타고 내륙으로 이동
이 때, 내륙의 찬 공기를 타고 상승하므로,
지상에서 925hPa 구간에 역전층 존재

- 눈, 비 판단 기준 -

925hPa 0°C 기준, 지상 습구온도 1.2°C
1000-850(700) 중후선도 이용 불가(역전층으로)
빙결고도는 1km 부근일 수 도 있으므로,
습구빙결고도가 중요: 200m 이하



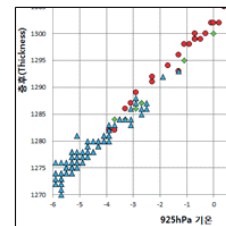
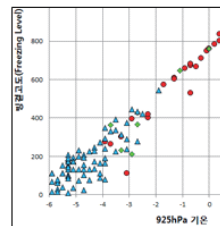
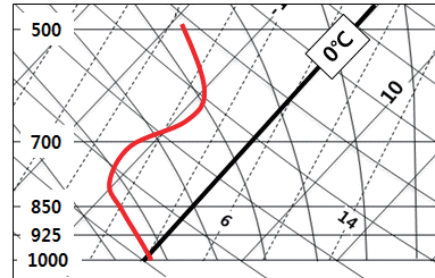
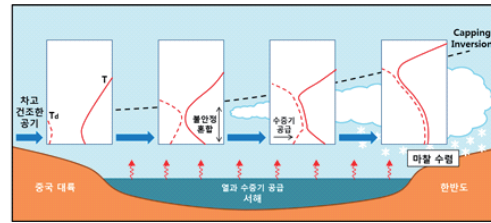
4. Lake Effect(서해안형)



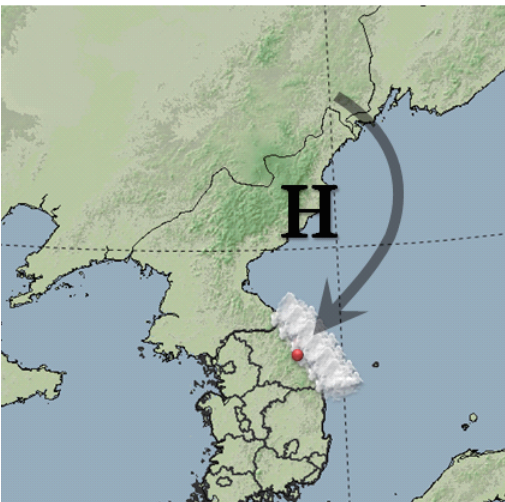
강한 한랭이류와 해기차로 인하여
지상에서 850hPa 부근까지 포화단열기온감을 구조로서,
지상에서 상층으로 기온감률이 크게 나타남

- 눈, 비 판단 기준 -

1000-850hPa 증후 기준값으로 판단 용이
단, 1000-700hPa 증후선도 불가(700hPa 역전층)
925hPa 기온은 -3°C 이하에서도 비가 오는 경우 있음
빙결고도는 400m 이하



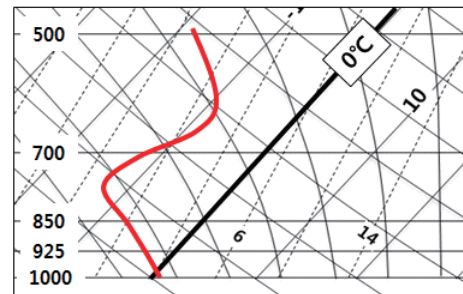
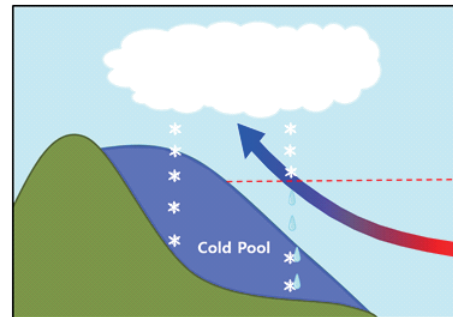
5. 동해안형: 동해상에서 한기이류에 의한 구름대가 산악지형의 영향을 받는 경우



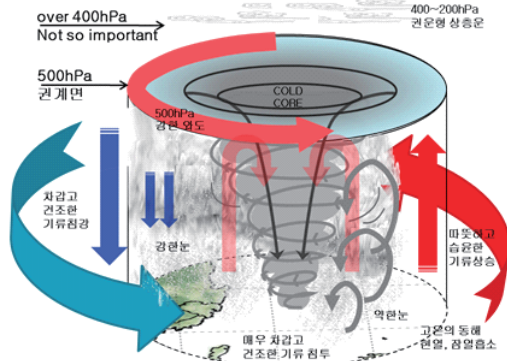
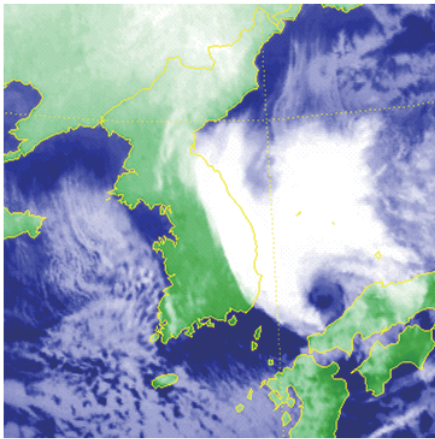
산사면에 찬 공기가 고립된 상태에서,
해상에서 해기차에 의한 구름대가 유입됨에 따라
지상에서 850hPa까지 기온감률이 크지만,
700hPa 부근에는 역전층이 위치

- 눈, 비 판단 기준 -

1000-850hPa 증후 기준값으로 판단 용이
1000-700hPa 증후 기준값 판단 불가(역전층 존재)
925hPa -4°C, 습구온도 1.2°C



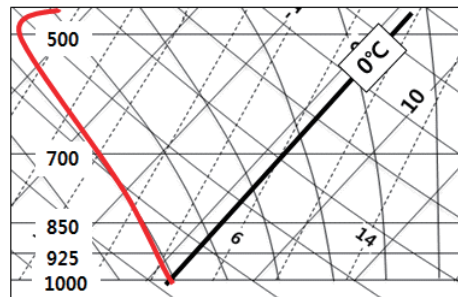
6. 극저기압형: 동해상에서 극공기를 수반한 중규모 저기압이 의해 발생하는 경우



중층 대기의 매우 차가운 공기와 따뜻한 수온 사이에서, 큰 온도차로 인한 연직 불안정 대기구조로서, 지상에서 500hPa부근까지 혼합대기형태 임 지상에서 500hPa 까지 포화단열기온감율 구조임

- 눈, 비 판단 기준 -

1000-850(700)hPa 층후 기준값으로 판단 용이
빙결고도는 300m 이하, 습구빙결고도는 200m
습구온도 1.2°C 눈, 비 판단 기준
단, 강수강도가 강하여 급격한 기온하강에 주의



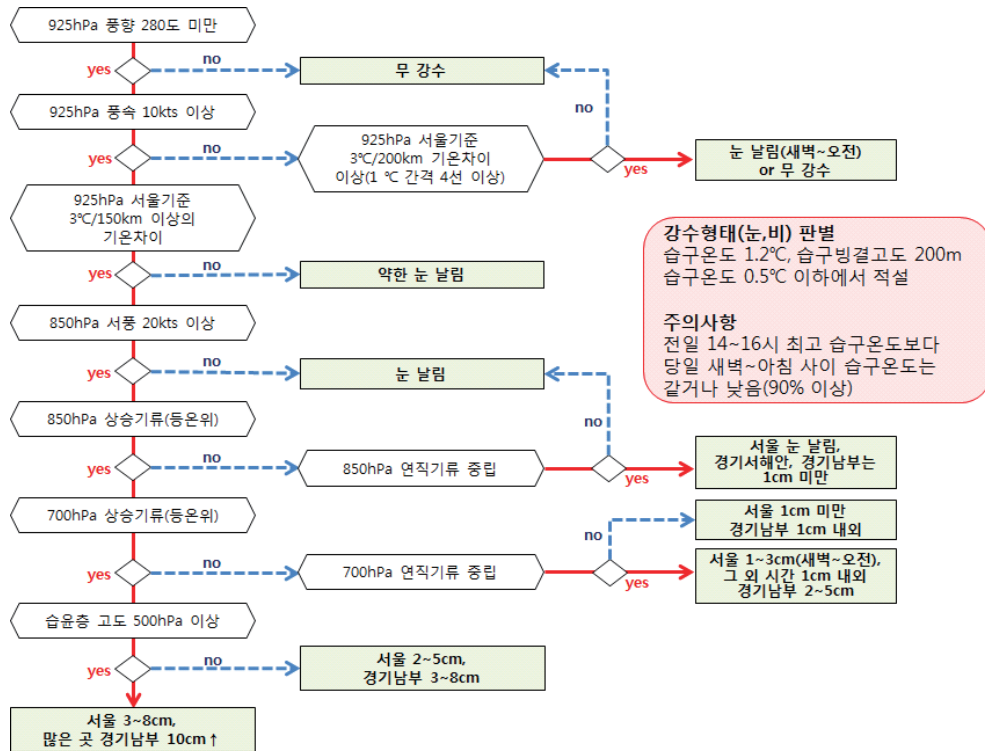
실황분석 기반 분석업무의 시간대별 체크리스트

8시~	실황 파악 위성 영상, 레이더 영상을 비롯한 다양한 관측 자료를 검토하여 우리나라 주변의 기상현상 파악 특히, 위성영상에 존재하는 구름과 암역(dry slot)은 3차원 구조로 해석해야 함
9시~	매커니즘 분석 우리나라에 영향을 줄 수 있는 시스템의 3차원 개념모델 분석 각 개념모델의 특징에서 시스템에 영향을 주는 중요 기상요소의 강도변화 및 모델차이 분석
10시	GTS 전문 분석 전일 21시에 관측된 GTS 전문 묘화, 기압계 파악, 기상현상의 원인 분석
11시	09시에 관측된 GTS 전문 묘화, 기압계가 12시간 전에 비해 어떻게 변하였는지 파악 기상현상의 원인 및 앞으로 영향을 줄 시스템의 발달·약화 경향 찾기 실황기반의 예보 시나리오 작성
12시	수치모델 분석 수치모델에서 현상을 어떻게 모의하고 있는지, 시스템이 어떻게 진행될 것인지 파악 모델에서 예측하고 있는 구름이나 강수의 역학적인 해석 필요 ex) 대류성 혹은 층운형 강수인지, 중층에서 발생하는 강수인지, 하층기반의 강수인지 모델과 실황 비교 관측자료와 수치모델 예상장을 비교하여 시스템에 영향을 주는 위치에서 정량적 차이 분석
1시~	다중 예보 시나리오 작성 모델과 실황을 비교하여 나타난 오차를 예보에 반영하여 실황 기반의 예보 시나리오 수정 시스템의 특징에 기반한 역학적 기상요소 중심의 다중 유사사례 분석(제2, 3의 시나리오) 변동 가능성을 고려한 향후 분석요소 점검
17시 ~	매뉴얼과 시나리오 중심의 실황감시 실황분석 업무 수행, 매뉴얼에 기반한 변동가능성 점검 변동 발견시 차선의 시나리오 중 확률 높은 시나리오 선택 및 예보수정, 정보발표

분석시 유의사항

위성영상과 레이더영상으로 실황을 파악할 때는 구름, 강수 등 현상과 함께 생성 원인, 이동 방향, 추후 변화 경향 (발달할 것인지, 약화할 것인지) 등도 분석한다
 실황분석은 항시 업무로 수행하며, 각 매뉴얼의 특징을 참고하여 수시로 점검해야 한다

온난이류형 강설예측 (최근 20년('00~'19년) 통계)



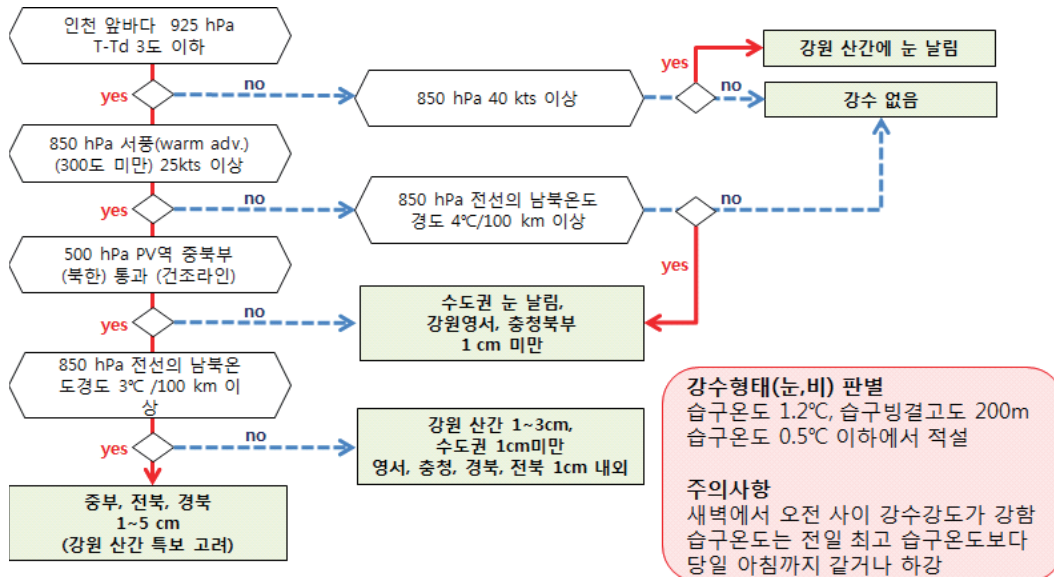
시간대별 실태감시 체크리스트(온난이류)

전일 10~14시	위성(수증기)영상에서 특징적인 구름 위치와 메커니즘 분석, 모델예상과 차이점 검토 00UTC GTS 분석: 모델예측과 차이 검토(700~925hPa 풍향, 풍속에 초점) 지상과 925hPa 모델 bias 검토로 예상 기온 수정, 온난이류 강도 추정 및 강설 예보
전일 22~23시	12UTC GTS 분석, 백령도, 오산 등 고층자료 분석: 925, 850hPa 풍향, 풍속 검토
당일 00시~	전일 18시 부터 3시간 간격 지상기온 편차 분석: 인천(서울), 춘천 간 온도 차이를 모델 예상과 비교, 발달여부 검토 연직바람관측장비 분석: 백령도 부근에 강수대 접근 시(당일 00~06시) 특히, 파주, 철원 감시: 800m(925hPa), 1.5km(850hPa), 3.0km(700hPa) 집중 감시 인천공항 AMDAR 분석(새벽 시간)
03시	오산 고층관측 자료 분석(18UTC)
04시	04시 예보 수정 결정, 05시 예보에 반영 및 통보
05시	김포공항 AMDAR 분석(6시 부터), 모델예측 결과와 오차 조정 연직바람관측장비 분석을 통해 925~850hPa 일기도 수정 및 강수대 유입과 강도 결정
06시	변화 감지시 정보 작성 및 통보

분석시 유의사항

위성영상에서 발해만~서해북부 해상에 구름대 형성시 분석 업무 진행
 강수 소스인 최초 구름 형성은 해상에서 해기차에 기인함에 주의(12월이 가장 유리)
 온난이류형 강수는 지표부근의 온도차이와 925hPa 풍향과 풍속에 기인하므로, 이에 대한 분석에 집중
 925hPa 고도에서 백령도로 구름 유입시 기온은 하강(습구온도로)하므로 동서온도 감소로 오해할 수 있음에 주의
 925, 850hPa 고도에서 풍속이 내륙으로 뚜렷이 증가할 경우 최대 적설은 경기남부, 강원영서남부, 충청북부

발해만 기압골 강설예측 (최근 5년('15~'19년) 통계)



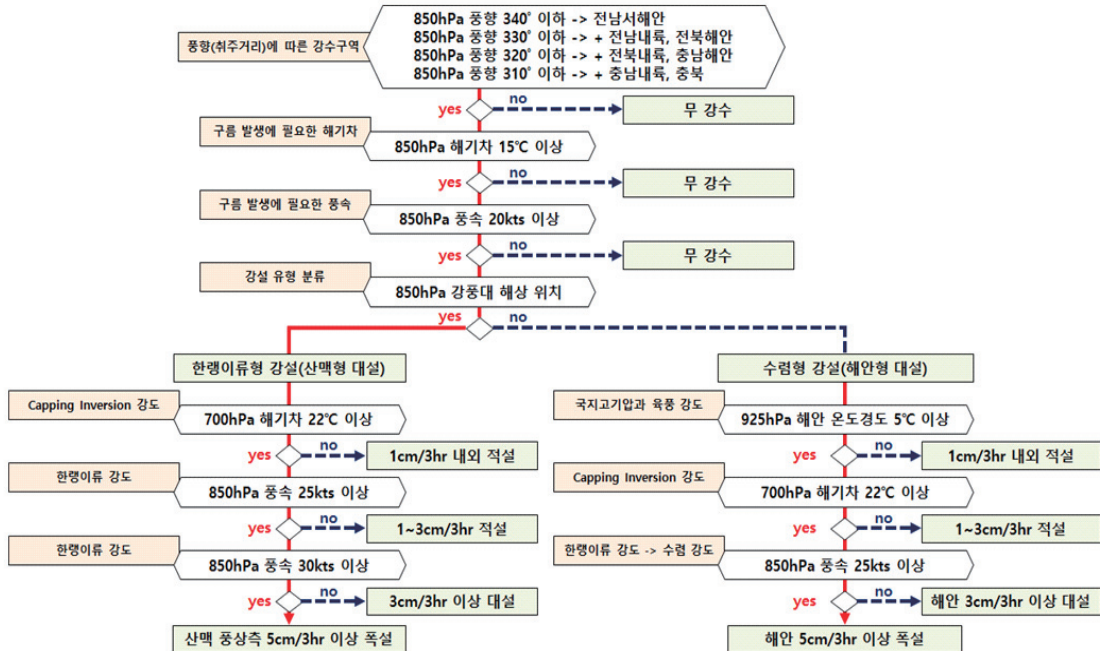
시간대별 실태감시 체크리스트(발해만기압골)

전일 10~14시	수증기 영상에서 발해만 서쪽 또는 북쪽으로 반달 모양의 건조라인 형성여부 확인 00UTC GTS 분석 : 850hPa(또는 925hPa)에서 기압골 강도(곡률, 중심고도, 경압성) 확인 강수의 재료가 되는 중국내륙 또는 서해상에 습윤역(또는 하층운) 분포 확인
전일 22~23시	수증기 영상에서 건조라인의 암화 진행여부 및 이동속도 추적 확인(강수시간과 강도 결정) 12UTC GTS 분석, 백령도, 오산 등 고층자료 분석 : - 오산, 백령도 지역에 하층(850~925hPa)의 습윤역 확인 - 중부지방으로의 서풍의 강풍대 형성여부 확인 - 요동반도, 산둥반도, 백령도 관측자료 등을 활용하여 기압골 후면 온도조밀정도 점검
당일 실태감시	(03시) 파주, 철원 수직측풍 장비의 하층 강풍대와 모델 예측 비교 오산 단열선도에서 하층의 서풍강도와 습윤정도를 모델과 비교 (04시) 위성영상에서 건조라인과 하층운대 위치와 움직임 확인, 예상보다 하층운이 해상에서 잘 발달한다면 강수영역과 시간 확대 필요 (05시) 백령도~경기만 부근에서 내륙으로 하층운대 유입 여부 확인

분석시 유의사항

- 발해만 기압골 강수의 경우 구름의 재료가 되는 서해상에 하층운 또는 습윤영역이 예상보다 잘 발달하는지 감시가 중요
- 파주나 철원의 수직측풍 장비에서 예상보다 강풍대가 강해지면 풍상층인 영서와 강원산지 적설 증가 가능성 검토
- 온난이류 영역에서 광범위한 강수가 선행된다면 기압골이 남하하면서 서울을 포함하여 강수대가 강하게 나타남
- 초단기 시점에서 강수대의 이동시간을 예측할 때는 모델예측보다는 건조역의 이동과 레이더 예보의 이동속도를 고려하여 외삽하는 것이 더욱 정확함

서해안형 강설예측 (최근 16년('03~'18년) 통계)



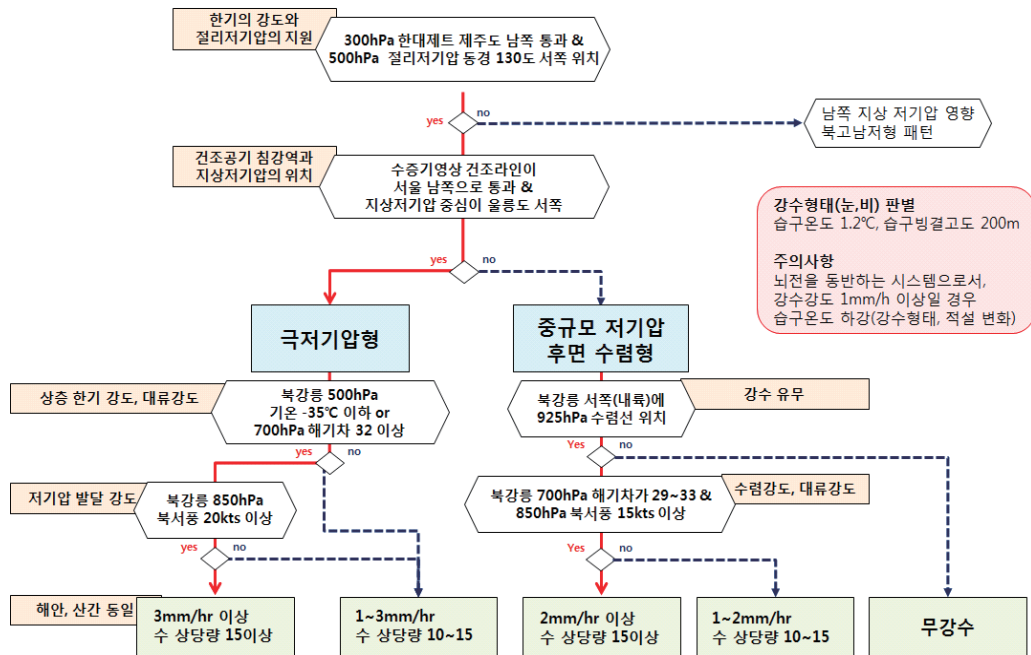
시간대별 실태감시 체크리스트(서해안형 강설)

전일 09~14시 (종합적 분석)	강수유무 판단 : 850hPa 해기차 15도 이상, 850hPa 풍속 20kts 이상을 충족하는지 검토 GTS 분석 : 00UTC 칭다오, 다렌, 백령도의 850hPa 기온과 풍속을 모델 예상과 비교 해상 부이(외연도, 부안, 칠발도)의 수온을 모델 예상과 비교 대설 판단 : 700hPa 해기차 22도 이상 충족, 한랭이류형인지 수렴형인지 판단 GTS 분석 : 00UTC 칭다오, 다렌, 백령도의 700hPa 기온을 모델 예상과 비교 실태 감시 : 서한만에서부터 대류운열 발달, 백령도 강수유무 여부 감시
전일 21~23시 (실태 감시)	(공통) 12UTC 백령도, 흑산도의 850/700hPa 기온과 풍속 모델 예상과 비교 (한랭이류형 강설) 850hPa 풍속(30kts 이상)을 중점적으로 분석 (수렴형 강설) 해안으로 925hPa 온도경도(5도 이상) 분석하고, 한반도 내륙의 지상기온 모델 편차(양의 편차) 여부 확인
당일 03~05시 (실태 감시)	(공통) 18UTC 광주 850/700hPa 기온과 풍속, 포화층 두께 확인 / 군산 850hPa 풍속 확인 (한랭이류형 강설) 850hPa 풍속(30kts 이상)을 중점적으로 분석 위성에서 구름대가 내륙까지 깊게 들어가는지 감시 (수렴형 강설) 한반도 내륙의 지상기온 모델 편차(양의 편차) 여부 확인 광주, 군산, 무안공항 925hPa 이하 고도 육풍(북동풍) 여부 확인 위성에서 해안으로 수렴대 형태의 구름대 발달 여부 감시

분석시 유의사항

850hPa 해기차와 풍속은 강설 발생의 기본 메커니즘으로 작용하므로 분석에 우선적으로 적용
 해기차 판단 시 모델 분석장의 수온은 실제와 다를 수 있으므로 반드시 해상 부이의 수온을 확인하여 계산
 한기 남하 초기 단계에서는 주로 한랭이류형 강설이 나타나며, 시간이 지나 기단이 변질이 되면 수렴형 강설로 바뀜
 수렴형 강설 패턴에서 내륙의 한기가 너무 강할 경우 육풍이 지나치게 강해져 강수대가 오히려 해안을 벗어날 수 있음
 서해안형 강설의 눈/비 판별은 925hPa -4도 이하에서 적설로 나타남, 11월이 아닌 이상 대부분 기간에 눈으로 내림

동해안형 강설예측 I (최근 5년('15~'19년) 통계)



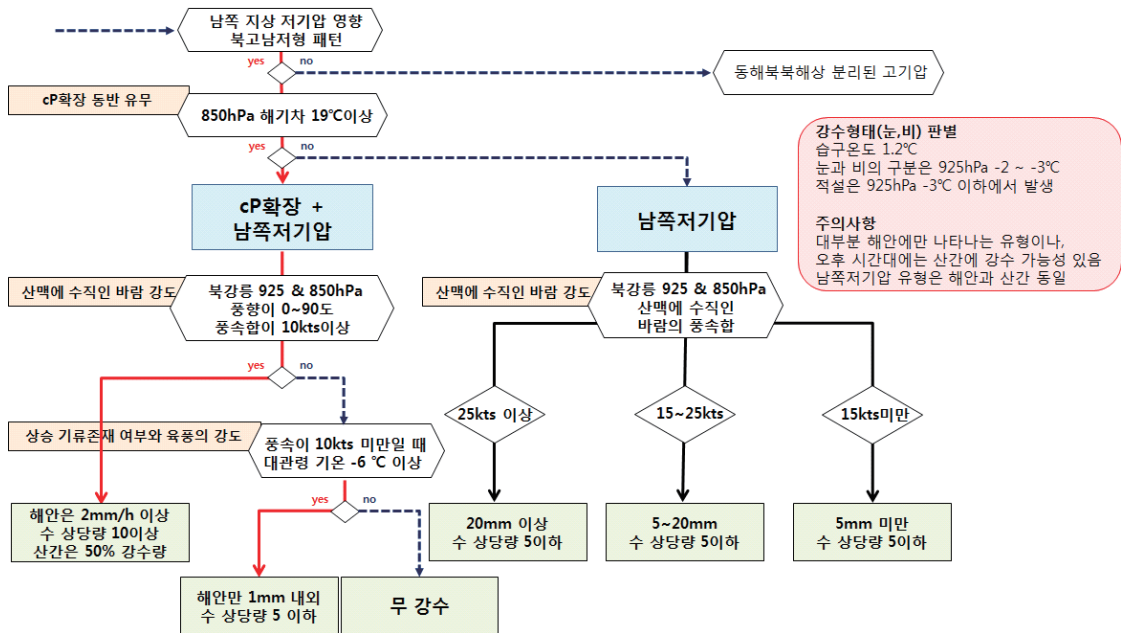
시간대별 상황감시 체크리스트(동해안형 강설 판단 I)

절리저기압 몽골 동쪽 위치	<p>위성(수증기)영상에서 절리저기압 강도와 이동속도 모델예상과 차이점 검토 GTS 분석 :</p> <p>300hPa 한대제트 풍속 bias 검토로 강도 확인 500hPa 절리저기압 부근 모델 온도와 풍속 bias 검토로 강도 확인 500hPa 아열대제트 풍속 bias 검토로 강도 확인</p>
절리저기압 산등반도 위치	<p>위성(수증기)영상에서 건조라인의 이동경로 모델예상과 차이점 검토 GTS 500hPa(중국자료와 국내자료) 자료와 연직바람관측장비, 김포·인천공항 AMDAR 5~6km바람자료를 활용해 500hPa 상세바람 예상과 비교, 절리저기압 중심 위치 확인, 한기핵 위치 확인</p> <p>위성 해상풍(QSCAT, ASCAT)자료와 상세바람 지상예상 바람 비교 동해부이와 해상풍 예상 바람 비교 동해북부해상 구름과 925hPa 모델 습수장 비교</p> <p>오차 예보에 반영 및 통보</p>
절리저기압 한반도 통과	<p>위성영상으로 동해상 저기압중심위치 모델과 비교 북강릉 연직바람관측장비 3km 이하 바람, 모델예측 결과와 오차 확인 변화 감지시 정보 작성 및 통보</p>

분석시 유의사항

위성 (수증기)영상에서 절리저기압의 저기압성 소용돌이 확인시 분석 업무 진행
최초 구름 형성은 동해북부해상에서 해기차에 기인함에 주의
극저기압형 강수는 500hPa 절리저기압에 따라 지상저기압이 발달이 결정되므로, 이에 대한 분석에 집중
지상저기압 중심의 위치에 따라 강수영역과 강도가 결정,
위성(합성)영상에서 동해상의 지상저기압 중심위치 확인이 필수

동해안형 강설예측 II (최근 5년('15~'19년) 통계)



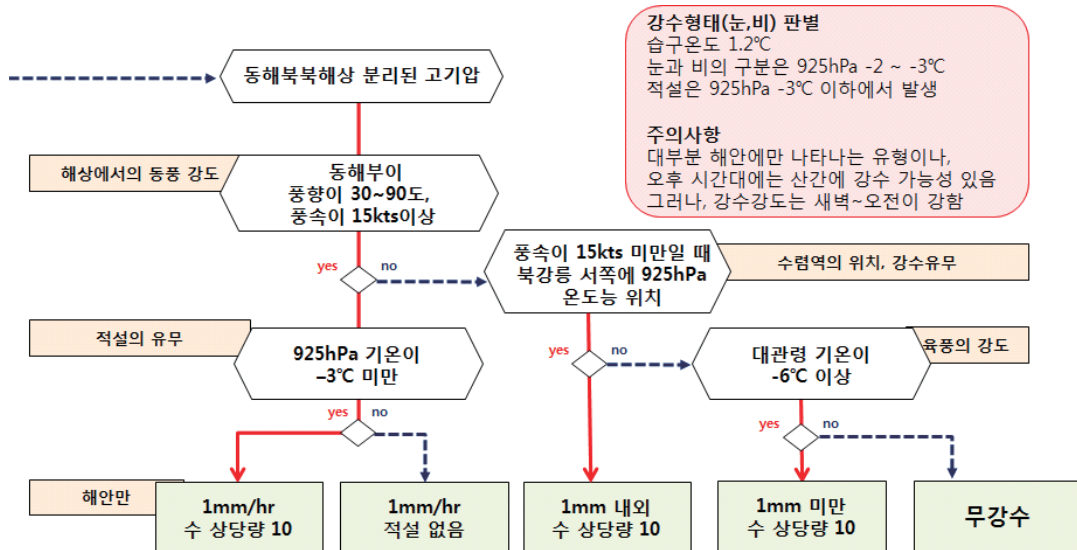
시간대별 실태감시 체크리스트(동해안형 강설 판단 II,III)

24시간 전	중국 북동부지역 북반구 500hPa 고도증분 분석으로 모델 경향성 확인 GTS 분석(중국북동부지역과 발해만부근): 500hPa 북서류 바람과 기온 bias 검토로 침강류의 강도 확인 700hPa 북서류 바람 bias 검토로 침강류의 강도 확인 (함경산맥과 수직인 풍향과 풍속비교)	12시간 간격 검토
동해북북해상 동풍 시작	남쪽저기압 위치, 이동속도와 강도 모델과 비교(동해안형 강수판단 II만) 위성(수증기)영상에서 건조역의 강도 모델예상과 차이점 검토로 침강류 강도 확인 블라티보스톡 바람과 기온 모델과 비교(GTS 지상자료) 동해상 구름과 925hPa 모델 습수장 비교 위성 해상풍(QSCAT, ASCAT)자료와 상세바람 지상예상 바람 비교 강원산간(대관령등) 지상 기온 bias 3시간 간격 확인 오차 예보에 반영 및 통보	
동풍 유입 전	북한지역 GTS 지상자료 바람과 강수량 모델예상과 차이점 3시간 간격 검토 동해부이와 해상풍 예상 바람 비교	
동풍 유입 후	북강릉 고층자료 1000~850hPa 바람, 모델예측 결과와 오차 확인 북강릉 연직바람관측장비 3km 이하 바람, 모델예측 결과와 오차 확인 변화 감지시 정보 작성 및 통보	

분석시 유의사항

동해안형 강수예상 24시간 전부터 분석 업무 진행
동해안형 강수(II,III)는 중국북동지역 침강류에 의해 하층 고기압 발달과 확장에 따라 결정되므로, 이에 대한 분석에 집중
남쪽으로 저기압이 동반되는 경우 저기압 발달이 동풍기류 강도에 영향을 주므로, 남쪽 저기압 강도와 위치분석에 주의
동풍기류가 강하지 않은 경우 대관령 기온에 따라 육풍의 강도가 결정되므로
특히, 새벽시간 대관령기온이 많이 떨어진 경우 육풍 강화로 인한 수렴대가 해안에 붙지 않을 가능성에 주의

동해안형 강설예측 III (최근 5년('15~'19년) 통계)



시간대별 실태감시 체크리스트(동해안형 강설 판단 II,III)

24시간 전	중국 북동부지역 북반구 500hPa 고도증분 분석으로 모델 경향성 확인 GTS 분석(중국북동부지역과 발해만부근): 500hPa 북서류 바람과 기온 bias 검토로 침강류의 강도 확인 700hPa 북서류 바람 bias 검토로 침강류의 강도 확인 (함경산맥과 수직인 풍향과 풍속비교)	12시간 간격 검토
동해북북해상 동풍 시작	남쪽저기압 위치, 이동속도와 강도 모델과 비교(동해안형 강수판단 II만) 위성(수증기)영상에서 건조역의 강도 모델예상과 차이점 검토로 침강류 강도 확인 블라티보스톡 바람과 기온 모델과 비교(GTS 지상자료) 동해상 구름과 925hPa 모델 습수장 비교 위성 해상풍(QSCAT, ASCAT)자료와 상세바람 지상예상 바람 비교 강원산간(대관령등) 지상 기온 bias 3시간 간격 확인 오차 예보에 반영 및 통보	
동풍 유입 전	북한지역 GTS 지상자료 바람과 강수량 모델예상과 차이점 3시간 간격 검토 동해부이와 해상풍 예상 바람 비교	
동풍 유입 후	북강릉 고층자료 1000~850hPa 바람, 모델예측 결과와 오차 확인 북강릉 연직바람관측장비 3km 이하 바람, 모델예측 결과와 오차 확인 변화 감지시 정보 작성 및 통보	

분석시 유의사항

동해안형 강수예상 24시간 전부터 분석 업무 진행
 동해안형 강수(II,III)는 중국북동지역 침강류에 의해 하층 고기압 발달과 확장에 따라 결정되므로, 이에 대한 분석에 집중
 남쪽으로 저기압이 동반되는 경우 저기압 발달이 동풍기류 강도에 영향을 주므로, 남쪽 저기압 강도와 위치분석에 주의
 동풍기류가 강하지 않은 경우 대관령 기온에 따라 육풍의 강도가 결정되므로
 특히, 새벽시간 대관령기온이 많이 떨어진 경우 육풍 강화로 인한 수험대가 해안에 붙지 않을 가능성에 주의

겨울철 예보 가이드스 Why? How!

발 행 일 2019년 12월
집 필 한상은, 공상민, 우재훈, 김영준, 박선영
편 집 임다솔
감 수 정관영, 이경희, 장근일
발행부서 예보국 예보분석팀
