



2023. 12.



예보국
재해기상대응팀

CONTENTS

1. 온난이류에 의한 강수의 이해와 예보 활용	1
1. 1. 온난이류형 강수의 정의	1
1. 2. 우리나라 온난이류형 강수의 형태	2
1. 3. 온난이류형 강수를 결정하는 요소	3
1. 4. 온난이류형 강수 예보 시 주의사항	25
1. 5. 온난이류형 강수 예보를 위한 흐름도	27
2. 발해만 기압골에 의한 강수	31
2. 1. 발해만 기압골이란?	31
2. 2. 온난이류형 강수에 미치는 발해만 기압골의 영향	33
2. 3. 발해만 기압골에서의 예보 흐름도	43
3. 호수 효과에 의한 서해안 강설 메커니즘의 이해와 예보 활용	47
3. 1. 호수 효과에 의한 서해안 강설 정의	47
3. 2. 호수 효과에 의한 강설 메커니즘	49
3. 3. 강설 판단 요소 I - 기온과 해기차	50
3. 4. 강설 판단 요소 II - 바람과 취주거리	58
3. 5. 서해안형 강설을 유발하는 기압계	64
3. 6. 대설 판단 요소 - 수렴	68
3. 7. 예보 의사결정을 위한 참고자료	77
3. 8. 호수 효과에 의한 적설 판단을 위한 흐름도	79

4. 북동기류에 의한 강수시스템 이해와 예보 활용	83
4. 1. 북동기류 강수의 정의	83
4. 2. 겨울철 북동기류에 의한 강수 예측의 어려움	85
4. 3. 눈구름이 동해안으로 들어올까, 해상에 머물까?	86
4. 4. 눈으로 올까, 비로 올까?	94
4. 5. 동해안 강수 유형 분류	102
5. 중층기압골에 의한 강수	119
5. 1. 겨울철 중층기압골 강수란?	119
5. 2. 중층기압골 강수예보를 위해 점검해야 할 기상요소	123
5. 3. 중층강수 예측 실패 사례	136
5. 4. 중층기압골에 의한 강수 예보 흐름도	142
6. 습구온도를 이용한 강수형태 예보	145
6. 1. 습구온도의 정의	145
6. 2. 습구온도계의 원리	146
6. 3. 실제 대기에서는...	147
6. 4. 습구온도의 일 변동성	148
6. 5. 강수형태 예측에 효과적인 요소	150
6. 6. 강수에 의한 기온 하강 예측	154
6. 7. 습구온도 활용 시 주의사항	155
부록 업무매뉴얼 요약	167

1. 온난이류에 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 예보에 활용할 수 있는 기준을 마련하고자 한다.

1. 1. 온난이류형 강수의 정의

온난이류형 강수는 겨울철 우리나라에서 대표적으로 나타나는 대설 유형 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.

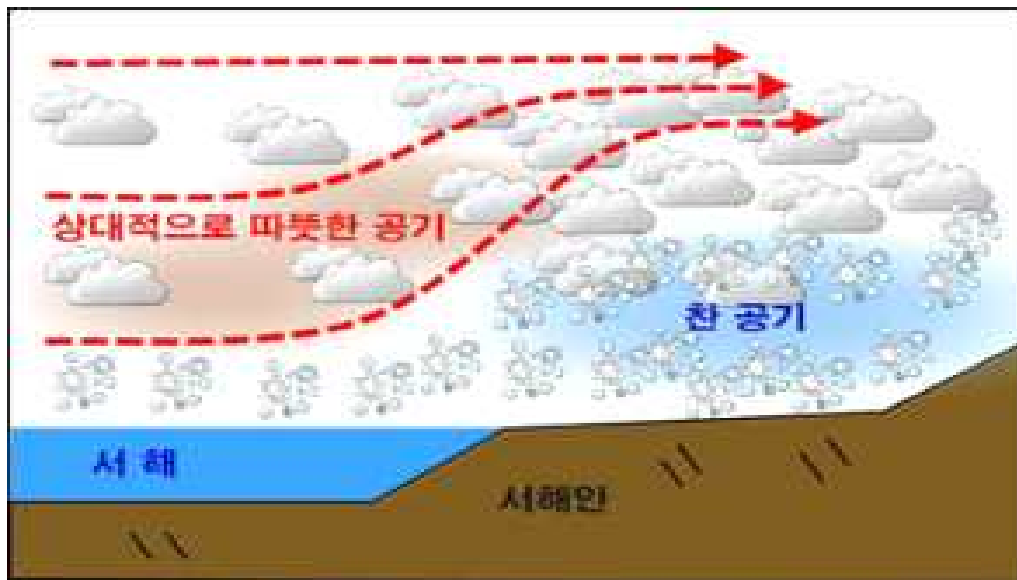


그림 1-1. 해안에서의 온난이류형 강수 모식도

1. 2. 우리나라 온난이류형 강수의 형태

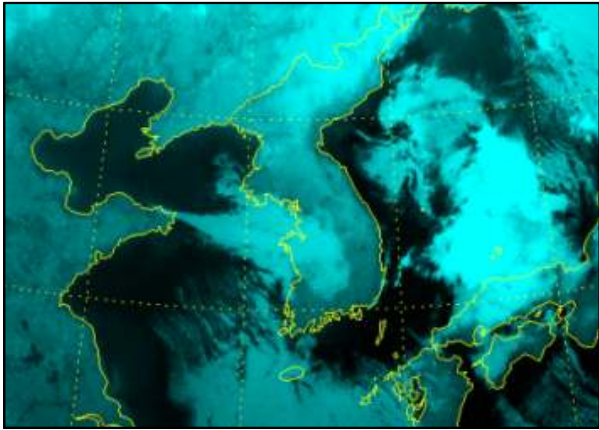


그림 1-2. 해상부터 발달하는 온난이류형 구름

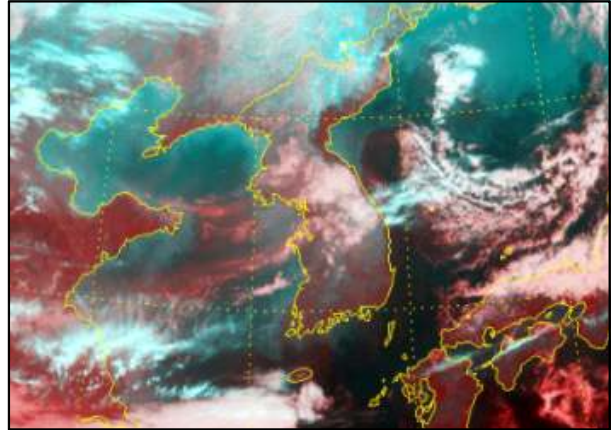


그림 1-3. 내륙에서 발달하는 온난이류형 구름

우리나라에서 발생하는 온난이류형 강수는 크게 두 가지 유형으로 나타난다. 첫 번째는 해기차가 충분한 가운데 해상과 육상 사이의 온도경도 구역을 따라 대기가 상승하면서 서해안으로 유입되는 형태이다(그림 1-1, 1-2). 두 번째는 해기차가 부족한 건조한 상태에서 내륙으로 이류된 공기가 내륙의 찬 공기덩어리(cold pool)와 충돌 또는 지형에 의해 상승해 응결하면서 강수가 발생하는 형태이다(그림 1-3). 일반적으로 강수의 강도는 해상에서 이미 포화된 공기가 들어오는 지역(주로 경기남부, 충청도, 전북북부)에서 강하지만, 서풍기류가 매우 강할 때는 공기가 강원산지에 부딪혀 강제 상승과 포화를 유도하여 10cm 이상의 많은 눈이 오는 경우도 있다.

1. 3. 온난이류형 강수를 결정하는 요소

1. 3. 1. 해수면 온도와 해기차

해수면 온도는 온난이류형 강수에서 크게 두 가지의 역할을 한다. 첫 번째는 내륙과의 온도차로 인한 온도경도 발생, 두 번째는 하층 대기의 수증기 공급 역할이다.

첫 번째로 바다와 내륙의 온도경도를 살펴보겠다. 겨울이 시작되면 내륙의 냉각은 급속도로 진행되나, 열용량이 높은 해수 온도는 서서히 하강한다. 따라서 육상과 바다 사이에서의 온도 차이는 필연적으로 발생한다.

표 1-1. 백령도 부이의 월평균 수온과 서울, 북춘천의 월평균 최저기온 비교

요소	기간	2018년 11월 ~ 2020년 3월				
		11월	12월	1월	2월	3월
최저기온(서울, °C)		3.4	-3.6	-3.4	-2.2	2.6
최저기온(북춘천, °C)		-0.3	-7.1	-8.3	-5.8	-1.7
백령도 부이 수온(°C)		14.0	10.5	7.1	5.3	6.1
해수면온도-최저기온(서울, °C)		10.6	14.1	10.5	7.5	3.5
해수면온도-최저기온(북춘천, °C)		14.3	17.6	15.4	11.1	7.8

2018~2020년까지 육상의 최저기온(서울 기준)과 경기만 해수온도와의 차이를 살펴보면(표 1-1), 11월에는 10.6°C, 12월에는 14.1°C, 1월에는 10.5°C로 높게 나타나고 특히 12월이 가장 크게 나타난다. 반면에 2월에는 7.5°C, 3월에는 3.5°C로 11~12월에 비교하여 내륙과 바다의 기온차가 큰 쪽으로 낮아진다.

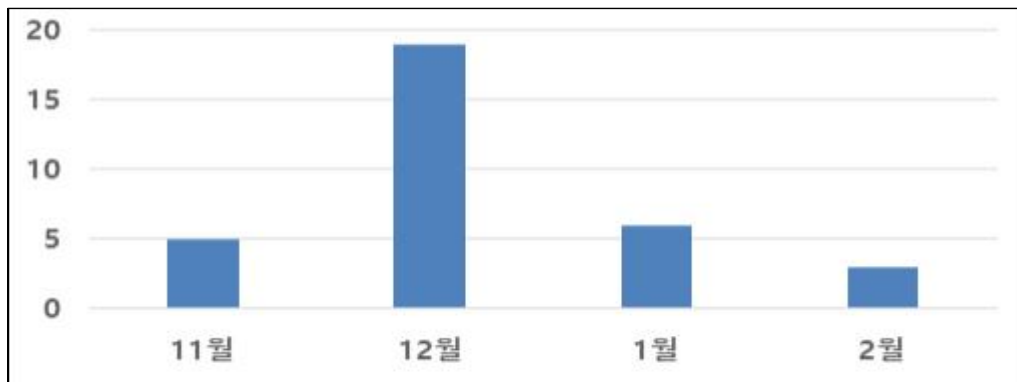


그림 1-4. 2017~2020년 월별 온난이류형 강수 발생 일수

실제로 온난이류형 강수가 나타나기 시작하는 시기는 11월 하순이며 12월에 가장 높은 빈도로 발생한다. 그리고 1월 하순부터는 발생빈도가 점차 낮아지기 시작해 3월에는 거의 나타나지 않는다. 그림 1-4를 보면 12월의 강수 발생빈도가 11월과 1월에 비해 4배가량 빈번히 나타나는 걸 볼 수 있다.

두 번째로 수증기 공급 측면에서 해수면 온도를 보면, 해수온도의 절대값이 높거나 해기차가 클 경우에는 강수 발달에 유리한 조건이 된다. 왜냐하면, 해상에서 수증기의 증발이 활발해져 육지로 이류되어 들어오는 동안 공기가 충분한 수증기를 공급받으므로 강수입자로 비교적 쉽게 발달할 수 있기 때문이다. 반대로 수증기 공급이 적은 건조한 공기는 이류가 되어도 포화가 되지 않아 강수로 발달하기 어렵다.

온난이류가 있었던 11월 사례 두 가지와 2월 사례 두 가지를 비교하여 살펴보자.

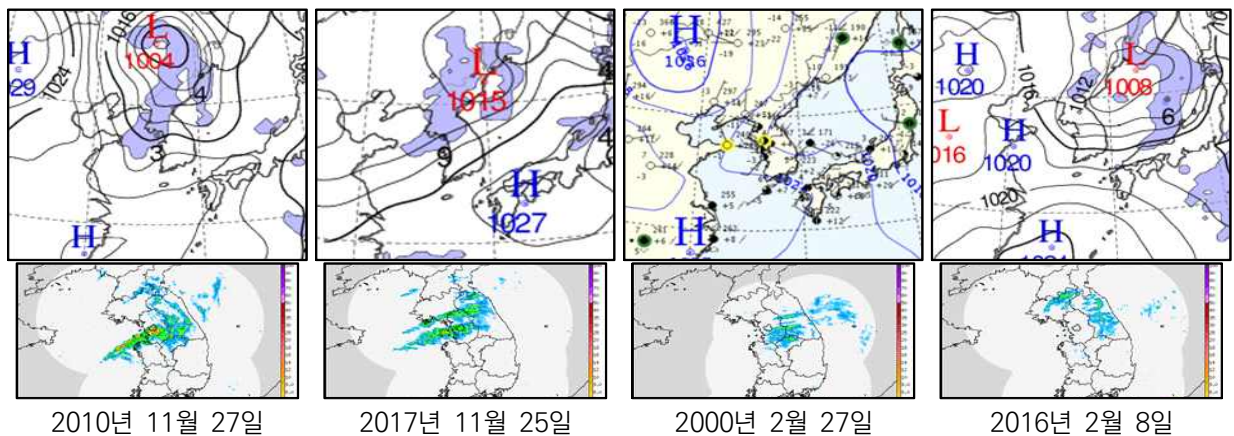


그림 1-5. 지상일기도(상), 레이더 PPIO 실황(하)

그림 1-5는 네 사례의 지상일기도와 레이더 영상이다. 해수면 온도와 수증기 공급의 연관성을 알아보기 위해 경기만 지역의 데이터를 살펴보았다. 2010년 11월 27일 사례는 해수온도가 11.7°C, 925hPa과 해기차는 약 11°C 였으며, 2017년 11월 25일 사례는 해수온도가 11.8°C, 해기차는 약 9°C로 나타났다. 반면에 2000년 2월 27일의 사례는 해수온도가 2.4°C로 낮았고 해기차도 약 4°C에 불과했으며, 2016년 2월 8일 사례는 해수온도가 3.5°C, 해기차는 약 4°C였다.

즉, 해수온도도 높고 해기차가 컸던 11월 사례는 해상으로부터 수증기가 원활하게 공급되면서 전선대 전면으로 강한 강수대가 발달하였지만, 수증기 공급조건이 좋지 않았던 2월 사례의 경우 해안지역에는 강수대가 거의 발달하지 못하고, 대신 지형에 의해 강제상승 영향을 받는 경기동부, 강원영서와 산지를 중심으로만 많은 강수가 있었다.

해수온도와 수증기 공급 조건을 정량적으로 분석하기 위하여 해기차 조건을 자세히 살펴보자.

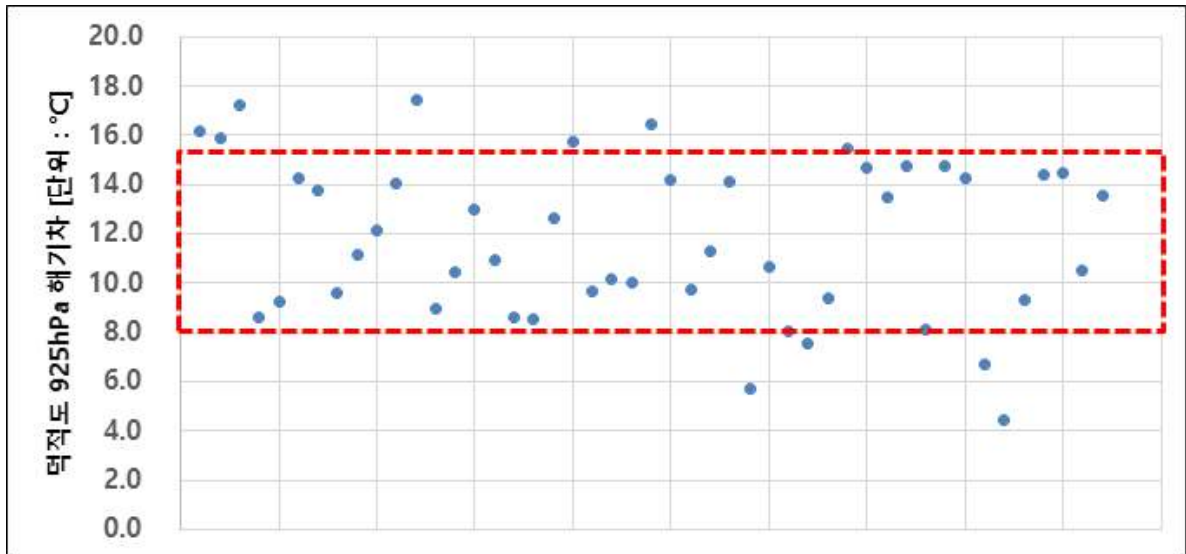


그림 1-6. 해상에서 온난이류형 강수가 발달한 사례의 925hPa-SST(해기차) 분포(덕적도 부이)

그림 1-6은 온난이류 강수가 있었을 때의 해기차 분포이다. 호수효과에 의한 서해안 강설은 해기차가 크면 클수록 불안정이 커져 강설 발생에 유리하지만, 온난이류형 강수는 해기차가 클수록 난기의 유입이 적다는 방증이므로 강설에 꼭 유리한 것은 아니다. 따라서 충분한 수증기 공급이 가능한 최소한의 해기차와 적절한 난기의 강도가 중요한데, 통계적으로 925hPa의 해기차가 8~15°C 사이일 때 온난이류형 강수 발달 빈도가 높은 것으로 나타난다.

다만 대략적인 해기차의 조건을 만족하더라도, 해안가의 온도경도, 풍향 등의 다양한 변수가 존재하기 때문에 모든 사례에 천편일률적으로 적용할 수는 없다. 따라서 뒷 절에서 해기차에 대한 내용을 다시 세부적으로 다루도록 하겠다.

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 평지 지역에서 3cm 이상 쌓이기 어려우나, 산간에서는 강제상승에 의해 10cm 이상의 대설이 내리기도 한다.
3. 서해상에 구름이 있는 상태이거나, 해기차가 8°C 이상이면 해안에서부터 강수가 발달한다.

1. 3. 2. 온도경도

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 온도 조밀역이다.

개별 사례에서 온난이류형 강수의 발생 가능 여부를 판단하기 위해서는 각 사례별 서해안 지역의 온도경도를 정량적으로 제시해야 한다. 이 기준을 선정하기 위해 본 가이드스에서는 예보장 자료에서 손쉽게 접할 수 있으면서 하층의 기상조건을 잘 고려할 수 있는 925hPa 등압면의 상세바람장을 활용하였다.

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

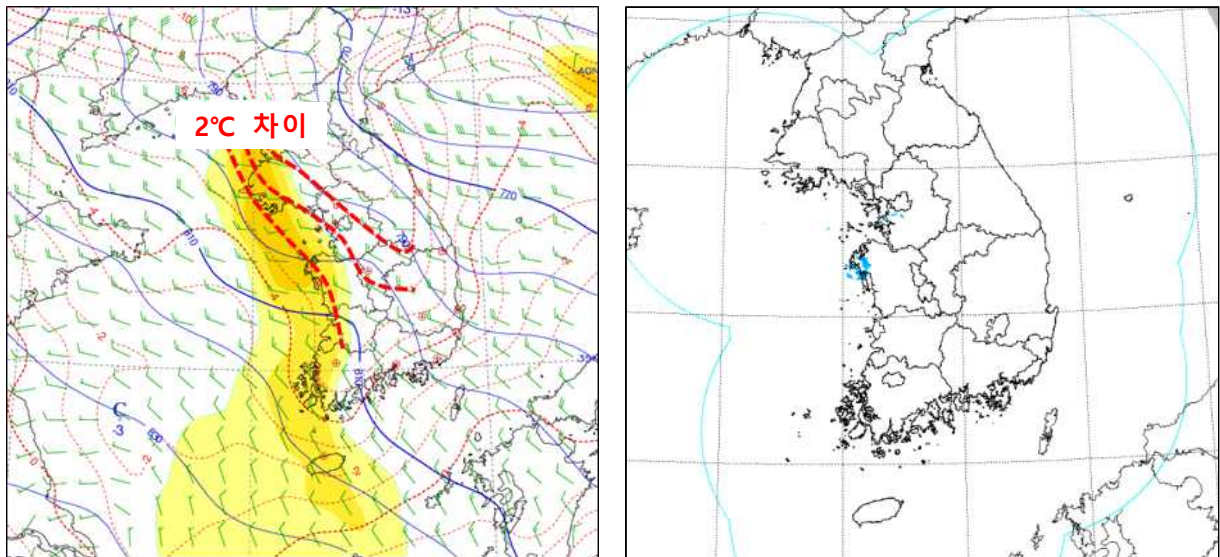


그림 1-7. 2017년 12월 25일 21시의 (좌) 925hPa 상세바람장, (우) 레이더 합성영상

시간 순서대로 25일 21시에서 26일 03시까지 바뀌는 바람과 온도 상황을 살펴보겠다. 먼저 25일 21시 상황이다. 925hPa 상세바람장(그림 1-7)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 일부 지역에만 눈이 내리고 대부분 지역에서 적설이 기록되지 않았다.

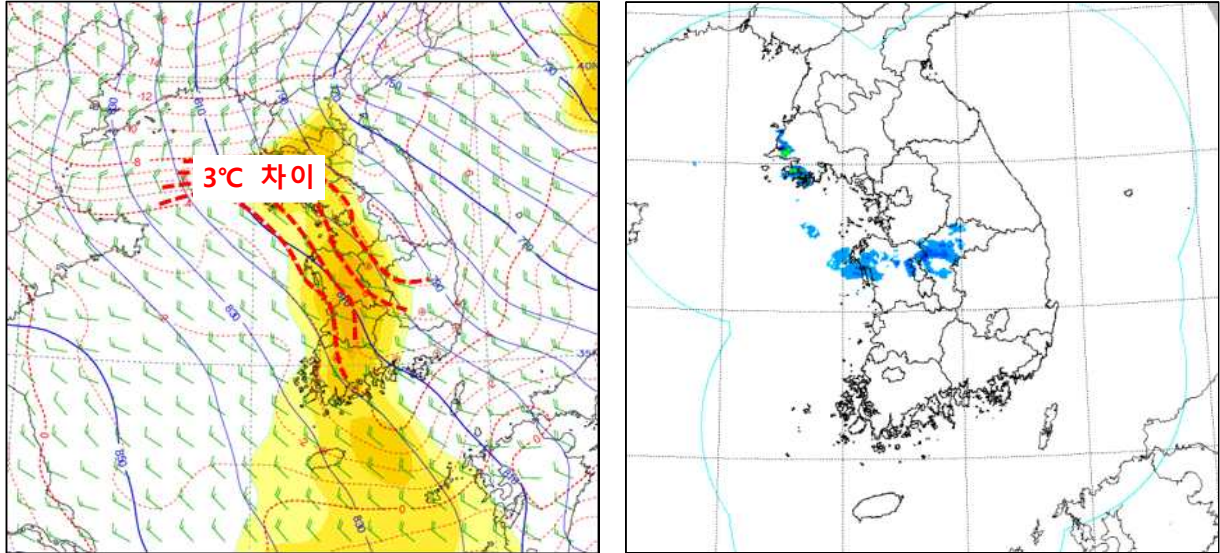


그림 1-8. 2017년 12월 26일 03시 (좌) 925hPa 상세바람장, (우) 레이더 합성영상

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

이 당시의 925hPa 상세바람장(그림 1-8)을 보면 충청지역으로 서북서풍의 바람이 20kts 정도로 강화되었고, 온도경도는 3°C로 커졌다. 온도경도가 커짐에 따라 습윤역은 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, 경기도 지역에서는 2~5cm까지의 적설을 기록하였다.

이러한 사례들을 토대로 요약해 보면 온도경도가 2°C/150km에서는 눈날림 정도의 구름이 형성되고, 온도 경도가 3°C/150km 이상이면 1cm 내외의 적설이 가능한 조건이 된다. 그리고 온도경도가 4°C/150km 이상이 되면 본격적으로 강수가 강화되기 시작하며, 3cm 내외의 적설을 기록할 수 있는 조건이 된다.

여기서 앞 절에서 언급하였던 해기차를 덧붙여 응용해보겠다. 온도경도는 상승의 기울기를 뜻하며, 즉 온도경도의 임계값을 넘어야 강수가 가능하다고 하였다. 그런데 서해상의 공기가 해기차가 커서 수증기가 충분하거나, 이미 구름이 존재하여 포화가 된 상태라면, 작은 온도경도에도 즉 작은 상승의 기울기로도 강수를 유발할 수 있다. 다시 말하면 온도경도를 고려할 때 큰 해기차는 온도경도를 보완할 수 있는 역할을 하게 된다. 반대로 해기차가 매우 작다면, 큰 온도경도에서 강수를 유발하기 어려울 수도 있다.

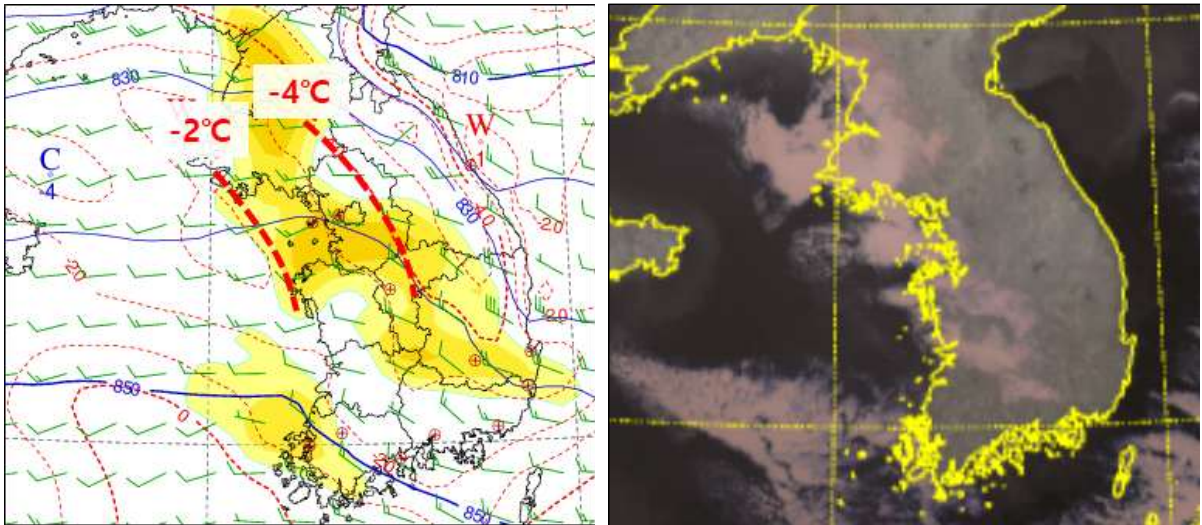


그림 1-9. 2020년 12월 22일 00~03시 (좌) 925hPa 상세바람장, (우) 주야간 합성영상

그림 1-9를 보면 온난이류가 예상되는 시점인 새벽 시간대의 925hPa 온도경도는 2°C/150km로 앞서 말한 기준으로 보면 적설을 기록하기는 어려운 수준이다. 그러나 이 당시 경기만의 해기차가 약 10~11°C로 수증기가 공급되기 매우 좋은 조건이었고, 경기만 부근에서 하층운대가 이미 존재하고 있는 상황이었다. 따라서 온도경도의 조건을 한 단계 상향 조정해서 예보에 적용하면 더 적절한 예보를 할 수 있었다.

이 당시에는 온도경도가 부족하여 적설 예보를 하지 않았지만, 수원 0.6cm, 파주 0.2cm 등 수도권을 중심으로 1cm 미만의 적설이 기록되었다.

Key Point!

1. 온난이류형 강수가 발생하기 위해서는 충분한 온도경도가 필수 조건!
2. 백령도에서 서울 동쪽까지 925hPa 온도경도가 2.0°C 이상일 때 눈구름이 생성되기 시작하고, 1cm 내외의 적설을 위해서는 약 3.0°C 이상의 온도경도가 필요하다.
3. 해기차가 10°C 이상으로 충분할 때는 적은 온도경도에도 적설 기록이 가능하다.

1. 3. 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.

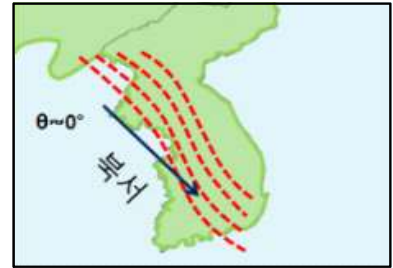
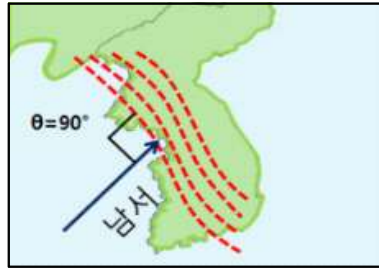


그림 1-10. 온도이류 모식도(서풍) 그림 1-11. 온도이류 모식도(남서) 그림 1-12. 온도이류 모식도(북서)

일반적으로 온난이류형 강수에서 서해안의 등온선은 수평에서 시계방향으로 45° 가량 기울어져 있기 때문에 이류의 정도는 남서풍(그림 1-11)에서 가장 크고(100%), 서풍(그림 1-10)일 때 70% 정도로 작아지며, 북서풍(그림 1-12)일 때는 10~20% 정도로 온도이류가 거의 일어나지 않는다. 따라서 풍향 조건만 고려하면 925hPa 남서풍 또는 서풍일 때 온난이류가 활성화되고, 점점 북서풍에 가까워지면 온난이류가 약화된다.

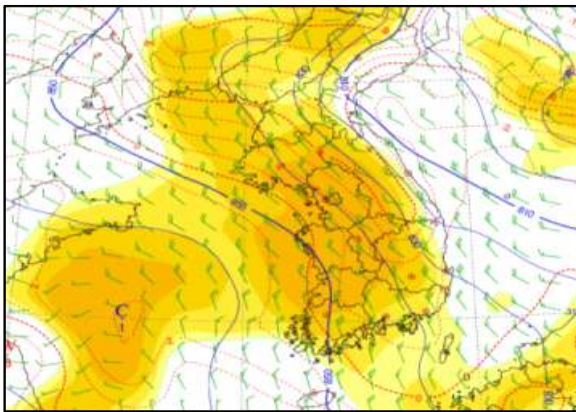


그림 1-13. 925hPa 상세바람장
(2017년 12월 29일 06시)



그림 1-14. 레이더 합성영상
(2017년 12월 29일 06시)

2017년 12월 29일 새벽 사례(그림 1-13과 1-14)를 보면 925hPa에서 저습수역으로 표현되면서 하층이 습윤한 상태를 보이고 있다. 925hPa의 풍속은 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 이때 서해안에는 약한 강수 에코만 나타났다【겨울예보 사례분석 1-3】.

925hPa의 바람조건이 최하층의 구름 발달을 결정한다면 850hPa의 바람조건은 온난이류가 일어나는 대기의 두께를 결정한다. 따라서 850hPa의 바람은 강수 강도에 큰 영향을 미칠 수 있다. 925hPa에서 온난이류가 충분했던 사례(온도조밀+서풍류) 중 850hPa 바람이 북서류와 서풍류인 두 가지 경우를 비교해보면 명확한 차이가 나타난다.

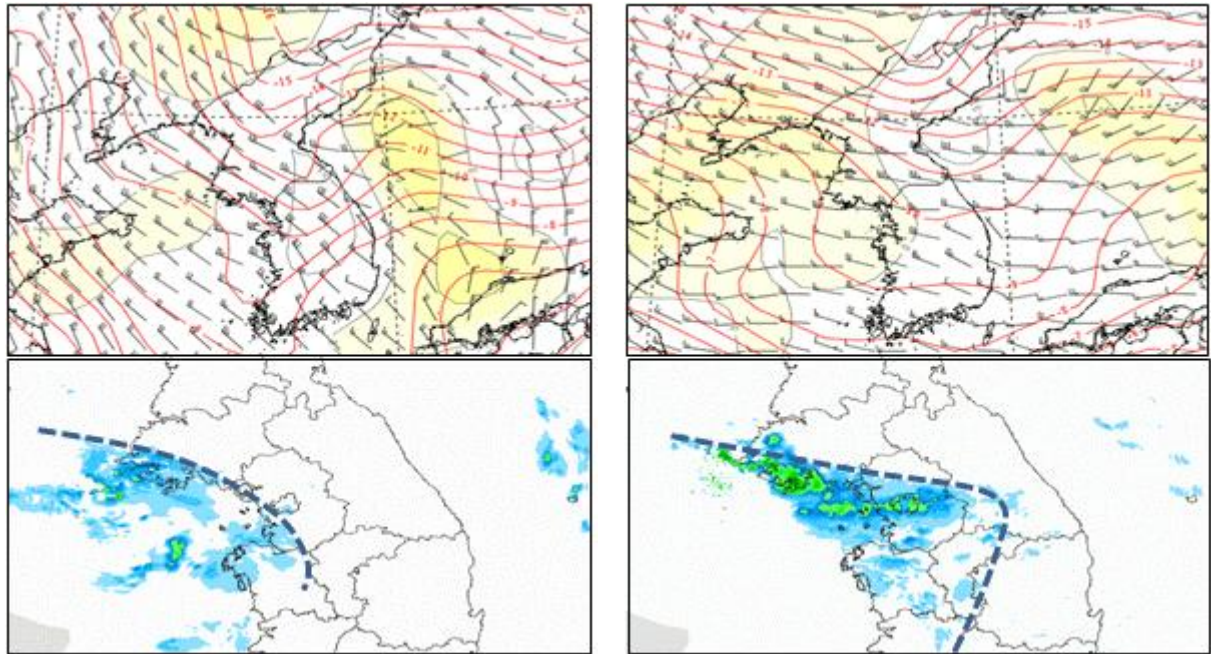


그림 1-15. 850hPa 기온, 바람, P속도, 레이더합성
(2017년 12월 8일 21시)

그림 1-16. 850hPa 기온, 바람, P속도, 레이더합성
(2017년 12월 18일 09시)

2017년 12월 8일의 경우(그림 1-15) 850hPa 풍향이 북서이고, 2017년 12월 18일(그림 1-16)은 서풍의 바람이 나타난다. 이에 따라 12월 18일 사례는 850hPa에서도 온난이류가 일어나면서 850hPa의 P속도가 음의 값(상승운동)의 영역이 내륙까지 나타나는 것을 볼 수 있다. 그리고 내륙까지 강수 강도가 뚜렷하게 나타났다. 반면, 12월 8일 사례는 850hPa에서 상승운동이 없고 운저가 낮은 구름만 발생하여 강수가 매우 약하게 나타남을 볼 수 있다【겨울예보 사례분석 1-1】. 즉, 온난이류가 최하층에서부터 850hPa까지 이루어져야 강수를 기록할 수 있는 구름이 원활히 발달할 수 있다.

바람 조건은 강수 발달뿐만 아니라 강수대의 전체적인 이동 방향에도 영향을 준다. 온난이류형 강수의 경우 구름대가 850hPa의 기류 흐름과 비슷하게 이동하는 경향이 있다. 그림 1-15와 그림 1-16의 사례에서도 나타나듯이 실제로 850hPa에서 북서류가 강하게 불면 해상의 강수대는 대부분 해안에 거의 나란하게 움직이기 때문에 충남 서해안, 전북 일부 지역에만 영향을 주고, 서풍계열이 강하다면 강원내륙까지도 유입 될 수 있다.

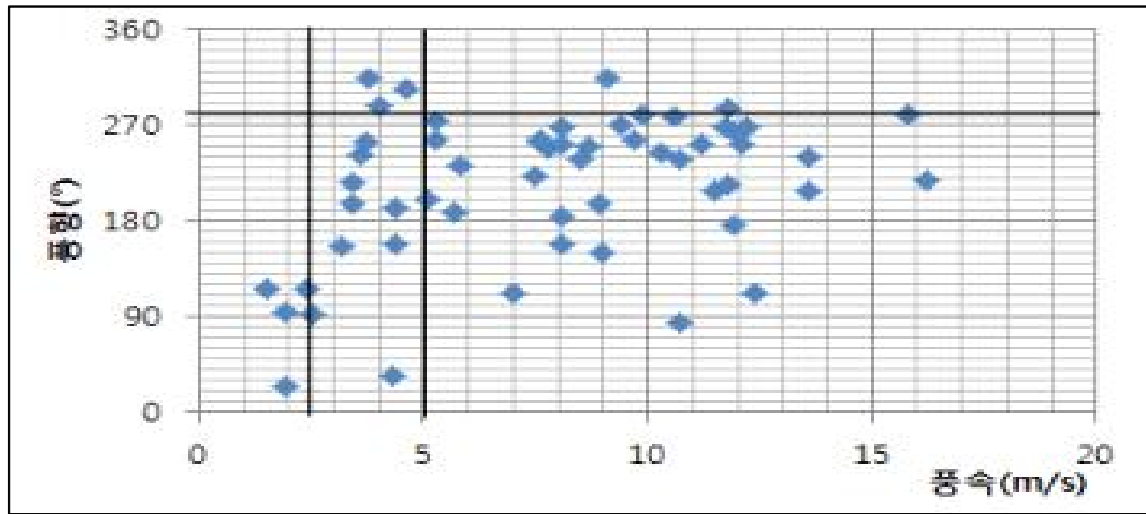


그림 1-17. 서울지역 적설 시 UM지역모델의 925hPa 풍향·풍속(2011~2016년)

비슷한 논리로, 925hPa 풍향에 따른 서울지역 0.1cm 이상의 적설 여부를 통계자료로 확인해 볼 수 있다. 그림 1-17은 서울지역에 0.1cm 이상의 적설이 있었던 사례의 풍향과 풍속을 나타낸 그래프이다. 적설이 있었던 경우 대부분 풍향은 280°보다 낮게 나타났고 풍속은 2.5m/s(5kts) 이상으로 나타났다. 이 통계 자료를 활용해 서울지역의 적설 유무 예보에 참고할 수 있을 것이다.

온난이류형 강수는 서해안의 지형특성, 해안 온도선 분포 등에 의해 하층의 풍향 조건에 상당히 민감하다는 것을 위에서 확인하였다. 다음은 풍속조건을 따져보겠다. 풍향 조건과 풍속 조건을 함께 고려한다면 전체적인 이류의 양을 알 수 있고, 온난이류 강수의 임계값을 확인할 수 있다(표 1-2, 표 1-3).

표 1-2. 2017~2018년 겨울기간 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	-
적설(인천,cm)	2.0	2.0	-	4.1	-	-	2.9	-	1.6	-
적설(수원,cm)	-	0.5	-	2.0	-	-	2.8	-	1.0	-
적설(서산,cm)	-	3.8	-	0.4	1.4	-	2.4	-	-	-

표 1-3. 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	-	눈날림	1.7	비로 내림	-	-	눈날림	눈날림	눈날림
적설(인천,cm)	비로 내림	-	눈날림	4.2	-	-	-	눈날림	-	눈날림
적설(수원,cm)	비로 내림	-	-	4.2	눈날림	-	-	눈날림	눈날림	눈날림
적설(서산,cm)	비로 내림	-	-	-	-	-	-	-	-	-

풍향이 남서류인 경우는 이류가 강하게 발생할 수 있으므로 약한 풍속 조건에서도 눈 구름을 충분히 만들어 낼 수 있다. 925hPa의 풍향이 남서류인 사례에서는 5kts 내외의 풍속에서도 1cm 내외의 적설을 기록하였고, 10kts 이상인 경우는 1~5cm까지 적설을 기록하였다. 풍향이 서풍계열인 사례가 가장 많았는데, 풍속이 10kts 이상이면 1~3cm의 적설이 가능했다. 이보다 조금 서 있는 서북서풍의 바람이 불 때는 풍속이 15kts 이상 되어야 눈구름 발달이 가능했고, 강도는 강하지 않았다.

850hPa의 경우 대부분 20~25kts의 풍속 범위가 나타났는데, 25kts 이상의 서풍이 불 경우에는 충청 또는 경기도 지역에 5cm 이상의 적설을 기록하기도 하였다. 하지만 30kts 이상의 강풍에서는 바람이 증가하더라도 적설이 그에 비례하여 증가하지는 않았다.

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 미만에 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 925hPa은 10kts 이상, 850hPa은 20kts 이상일 때 강수가 발생할 수 있으며, 850hPa에서 서풍이 25kts 이상의 풍속으로 불 때에는 5cm 이상의 적설도 가능하다.
그러나 풍속이 더 증가하더라도 적설이 풍속에 계속 비례하여 증가하지는 않는다.

1. 3. 4. 풍향과 해기차의 조건

앞서 온난이류 강수 예보에 있어서 해기차의 중요성과, 풍향의 중요성을 알아보았다. 이번에는 이 두 가지의 변수를 함께 고려하여 살펴보자.

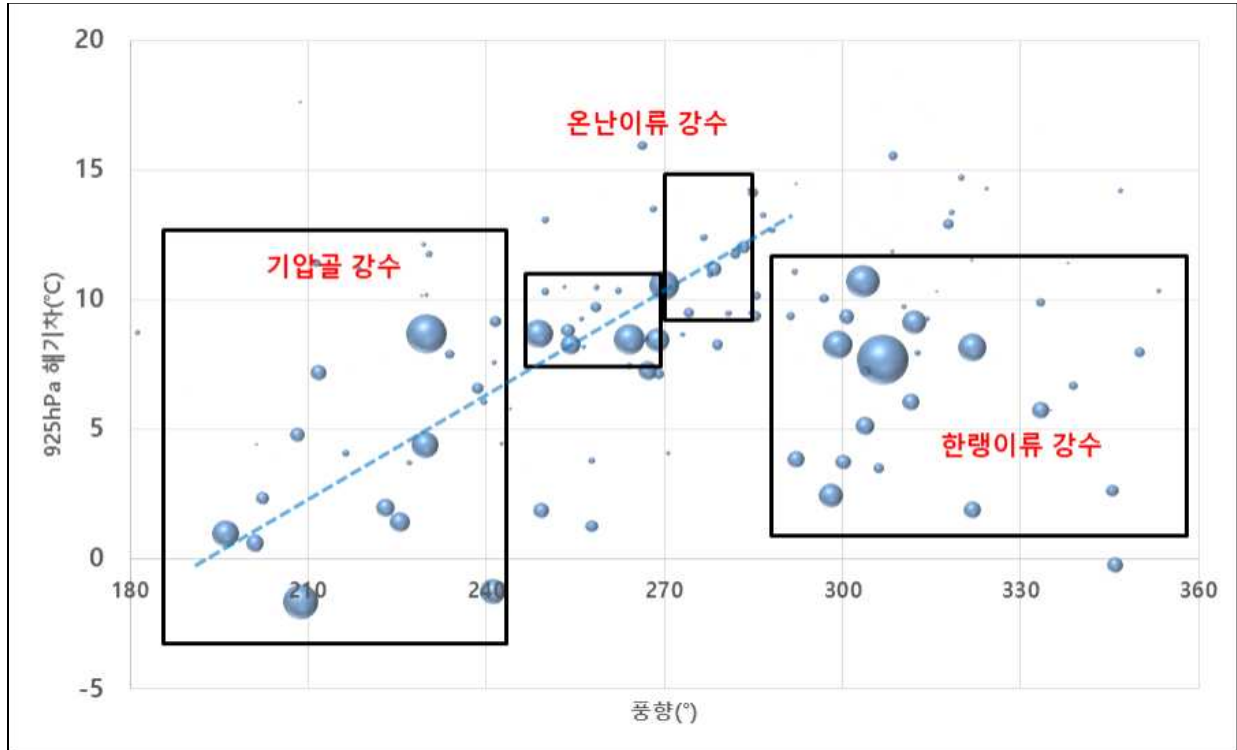


그림 1-18. 2017~2019년 11~2월 덕적도 부근 925hPa 풍향과 해기차에 따른 서울 강수량 분포

온난이류가 주로 발생하는 11월부터 2월까지, 지난 3년간의 덕적도 지점의 925hPa 해기차와 풍향 자료, 그리고 서울 지점의 강수량을 살펴보았다(그림 1-18). 앞서 서울에 온난이류 강수가 있기 위해서는 풍향이 280도보다 작아야 한다고 하였다. 따라서 280도 초과인 강수는 한랭이류 또는 그 외의 메커니즘에 의한 강수로 이해해야 한다. 280도 이하의 사례들은 온난이류, 또는 발해만 기압골 강수로 볼 수 있다. 풍향이 남서에 가까우면 더 적은 해기차로도 강수량을 기록했으며, 강수량(원의 크기)도 큰 경향을 보였다. 그러나 풍향이 서풍에 가까우면 더 큰 해기차가 필요한 것으로 나타난다.

온난이류 사례를 270도를 기준으로 나누어 본다면 풍향이 더 북서에 가까운 경우는 해기차 9°C 정도 이상에서 강수량이 기록되었고, 270도 미만인 경우는 해기차가 7°C 이상에서도 강수량을 충분히 기록하였다. 사례를 통해서 자세히 살펴보겠다.

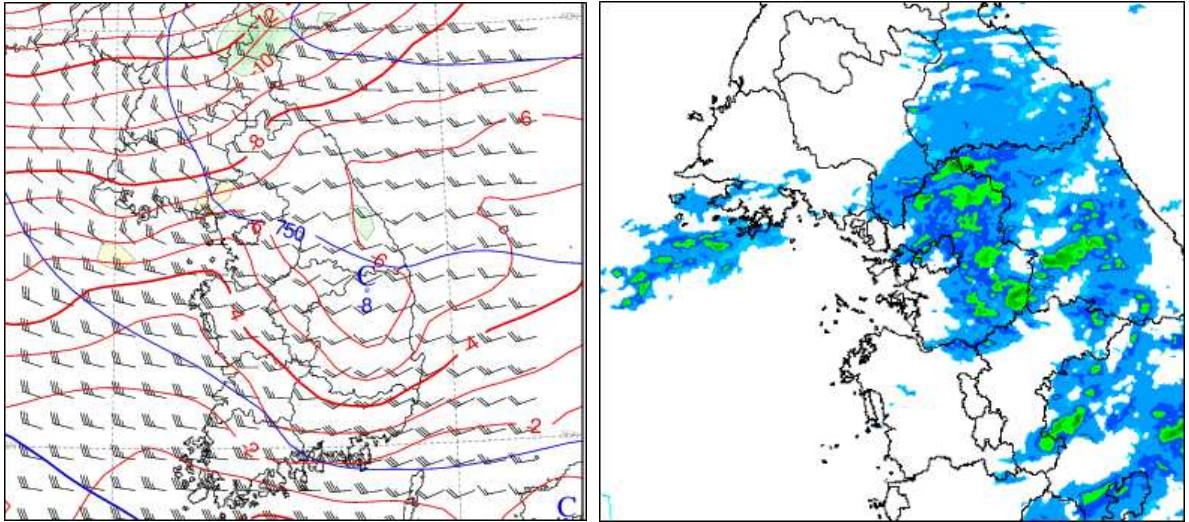


그림 1-19. 2021년 1월 18일 12시의 925hPa 바람, 기온, 고도 자료(좌), 레이더합성영상(HSR)(우)

그림 1-19 사례는 덕적도 수온이 약 4°C, 925hPa 기온은 약 -4°C로 해기차가 8°C였다. 백령도 부근으로는 북서의 경압구역이 기압골을 발달시키는 형태를 보여주고 있어서 많은 양의 강수가 예상되었다. 이때 서울 쪽으로 들어오는 기류의 풍향을 보면 270도보다 약간 높은 형태를 보이고 있었으며, 따라서 해안에서부터 구름이 발달해 들어오기 위해 필요한 해기차 값인 9°C보다는 약간 부족한 상태였다.

레이더 영상을 보면, 해기차가 부족한 만큼 서해안에는 강수대가 없거나 약했고, 서울 동쪽에는 강한 에코가 위치함을 볼 수 있다. 해기차는 부족하지만, 내륙으로 유입되면서 찬 공기, 또는 지형과 부딪히며 구름대가 발달하기 때문으로 보인다.

반면에 남서류의 바람이 예상된다면 비슷한 해기차에서도 훨씬 쉽게 포화에 이를 수 있다【겨울예보 사례분석 1-7】.

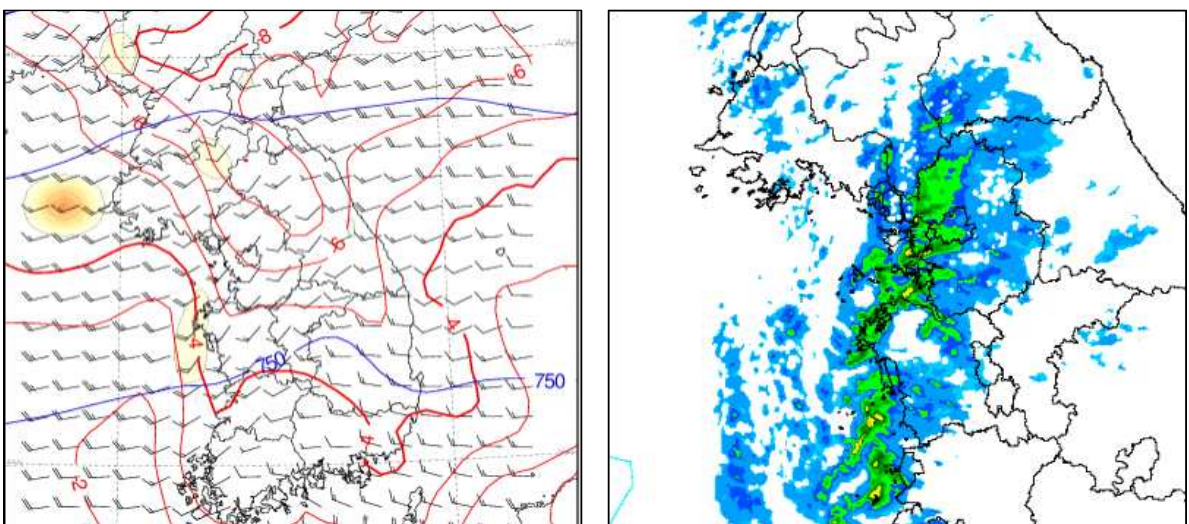


그림 1-20. 2021년 1월 12일 15시의 925hPa 바람, 기온, 고도 자료(좌), 레이더합성영상(HSR)(우)

그림 1-20 사례의 덕적도 부이 수온 약 4°C이며, 925hPa 기온은 -5°C로 앞선 사례보다 조금 더 큰 9°C의 해기차를 보였다. 한 가지 차이점은 앞 사례는 서풍계열에 가까운 바람이 불었다면, 이번 사례는 바람이 남서로 유입되었다는 것이다. 그림 1-18에서 남서풍의 바람일수록 더 낮은 해기차에도 공기가 쉽게 포화되어 강수가 나타날 수 있다고 하였다. 실제 레이더 영상에서 해안에서부터 구름이 포화되면서 강수대가 잘 발달한 모습을 보여준다. 이날 서울 일부 지점에서는 10cm 이상의 적설이 기록되었다【겨울예보 사례분석 1-6】.

앞 절에서 925hPa의 해기차 조건을 8°C를 기준으로 제시하였다. 그러나 바람이 남서 또는 북서류에 가깝다면 해기차 조건을 보정해 예보했을 때 더욱 정확한 예보가 가능하다.

1. 3. 5. 하층 강풍과 지형에 의한 강제상승 효과

일반적으로 온난이류에 의한 강수는 해안에서 발생하지만, 해상에서 해기차가 크지 않는 등의 이유로 수증기 공급이 원활하지 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.

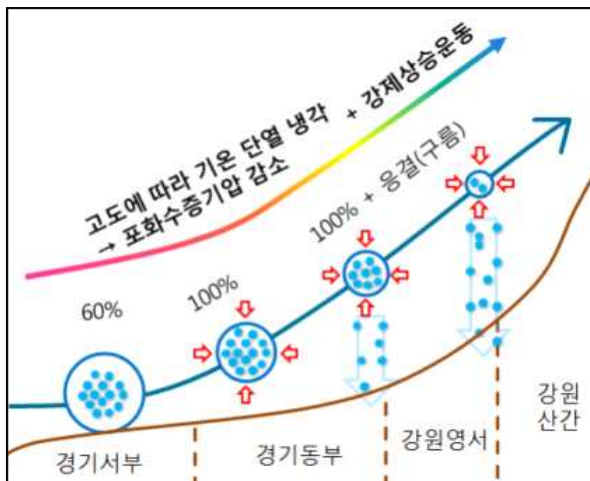


그림 1-21. 지형 강제상승에 의한 강수 모식도

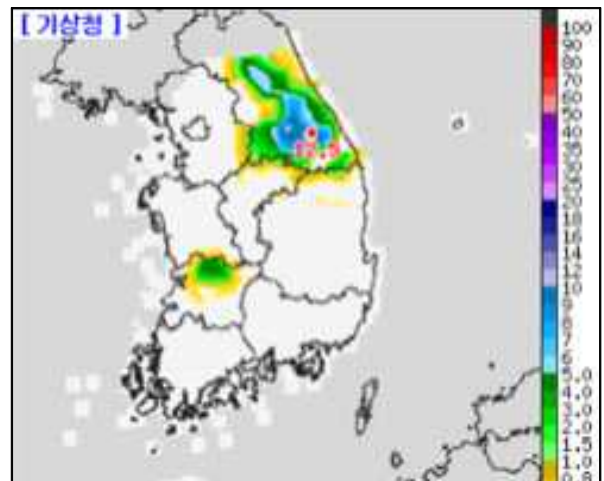


그림 1-22. 2016년 2월 8일 신적설 분포(온난이류 사례)

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). 그에 더불어 지대가 높은 곳은 구름층과 지면의 높이 차이가 작으므로 강수가 낙하하는 동안 건조 층에 의해 증발할 수 있는 기회가 적어지는 만큼 강수효율에도 +요인으로 작용한다.

이러한 지형적인 효과는 유입되는 풍향에 따라서 강수의 영향을 받는 영역이 달라진다.

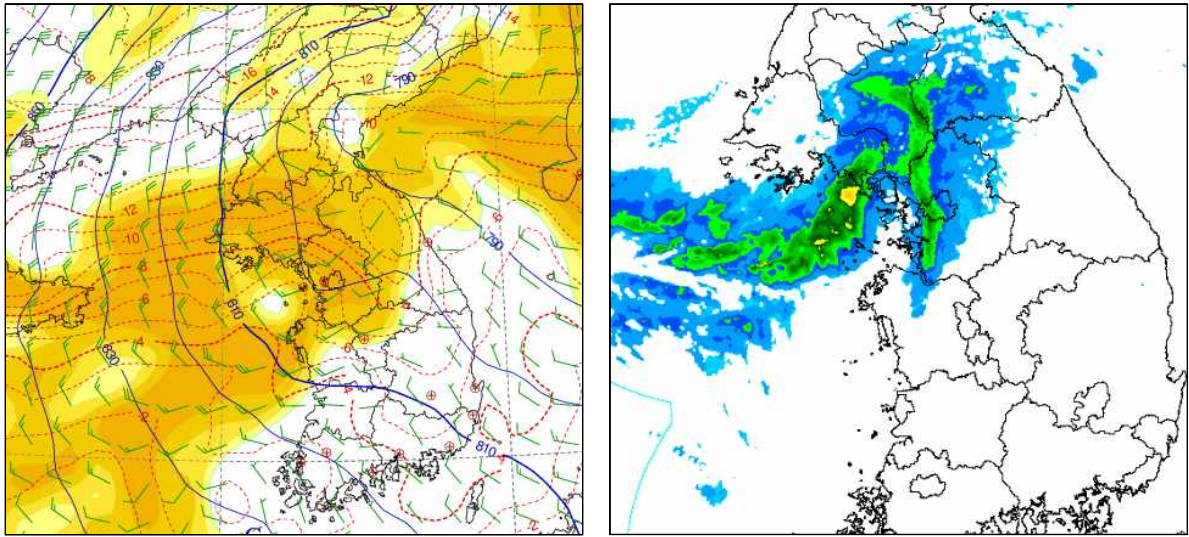


그림 1-23. 2022년 1월 19일 09시 925hPa 상세바람장(좌), 레이더합성영상(우)

첫 번째, 2022년 1월 19일의 사례의 경우 주로 925~850hPa에서 강풍대가 형성되면서 구름대가 발달했던 사례인데, 기압골의 전면 온난영역에서 강수가 강하게 발달했다. 강수가 지나간 길을 보면 서울과 경기동부를 통과할 때는 강수량을 많이 기록하지 못하였으나, 높은 지형이 있는 영서 부근에서 강수대가 더 강화되는 형태를 보였다. 또한 풍향이 주로 남서로 유입되면서 강원영서북부를 중심으로 강수량이 기록되었다.

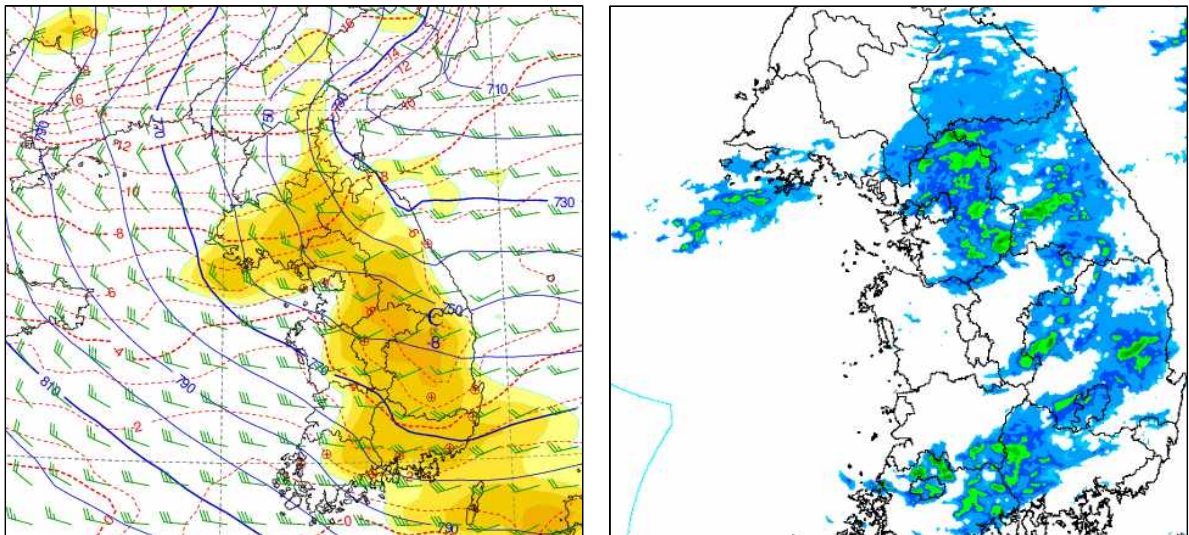


그림 1-24. 2021년 1월 18일 09시 925hPa 상세바람장(좌), 레이더합성영상(우)

두 번째, 2021년 1월 18일 사례의 경우도 마찬가지로 온난역에서 구름대는 충분히 발달하였으나, 해기차가 부족하여 서울 부근에서는 강수가 거의 없었다. 하지만, 지형의 영향을 받는 내륙으로 진입할수록 강수대가 발달하는 특징을 보였다. 이 사례는 925~850hPa의 풍향이 주로 서남서풍을 보여서, 앞 사례보다 더 폭넓은 지역에 많은 적설이

기록되었다.

따라서 925~850hPa의 기류가 유입되는 방향에 따라 지형의 영향을 받는 곳을 북쪽으로 한정 지을 것인지 내륙으로 폭넓게 선택할 것인지를 고려하여 예보해야 한다.

추가로 강원산지 부근까지 지형적인 영향을 충분히 받기 위해서는 풍향에 더해서 풍속 조건까지 필요한데, 백두대간에 수직인 바람이 가장 효과적이므로, 925hPa 또는 850hPa 바람이 서풍(또는 남서풍)으로 40kts 이상 매우 강하게 불어야 한다는 점도 예보에 참고하여야 한다.

Key Point!

1. 수증기의 공급이 부족하더라도, 하층 강풍이 지형에 부딪히면 강수량이 증가한다.
2. 하층 강풍대가 남서류로 불면 북부지역에, 서풍류가 불면 내륙에 전반적으로 강수량이 증가하는 형태를 보일 가능성이 커진다.

1. 3. 6. 중상층 대기의 하강류 또는 상승운동의 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.

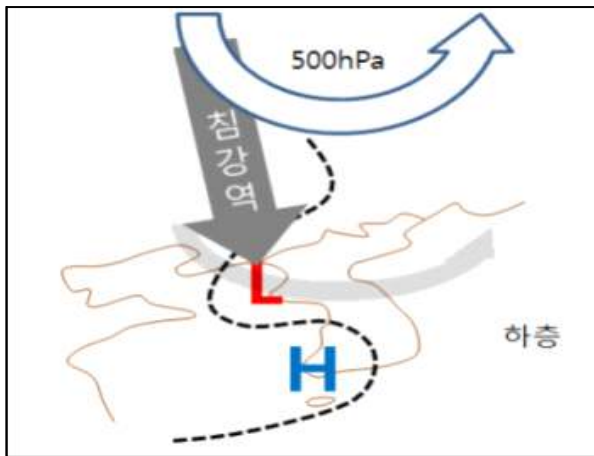


그림 1-25. 상층골 이동에 따른 침강역 모식도

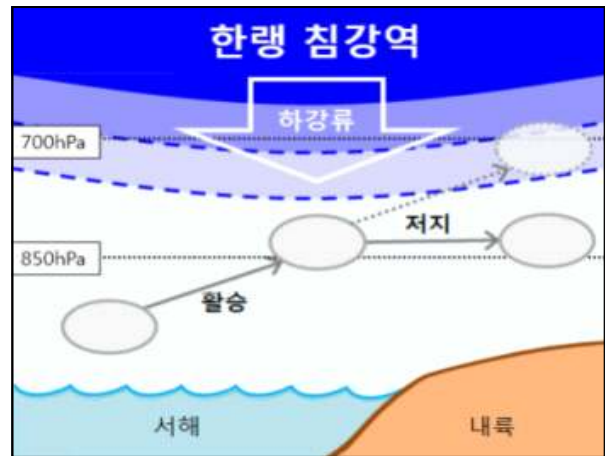


그림 1-26. 하강류에 의한 구름 발달 제한 모식도

그 이유는 상층 기압골이 발해만 기압골의 발달을 지원한 후 빠르게 동진하면, 발해만 기압골이 경기만 인근에 위치할 때 상층기압골이 이미 동해상으로 빠져나가게 되면서 그 후면으로 찬 공기가 침강해 하강 기류를 형성하기 때문이다(그림 1-25).

대기의 중상층에서 뚜렷한 하강류가 없을 경우, 서해상의 따뜻한 공기가 cold pool을 만나면 두 공기 간의 밀도차에 의해 온도 조밀역의 경사면을 따라 자연스럽게 상승운동을 하게 되고 이는 강수로 연결된다.

그러나 중층 또는 상층에서의 하강류가 지배적일 때는 하층에서의 상승운동이 하강 기류에 의해 제한되고 구름이 더 발달하지 못한다(그림 1-26). 이런 경우 충분한 상승운동을 하지 못해 입자가 매우 작은 눈으로 떨어지게 되고, 그에 따라 강수량 또는 적설이 매우 적어진다.

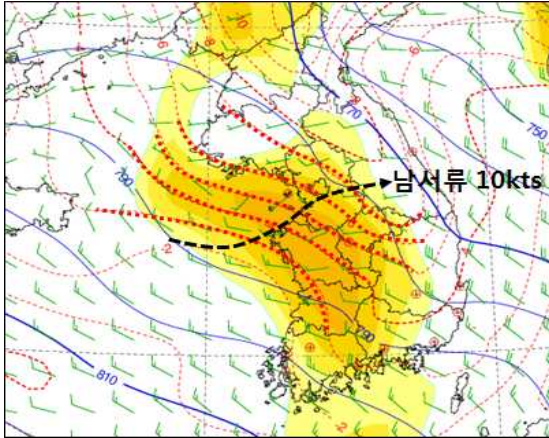


그림 1-27. 925hPa 상세바람장
(2017년 12월 9일 06시)

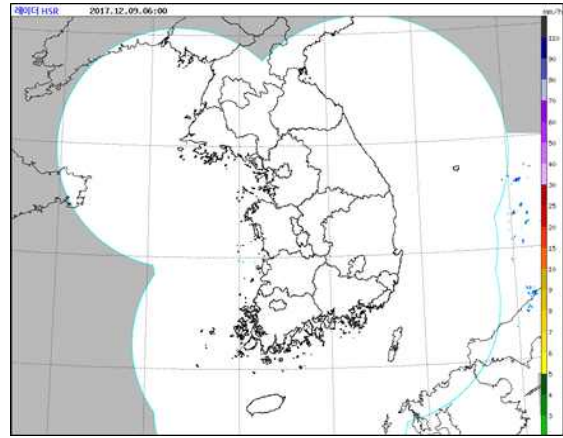


그림 1-28. 레이더 합성영상
(2017년 12월 9일 06시)

2017년 12월 9일 사례를 살펴보면, 지상에서는 저기압이 뚜렷하게 나타나고 925hPa(그림 1-27)에서 남서류가 10kts 이상으로 나타나 온난이류가 활발히 일어날 것으로 예상할 수 있다. 따라서 당시 최대 5cm까지 적설을 예보하였으나, 실제로는 충남서해안 일부 지역에 0.5cm 미만의 매우 적은 적설을 기록했다【겨울예보 사례분석 1-1】.

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



그림 1-29. 2017년 12월 9일 03시 (좌) 300K 등온위면, (우) 오산 단열선도 분석장

300K의 등온위면(그림 1-29)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 1-29)에서도 나타나는데, 대기중층에 건조영역이 확대되면서 하층으로 침강역전이 발달하고, 온난이류의 층이 제한되고 있는 모습이 확인된다.

이번에는 산지에서 강제상승에 의해 역전층이 강화되어 강수대가 저지되는 사례를 살펴보자. 중층에서 따뜻한 남서풍이 강하게 부는 경우, 또는 침강이 나타나는 경우를 고려해보겠다. 이때 최하층의 바람은 지형의 강제상승효과로 냉각되며 습윤단열 감률(겨울

철은 기온이 낮고 대기가 건조해 약 $-9^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 에 가까운 형태로 기온이 급감한다. 반면에 중층 대기에서는 온난이류가 지속적으로 이루어지거나 또는 침강에 의한 단열승온으로 대기 온도가 높아지는 형태가 된다. 그러면 산 정상 온도는 냉각으로 인해 낮아지지만, 중층대기는 따뜻해지므로 Capping inversion과 침강역전이 동시에 나타나는 형태를 보인다.

백두대간의 높이를 약 1.5km까지로 본다면 1.5~3km 사이의 대기는 강한 역전층이 나타나 공기의 상승운동이 저지되는 온도구조를 가지므로 구름이 발달하지 못하고 하층운대만 발생할 수 있다.

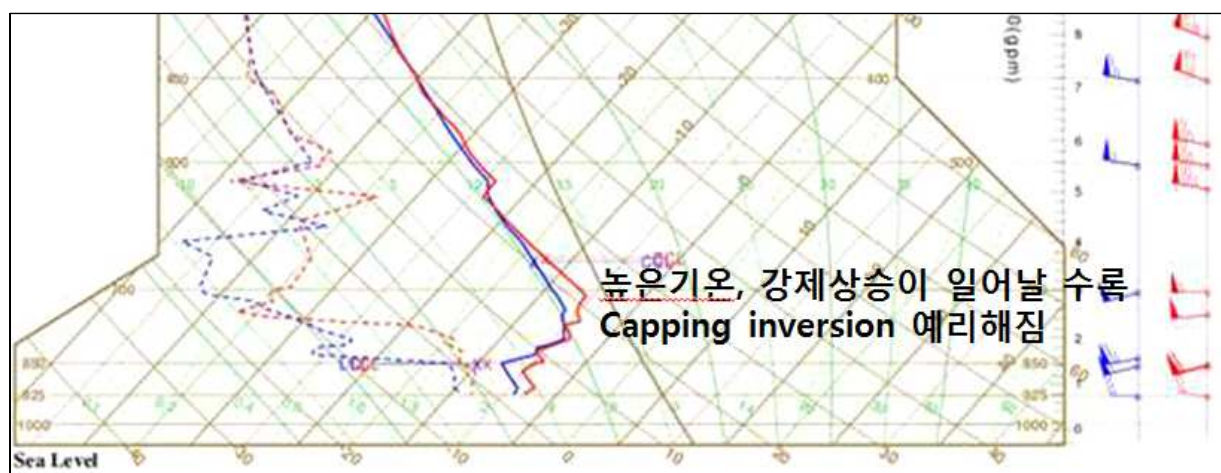


그림 1-30. 2018년 2월 14일 09시 대관령 단열선도

2018년 2월 14일 사례(그림 1-30)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【겨울예보 사례분석 1-5】.

위의 사례처럼 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 있다.

이번에는 반대로 700hPa에 온도골이 위치하면서 강수대가 오히려 발달하는 사례를 보겠다. 앞서 잠시 언급되었던, 2021년 1월 12일 사례를 다시 살펴보면(그림 1-31) 하층에 충분한 온도경도와 함께 강한 남서류가 유입되면서 구름이 충분히 발달할 수 있는 조건이 형성되어 있었다.

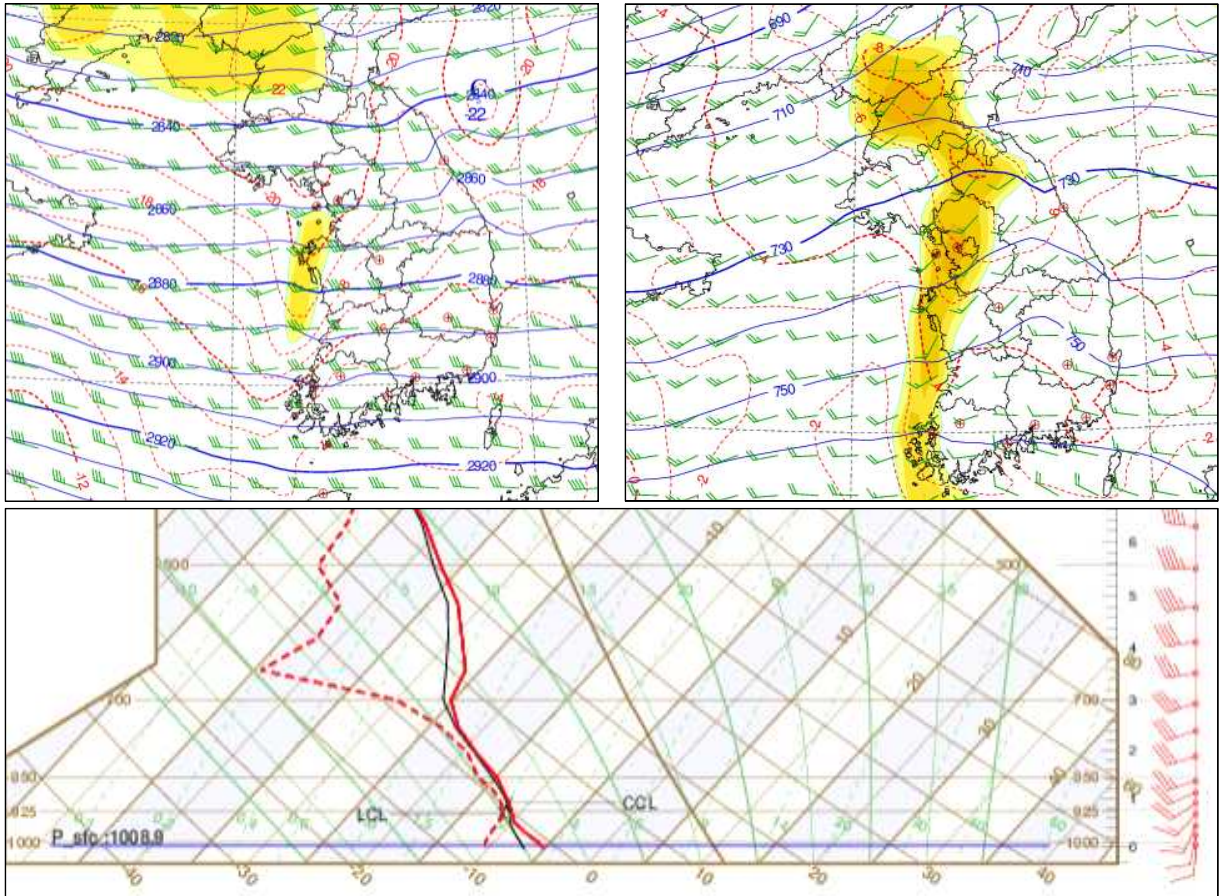


그림 1-31. 2021년 1월 12일 15시 (좌상) 700hPa, (우상) 925hPa 상세바람, (하) 서울 단열선도(분석장)

이러한 조건하에 700hPa에 온도골이 강하게 형성되어 있는데, 일반적인 온난이류 강수의 형태에서는 구름의 높이가 2.5km를 넘기 어렵지만, 이렇게 700hPa에 온도골이 위치하거나, 역학적으로 상승류가 존재할 때에는 3km 또는 그 이상으로 발달하는 형태를 볼 수 있다.

일반적인 온난이류 강수의 경우 적설의 상한을 3cm 또는 지형영향을 받아 5cm까지 고려하지만, 700hPa 이상으로 구름이 발달할 수 있는 조건이라면 5cm이상의 적설 예보까지 고려해야 함을 알 수 있다. 이 사례에서도 강수 예고는 잘 발달했으며 적설도 10cm가량 기록한 곳이 있었다.

Key Point!

1. 대기 중층에 난기가 강하게 유입되면 산 정상부터 중층까지 강한 역전층이 형성되어 적설이 적을 수 있다.
2. 불안정에 의해 3km까지 구름대가 발달하면 5cm이상의 많은 눈이 내릴 수 있다.

1. 3. 7. cold pool의 강도

cold pool은 온난이류형 강수에서 강수강도를 강화시키는 중요한 요소이다. cold pool이 강해야 앞 절에서 다룬 동서 온도경도가 커지면서 상승운동의 기울기가 커질 수 있기 때문이다.

특히 약한 강수의 경우에는 낮은 고도에서 강하게 트리거가 이루어져서 지표 부근에서부터 포화가 이루어져야 강수가 기록될 수 있으므로, 더 중요하게 고려되어야 한다. 따라서 약한 강수를 판단할 때 cold pool과 850hPa의 경압성을 함께 고려해야한다.

먼저, cold pool이 약하고 850hPa의 기압골 지원도 없는 경우를 보겠다.

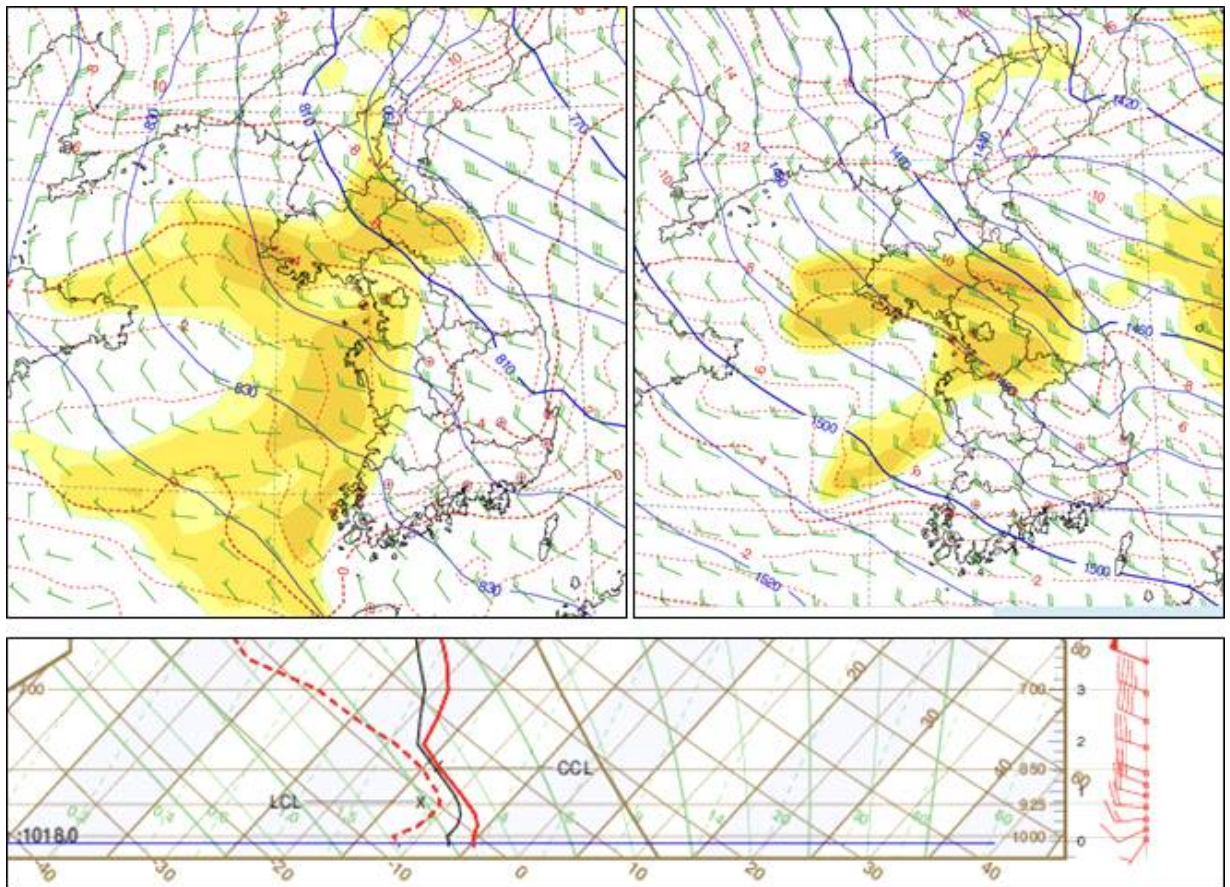


그림 1-32. 2022년 1월 3일 21시 (좌상) 925hPa, (우상) 850hPa 상세바람, (하) 서울 단열선도(분석장)

그림 1-32의 사례를 보면 925hPa에서는 약간의 기압골 형태가 잡히지만, 850hPa에서 기압골의 지원이 없는 형태이며, 시간대도 본격적인 냉각이 되기 전인 21시인 만큼 내륙으로 온도골의 형태도 보이지 않는다.

단열선도 상에서 보면 포화층의 top은 2km정도 나오지만, 925hPa 아래로는 포화가

되지 않은 형태를 보이고 있다. 이러한 경우라면 구름이 강수입자를 성장시키기 어렵기 때문에 강수를 기록하기는 어려운 조건이며, 실제로 아주 일부 지역을 제외하고는 대부분 적설을 기록하지 못하였다.

다음은 cold pool은 강하고, 850hPa의 기압골 지원은 없는 사례를 살펴보겠다.

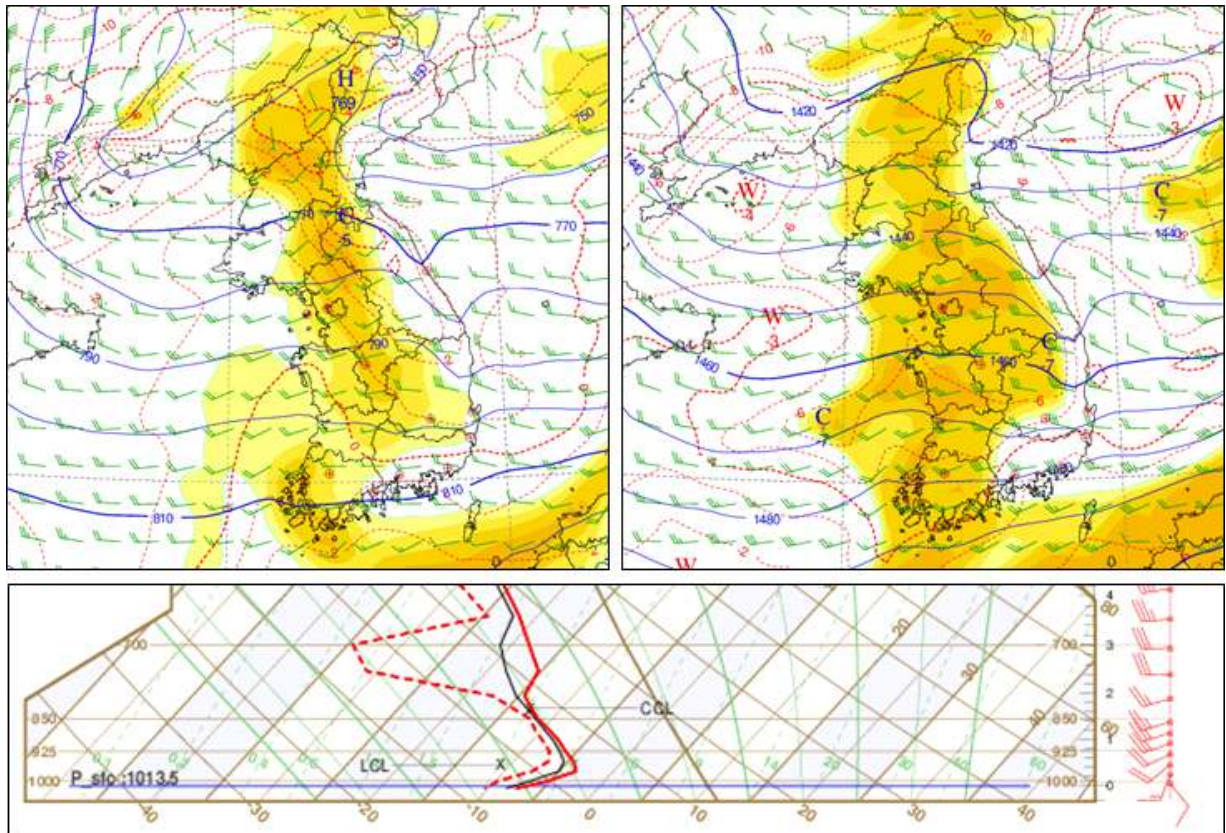


그림 1-33. 2021년 12월 29일 03~09시 (좌상) 925hPa, (우상) 850hPa 상세바람, (하) 서울 단열선도(분석장)

그림 1-33의 사례는 925hPa에서 온난이류는 충분히 있지만, 850hPa에서는 뚜렷한 이류나 기압골 지원이 없는 형태이다. 하지만 시간대가 새벽에서 아침으로 흘러가는 시점인 만큼 내륙에 온도골은 존재하는 형태였다.

그림 1-33의 단열선도를 보면 그림 1-32. 사례와 구름의 top은 거의 유사한 형태를 보이고 있다. 하지만 지표 부근의 냉각으로 역전층이 강하게 형성된 것을 볼 수 있고, 그에 따라 포화층이 지표 부근부터 형성된 것을 확인할 수 있다. 이 사례 역시 구름이 크게 발달하진 않았지만 cold pool이 강했기 때문에 강수를 만들어 낼 수 있었고, 강수량은 0.1~0.7cm 정도로 1cm에 못 미치는 적은 강수가 기록되었다.

따라서 두 사례를 비교·대조해 본다면, 850hPa의 지원이 없어 2km 내외로 구름이 크게 발달하지 못할 때는 cold pool의 지원이 있어야만 낮은 고도에서부터 강수가 발달하면서 1cm 미만의 적설을 기록할 수 있음을 알 수 있다.

이 외에도 cold pool이 강수 강화의 판단 근거로 사용될 수 있을지 더 알아보자. 그림 1-34는 중부지방에 적설이 기록된 10개 사례의 온위값 분포를 보기 위해, 3차원 기상표출 시스템(Gloview)을 활용하여 경기만에서 강원도 방향으로 자른 연직단면도이다.

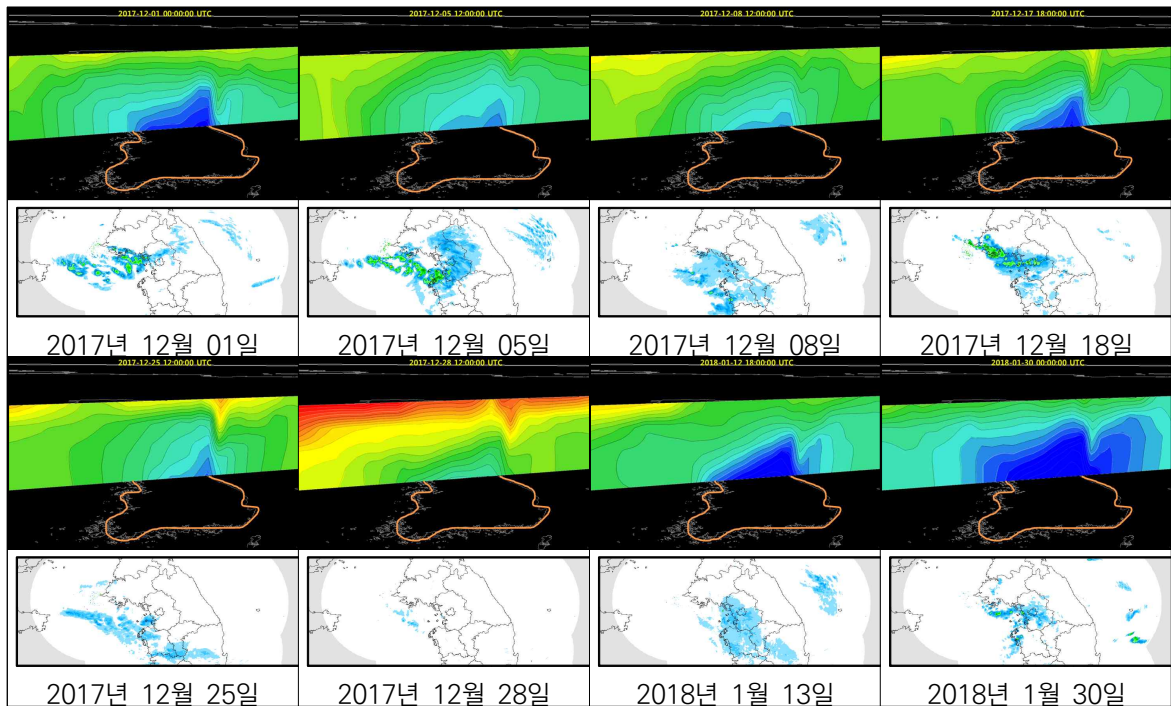


그림 1-34. 중부지방 동서(경기만에서 강원도 방향) 연직단면도 온위(260~280K)

그림 1-34에서 파란색 영역(260K 미만 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 강수강도는 가늠할 수 있었다.

한 가지 또 고려할 점은 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【겨울예보 사례분석 1-2】.

Key Point!

1. 2km 이하의 낮은 구름대의 경우 cold pool이 지원되어야 적설 기록이 가능함
2. 260K 미만의 온위역이 서해상까지 가득 차 있을 때: 1~3cm 강도의 적설 가능
3. cold pool을 분석할 때, 겨울철 GDAPS에서 Warm bias 경향을 보이는 것에 주의!

1. 4. 온난이류형 강수 예보 시 주의사항

1. 4. 1. 낮 동안에도 온난이류형 강수가 발생할까?

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 꼭 차 있을 정도로 매우 강한 경우는 경기만 지역으로 강한 강수대가 형성된다. 또한 낮 시간대까지도 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 1-35).

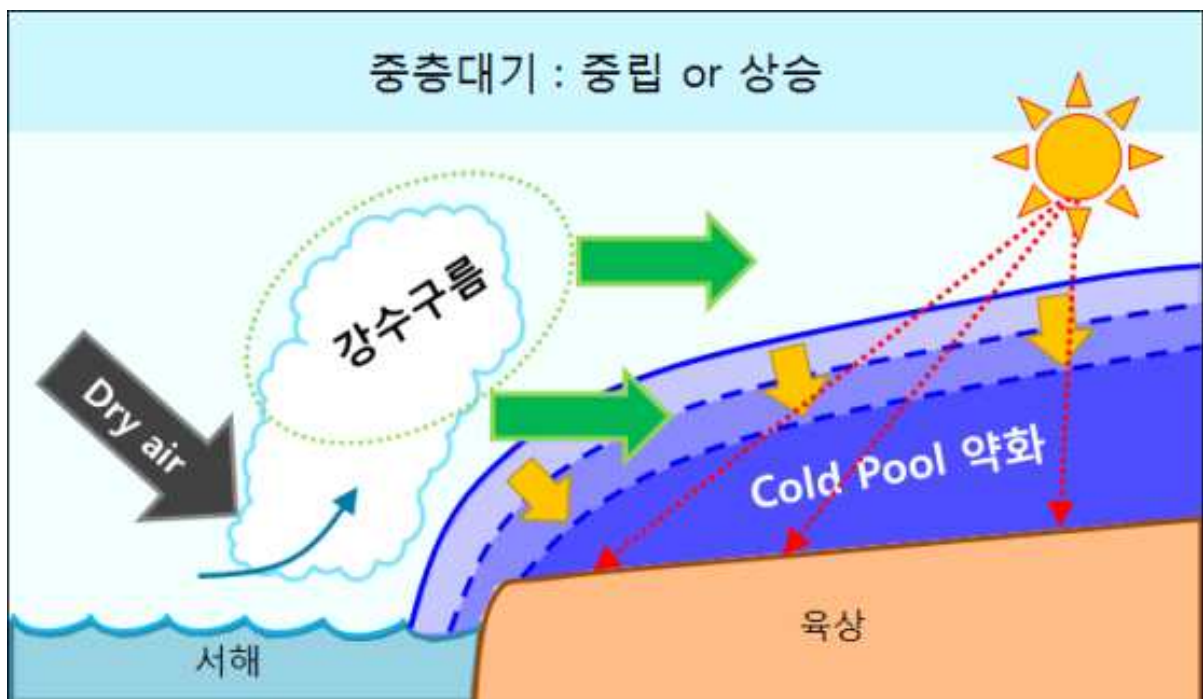


그림 1-35. 낮 동안에 발생하는 온난이류형 강수 모식도

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 강수 조건들도 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 온도 조밀역이 강하게 나타났으며 강수대가 형성되어 내륙에도 강수가 내렸다【겨울 예보 사례분석 1-4】.

1. 5. 온난이류형 강수 예보를 위한 흐름도

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

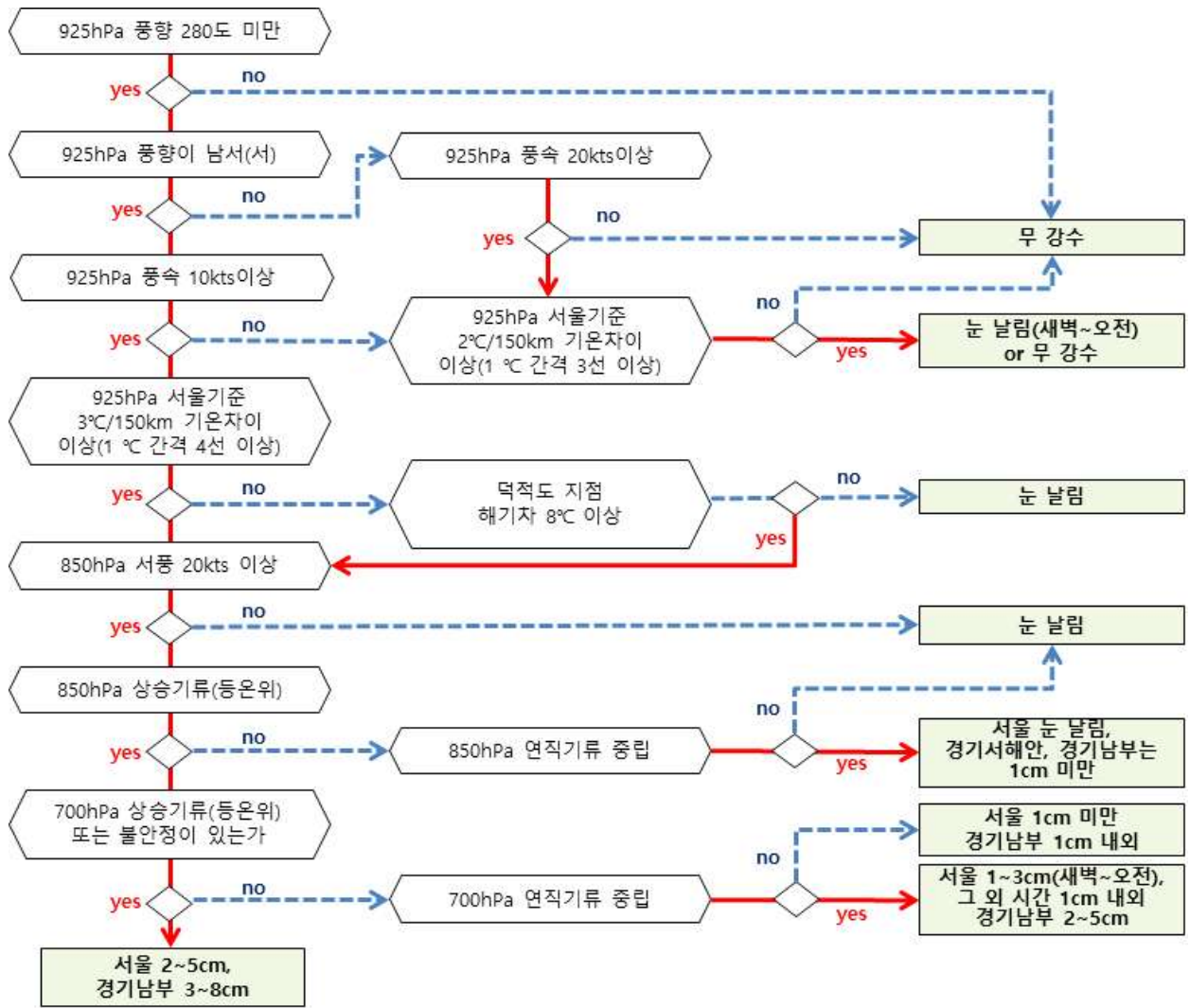


그림 1-36. 온난이류형 강수 예보를 위한 흐름도

위의 조건은 일반적인 온난이류형 강수일 때의 조건이며, 기압골을 동반하거나 시스템 정체 등 다양한 변수에 의해 강수 양상은 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 《Why?How!》 제4권 ‘겨울예보 사례분석’을 참고하길 바란다.

| 참고문헌

1. 기상청, 2011: 손에 잡히는 예보기술 대설판단 가이드스 4.
2. 기상청, 2011: 예보관핸드북시리즈(1), 한눈에 보는 대설개념모델
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

| 《Why?How!》 제4권 ‘겨울예보 사례분석’ 가이드스 중 ‘1. 온난이류형 강수’ 연계 내용

- 1-1. 2017년 12월 9일 사례: ‘최하층 온난이류에 의한 중부지방 강수?’
- 1-2. 2017년 12월 10일 사례: ‘발해만 저기압에 의한 수도권 예상보다 많은 적설’
- 1-3. 2017년 12월 29일 사례: ‘발달하지 못하고, 내륙 깊이 유입되지 못한 온난이류형 강수’
- 1-4. 2018년 1월 30일 사례: ‘낮 시간 동안 온난이류에 의한 수도권 강수?’
- 1-5. 2018년 2월 14일 사례: ‘매우 강했던 남서풍과 온난이류? 하지만 강수는 없었다.’
- 1-6. 2021년 1월 12일 사례: ‘오후 시간 온난이류에 의한 수도권 대설’
- 1-7. 2021년 1월 18일 사례: ‘발해만기압골이 동반된 온난이류에 의한 수도권 눈’

겨울 예보

2. 발해만 기압골에 의한 온난이류형 강수



2. 발해만 기압골에 의한 강수

Why?

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

2. 1. 발해만 기압골이란?

발해만 기압골은 겨울철에 발해만 부근에서부터 발달하는 기압골을 말하는데, 따뜻하고 마찰이 적은 발해만 인근으로 차고 건조한 상층골이 남하하는 11월 하순에서 12월 중순까지 자주 발생한다.

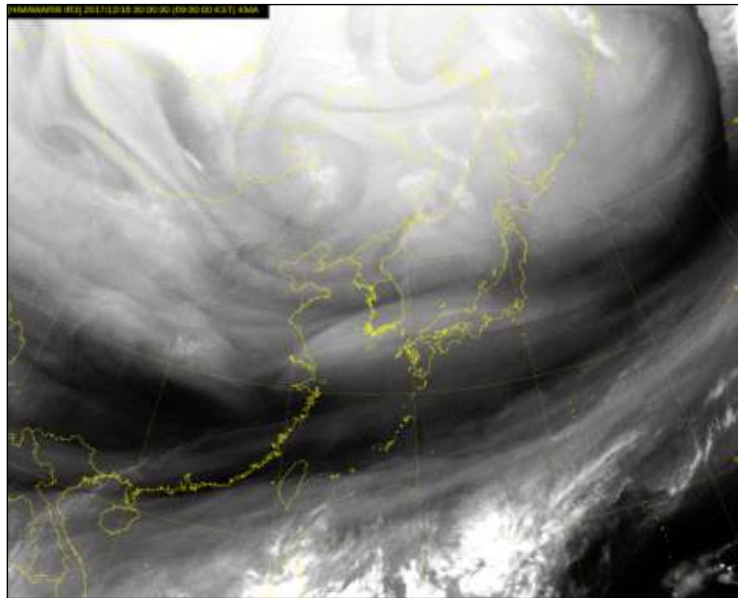


그림 2-1. 발해만 저기압이 발달할 때의 위성 수증기 영상
(2017년 12월 18일 09시)

수증기 영상(그림 2-1)에서 몽골 동쪽에 중심을 둔 소용돌이와 그 중심을 따라 회전하는 건조역이 여러 겹으로 형성되어 강한 회전력으로 돌고 있다. 또한 우리나라 남부지역으로는 능 형태의 라인이 잡혀 있고, 따라서 산둥반도 인근으로 풍속이 점차 강화되는 와도 streak이 나타날 수 있음을 알 수 있다. 한편, 일반적으로 하층에서는 해수온도가 주변 육지보다 따뜻하고 마찰도 적으므로, 상층에서 하층으로 저기압성 흐름이 전이되면서 발해만 기압골이 형성될 수 있다.

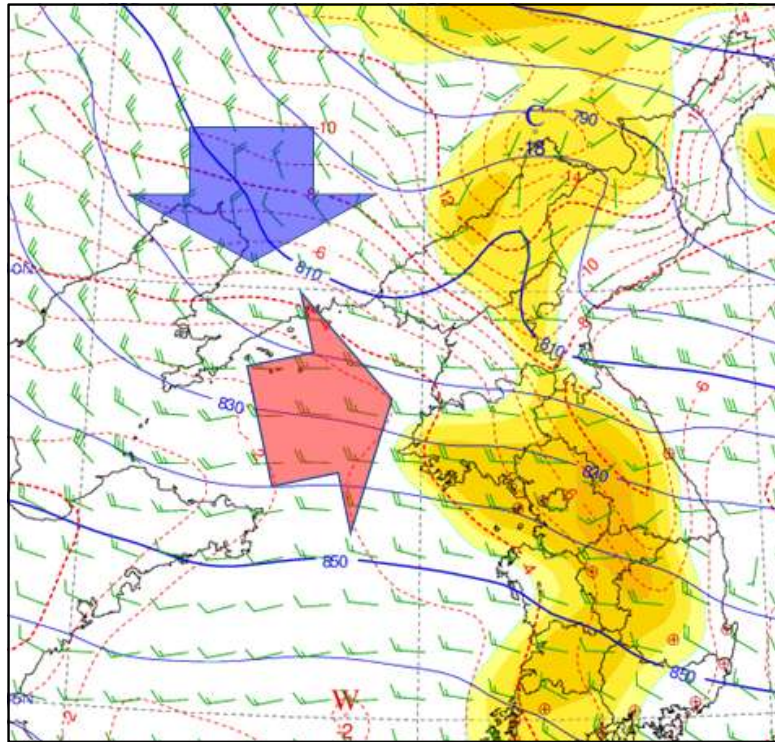


그림 2-2. 발해만 저기압이 발달할 때의 925hPa 상층바람기온 분석장
(2017년 12월 18일 09시)

이렇게 형성된 발해만 기압골의 경우 그림 2-2에서와 같이 850hPa ~ 925hPa 고도에서 북서류가 남하하는 구역에서의 온도경도와 기압골 전면에서 풍속의 차이가 뚜렷하게 증가하는 것을 통해 확인할 수 있다.

발해만 기압골은 겨울철에 발생하는 온난이류형 강수와 연관성이 큰데, 기압골이 발달하면 온난이류형 강수의 강도를 강화 시키기도 하고 온난이류 후면에 한랭전선역을 형성하여 추가적인 강수대를 만들기도 한다. 따라서, 발해만 기압골의 특성을 이해하고 발해만 기압골이 형성될 때 생기는 강수대 특성과 예보를 위한 판단 흐름도를 제시하고자 한다.

2. 2. 온난이류형 강수에 미치는 발해만 기압골의 영향

2. 2. 1. 발해만 기압골과 온난이류형 강수

단순 온난이류형 강수 유형에 발해만 기압골이 동반되면 남서류 강화에 따른 수증기 공급 추가, 풍속 강화, 불안정 증가를 일으켜 강수 강도가 강화되고 강수 범위도 넓어지게 된다.

발해만 기압골에 의해 925hPa 또는 850hPa에서 남서류가 강화되면 중부지방의 눈이 대설로 이어질 수 있다. 남서류로 인하여 이류의 강도가 강해지는 점, 강수대를 남하시키기보다 중부지방에 체류시키면서 강수 지속시간이 길어지는 점 등이 그 이유이다. 다음은 발해만 기압골의 대표사례들을 살펴보겠다.

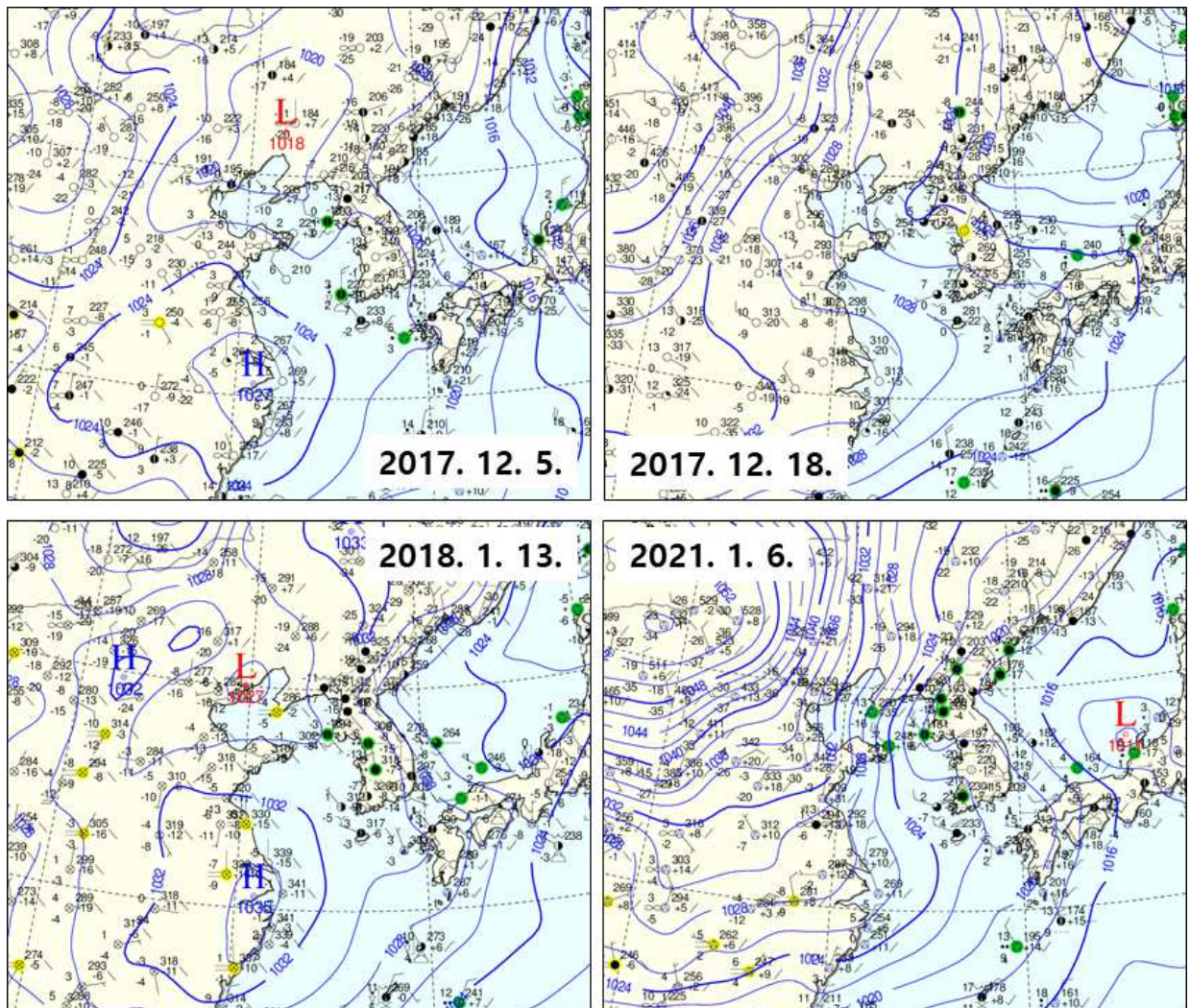


그림 2-3. 수도권 지역 5cm 내외의 적설을 기록한 사례의 지상 일기도

최근 수도권 지역의 온난이류형 강수 유형에서 5cm 내외의 적설을 기록하였던 사례 네 가지를 선정하여 살펴보았다(①2017.12.5., ②2017.12.18., ③2018.1.13., ④2021.1.6., 그림 2-3). 사례에서 두 가지 공통점을 찾을 수 있는데, 첫째는 지상일기도에서 남쪽에 고기압이 견고하게 버티고 있다는 점, 둘째는 발해만 저기압 형태가 지상에서까지 보인다는 점이다. ①, ③의 사례의 경우는 남쪽고기압의 역할이 뚜렷했고, ②, ④번 사례의 경우는 중규모저기압 형태가 잘 나타났던 사례였다. 이 두 요소는 발해만 기압골 패턴에서 앞서 말한 남서류의 강도와 강수지속시간을 늘리며 강수량을 증가시키는 주요 요인이다.

2017년 12월 18일 사례는(그림 2-3) 온난이류에 의한 강수 이후 상층 한기 남하에 따른 발해만 기압골의 영향이 더해지면서 강수대가 전선대의 형태로 변하였고, 예상보다 많은 적설이 내렸다. 당시 서울경기 지역에 1~5cm의 적설을 예보하였으나 실제로는 4~10cm가 내렸다【겨울예보 사례분석 2-2】. 이처럼 발해만 기압골이 동반될 경우 일반적인 온난이류형 강수 유형보다 한 두 단계 많은 강수량을 예보하여야 한다.

또한 발해만 저기압의 영향을 받으면서 남쪽에 고기압이 버티고 있고 상층 한기에 의해 불안정까지 커지면서 구름의 top이 5km 가까이 발달하는 경우에는 강수량이 20mm 이상 폭발적으로 증가하기도 한다【겨울예보 사례분석 2-1】.

2. 2. 2. 발해만 기압골에 의한 강수 강화 원리

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

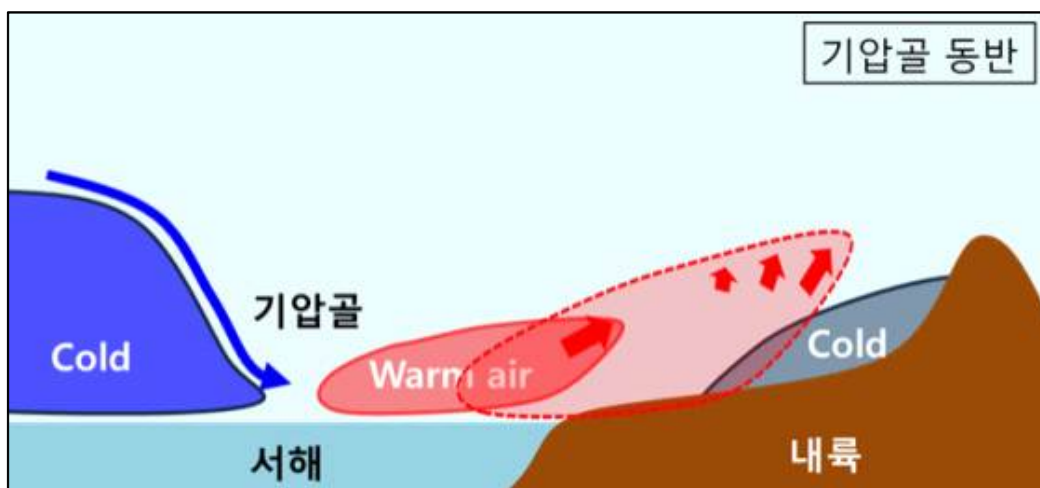


그림 2-4. 한랭역 지원에 의한 온난이류형 강수 모식도

위 모식도(그림 2-4)는 cold pool이 약하거나 Warm air의 이류가 약할 때, 그 후면에서 이류되는 찬 공기가 전면의 Warm air를 밀면서 더욱 상승시켜 강수를 유발하는 것을 보여준다.

실제 사례에서 차고 건조한 공기가 가라앉으면서 그 전면대로 구름이 발달하는 사례를 찾아 볼 수 있다.

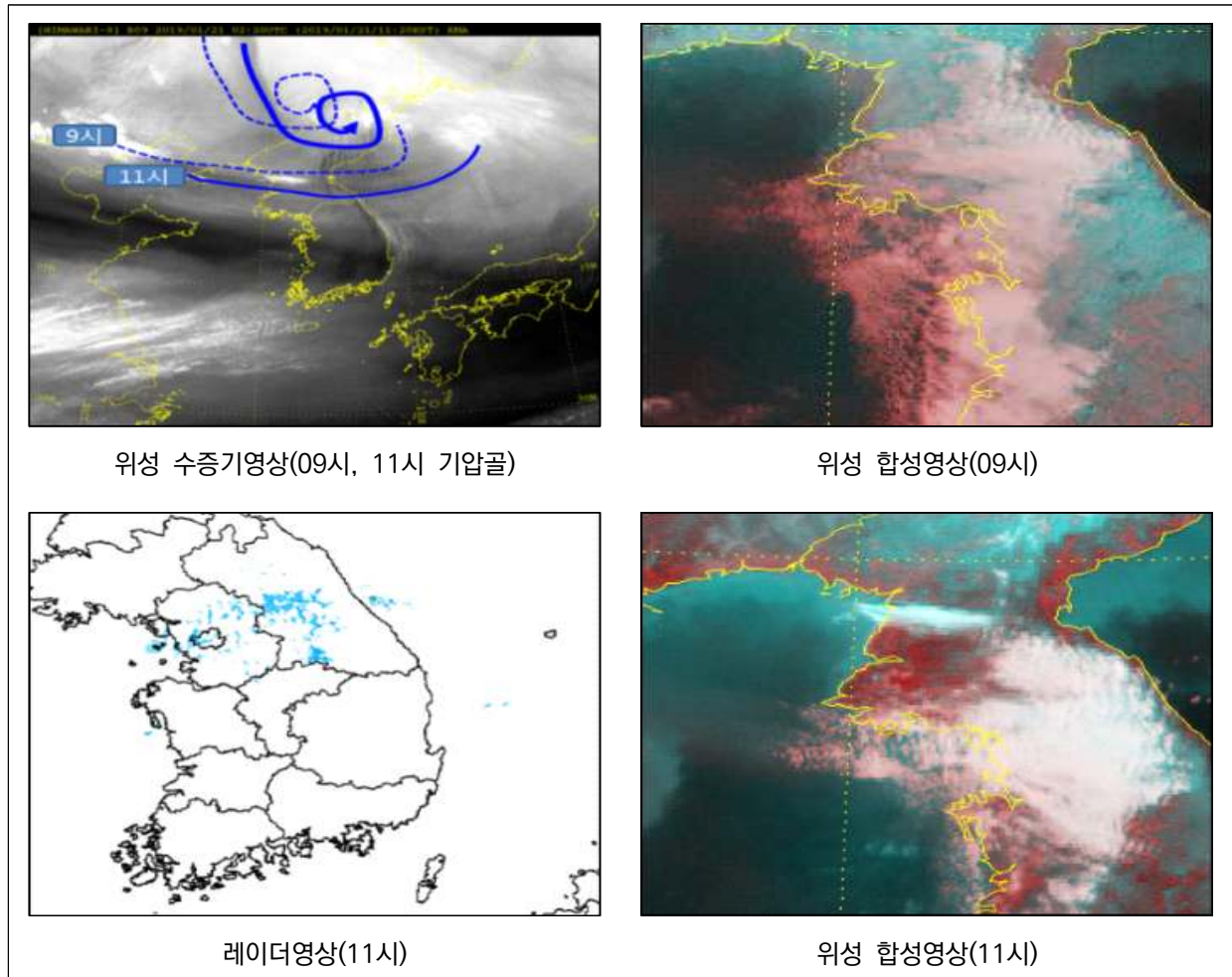


그림 2-5. 2019년 1월 21일 위성 수증기영상, 위성 합성영상, 레이더영상

2019년 1월 21일 사례(그림 2-5)를 보면 9시에는 건조역이 중부지방과 멀리 떨어져 있는 상태에서 온난이류가 약하여 하층운만 약하게 존재하였다. 11시에는 건조역이 접근하면서 건조역과 중부지방 하층운대가 가까워졌고, 그에 따라 합성영상에서 구름대가 9시보다 11시에 더 밝아진, 즉 구름대가 더욱 발달한 것을 볼 수 있다. 이때 구름대가 강화되면서 일부 지역에서는 강수량을 기록하였다. 즉 기압골 후면의 건조공기(찬공기)가 전면대의 구름을 더 발달시킨 작용을 했음을 알 수 있다.

2. 2. 3. 최하층 수증기 공급과 850hPa의 한랭이류 영역 전면대에서의 강수 강화

온난이류에 의한 Warm air의 상승이 강화되기 위해서, 후면에서 찬 공기의 침강이 지원되어야 한다는 전제를 앞서 언급하였다. 이를 살펴볼 수 있는 척도로 850hPa에서 한랭역의 온도경도가 있다. 850hPa의 경압성은 찬 공기영역의 강도를 결정짓는다고 볼 수 있다.

925hPa에서 남서류가 유입되면서 수증기 공급이 원활한 경우와, 925hPa에서 북서류가 유입되어 수증기 재료가 거의 없는 상황을 나누어서 850hPa의 경압구역의 강수 강도에 어떻게 영향을 주는지 살펴보도록 하겠다.

먼저 2018년 12월 13일 09시 사례(그림 2-6)는 925hPa에서 남서류가 유입되면서 수증기가 충분히 공급되었던 사례이다.

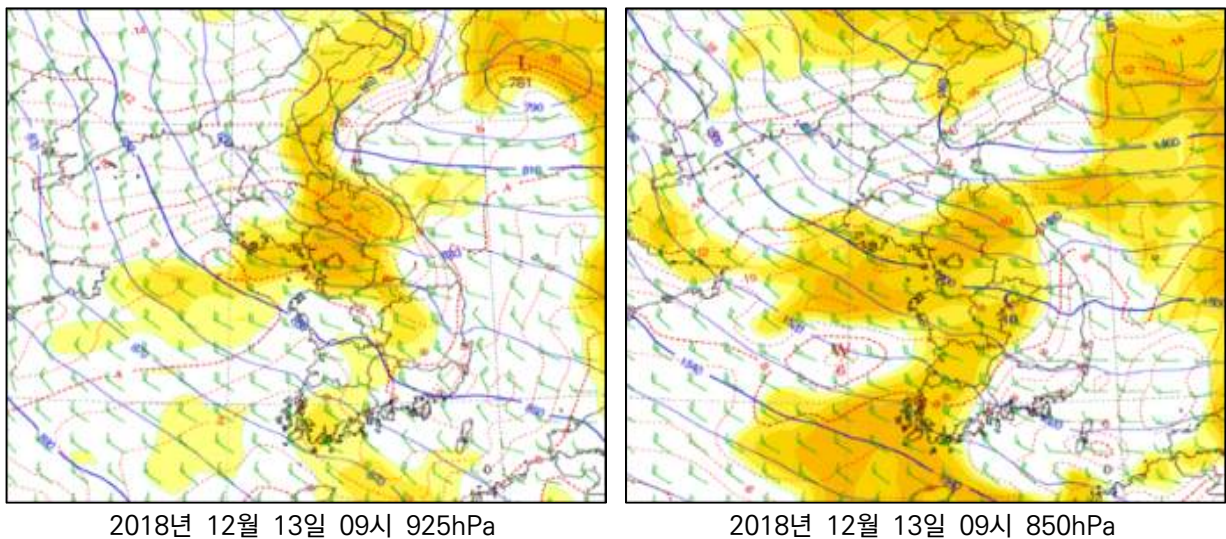
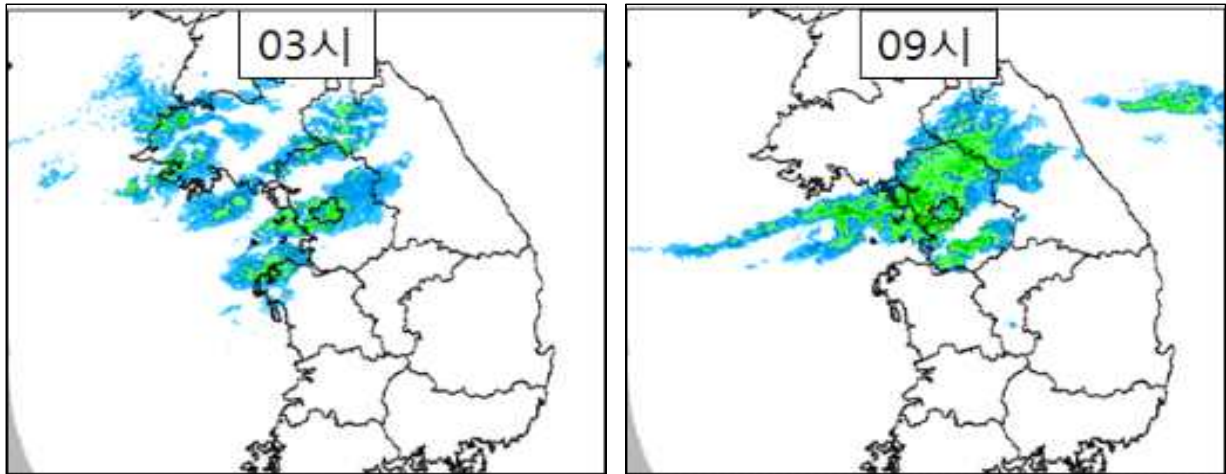


그림 2-6. 2018년 12월 13일 09시 925hPa(좌), 850hPa(우) 일기도

위 사례의 경우 925hPa에서는 저기압성 곡률을 보여주며 서 또는 남서풍이 25kts로 강하게 불었다. 즉 경기만 부근에 해기차로 만들어진 수증기 또는 구름대가 서풍 기류를 타고 내륙으로 유입될 수 있는 조건이었다. 해기차가 충분한 여건에서 서풍이 들어오므로 Warm 영역에서 1차로 강수대가 만들어졌다.

거기에 더해서 서한만 부근에서는 850hPa에 2.5°C정도의 온도경도 구역이 뒤따라 붙었는데, 그로 인해 전면대에 풍속은 더욱 증가하였고, 대기가 남북으로 압축되어 강수의 영역이 띠의 형태로 좁아지면서 강수의 강도도 더욱 증가하는 형태를 보였다.



03시 레이더영상

09시 레이더영상

그림 2-7. 2018년 12월 13일 03시(좌), 09시(우) 레이더영상

실제 레이더 영상(그림 2-7)을 보면 먼저 난역에서의 강수가 새벽 시간대에 영향을 준 것을 볼 수 있고, 9시 경에는 발해만 기압골이 지원되면서 한랭 온도 조밀역이 접근해 올 때 그 전면에서 전선대의 모양으로 강수대가 강화되었다.

따라서 925hPa에서 수증기가 유입되는 경우에는 850hPa의 경압구역이 약 150km에 온도 경도가 2.5°C 이상이 나타나면 강수대는 한 단계 더 강해질 수 있음을 고려해서 예보하여야 한다.

다음은 925hPa에 북서류가 불면서 수증기 공급이 적었던 사례를 살펴보겠다.

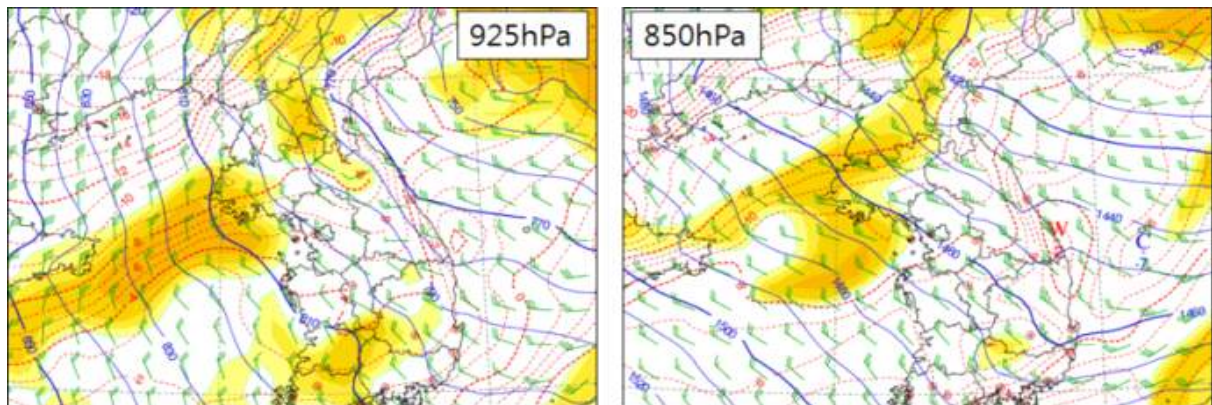


그림 2-8. 2019년 1월 15일 09시 925hPa(좌), 850hPa(우) 일기도

그림 2-8에서 기압골 전면을 보면 925hPa에서 북서류가 불고 있으며, 850hPa에서도 남서류가 특별히 뚜렷하지 않은 특징을 보이고 있다. 이러한 패턴은 남쪽에 고기압이 없는 상황에서 서해상으로 강하게 밀고 내려오는 한기에 의해서만 기압골이 유도될 때 주로 나타난다.

이 사례에서는 후면으로의 경압성이 매우 컸음에도 불구하고, 눈 날림 정도로 강수가 약했는데, 이는 수증기 공급이 거의 없는 상태에서 후면에 약 150km에 3°C의 강한 경압성(큰 기울기)에 의해 대기를 쥐어짜면서 강수가 만들어졌기 때문이다.

여기서 두 가지 시사점을 생각해 볼 수 있는데, 첫 번째로 수증기가 매우 적은 사례에서도 산둥반도에서 백령도 사이에 850hPa에서 형성된 경압 구역이 매우 강하다면 전면에 난기가 뚜렷하지 않더라도 강수를 유발할 수 있다는 것이고, 두 번째로는 850hPa의 일기도만 분석해서 기압골이 뚜렷하더라도, 925hPa에서 북서류가 예상된다면 많은 양의 강수 예보를 하면 안 된다는 것이다.

2. 2. 4. 중상층 기압골 지원에 의한 강수대 발달

앞서 이야기한 850hPa에서의 경압성까지 확보된 상황이라면, 1cm 내외의 적설 조건은 어느 정도 갖추었다고 할 수 있다. 여기서 적설이 더 늘어나기 위해서는 구름이 연직으로 더 발달할 수 있어야 하는데, 그러기 위해서는 상층(또는 중층)의 기압골 지원이 필요하다.

상층기압골이 지원하는 발해만 기압골 사례에서 수증기영상과 500hPa 일기도를 이용하여 건조공기의 위치에 따른 강수발달 정도를 분류해보자.

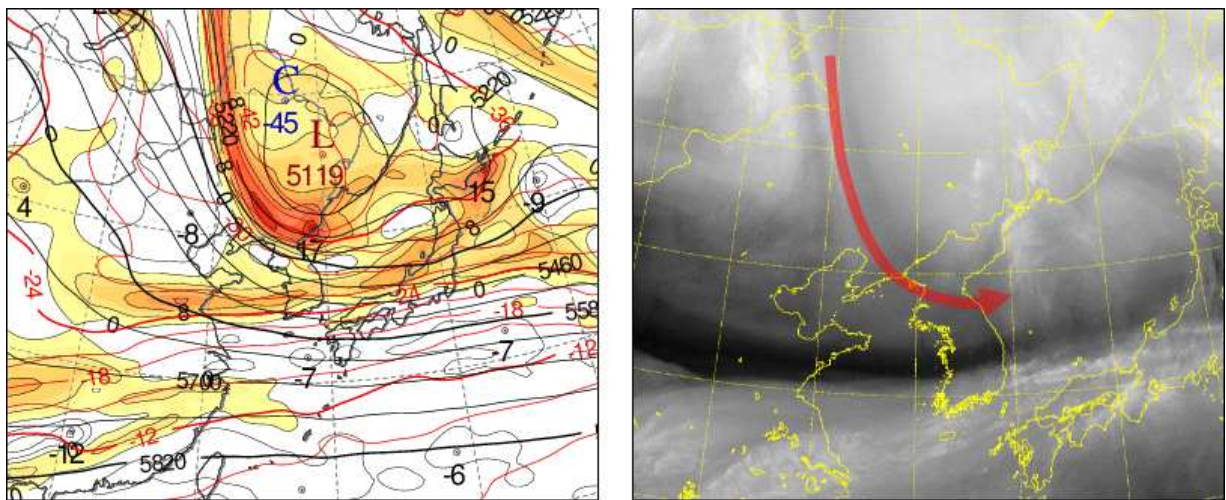


그림 2-9. 2022년 1월 17일 500hPa(좌) 일기도와 상층 수증기영상(우)

그림 2-9에서 500hPa의 기압골과 함께 PV streak이 만주 부근에서 백령도 부근으로 남하하는 형태를 보여주고 있으며 이 영역은 수증기영상에서의 암역과도 일치한다. 이렇게 PV streak이 북쪽을 통과하여 지나갈 때에도 발해만 기압골의 강수대가 발달하는 모양새를 보인다.

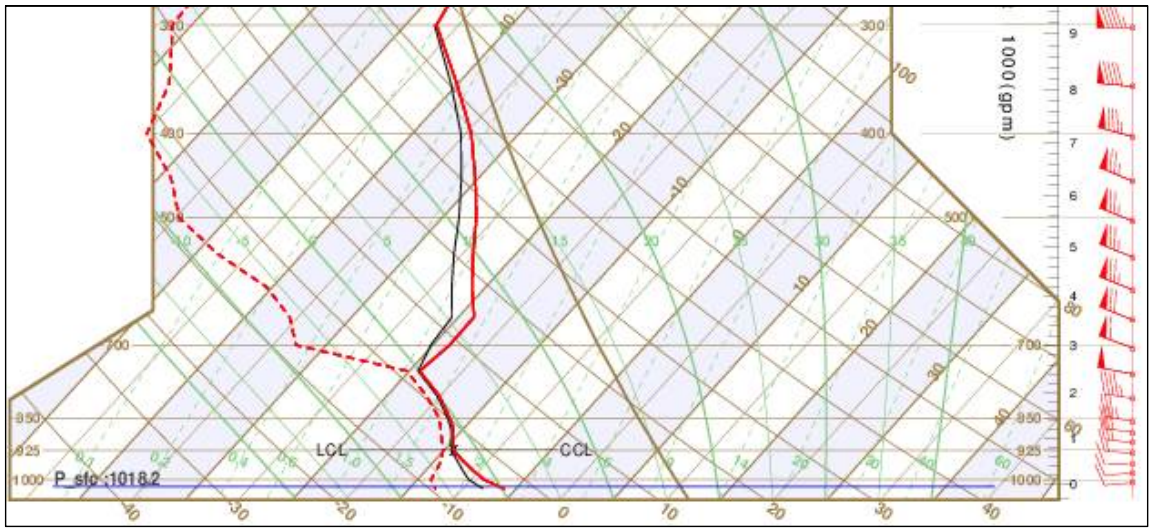


그림 2-10. 2022년 1월 17일 15시 서울 단열선도(분석장)

사례마다 다르지만 대체로 구름대의 top이 2.5~3km 사이에서 형성되는 경우가 많다. 이런 경우 보통 적설은 1~5cm 범위내로 형성되며, 지형의 영향이나 수렴대의 영향을 받는 경우에는 더 많은 적설을 기록하기도 한다【겨울 예보 사례분석 2-6】.

위 사례를 기준으로 기압골에 의한 건조역의 영역이 더 북쪽이나 동쪽으로 통과하는 경우에는 오히려 하강류의 영향을 받을 가능성이 크므로, 중상층 기압골의 지원을 받는다고 보기는 어렵다.

그럼 반대로 기압골이 서해상으로 크게 돌아 들어오는 경우를 생각해보자.

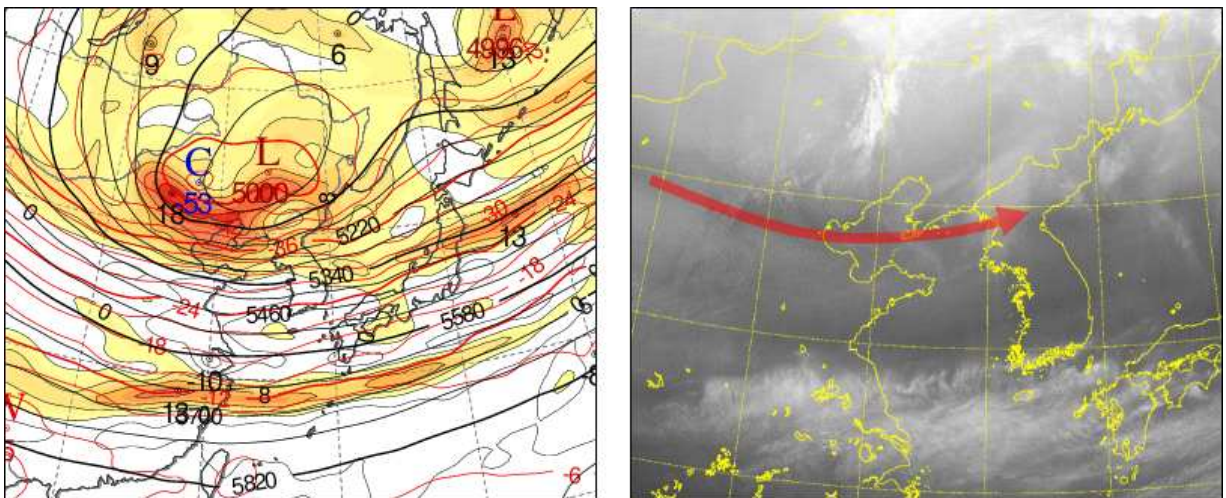


그림 2-11. 2021년 1월 6일 500hPa(좌) 일기도, 상층 수증기영상(우)

그림 2-11의 경우는 앞 사례와 달리 500hPa의 한기핵이 발해만 북서쪽에 중심을 둔 가운데, 기압골이 서해상으로 크게 돌아서 내려오는 형태를 보인다. 이러한 형태의 경우 앞선 사례보다 발해만 기압골이 더욱 발달하게 되고 중규모 저기압의 형태가 나타날 가능성도 커지게 된다.

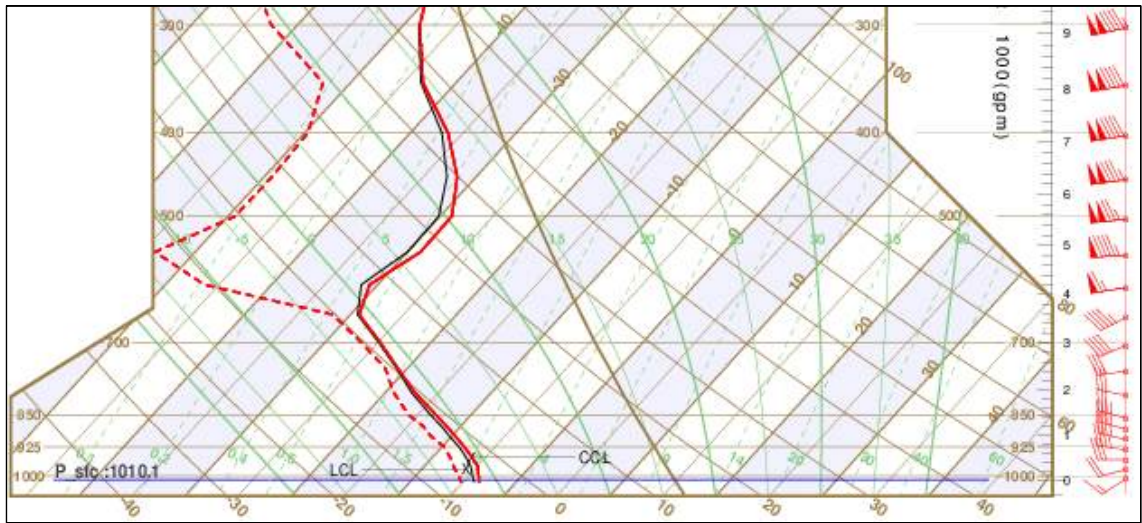


그림 2-12. 2021년 1월 6일 21시 서울 단열선도(분석장)

또한 기압골의 영향을 더 강하게 받기 때문에 구름의 top은 3~4km까지 발달하는 경우가 많으며 그에 따라 적설도 대설특보가 가능한 수준으로 대폭 증가하게 된다.

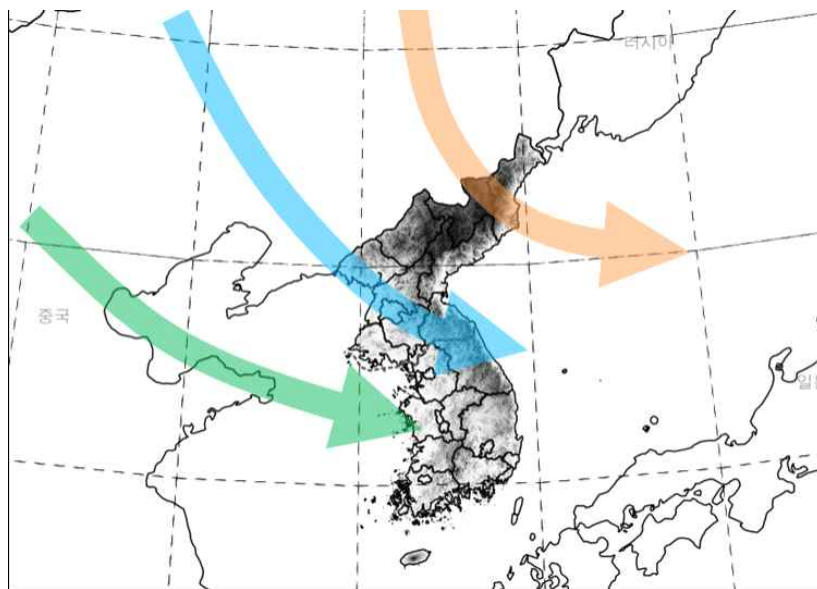


그림 2-13. 상층기압골에 의한 건조역의 이동경로

그림 2-13에서 상층기압골에 동반된 건조역의 이동 경로에 따라 구름의 발달 경향을 구분하여 보았다. 건조역이 녹색 경로를 따라 유입되는 경우 발해만 기압골이 잘 발달해 구름이 3~4km까지 발달할 수 있고, 하늘색 경로를 따라 유입되는 경우 녹색 경로보다 발해만 기압골에 직접적인 영향이 적어 구름이 2.5~3km까지 발달할 수 있으며, 주황색 경로를 따라 유입되는 경우 상층 기압골이 발해만 기압골의 발달을 지원하지 못하여 구름이 잘 발달하지 못할 확률이 높다.

따라서 실전 예보에서 활용할 경우에는 500hPa의 기압골이 통과하는 경로를 판단한 후에 건조역의 실황분석을 통해서 기압골의 깊이를 가늠해본다. 그 후 위성분석,

단열선도 분석 등을 통해 구름의 발달 정도를 확인하고, 적설예보를 하면 정확한 예보에 도움이 된다.

2. 2. 5. 중규모저기압 발달과 하층제트에 의한 강수 발달

앞 절에서 다뤘듯이 발해만 기압골이 상층기압골의 영향을 받을 때, 서해상에서 저상 저기압, 즉 중규모저기압의 형태가 발달하고, 그에 따라 최하층 고도에서 강풍대를 동반하며 강수가 강해지는 경우가 있다. 이때는 일반적인 기압골 형태보다 매우 많은 적설이 기록될 수 있다.

발해만 기압골이 중규모저기압으로 발달하기 위해서는 몇 가지 조건들이 필요한데 그림 2-13의 녹색 경로처럼 상층기압골에 동반된 건조역이 산동반도 부근으로 침강하고, 서해안으로는 온난이류가 위치하면서 소용돌이를 만들 수 있는 형태여야 한다. 더불어 냉각에 의한 육상의 국지고기압이 위치하면 상대적으로 서해상의 중규모 저기압은 더욱 발달하기 유리해진다.

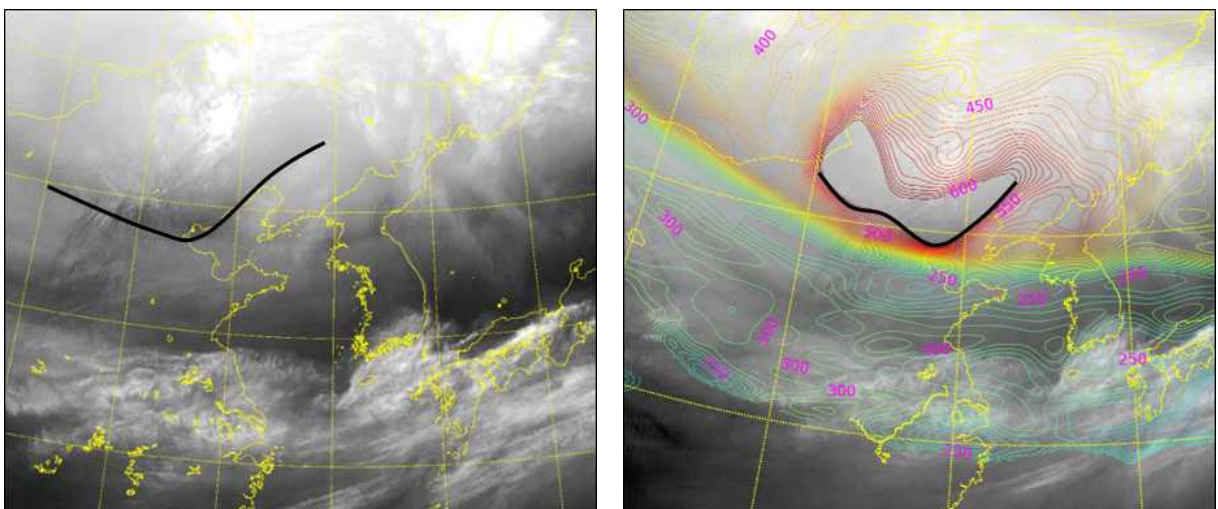


그림 2-14. 2021년 1월 6일 12시 수증기영상(좌), 1.5PVU(우)

발해만 기압골이 중규모저기압으로 발달했던 2021년 1월 6일 강설 사례(그림 2-14)를 살펴보면 발해만 북서쪽에 상층 기압골이 위치하고 있다. 수증기영상에서는 암역으로 V자 형태의 기압골이 나타나는데, 이 기압골 위치에서 권계면에 해당하는 1.5PVU 등치선을 중첩하여 보면 조밀역이 위치하며 큰 경사면을 보이고 있다. 즉 상층의 건조 공기가 큰 기울기로 침강하여 하층 저기압을 발달시켜 강설을 만들 수 있었다.

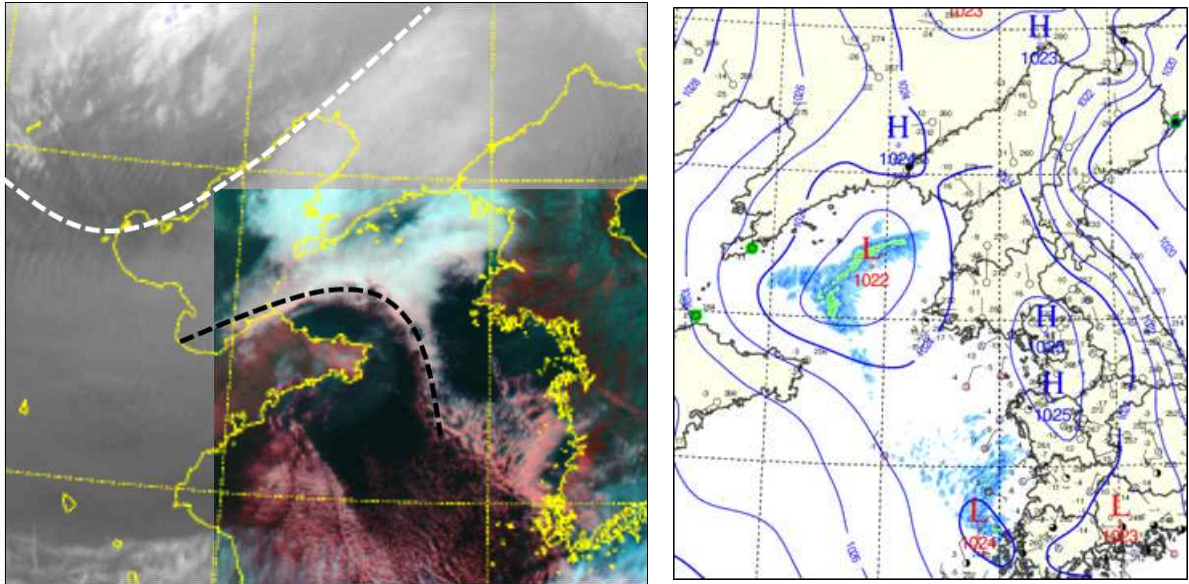


그림 2-15. 2021년 1월 6일 12시 수증기영상(흑백부분)과 합성영상(컬러부분)(좌), 지상일기도(우)
 흰색 점선은 건조역의 경계, 검은색 점선은 난역의 경계

수증기영상과 합성영상을 함께 중첩해서 살펴보면(그림 2-15), 서해상으로 해기차(14°C 이상)에 의한 적운열이 위치해 있으며, 산동반도 동쪽에는 그 위로 온난이류가 나타나면서 생기는 “ㄱ” 모양의 구름대가 있다. 그리고 발해만 북서쪽에는 앞서 침강하는 공기가 접근하면서 중규모저기압을 만들 수 있는 좋은 모양새를 나타내고 있다.

같은 시간 지상 해면기압(그림 2-15)을 보면 서한만에 저기압이 위치하고 있으며, 저기압이 크게 발달하지는 못하였고 강수대도 체계적이지 않지만 북서쪽 건조역에 의해 저기압은 점차 발달하였고, 내륙의 국지 고기압을 만나면서 강수대는 급격하게 강화되었다.

이 당시 오산 단열선도에서는 구름이 4.5km까지 발달하였는데, 적설 기록을 보면 서초 13.7cm, 과천 15.6cm으로 10cm가 훌쩍 넘는 강한 눈이 내렸다. 즉 이러한 중규모저기압이 발달할 경우 최대 10cm의 적설도 가능하며, 정체할 경우 10cm 이상의 적설도 가능한 것을 시사해준 사례였다【겨울예보 사례분석 2-5】.

2. 3. 발해만 기압골에서의 예보 흐름도(개별 사례에서 다르게 적용 될 수 있음)

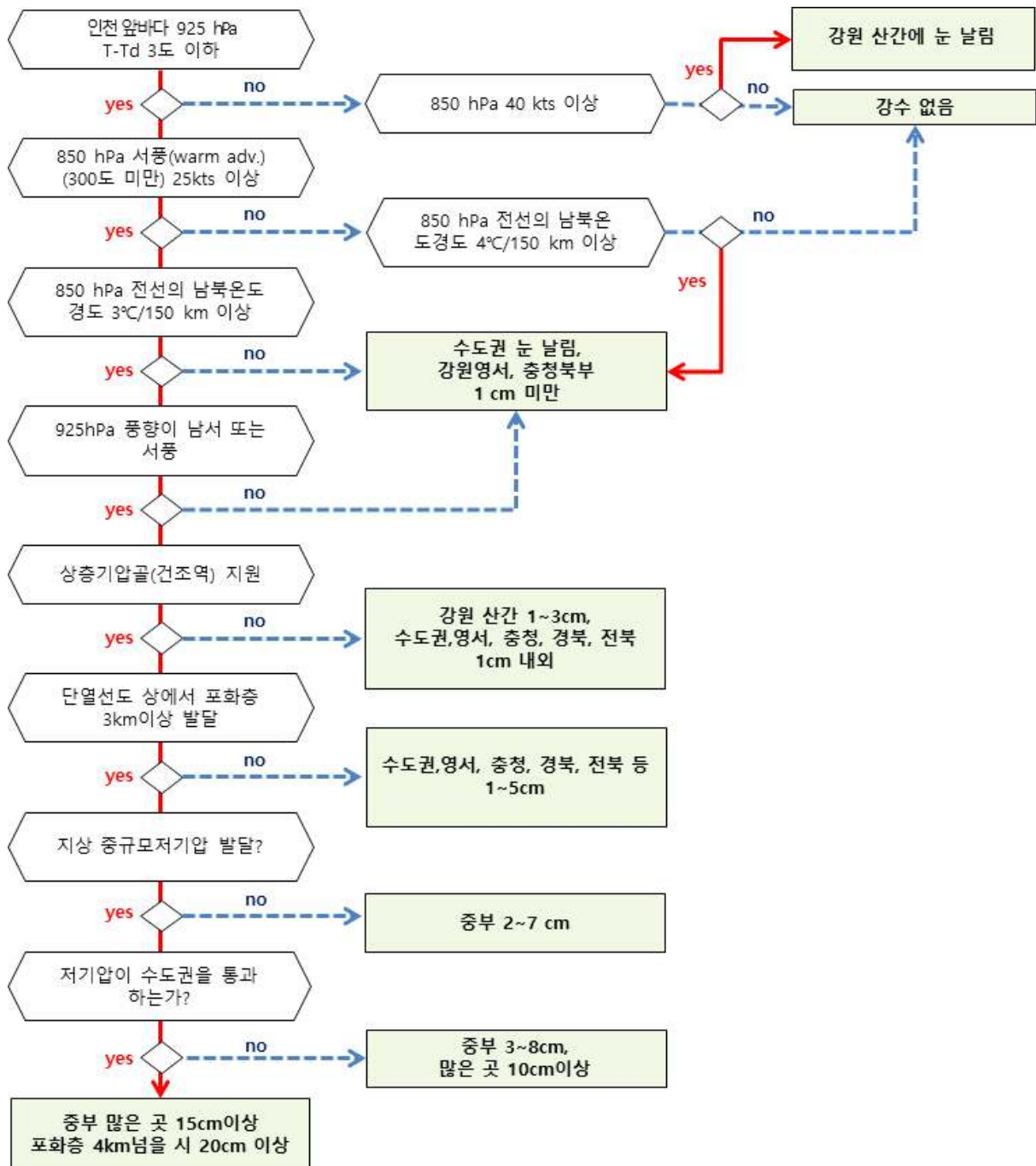


그림 2-16. 발해만 기압골에서의 예보 흐름도

《Why?How!》 제4권 ‘겨울예보 사례분석’ 가이던스 중 ‘2. 발해만 기압골 강수’ 연계 내용

- 2-1. 2017년 11월 25일 사례: ‘초겨울 이례적인 스콜라인 형성’
- 2-2. 2017년 12월 18일 사례: ‘온난이류형 강수만 고려하면 안 된다고?’
- 2-5. 2021년 1월 6일 사례: ‘발달한 저기압에 의한 수도권 대설’
- 2-6. 2022년 1월 19일 사례: ‘새벽 시간대 발해만 기압골 강수 예상보다 저기압이 빠르게 발달한다면’

3. 호수 효과에 의한 서해안 강설 메커니즘의 이해와 예보 활용



3. 호수 효과에 의한 서해안 강설 메커니즘의 이해와 예보 활용

Why?

호수 효과에 의한 서해안 강설 발생에 필수 요소인 해기차·바람·취주거리가 어떻게 강설에 영향을 주는지 이해하고, 나아가 서해안 대설의 원인이 되는 수렴이 발생하는 유형을 분석해 예보 방법을 제시하고자 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 비열 차이로 아직 따뜻한 해수면 위를 이동하게 되는 시기이기 때문이다. 대륙고기압에 동반된 차고 건조한 공기가 상대적으로 따뜻한 서해상의 수면 위로 이동하면서 열적으로 대기가 불안정해지고, 해상에서 대류운이 발달해 서해안으로 유입되면서 강설이 나타나게 된다.

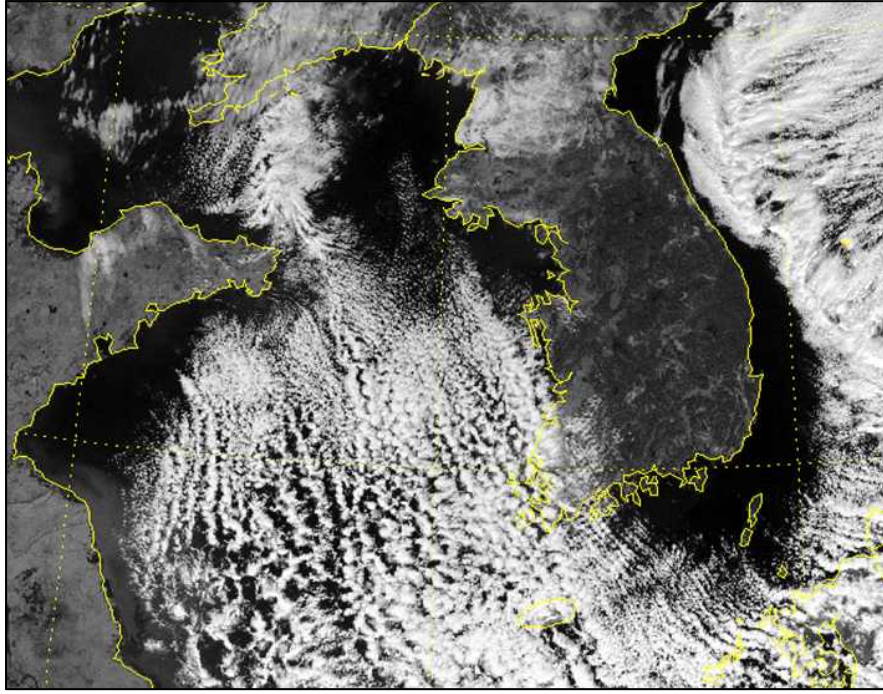


그림 3-1. 2017년 12월 8일 12시 천리안위성 가시영상

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

이와 같이 호수 효과에 의한 강설은 저기압에 동반된 전선성 강수와 같은 종관규모의 현상이 아닌 중규모 이하의 작은 대류 현상의 집합체로 나타난다. 따라서 중규모 이하의 강수 현상은 수치모델의 해상도와 물리 과정의 한계로 예측 성능이 떨어질 수밖에 없어, 예보를 낼 때 모델에만 의존하는 것은 매우 위험하고 강수 현상의 정확한 메커니즘 이해가 우선시 되어 한다. 이러한 이해를 바탕으로 예보에 활용할 수 있는 방법을 찾아보았다.

3. 2. 호수 효과에 의한 강설 메커니즘

겨울철 대륙의 차고 건조한 공기가 상대적으로 따뜻한 해수면을 지나가게 되면 열과 수증기를 공급받게 되는데, 긴 거리를 오랜 시간 이동할수록 해수면 부근의 하층 대기는 더욱 온난 습윤해지고 불안정해진다. 대기가 불안정해지면서 대류와 함께 혼합이 일어나고 점차 혼합층이 깊어지면서 대류운이 발생하게 된다. 긴 거리를 이동하는 동안 계속되는 열과 수증기의 공급은 대류를 강화하여 구름을 더 높게 발달시킨다.

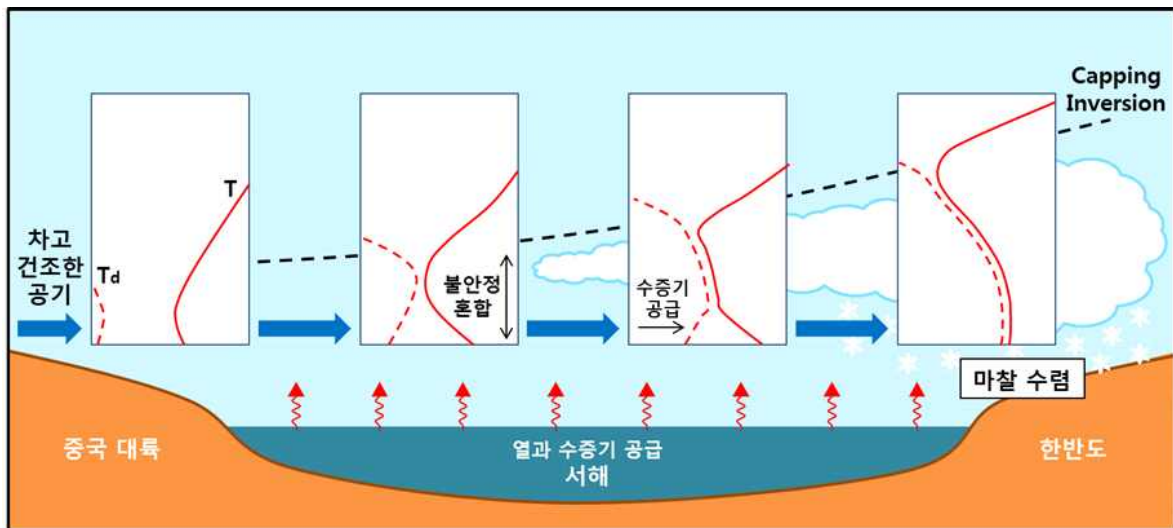


그림 3-2. 호수 효과(lake effect)에 의한 서해안 강설 발생 과정 모식도

기류가 해수면을 지나 육지로 유입되는 지역에서는 마찰에 의한 수렴으로 상승기류가 더해져 구름은 더욱 강하게 발달해 많은 눈이 내리게 된다. 한편 대류와 혼합으로 인해 발달한 구름은 상부로 갈수록 단열냉각 되므로 상부의 기온이 낮아져 그 위로는 'capping inversion(착모역전)'이라는 모자 쓴 형태의 기온역전 현상이 나타나게 되며, 이는 대류에 의한 구름 발달을 하층으로 제한하게 된다.

따라서 서해의 수온이 높고 수면 위로 유입되는 공기가 차가워 그 차이가 클수록 하층 대기로의 열 공급은 더욱 커지게 되며, 서해상을 길게 이동할수록 많은 수증기 공급이 일어나게 된다. 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 | - 기온과 해기차

3. 3. 1. 850hPa 기온

호수 효과에 의한 강설을 판단하기 위해서는 먼저 850hPa의 기온을 확인해야 한다. 호수 효과로 눈이 내리기 위해서는 대류로 인해 구름이 발달하는 고도인 대류혼합층의 높이가 1km 이상이어야 한다(Niziol, 1987). 따라서 고도가 1km보다 낮은 925hPa 등압면 기준으로는 대류로 인한 강설을 판단할 수 없으며, 고도가 1km보다 높은 850hPa 등압면을 기준으로 판단해야 한다.

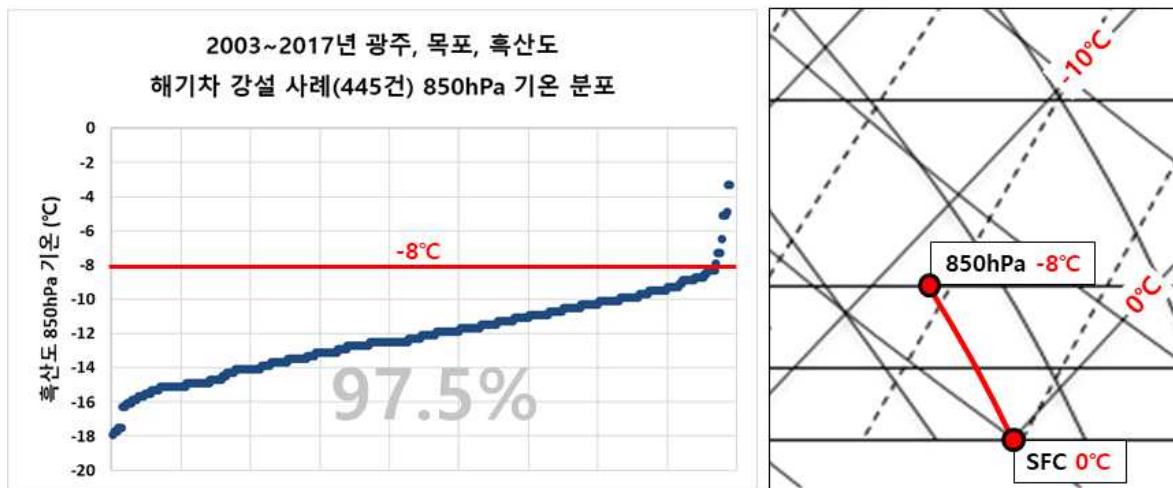


그림 3-3. (좌) 2003~2017년 겨울철(11월~2월) 호수 효과에 의한 광주, 목포, 흑산도 강설 사례의 흑산도 850hPa 기온 분포, (우) 지상이 기온이 0°C일 때, 포화단열감률로 상승했을 때의 850hPa 기온 예시

850hPa 고도로 얼마나 찬 공기가 남하해야 호수 효과에 의한 강설이 나타날 수 있는지 알아보기 위해 전라서해안 지역의 관측 자료를 조사해 보았다. 그림 3-3의 왼쪽 그림은 2003~2017년 겨울철 광주, 목포, 흑산도 지역에서 호수 효과에 의한 강설이 발생한 445건의 사례에서 흑산도의 850hPa 기온 자료를 순차적으로 나열한 것이다. 총 445건 중 11건을 제외한 나머지 434건(약 97.5%)이 -8°C 이하에서 강설이 발생하였기 때문에 -8°C는 해기차 강설 발생의 임계값이 됨을 알 수 있다.

왜 850hPa -8°C가 임계값이 되는지는 그림 3-3의 오른쪽 단열선도 그림을 보면 이해할 수 있다. 대류로 인해 대기가 포화되는 경우 그림과 같이 포화단열감률의 기온구조를 보이게 되는데, 이때 지상에 눈이 내릴 수 있는 기온을 0°C로 가정하여 포화단열선을 따라 상승하면 850hPa의 기온은 정확하게 -8°C가 된다. 즉, 대류로 인해

850hPa 이상 포화가 된 조건에서 850hPa의 기온이 -8°C 보다 높다면 강수가 발생하더라도 눈이 아닌 비로 내리게 될 가능성이 커진다.

3. 3. 2. 850hPa 해기차

해수면온도와 대기온도의 차이인 해기차는 호수 효과에 의한 서해안 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 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.

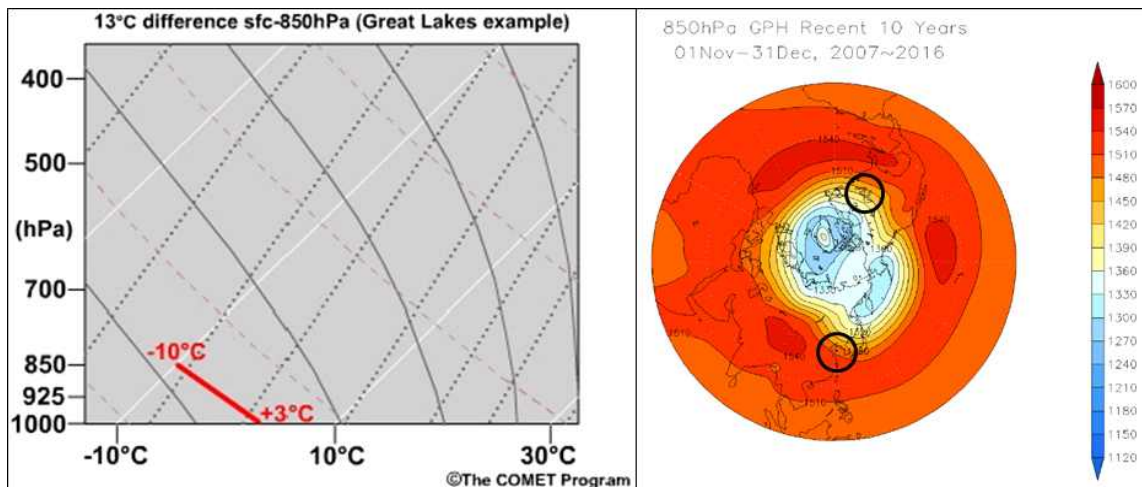


그림 3-4. (좌) 미국 오대호 지역에서 호수 효과 강설에 필요한 850hPa 해기차와 단열선도 예시
(우) 2007~2016년 12월 북반구 850hPa 지위고도 평균장

호수 효과의 본고장인 북아메리카 오대호(Great Lakes) 지역에서는 850hPa 기온과 수온의 차이가 13°C 이상이 될 때를 강설 발생 조건으로 판단한다(Niziol, 1987). 이는 그림 3-4의 왼쪽 단열선도에서 알 수 있듯이 오대호의 수온과 850hPa 고도의 건조단열감률을 고려한 값으로 지리적 위치가 다른 우리나라에서는 기준값을 조정할 필요가 있다. 그림 3-4의 오른쪽 그림은 2007~2016년 12월의 북반구 850hPa 지위고도 평균장으로, 검정색 동그라미로 표시한 북아메리카 오대호 부근의 지위고도와 우리나라 서해상의 지위고도 값에 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 서해상은 오대호보다 약 150gpm 정도 높은 지위고도 값을 보이므로 건조단열감률을 고려한 해기차는 분명히 오대호와는 다른 결과로 나타날 것이다.

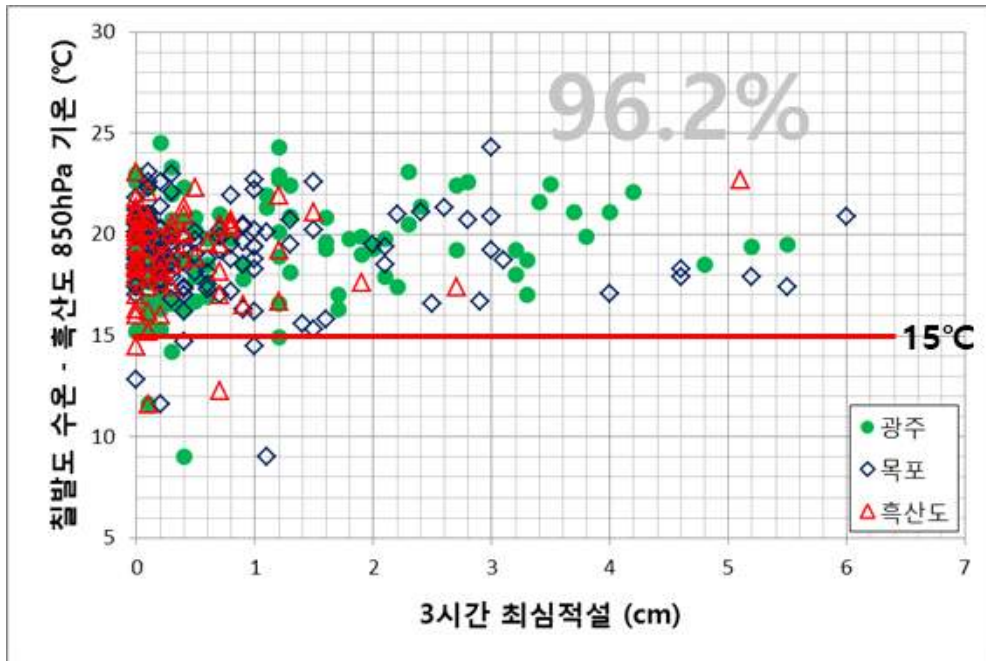


그림 3-5. 2003~2017년 겨울철 호수 효과에 의한 서해안 강설 사례 중 칠발도-흑산도 850hPa 해기차와 광주, 목포, 흑산도의 3시간 최심적설 분포

그림 3-5는 2003~2017년 겨울철 호수 효과에 의한 서해안 강설 사례에서 칠발도 수온과 흑산도 850hPa 기온의 해기차와 전라서해안의 주요 세 지점인 광주, 목포, 흑산도의 3시간 최심적설을 비교한 자료이다. 총 327건의 사례 중 12건을 제외한 나머지 315건(약 96.2%)의 사례는 모두 해기차가 15°C 이상일 때 적설이 발생한 것을 알 수 있으며, 우리나라 서해상에서의 해기차 강설 발생 임계값은 오대호 지역의 13°C보다 높은 15°C인 것을 확인하였다. 겨울철 우리나라 서해상 지역의 850hPa 지위고도가 오대호 지역보다 높은 특징이 잘 반영된 결과라고 볼 수 있다.

한편, 850hPa 해기차가 크면 클수록 불안정이 커져 강설의 강도가 강해질 것으로 생각할 수 있으나, 그림 3-5 분포도를 보면 해기차의 크기와 적설 강도 사이에 뚜렷한 상관관계는 나타나지 않는다. 850hPa 해기차는 강설 유무를 판단하는 결정적인 지표일 수 있으나 강수 강도 판단 시에는 다른 요소들을 함께 고려해야 한다.

3. 3. 3. 700hPa 해기차

850hPa 고도의 해기차를 이용하는 것은 1km 이상 발달하는 대류운의 발생 여부 판단에 적절한 방법이다. 하지만 강수 강도가 강할 때에는 대류혼합층의 두께가 3km 이상 발달하는 경우도 있으므로 850hPa 고도의 해기차만으로는 높게 발달하는 대류운의 강도를 판단하기가 어렵다.

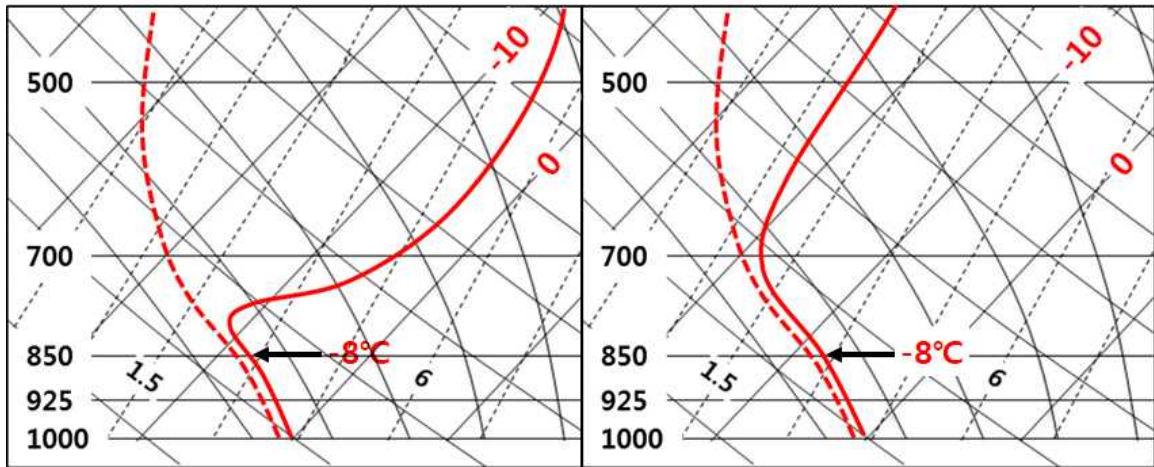


그림 3-6. 850hPa 기온과 해기차는 동일하나 포화층의 높이가 다른 두 가지 상황

그림 3-6에서 단열선도로 표현한 두 가지 상황을 비교해보면 850hPa의 기온은 약 -8°C 로 동일하므로 850hPa 해기차도 동일하다. 하지만 포화층의 깊이가 다르므로 강설이 있는 상황이라면 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 발달할 수 있는 조건이 된다. 결국, 700hPa 기온에 따라 역전층의 고도와 강도가 달라지는 것을 알 수 있다.

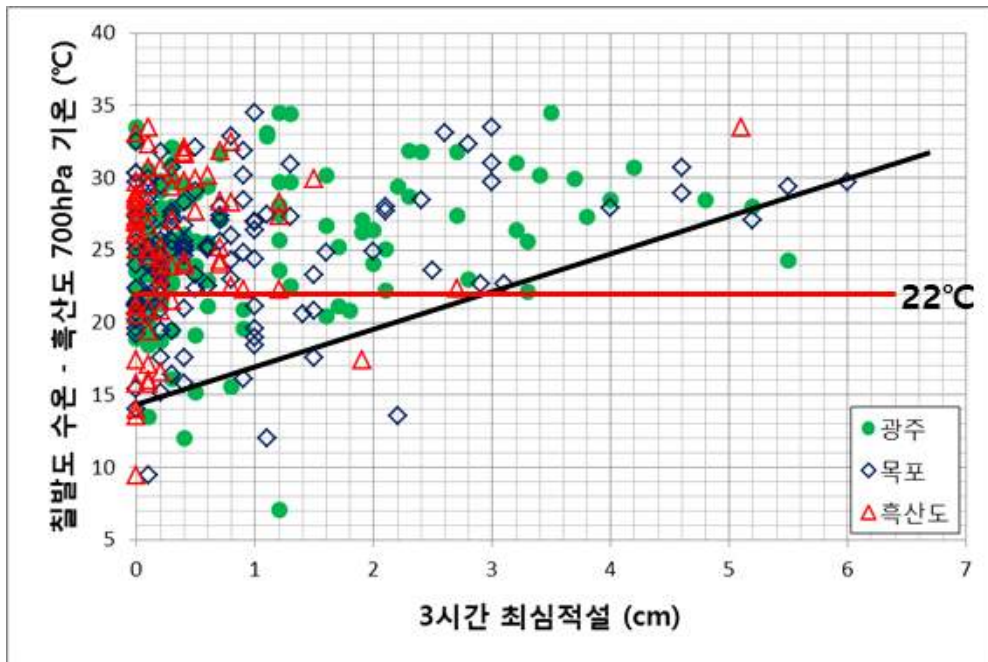


그림 3-7. 2003~2017년 겨울철 호수 효과에 의한 서해안 강설 사례 중 칠발도-흑산도 700hPa 해기차와 광주, 목포, 흑산도의 3시간 최심적설 분포

그림 3-7은 앞서 850hPa 해기차 분석에 이용했던 2003~2017년 겨울철 327건의 호수 효과에 의한 서해안 강설 사례들을 850hPa보다 높은 700hPa 고도와 해기차로

비교한 자료이다. 850hPa 해기차와는 다르게 적설이 증가할수록 700hPa의 해기차는 임계값(검정색 실선)이 증가하는 경향을 보여주고 있다. 특히, 700hPa 해기차가 22°C 이상에서 3cm/3hr 이상의 강도가 나타나므로 6시간 이상 조건이 만족한다면 22°C의 해기차는 대설 판단의 임계값으로 설정할 수 있다【겨울예보 사례분석 3-1】.

3. 3. 4. 925hPa 해기차

서해상에서 호수 효과에 의한 구름열이 발달하여 해안으로 유입되어도 강수가 발생하지 않는 경우가 있다. 앞서 언급했던 것처럼 호수 효과에 의한 강설이 발생하려면 대류혼합층의 두께가 1km 이상, 즉 구름의 연직 두께가 1km 이상으로 발달해야 가능하다. 그림 3-8은 2019년 12월 18일 09시의 위성영상으로 서해상에 호수 효과에 의한 대류운열이 발달하여 전라서해안으로 유입이 된 상황임을 알 수 있다. 하지만 이 사례에서는 구름은 유입이 되었으나 강수는 없었다.

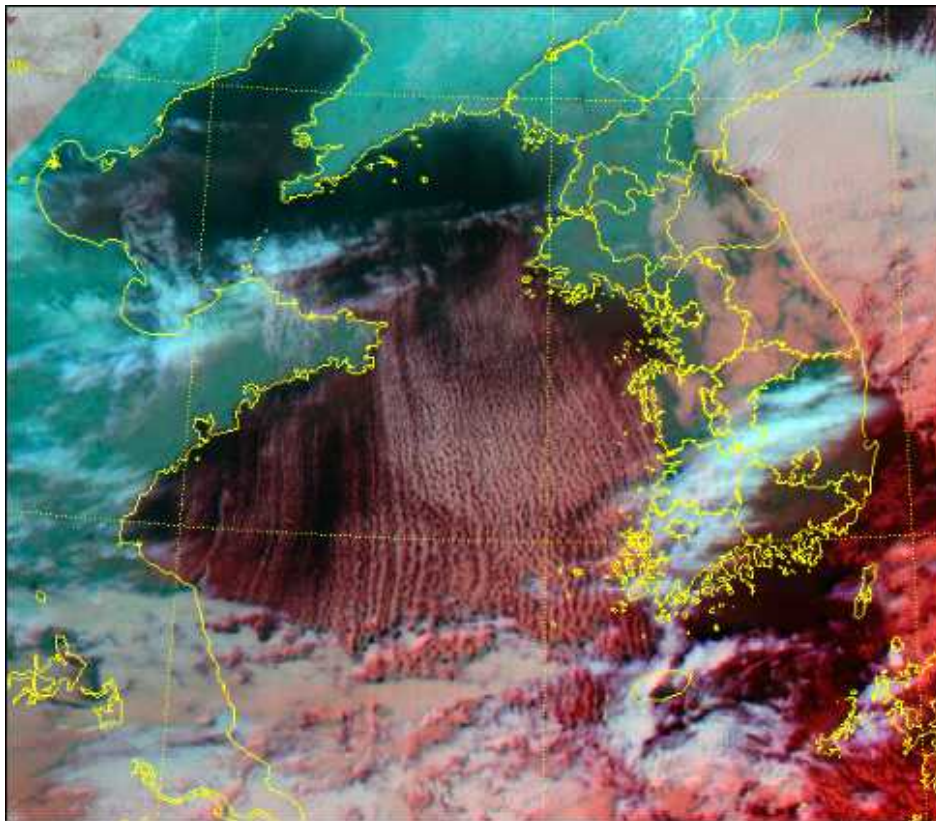


그림 3-8. 2019년 12월 18일 09시 천리안위성2A 합성영상

그림 3-9는 같은 시각의 흑산도 단열선도 자료이다. 850hPa 이하 고도로 역전층이 강하게 나타나면서 포화층이 1km 이상으로 높게 발달하지 못했다. 포화층의 두께는 약 300m 정도로 얇아 강수로 이어지기는 어려운 상황임을 알 수 있다. 이때 칠발도 부이 수온과의 850hPa의 해기차는 9.4°C로 강설이 발생하기는 불가능한 조건이었으나 오히려 925hPa의 해기차는 13.3°C로 850hPa 해기차보다 더 크게 나타났다. 따라

서 925hPa 이하 고도에서는 불안정이 커 대류가 활발하게 일어날 수 있었기 때문에 구름은 발생하였으나, 역전층이 존재하는 1km 이상으로는 발달하지 못하면서 강수로 이어지지 못한 상황이라고 할 수 있다.



그림 3-9. 2019년 12월 18일 09시 흑산도 단열선도

이러한 이유 때문에 해기차 강설 발생에는 925hPa이 아닌 850hPa의 해기차가 결정적인 역할을 하게 되는 것이다. 925hPa 해기차는 강설 유무가 아닌 구름 발생 여부를 판단하는 데 참고해야 한다.

3. 3. 5. 해기차를 이용한 적설 예보

호수 효과에 의한 서해안 강설의 적설 예보를 하기 위해서는 대류운이 얼마나 높게 발달하는지를 판단해야 한다. 그림 3-10은 구름의 발달 높이에 따른 적설 분포를 나타낸 것으로 대류운의 발달 고도에 따라 고려해야 할 해기차의 고도도 달라지는 것을 알 수 있다. 대류운이 높게 발달할수록 많은 눈이 내리기 때문에 대류운의 발달 높이에 영향을 미치는 고도의 해기차가 클수록 적설은 많아지게 된다. 강설이 6~12시간 지속 되는 조건에서 대류운이 1.5km까지 발달하는 경우 850hPa 해기차의 영향을 받게 되며, 조건을 만족할 시 1~5cm의 적설이 나타난다. 대류운이 1.5km 이상 높이로 발달하는 경우 850hPa 이상 고도의 역전층 영향을 크게 받기 때문에 850hPa 해기차뿐만 아니라 700hPa 해기차의 영향을 받기 시작하며, 조건을 만족할 시 대설주의보 수준인 5cm 이상의 적설이 나타나기 시작한다. 대류운이 2km 이상 발달하는 경우 850hPa 해기차는 대부분 조건을 충분히 만족시키게 되고, 700hPa 해기차의 크기에 따라 대류운의 발달 정도가 결정된다. 최종적으로 700hPa 해기차가 매우 커서 대류운이 3km 이상 발달하는 경우에는 대설경보 수준인 20cm 이상 적설이 나타나게 된다.

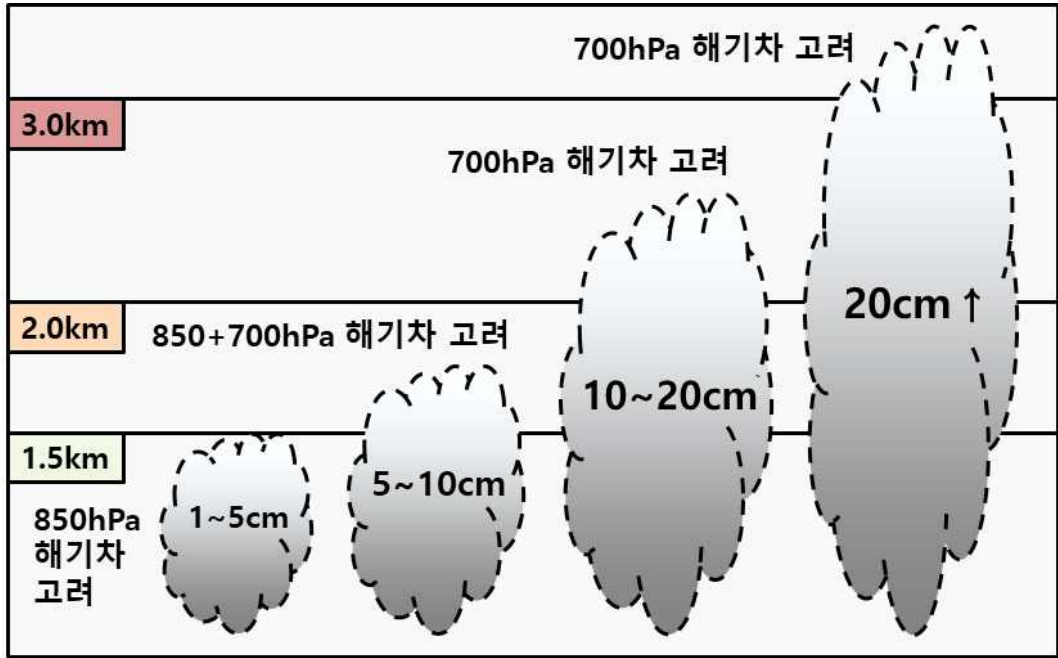


그림 3-10. 호수 효과에 의한 대류운의 발달 고도에 따른 적설 분포

표 3-1은 2017~2022년 겨울철 호수 효과에 의한 해기차 강설 사례에서 해기차에 따른 적설 분포를 조사하여 정리한 것이다. 먼저 850hPa 해기차가 15°C 미만일 경우 적설은 발생하지 않으며, 1cm 이상의 적설이 기록되기 위해서는 우선적으로 850hPa 해기차가 15°C 이상이어야 한다. 850hPa 해기차가 20°C 이상으로 매우 강한 경우에는 불안정의 강도가 강하기 때문에 역전층이 존재하더라도 1.5km 이상으로는 대류운을 발달시킬 수 있어 5~10cm의 적설이 나타나기도 한다. 700hPa 해기차는 역전층의 강도를 나타내는 지표로 결국 해기차의 크기에 따라 적설이 증가하게 되는데, 22°C 이상에서 5~10cm, 25°C 이상에서 10~20cm, 30°C 이상에서 20cm 이상의 적설이 나타나게 된다.

표 3-1. 호수 효과에 의한 강설 시 해기차 조건(6~12시간 지속)에 따른 적설 분포

		700hPa 해기차			
		22°C	25°C	30°C	
850hPa 해기차	15°C	no snow	no snow	no snow	no snow
	20°C	1~5cm	5~10cm	10~20cm	>20cm

표에 정리한 적설은 해기차 조건이 6~12시간 정도 지속되는 일반적인 상황에서의

적설이므로 기압계 상황에 따라 지속시간이 6시간 미만 혹은 12시간 이상으로 상황이 다른 경우 적설을 가감하여 활용해야 한다. 또한 뒤에서 설명하게 될 육풍수렴대의 영향을 받을 경우 해기차의 발달 보다 더욱 강하게 대류운이 발달하므로 단순 해기차 조건보다는 한 단계 상향해서 적용할 필요가 있다.

Key Point!

1. 서해안형 강설 발생에 필요한 850hPa 해기차는 15℃ 이상이다.
2. 1.5km 고도 이상 대류운의 발달은 700hPa 해기차가 영향을 준다.
3. 대설주의보(적설 5cm 이상)는 850hPa 해기차가 25℃ 이상이거나,
700hPa 해기차가 22℃ 이상일 때 발생한다.
4. 대설경보(적설 20cm 이상)는 700hPa 해기차가 30℃ 이상일 때 발생한다.

3. 4. 강설 판단 요소 II - 바람과 취주거리

3. 4. 1. 풍속

호수 효과에 의한 서해안 강설 발생 과정에는 해수면 위로 찬 공기가 이루어지면서 강한 바람이 함께 동반되는데, 밀도가 큰 차가운 공기는 하강기류를 형성하고 하층 대기를 혼합시킨다. 이러한 과정으로 바람은 해수면에서 하층 대기로 열과 수증기를 활발하게 전달해 대기를 불안정하게 만들게 된다. 특히 강한 풍속은 해수면으로부터의 잠열속(latent heat flux)을 증가시켜 수증기 공급의 주요한 역할을 하게 한다(이재근 등, 2018).

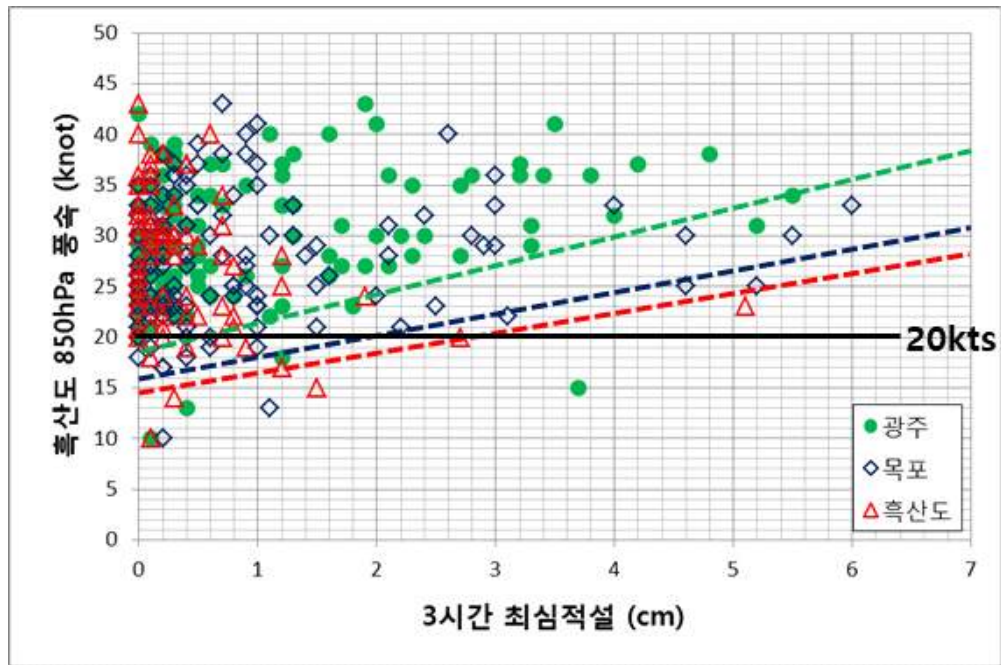


그림 3-11. 2003~2017년 겨울철 호수 효과에 의한 서해안 강설 사례 중 흑산도 850hPa 풍속과 광주, 목포, 흑산도의 3시간 최심적설 분포

그림 3-11은 앞서 850hPa 해기차 분석에 이용했던 2003~2017년 겨울철 327건의 사례에서 흑산도의 850hPa 풍속과 각 지점별 3시간 최심적설의 분포를 나타낸 자료로, 850hPa 풍속이 20kts 이상인 사례가 307건으로 전체의 93% 이상으로 나타난다. 따라서 850hPa의 20kts 이상의 풍속은 호수 효과에 의한 강설을 발생시키기 위해 하층 대기를 충분히 혼합할 수 있는 임계값이 된다. 또한, 적설이 증가할수록 풍속의 임계값(기울어진 파선)도 증가하므로 많은 적설이 있기 위해서는 강한 풍속이 필요하며, 섬지역인 흑산도에서 해안지역인 목포, 내륙지역인 광주로 들어갈수록 적설이 증가하기 위해서는 더 강한 풍속이 필요한 것을 알 수 있다. 내륙지역인 광주의 경우 3시간

최심적설이 2cm 이상인 사례 총 23건 중 18건의 850hPa 풍속이 30kts 이상으로 나타났다【겨울예보 사례분석 3-4】.

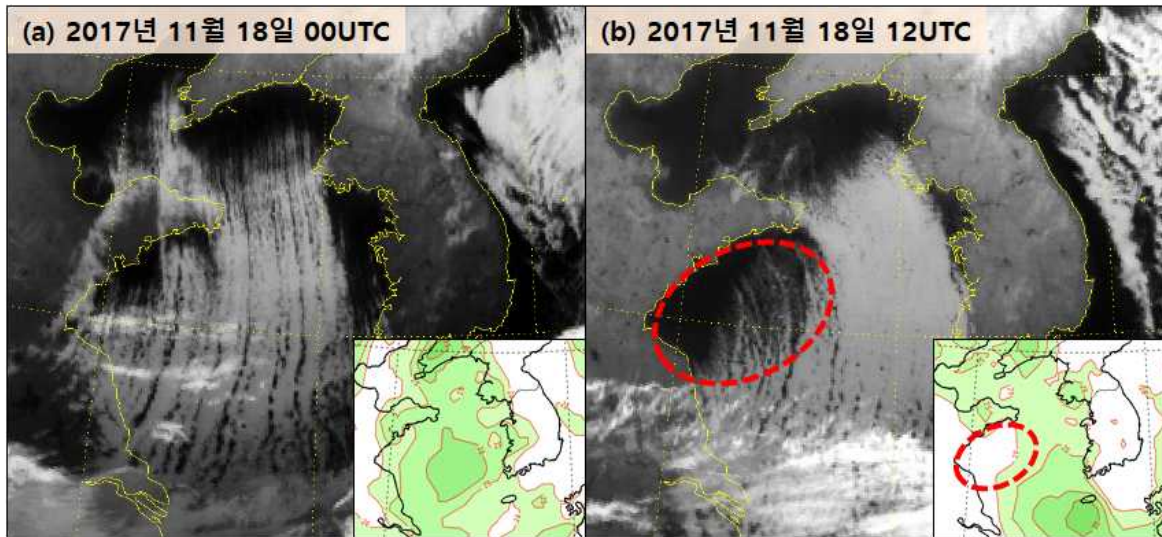


그림 3-12. 2017년 11월 18일 00UTC(좌), 12UTC(우) 천리안위성 적외영상 및 850hPa 등풍속선

그림 3-12의 사례는 850hPa 풍속이 20kts 이하로 약해지면서 호수 효과에 의한 대류운열이 약화되는 모습을 보여준다. 왼쪽 그림은 서해상으로 850hPa 해기차가 15°C 이상, 풍속이 20kts 이상으로 강설 발생 조건을 충족하여 대류운열이 발달한 상황이다. 하지만 12시간 후인 오른쪽 그림에서 해기차는 15°C 이상으로 유지되었으나 풍속이 20kts 미만으로 약해져 서해상의 서쪽지역(빨간색 원)으로 대류운열이 약화된 것을 확인할 수 있다.

따라서 풍속의 강도는 구름의 발생 및 발달에 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

3. 4. 2. 풍향

아무리 강한 풍속이 뒷받침되더라도 구름대가 해안으로 들어오지 못한다면 강설은 나타나지 않게 된다. 예를 들어 그림 3-12의 왼쪽 그림처럼 하층 풍향이 북풍에 가까운 흐름이 나타나는 경우 서해상에서 발달한 구름대가 해안으로 유입되지 못하게 된다. 결국 하층의 풍향에 따라 강설이 나타나는 지역이 달라질 수 있다.

그림 3-13은 앞서 850hPa 해기차 분석에 이용했던 2003~2017년 겨울철 327건의 사례에서 흑산도의 850hPa 풍향과 각 지점별 3시간 최심적설을 비교한 자료로 세 지점 모두 풍향의 각도가 작을수록(서풍에 가까울수록) 적설이 늘어나는 경향을 보여준다. 섬 지역인 흑산도와 해안 지역인 목포의 경우 850hPa 풍향이 340° 이하일 때, 내륙인 광주는 330° 이하일 때 대부분의 강설이 나타나므로 각각의 풍향은 강설 발생 임계값이 된다. 각 지점별 풍향 임계값은 그림의 오른쪽 하단 지도에 화살표로 표시한

것과 같이 기류가 웅진반도에 막히지 않고 들어올 수 있는 경로의 각도와 일치하는 것을 알 수 있다.

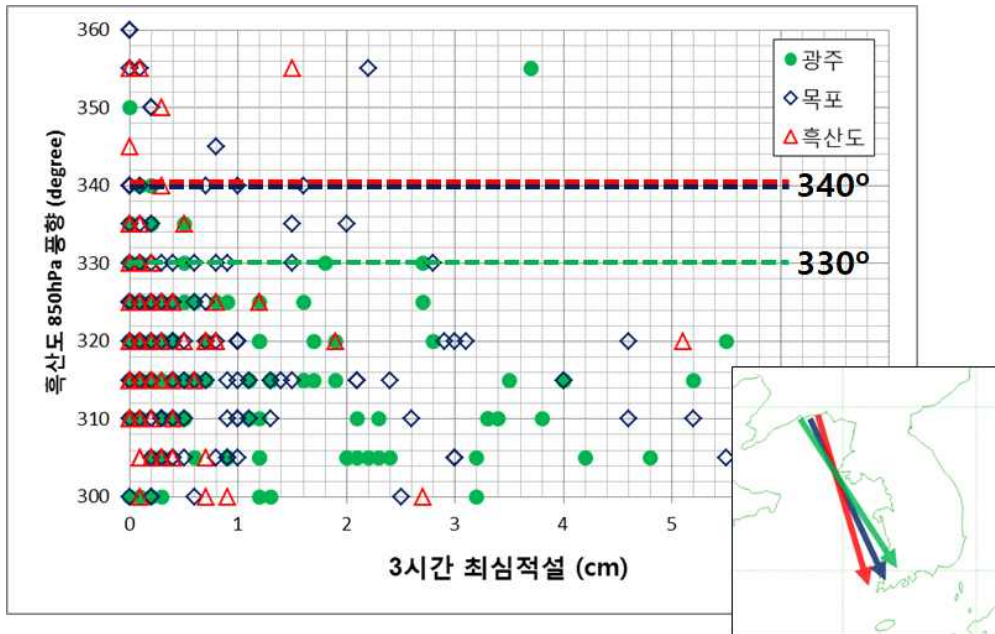


그림 3-13. 2003~2017년 겨울철 호수 효과에 의한 서해안형 강설 사례 중 흑산도 850hPa 풍향과 광주, 목포, 흑산도의 3시간 최심적설 분포

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 가로막혀 북서풍의 취주거리를 충분히 확보할 수 없는 경기서해안 지역으로는 호수 효과에 의한 강설이 쉽게 발생하지 않는다.

선행 연구에 따르면 눈 날림 수준의 강설을 유발할 수 있는 취주거리의 임계값은 80km이며, 적설이 가능하기 위해서는 160km 이상의 취주거리가 필요하다. 그림 3-14는 2018년 1월 26일 12시 천리안위성 가시영상으로 북쪽에서 찬 공기가 강하게 남하하면서 한반도 주변 해상에 해기차에 의한 대류운열이 발달한 사례이다. 노란색 화살표로 표시한 요동반도와 함경도 남쪽으로는 강설 발생 취주거리의 임계값인 80km 이상 떨어진 해상에서부터 대류운이 발달하기 시작한 것을 확인할 수 있다.

목포의 경우 요동반도에서 약 640km, 산둥반도에서는 약 440km의 매우 긴 취주거리를 갖게 되므로 전남서해안은 풍향 조건만 만족한다면 강설 발생에 필요한 취주거리가 충분한 지역인 것을 알 수 있다.

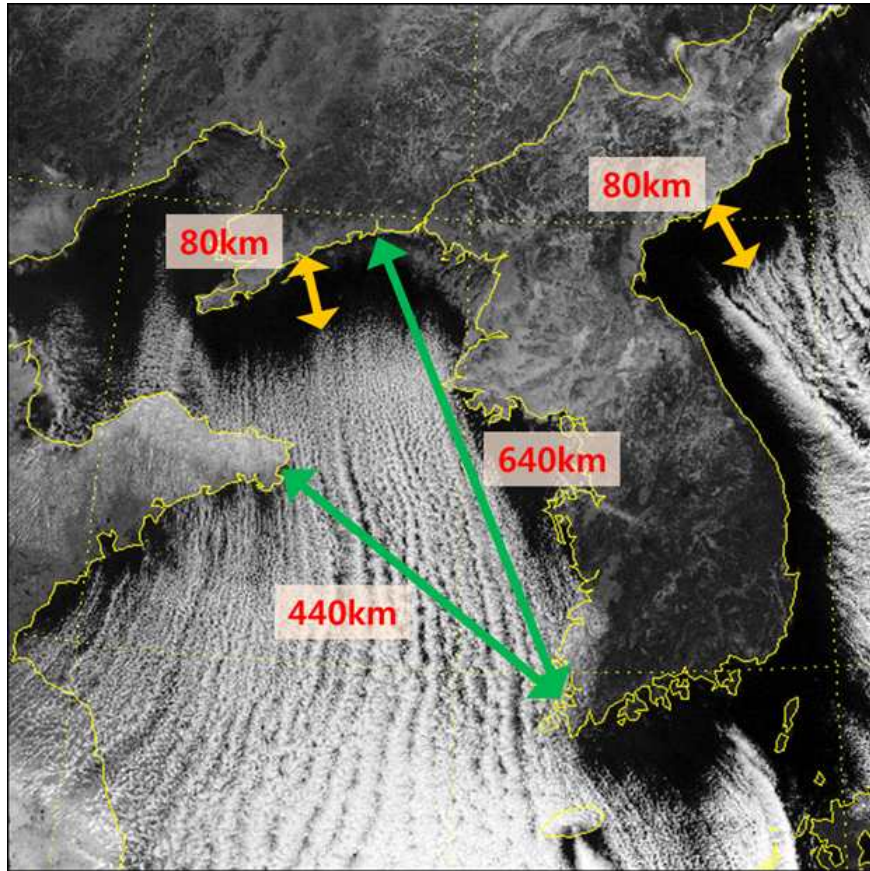


그림 3-14. 2018년 1월 26일 12시 천리안위성 가시영상

그림 3-15는 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 상부의 강한 역전층에 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 넓게 나타나는 것을 알 수 있다.

결국, 취주거리가 길수록 더 많은 열과 수증기를 공급받아 강한 대류운이 발달하게 되는 것이다. 반대로 백령도의 경우 요동반도와와의 거리가 약 200km 정도로 나타나 전라서해안보다는 상당히 짧은 취주거리를 갖게 된다. 그림 3-16은 2008~2012년 겨울철 5년간 총 29건의 호수 효과에 의한 강설 사례에서 백령도의 해기차와 3시간 최심적설의 분포이다. 3시간 최심적설이 1cm 이상인 사례가 5건에 불과한 것을 보면 백령도는 짧은 취주거리의 영향으로 열과 수증기의 공급이 적어 강한 강설이 발생하기 어려운 지리적 위치임을 확인할 수 있다.

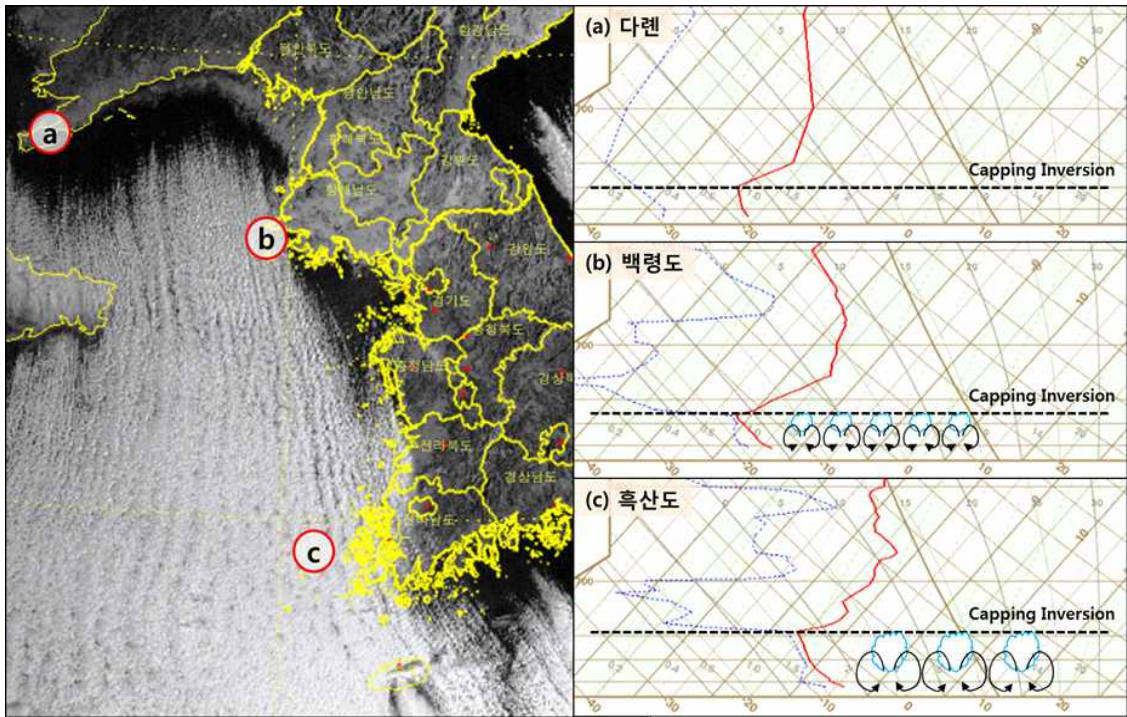


그림 3-15. (좌) 2018년 1월 26일 09시 천리안위성 가시영상
 (우) 다렌(a), 백령도(b), 흑산도(c)의 고층관측 단열선도 실황과
 역전층 고도 변화에 따른 대류 순환 규모 예시

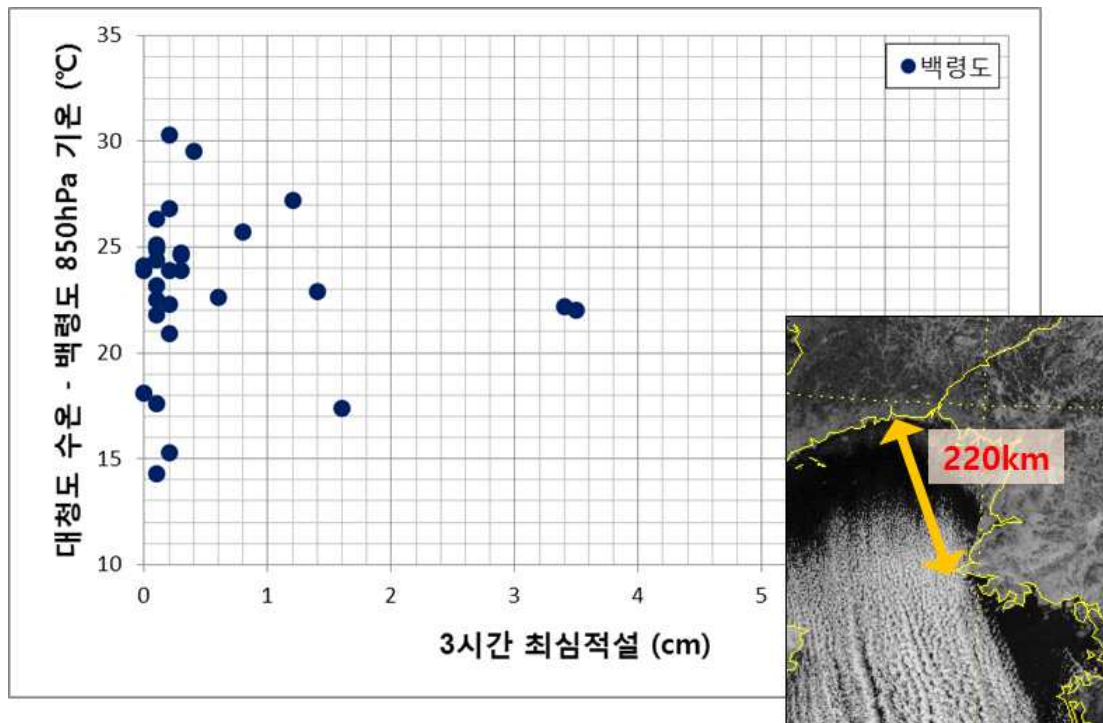


그림 3-16. 2008~2012년 겨울철 호수 효과에 의한 서해안형 강설 사례 중 백령도
 850hPa 해기차와 3시간 최심적설 분포

Key Point!

1. 호수 효과에 의한 강설은 850hPa 풍속이 20kts 이상일 때 발생한다.
2. 내륙지역에 강설이 발생하기 위해서는 더 강한 풍속이 필요하다.
2. 지리적인 영향으로 지역별 풍향 조건이 만족해야 구름대가 유입된다.
3. 해상에서의 취주거리(fetch)가 길수록 강설 발생과 발달에 유리하다.

3. 5. 서해안형 강설을 유발하는 기압계

호수 효과에 의한 서해안 강설이 발생하기 위해서는 서해상으로 강한 한랭이류가 있어야 한다. 즉, 서해상으로 강한 북서풍 계열의 바람이 불면서 북쪽의 찬 공기가 남하하는 기압계가 형성되는 조건이어야 한다. 그림 3-17의 모식도는 서해상에 북서풍 계열의 기류가 나타나는 대표적인 두 지상 기압계로 고기압 전면의 북서풍과 저기압 후면의 북서풍이 형성되는 모습을 보여주고 있다. 어떠한 기압계의 영향을 더 받느냐에 따라 강수 결과가 다르게 나타나게 되므로 예보를 하기 위해서는 두 기압계의 특징을 먼저 이해하는 것이 필요하다.

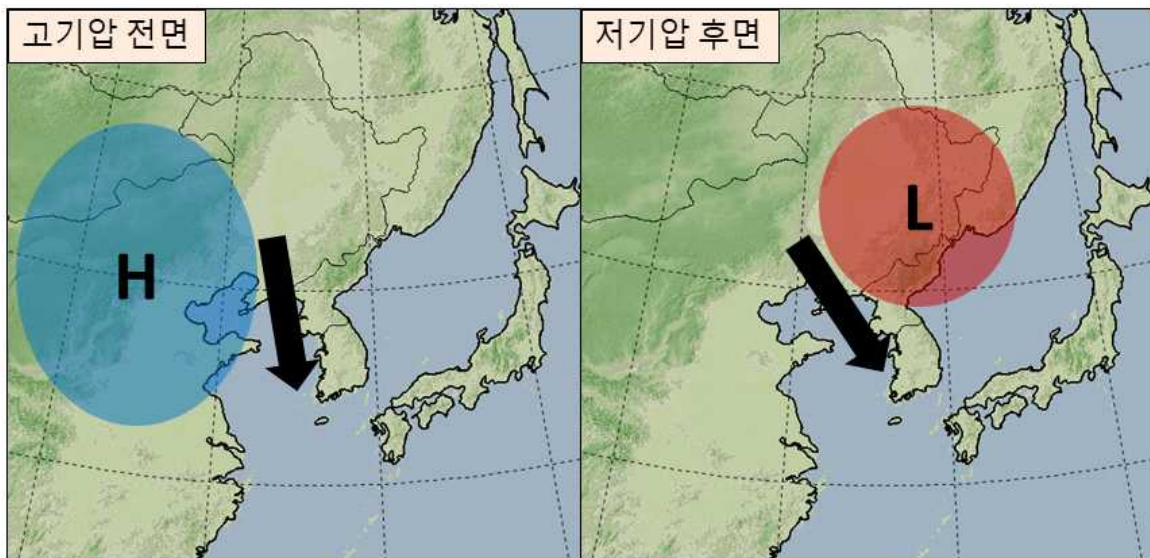


그림 3-17. 서해상에 강한 북서풍 기류를 따라 한기를 남하시키는 두 지상 기압계

3. 5. 1. 고기압성 기압계의 특징

그림 3-18은 고기압성 기압계의 영향을 받은 2018년 1월 26일 사례로 위성영상에서 밧고랑 모양의 대류운열이 고기압성 곡률 형태로 발달한 모습을 확인할 수 있다. 같은 시각 지상일기도의 기압계를 보면 저기압은 동경 150도 부근으로 멀리 떨어져 있으며, 한반도는 북서쪽에 위치한 규모가 큰 대륙고기압의 영향권에 들어 있음을 알 수 있다.

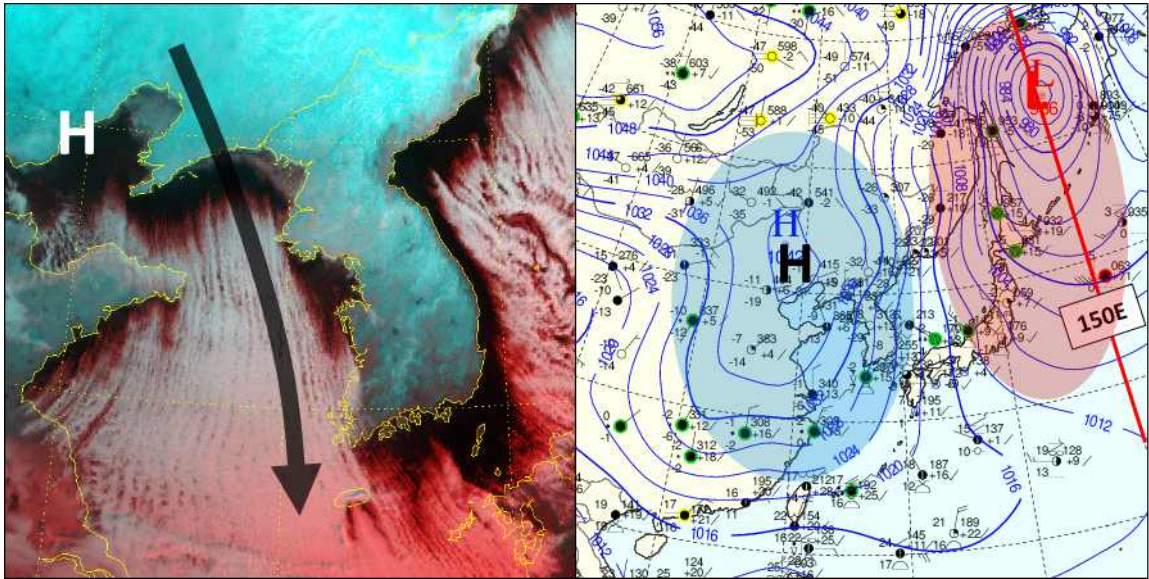


그림 3-18. 2018년 1월 26일 09시 천리안위성 합성영상과 지상일기도

고기압성 기압계의 영향을 받게 되는 경우 고기압성 곡률을 따라 풍계가 형성되므로 서해안으로는 서풍계열의 풍향보다는 북풍계열에 가깝게 풍향이 형성되는 것이 일반적이다. 따라서 구름대가 내륙으로 깊게 유입되기 어려운 유형이라 할 수 있으며, 주로 전라서해안 지역으로만 영향을 주게 된다.

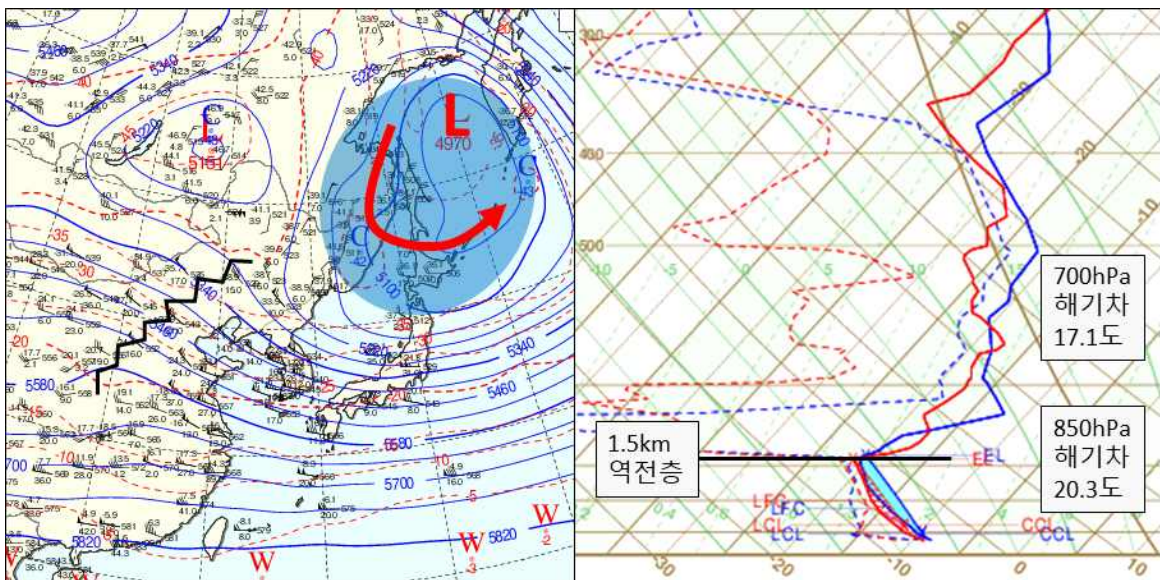


그림 3-19. 2018년 1월 26일 09시 500hPa 일기도와 흑산도 단열선도

또한, 고기압의 영향을 지배적으로 받으면 강설의 지속시간은 길어질 수 있으나 강도는 약하게 나타날 수 있다. 그림 3-19는 그림 3-18과 같은 사례에서의 500hPa 일기도와 흑산도 단열선도의 자료로 상층의 저기압은 오호츠크해 부근에 위치하여 한반도로 상층의 한기를 남하시키기 어려운 기압계 배치이다. 흑산도의 단열선도에서 기온선을 보면 1.5km 고도에 강한 역전층과 함께 1.5km 이상 고도의 기온이 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 서해안형 강설의 강도를 결정하는 700hPa 해기차가 17.1°C로

대설 기준인 22°C보다 낮게 나타났으며, 이 사례에서 25~26일 이틀에 걸쳐 전라서해안에 눈이 내렸으나 최심적설은 전남 영광군에서 3.5cm에 불과했다.

3. 5. 2. 저기압성 기압계의 특징

저기압성 기압계에서 발생하는 서해안형 강설의 특징은 앞서 살펴보았던 고기압성 기압계의 특징과는 정반대이다. 그림 3-20은 저기압성 기압계의 영향을 받았던 2018년 1월 9일 03시 사례로 위성영상에서 저기압성 곡률로 대류운열이 발달하여 내륙까지 유입된 모습을 확인할 수 있으며, 지상의 기압계는 서쪽의 대륙고기압의 영향보다는 동해상에 위치한 저기압의 영향권에 더 가까운 것을 알 수 있다.

위성영상에서 확인할 수 있듯이 북동쪽에 위치한 저기압성 곡률을 따라 구름이 유입되므로 하층의 풍계는 서풍계열의 풍향이 우세하게 나타나는 것이 일반적이다. 따라서 고기압성 기압계와는 다르게 강설 구역이 서해안에 국한되지 않고 내륙까지 유입되며, 충청도와 경기남부 등 중부지방에도 영향을 주는 경우가 많다.

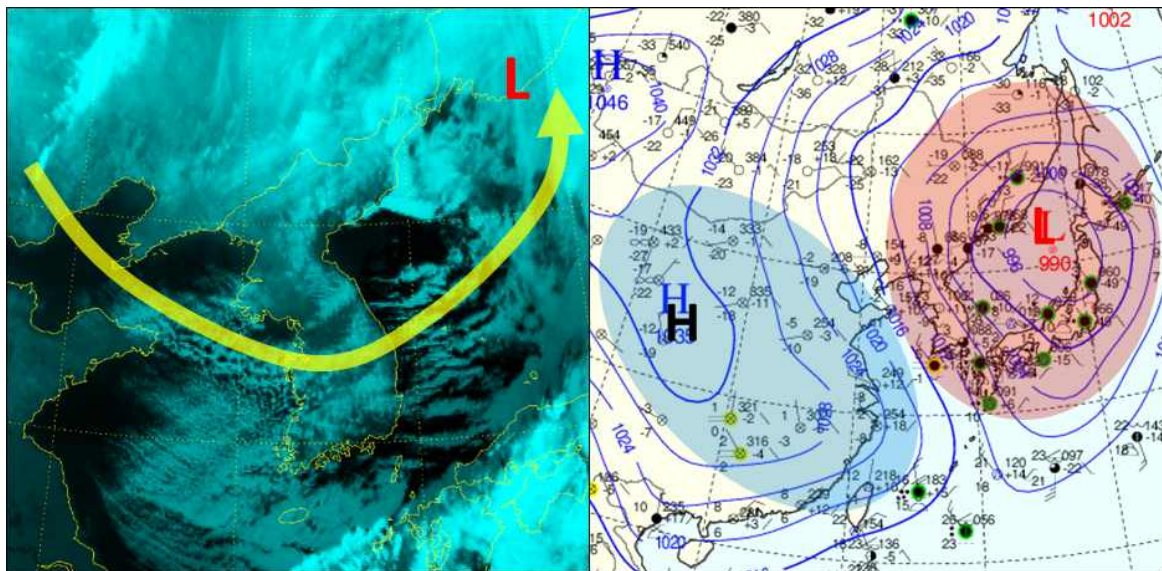


그림 3-20. 2018년 1월 9일 03시 천리안위성 합성영상과 지상일기도

저기압성 기압계에서는 상층의 저기압이 한반도 북쪽에 가깝게 위치하기 때문에 그림 3-21과 같이 상층의 찬 공기가 한반도 상공으로 남하하기 좋으며, 기압골이 동반되는 경우가 많아 구름대 발달에 유리하다. 광주의 단열선도에서 기온선을 보면 역전층의 고도가 3km로 비교적 높은 고도에 위치하고 있어 대류를 억제하는 힘이 약한 구조를 가진다. 결국, 700hPa 해기차는 대설 기준인 22°C보다 높은 26°C로 나타났으며 이날 새벽부터 아침 사이 충청도와 전라도 지역에는 5cm가 넘는 적설을 기록했고, 충남 일부 지역에는 15cm가 넘는 적설이 기록됐다.

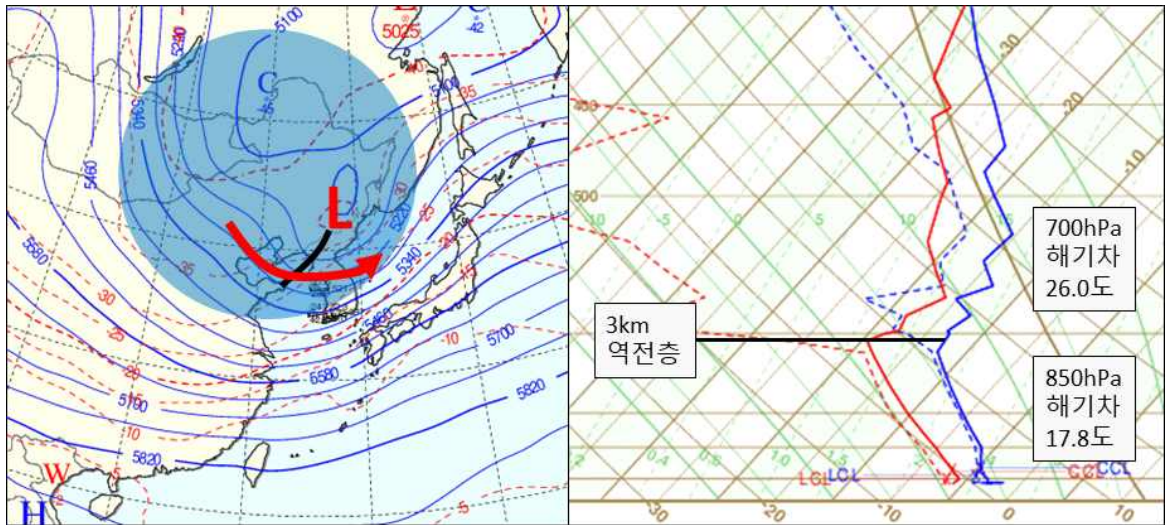


그림 3-21. 2018년 1월 9일 03시 500hPa 일기도와 광주 단열선도

3. 6. 대설 판단 요소 - 수렴

3. 6. 1. 서해안형 강설에서의 대설 유형

앞서 강설 발생 메커니즘에서 알아보았듯이 호수 효과에 의한 강설은 역전층의 영향을 받기 때문에 주로 구름이 하층에서 발달해 영향을 준다. 특히, 역전층이 강할 경우 많은 양의 강설을 기대하기 어려우며, 대설은 잘 나타나지 않는다. 외국의 선행 연구 결과에 의하면 단순히 호수 효과에 의한 대류만으로는 많은 양의 강설이 나타나기 어렵고, 대설(heavy snowfall)로 이어지기 위해서는 반드시 수렴이 동반되어야 하는 것으로 알려져 있다.

우리나라에서 호수 효과에 의한 서해안형 강설로 대설이 나타나는 경우는 그림 3-22와 같이 크게 세 가지 유형으로 나눌 수 있으며, 모두 역학적인 강제 상승을 동반하는 경우이다. 첫 번째 지형수렴형은 강한 북서풍의 지형에 의한 강제 상승, 두 번째 육풍수렴형은 북서풍과 육풍의 수렴에 의한 강제 상승, 세 번째 기압골지원형은 말 그대로 상층의 기압골에 의한 역학적인 강제 상승이 지원되는 경우이며, 기압골지원형의 경우 지형수렴형과 육풍수렴형이 복합적으로 나타나기도 한다.

(1) 지형수렴형(18.12.28) (2) 육풍수렴형(18.12.08) (3) 기압골지원형(18.01.10)

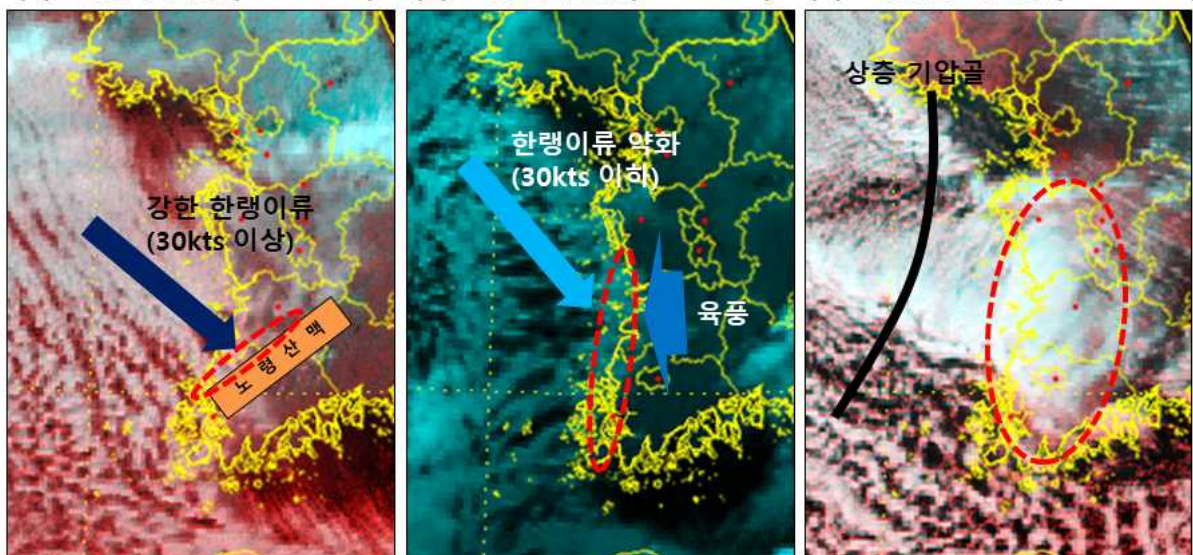


그림 3-22. 서해안형 강설 중 대설이 가능한 세 가지 유형

일반적으로 지형수렴형은 대륙고기압이 강하게 확장하는 시기에, 육풍수렴형은 대륙고기압이 확장 후 어느 정도 시간이 지나 고기압이 변질되는 시기에 나타난다. 기압골지원형의 경우 1차로 기압골이 통과한 뒤 대륙고기압이 확장 후 상층 기압계의 정체로

다시 2차(secondary) 기압골이 유입될 때 주로 발생하게 된다. 각각의 대설 유형 특징을 아래에 정리하였다.

3. 6. 2. 지형수렴형 대설

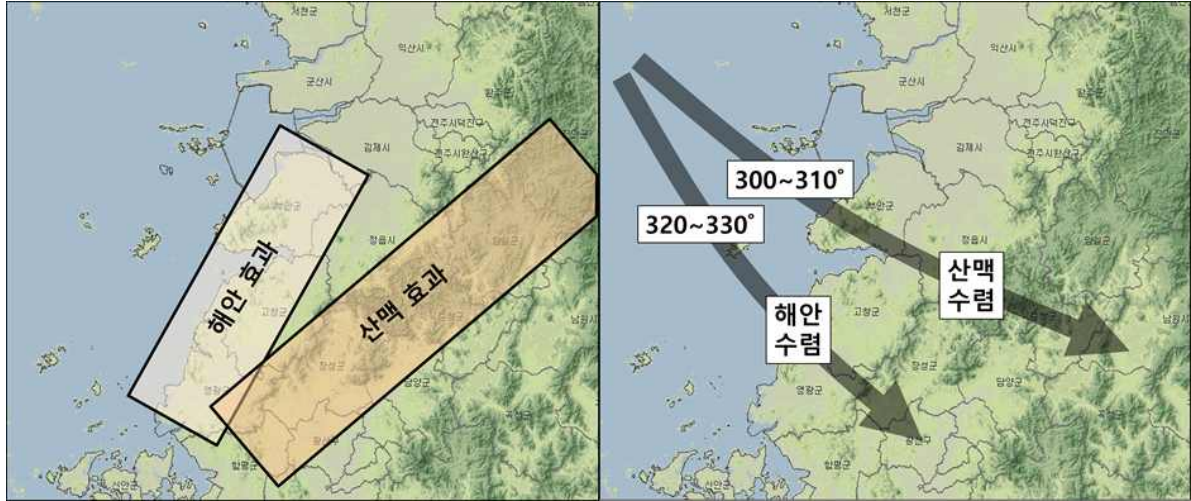


그림 3-23. 지형 효과의 구분과 850hPa 풍향에 따른 강설 집중구역

지형 수렴에 의한 대설은 대륙고기압이 확장하면서 한기가 강하게 남하하는 시기에 강한 풍속이 동반되며 나타나는데, 세 가지의 대설 유형 중 가장 단순한 원리로 대설이 발생한다. 그림 3-23의 왼쪽 그림을 보면 해안 효과가 나타나는 곳과 산맥 효과가 나타나는 곳으로 구분할 수 있는데, 이 지역으로 850hPa 바람이 25~30kts 이상 유입될 때 지형 효과가 발생하게 된다. 해안 효과는 북서풍의 기류가 마찰이 작은 해상에서 마찰이 큰 육지로 유입되면서 해안에서 풍속이 감소 되어 수렴이 나타나는 유형으로 특히 그림에 표시한 부안, 고창, 영광 지역의 경우 해안에 300m 내외의 산들이 분포하고 있어 수렴이 더욱 강화되기 좋은 조건을 가지고 있다. 기류가 좀 더 내륙으로 강하게 유입되면 노령산맥에 위치한 지역에서는 산맥에 의한 강제 상승 효과로 수렴이 발생하게 되며, 앞서 설명한 해안 효과보다 더 강한 수렴이 나타나게 된다.

그림 3-23의 오른쪽 그림과 같이 850hPa 고도에서 유입되는 기류의 풍향에 따라 강설 집중구역이 달라지게 되는데, 320~330° 풍향으로 유입될 시 고창, 영광, 광주(광산) 등 주로 전남서해안 지역을 중심으로 해안 수렴에 의한 대설이 나타나게 된다. 300~310° 풍향으로 내륙까지 깊게 유입될 경우 정읍, 순창, 임실 등 전북내륙 지역을 중심으로 산맥 수렴에 의한 대설이 나타나게 되므로, 서해안형 강설 예보 시 유입되는 기류의 풍향과 풍속을 고려하여 강설 집중구역을 사전에 판단하는 것이 필요하다.

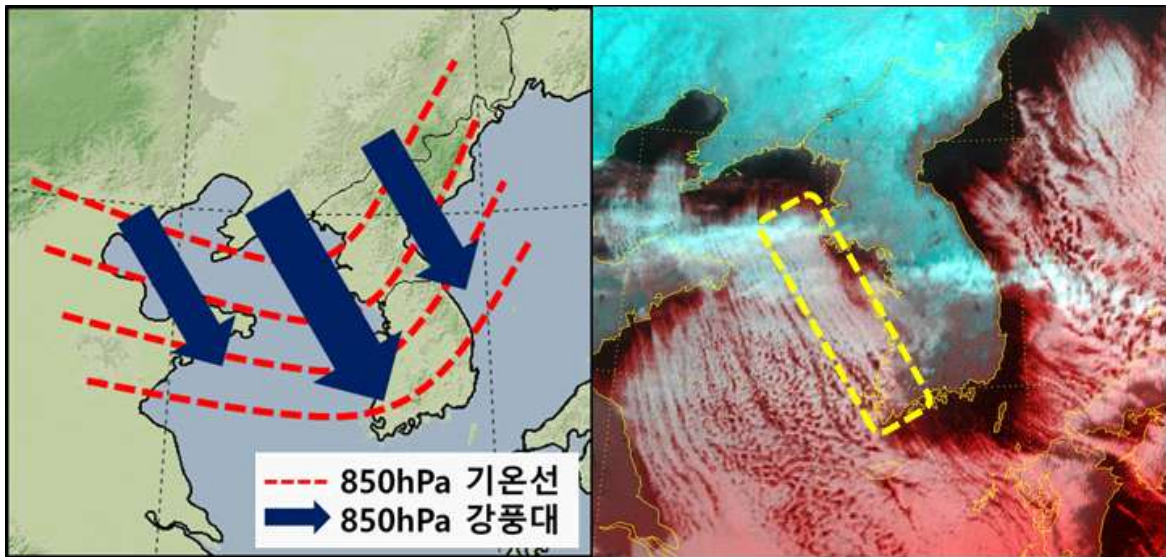


그림 3-24. 지형수렴형 대설이 발생하는 하층 강풍대와 온도골 위치, 지형수렴형 대설이 발생했던 2018년 12월 28일 사례의 천리안위성 합성영상

지형수렴형 대설이 발생하기 유리한 하층의 종관적인 조건은 그림 3-24의 왼쪽 모식도와 같이 850hPa 강풍대와 온도골의 축이 전라서해안으로 유입되는 형태여야 한다. 특히, 내륙인 노령산맥까지 기류가 유입되어 지형수렴이 발생하기 위해서는 850hPa의 풍속이 30kts 이상으로 강해야 한다. 오른쪽 그림은 고창과 영광에 20cm 이상의 적설을 기록했던 2018년 12월 28일 사례의 천리안위성 합성영상으로 전라서해안으로 유입되는 대류운열(노란색 파선 영역)이 강하게 발달한 것을 볼 수 있는데 이날 850hPa의 30kts 이상 강풍축과 온도골이 전라서해안에 위치했다【겨울예보 사례분석 3-6】.

3. 6. 3. 육풍수렴형 대설

남북으로 긴 수렴대가 서해안에 정체하면서 대설을 유발할 때가 있는데, 찬 내륙에서 해상으로 불어나가는 육풍이 발생하여 서해상에서 불어오는 종관기류와 부딪혀 수렴대가 형성되는 경우이다. 육풍수렴에 의한 대설 발생 과정을 이해하기 위해서는 그림 3-25의 모식도와 같이 대륙고기압의 확장기와 변질기에 나타나는 특징을 먼저 이해해야 한다.

그림 3-25의 왼쪽은 대륙고기압 확장기의 과정을 나타낸 모식도이다. 대륙고기압이 한반도로 확장하면서 서해상과 우리나라로 한랭기류가 강하게 일어나는데, 하층에서 강한 북서풍의 바람과 온도골이 서해상과 한반도로 광범위하게 형성된다. 대륙고기압 확장기의 경우 앞서 다른 지형수렴에 의한 대설이 발생하기 좋은 상황으로 육풍이 나타나기는 어려운 조건이다.

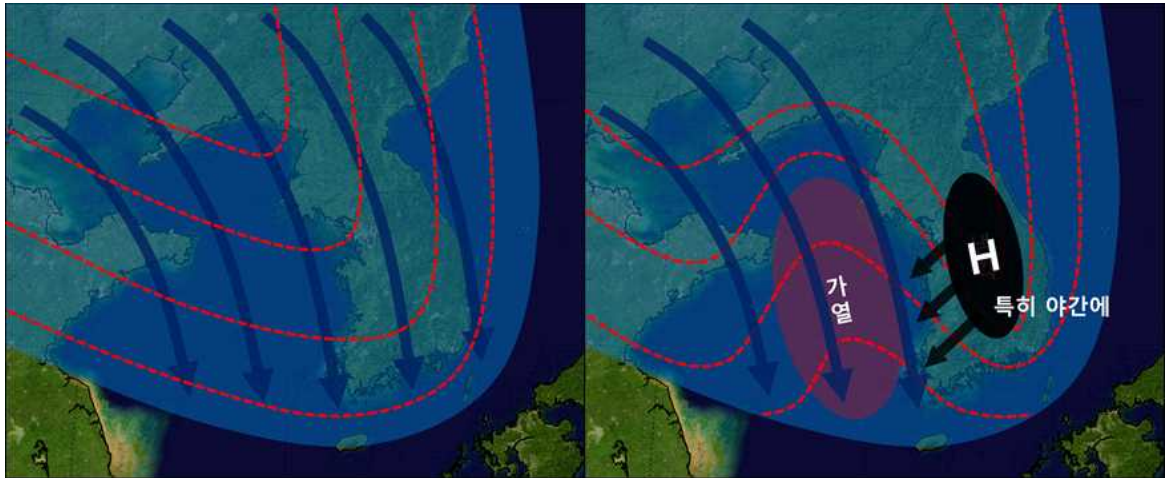


그림 3-25. 대륙고기압 확장기(왼쪽)와 변질기(오른쪽)의 모식도

대륙고기압의 확장한 뒤 시간이 지나 변질기에 들어서면(그림 3-25의 오른쪽) 바람이 점차 약해지고, 따뜻한 서해상의 하층 대기는 공기가 빠르게 변질되면서 차가운 육지인 한반도에 비해 상대적으로 따뜻해진다. 서해상에는 그림과 같이 온도능이 발달하고 반대로 육지에서는 한기가 축적되면서 냉각되는데, 특히 야간의 경우 내륙의 복사냉각 효과가 더해져 온도골이 더욱 깊어진다. 상대적으로 차가운 육지에는 국지고기압 또는 고압부가 형성되고 가장자리로 육풍 성분인 북동풍이 서해안으로 불게 되면서 종관풍인 북서풍과 부딪혀 수렴대가 발생한다. 이 수렴대의 위치가 서해안으로 자리 잡는 경우 서해안에 대설이 나타나게 되며, 육풍이 너무 강하면 수렴대가 해상으로 밀려나 오히려 적설이 기록되지 못하는 사례도 나타난다. 따라서, 육풍수렴형의 대설 예보에서는 수렴대의 위치를 예상하는 것이 가장 중요하다.

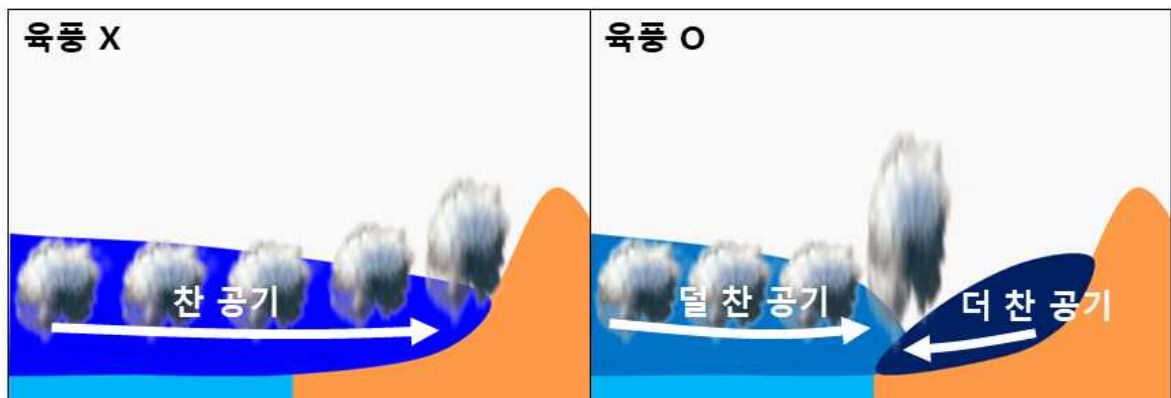


그림 3-26. 대륙고기압 확장기(왼쪽)와 변질기(오른쪽)의 모식도

그림 3-26은 육풍 수렴이 발생할 때의 연직 모식도이다. 왼쪽과 같이 육풍이 약한 시기에는 서해상에서 불어오는 종관기류가 해안으로 그대로 유입되면서 주로 지형에 의한 수렴이 작용하게 된다. 그러나 오른쪽의 육풍이 강한 시기에는 내륙의 냉각으로 서해상의 공기보다 더 차가운 육풍이 해상으로 불면서 종관기류와 양방향으로 기류 수렴이 일어나 수렴의 강도가 강해진다. 따라서, 수렴대가 위치하는 지역에서는 대설이

발생하게 되며, 종관풍과 육풍의 강도가 균형을 이루면서 수렴대가 정체할 시 상당히 많은 적설이 기록되기도 한다【겨울예보 사례분석 3-7】.

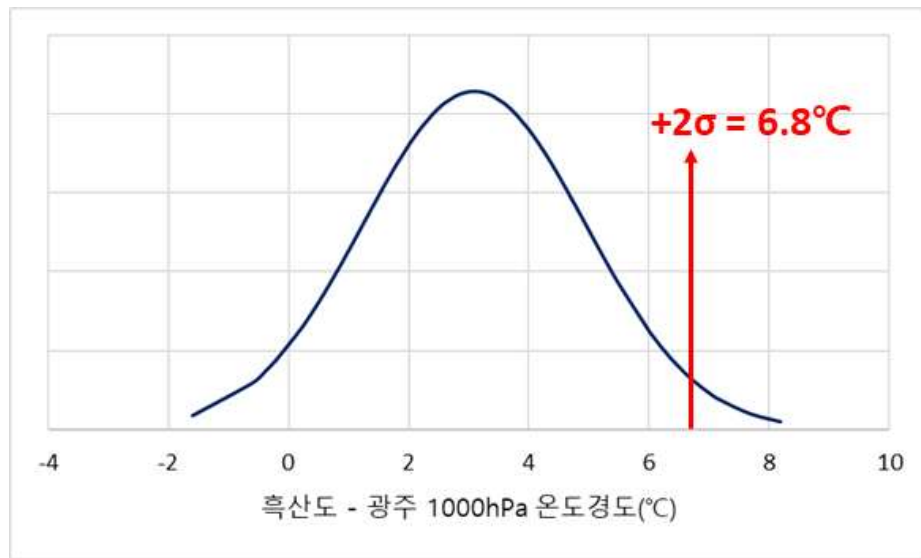


그림 3-27. 2003~2017년 목포 지점 서해안형 강설 사례에서 흑산도와 광주 고층 1000hPa 기온차의 정규 분포

육풍수렴대의 유입 여부를 판단하기 위해 1000hPa 고도의 수평 온도경도를 분석해 보았다. 겨울철 1000hPa 고도는 200m 내외로 해륙풍이 나타나는 고도와 가장 가까운 표준고도 자료이므로 분석 고도로 사용하였으며, 2003~2017년의 목포 지점의 서해안형 강설 기록 사례들을 기준으로 서쪽은 흑산도, 동쪽은 광주 지점에서의 온도 차를 조사해 보았다. 그림 3-27은 목포 지점 강설 사례에서의 흑산도와 광주 지점의 1000hPa 온도 차 정규 분포이며, $+2\sigma$ 구간의 온도 차는 6.8°C 로 나타났다. 즉, 통계자료를 기반으로 흑산도와 광주의 1000hPa 수평 온도차가 6.8°C 이하일 때 육풍 수렴대는 전남 서해안으로 유입, 반대로 6.8°C 초과일 때는 수렴대가 해상으로 벗어나는 것으로 분석할 수 있다. 한편, 두 지점의 1000hPa 수평 온도차가 6.8°C 내외로 큰 변화 없이 긴 시간 지속되는 경우 수렴대가 전남서해안에 정체하면서 많은 적설이 기록될 가능성을 고려해야 한다.

한편, 겨울철 내륙의 복사냉각이 강하게 일어나게 되면 복사냉각 효과를 수치모델이 과소모의하는 경우가 많아, 수렴대의 위치 예측이 빗나가는 경우가 빈번하게 일어난다. 그림 3-28은 2018년 1월 24일 09시 UM 수치모델의 24시간 전에 예상한 강수 예상도와 실제 레이더 강수 현황의 비교 자료이다. 이날 수치모델 예상보다 내륙의 복사냉각이 강화되면서 육풍이 예상보다 해상으로 강하게 불어 나갔다. 따라서 수렴대가 해상으로 밀려나면서 전라서해안에 적설은 5cm 미만으로 대설을 기록하지 못했다【겨울예보 사례분석 3-3, 3-5】.

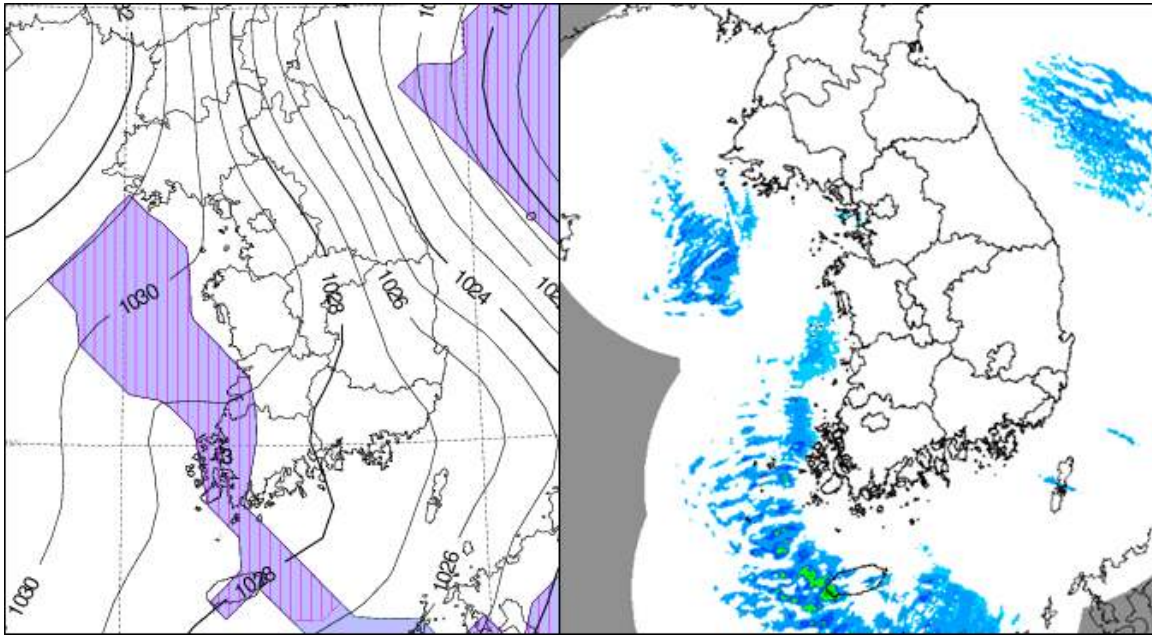


그림 3-28. 2018년 1월 24일 09시 UM 강수 예상도(+24H)와 레이더 강수 실황

대부분의 육풍수렴형 사례들은 수치모델이 전라서해안으로 많은 양의 강설을 모의하나 실제로는 육풍이 예상보다 강화되어 수렴대가 서해상으로 벗어나는 경우가 많다. 특히 한기가 강해 낮에도 기온이 -10°C 정도에 머무르는 경우 주간에도 육풍이 약화되지 않아 수렴대가 해안으로 유입되지 못하므로 예보 시 주의해야 한다.

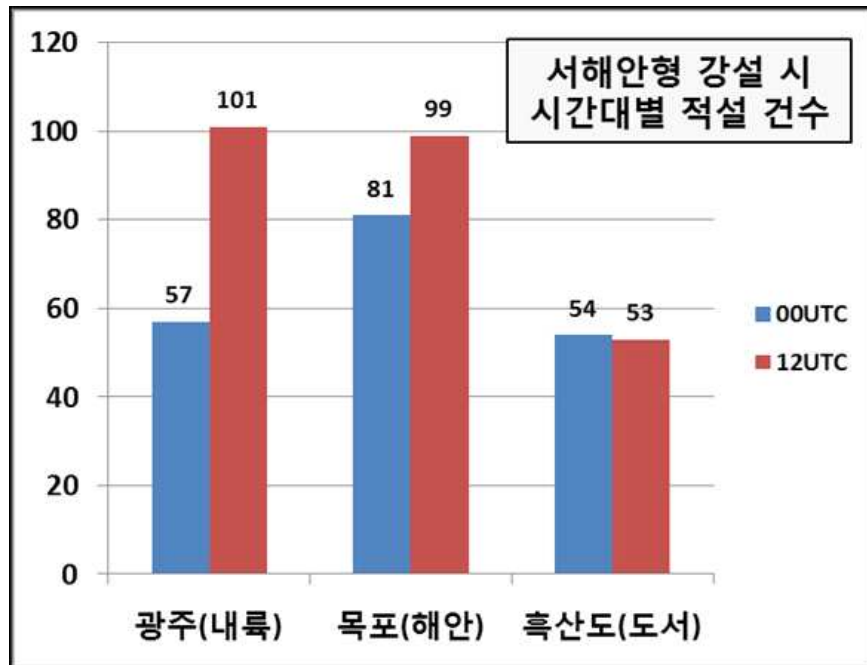


그림 3-29. 2008~2012년 겨울철 시간대별(00/12UTC) 서해안형 강설의 지점별 적설 일수

그림 3-29는 광주(내륙), 목포(해안), 흑산도(도서) 각 지점별 호수 효과에 의한 서해안형 강설 사례의 적설 건수를 00UTC와 12UTC의 시간대별로 나타낸 자료이다. 육풍의 영향이

미치지 못하는 흑산도의 경우 00UTC와 12UTC의 시간대별 차이가 거의 나타나지 않는다. 그러나 내륙인 광주외의 경우 냉각 효과로 육풍이 강화되는 00UTC 시간대에 강설 발생 건수가 거의 절반 수준으로 감소하는 결과가 나타난다.

3. 6. 4. 기압골지원형 대설

그림 3-30의 두 위성영상을 보면 모두 해기차에 의한 구름열이 서해상을 뒤덮고 있는 모습이다. 하지만 구름열의 회전 방향을 보면 왼쪽은 시계 방향의 고기압성 곡률을, 오른쪽은 반시계 방향의 저기압성 곡률로 흐르는 차이가 있다. 왼쪽의 경우는 순수 호수 효과에 의한 대류운열이 발달한 것으로 하층의 강한 역전층으로 대류가 억제되고 바람의 연직시어가 크지 않아 받고랑 모양으로 구름이 발달하였다. 왼쪽과는 다르게 오른쪽은 구름열의 배열이 나란하지 않고 구름층도 하나의 방향으로 나타나지 않는다. 오른쪽은 호수 효과에 추가적으로 상층의 기압골이 영향을 주면서 더 높은 고도로 구름이 발달하기 때문이다. 기압골의 영향으로 바람의 연직시어가 존재하여 구름의 배열이 일정하지 않고, 특히 화살표로 표시한 곳으로 기압골이 통과하면서 구름을 더욱 강하게 발달시킨 것을 확인할 수 있다.

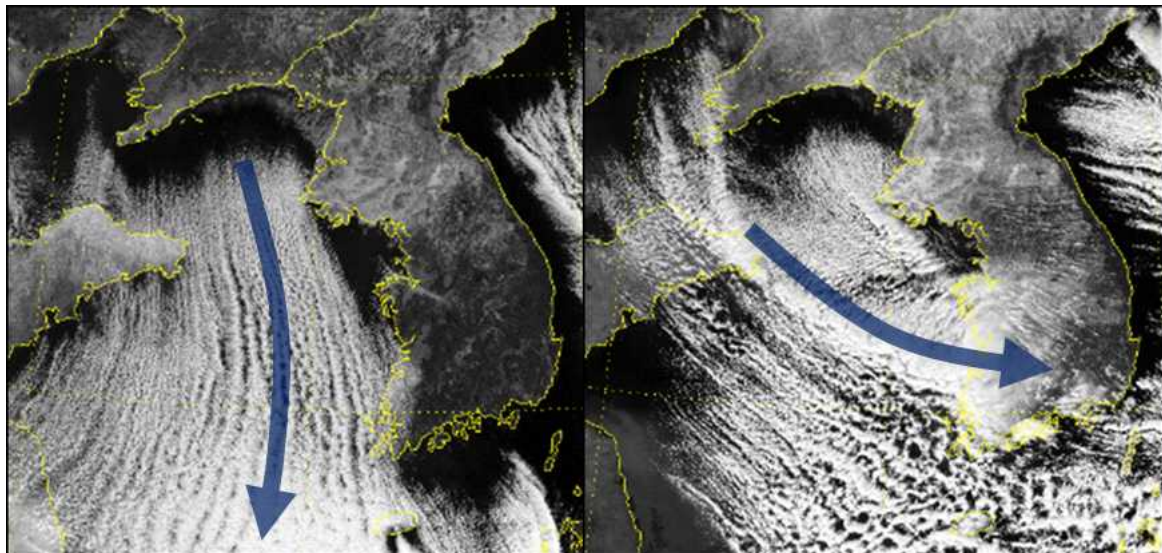


그림 3-30. 2018년 1월 26일 12시, 2018년 1월 10일 13시 천리안위성 가시영상

겨울철 우리나라 북쪽에서는 상층저지(Blocking)에 의해 한기핵을 동반한 상층저기압이 절리(Cut-off)되면서 정체되는 경우가 종종 발생하는데, 그림 3-31의 기압계 모식도와 같이 절리 저기압이 우리나라 북쪽에서 정체하게 되면 북쪽의 찬 공기가 우리나라로 주기적으로 남하하게 된다. 이때 상층에서 1차 기압골 통과 후 2차 기압골이 서해상으로 남하하는 경우 하층에서도 기압골 형태의 두 불연속면에서 수렴대가 나타나고, 전면으로는 북서풍이 아닌 서풍류의 바람을 강화시키게 된다. 더불어, 상층에서는 기압골이 통과하면서 역학적으로 구름을 상승시켜 구름대를 더욱 발달시킨다.

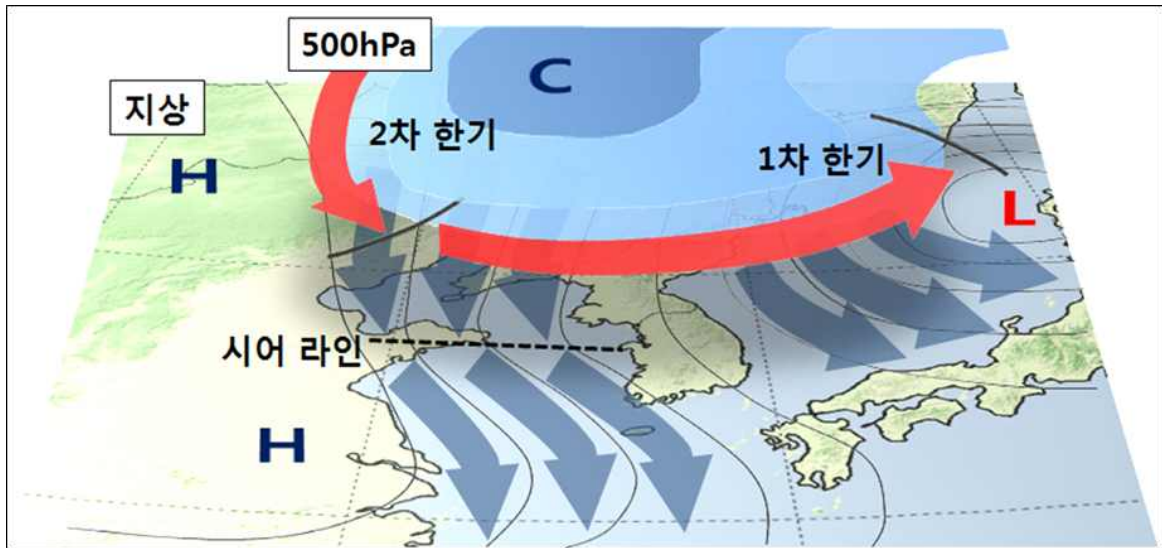


그림 3-31. 상층 기압골 영향으로 서해상에 기류 수렴이 형성되는 기압계의 모식도

그림 3-32의 모식에서도 확인할 수 있듯이 왼쪽 그림과 같이 기압골 지원이 없는 경우 하강기류가 지배적이기 때문에 내륙까지 구름대가 발달해서 유입되기 어렵다. 하지만 오른쪽 그림과 같이 기압골 지원이 있으면 내륙까지 구름대가 발달해서 유입될 수 있으며, 내륙의 산맥에 부딪혀 지형 효과까지 더해지는 경우 적설이 더욱 늘어날 수도 있다. 따라서, 기압골 지원형은 내륙까지 광범위하게 대설 구역이 나타나며, 많은 적설을 기록하는 것이 특징이라고 할 수 있다【겨울예보 사례분석 3-2】.

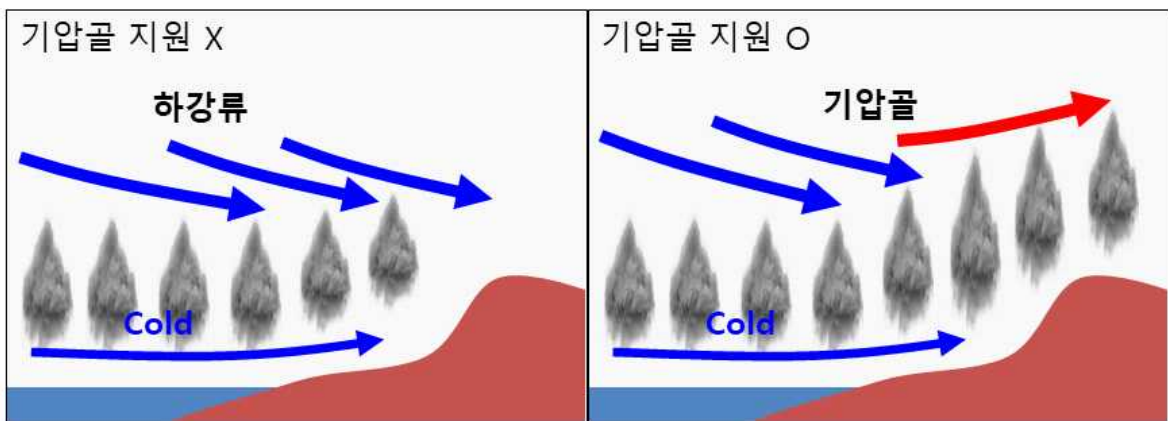


그림 3-32. 기압골 지원 여부에 따른 구름의 발달과 유입의 모식도

기압골지원형 대설의 경우 한기가 두 차례 이상 영향을 주기 때문에 기본적으로 강설의 지속시간이 길어진다. 또한 상층 찬 공기의 영향으로 700hPa 해기차도 커지고, 하층의 수렴과 상층의 강제력까지 더해지므로 매우 많은 적설로 이어질 수 있다. 그림 3-33의 두 사례의 500hPa 일기도에서 왼쪽 사례는 절리저기압이 중국북동지역에 위치하면서 서해상으로 2차 기압골이 한 차례 남하하면서 강수 지속시간이 24시간을 넘지는 않았다. 반면에 오른쪽 사례는 절리저기압의 중심이 북한에 정체하면서 2차 기압골이 여러차례 반복하여 남하하였고, 강수 지속시간이 48시간 이상 지속되었다. 강한 강도의 강설이

긴 시간 지속되면서 오른쪽 사례는 전북내륙에 최대 60cm 이상의 매우 많은 적설이 기록되기도 했다【겨울예보 사례분석 3-8】.

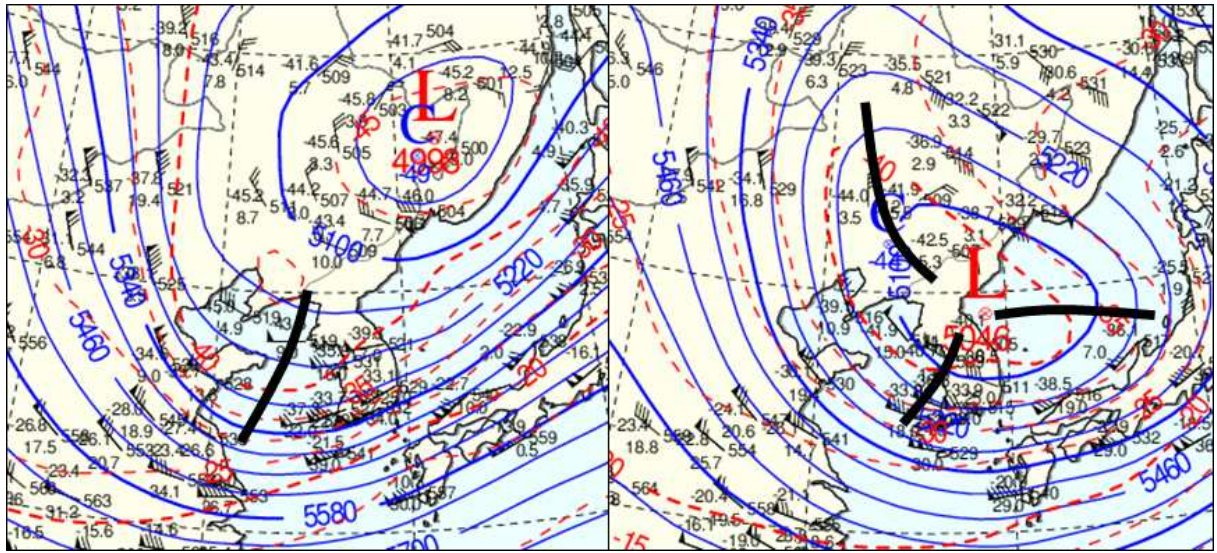


그림 3-33. 2022년 12월 17일 21시(좌)와 2022년 12월 22일 21시(우) 500hPa 일기도

Key Point!

1. 호수 효과에 의한 대설 발생은 반드시 수렴을 동반해야 한다.
2. 지형수렴형은 해안으로 강한 한랭이류가 나타날 때 발생한다.
3. 육풍수렴형은 한랭이류가 약화되는 변질기와 야간 시간대에 발생한다.
4. 기압골지원형은 내륙까지 광범위하게 대설이 발생한다.

3. 7. 예보 의사결정을 위한 참고자료

표 3-2. 2017~2022년 겨울철 대설 유형별 사례 목록

대설 유형	사례 일자	적설(상위 2순위)
지형수렴형	2022. 12. 14.	순창 11.9 장수 11.6
	2022. 2. 20.	순창 10.7
	2022. 2. 5.	순창 9.9 정읍 8.0
	2022. 1. 11.	고창 8.1
	2021. 12. 30.	순창 10.9 정읍 7.0
	2021. 12. 25.	고창 13.5 장성 12.0
	2021. 12. 17.	순창 16.0 고창 14.3
	2021. 2. 18.	광주 9.0 나주 8.6
	2021. 2. 17.	순창 18.6 정읍 14.4
	2021. 1. 29.	장성 9.0 부안 8.0
	2021. 1. 28.	순창 9.0 담양 6.4
	2020. 12. 30.	부안 33.5 정읍 31.2
	2020. 12. 14.	장성 9.0 광주 8.0
	2018. 12. 28.	고창 24.5 영광 22.0
	2018. 12. 7.	영광 8.0 고창 7.5
	2018. 2. 4.	부안 19.8 고창 17.2
	2017. 12. 11.	군산 8.0 김제 8.0
	2017. 12. 8.	고창 9.0 영광 9.0
	2017. 12. 5.	정읍 7.0 군산 6.0
육풍수렴형	2023. 1. 24.	영암 20.9 강진 20.6
	2022. 12. 18.	군산 39.5 고창 25.9
	2022. 12. 14.	군산 13.8 부안 8.3
	2022. 1. 13.	무안 5.7 군산 5.3
	2021. 12. 26.	무안 33.0 영광 21.9
	2021. 1. 7.	부안 16.4 영광 11.5
	2020. 12. 16.	흑산도 10.9 군산 8.4
	2020. 12. 15.	무안 14.4 군산 8.2
	2018. 12. 8.	군산 14.6 흑산도 9.0
	2018. 2. 6.	목포 9.8 진도 9.1
	2018. 2. 5.	무안 9.5 목포 7.5
	2018. 1. 29.	목포 5.4 군산 5.1
	2018. 1. 25.	영광 7.5 신안 5.9
	2018. 1. 24.	영광 5.0 무안 5.0
	2018. 1. 11.	군산 33.7 부안 25.5
	2017. 12. 17.	고창 10.0 정읍 8.0
	2017. 12. 12.	군산 13.1 부안 6.7
기압골지원형	2022. 12. 23.	순창 63.7 임실 57.2
	2021. 1. 7.	김제 20.4 임실 17.5
	2020. 2. 17.	진안 27.0 임실 19.7
	2018. 1. 10.	임실 28.5 영광 25.0

표 3-2는 2017~2022년 겨울철 기간의 대설 사례를 유형별로 정리한 것이다. 각 사례 일별로 상위 2순위 지역의 적설을 함께 정리하였으며, 목록을 보면 기압골지원형은 4건에 불과하고 지형수렴형과 육풍수렴형이 대부분의 대설 유형으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 다만 기압골지원형의 경우 발생 빈도는 적지만 발생하게 되면 내륙까지 광범위한 지역으로 20cm 이상의 많은 적설로 이어지는 유형이므로 주의해야 한다. 또한, 육풍수렴형은 수렴대의 강설강도가 매우 강한 대설 유형이지만 보통은 육풍이 강화되면서 수렴대가 정체하기보다는 이동하는 경우가 많아 20cm를 넘는 적설은 드물게 나타나는 것이 특징이다.

3. 8. 호수 효과에 의한 적설 판단을 위한 흐름도

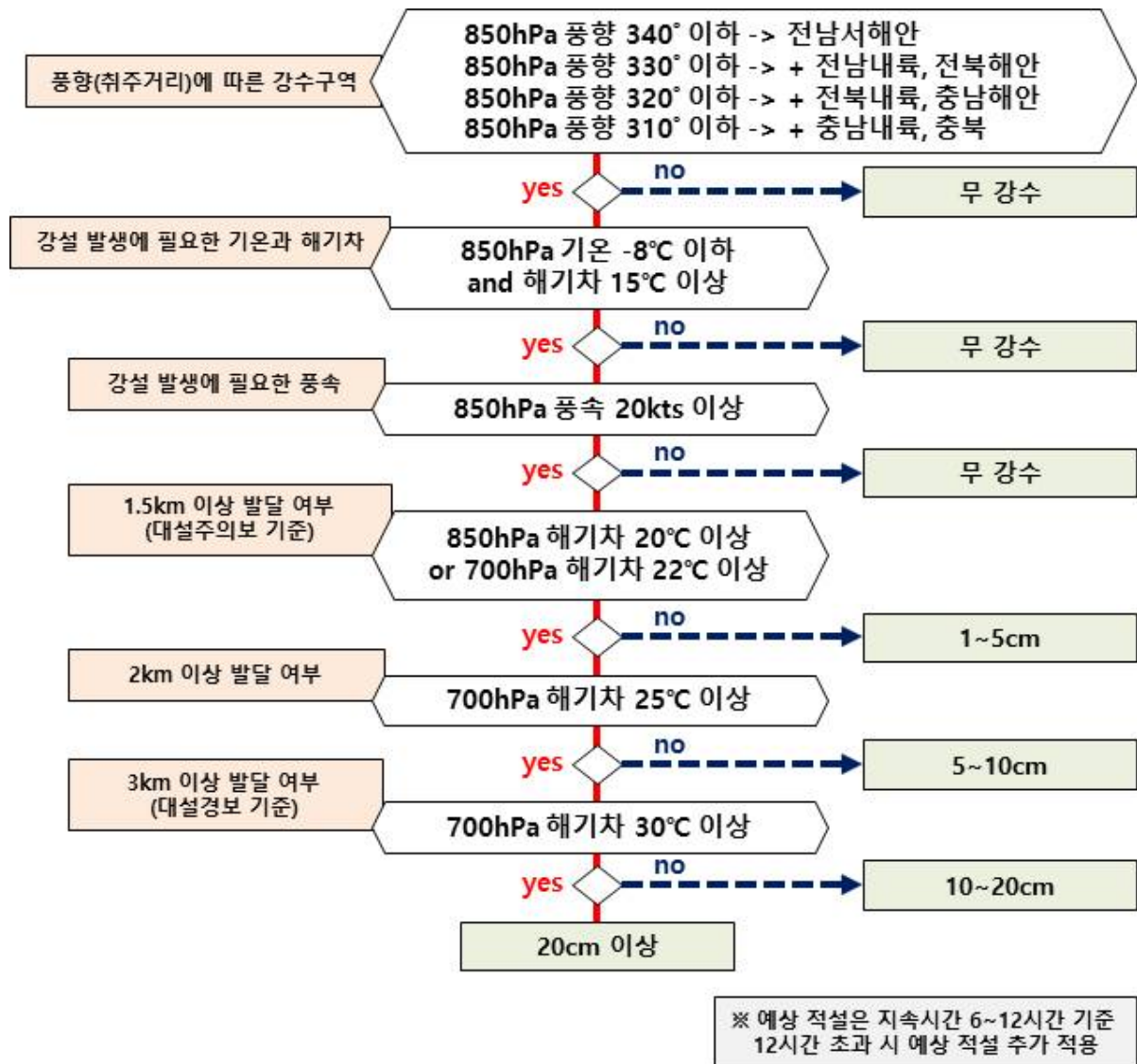


그림 3-34. 호수 효과에 의한 적설 판단 흐름도

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.

《Why?How!》 제4권 ‘겨울예보 사례분석’ 가이드스 중 ‘3. 서해안형 강수’ 연계 내용

- 3-1. 2017년 11월 18~19일 사례: ‘2017년 겨울철 서해안 첫 적설 도입 실패’
- 3-2. 2018년 1월 10일 사례: ‘기류 수렴 영향으로 20cm 이상 기록한 서해안 대설’
- 3-3. 2018년 1월 23~24일 사례: ‘큰 해기차에도 불구하고 예상보다 적었던 서해안 강설’
- 3-4. 2018년 1월 24~25일 사례: ‘북풍의 풍계에서 예상하지 못한 전남서해안 대설’
- 3-5. 2018년 12월 8일 사례: ‘야간 육풍 강화로 해안 위주의 대설, 내륙은 강수 어려움’
- 3-6. 2018년 12월 28일 사례: ‘강한 한랭이류와 불안정, 그리고 지형수렴에 의한 대설’
- 3-7. 2021년 12월 26일 사례: ‘강하게 발달한 육풍수렴대 정체, 전남서해안 30cm 이상 적설’
- 3-8. 2022년 12월 22~23일 사례: ‘기압골지원형 전라내륙 50cm 이상 적설(광주 신적설 극값 2위)’

겨울 예보

4. 북동기류에 의한 강수시스템 이해와 예보 활용



4. 북동기류에 의한 강수시스템 이해와 예보 활용

Why?

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

4. 1. 북동기류 강수의 정의

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

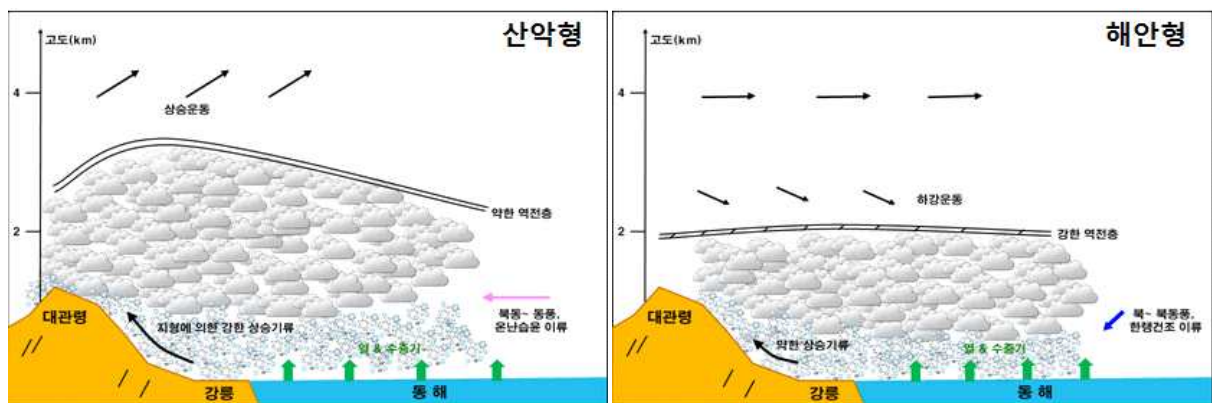


그림 4-1. 영동지방 강수 유형 모식도 산악형(좌), 해안형(우) (이재규(1999), 박정민(2016))

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 2km

이내에 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 산악형과 해안형으로 뚜렷하게 나눌 수 없거나 두 유형이 혼합되어 나타나는 경우가 약 50%를 차지한다. 따라서 위 분류법을 활용해 강수집중구역을 예측하는 데 어려움이 있다.

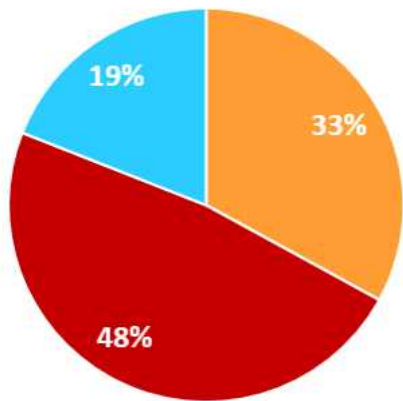


그림 4-2. 20년(1978. 1.~1998. 3.)동안 대관령과 강릉의 신적설로 나눈 북동강수 유형 분포 (이재규(1999))

- 산악형: 대관령이 강릉보다 10cm 이상 많은 유형(52일)
- 해안형: 강릉이 대관령보다 10cm 이상 많은 유형(30일)
- 혼합형: 대관령과 강릉의 차가 10cm 미만으로 큰 차이가 없었던 유형(77일)

4. 2. 겨울철 북동기류에 의한 강수 예측의 어려움

겨울철 북동기류에 의한 강수 예측에 어려움을 겪는 부분 중 첫째는 강수 유무를 판단하는 것이다. 해상에서 형성된 구름이 영동 해안 쪽을 스치면서 강수를 내리기도 하지만 때로는 비슷한 종관 상태에서 눈구름이 해안으로 상륙하지 못하고 해상에 머무르게 되어 강수가 오지 않는 경우도 있기 때문이다.

두 번째는 강수 형태를 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 강수 형태가 매우 복잡하게 나타난다는 점이다.

마지막은 강수 집중 구역을 예측하기 어렵다는 것이다. 앞서 살펴본 이재규(1999)의 연구에서 언급한 역전층의 깊이와 역전층 위의 고도에서의 상승 운동 여부만으로는 강수 집중구역을 정확히 예측할 수 없다. 또한 시스템의 이동에 따라 강수가 해안에 집중됐다가 산악지형으로 이동하는 경우 누적강수량이 뚜렷하게 차이 나지 않는 경우가 많다. 따라서 강수 메커니즘별 분류가 없는 상황에서 강수 집중 구역 예측은 한계가 있다.

4. 3. 눈구름이 동해안으로 들어올까, 해상에 머물까?

4. 3. 1. 북동기류 강수에 영향을 주는 기압배치

북동기류에 의한 구름대의 해안 유입 여부를 판단하기 위해 강수가 잘 유입되지 못하는 기압 배치 형태를 살펴보는 것이 도움이 된다. 겨울철 시베리아에서 발달한 대륙 고기압 (cP: continental Polar)이 남동진하면서 확장하는 경로와, 북동기류가 영동지방에 영향을 줄 시점에 고기압과 고기압 사이 골의 위치에 따라 2가지 형태로 나눌 수 있다.

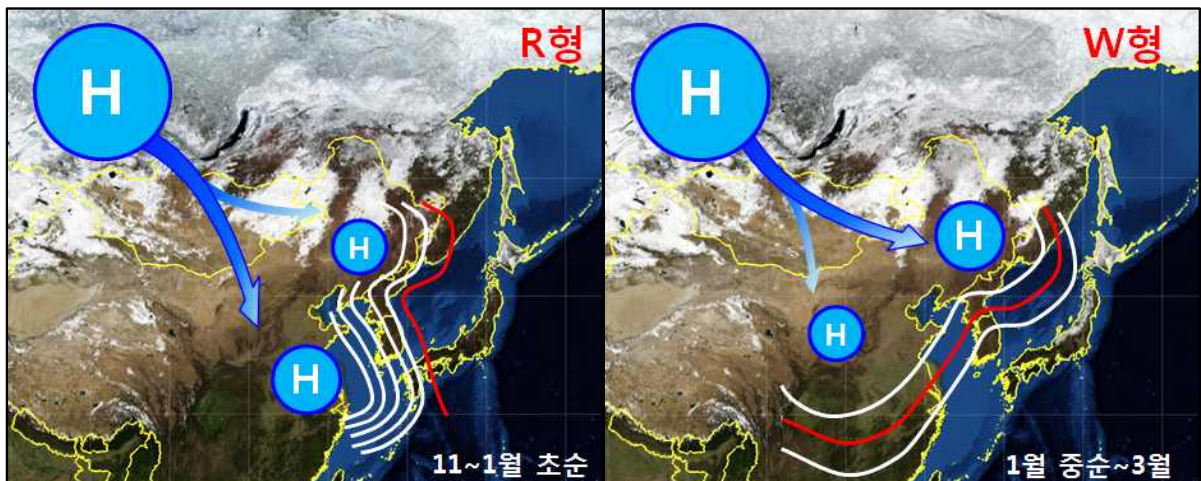


그림 4-3. 기후학적인 겨울철 대륙고기압 확장경로와 해면기압 형태
 (좌) 11~1월 초순 주 확장경로(파란색 굵은 화살표)와 R형 기압배치
 (우) 1월 중순~3월 주 확장경로(파란색 굵은 화살표)와 ω형 기압배치

대륙고기압(cP형태)은 11월부터 이듬해 3월까지 발달해 한반도에 영향을 주는데, 시기에 따라 고기압의 주 확장경로가 변하며 그림 4-3과 같이 중국 중남부와 중국 북동부 두 경로로 확장한다. 기후학적으로 겨울의 초중반(11월~이듬해 1월 초순)에는 주로 중국 중남부로 확장하면서 R형태의 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 발생하는데, 이때 북동기류가 탁월하지 않으면 영동지방까지 강수대가 영향을 끼치기는 어려운 시기이다.

두 번째로 겨울의 중후반(1월 중순~3월) 시기에는 대륙고기압이 주로 중국북동부로 확장하면서 ω형의 기압배치가 나타나며, 북동기류에 의해 영동지방에 영향을 주는 가장 전형적인 형태이다. 이 시기에는 중국 북동부의 고기압 중심 세력이 중국 중남부와 비슷하거나 그보다 강해 북동기류가 활성화된다. 따라서 북동기류가 육지로 유입되고, 태백산맥의 지형적인 영향까지 더해져 영동지방에 강수가 내리기 좋은 기압배치가 형성된다.

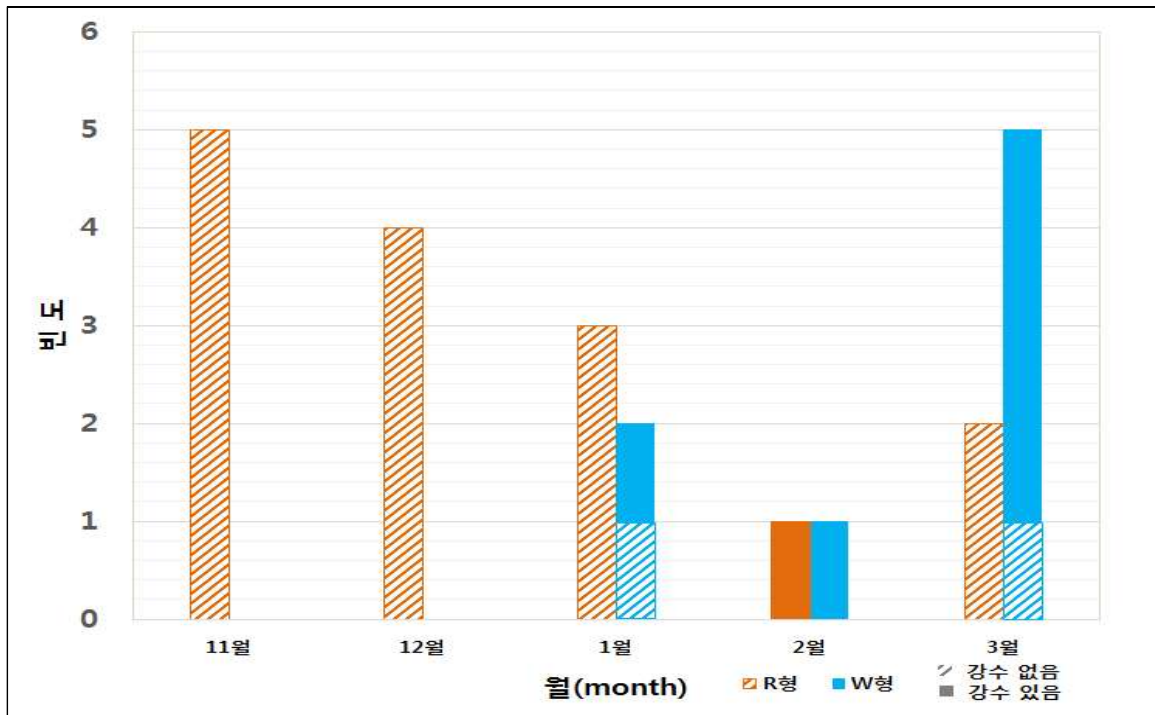


그림 4-4. 2017~2018년 겨울철 월별 해면기압 형태 분류와 강수 유무 빈도
(단색: 강수 있음, 빗금: 강수 없음, 주황색(R형), 파란색(ω 형))

그림 4-4에서 2017~2018년 겨울철 북동기류가 한반도에 영향을 주는 시점에 나타난 지상 기압배치를 두 가지 유형(R, ω 형)으로 나누었으며, 실제 영동지방의 강수 유무를 함께 표시하였다. 11~1월에 나타난 R형 기압배치에서는 동해안의 북동기류와 육지에서 부는 서풍류의 수렴대가 한 차례도 해안가로 접근하지 못하였다.

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

2017~2018년 겨울철 영동지방에서 북동기류에 의해 강수를 기록한 기압배치는 주로 ω 형이다. ω 형은 1~3월에 주로 발생했고 여덟 사례 중 두 사례를 제외하고 모두 강수를 기록하였다. ω 형에서는 지상일기도 기압능 사이의 기압골 위치와 925hPa의 온도능 위치에 따라 주 강수역을 찾을 수 있다.

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

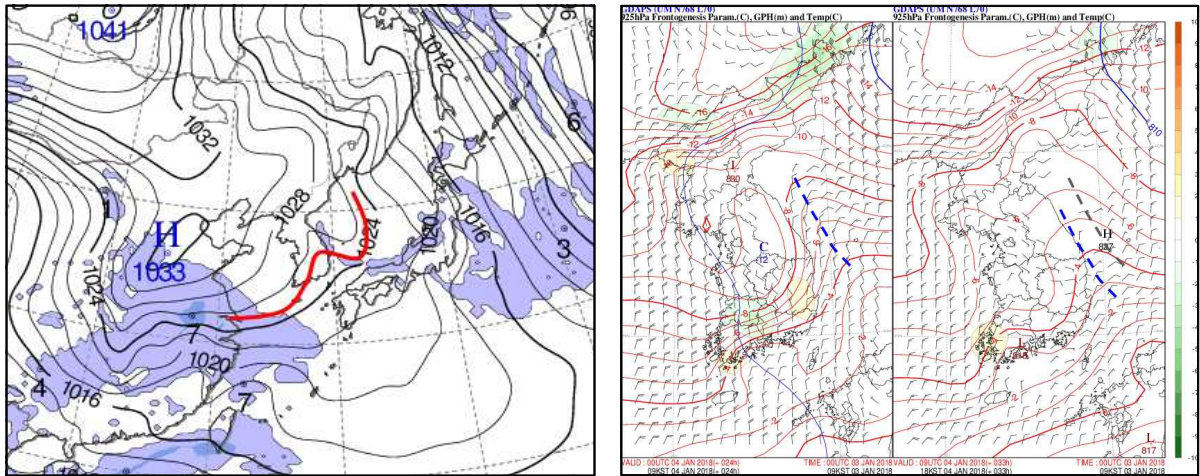


그림 4-5. UM 전구모델 예상장(3일 09시 발표)

(좌) 2018년 1월 4일 18시 해면기압, 3시간 누적강수량, ω 형 기압배치
 (우-1) 4일 09시 925hPa, (우-2) 4일 18시 925hPa 전선강도(파란 점선 온도능)

2018년 1월 4일은 모델에서 북동기류에 의해 강수가 동해안에 진입할 것으로 예상했으나 실제로는 오지 않았던 사례이다. 그림 4-5에서 지상기압 배치는 ω 형을 나타내고 있어 북동기류가 영동지방으로 유입되기에는 좋은 조건으로 나타난다. 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 강원남부와 경북북부에 강수를 모의하였으나 실제 강수량상은 이와 달랐다.

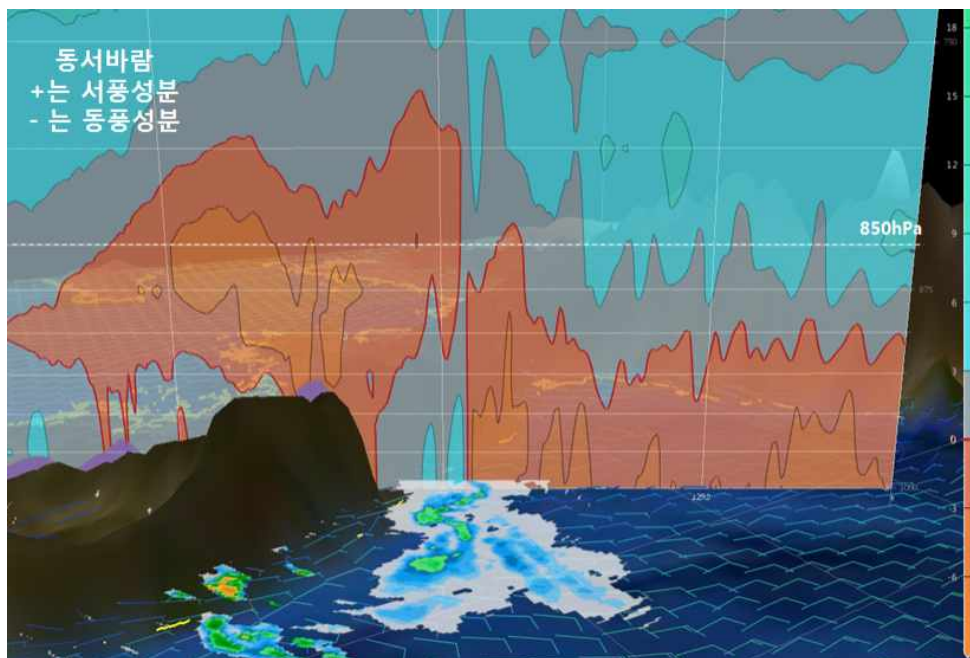


그림 4-6. 2018년 1월 4일 15시 UM 국지모델 분석장 동서바람 연직단면, 레이더영상 CMAX

그림 4-6은 2018년 1월 4일 15시 UM 국지모델 분석장의 동서바람 연직단면과 레이더영상을 중첩한 것이다. 동서바람 연직단면에서 주황색 계통의 (-)영역은 동풍 성분을, 파란색 계통의 (+)영역은 서풍성분을 나타낸다. 모델의 예상과는 달리 레이더 영상에서 강수가 나타나는 지역은 동풍성분과 서풍성분이 교차하는 해상에 위치하고 있다. 이처럼 한기이류가 강하지 않을 때에도 내륙에서 동해상으로 불어나가는 바람(서풍계열, 종관풍, 국지적인 육풍과 마찰풍이 결합된 바람)과 북동기류가 동해상에서 만나 구름을 발달시킬 수 있지만, 서풍계열의 바람이 더 강한 경우에는 강수대가 들어오지 못한다.

Key Point!

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

4. 3. 2. 강수 유입과 육풍과의 상관관계

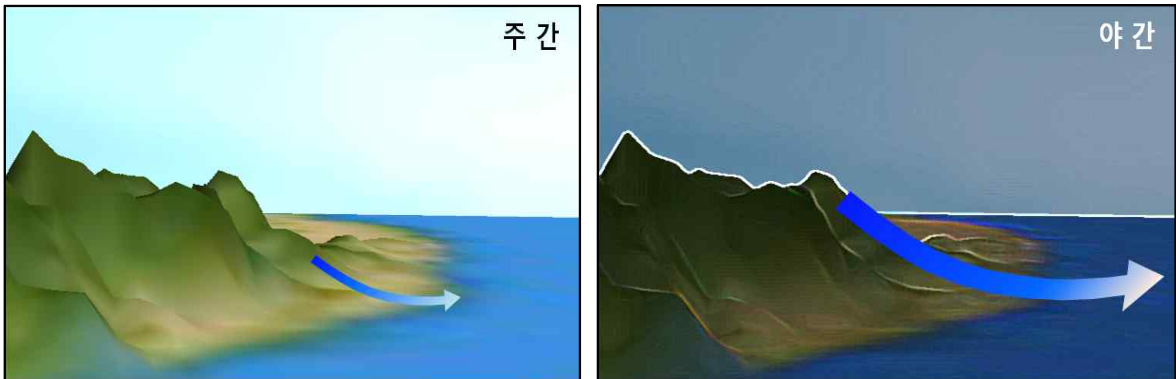


그림 4-7. 겨울철 영동지역에 나타나는 해륙풍(육풍)+산곡풍(산풍)의 일변화 모식도

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 더 커져 내륙으로 수렴대가 들어오지 못하는 경우가 발생하기도 한다.

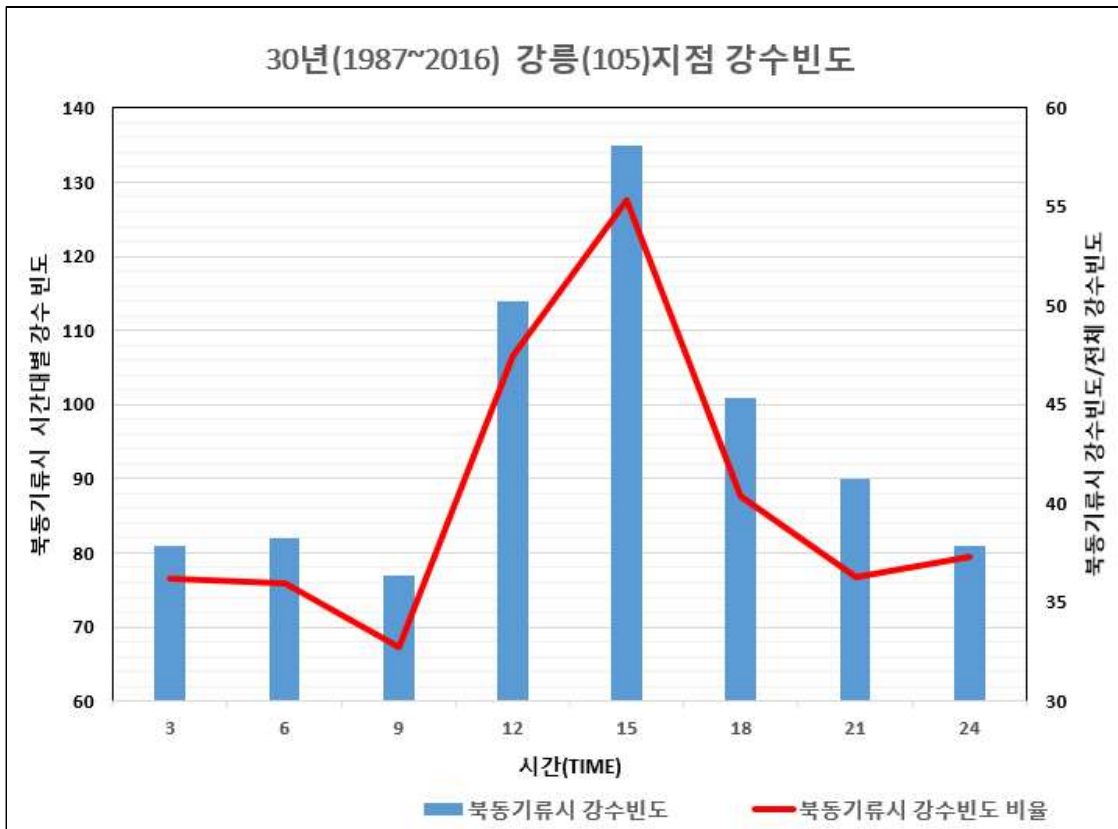


그림 4-8. 30년(1987~2016)간 겨울철(12~2월) 강릉(105)지점 북동기류 시 3시간 0.1mm 이상 강수빈도(파란색 막대)의 북동기류 시 강수일수 비율(빨간 실선)

그림 4-8의 파란색 막대그래프는 강릉지점(105)의 30년(1987~2017)간 겨울철(12~2월) 북동기류 유입 시 3시간 누적강수량 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 북서 방향으로 휘는 효과와 국지풍의 효과를 반영해 실제 강릉지점에서 관측하는 풍향을 고려한 것이다.

전체 풍향에 대한 시간대별 강수빈도는 크게 차이가 없었으나 북동기류 유입 시 강수빈도가 주간에는 높고 야간에는 낮았다. 이는 북동기류에 의한 강수빈도를 강수가 나타난 모든 경우의 수로 나눈 '북동기류 시 강수빈도 비율(빨간색 실선)'을 보면 뚜렷하게 나타난다. 특히 육지와 해상의 기온차가 가장 커 육풍이 강한 6~9시에 강수빈도 비율이 가장 낮다. 그리고 기온차가 가장 작아 국지적인 육풍이 약한 12~15시에 가장 높게 나타났다. 즉, 북동기류에 의한 영동지방 강수는 주간에는 확률이 높고 야간에는 상대적으로 낮아진다고 할 수 있다.

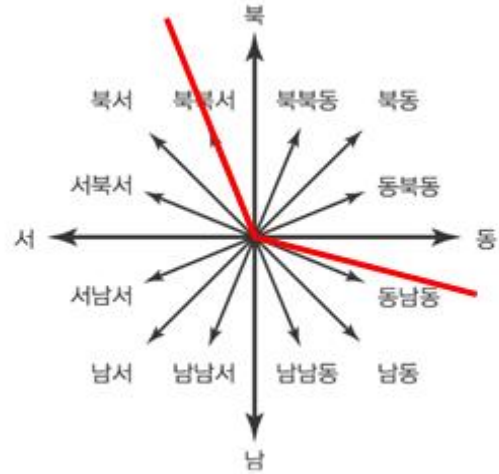
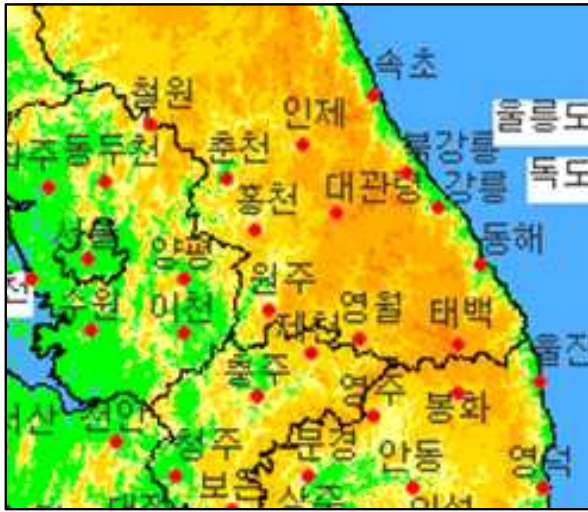


그림 4-9. (좌) 영동지방 지도, (우) 영동지방에 북동기류가 유입될 때 지상에서의 풍향 범위

겨울철 종관풍은 주로 서풍계열의 바람이 강하기 때문에 여름철처럼 중규모 해륙풍 순환이 정량적으로 나타나지 않는다. 하지만 30년간의 북동기류에 의한 강수 통계 자료를 이용하면 육풍 일변화에 따른 해상 수렴대의 내륙 유입 여부를 판단하는 데 도움이 된다.

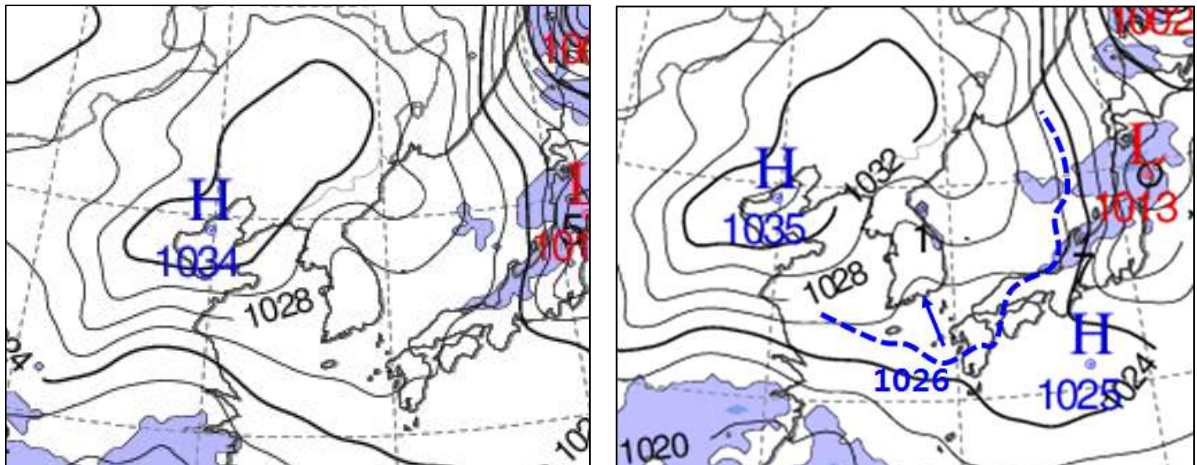


그림 4-10. (좌) 2018년 2월 24일 15시 해면기압 예상장(23일 09시 발표)

(우) 2018년 2월 24일 15시 해면기압 분석장, 파란색 점선은 (좌) 예상장의 1026hPa 등압선

그림 4-10의 UM 전구모델의 해면기압 예상장에서 발해만과 중국북동부에 위치한 대륙고기압의 위치를 모의하고 있으나, 분석장과 비교했을 때 남쪽 기압골이 버티고 있는 것과 북쪽 고기압의 강도는 과소 모의하고 있다. 그림 4-11은 2018년 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 마찰에

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【겨울예보 사례분석 4-1】.

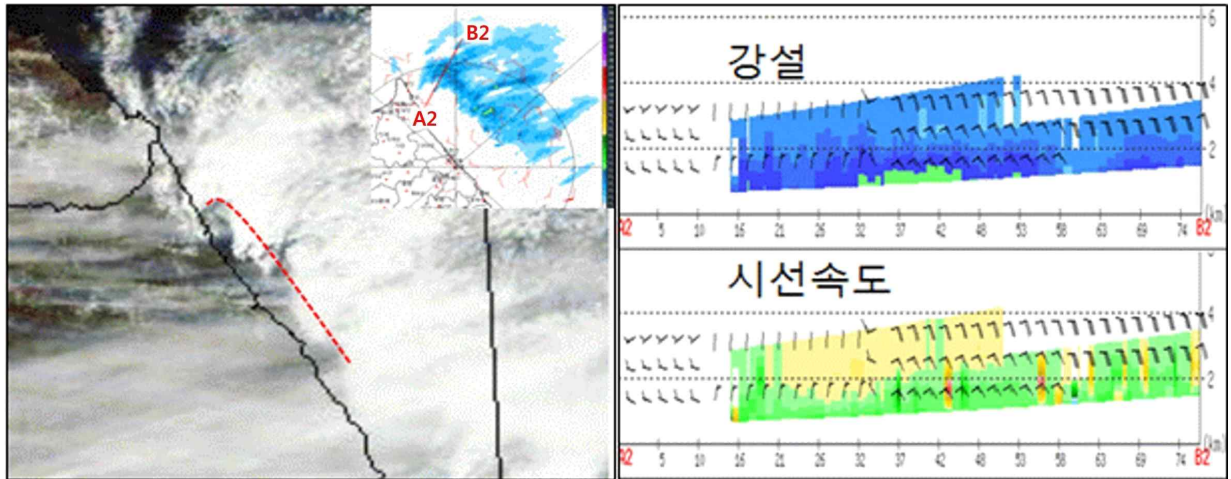


그림 4-11. (좌) 2018년 2월 24일 11시 35분 위성영상(MODIS RGB)과 강릉레이더영상(CAPPi) (우상) 레이더 강설 연직 단면(A2-B2), (우하) 레이더 시선속도 연직 단면(A2-B2)

Key Point!

1. 야간에는 육풍과 산풍이 결합되어 서풍류가 강화된다.
2. 주간에는 해상과 육지의 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 못한다.

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.

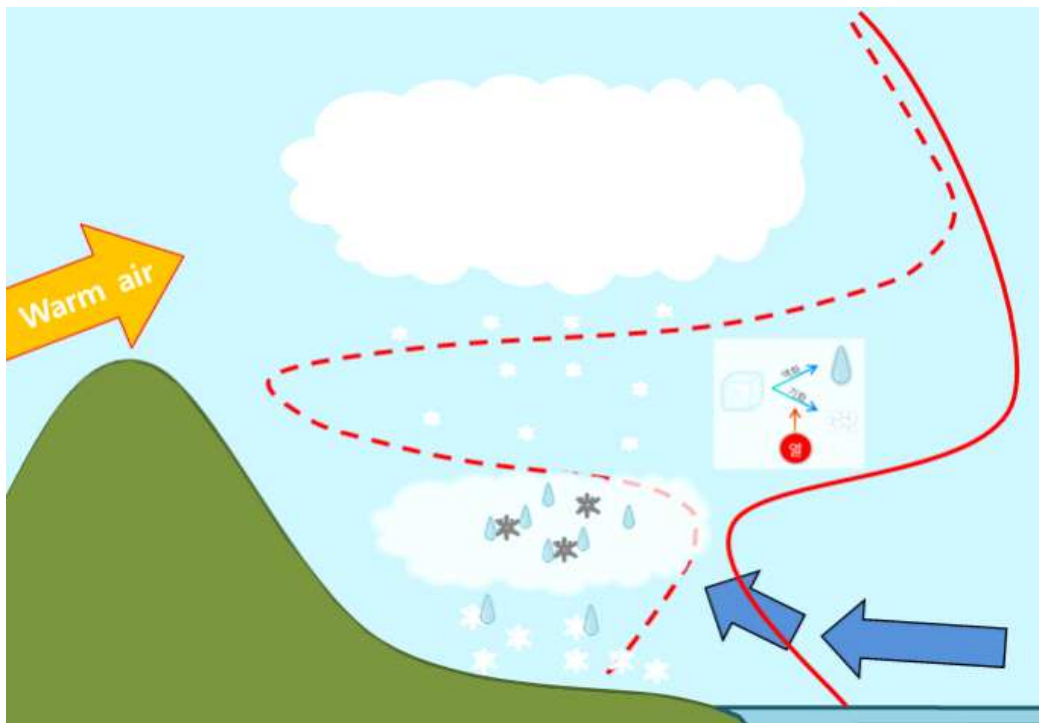


그림 4-12. seeder-feeder를 설명하는 모식도와 연직 기온 분포 (실선은 기온, 점선은 노점온도)

그림 4-12 모식도처럼 상하층에 각기 다른 메커니즘으로 발생한 구름이 연결되지 않고 분리된 상태에서 상층운에서 내린 강수입자가 하층운을 지나며 강수입자가 커지고 강수량이 늘어난다. 이때 상층 기온이 -10°C 이하로 과냉각 수적보다 빙정이 많은 경우에는 강수입자가 주로 빙정으로 나타난다. 이 강수입자가 빙결핵 역할을 하면서 상대적으로 과냉각 수적이 많은 하층운에서 빙결성장 이론에 따라 강수입자를 키우는 역할을 한다.

또한 상층운에서 빙정이 떨어지다가 구름이 없는 건조층을 지날 때 증발되면 주변 기온이 떨어진다. 궁극적으로 포화도는 높아지면서 하층 역전층이 해소되기 때문에 구름이 하층에서 상층까지 잘 발달할 수 있는 연직 기온 분포가 만들어진다. 이러한 미세물리과정은 모델이 예상하는 것보다 북동기류에 의한 강수 시스템을 발달시킬 수 있는 원인으로 작용한다.

강수 형태는 주로 하층운에서 지표까지의 연속 기온 분포에 의존한다. seeder-feeder 사례는 상층에서 빙정이 공급되기 때문에 하층운만 있는 경우보다 강수입자 중 빙정의 비율이 높다. 따라서 모델 예상보다 눈으로 내릴 가능성이 높아진다. 이런 경우는 저기압이 남부지방으로 통과하는 유형에서 하층은 동풍 계열, 상층은 서풍 계열의 바람이 불 때 종종 나타난다.

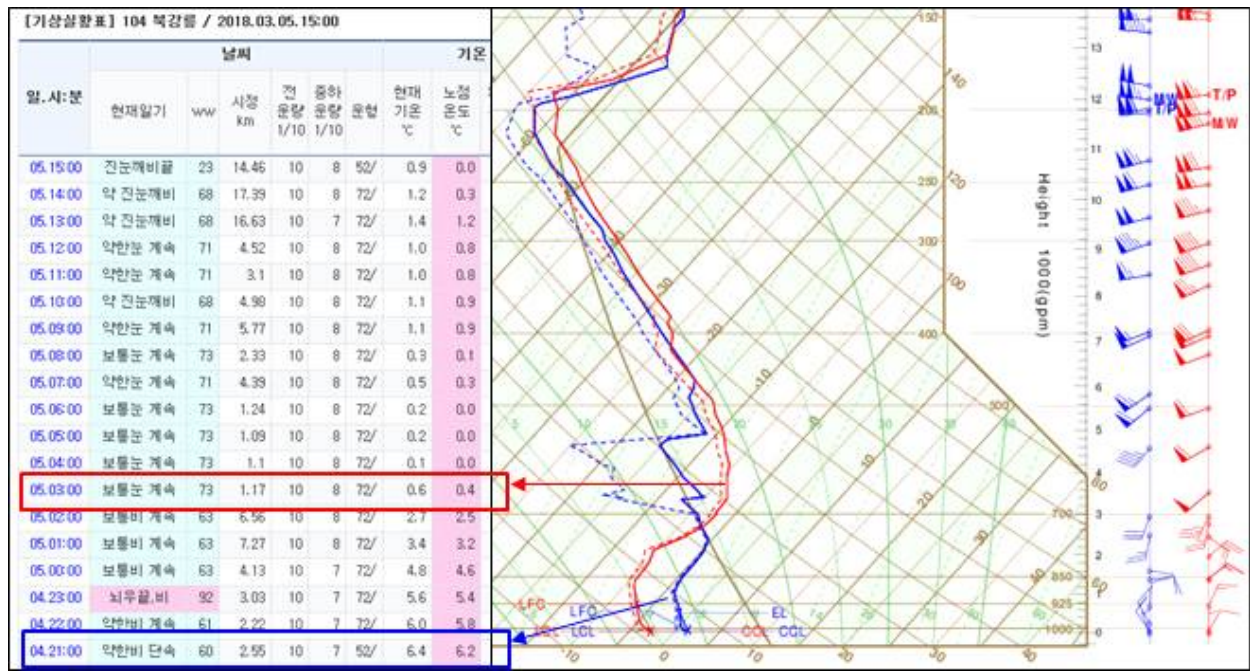


그림 4-13. (좌) 2018년 3월 4일~5일 북강릉 관측상황
(우) 북강릉 단열선도-파란색(4일 21시), 빨간색(5일 03시)

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

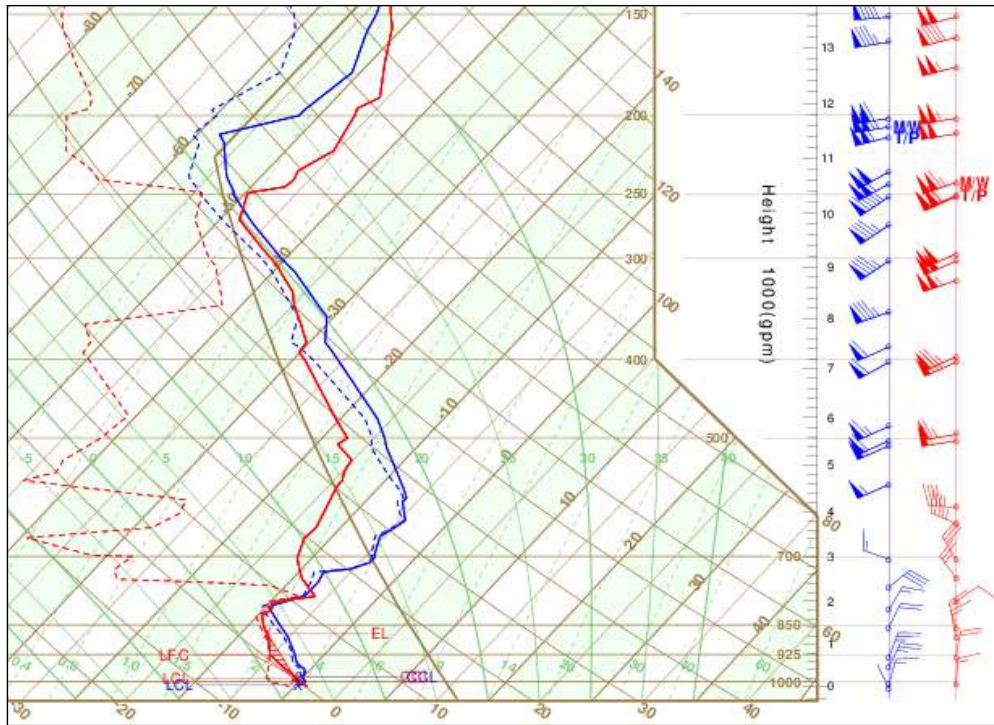


그림 4-14. 북강릉 단열선도, 파란색(2018년 3월 5일 9시), 빨간색(5일 15시)

그림 4-14를 보면 2018년 3월 5일 15시 3km 이상 고도에서 풍향은 북서풍으로 바뀌고 건조역이 유입되면서 하층의 북동기류에 의한 강수 시스템이 약하게 유지되었다. 상층운에 의한 빙정의 지원이 사라지자 하층의 한기이류는 지속되어 2km 이하의 온도곡선은 전 시간보다 더 왼쪽(0°C 이하로)으로 옮겨가고, 진눈깨비가 내렸다. 습구온도가 약 1°C 이내임에도 불구하고, 구름을 만들 수 있는 구간의 온도가 과냉각 수적이 많이 분포하고 있는 $-10\sim 0^{\circ}\text{C}$ 이고, 해풍의 유입으로 지속적인 수증기 공급이 가능해 지면서 진눈깨비 형태의 강수가 내릴수 있었다.【겨울예보 사례분석 4-2】

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 현상이다. 찬 공기가 갇히는 현상뿐만 아니라 찬 공기 위로 이동하는 기단에 역학적으로 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 된다. 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 4-15의 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.

마지막으로 CAD는 강수 현상이 동반될 때 수적의 증발이나 빙정이 녹으면서 잠열을 소모 하기 때문에 주변 온도를 떨어뜨리는 비단열 냉각에 의해 발생한다.(그림 4-15, 우).

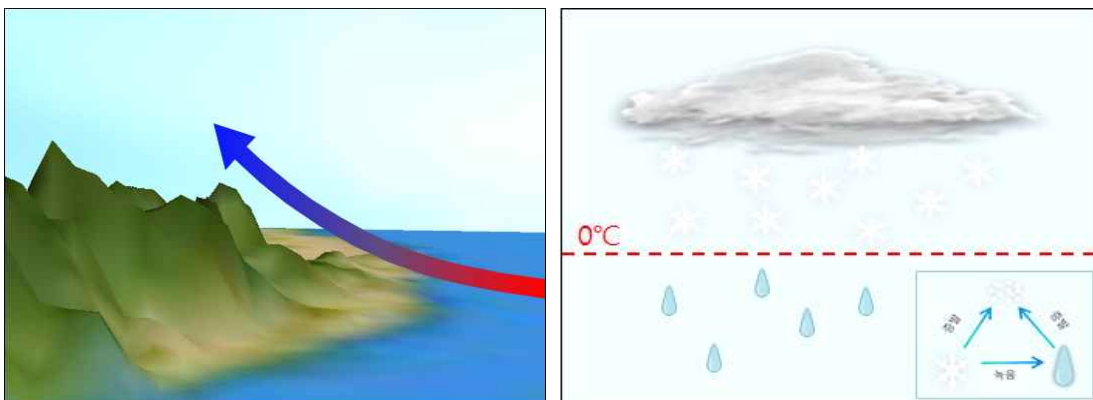


그림 4-15. (좌) 단열 냉각, (우) 비단열 냉각 모식도

영동지방에서 CAD가 발생하는 기본적인 역학은 그림 4-16과 같다.

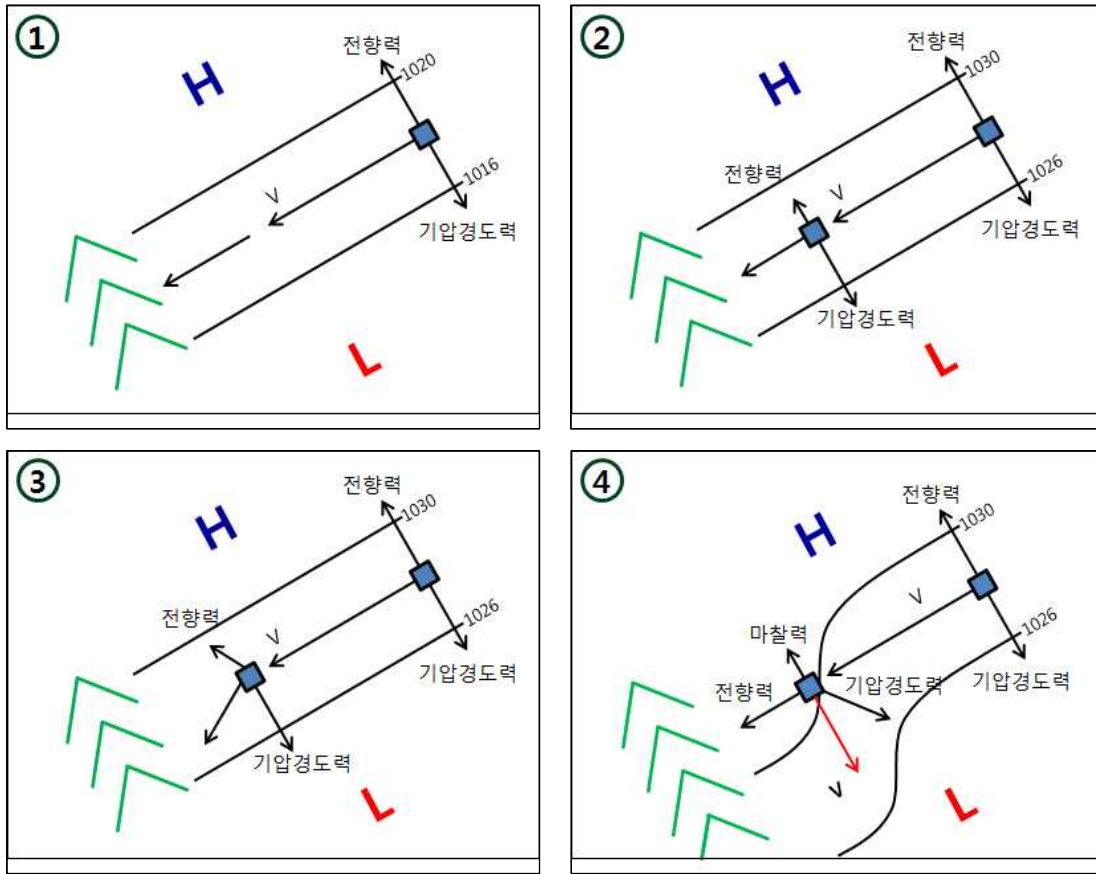


그림 4-16. 태백산맥 동쪽 사면으로 찬 공기가 쌓이는 기본적인 역학

①에서 북동기류가 태백산맥을 향해 불 때 지형에 의한 마찰이 있는 상황에서 프라우드 수(Froude number)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 중규모 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.

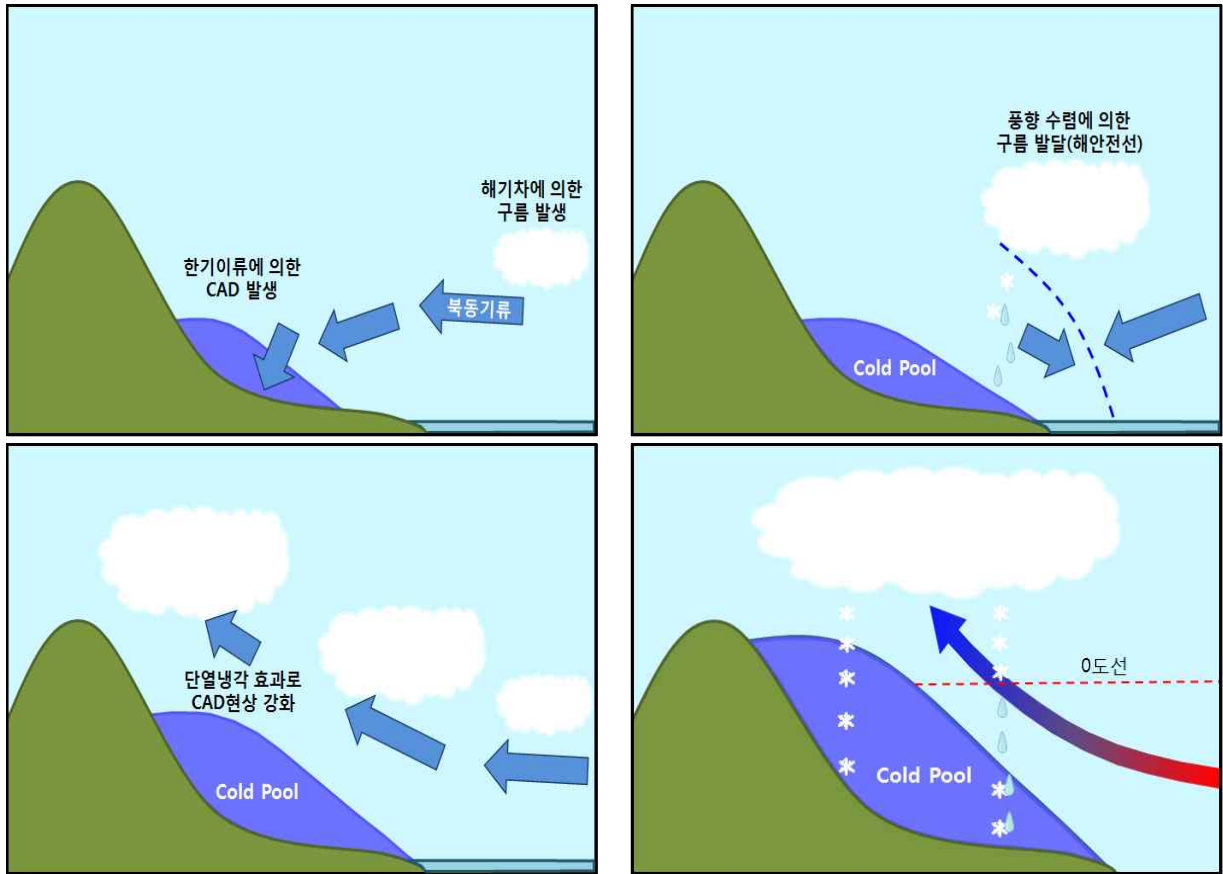


그림 4-17. 태백산맥 동쪽 사면으로 CAD가 발생하면서 강수가 일어나는 과정

그림 4-17은 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 발생하는 과정을 보여준다.

2018년 3월 15일은 저기압이 빠져나가고 후면으로 고기압이 확장하면서 동해안으로 급격하게 한기가 이류 되어 CAD가 뚜렷하게 나타났다. 그림 4-18은 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.

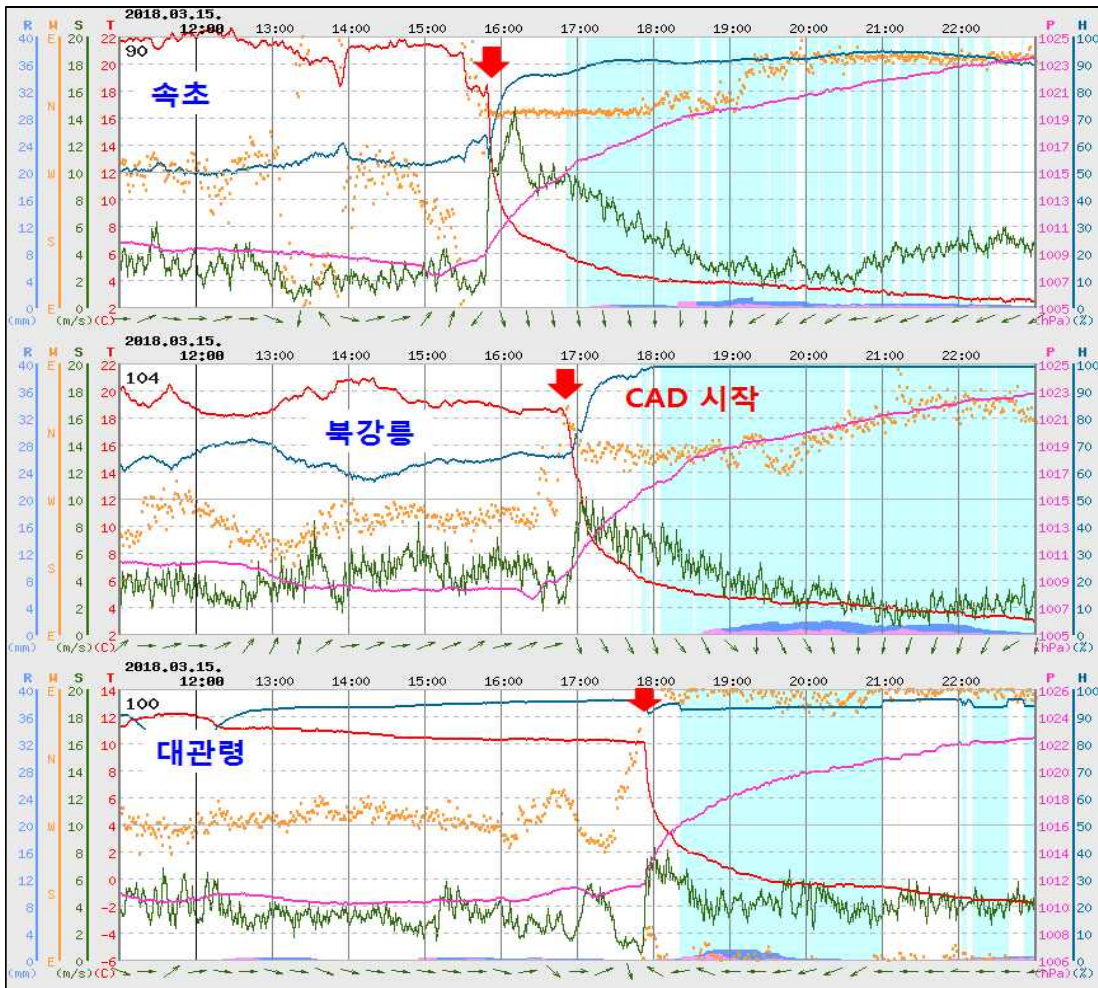


그림 4-18. 속초, 북강릉, 대관령 AWS 시계열

한편 CAD 발생 시 강수 형태 예보에도 주의가 필요하다. 그림 4-19는 3월 16일 1시의 3시간 누적강수량과 시정·현천계에 나타난 일기현상을 나타낸 것이다. 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 형태가 달라지기 때문에 예측이 어렵다【겨울예보 사례분석 4-3】.

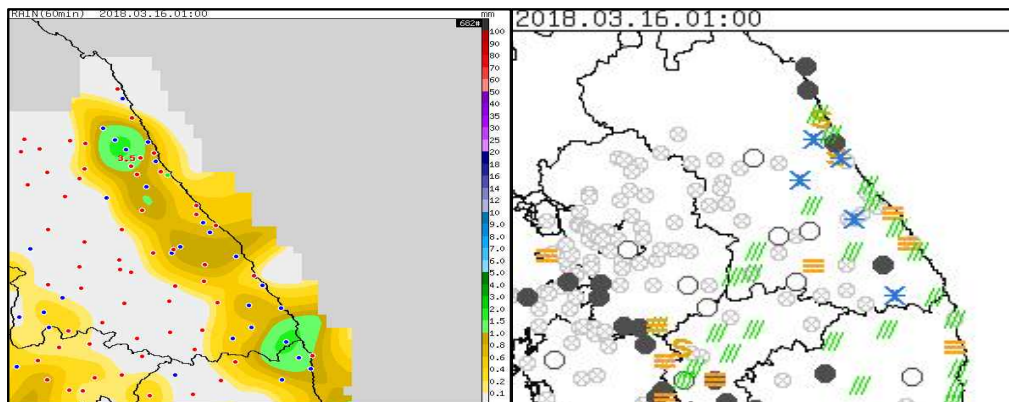


그림 4-19. (좌) 2018년 3월 16일 01시 3시간 누적강수량, (우) 시정·현천계 일기 현상

최근에는 수치모델의 해상도가 증가하면서 CAD 현상에 관한 수치 모의가 개선됐다. 하지만 고해상도 수치모델이라 하더라도 지형 묘사정확도가 떨어지기 때문에 1km 이하의 제한된 층에서 만들어진 찬 공기의 깊이와 강도를 정확히 분석하기는 어렵다. 또한 영동 지방에서 AWS는 주로 해안이나 산을 중심으로 설치되어 있기 때문에 산 사면에서 한기가 축적되는 것을 제대로 관측하기 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 발생 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 강수 유형 분류

4. 5. 1. 극저기압형(‘극저기압형’, ‘중규모저기압 후면 수렴형’)

예보관 핸드북(한상은, 2010)의 대설개념모델은 한대제트축을 기준으로 대설의 유형을 나누었다. 이 중 동해안 강수를 유발하는 유형을 ‘극저기압형’과 ‘동해안형’으로 구분할 수 있다. ‘극저기압형’은 한대제트 축의 북쪽에서 상층 한기에 의해 발생하는 강수 유형이며, ‘동해안형’은 한대제트의 남쪽에서 하층 고기압에 의해 강수가 좌우되는 유형이다. 본 절에서는 두 유형을 상층 한기의 중심 위치와 그에 따른 하층기압계의 형태에 따라 세분화하여 각각의 메커니즘을 살펴보겠다.

‘극저기압형’ 강수는 ‘극저기압형(직접영향)’과 ‘중규모저기압 후면 수렴형(간접영향)’으로 나눌 수 있다. ‘극저기압형’ 강수는 한대제트가 제주도 남쪽까지 남하할 때 발생하는데, 절리저기압이나 깊은골이 중부지방을 통과하면서 동해상에 중규모저기압을 만들어 낸다. 이때 상층골과 하층 중규모저기압이 수직으로 연결되면서 500hPa 와도 스트릭(streak) 내부에서 발달한 중규모저기압의 영향을 직접적으로 받는 유형을 ‘극저기압형(직접영향)’이라고 한다. 그리고 상층기압골의 지원을 받아 동해 먼바다에서 중규모저기압이 발달해 그 후면으로 저기압성 수렴선이 동해안을 통과하며 영향을 주는 형태를 ‘중규모저기압 후면 수렴형(간접영향)’이라고 한다.

그림 4-20(좌)는 ‘극저기압형(직접영향)’의 모식도이다. 중·상층 대기의 매우 차가운 공기와 따뜻한 해수의 큰 온도차는 연직불안정을 유발한다. 상·하층의 큰 온도차는 대설을 유발하는 가장 큰 원인이다.(한상은, 2010). 그림 4-20(우)는 ‘중규모저기압 후면 수렴형’의 모식도이다. 한대제트가 남하할 때, 제트의 북쪽에 성층권으로부터 하강한 절리 된 공기를 동반한다. 잠재소용돌이도가 큰 공기가 산둥반도에서 중부 이남을 거쳐 동해상으로 침강하면서 하층의 저기압성 회전을 강화시키고 동해상에 중규모저기압을 발달시킨다. 이 저기압 후면으로 북서와 북동풍이 수렴하면서 영동지역에 영향을 준다.

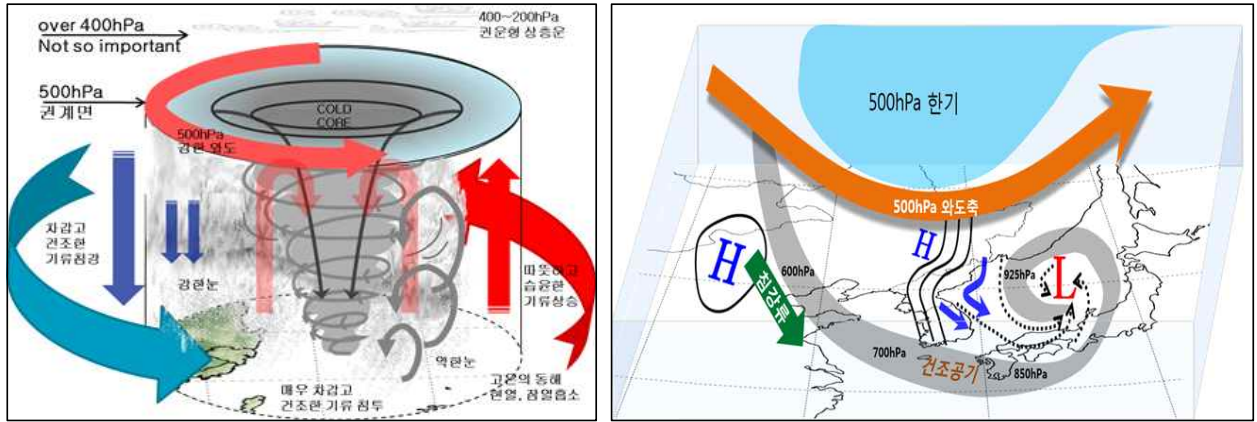


그림 4-20. 동해안 강수의 첫 번째 유형 (좌) ‘극저기압형(직접)’, (우) ‘중규모저기압 후면 수렴형(간접)’

‘극저기압형(직접영향)’과 ‘중규모저기압 후면 수렴형(간접영향)’은 중규모저기압의 발달 위치와 그 영향을 받는 정도에 따라 구분되기 때문에 강수 발달 메커니즘에서는 큰 차이가 없다.

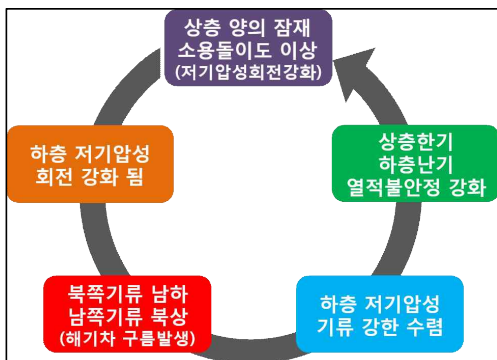


그림 4-21. ‘극저기압형’ 강수의 발달 과정

그림 4-21은 ‘극저기압형’의 발달 메커니즘이다. 상층 양의 잠재 소용돌이도 이상(anomaly)은 하층의 저기압성 회전을 유도한다. 이 저기압성 흐름은 중국 북동지역의 한기를 남하시키고 남쪽의 난기를 북상시킨다. 대륙의 한기가 남하하며 동해상을 통과할 때 해기차와 하층 저기압성 기류의 수렴으로 구름이 발달한다. 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 4-22의 2017년 1월 20일 북강릉처럼 성층권 공기가 침강한 고도 바로 아래(역학적 대류권계면)까지 포화단열적으로 발달한다. 또한, 강한 대류성 강수가 발달하기 때문에 동해안 강수 중 유일하게 뇌전을 동반하기도 한다.

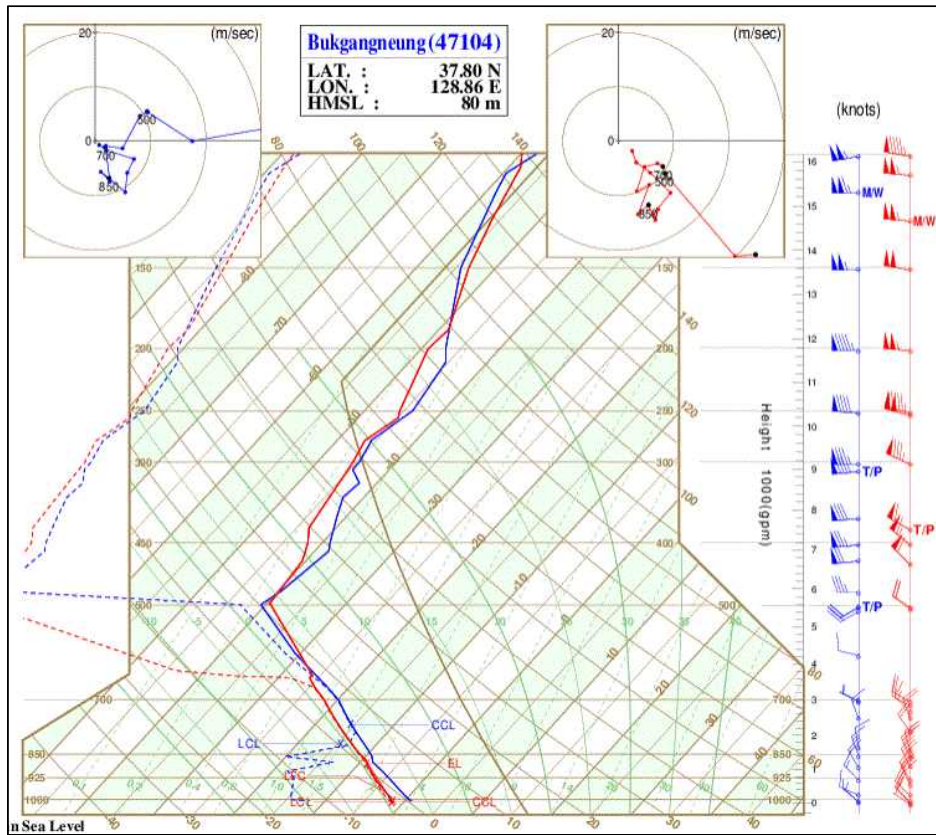


그림 4-22. 북강릉 단열선도 (2017년 1월 20일 09시(파란색), 15시(빨간색))

대기 구조가 포화단열선을 따르기 때문에 습구온도 1.2°C 이하와 습구빙결고도가 200m 이하일 때 적설이 나타난다. 강수 강도가 1mm/h 이상으로 강할 때는 상층의 차가운 공기를 비단열적으로 하강시키므로 하층 기온이 영상이더라도 기온이 급격히 하락해 눈으로 쌓일 수 있으므로 주의해야 한다.

강수량은 열적불안정도와 저기압이 얼마나 직접적으로 영향을 주는가에 따라 결정된다. 1000-500hPa 온도차와 700hPa 해기차가 클수록 대류 강도가 강화되고 강수량이 증가한다(그림 4-23). 그러나 저기압의 영향을 받는 시간에 따라 강수량이 달라질 수 있기 때문에, 각 관측지점에서 받는 저기압의 영향을 고려해야 한다.

그림 4-24를 보면 ‘극저기압형’에 의한 바람은 1000~700hPa까지 고도별 풍향 시어가 크지 않고, 500hPa의 한기 중심역을 동반하므로 중층에서는 바람이 약하다. 반면 하층에서는 수평 온도차로 925~850hPa 사이에서 강한 풍속이 나타난다. 또한 바람과 강수량의 관계를 살펴보면 하층 풍속이 강할수록 강수량이 많은 경향을 보이며, 500hPa까지 저기압성 회전을 보인다. 따라서 강수계가 영향을 줄 때는 주로 북동기류 보다 북서풍이 나타남을 확인할 수 있다. 만일 하층에서 북동풍이 나타난다면 수렴선이 내륙 깊숙이 들어왔다는 것을 의미하므로 영동뿐만 아니라 영서까지 강수를 고려해야 한다.

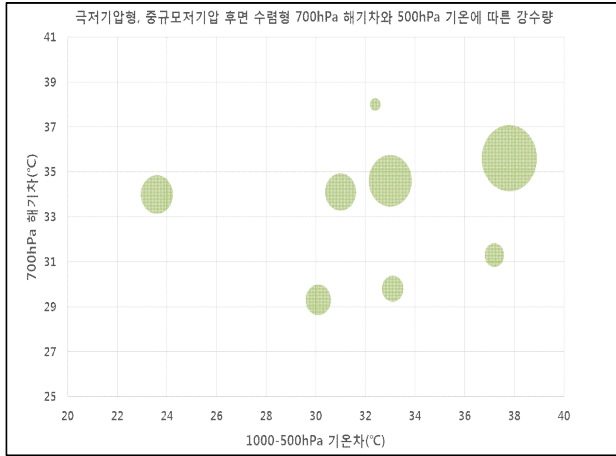


그림 4-23. '극저기압형'에 의한 강수량(동심원 크기)과 1000-500hPa 기온차, 700hPa 해기차

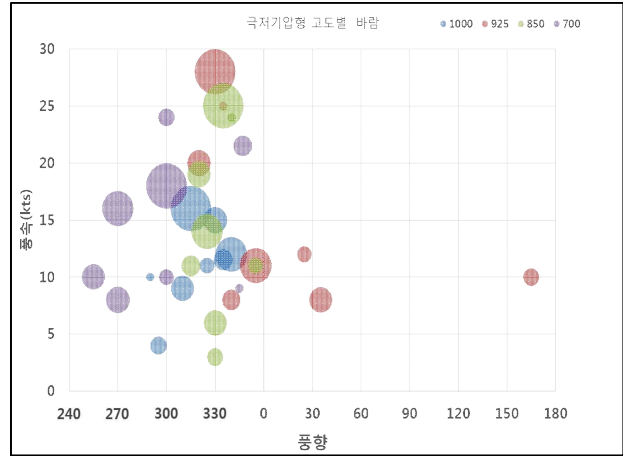


그림 4-24. '극저기압형'에 의한 강수량(동심원 크기)과 북강릉지점 고도별 바람

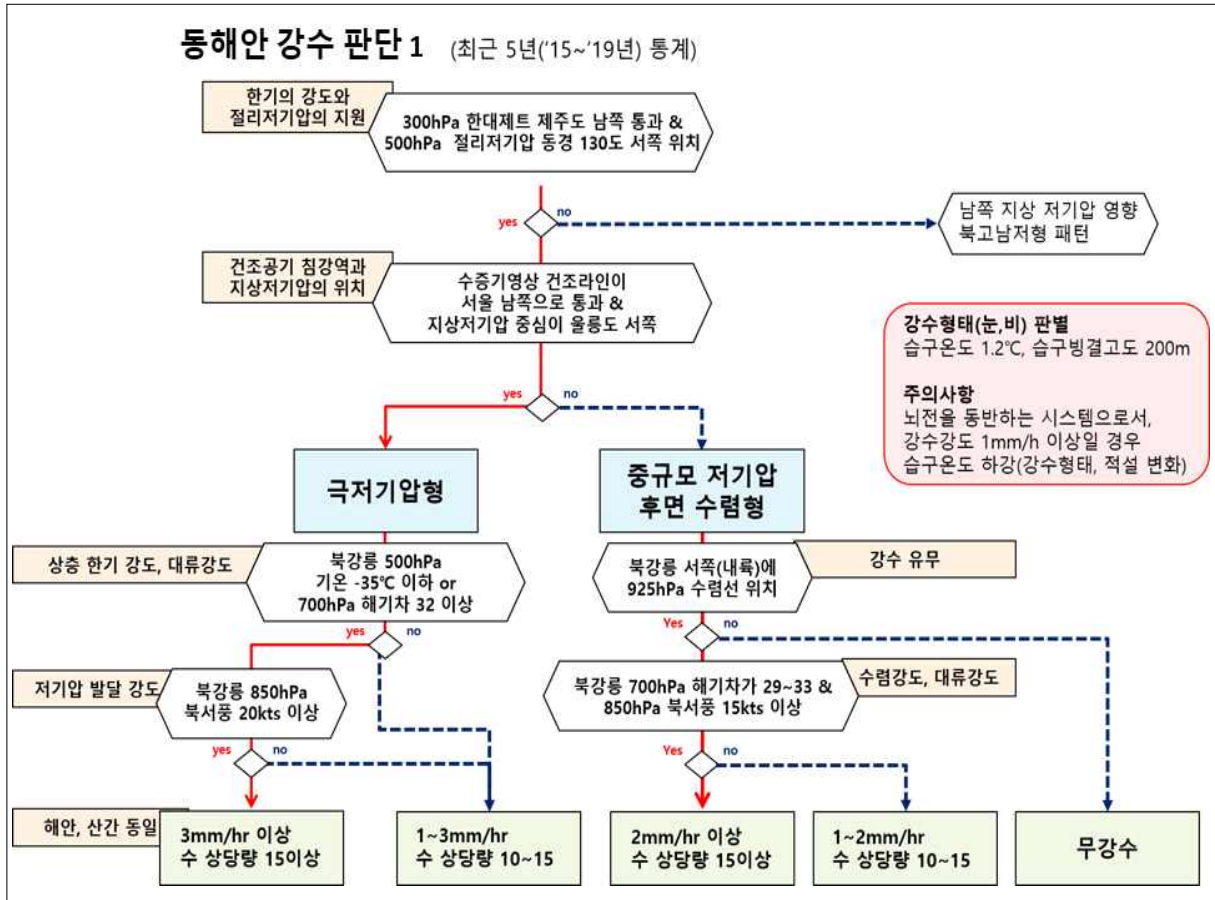


그림 4-25. '극저기압형(직접영향)', '중규모저기압 후면 수렴형(간접영향)' 강설 판단 흐름도

4. 5. 2. 북고남저형(‘cP확장+남쪽저기압형’, ‘남쪽저기압형’)

‘극저기압형’과 함께 동해안 강수를 유발하는 ‘동해안형’은 남쪽 지상 저기압의 영향을 받는 ‘북고남저형’과 동해북부해상에 분리된 고기압의 영향을 받는 ‘단순 고기압 확장형’으로 구분할 수 있다.

‘북고남저형’은 말 그대로 북고남저형 기압배치에서 나타나는 패턴으로, 대륙고기압(cP)이 확장하는 가운데 남쪽저기압이 통과하는 유형과, 북쪽에 고압부가 위치하는 상황에서 남쪽저기압이 발달해 통과하는 유형으로 나눌 수 있다(그림 4-26).

‘cP확장+남쪽저기압형’은 상층 한기핵이 홋카이도 쪽에 위치하고 후면의 침강류에 의해 중국북동부에 하층 고압부가 발달한 상황에서 발생한다. 이때 규슈지방으로 저기압이 통과하면 우리나라는 북고남저형 또는 북서고남동저형의 기압배치를 이루게 되고, 북동류에 의해 한기이류가 강화된다. ‘남쪽저기압형’은 이미 고압부가 북한 지역과 동해안으로 위치한 상황에서 발생한다. 이때 상해 동쪽 해상에서 저기압이 발달해 동진할 때 저기압의 북동쪽으로 기압경도력이 강화되면서 강원영동과 경북 북부 지역으로 동풍이 불게 되어 강수가 내리는 유형이다.

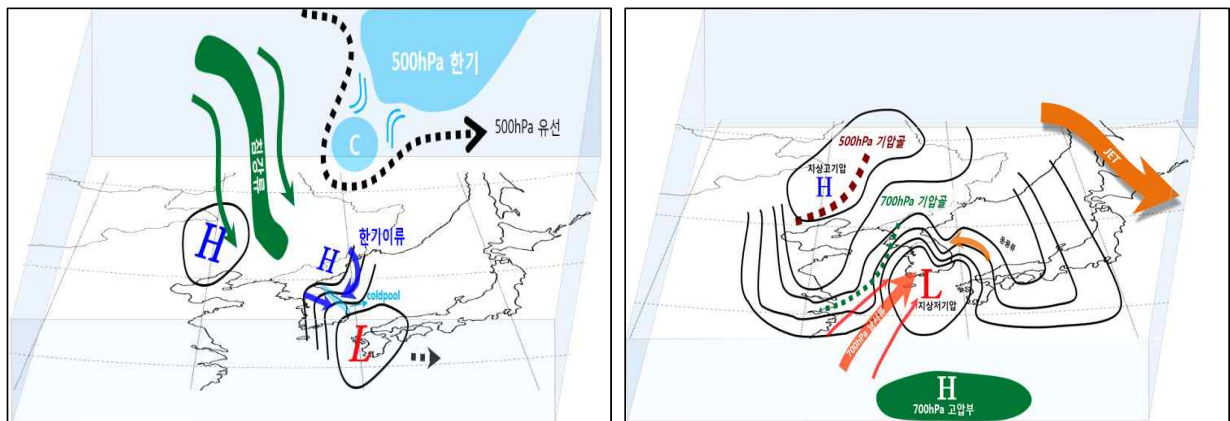


그림 4-26. (좌) ‘cP확장+남쪽저기압형’, (우) ‘남쪽저기압형’

두 유형은 그림 4-27과 같이 하층 한기이류의 강도와 태백산맥에 수직으로 부는 바람에 따라 구분할 수 있다. 참고로 850hPa 해기차를 계산하기 위해 북강릉 지점 고층관측의 850hPa 기온과, 비교적 해안가의 영향이 적고 한기의 동해상 통과를 관측할 수 있는 동해부이 해수온도를 사용하였다.

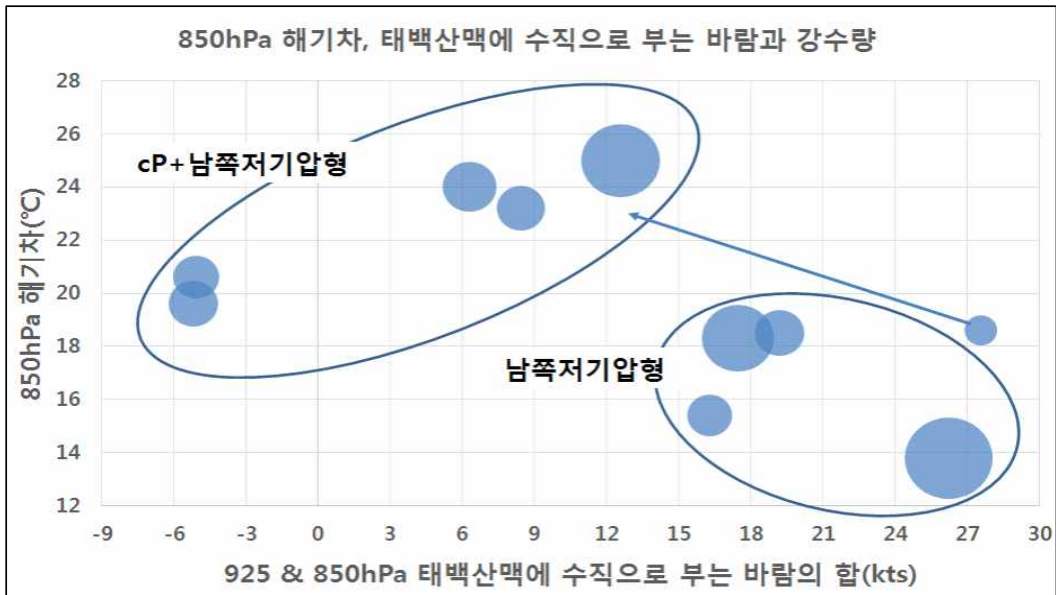


그림 4-27. 850hPa 해기차와 태백산맥(330도 방향)에 수직으로 부는 두 고도(925hPa, 850hPa) 바람의 합과 강수량(동심원의 크기)

‘cP확장+남쪽저기압형’은 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 850hPa 해기차는 25°C로 가장 크게 나타났다.

또한 ‘cP확장+남쪽저기압형’의 강수구역은 산지보다 해안에 집중되어 해안형(이재규, 1999)에 가깝다. 그림 4-28에서 ‘cP확장+남쪽저기압형’에 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 약해 기류가 산맥을 타고 상승하지 못하기 때문이다. 한기가 이루어지는 과정에서 한기가 해상을 지날 때 풍속은 강하나 육지에 도달하게 되면 마찰 등의 영향으로 풍속과 풍향이 변한다. 북강릉 지점의 바람 관측 자료를 보면(그림 4-30, 4-34 좌 ‘cP+남쪽저기압’ 기본형), 850hPa 이하 하층에서 대체로 풍속이 강하지 않고 1000hPa의 풍향은 동풍류가 아닌 북서~북풍으로 나타난다. 또한, 남쪽 저기압의 북서쪽으로 골이 한반도로 놓인 상황(그림 4-32)에서 태백산맥으로 불어 들어 오는 동풍류는 국지풍, 마찰풍 등을 포함한 서풍류와 해안에서 수렴한다. 따라서 ‘cP확장+남쪽저기압형’은 수렴역이 주로 해안에 위치하고 있어 북강릉 지점에서는 상승운동이 활발하기 때문에 하층 바람은 강하지 않게 나타난다【겨울예보 사례분석 4-4】. 다만 그림 4-34 오른쪽 ‘cP확장+남쪽저기압’ 변형의 모식도처럼 북쪽 고기압이 확장하면서 동풍이 남하할 때 북쪽골을 다시 통과하면서 수렴대 발달을 지원하면 해안뿐 아니라 산간까지 강수량이 늘어날 수 있다.

‘남쪽저기압형’의 강수량은 해기차보다 저기압의 발달이나 저기압 중심과의 거리에 따른 바람의 강도와 지형의 영향을 많이 받는다. 그림 4-27에서 ‘남쪽저기압형’의 850hPa 해기차는 19°C 이하로 ‘cP+남쪽저기압형’에 비해 작지만 1.5km 고도 이하에서 태백산맥에 수직으로 부는 바람의 합은 오히려 더 크게 나타났다. 북강릉 지점의 고층바람자료를 비교해보면(그림 4-30, 그림 4-31), ‘남쪽저기압형’은 ‘cP+남쪽저기압형’에 비해 1.5km 이하 고도에서 풍속이 15kts 이상으로 강하고, 동풍 성분이 강하다. 또한 700hPa에서는 남서풍의 영향을 받음을 알 수 있다.

2018년 3월 8일의 6시 지상일기도를 보면(그림 4-33), 한반도 북쪽에 고기압(한기)이 위치한 상황에서 비교적 따뜻한 저기압이 남쪽으로 통과하고 있다. 그림 4-35은 ‘남쪽저기압형’의 열역학선도 모식도이다. 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 공기 위로 상승하기 쉬워 강수량이 늘어날 수 있고 강수 형태도 눈으로 바뀌기 쉽다【겨울예보 사례분석 4-2】. 따라서 이 사례에서는 그림 4-29에서 보는 것처럼 북강릉과 대관령의 강수량에 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 습구온도와 925hPa 기온을 고려하여 적설을 예보해야 한다.

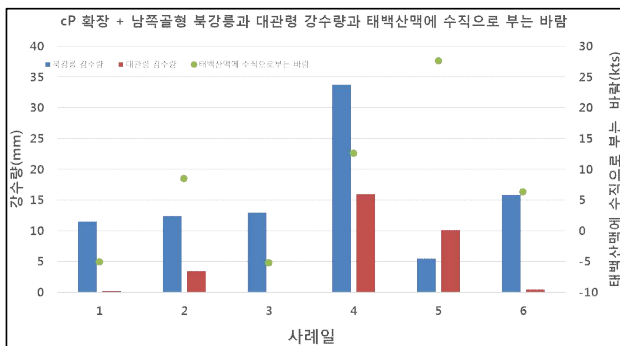


그림 4-28. ‘cP확장+남쪽저기압형’의 북강릉(파란색), 대관령(빨간색)의 강수량과 태백산맥에 수직으로 부는 바람의 합

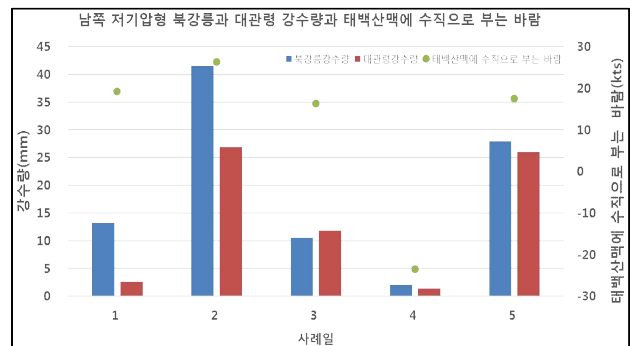


그림 4-29. ‘남쪽저기압형’의 북강릉(파란색), 대관령(빨간색)의 강수량과 태백산맥에 수직으로 부는 바람의 합

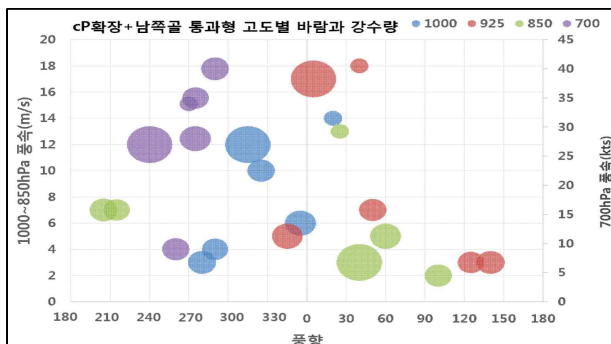


그림 4-30. ‘cP+남쪽저기압형’의 고도별 바람과 강수량(동심원의 크기)

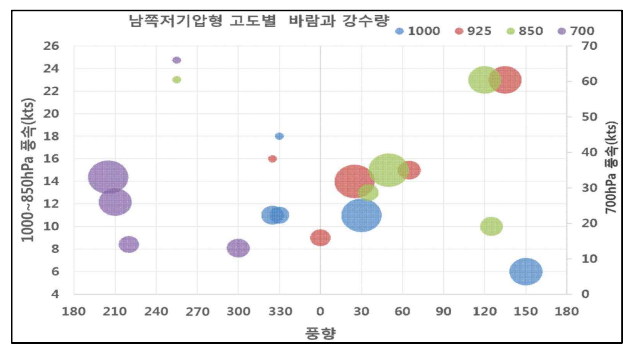


그림 4-31. ‘남쪽저기압형’의 고도별 바람과 강수량(동심원의 크기)

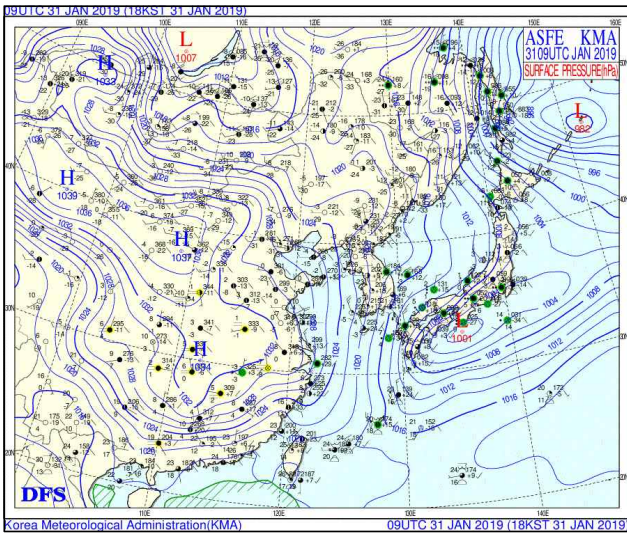


그림 4-32. 2019년 1월 31일 18시
지상일기도(‘cP확장+남쪽저기압형’)

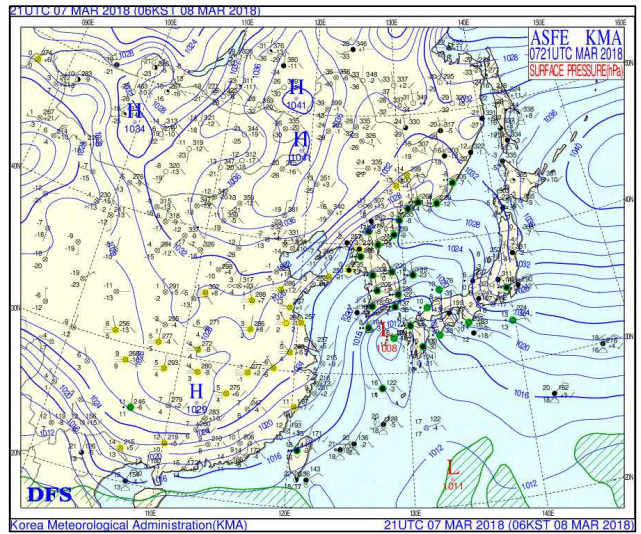


그림 4-33. 2018년 3월 8일 06시
지상일기도(‘남쪽저기압형’)

cP+남쪽골 기본형

cP+남쪽골 변형(북쪽골 지원)

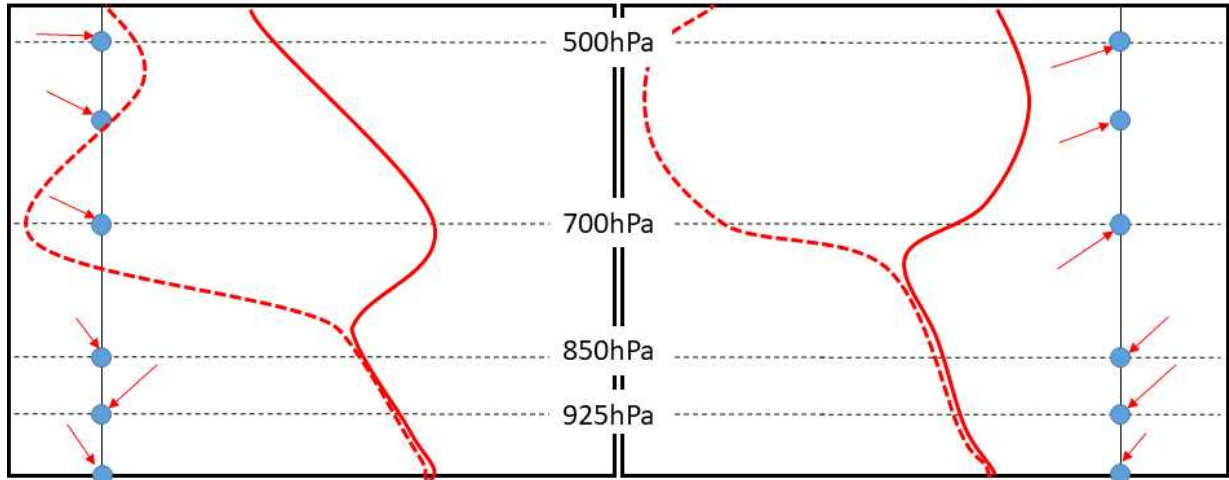


그림 4-34. ‘cP확장+남쪽저기압형’ 열역학선도 모식도 기본형(좌) 북쪽골이 동반되는 유형(우)

남쪽저기압형

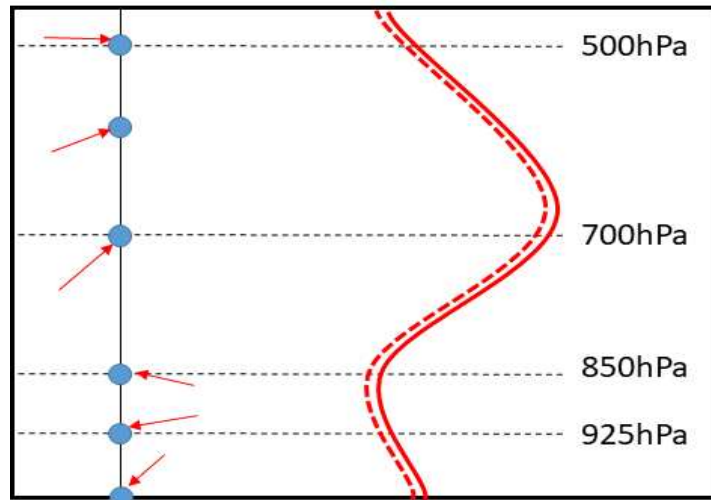


그림 4-35. ‘남쪽저기압형’ 열역학선도 모식도

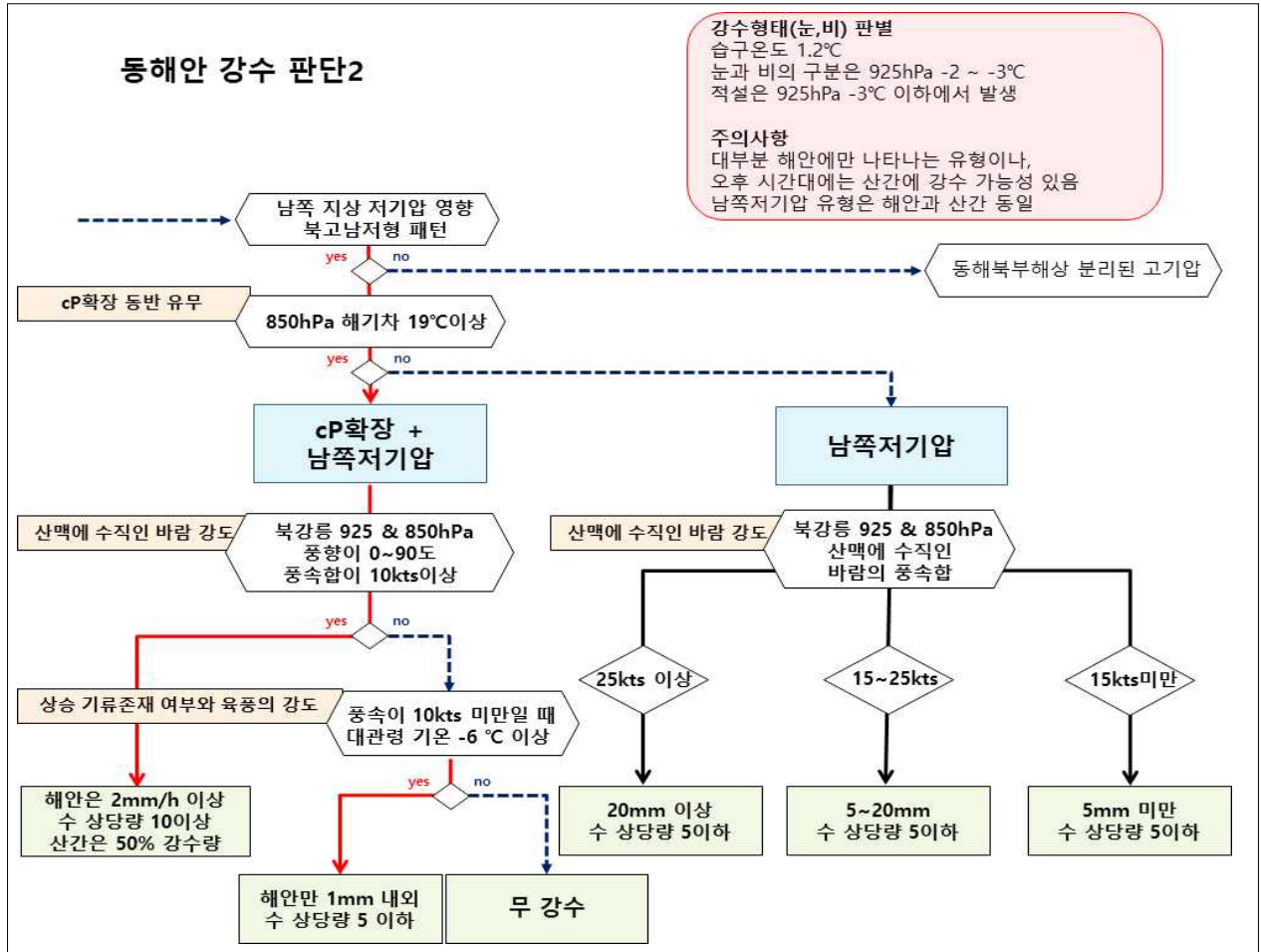


그림 4-36. 'cP확장+남쪽저기압형', '남쪽저기압형' 강설 판단 흐름도

4. 5. 3. 단순 고기압 확장형('cP확장형')

'단순 고기압 확장형'은 남쪽으로 통과하는 저기압의 영향을 받지 않을 때 북쪽에서 대륙고기압 확장에 의해 동풍 기류가 유입되어 강수가 내리는 유형이다.

이 유형은 남쪽 저기압이 그림 4-37의 모식도처럼 일본 동쪽으로 멀리 위치하거나 그림 4-40의 일기도처럼 동중국해 해상에 약한 골 형태로 위치한다. 따라서 남쪽 골의 영향은 거의 받지 않으며 중국 북동쪽에서 확장하는 대륙고기압의 영향을 받는다. 그리고 925hPa과 850hPa에서 북동풍이 주로 분다(그림 4-38).

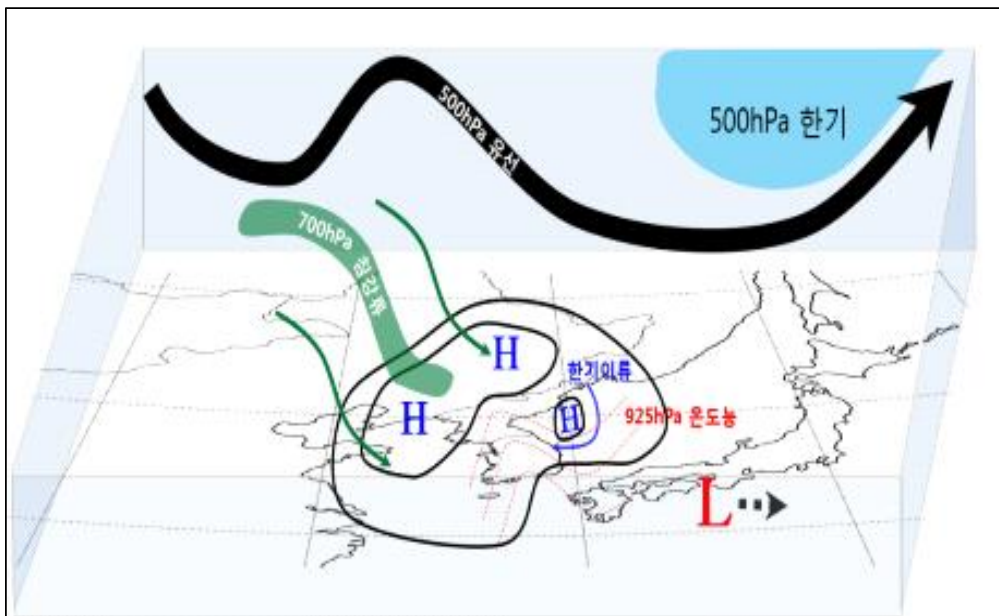


그림 4-37. 'cP확장형'의 모식도

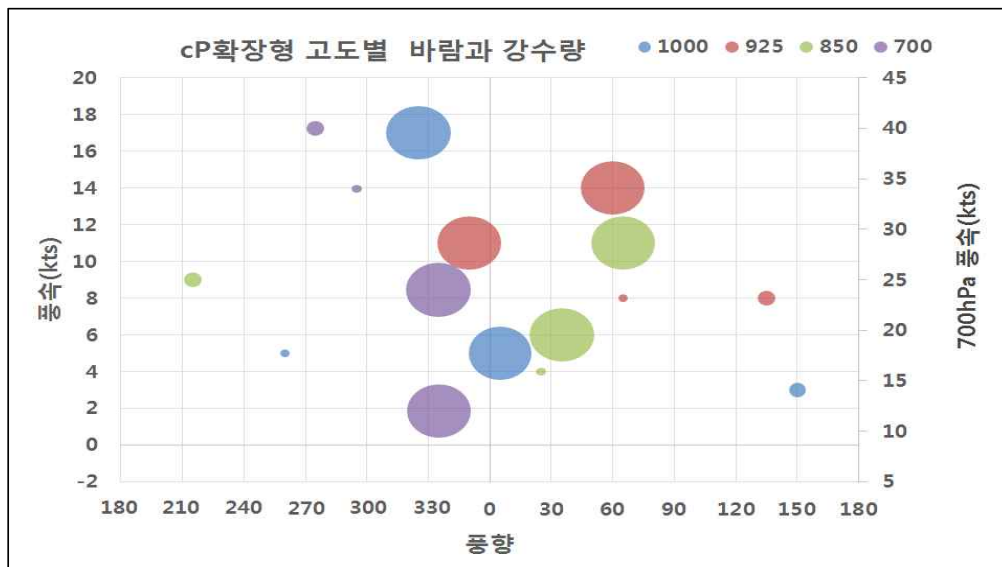


그림 4-38. 'cP확장형' 사례의 고도별 바람과 강수량(동심원 크기)

‘cP확장형’의 강수량은 해기차와 동해안으로 유입되는 하층 북동풍의 강도에 따라 달라진다. 참고로, 북강릉 고층관측자료의 바람은 강수 시 상승운동에 의해 약화되기 때문에, 동해안으로 유입되는 하층 북동풍(북동기류의 종관풍)의 강도는 동해부이에서 관측한 태백산맥에 수직으로 부는 바람을 사용하였다. 그림 4-39를 보면, 강수를 기록한 경우 850hPa 해기차는 19°C 이상으로 충분히 컸지만 강수량이 해기차와 비례하여 증가하지 않았다. 오히려 동해안으로 유입되는 종관풍의 강도가 강할수록 강수량이 증가했다. ‘단순 고기압 확장형’의 강수량은 앞선 두 유형에 비해 많지 않고 주로 해안형으로 나타난다. 그림 4-42는 ‘cP확장형’의 기본형과 북쪽골이 동반될 때 나타나는 유형의 열역학선도 모식도이다. 모식도에서도 볼 수 있듯이 한반도의 북쪽은 주로 침강류의 지배를 받으면서 북동기류가 분다. 하지만 이때 빠른 속도로 북쪽골이 통과하면서 하층을 지원할 때 850hPa의 역전층이 약화된다. 그리고 북동기류가 지형효과와 결합되면서 많은 강수량을 기록하기도 한다.

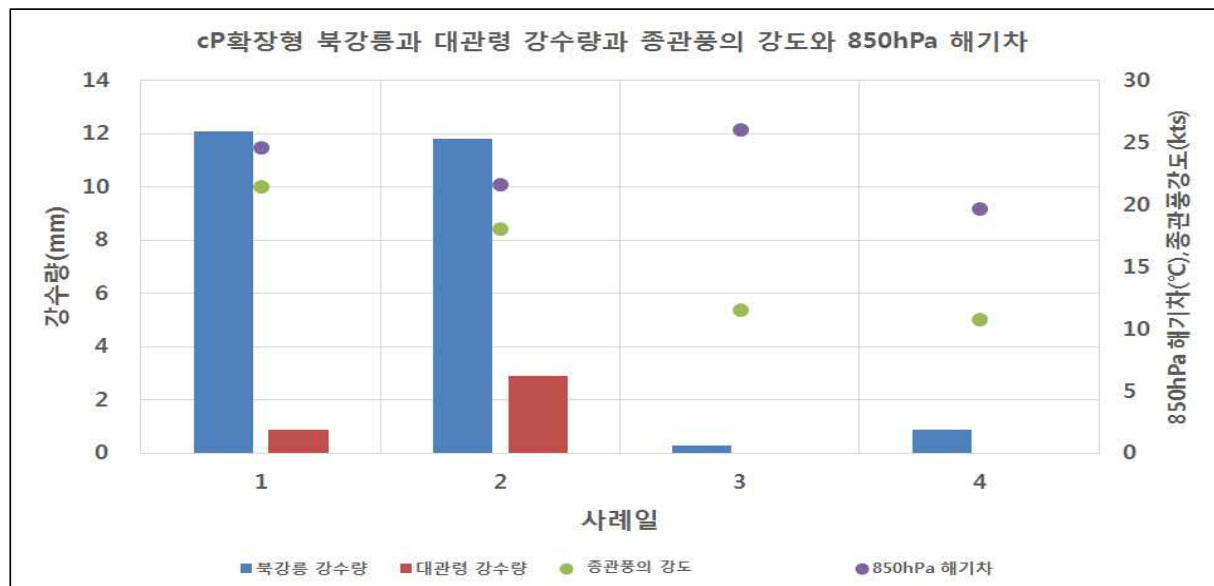
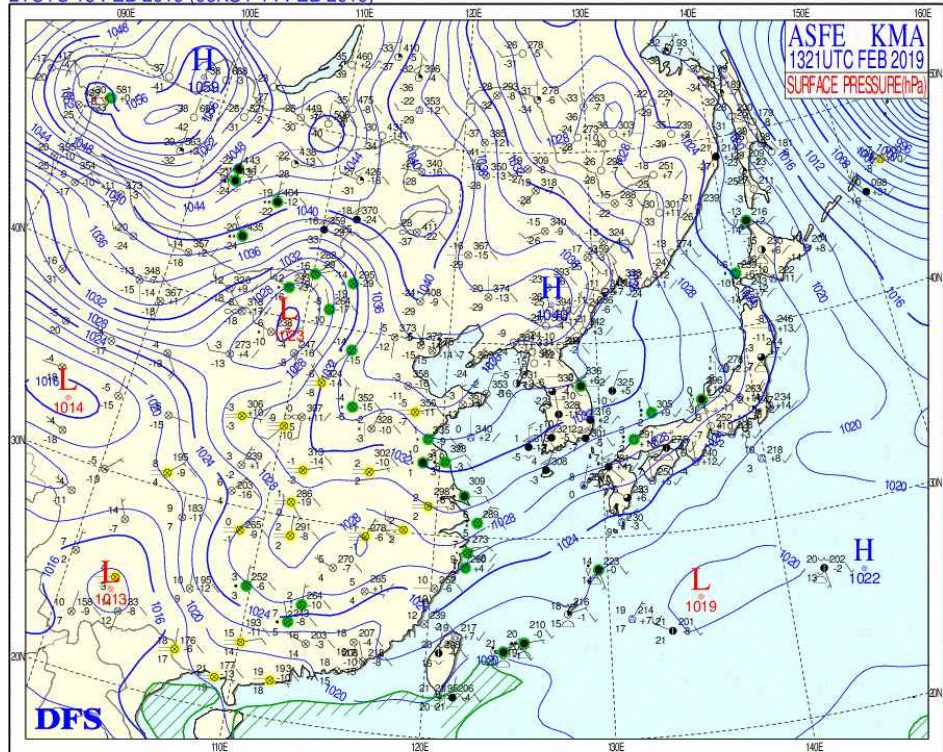


그림 4-39. ‘cP확장형’에 의해 북강릉과 대관령 지점에서 관측된 강수량과 850hPa 해기차, 동해상에서 유입되는 북동기류 종관풍 강도

특히 ‘cP확장형’은 국지풍의 영향을 많이 받기 때문에 강수 시각이 육풍이 강화되는 새벽인지, 약화되는 밤인지에 따라 강수량이 달라질 수 있다. 2019년 2월 14일(그림 4-40, 【겨울예보 사례분석 4-5】)의 경우, 내륙의 기온이 많이 하강하는 새벽 시간에 북동기류가 유입되었다. 그러나 그림 4-41의 연직 단면에서처럼 육풍이 강하게 유지되면서 최하층에 서풍기류가 불어 수렴역이 해상에서 발생하였다. 따라서 강한 강수대가 북강릉으로 유입되지 않아 예상보다 강수량이 적었다. 낮이 되면서 육풍이 약화 되자 동풍이 유입되어 풍상측 산지에 약하게 눈이 내렸다. 만일 이 사례에서 동풍이 더 약하거나 서풍이 더 강할 경우 강수가 아예 없었을 수도 있다. 육풍의 강도에 따라 강수가 오지 않은 사례에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

21UTC 13 FEB 2019 (06KST 14 FEB 2019)



Korea Meteorological Administration(KMA)

21UTC 13 FEB 2019 (06KST 14 FEB 2019)

그림 4-40. 2019년 2월 14일 06시 지상일기도

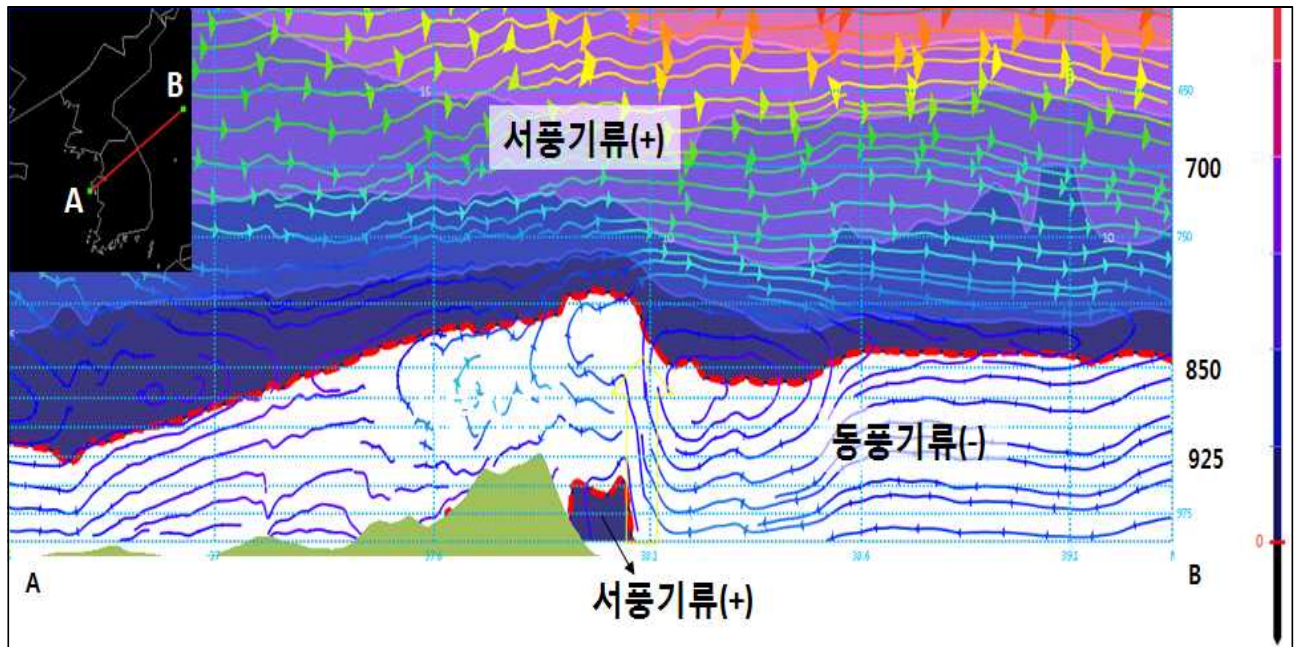


그림 4-41. 2019년 2월 19일 09시 동서/남북 바람 연직흐름도 분석장 (흰 영역: 동풍기류, 채색된 영역: 서풍기류)

단순고기압 기본형

단순고기압 변형(북쪽골 동반)

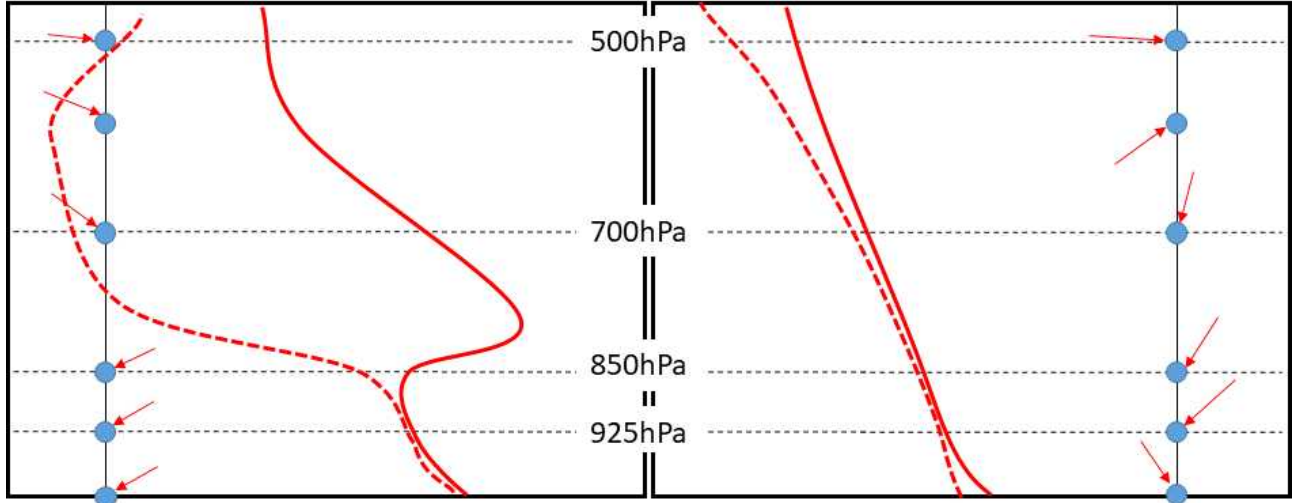


그림 4-42. 'cP확장형'의 열역학선도 모식도 기본형(좌, 2020년 1월 24일), 변형(우, 2019년 11월 3일)

동해안 강수 판단 3

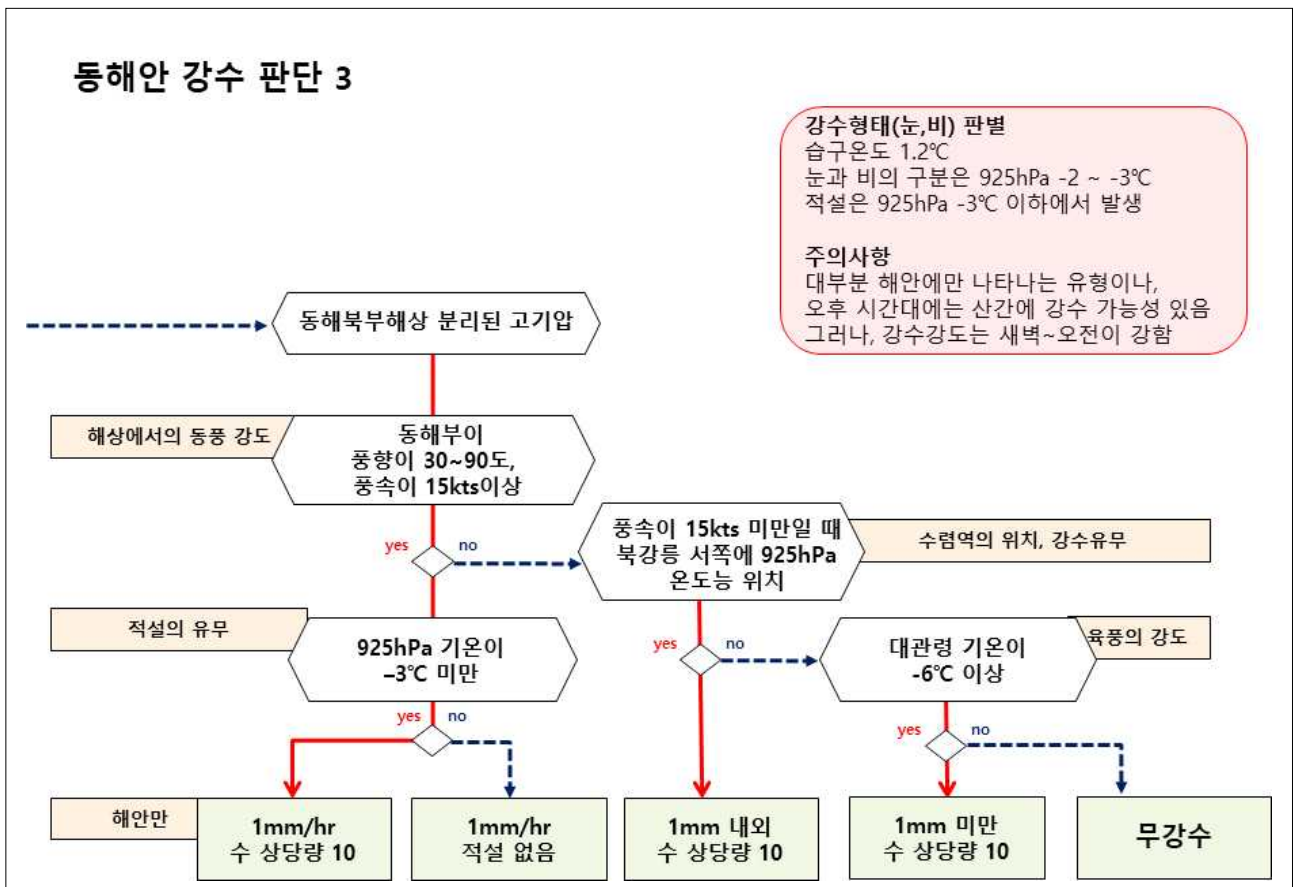


그림 4-43. 'cP확장형' 강설 판단 흐름도

| 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 Money Penny, 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

| 《Why?How!》 제4권 ‘겨울예보 사례분석’ 가이드스 중 ‘4. 동해안형 강수’ 연계 내용

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

겨울 예보

5. 중층기압골에 위한 강수



5. 중층기압골에 의한 강수

Why?

겨울철 우리나라는 키 작은 대륙고기압의 영향으로 하층대기는 차고 건조한 기단의 영향을 주로 받는다. 따라서 남쪽저기압의 영향을 받지 못하는 경우가 많다. 그러나 하층대기 위로 중층 또는 상층기압골에 의해 형성된 구름에서 강수가 내리는 경우가 있는데 모델에서는 잘 반영되지 않는 경우가 많다. 이에 대한 가이드언스를 제공하고자 한다.

5. 1. 겨울철 중층기압골 강수란?

5. 1. 1. 중층기압골의 정의와 특징

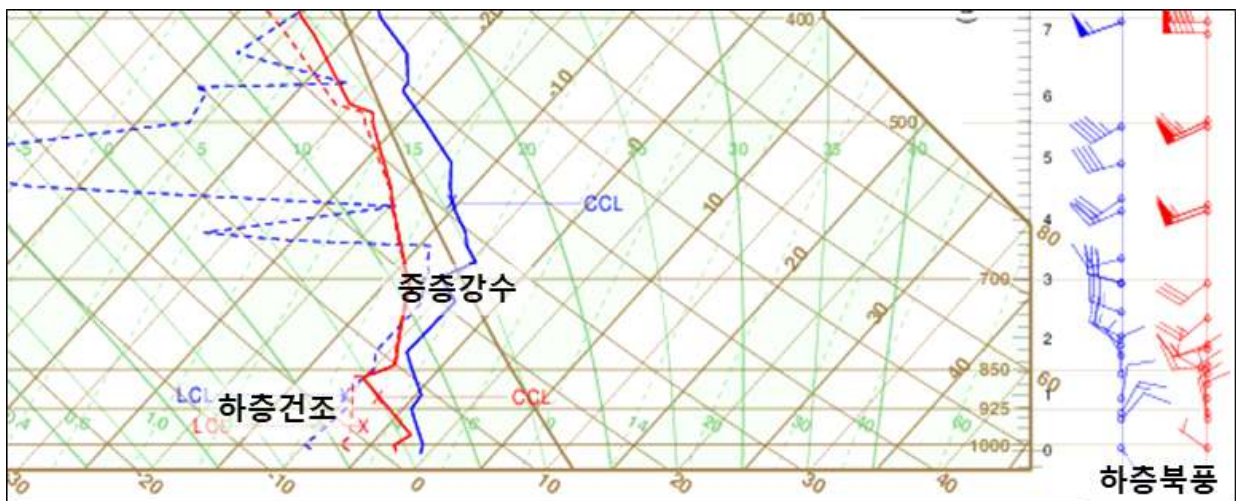


그림 5-1. 2019년 12월 26일 09시 오산 단열선도(중층강수 사례)

일반적으로 기압골에 의한 강수는 지상 또는 하층 대기에서부터 발달한다. 이 구름대의 운고는 작게는 3km, 높게는 12km 이상으로 발달하여 많은 강수를 내리기도 한다. 그러나 하층부에 저기압과 같은 뚜렷한 시스템이 존재하지 않지만, 중층에서 상층까지 3km 이상 발달한 구름에 의해 강수가 내리는 경우가 있는데 이를 중층기압골 강수라 한다. 다시 말하면 중층기압골 강수는 하층 시스템과 중상층 시스템이 분리되거나 약하게 연계된 경우를 말한다.

대기를 연직적으로 보면 가장 많은 수증기가 위치하는 고도는 지표에서 850hPa 사이이다. 따라서 하층에 기반을 두고 있지 않은 중층기압골에 의한 강수는 강수 효율이 매우 떨어지기 때문에 일반적으로 5mm 미만의 적은 강수량이 기록된다.

5. 1. 2. 겨울에 주로 발생하는 이유는?

중층기압골에 의한 강수는 사계절 내내 발생하지만, 특히 겨울철에 가장 빈번하게 발생한다. 그 이유는 크게 세 가지로 설명할 수 있다.

첫 번째는 대기의 상하층 분리가 잘 나타나기 때문이다. 겨울에는 시베리아고기압이 잘 발달하는데, 시베리아고기압의 경우 대륙의 냉각으로 발생하는 키 작은 고기압이므로 이 기단의 영향을 받을 때는 주로 하층 고도에서만 고기압이 관측된다. 반면에 상층에서는 한대 제트가 주기적으로 남하하면서 중상층 기압골을 만들어 내고 우리나라 방향으로 남하하는 경우가 빈번히 발생한다. 이럴 때 중상층은 기압골의 영향, 대기 하층은 고기압의 영향을 받게 된다.

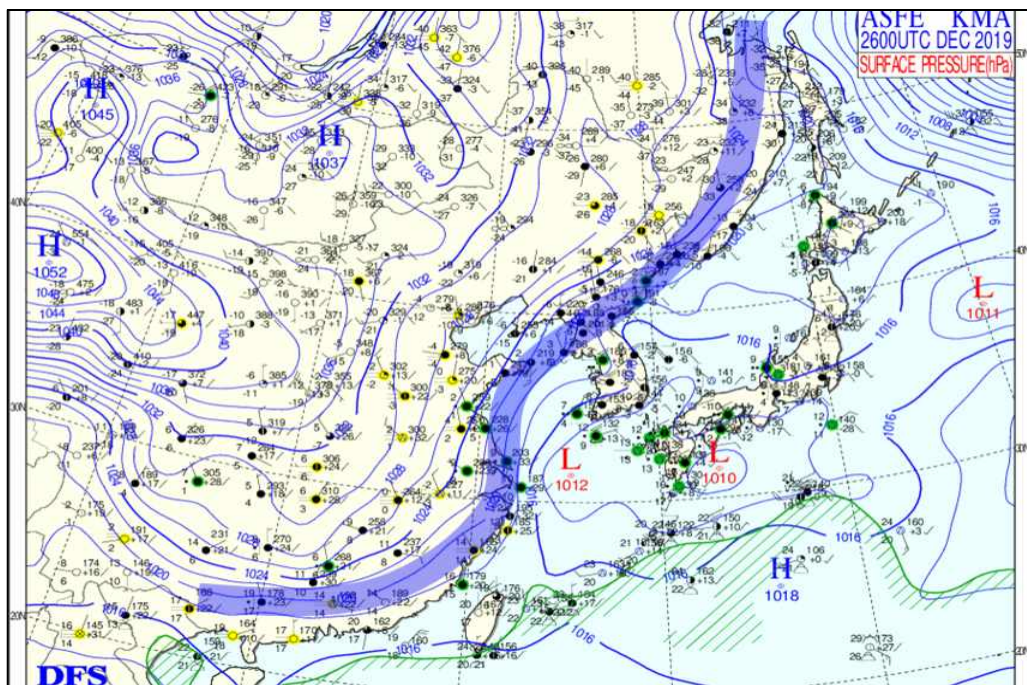


그림 5-2. 2019년 12월 26일 09시 3시간 지상일기도와 대륙고기압의 경계(파란색 선)

그림 5-2는 겨울철에 흔히 볼 수 있는 지상일기도이다. 중국 대륙을 중심으로 시베리아고기압이 확장한 것을 볼 수 있으며, 1020hPa 선 주변으로 기단의 경계가 나타나고 있다. 우리나라 주변을 보면 남쪽으로 저기압이 형성되어 있는데 이 저기압들은 하층 대기에서는 대륙고기압에 막혀 더 이상 북상하기 어려운 형태를 보인다. 따라서 이러한 구조에서 우리나라는 지상 저기압에 의한 강수의 영향을 받기는 어렵다.

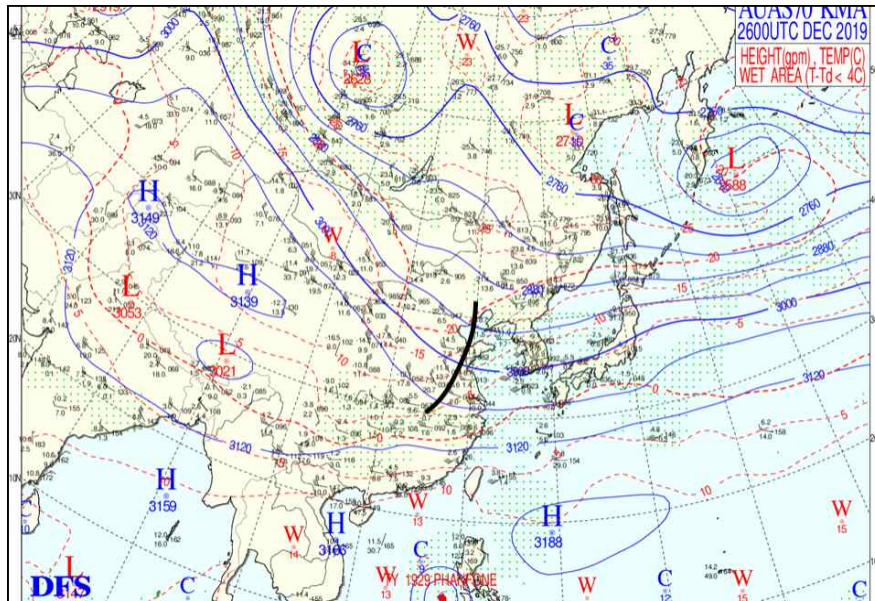


그림 5-3. 2019년 12월 26일 09시 700hPa 일기도와 기압골(검은색)

그림 5-3은 같은 시간 700hPa의 일기도이다. 지상일기도에서는 차고 건조한 공기가 남하하는 반면에 700hPa 일기도에서는 오히려 기압골의 영향으로 따뜻한 공기가 유입되는 패턴을 보여주고 있다. 바이칼호 북서쪽에서부터 내려온 한기가 만든 기압골이 산둥반도 서쪽에 위치하고 있고, 우리나라 쪽으로 향할 것을 알 수 있다.

우리나라 중부지방을 중심으로 본다면 분명 지상 저기압이 영향을 주기에는 다소 먼 거리이다. 하지만 700hPa의 기압골은 중부지방에 영향을 줄 수 있다. 정리해 보면 하층은 대륙고기압, 중상층은 기압골의 영향을 받는 구조가 되었다는 의미이며, 이는 중층 기압골 강수가 나타날 수 있는 조건이다.

두 번째 이유는 대기의 연직 온도구조이다. 상하층이 분리되면서 중층으로만 구름이 생기는 경우는 사계절 모두 잘 발생할 수 있다. 그러나 하층 대기가 얼마나 건조하고, 많은 수증기를 흡수할 수 있는지에 따라서 중층강수의 지면 낙하 여부가 결정되는데, 이러한 측면에서 겨울은 유리하다.

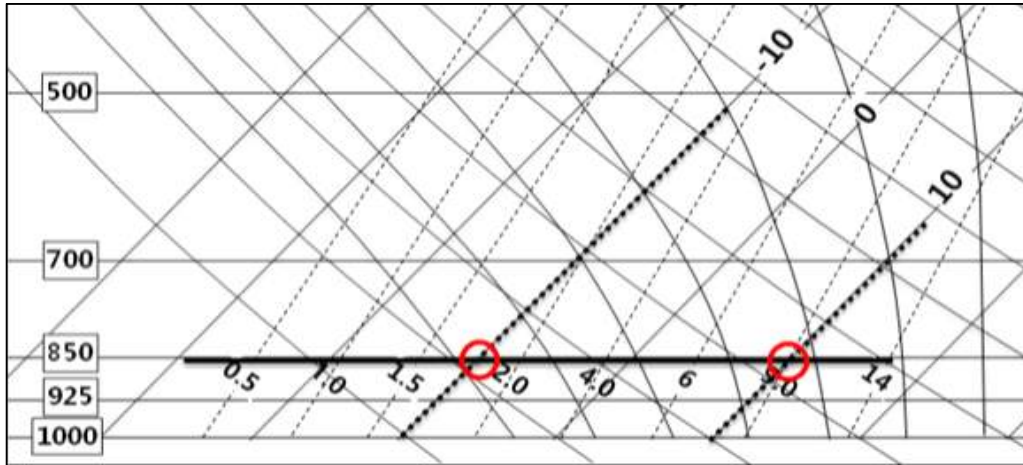


그림 5-4. 단열선도 모식도 (점선은 등온선, 빨간색은 850hPa -10°C, 10°C의 포화혼합비)

겨울은 기본적으로 다른 계절에 비하여 기온이 낮다. 따라서 대기가 품을 수 있는 절대적인 수증기량도 적다. 그림 5-4의 단열선도를 보면 좀 더 쉽게 이해할 수 있다. 850hPa를 기준으로 겨울에 해당하는 -10°C의 포화혼합비를 보면 약 1.8g/kg 정도 된다. 반면에 봄, 가을에 해당하는 10°C의 경우, 포화혼합비가 약 9g/kg의 값을 가진다. 중층에서 발생한 강수가 하층으로 내려오면 건조한 공기에 의해 대기 중으로 증발하게 되는데, 겨울에는 수증기를 담을 수 있는 그릇의 크기가 타 계절의 20%에 불과하다. 따라서 적은 강수의 증발에도 쉽게 포화되므로, 중층의 강수가 지상까지 쉽게 도달할 수 있다.

그러나 겨울철에 하층에서 차고 건조한 북서류가 지속적으로 내려온다면 상황은 달라질 수 있다. 건조도 높은 공기가 계속 유입된다면 중층에서 떨어지는 강수대를 모두 수용할 수 있기 때문인데 이것은 다음 장에서 자세히 살펴보기로 한다.

세 번째 이유는 강수 형태이다. 겨울에는 700~500hPa 포화층의 온도가 -20~-10°C인 경우가 많은데, 눈 미세물리과정을 고려했을 때 이 온도 구간에서 빙정이 잘 발달하고, 눈 결정이 잘 만들어진다. 이는 중층강수가 지면에 낙하하는데 유리하게 작용한다.

고체상의 강수는 건조한 대기에서 일부 증발하기도 하지만, 액체상으로 녹는(melting)데 많은 에너지가 흡수되기 때문에 액체상의 강수보다 증발에 훨씬 큰 에너지가 필요하며, 그만큼 증발 과정이 어렵다. 따라서 약한 강수가 예상되는 경우 액체상은 증발하여 지면에 낙하하지 않는 경우가 많으나, 고체상은 증발하지 않고 지상에 눈으로 내리기 쉽다.

5. 2. 중층기압골 강수예보를 위해 점검해야 할 기상요소

5. 2. 1. 남쪽저기압의 중심위치와 풍향에 따른 하층건조

중층기압골의 강수는 남쪽저기압과 관련이 깊다. 남쪽에서 북상하는 저기압의 경우 난기에 의해 발생하는 저기압이므로 주로 하층에서부터 발달한다. 이 하층 저기압이 얼마나 북상해 상층기압골과 가까이 접근하느냐가 중층강수에서 중요한 요소이다. 남쪽저기압 북상 정도에 따라 중층기압골과의 상호관계를 모식도로 나타냈다(그림 5-5).

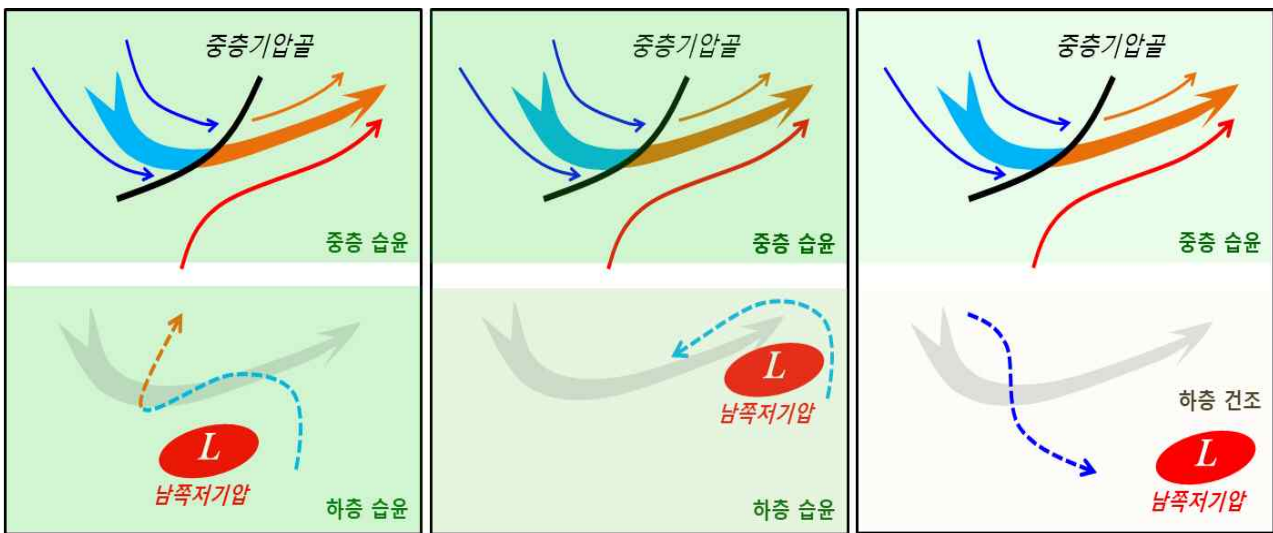


그림 5-5. 남쪽저기압 북상 정도에 따른 중층기압골과 연관성 (파란 점선: 하층기류, 빨간 점선: 상층기류)

첫 번째 경우(그림 5-5의 왼쪽)는 저기압이 충분히 북상하여 중층기압골과 완전히 연결된 형태이다. 기압골 후면 한기가 저기압의 중심으로 파고드는 형태로 저기압은 발달하고 저기압의 북쪽으로는 CCB(Cold Conveyor Belt)가 뚜렷하게 나타나는 강수 형태이다. 이러한 경우는 강수대가 하층에서부터 발달하므로 20mm 이상의 많은 강수가 오기도 한다. 본 가이드스에서는 이러한 형태는 다루지 않기로 한다.

두 번째는(그림 5-5의 가운데) 중층기압골에 남쪽저기압 중심이 500km 내외로 접근하였으나, CCB는 발달하지는 않은 형태이다. 이 경우 하층에서는 북동에서 남동풍까지의 바람이 불기 때문에 하층이 매우 건조하지는 않다. 따라서 하층으로부터 직접적인 수증기 공급은 약하지만, 중층 강수가 증발하지 않고 내리기에는 크게 부족함이 없는 경우이다.

세 번째는(그림 5-5의 오른쪽) 중층기압골이 남쪽저기압과 500km 이상 떨어진 형태로 두 개의 시스템이 거의 영향을 주지 않는 분리된 형태이다. 이 경우는 하층에 북서류가

불면서 건조한 공기를 끄집어 내리는 경우가 많아 중층 강수가 지상에 떨어지기 어려운 조건이다. 그러나 기압골의 강도에 따라 강수가 내리는 때도 있다.

이처럼 남쪽저기압의 위치에 따라 하층 풍계와 건조도가 달라지고 이에 따라 중층강수의 강도나 강수 유무가 달라질 수 있는데, CCB 형태로 발달한 첫 번째 경우를 제외하고 두 번째와 세 번째 사례에 대해 살펴보겠다.

그림 5-5의 두 번째 모식도처럼 중층기압골과 저기압의 중심이 500km 내외로 접근했던 사례를 먼저 살펴보겠다.

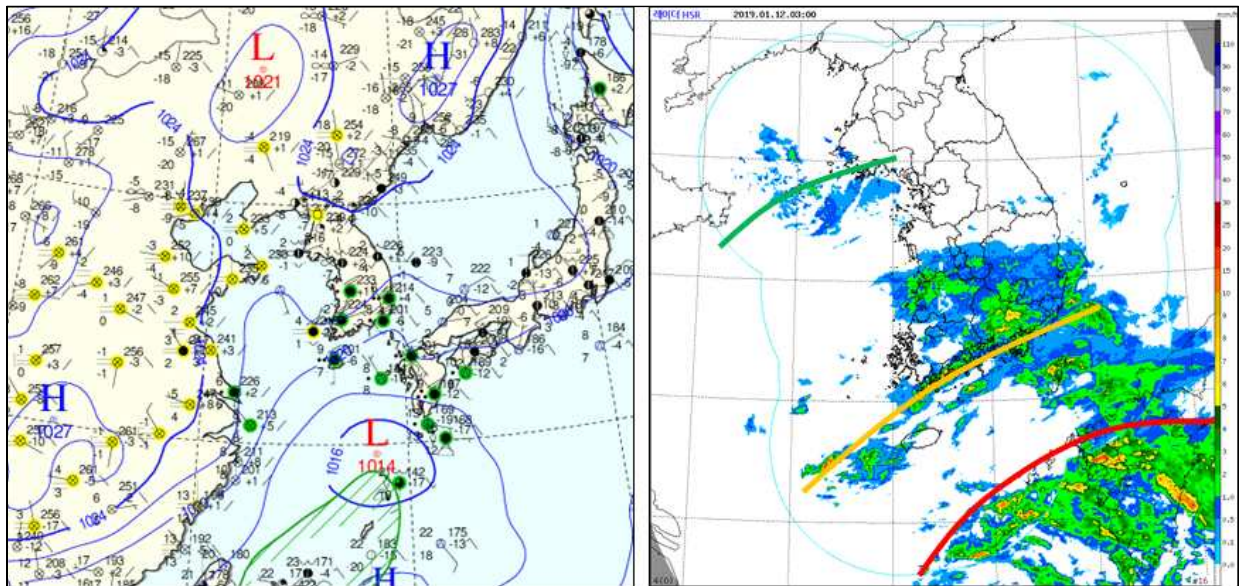


그림 5-6. 2019년 1월 12일 03시 지상일기도와 레이더합성영상(HSR)
(녹색 선: 중층강수, 노란 선: 저기압 간접영향, 빨간 선: 저기압 영향권 강수)

그림 5-6을 보면 지상 저기압이 북위 30도 부근에 있고 이 저기압에 의한 강수대는 빨간색 선의 아래쪽으로 한정된다. 이 구역은 저기압의 직접적인 영향으로 강수가 오는 곳이다. 노란색 영역의 경우는 저기압에서 약 500km 정도 떨어진 구역으로 저기압의 간접영향을 받으며, 중층기압골에 의해 강수가 활성화되는 곳으로 볼 수 있다. 노란 선과 녹색 선 사이는 안장부에 드는 구역으로 볼 수 있으며, 저기압의 간접영향을 받는 곳보다는 약한 강수를 보인다.

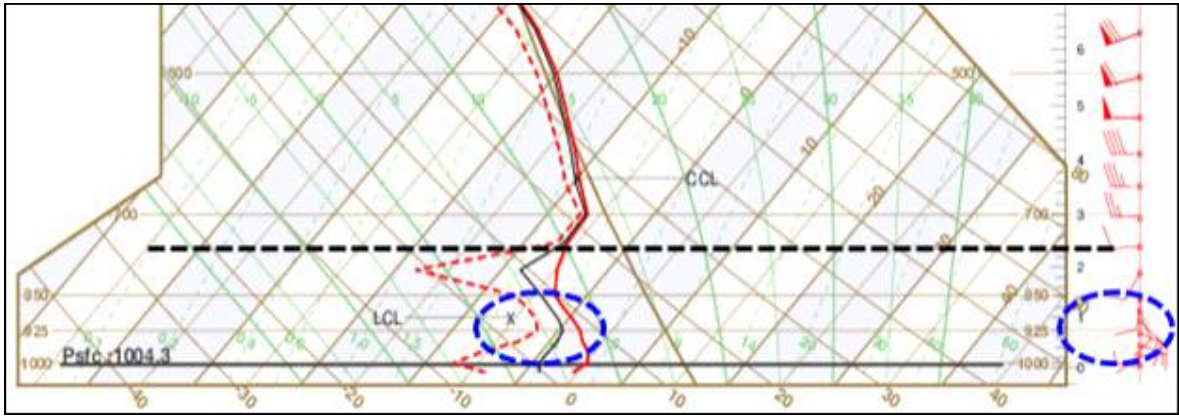


그림 5-7. 2019년 1월 12일 00시 대구 예상 단열선도(11일 21시 UM모델 +3h 예측)

그림 5-6의 노란색 영역에 해당하는 대구의 예상 단열선도(그림 5-7)를 보면 700hPa 보다 낮은 고도에서부터 포화된 모습을 보이고 있으며, 925hPa 부근에서는 저기압의 간접영향으로 동풍이 들어 들어가고 있다. 이 구역의 연직 포화도를 살펴보면 하층이 습윤한 것을 알 수 있다. 즉 하층이 습윤한 상태이므로 중층에서 만들어진 강수대가 그대로 지면에 낙하할 수 있음을 알 수 있다. 이 사례의 경우 남부지방은 1mm 정도의 강수가 내렸고, 대기조건이 더 건조하거나 포화층 두께가 더 얇은 중부지방에는 특별히 강수가 없었다.

다음은 저기압에서 500km 이상 떨어진 경우, 그중에서도 하층에 대륙고기압이 위치한 사례를 보겠다.

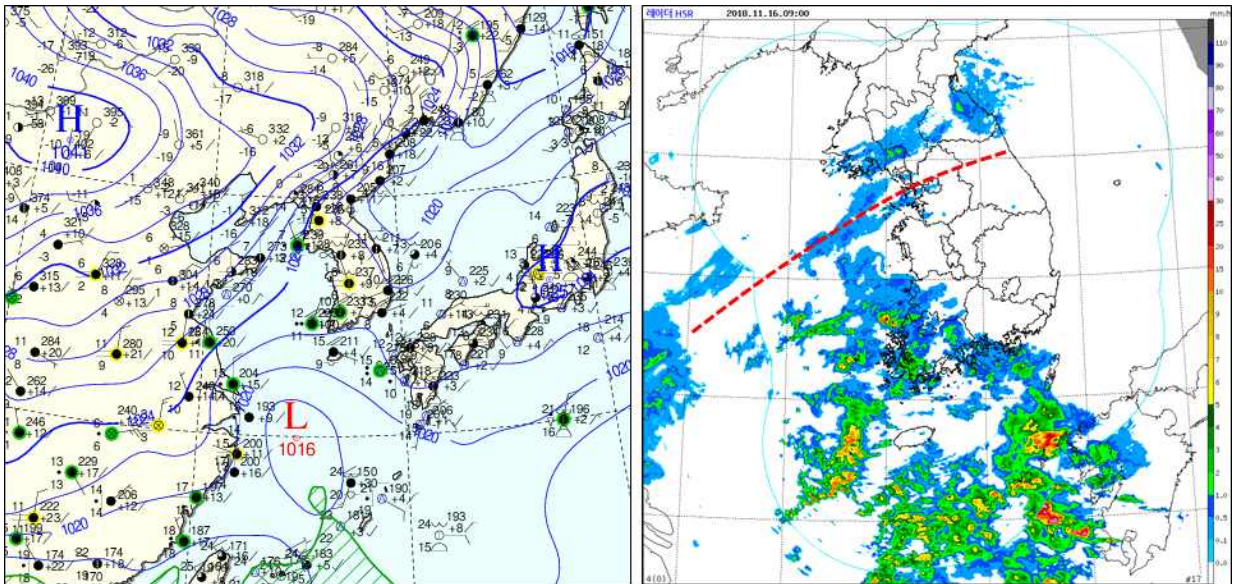


그림 5-8. 2018년 11월 16일 09시 지상일기도와 레이더합성영상(HSR) (빨간 점선: 중층강수)

그림 5-8의 지상 저기압은 북위 30° 부근에 있으며 레이더영상을 보면 빨간 점선보다 남쪽에는 어느 정도 강도를 가진 에코들을 볼 수 있다. 이 강수대는 앞선 사례처럼 저기압의 간접영향을 받는 구역으로 1~5mm의 강수가 있었다. 하지만 이번 사례에서는 그보다

북쪽에 빨간 점선이 있는 곳에 집중해 보겠다. 이 구역은 저기압의 중심으로부터 500km 이상 떨어진 곳이며, 지상에는 대륙고기압의 경계와 인접해 있다.

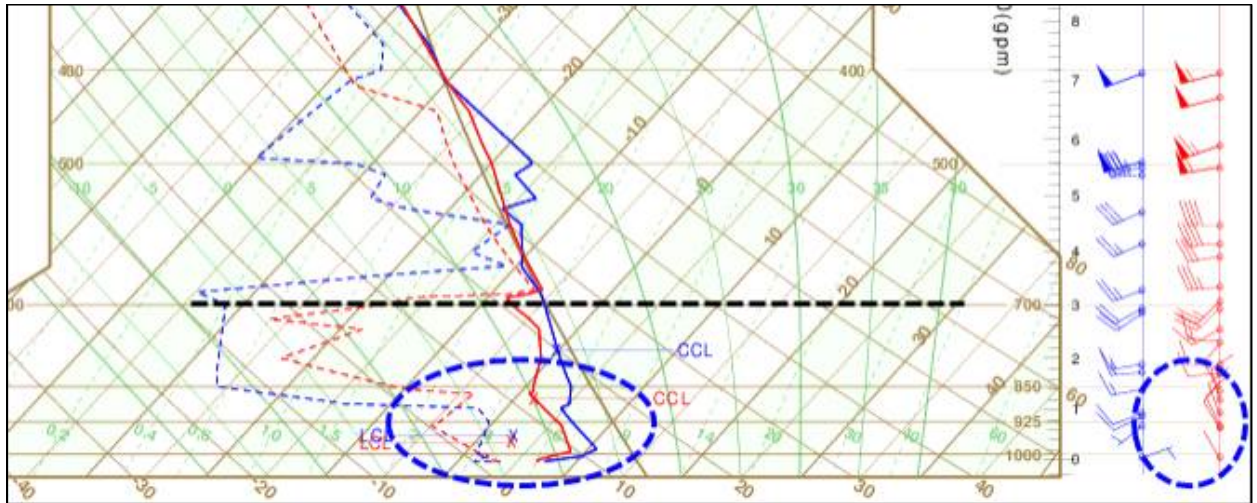


그림 5-9. 2018년 11월 16일 09시 오산 단열선도

앞선 사례와 마찬가지로 700hPa을 기준으로 남북으로 습윤층과 경계층이 나누어져 있다. 그러나 하층의 풍계가 북서로 건조한 바람이 유입되고 있다. 따라서 건조한 영역이 여전히 유지되고 있고 중층의 포화된 강수대는 이 건조영역을 포화시키기에는 역부족이다. 이 사례의 경우는 중층의 기압골도 강하지 않았기 때문에 중부지방에는 약한 강수조차도 없었다. 다만 백령도 부근에는 약한 강수가 있었는데, 백령도 부근에는 한랭이류가 발생하여 해기차로 인해 하층에 수증기 공급이 지원되었기 때문으로 보인다. 그러나 내륙은 조건이 다를 수 있음을 유의해야 한다.

5. 2. 2. 중층기압골의 경압성

하층의 건조도를 체크 했다면, 결국 구름대의 강도를 결정할 부분은 중층기압골의 깊이이다. 하층의 대기가 습윤하더라도 중층기압골 강도 자체가 약하다면 강수를 만들어 낼 기작 자체가 없기 때문이다.

과거 중층기압골 강수가 있었던 날들의 사례를 살펴보면 500hPa의 바람이 남서의 풍향으로 50kts 이상 불어 온난이류역이 존재할 때 강수가 있었다. 그러나 그것만으로는 강수를 유발할 수 있는 구름이 형성된다고 설명하기는 어렵다. 그 기압골이 발달할지 아닐지는 기압골의 경압성을 통해 분석해야 한다.

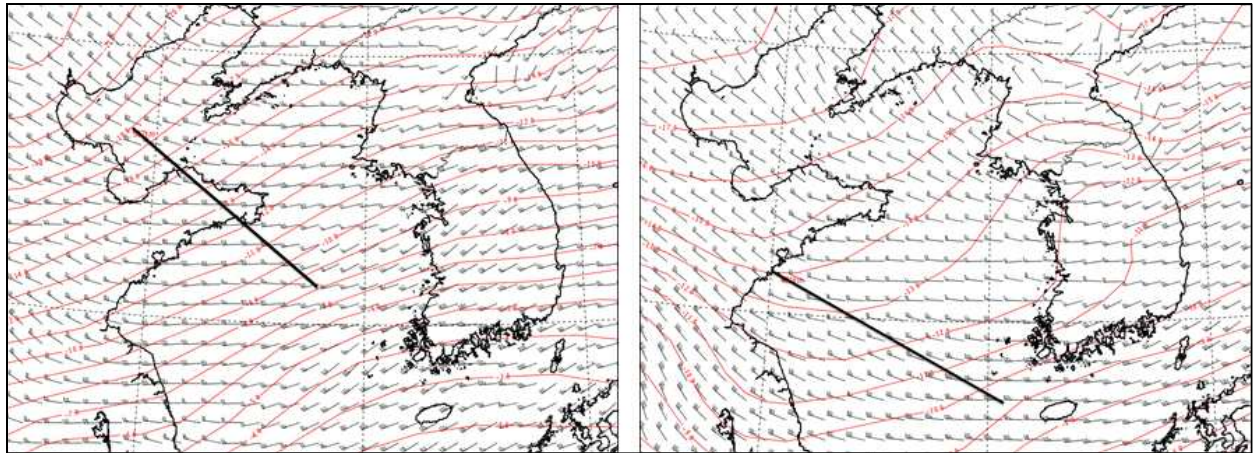


그림 5-10. 700hPa의 바람과 등온선 / (좌) 2019년 12월 26일 09시, (우) 2020년 1월 12일 03시
(검은색 실선: 한랭이류가 위치한 곳으로 약 500km 길이에 해당함)

경압성을 보기 위하여 북서류가 등온선과 교차하는 구역의 온도경도를 살펴보았다. 그림 5-10의 왼쪽은 2019년 12월 26일 중부지방 강수 사례로 산동반도 부근에 약 500km에 10°C의 온도경도를 보였다. 반면에 오른쪽은 2020년 1월 12일 남부지방 강수 사례로 약 500km에 4°C의 온도경도를 보였다. 직관적으로 보더라도 왼쪽 사례가 경압성이 더 큰 사례임을 알 수 있다. 기압골 전면의 남서류의 풍속을 보더라도 왼쪽 사례는 30~35kts, 오른쪽 사례는 20~25kts로 기압골의 강도에서 차이를 보였다. 그림 5-11에서 실제로 나타난 에코의 강도를 비교해보자.

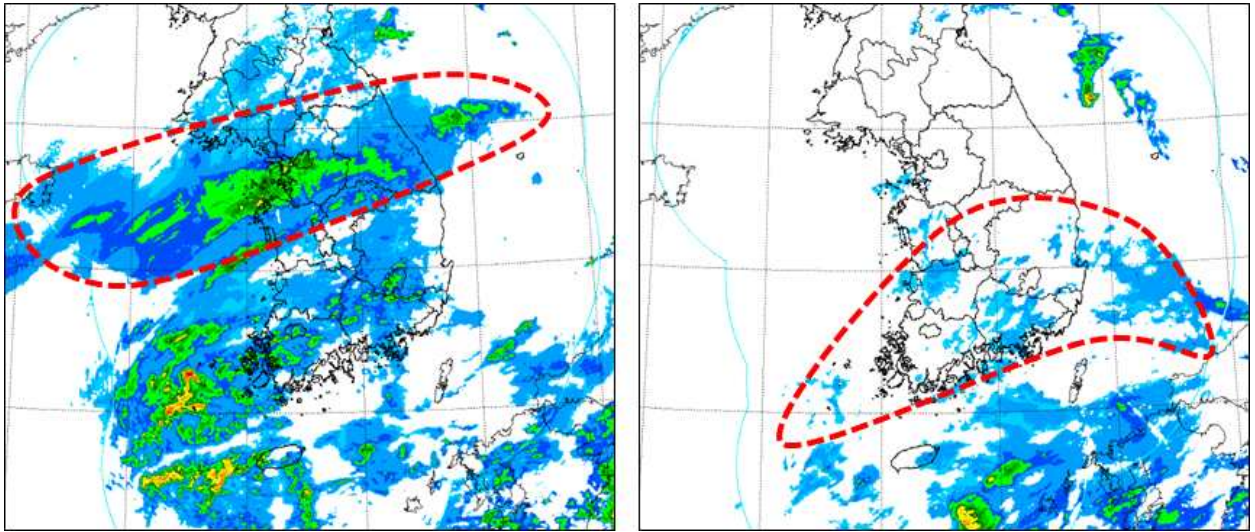


그림 5-11. 레이더합성영상(HSR) / (좌) 2019년 12월 26일 09시, (우) 2020년 1월 12일 03시
(빨간색 점선: 중층기압골에 의한 강수대에 해당)

왼쪽 사례의 경우 경압성이 강한 만큼 기압골 전면에서 남서류도 강했고, 그에 따라 레이더 반사도도 크게 나타났다. 실제 강수량은 1~3mm 정도, 많은 곳은 4mm까지 기록하였다. 반면에 오른쪽 사례는 경압성이 약하고 그로 인해 강수대가 발달하지 못하고 강수에도 산발적으로만 나타났다. 구름의 top의 높이도 왼쪽 사례가 1~2km 정도 더 발달하였다.

그렇다면 700hPa의 경압성이 크다는 것은 어떤 의미일까? 경압성이 크다는 것은 기압골이 깊어지는 것을 의미한다. 기압골이 깊어진다면 그 전면대로 구름의 시작 고도는 낮아지고 상승류는 더욱 강화된다. 다시 말하면 3km 부근 공기의 상승기류가 강화되는 것을 의미하므로 구름이 3km에서 더 위로 올라갈 수 있게 해주는 힘의 원천이라 볼 수 있다.

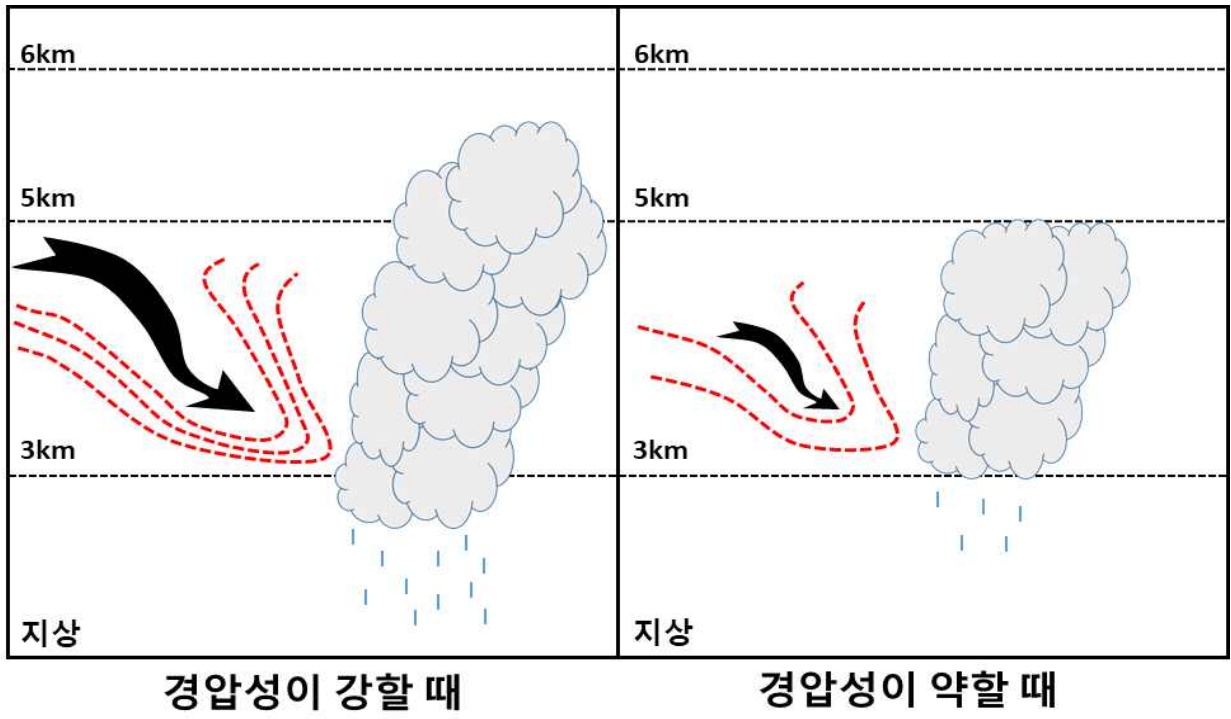


그림 5-12. 중층 경압성 강도에 따른 구름 발달 모식도

그림 5-12처럼 700hPa의 경압성이 강하다면 중층에서 충분한 두께의 구름대 형성을 의미하므로 하층이 건조하지만 얇다면 지면까지 강수를 낙하시킬 수 있는 하나의 충분 조건이 된다. 700hPa의 경압성과 강수량의 상관관계를 정량적으로 보기 위하여 임의로 한랭이류가 있는 지점간의 거리인 500km 구간에서 온도경도를 살펴보았다. 온도경도가 5°C 이하일 때에 강수가 없거나 매우 약한 경우가 대부분이었으며, 온도경도가 9°C 이상 일 때에는 대체로 1mm 이상의 강수가 내렸다. 온도경도가 5~9°C 사이일 경우에는 온도경도만으로 경압성을 판단하기 힘들며, 하층의 건조도가 매우 중요하게 작용했다.

또한 700hPa의 경압성이 강하더라도 구름의 top이 500hPa 또는 그 이상으로 발달 하는지는 중층강수의 중요한 판단 요소가 된다. 즉 습윤층의 두께가 중요한데, 이 내용은 다음절에서 자세히 다루기로 한다.

5. 2. 3. 습윤역의 고도와 두께

중층강수를 판단할 때 구름의 운정·운저 고도, 두께 등은 중요한 요소이다. 이것을 통계적으로 설명하기 위하여 표 5-1과 같이 분석하였다.

자료는 2018~2020년, 11~3월까지 00, 06, 12, 18UTC의 GDAPS(N128) 분석장을 활용하였고 지점은 중부지방은 서울, 남부지방은 광주, 그리고 그 중간으로 하여 대전을 대표지점으로 하여 통계처리 하였다. 고도는 300hPa, 400hPa, 500hPa, 700hPa, 850hPa, 925hPa의 자료를 분석했다. ‘습윤하다’의 기준은 300~400hPa은 습수가 6 이하, 500hPa은 습수가 5 이하, 700~850hPa은 습수가 4 이하인 것으로 하였다.

표 5-1. 해당 구간에서 습윤역이 나타날 때 강수 발생확률과 강수가 있는 날의 평균강수량
(주황색 채색: 평균강수량이 1mm 이상, 노란색 채색: 평균강수량이 1mm 이하)

포화층고도	서울		대전		광주	
	강수 발생확률	평균강수량	강수 발생확률	평균강수량	강수 발생확률	평균강수량
850~400hPa	91.7%	3.04	94.7%	3.16	91.7%	2.48
850~500hPa	90.9%	2.56	80.0%	4.06	88.9%	1.64
850~700hPa	71.4%	2.69	53.8%	0.94	81.8%	1.65
700~400hPa	11.4%	0.125	12.0%	0.23	15.2%	0.82
700~500hPa	-	-	33.3%	0.1	41.2%	0.28
700hPa건조	-	-	-	-	-	-

습윤층의 고도는 크게 850hPa부터 습윤층인 경우, 700hPa부터 습윤층인 경우, 700hPa까지는 건조하고 그 위로 습윤한 경우 3가지로 나눌 수 있다.

첫 번째로 850hPa부터 습윤층이 나타나는 경우를 살펴보자. 중층강수에서 850hPa에 습윤층이 나타나는 경우는 중층기압골이 깊어지면서 강수 트리거 고도가 낮아져 850hPa이 습윤해지는 경우가 많다. 이런 경우 통계자료를 보면 구름이 500hPa 이상까지 발달한다면 강수확률은 거의 90%에 육박하는 것을 알 수 있다. 또한 강수량도 3시간에 1mm를 넘는 경우가 많았다. 따라서 850hPa부터 포화층을 이루고, 특히 운정 고도가 5km를 넘는다면 5mm 정도의 강수를 고려해야 한다. 중층기압골의 경우 북쪽에서부터 남하하는 경우가 일반적이므로, 850hPa이 포화만 된다면 중부지방 강수량은 남부지방보다 많아질 수 있다. 위 표에서도 850hPa이 습윤한 경우에는 서울의 경우가 광주보다 강수량이 많다.

두 번째로 850hPa은 건조하고 700hPa부터 습윤한 경우이다. 이 경우에는 남부지방과 중부지방이 조금 달라진다. 중부지방은 위도상 대륙고기압의 영향을 더 받기 쉬운 곳이므로 700hPa부터 습윤층으로는 강수가 기록되기 어렵다. 서울의 경우 습윤역이 700hPa부터 400hPa까지 발달했을 때도 강수확률은 10%에 불과하고 강수량도 0.1mm 정도로 약하다. 그러나 광주의 경우 강수확률은 약 30% 내외로 중부지방의 3배에 달했고 강수량도 약 0.5mm로 중부지방의 5배에 달했다. 북쪽 대륙고기압보다는 남쪽저기압에 더 근접한 남부지방일수록 중층강수에는 유리함을 알 수 있다. 대전의 경우는 서울과 광주의 중간 정도에 해당했다.

세 번째로 700hPa도 건조하고 그 위로 습윤한 경우이다. 표 5-1과 같이 700hPa이 건조할 때 강수가 기록된 곳이 없었다. 따라서 중층강수의 최소한의 강수 시작 고도는 700hPa로 보는 것이 타당하다.

위 내용을 아래 표 5-2와 같이 요약할 수 있다.

표 5-2. 습윤층 고도에 따른 예상 강수량

포화층 고도	구역	강수량
850hPa~500hPa까지 습윤	중부지방	3mm/3h의 강수
	남부지방	1~3mm/3h의 강수
700hPa~400hPa이상 습윤	중부지방	빗방울/눈날림
	남부지방	1mm/3h 이하의 약한 강수
700hPa~500hPa까지의 습윤	중부지방	무강수
	남부지방	빗방울/눈날림
700hPa 건조	전국	무강수

다만 표 5-2에서는 850hPa에서 700hPa 사이에서부터 포화되어 발달한 구름대에 관한 판단에 어려움이 있다. 그러한 경우에는 하층의 건조도를 함께 고려해서 예보하는 것이 좋고, 다음절에 나오는 상승속도도 함께 고려하여 판단할 필요가 있다【겨울예보 사례분석 5-2】.

5. 2. 4. 습윤역과 상승운동

앞 절에서 포화층의 고도와 중층강수에 대해 알아보았다. 그런데 850hPa은 건조하고 700hPa 부근에서 습윤역이 존재할 때 강수유무를 판단하기가 모호한 경우가 많다. 이럴 때 해당 고도에서 상승속도가 존재하는지 점검해보면 예보에 도움이 된다.

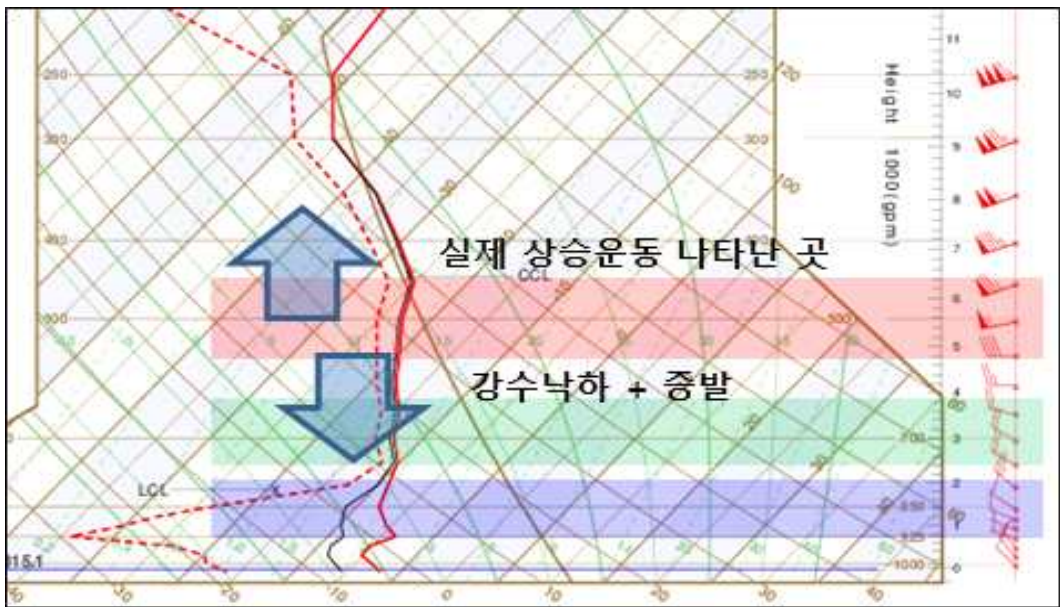


그림 5-13. 2019년 1월 31일 09시 서울 예상 단열선도

그림 5-13의 단열선도를 보면 약 800hPa 아래에는 건조한 대기상태를 보이며, 그 위로는 200hPa까지 습윤층이 나타난다. 습윤층의 두께만 생각해보면 강수가 가능할 것 같은 조건이지만, 700hPa 아래 고도에 건조층이 있어서 다소 애매할 수 있다. 이럴 때 온도구조를 좀 더 상세히 살펴볼 필요가 있다.

500hPa의 약간 위를 보면 온도선이 꺾이는 지점이 있는데, 이 위로는 온도구조가 습윤 단열선에 가까운 형태를 보인다. 여기는 확실하게 상승하는 운동을 보여주는 곳이다. 이미 포화된 상태에서 상승운동을 할 때 습윤단열선에 나란해지기 때문이다. 그 아래쪽으로는 고도가 낮아지면서 습윤단열선보다 기온이 낮아지는 일종의 역전층 형태를 보인다. 이 구역은 떨어진 강수가 증발하면서 만들어진 습윤층임을 추측해 볼 수 있다.

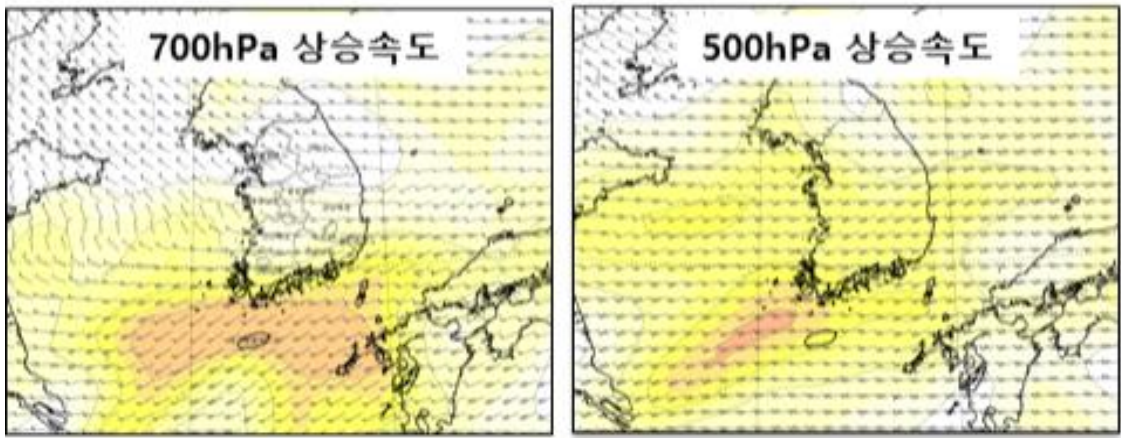


그림 5-14. 2019년 1월 31일 09시 상승속도 (좌) 700hPa, (우) 500hPa

이러한 상승운동 또는 강수가 낙하하는 구역을 구분하기 위해서 바람의 방향과 상승속도 자료를 함께 활용해야 한다. 그림 5-13에서 빨간색으로 색칠한 영역은 남서계열의 바람이 부는 구역이고, 녹색은 북서계열의 바람이 부는 구역이다. 즉 빨간색 영역은 상승 구역, 녹색 영역은 하강 구역으로 짐작할 수 있다. 이를 상승속도 예상장(그림 5-14)에 매칭시켜보면 중부지방은 500hPa에서 상승속도가 관측되지만, 700hPa에서는 상승속도가 나타나지 않는다.

위 내용들을 정리하면, 포화층이 매우 두껍게 나타나지만, 실제 상승운동 고도 즉, 비구름대가 시작되는 고도는 약 600hPa 정도이다. 이러한 조건에서는 앞서 살펴본 표 5-2에 따라 지상에서 강수량이 기록되기 어렵다는 것을 예상할 수 있으며, 실제로 이 사례는 강수가 기록되지 않았다.

이렇듯 중층강수를 예보할 때 풍향과 상승속도를 고려하면 중층강수 예보에 도움이 되는 경우들이 있는데, 관련 사례를 하나 더 살펴보겠다.

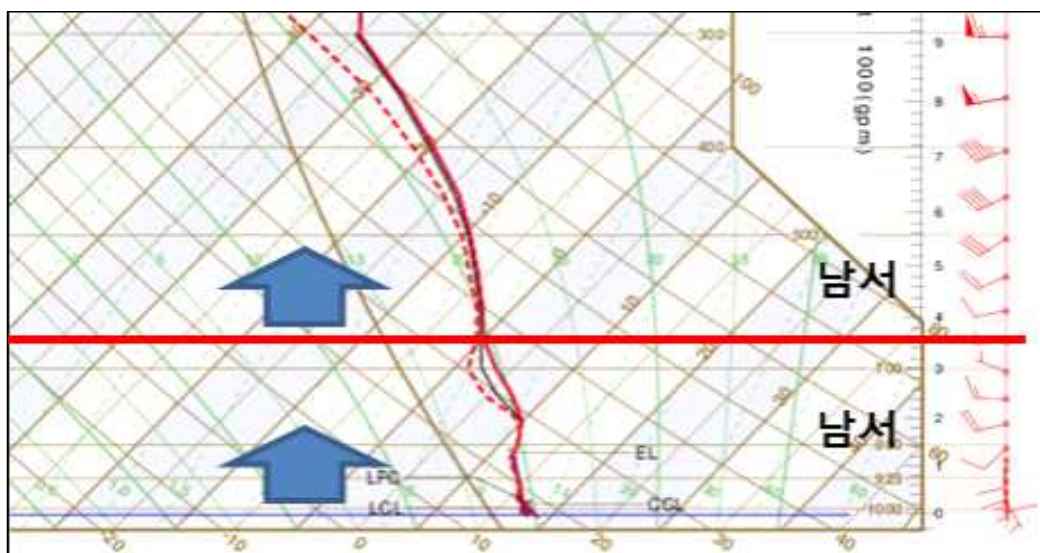


그림 5-15. 2021년 10월 08일 09시 서울 예상단열선도

그림 5-15의 사례를 보면 대기가 대부분의 연직층에서 습윤한 상태이지만 700hPa에서 건조한 영역이 존재하는 것을 볼 수 있다. 풍향을 따져본다면 700hPa 부근에 불연속면이 존재하며, 그 위아래에는 남서류가 지배하고 있다. 그리고 700hPa 위의 대기는 습윤단열적 구조를 보이며 상승운동이 잘 나타날 수 있는 상황임을 알 수 있다.

그렇다면 이 단열선도가 과연 강수가 내릴 수 있는 조건인지를 상승속도를 통해 한 번 더 점검해보고자 한다.

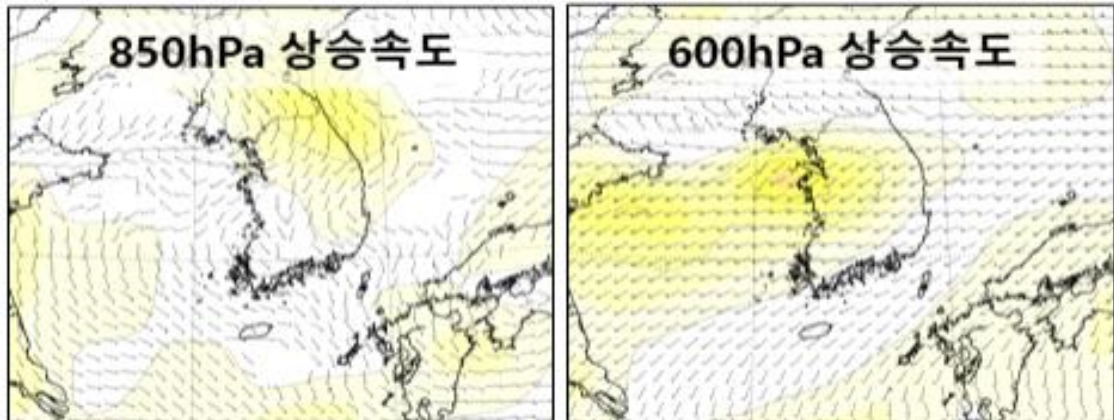


그림 5-16. 2021년 10월 08일 09시 상승속도 (좌) 850hPa, (우) 600hPa

앞서 단열선도에서 나타났던 불연속면인 700hPa을 기준으로 위아래의 상승속도를 보기 위해 850hPa과 600hPa의 상승속도를 살펴보았다. 먼저 서울에 850hPa에서 남서류가 우세하며 약한 상승속도가 나타나고 있다. 상승속도가 크지 않기 때문에 하층에서 단독으로 강수를 만들 수 있는 조건은 아니지만, 최소한 습윤한 대기조건을 가지는 것은 확인할 수 있다.

600hPa은 앞서 단열선도를 통해 상승운동이 활발할 것으로 예상하였는데, 실제로 그림 5-16에서 경기만 부근으로 상승속도가 뚜렷하게 나타나 중층의 상승류가 강한 것을 확인할 수 있다.

결국 중층강수는 중층에서 발달한 강수대가 지면에 낙하하는 것이 가장 중요한 요소인데, 600hPa의 상승류로 중층에 강수가 잘 발달했지는 확인이 가능했고, 850hPa의 상승속도로 하층의 건조도를 체크 할 수 있었다.

이렇듯 중층강수에서 풍향과 상승속도를 여러 방향으로 응용해서 적용한다면 강수 메커니즘을 이해하고, 강수예보를 하는 데 큰 도움이 될 수 있다.

5. 2. 5. 그 외 중층강수 예보 시 고려해야 할 점

중층강수는 모델에서도 예측력이 떨어지기 때문에 강수예보를 할 때 여러 가지 변수를 고려할 필요가 있다. 앞서 언급한 하층 건조도, 중층기압골의 강도 이외에도 몇 가지 고려할 점을 생각해보자.

첫 번째로 하층 건조도와 관련해서, 일변화(diurnal cycle)를 고려해야 한다. 왜냐하면 낮에는 일사에 의해 기온이 올라가고 그에 따라 건조도가 떨어지고, 반대로 밤에는 냉각 때문에 기온이 떨어지고 습윤도가 높아지기 때문이다. 따라서 약하게라도 중층강수가 예상될 때는 일변화를 고려해서 예보해야 한다.

두 번째로 내륙보다 해안이 강수에 유리하다는 것을 고려해야 한다. 첫 번째 주의할 점과 마찬가지로 해안에서는 내륙보다 이슬점온도와 습윤도가 높을 가능성이 크기 때문이다.

세 번째로는 지형과 고도를 고려해야 한다. 앞서 하층에 북서류가 분다면 중층의 강수가 떨어지기 어렵다고 하였다. 중층에서 떨어지는 강수가 북서류에 의해 마르기 때문이다. 하지만 고도가 충분히 높아 북서류의 영향을 받지 않거나 작게 받는다면 강수가 내릴 수 있다. 따라서 925hPa에 북서류가 강하다면 800m 이상의 고지대에 강수가 기록될 수 있고, 850hPa에서도 북서류가 분다면 1.5km 이상의 높은 산지에 강수가 기록될 수 있음을 유의해야 한다.

5. 3. 중층강수 예측 실패 사례

서두에 중층강수는 모델이 예측에 실패하는 경우가 많다고 하였다. 특히 Miss(모델에서 강수 예측하지 않았으나 강수가 온 경우)가 발생하는 경우가 많으므로 모델에서 강수를 모의하지 않더라도 중층강수에 대한 가능성을 늘 염두를 둔 상태에서 예보해야 한다.

5. 3. 1. 포화층을 두껍게 모의하나, 모델이 강수를 모의하지 못한 사례

2019년 12월 26일 낮에 남쪽저기압의 영향으로 충청권까지 강수를 예보하였다. 그러나 실제로는 수도권을 중심으로 많은 강수가 내렸고, 중부지방에 1~5cm의 많은 눈이 내렸다. 그렇다면 이때 모델에서의 예측은 어땠을까?

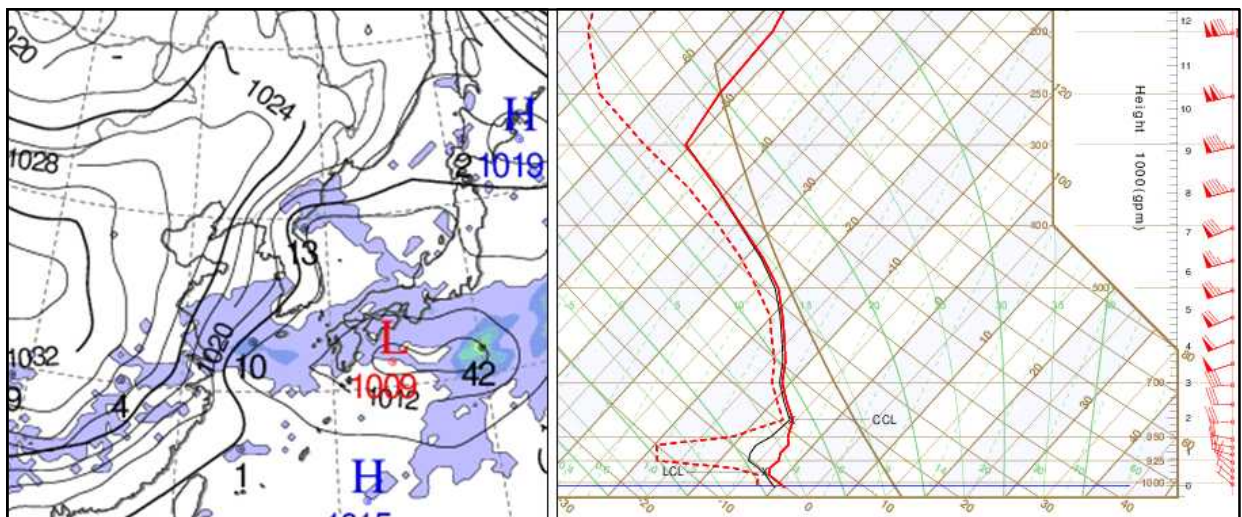


그림 5-17. 2019년 12월 24일 21시 모델이 예측한 2019년 12월 26일 12시 UM 예상일기도
(좌) 해면기압/누적강수량 예상, (우) 서울 단열선도

위 사례의 지상 예상일기도를 보면 우리나라를 중심으로 북쪽으로는 대륙고기압이 확장해 있으며 남해상으로는 남쪽저기압 시스템이 위치하고 있다. 중부지역은 주로 대륙고기압의 영향을 받아 하층이 건조하므로 모델에서는 강수를 모의하지 않고 있다.

서울의 예상 단열선도에서도 850hPa 아래 고도에서 북서류가 불면서 건조한 연직 구조를 보인다. 그러나 850hPa 부근에서부터 포화층이 형성되어 있으며 300hPa까지도 습윤한 형태가 나타내고 있다. 중층기압골은 뚜렷하며 700hPa에서 경압성은 500km에 약 10°C로 크게 형성되어 있다(그림 5-2, 그림 5-3, 그림 5-13 참고). 단열선도에서 풍속을 보면 5km 부근에는 80kts 이상의 서남서풍이 예측되고 있다. 500hPa에서 50kts 이상의 풍속, 강한 경압성, 850hPa~300hPa의 포화도를 모두 고려한다면 강수량을 기록할 확률은 매우 높고, 표 5-2에 따르면 중부지방에 3시간에 3mm의 강수량을 기록할 수 있는 사례이다.

앞서 이야기 하였듯이 실황에서는 5mm 미만의 강수량, 1~5cm의 적설(서울의 경우는 강수형태 비)을 기록하였으나, 모델은 전혀 강수를 모의하지 못하였다.

이렇게 모델이 중층강수를 놓치는 경우가 매년 발생한다. 대륙고기압이 위치하고, 남쪽에 저기압이 통과할 때 중층기압골의 경압성, 전면대 풍속, 포화층 두께 등을 종합적으로 고려하여 강수 가능성에 대해 면밀히 검토하는 것이 중요하다【겨울예보 사례분석 5-1】.

5. 3. 2. 기압골이 모델보다 실황이 깊어진 사례

중층강수에서 중층기압골의 강도는 강수와 관련성이 깊다고 앞에서 언급하였다. 이 중층기압골이 깊지 않으리라고 모델이 예측하면서 강수를 모의하지 않다가 실제로는 골이 깊어지면서 강수가 나타나는 경우가 빈번히 발생한다. 그림 5-18의 2019년 1월 12일 사례를 살펴보겠다.

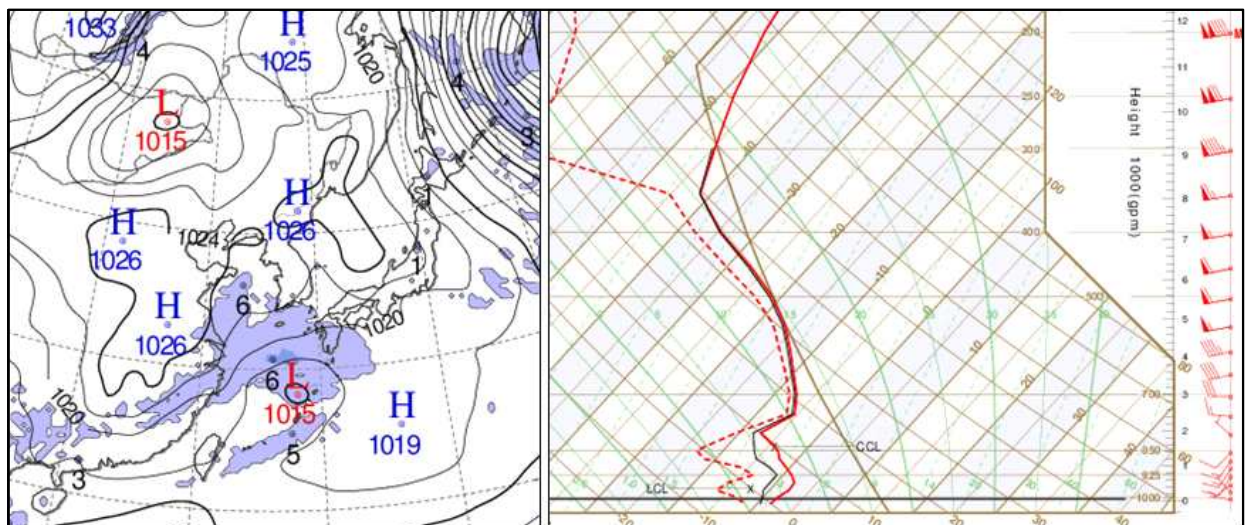


그림 5-18. 2019년 1월 10일 21시 모델이 예측한 2019년 1월 12일 03시 UM 예상일기도

(좌) 해면기압/누적강수량 예상. (우) 대구 단열선도

위 사례에서는 지상에 대륙고기압의 영향은 없으며, 남해안까지는 저기압의 간접영향으로 강수를 모의하고 있다. 그리고 그 북쪽은 안장부 구역으로는 강수를 예측하지 않고 있다. 대륙고기압이 영향을 주는 상황은 아니기 때문에 하층이 매우 건조하지 않으므로 중층의 기압골만 충분하다면 충분히 강수를 기록할 수 있는 대기조건이다.

대구는 강수가 예측되지 않고 있는데, 연직 포화도를 살펴보면 700hPa과 850hPa의 중간부터 포화구조를 보이고 있다. 모델 자료만으로는 강수 여부를 판단하기 다소 애매한 경우이다. 이때 중층기압골이 모델 예측보다 강하다는 전제 조건만 붙는다면 강수는 충분히 내릴 수 있는 조건이라 할 수 있다. 전날 분석할 수 있는 10일 21시의 실황을 분석 해보

면 강수 가능 여부에 대한 단서를 얻을 수 있다.

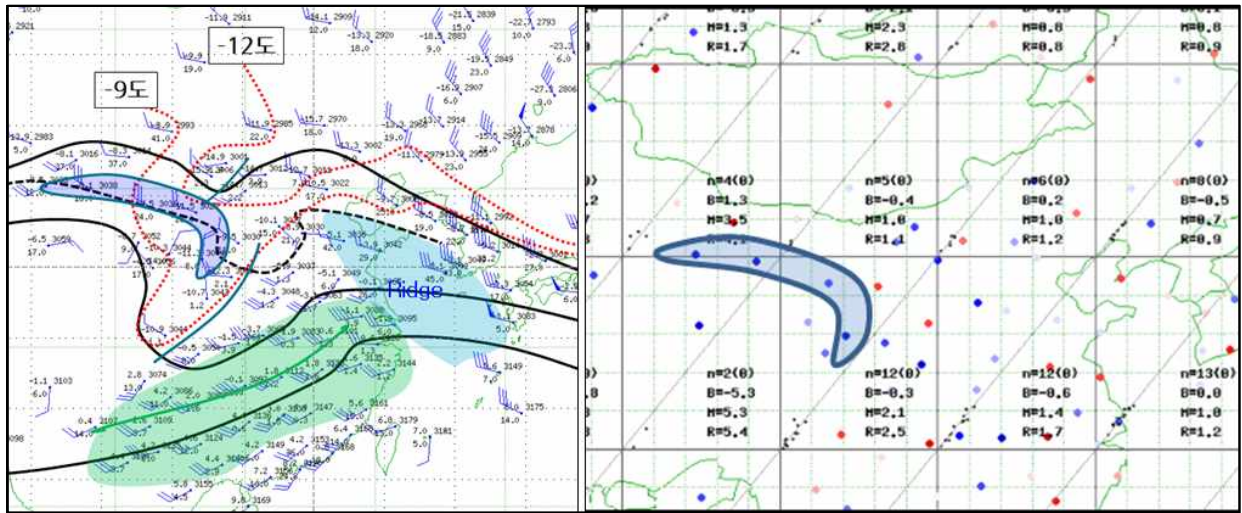


그림 5-19. 2019년 1월 10일 21시 (좌) 700hPa GTS 일기도, (우) UM 모델(분석장) 풍속 편차

강수 발생일 전전날인 10일 밤 700hPa GTS 일기도를 묘화해 보면(그림 5-19 좌) 기압골이 산동반도 서쪽에 있는 것을 확인할 수 있다. 이 기압골이 12일 새벽에 영향을 주는데, 그 기압골의 후면의 풍속 편차를 주목할 필요가 있다. 기압골의 전면에는 능이 강하게 있으며, 기압골의 후면에는 북서류가 내려오는데, 이 북서기류의 강도가 분석장(모델 초기장)에서 실제 관측자료보다 5~10kts 정도 약하게 나타나고 있다(그림 5-19 우). 다시 말하면 이 기압골은 모델에서 예측하는 것보다 강화된다는 것을 의미한다.

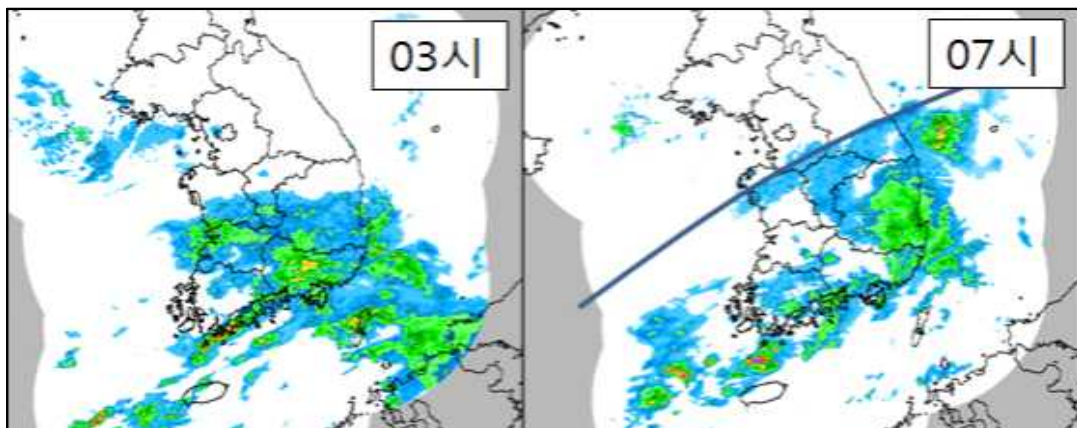


그림 5-20. 2019년 1월 12일 레이더 합성영상(HSR) (좌) 03시 관측, (우) 07시 관측 (실선: 지상 강수가 관측된 경계)

위의 모델장으로 다시 돌아가서 생각해보면, 모델에서 예측하는 기압골은 실제보다는 약하며 실제로는 중층의 강수 강도가 더 강화될 것이다. 따라서 지상에서 강수가 관측될 가능성이 커지고, 실제로 그림 5-20에서 충청권까지 강수 현상이 나타난 것을 확인할 수 있다【겨울예보 사례분석 5-2】.

5. 3. 3. 700hPa이 건조한 사례

그림 5-21의 2020년 3월 7일 09시 사례는 700hPa이 건조했던 사례로 예측이 틀렸던 사례는 아니지만 눈여겨볼 필요가 있어 이 장에 수록하였다.

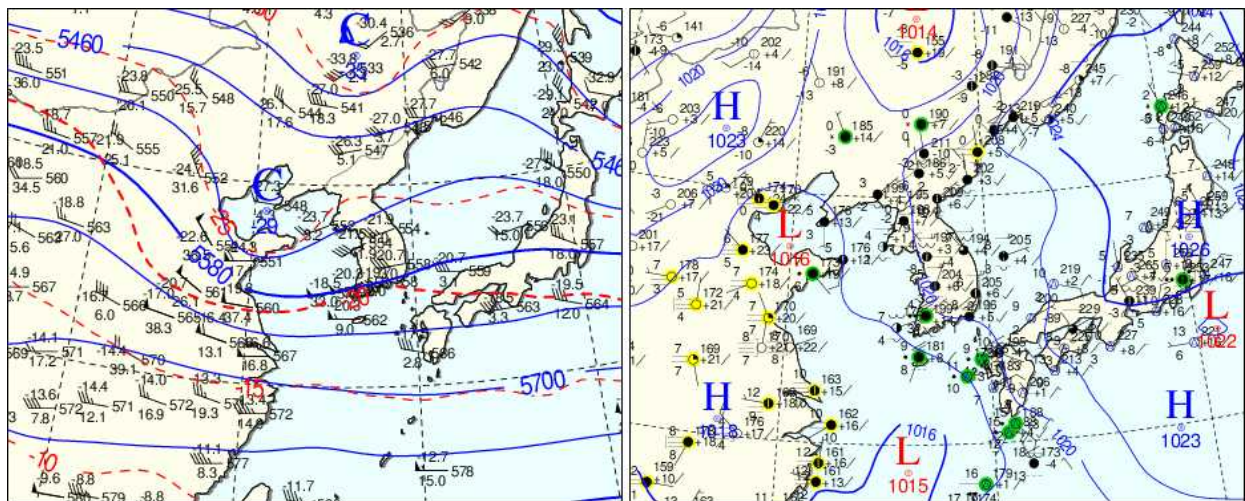


그림 5-21. 2020년 3월 7일 09시 (좌) 500hPa 일기도, (우) 지상일기도

지상일기도에서는 서쪽과 남쪽에 저기압이 있으나 거리가 멀어 중부지방에 영향을 주기는 어려운 형태이다. 다만 500hPa을 보면 기압골이 깊고 한기를 동반한 상태로 위치하기 때문에 중층 강수를 고려해 보아야 한다.

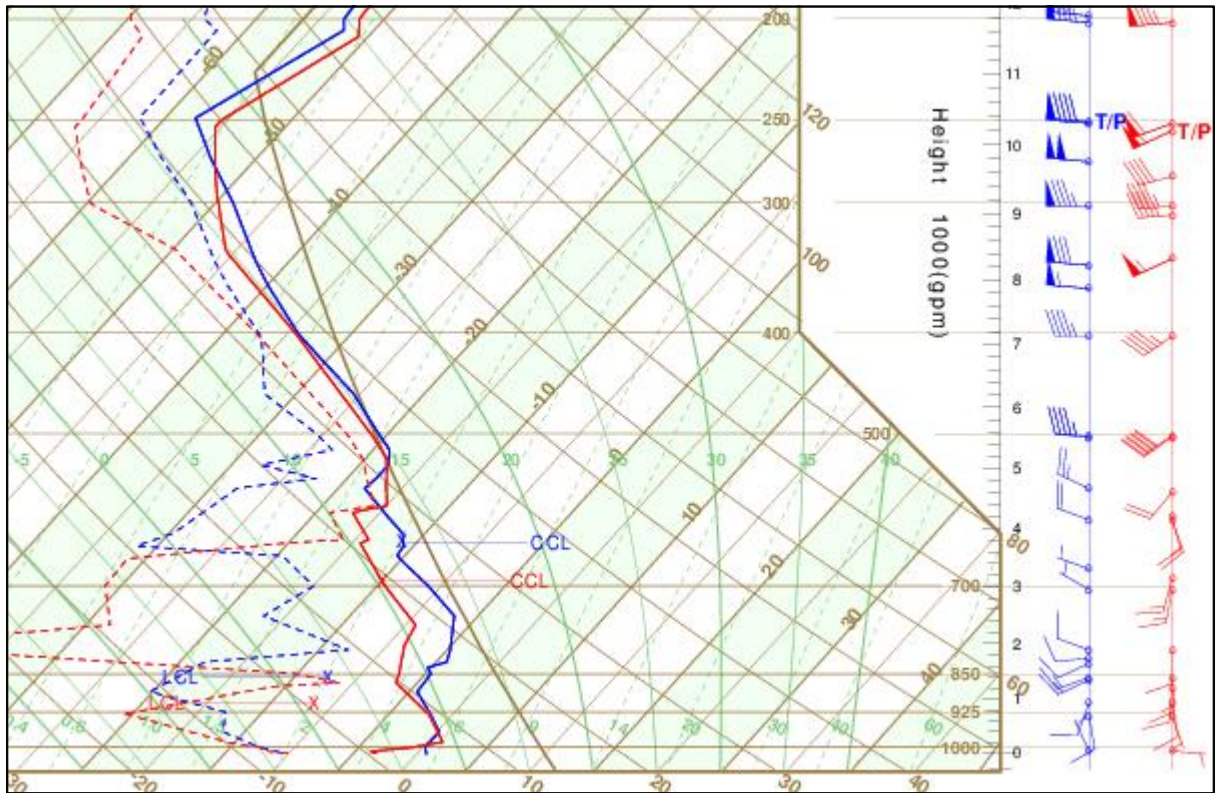


그림 5-22. 2020년 3월 7일 09시 오산 단열선도

그림 5-22의 오산 단열선도를 보면 기존의 사례들과는 다른 점을 볼 수 있다. 포화가 시작되는 고도가 700hPa보다 높게 형성되어 있고 700hPa에서는 상당히 건조한 영역이 나타난다. 그 위의 고도부터 약 300hPa까지 포화되어 있으므로 습윤층의 두께 자체는 두껍다. 그러나 700hPa이 건조하면 강수가 지상에 떨어질 수 없다는 것을 앞에서 통계적으로 확인하였다.

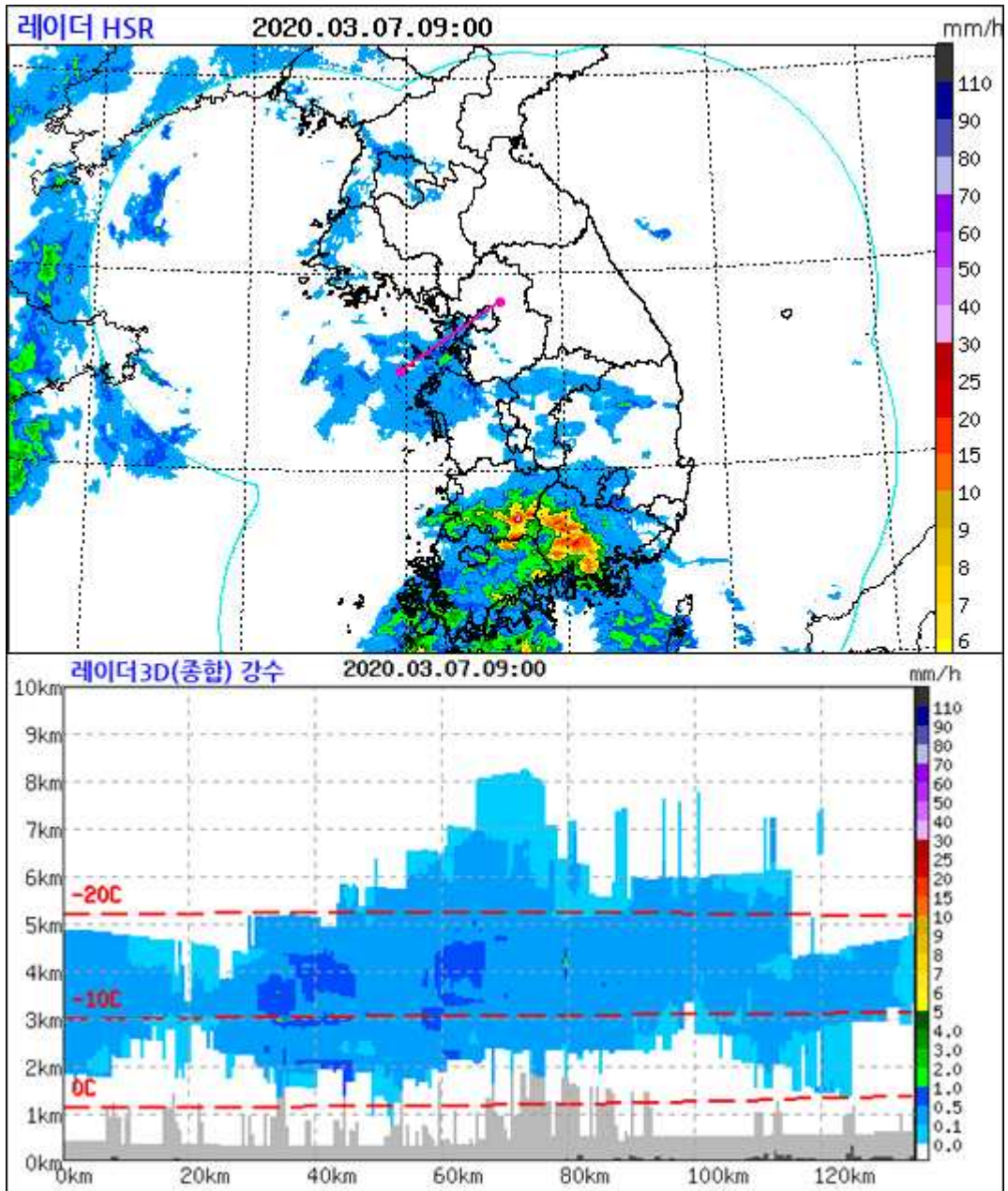


그림 5-23. 2020년 3월 7일 09시 레이더 합성영상(HSR) 수도권 단면도

그림 5-23에서 레이더 단면을 보면 분명 강수대는 일부 운정고도가 7km 이상이 나타날 만큼 발달 되어 있다. 그러나 700hPa이 건조하기 때문에 강수대가 지면까지 떨어지지 못하고 떠 있는 형태가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서 700hPa에서 북서류가 우세하거나, 건조한 상태라면 중층기압골이 강하더라도 강수가 내릴 수 없음을 유의해야 한다.

5. 4. 중층기압골에 의한 강수 예보 흐름도

중층강수는 기본적으로 하층 수증기에 기반하는 강수가 아니기 때문에 강수량을 기록하는 것이 쉽지 않다. 그러나 다음 흐름도를 따라 조건이 잘 맞는다면 모델에서 강수를 모의하지 않더라도 적극적으로 강수 도입을 검토해야 한다.

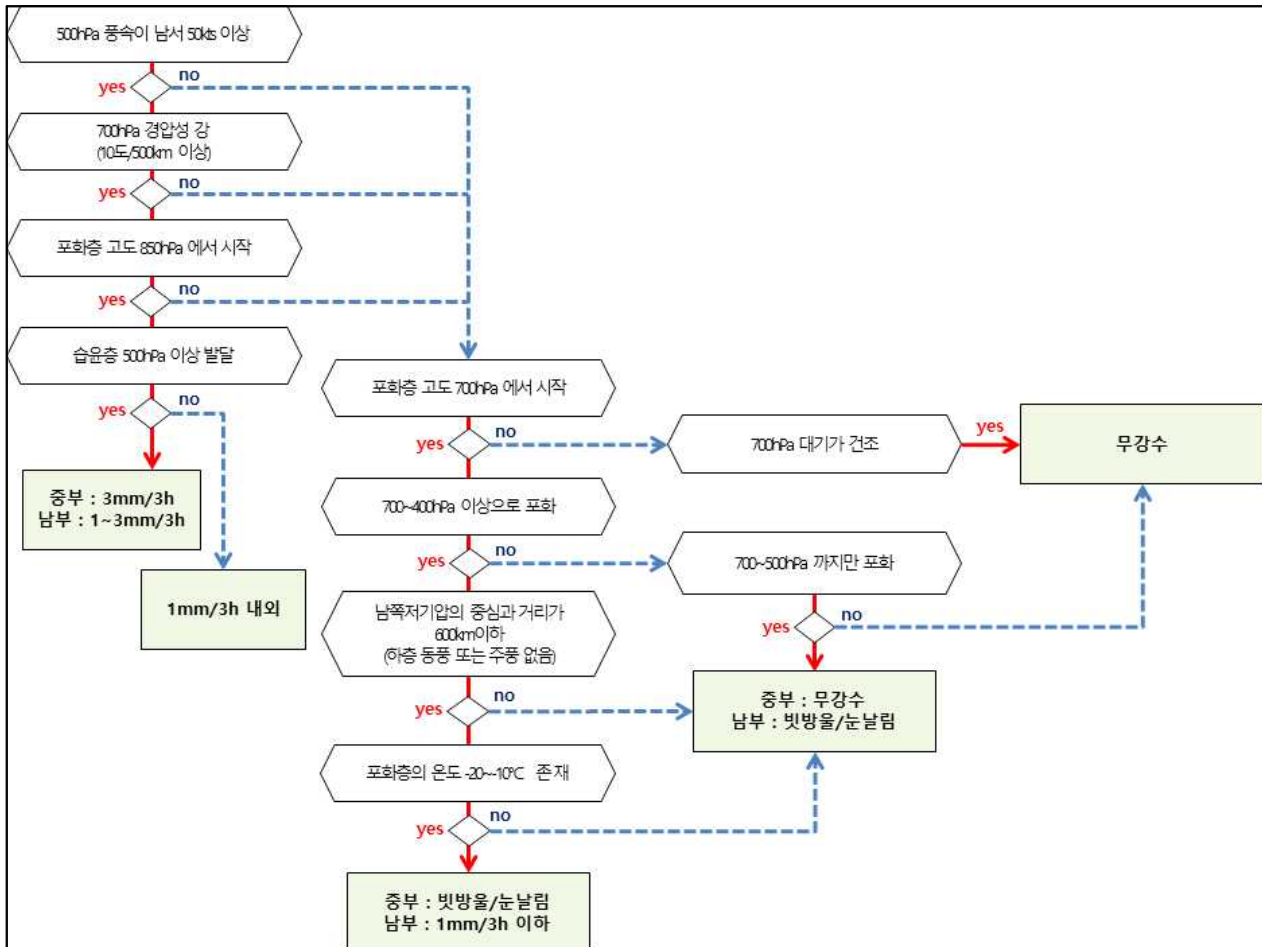


그림 5-24. 중층기압골에 의한 강수 예보 흐름도

《Why?How!》 제4권 ‘겨울예보 사례분석’ 가이던스 연계 내용

- 5-1. 2019년 12월 26일 사례: ‘중부내륙 중층 기압골에 의한 대설’
- 7-1. 2019년 1월 12일 사례: ‘남쪽골은 속임수, 진짜는 서쪽 기압골’

겨울 예보

6. 습구온도를 이용한 강수형태 예보



6. 습구온도를 이용한 강수형태 예보

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 알아보려고 한다.

6. 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/g이며, 고체에서 액체로 바뀔 때 용해열은 약 79cal/g이다. 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.

6. 2. 습구온도계의 원리

그림 6-1과 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.

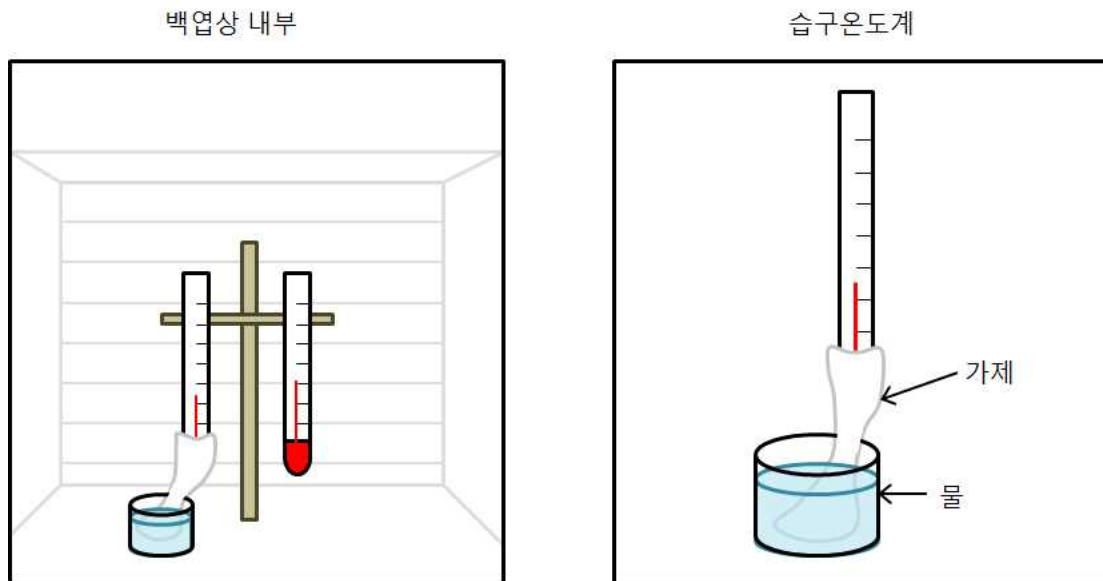


그림 6-1. 백엽상 내부의 습구온도계 모형 (좌) 백엽상 내부, (우) 습구온도계

6. 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.

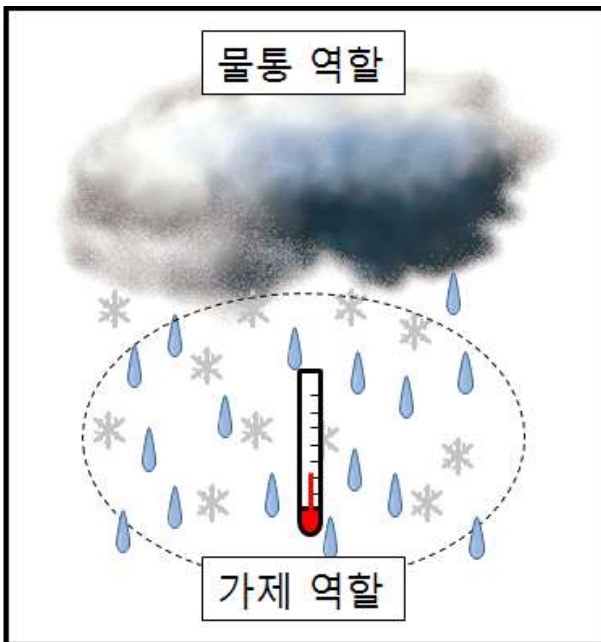


그림 6-2. 강수현상과 관련한 습구온도의 원리 모식도

그림 6-2와 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.

6. 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 상대 습도에는 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.

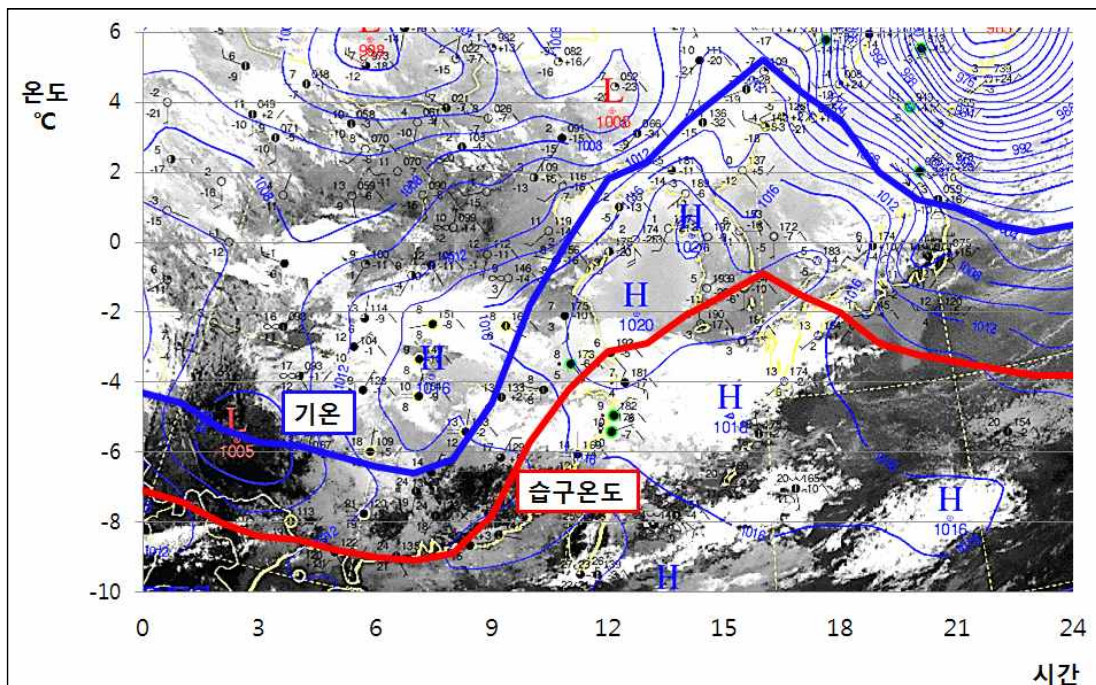


그림 6-3. 2018년 3월 2일 서울의 기온(파란색)과 습구온도(붉은색) 분포도
바탕은 2일 12시(KST) 지상일기도와 적외영상

그림 6-3은 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.

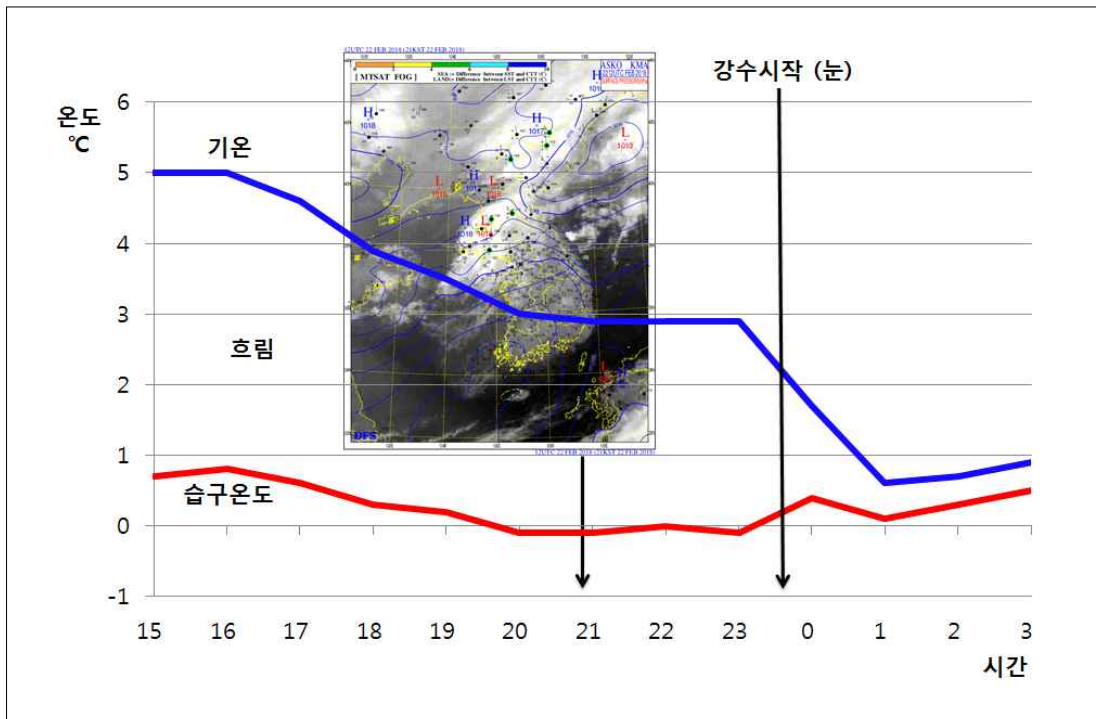


그림 6-4. 구름이 끼고 비(눈)가 내린 날씨의 기온과 습구온도 변화
(2018년 2월 22일 15시에서 23일 03시까지의 서울의 기온과 습구온도)

그림 6-4는 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.

6. 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°C 고도) 또한 급격한 변화를 보인다. 시시각각 변하는 기온을 기준으로 강수형태를 예측하는 것은 너무 많은 오차를 내포하는 것이다.

둘째, 강수가 나타나는 상황이라든가 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 6-1과 같이 눈과 비 구분에 활용하는 데 상당한 어려움이 있다.

표 6-1. 포화되었을 때의 빙결 고도인 습구온도 0°C의 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.

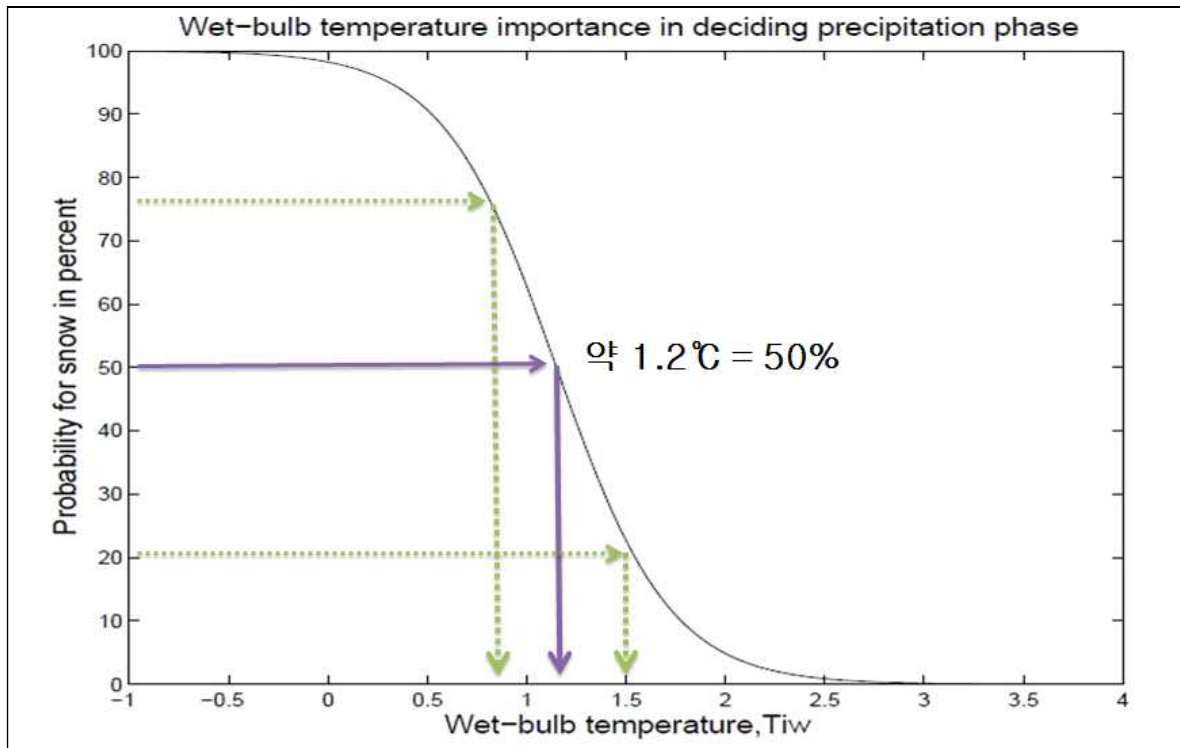


그림 6-5. 지상의 습구온도 분포에 따른 강설 확률(Häggmark and Ivarsson, 1997)

그림 6-5는 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【겨울예보 사례분석 6-2】.

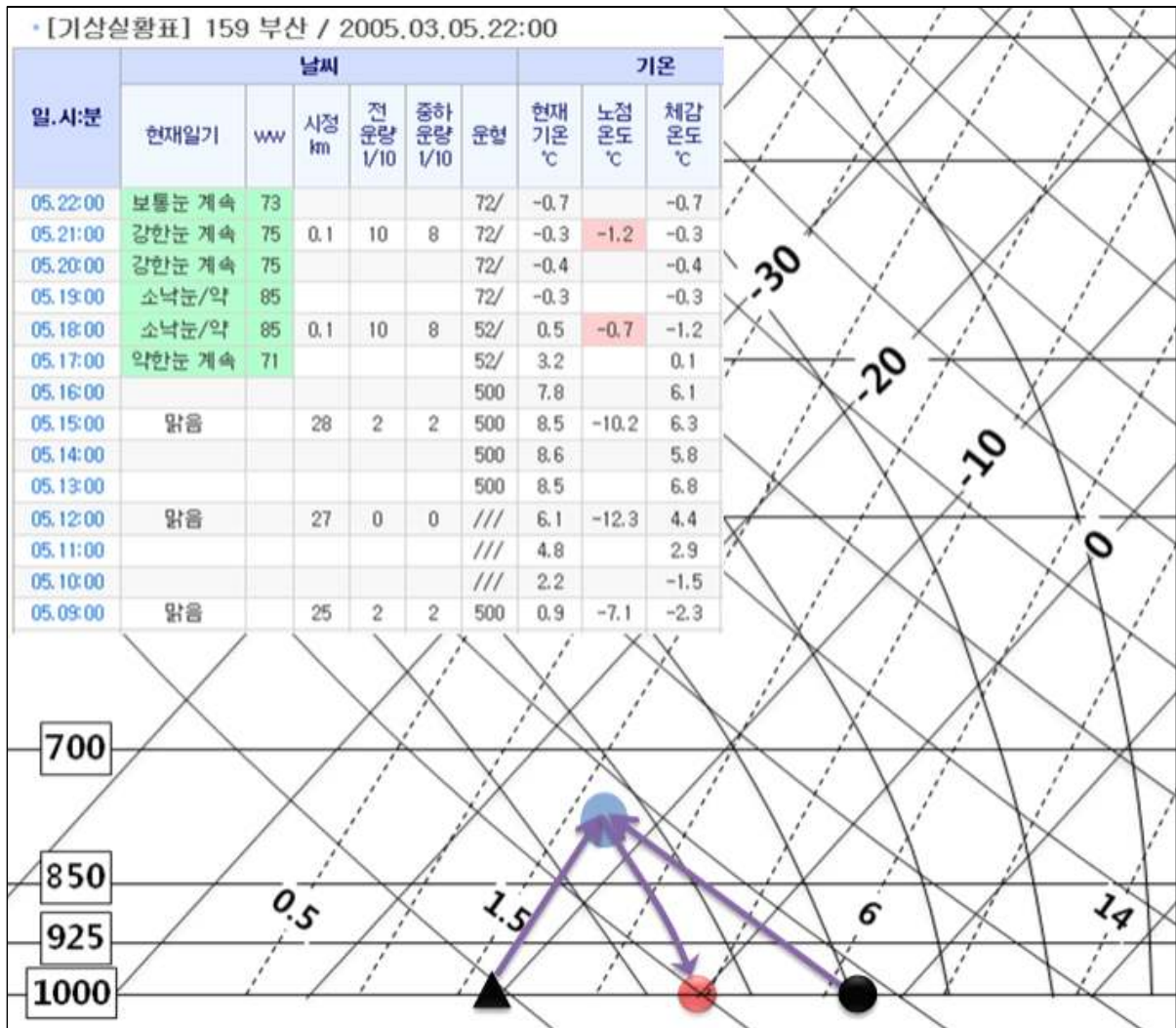


그림 6-6. 2005년 3월 5일 부산에 대설이 내린 사례로서, 15시에 관측한 기온과 이슬점 온도로부터 구한 습구온도 (약 0℃)의 위치(붉은색)

그림 6-6은 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 6-6의 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 습구 온도 0℃와 같아졌다. 기온이 아무리 높아도 건조한 상태에서 습구온도가 낮으면 눈으로 내릴 수 있다는 것을 보여준 대표적인 사례였다.

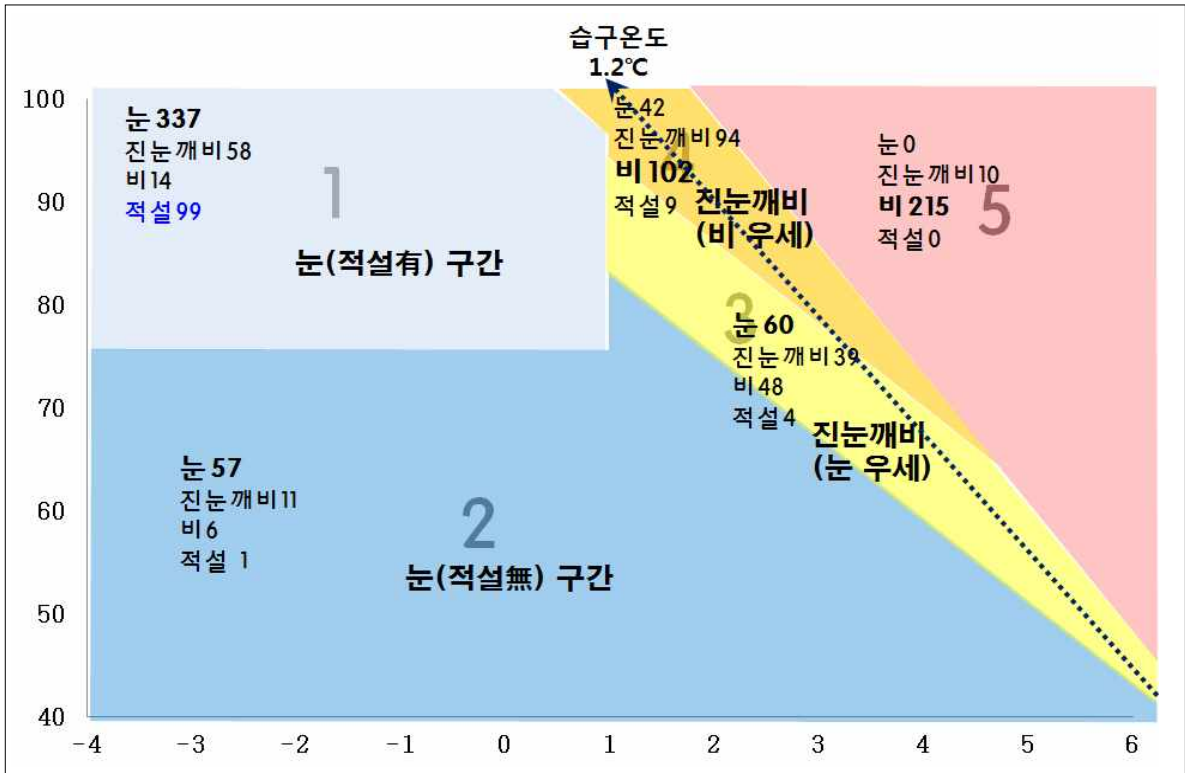


그림 6-7. 기온(x축)과 상대습도(y축) 분포에 따른 우리나라 강수형태
(점선 화살표: 습구온도 1.2°C)

그림 6-7은 2003~2011년 우리나라 겨울철(12~3월) 고층관측소 7개 지점에서 강수를 기록한 사례를 기준으로 강수형태를 구분한 그래프이다. 총 1212개 사례 중 눈은 877건, 젖눈깨비는 54건, 비는 281건으로 나타났다. 현재 현업모델에서 위 기준을 이용하여 강수형태를 표출하고 있다. 우리나라에서도 젖눈깨비 구간에 습구온도 1.2°C(점선 화살표)가 위치하는 것을 알 수 있다.

Key Point!

습구온도 1.2°C는 눈과 비를 구분하는 기준이다.

6. 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.

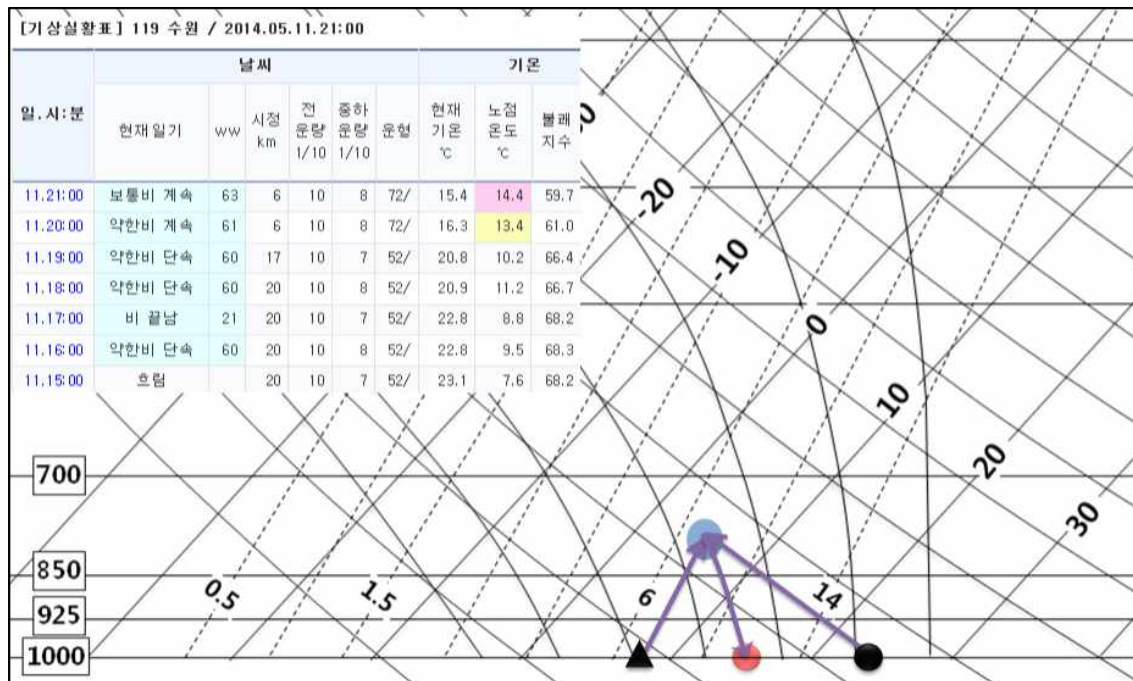


그림 6-8. 2014년 5월 11일 수원에 비가 내린 사례로서, 15시에 관측한 기온과 이슬점 온도로부터 구한 습구온도(약 15°C)의 위치(붉은색)

그림 6-8은 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.

6. 7. 습구온도 활용 시 주의사항

6. 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.

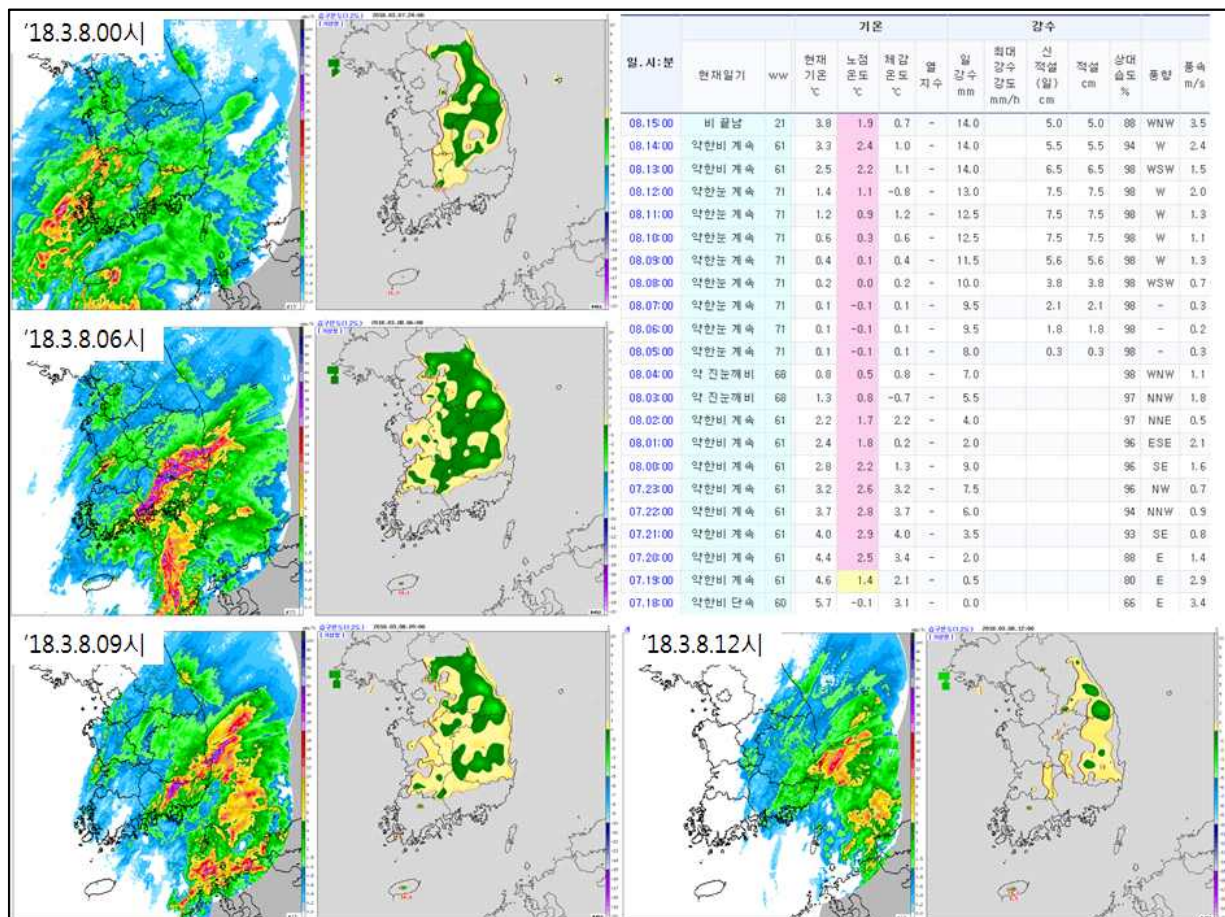


그림 6-9. 2018년 3월 8일 대구지역 레이더 영상과 습구온도 분포(1.2℃ 이하 채색) 및 매 시각 관측 결과

그림 6-9는 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 남부 지역은 비 구역에 위치해 있다.

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

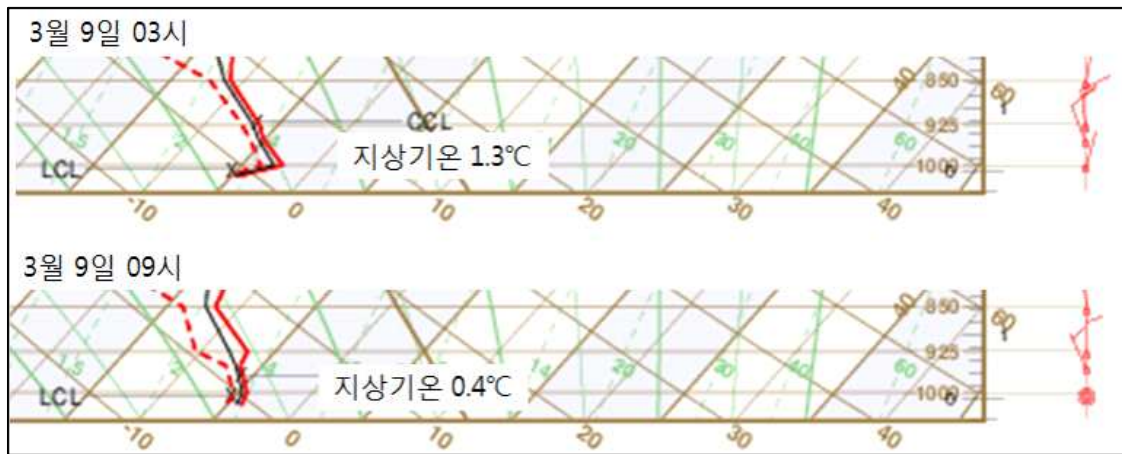


그림 6-10. 그림 6-9에서 보여준 대구지점의 2018년 3월 8일 강수사례에서 3시(위)와 9시(아래) GDAPS 단열선도 초기장

그림 6-10은 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. 이때 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 에코가 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.

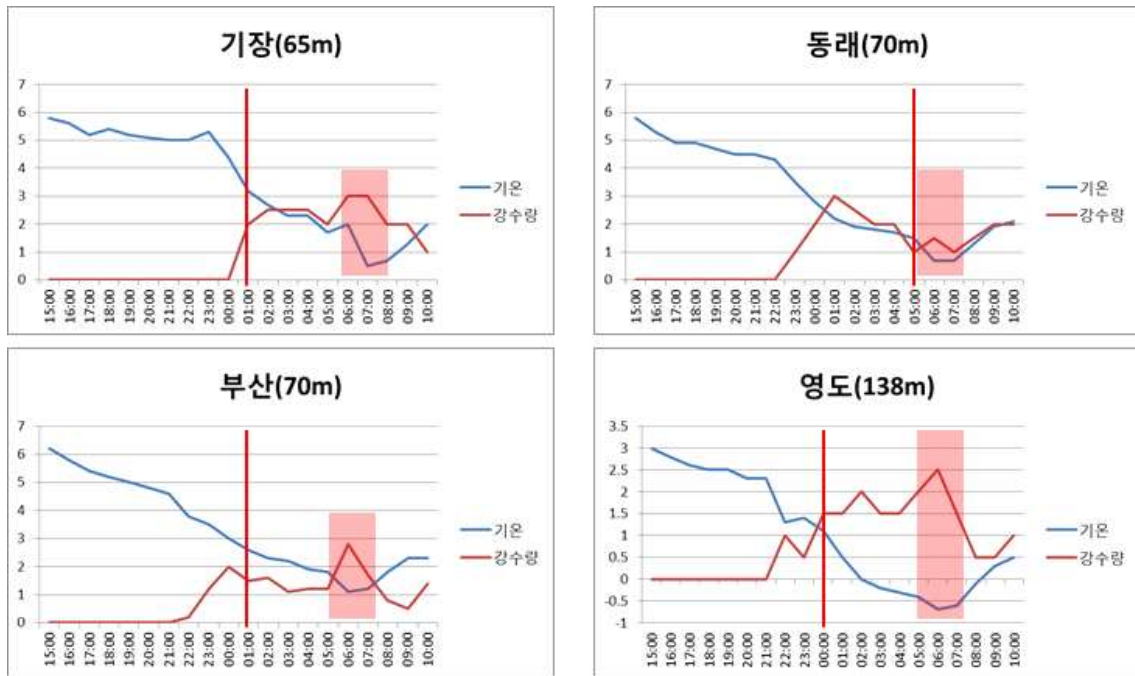


그림 6-11. 부산 주요지점별 2018년 3월 20일 15시~21일 10시까지 매 시각 기온, 강수량 분포도
 (붉은색 수직선: 강수가 시작되는 시점으로서, 상대습도가 90% 이상을 나타내기 시작한 시각, 붉은색 사각형 구간: 강수가 증가된 시각)

그림 6-11은 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, 강수 강도가 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.

6. 7. 2. 해상에서 온난이류 유입에 의한 습구온도 상승

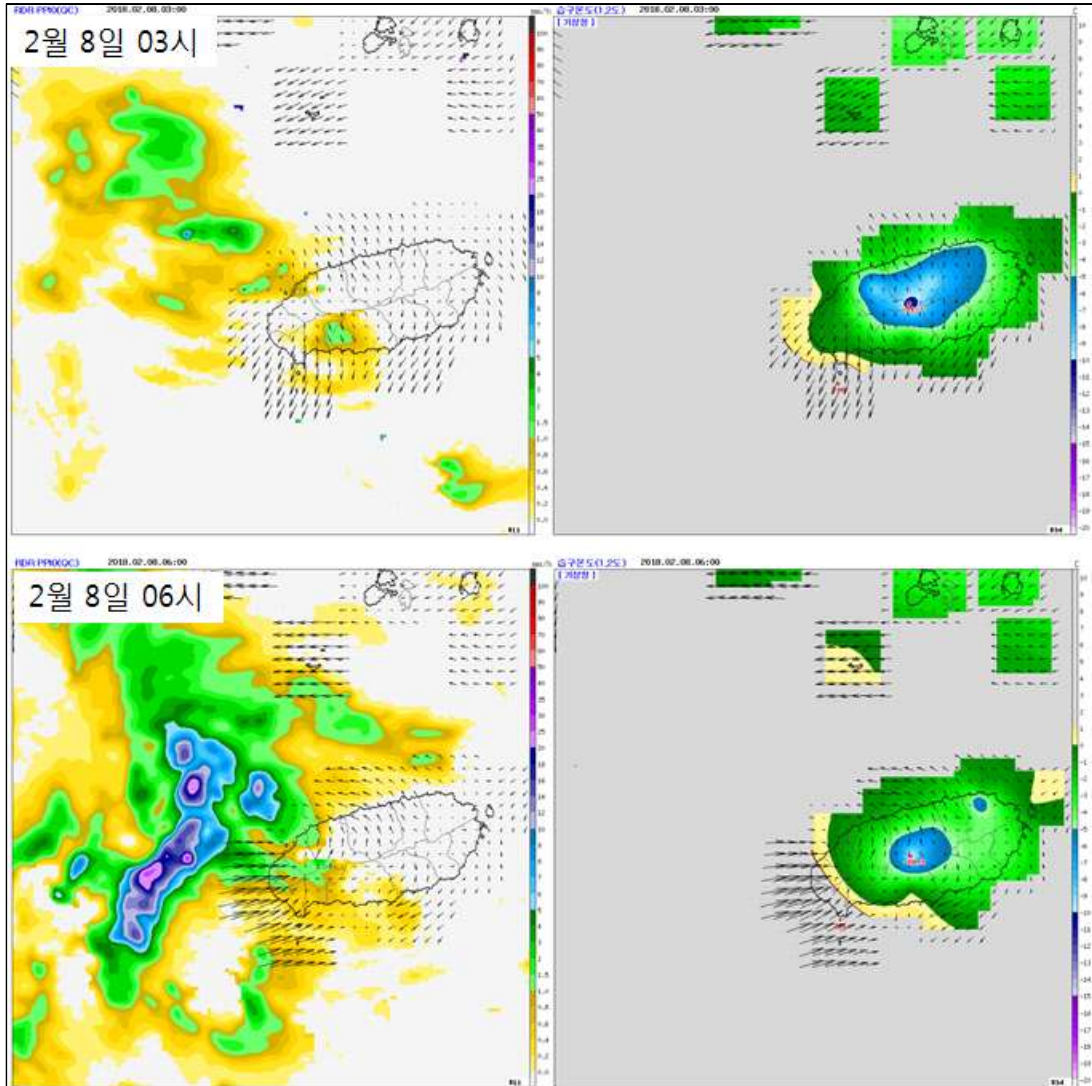


그림 6-12. 제주지역 대설 발생 사례인 2018년 2월 8일 3시와 6시의 레이더영상(왼쪽)과 습구온도 1.2°C 이하(채색구역) 분포도

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°C 이하로 눈이 올 수 있는 상황을 나타냈다. 그러나 6시 경에 강한 예코가 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 6-12에서 나타난 바와 같이 6시에 제주도 서쪽지역은 습구온도가 1.2°C보다 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 가뭄기 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【겨울예보 사례분석 6-1】.

6. 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.

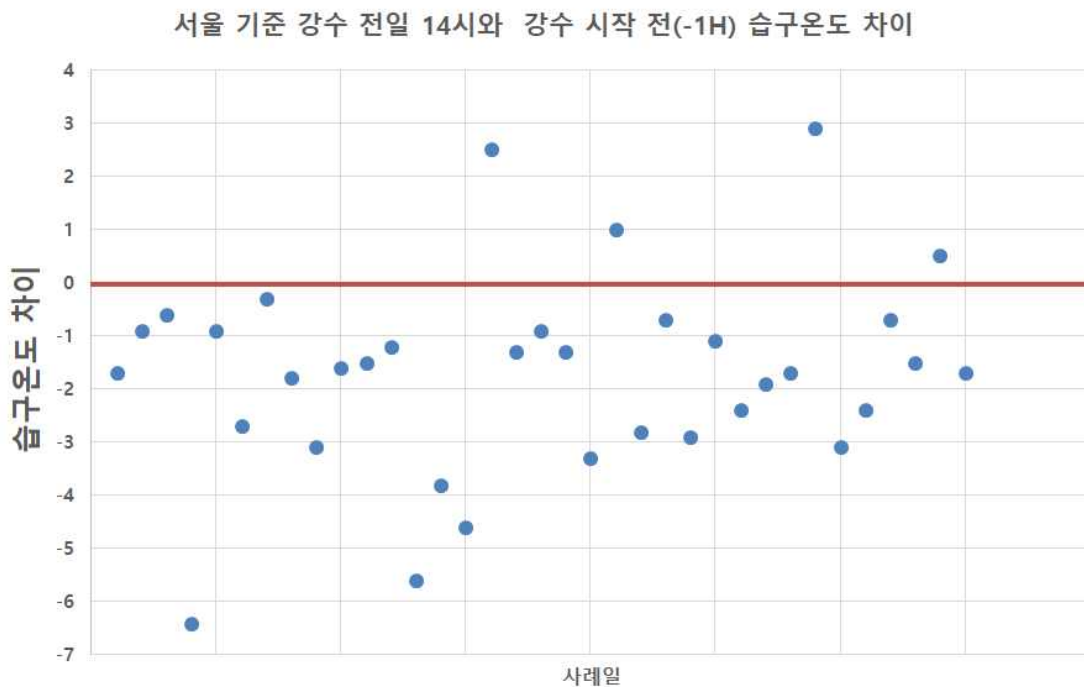


그림 6-13. 3년간(2016~2018년) 겨울철(12~3월) 서울지역에서 강수 전일 14시와 강수 시작 1시간 전 습구온도의 차이를 나타낸 분포도. 붉은 색의 직선은 습구온도의 차이가 없는 0을 의미함

그림 6-13은 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°C 정도의

습구온도 하강이 관측되었다. 이 분포도는 낮에서 야간으로 갈수록 기온하강에 따른 습구온도의 하강률을 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.

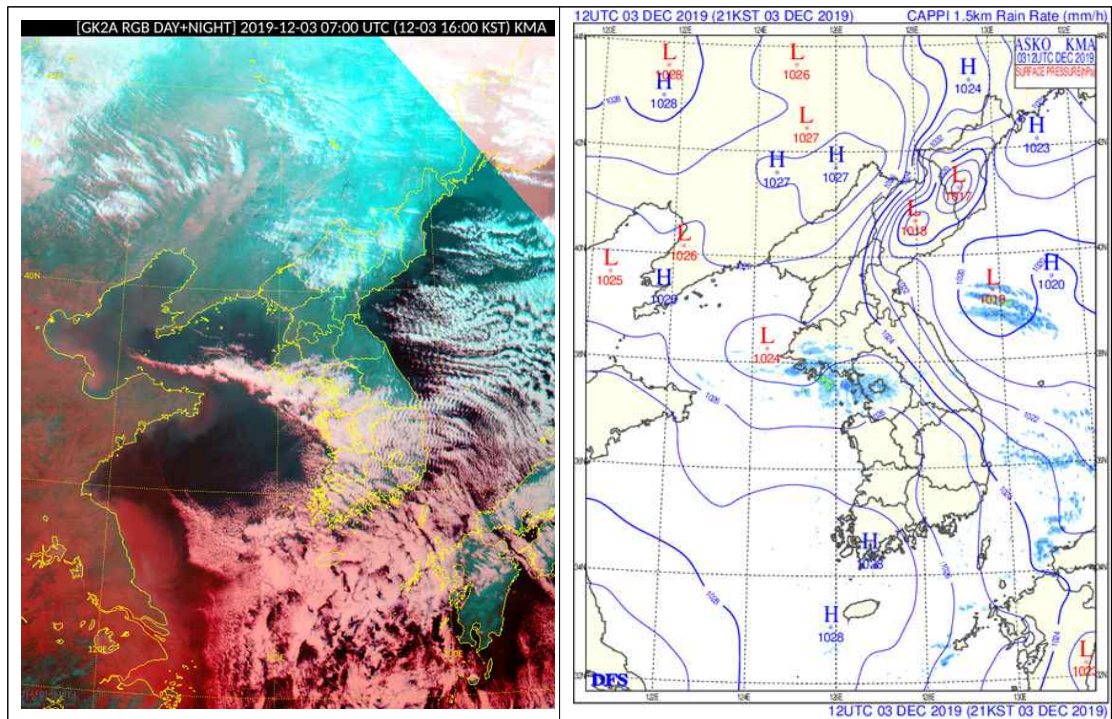


그림 6-14. (좌) 2019년 12월 3일 16시 위성영상 (우) 같은 날 21시 지상일기도+레이더 중첩장. 지상 저기압 중심이 서한만에서 백령도로 이동하면서 저기압 중심의 남쪽으로 서~남서풍의 풍계에서 온난이류에 의한 구름대가 오후부터 지속적으로 유입

그림 6-14는 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.

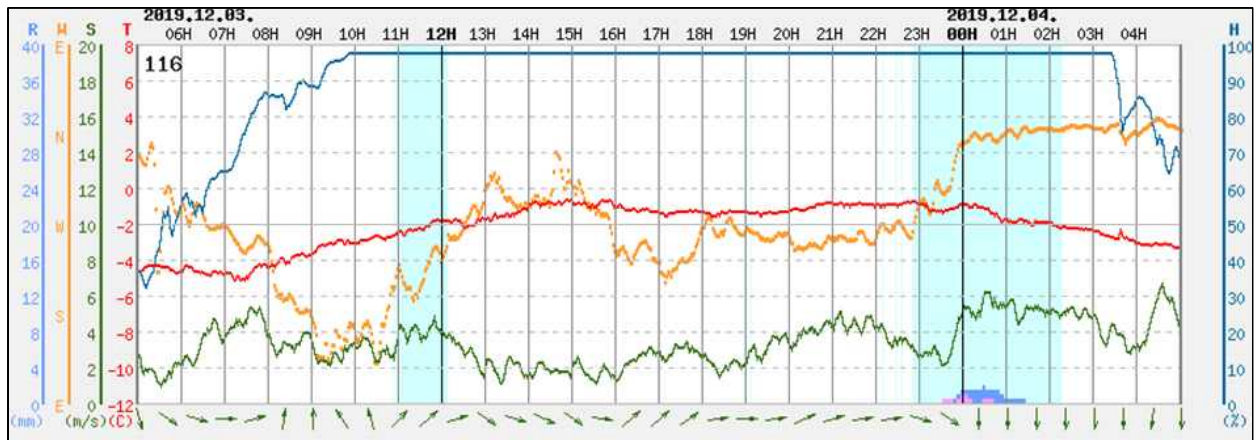


그림 6-15. 관악산 레이더 관측소의 3일 05시부터 4일 05시까지의 기상관측 시계열

- 상대습도: 3일 10시부터 100%로 포화
- 기온: 포화된 이후에도 14시까지 기온이 상승하였고, 이후 유지됨

그림 6-15의 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 6-16과 같이 강수예코가 유입된 3일 21시에 중부지방 대부분이 큰 음의 편차를 보여 모델에서 예상한 강수형태와 다르게 대부분 지역에서 비가 내렸다.

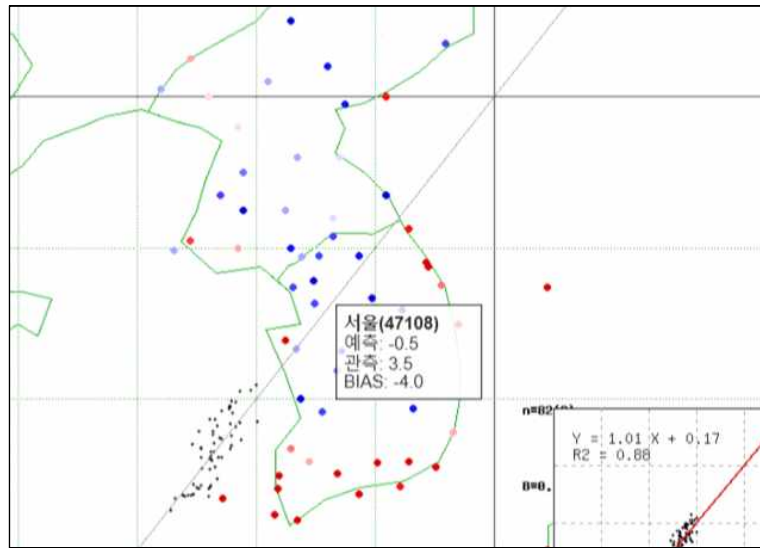


그림 6-16. UM 전구모델 기온 예측과 실황 관측 자료와의 편차로, 붉은색은 모델예상이 실제 기온보다 높게 예측한 것, 파란색은 모델예상이 실제 기온보다 낮게 예상한 것을 의미함. 해당 시각은 2019년 12월 3일 21시 자료이며, UM 전구모델 예측은 3일 9시에 생산한 12시간 후 예측자료를 실황과 비교한 것임

야간에 복사 냉각 효과가 있는 경우에도 지표에서부터 강한 온난이류에 의해 습구 온도가 전일 14시 보다 다음날 강수가 있었던 새벽에서 아침사이 2°C 이상 큰 폭으로 상승한 2개의 예외 사례가 있다(그림 6-13에서 가장 위에 분포한 2개의 사례).

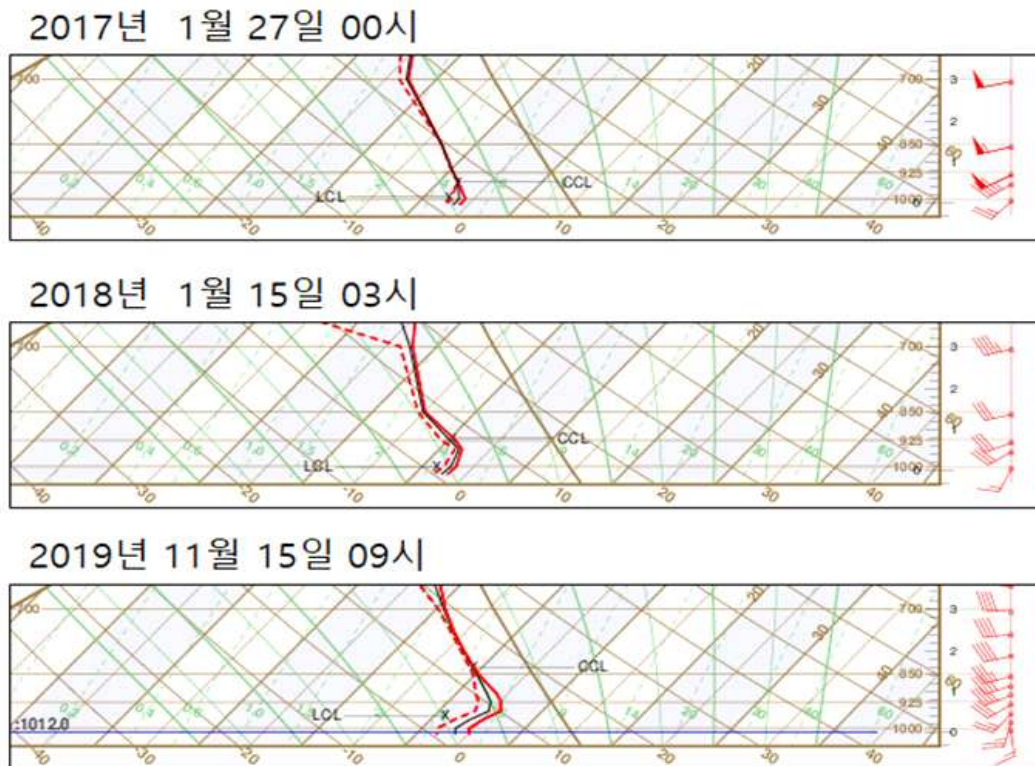


그림 6-17. 그림 6-13의 분포도에서 예외적으로 습구온도가 2°C 이상 상승한 2개의 사례의 서울지역 GDAPS 단열선도(각 시각은 모델 초기장 혹은, 최단 예상시간)

그림 6-17은 그림 6-13에서 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 괴를 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 6-18의 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.

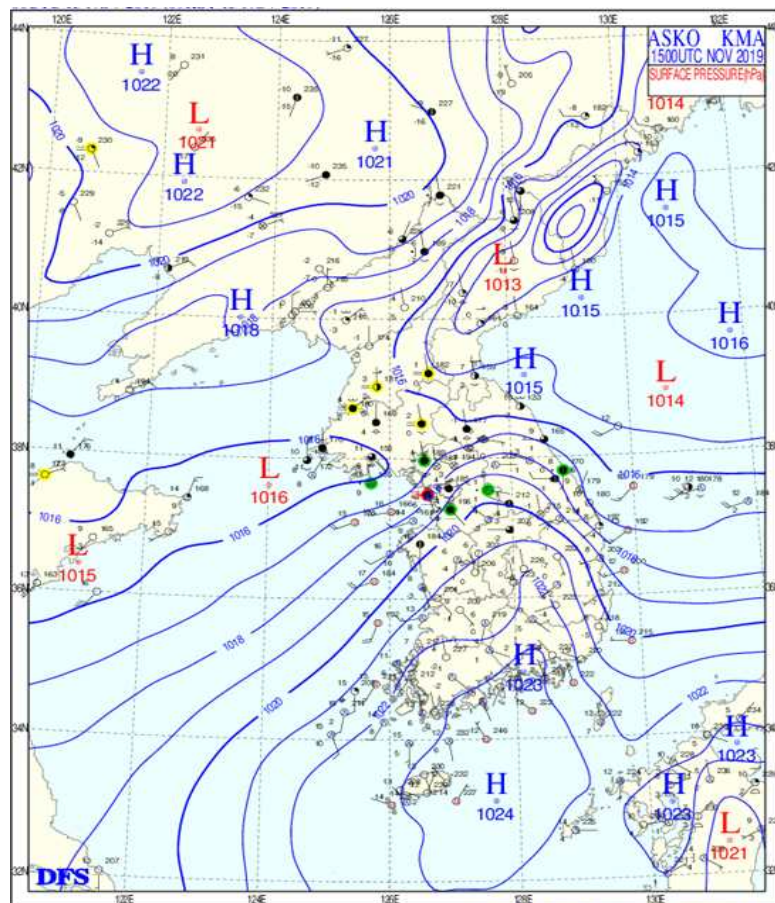


그림 6-18. 2019년 11월 15일 09시 한반도 지상일기도

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 종관풍이 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.

《Why?How!》 제4권 '겨울예보 사례분석' 가이던스 중 '6. 습구온도를 활용한 강수형태판별' 연계 내용

- 6-1. 2018년 2월 8일 사례: '제주도 강수 눈비 판별 오차에 따른 대설'
- 6-2. 2018년 11월 24일 사례: '온난이류 강수의 눈비 구분의 실패'

겨울 예보

부록

업무매뉴얼 요약

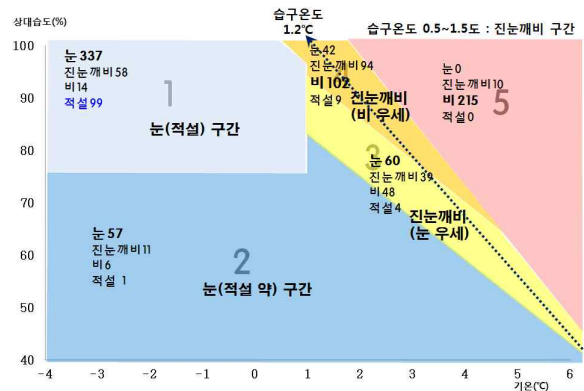
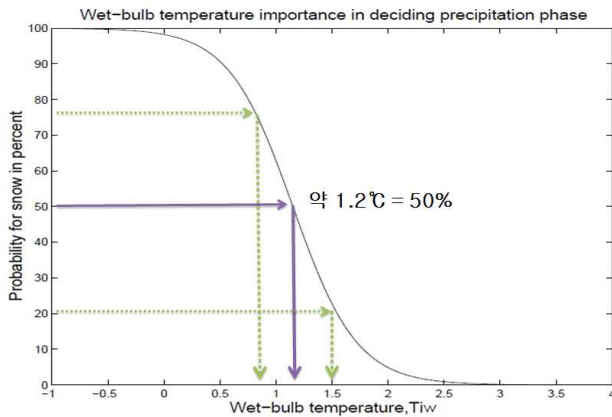


강수형태 판별 순서

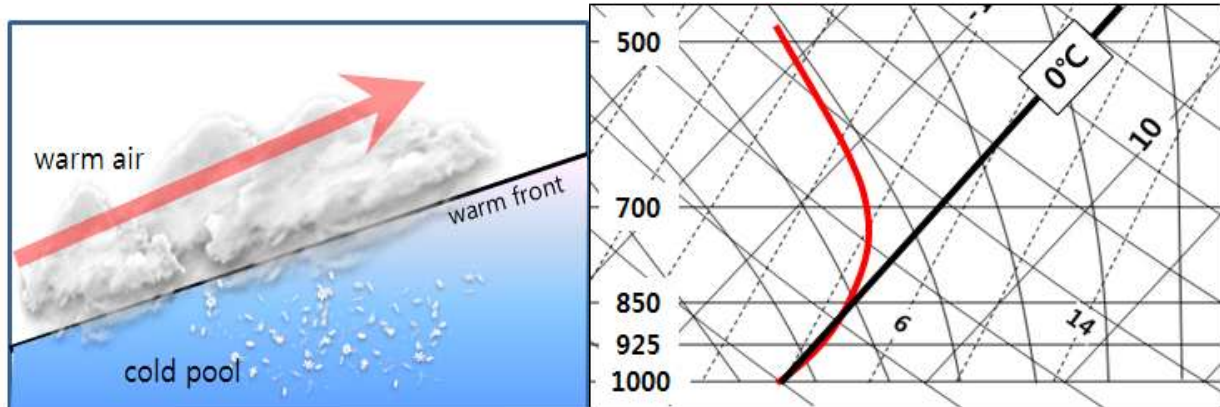
- 종관규모 : 1000-850hPa 층후선도를 이용한 광역적 구분

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

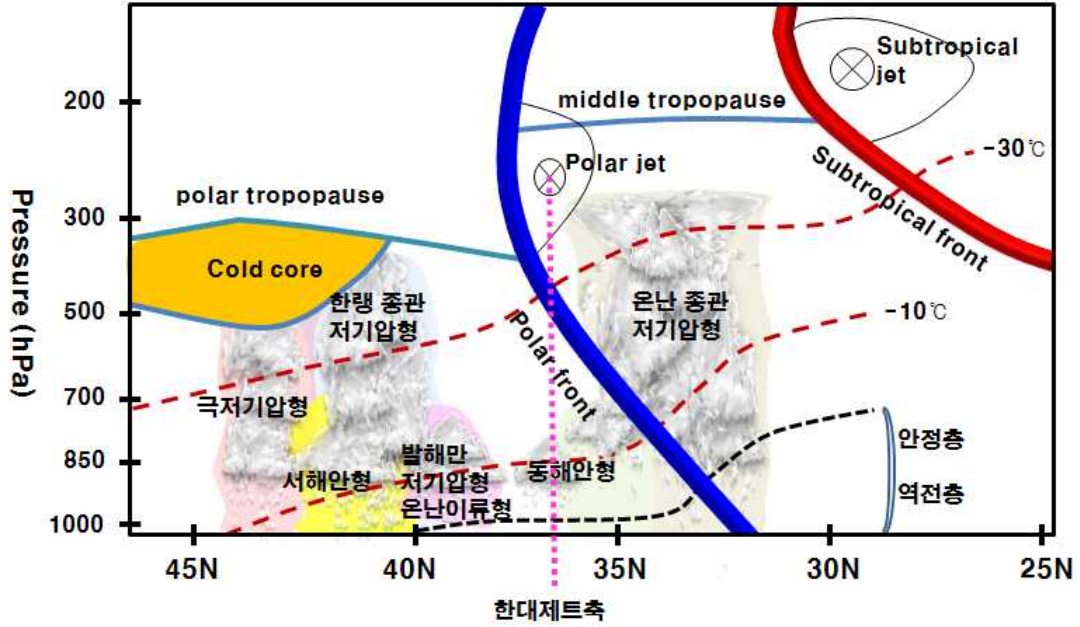


- 남쪽으로 지상 저기압 통과시 구분(925hPa 0~1°C, 850hPa 0°C) 층후선도에서 비 구역에서 눈이 오는 경우 있음

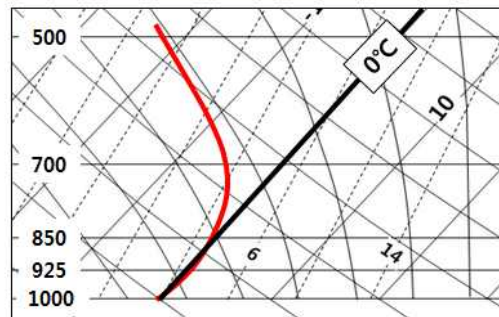
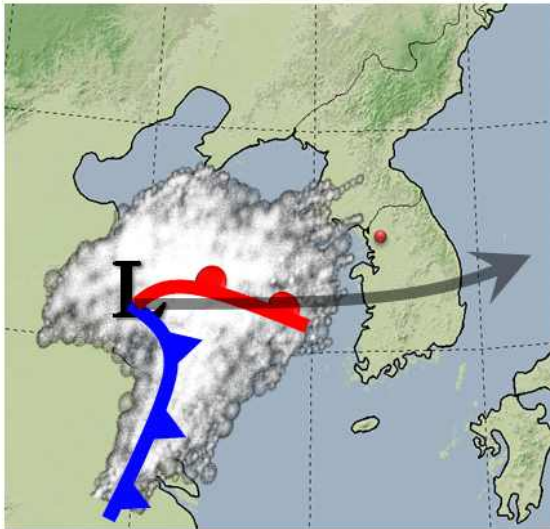


시스템별 강수형태 판별

유형별 강수형태 구분 방법



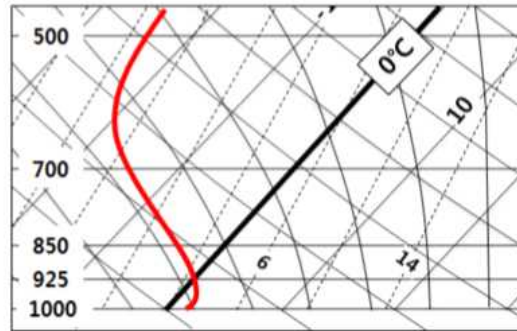
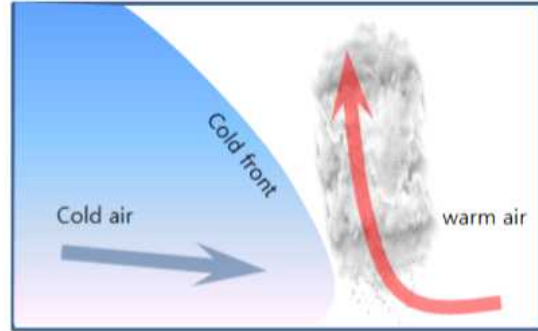
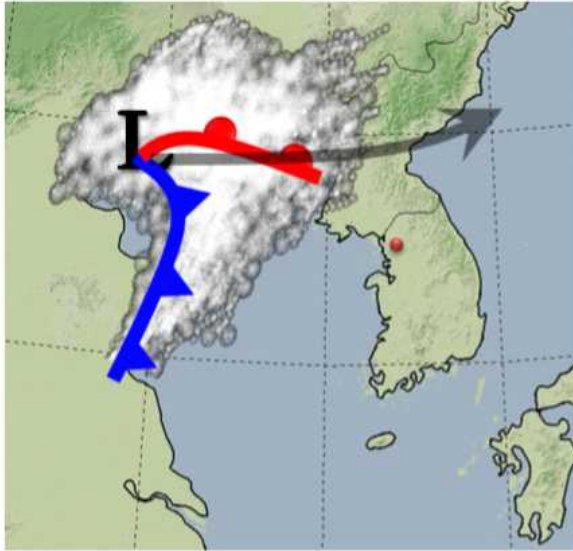
1. 발달한 저기압 : 지상 저기압 중심이 관측소 남쪽을 통과하는 경우



내륙에 찬 공기가 고립된 상태에서, 상승의 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
증후선도: 비 기준에서 눈 관측(참고 불가)
강수직전 빙결고도가 1km 부근에 형성되기도 함
단, 습구빙결고도는 200m 이하여야 함

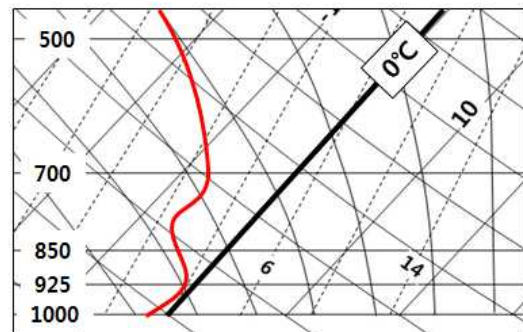
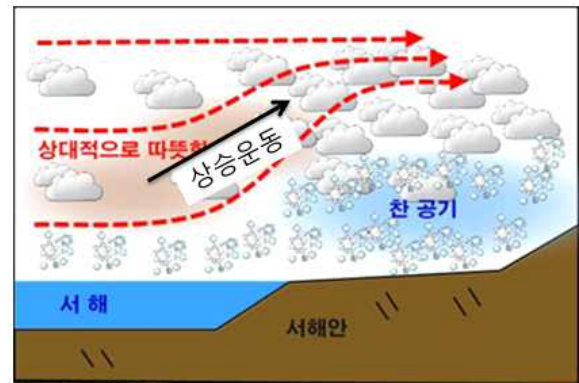
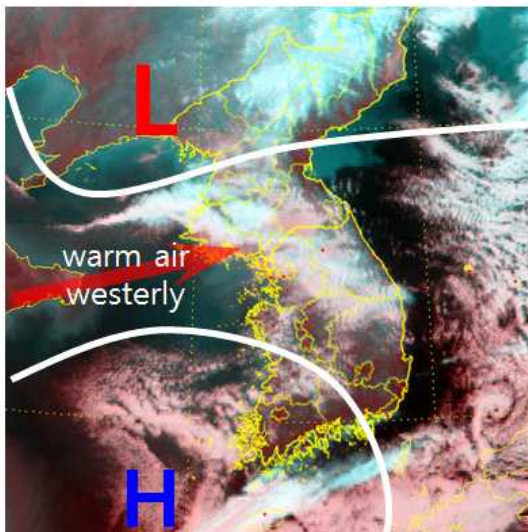
2. 발달한 저기압 : 지상 저기압 중심이 관측소 북쪽을 통과하는 경우



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

- 눈, 비 판단 기준 -
눈, 비 판단 기준: 1000-850(700) 층후선도
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

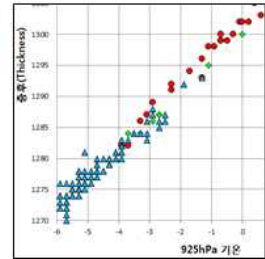
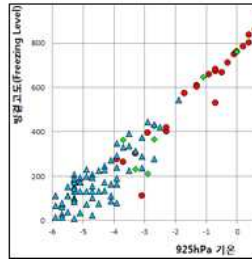
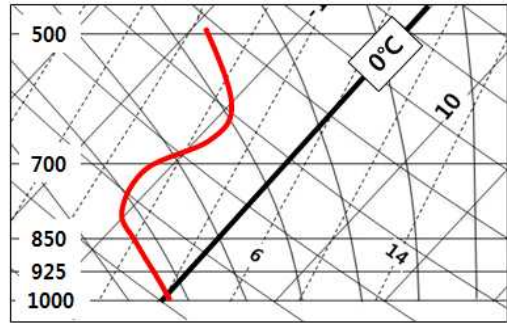
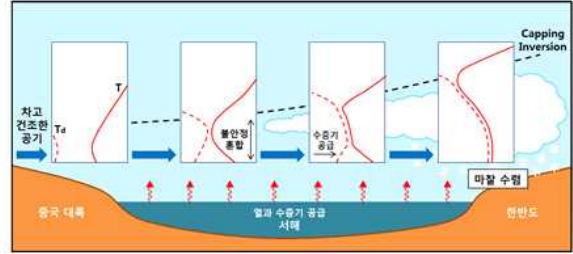
- 눈, 비 판단 기준 -
925hPa 0°C 기준, 지상 습구온도 1.2°C
1000-850(700) 층후선도 이용 불가(역전층으로)
빙결고도는 1km 부근일 수도 있으므로,
습구빙결고도가 중요: 200m 이하

4. Lake Effect(서해안형)

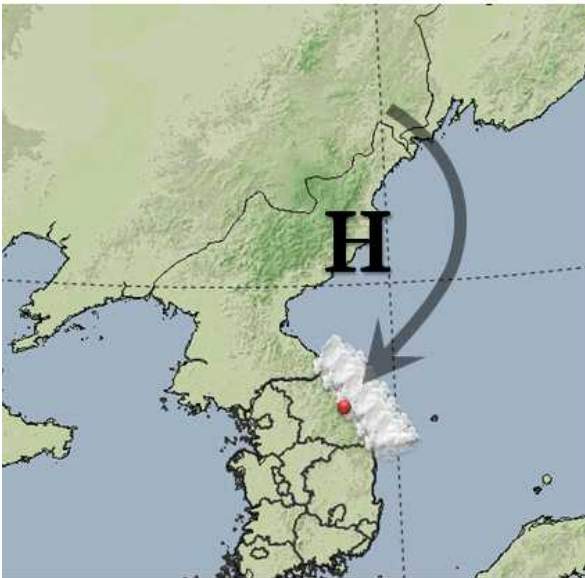


강한 한랭이류와 해기차로 인하여
지상에서 850hPa 부근까지 포화단열기온감을 구조로서,
지상에서 상층으로 기온감율이 크게 나타남

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

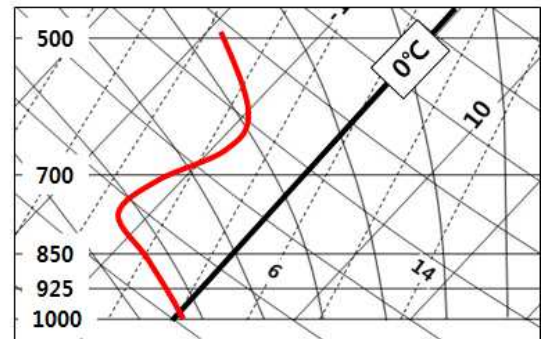
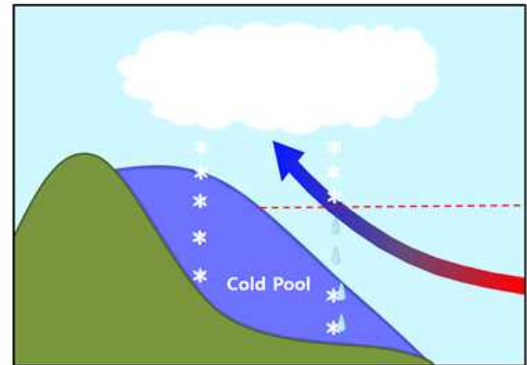


5. 동해안형: 동해상에서 한기이류에 의한 구름대가 산악지형의 영향을 받는 경우

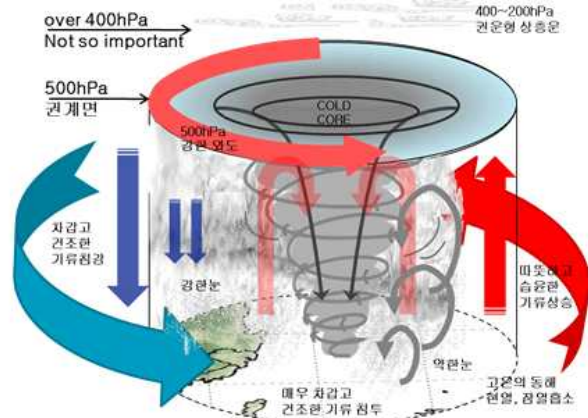
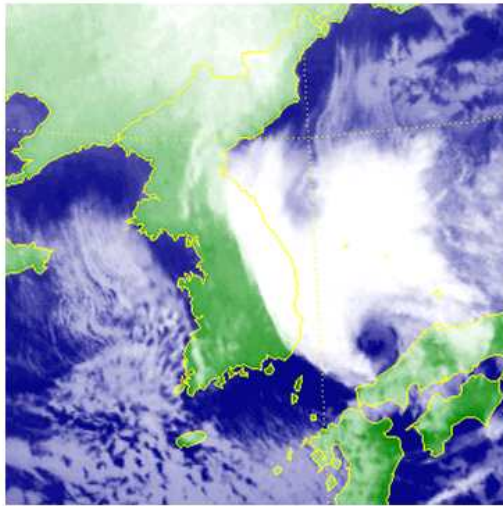


산사면에 찬 공기가 고립된 상태에서,
해상에서 해기차에 의한 구름대가 유입됨에 따라
지상에서 850hPa까지 기온감율이 크지만,
700hPa 부근에는 역전층이 위치

- 눈, 비 판단 기준 -
1000-850hPa 층후 기준값으로 판단 용이
1000-700hPa 층후 기준값 판단 불가(역전층 존재)
925hPa -4°C, 습구온도 1.2 °C

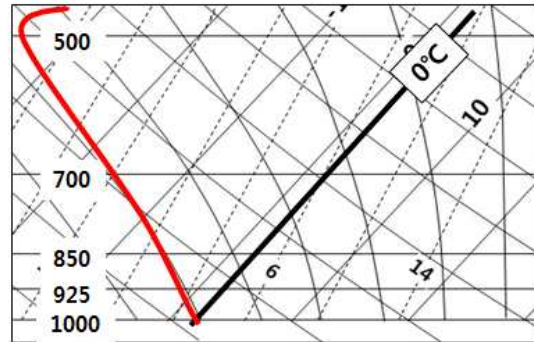


6. 극저기압형: 동해상에서 극공기를 수반한 중규모 저기압이 의해 발생하는 경우



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



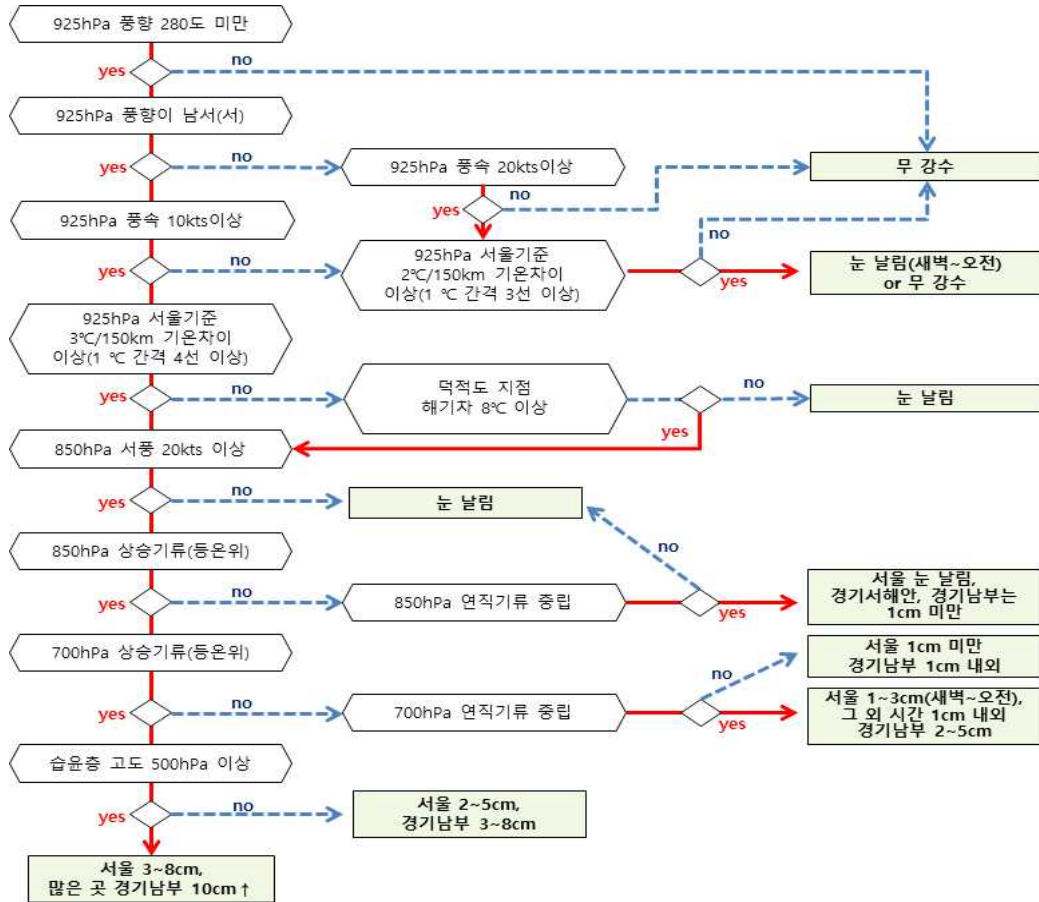
실황분석 기반 분석업무의 시간대별 체크리스트

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 변화하였는지 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 증운형 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)



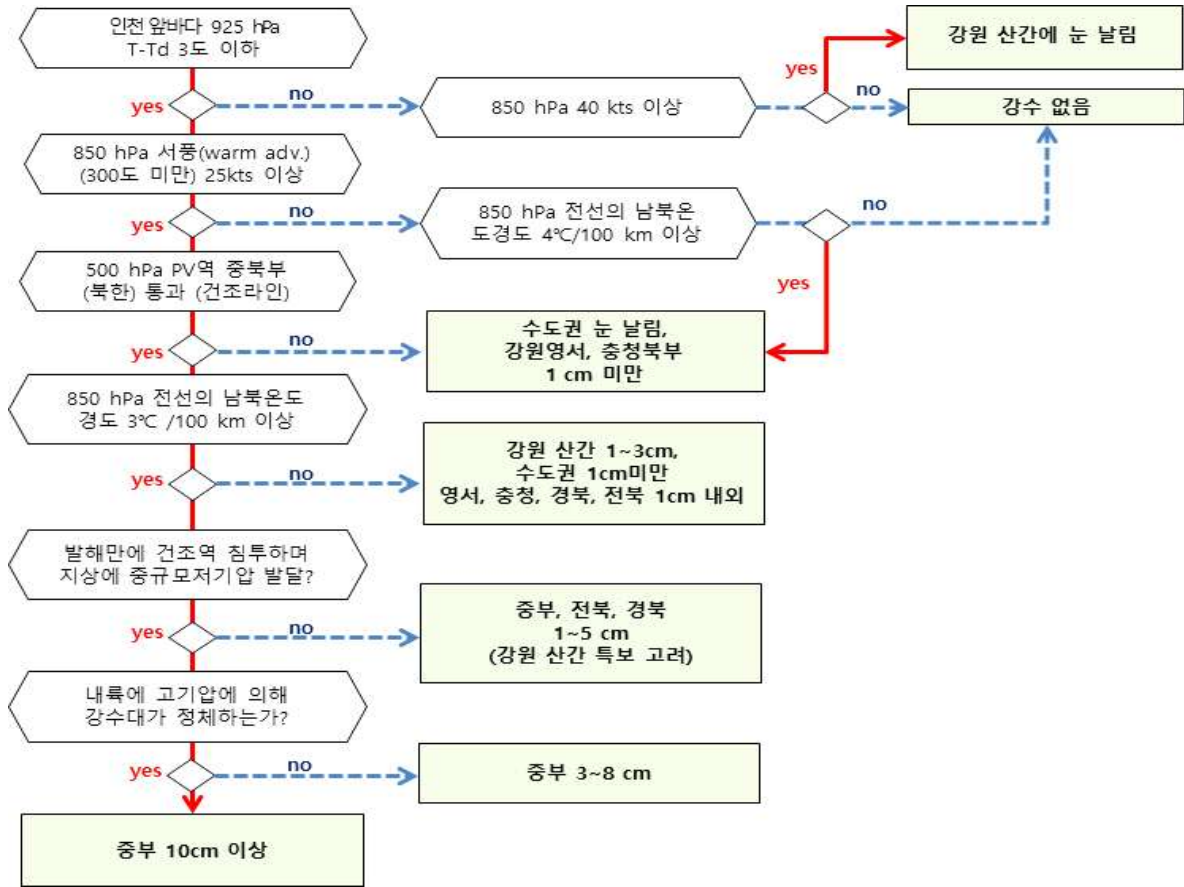
시간대별 실황감시 체크리스트(온난이류)

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
06시	연직바람관측장비 분석을 통해 925~850hPa 일기도 수정 및 강수대 유입과 강도 결정 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)



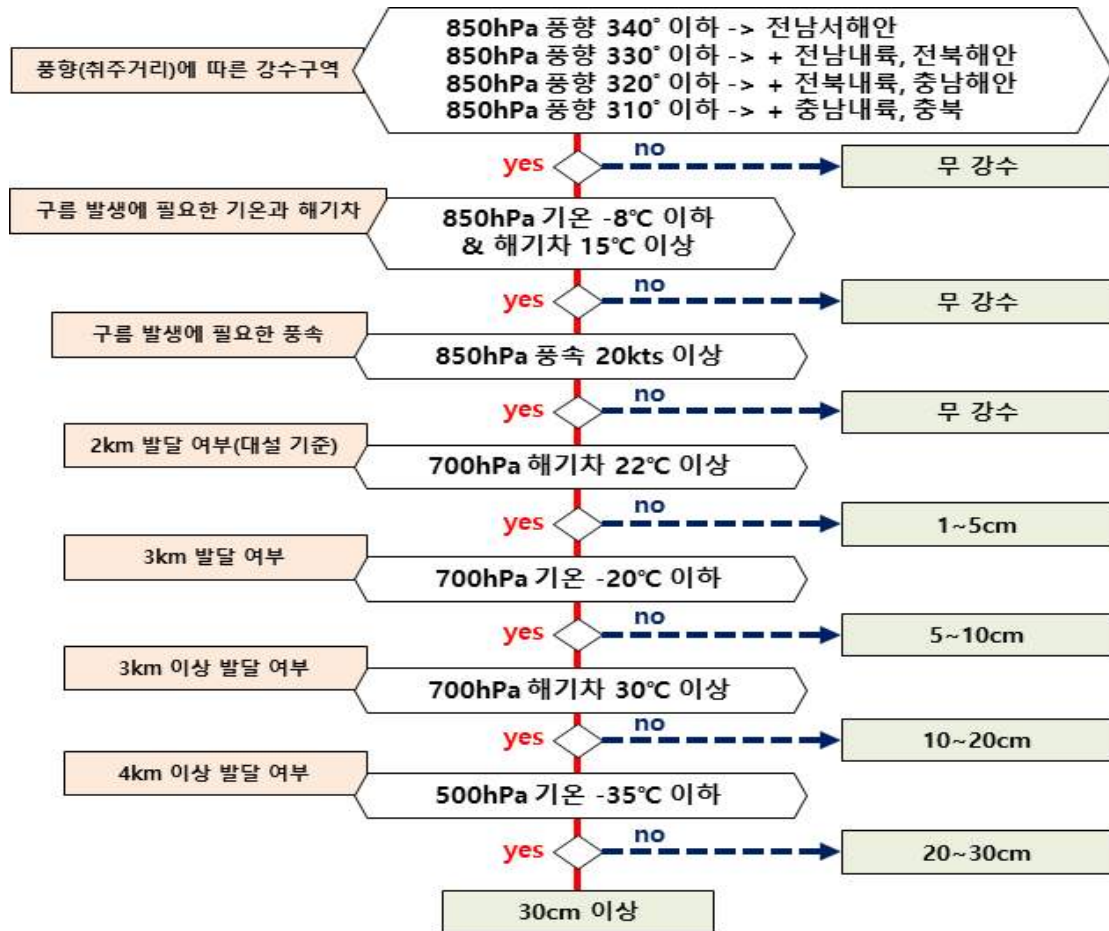
시간대별 실황감시 체크리스트(발해만기압골)

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 실황감시	(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 레이다 에코의 이동속도를 고려하여 외삽하는 것이 더욱 정확함

서해안형 강설예측 (최근 16년('03~'18년) 통계)



시간대별 실황감시 체크리스트(서해안형 강설)

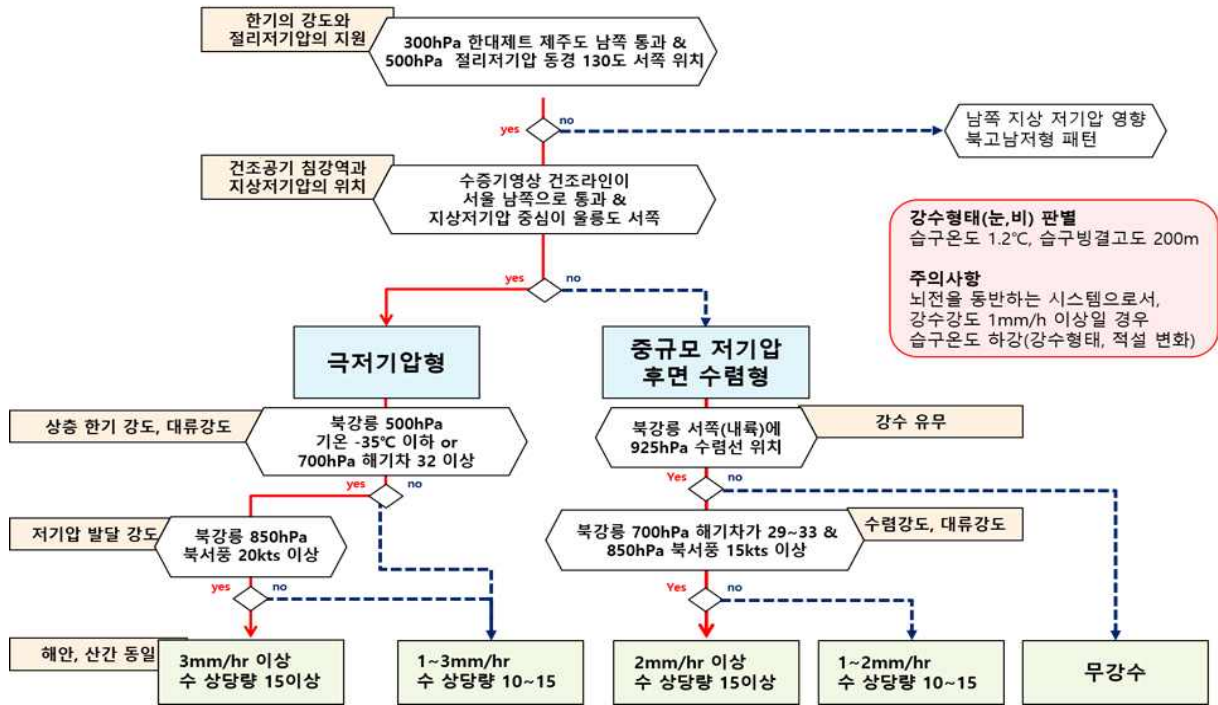
전일 09~14시 (종합적 분석)	<p>강수유무 판단 : 850hPa 기온 -8° 이하, 해기차 15° 이상 850hPa 풍속 20kts 이상을 충족하는지 검토</p> <p>GTS 분석 : 00UTC 칭다오, 다롄, 백령도의 850hPa 기온과 풍속을 모델 예상과 비교 해상 부이(외연도, 부안, 칠발도)의 수운을 모델 예상과 비교</p> <p>대설 판단 : 700hPa 해기차 22° 이상 충족하는지 검토</p> <p>GTS 분석 : 00UTC 칭다오, 다롄, 백령도의 700hPa 기온을 모델 예상과 비교</p> <p>실황 감시 : 서한만에서부터 대류운열 발달, 백령도 강수유무 여부 감시</p>
전일 21~23시 (실황 감시)	GTS 분석 : 12UTC 백령도, 흑산도의 850/700hPa 기온과 풍속 모델 예상과 비교
당일 03~05시 (실황 감시)	<p>GTS 분석 : 18UTC 광주 850/700hPa 기온과 풍속, 포화층 두께 확인</p> <p>실황 감시 : 군산 850hPa 풍속 확인, 위성에서 구름대 유입 경로 감시 위성에서 구름대가 내륙까지 깊게 들어가는지 감시</p>

분석시 유의사항

850hPa 해기차와 풍속은 강설 발생의 기본 메커니즘으로 작용하므로 분석에 우선적으로 적용
해기차 판단 시 모델 분석장의 수운은 실제와 다를 수 있으므로 반드시 해상 부이의 수운을 확인하여 계산
서해안형 강설의 눈/비 판별은 925hPa -4° 이하에서 적설로 나타남, 11월이 아닌 이상 대부분 기간에 눈으로 내림

동해안 강설예측 | (최근 5년('15~'19년) 통계)

동해안 강수 판단 1 (최근 5년('15~'19년) 통계)



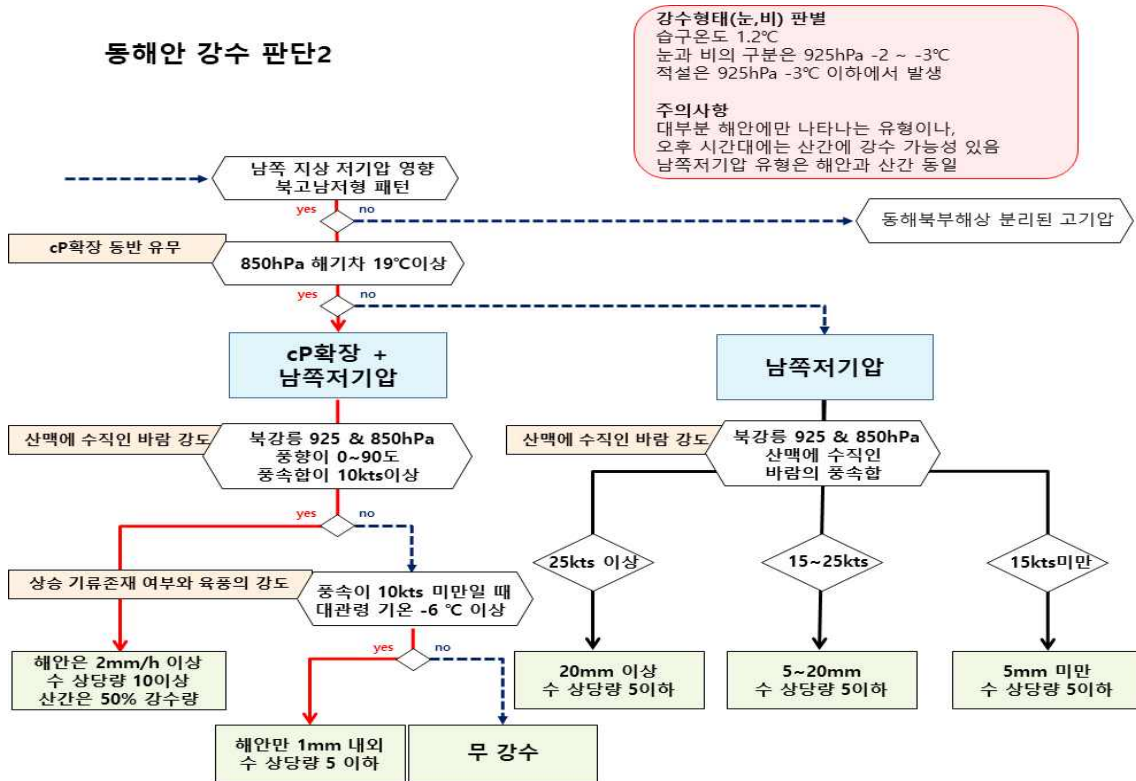
시간대별 실황감시 체크리스트(동해안형 강설 판단 I)

절리저기압 동골 동쪽 위치	위성(수증기)영상에서 절리저기압 강도와 이동속도 모델예상과 차이점 검토 GTS 분석 : 300hPa 한대제트 풍속 bias 검토로 강도 확인 500hPa 절리저기압 부근 모델 온도와 풍속 bias 검토로 강도 확인 500hPa 아열대제트 풍속 bias 검토로 강도 확인
절리저기압 산등반도 위치	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
절리저기압 한반도 통과	위성 해상풍(QSCAT, ASCAT)자료와 상세바람 지상예상 바람 비교 동해부이와 해상풍 예상 바람 비교 동해북부해상 구름과 925hPa 모델 습수장 비교 오차 예보에 반영 및 통보
절리저기압 한반도 통과	위성영상으로 동해상 저기압중심위치 모델과 비교 북강릉 연직바람관측장비 3km 이하 바람, 모델예측 결과와 오차 확인 변화 감지시 정보 작성 및 통보

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

동해안 강설예측 II (최근 5년('15~'19년) 통계)



시간대별 실황감시 체크리스트(동해안형 강설 판단 II,III)

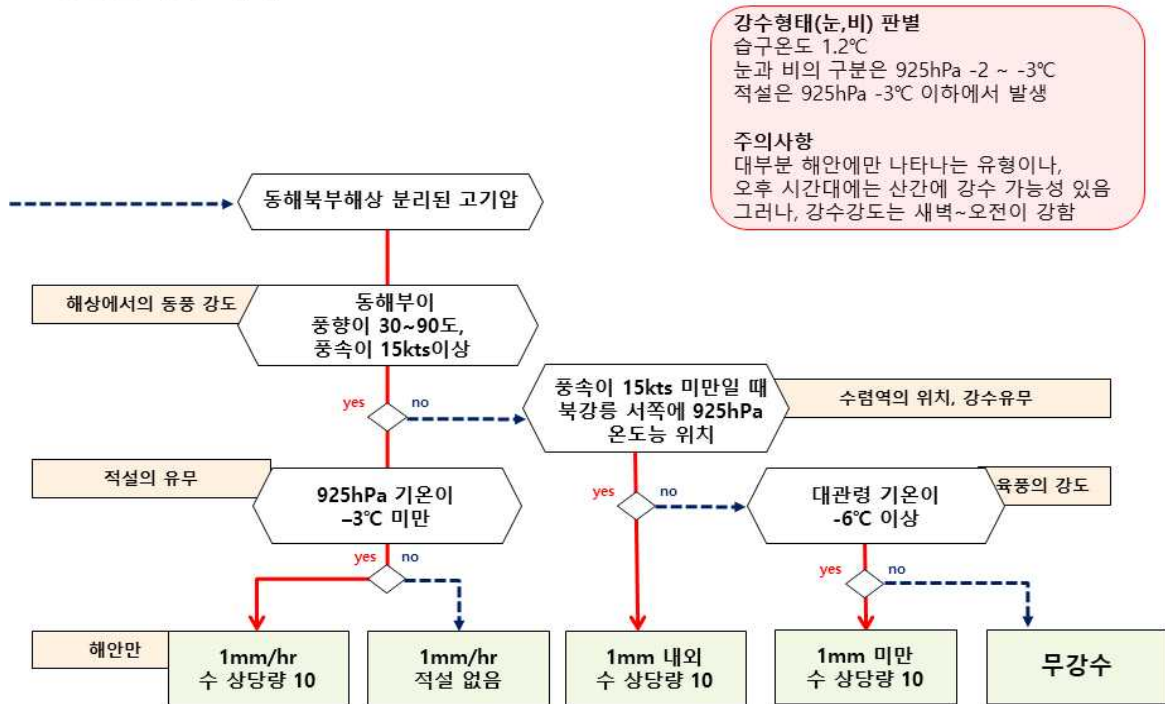
24시간 전	중국 북동부지역 북반구 500hPa 고도증분 분석으로 모델 경향성 확인 GTS 분석(중국북동부지역과 발해만부근): 500hPa 북서류 바람과 기온 bias 검토로 침강류의 강도 확인 700hPa 북서류 바람 bias 검토로 침강류의 강도 확인 (함경산맥과 수직인 풍향과 풍속비교)	} 12시간 간격 검토
동해북부해상 동풍 시작	남쪽저기압 위치, 이동속도와 강도 모델과 비교(동해안형 강수판단 II만) 위성(수증기)영상에서 건조역의 강도 모델예상과 차이점 검토로 침강류 강도 확인 블라티보스톡 바람과 기온 모델과 비교(GTS 지상자료) 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

동해안 강설예측 III (최근 5년('15~'19년) 통계)

동해안 강수 판단 3



시간대별 실황감시 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
동해북부해상 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

Why? How! 겨울 예보

발행일 2023년 12월
집필 한상은, 공상민, 우재훈, 김영준
편집 서민지
감수 임윤진
발행부서 예보국 재해기상대응팀
