

2021년 예보관 과정 훈련보고서

지역특성을 고려한 예보 기술 연구

- 겨울철 서해상에서 유입되는
충청내륙 적설 연구 -

소속: 기상청

교번: 9번

성명: 유제규

2021. 9.

- 목 차 -

1. 서론	1
1. 1 연구배경 및 목적	1
1. 2 호수효과의 정의	1
1. 3 강설 발생 요인	5
1. 4 사례별 대설 유형	9
2. 이론적 배경	12
2.1 구름의 상승발달	12
2.2 등온위면	15
2.3 하층제트	16
2.4 호수효과를 발생시키는 해기차	17
2.5 Capping inversion	18
2.6 구름입자의 낙하속도	19
3. 자료조사 및 분석방법	21
3.1 자료조사	21
3.2 자료 분석방법	23
3.2 사례 분석방법	23
4. 본론	24
4.1 분석결과	24
4.1.1 유형별 일수	24
4.1.2 야간에 눈이 많이 내리는 경향	26
4.2 요소별 분석	28

4.2.1 해기차 분석	28
4.2.2 해양의 층별 습수가 내륙까지 영향받을 상관성 분석	33
4.2.3 바람에 따른 지역별 신적설	40
4.2.3.1 풍향에 따른 지역별 신적설	40
4.2.3.2 인천부이 풍향별 지역 신적설 일수	40
4.2.3.3 덕적도부이 풍향별 지역 신적설 일수	42
4.2.3.1 외연도 풍향별 지역 신적설 일수	44
4.2.4 해상부이 하층풍속 대비 지역별 신적설	47
4.2.4.1 풍속 강도에 따른 지역별 신적설 최심	47
4.2.4.2 해상부이 풍속 10m/s 이상 시 지역별 눈 내리는 확률 ..	54
5. 사례분석	56
5.1 2021년 2월 16~17일	56
5.1.1 종관 기압계 분석	56
5.1.2 실황 및 수치예보 분석	58
6. 결론	
6.1 요약	66
6.2 예보 현업에서 활용할 전략 제시	68
[참고문헌]	69

1. 서론

1.1. 연구배경 및 목적

우리나라는 기상학적으로 편서풍대에서 서해해상의 영향을 받아 날씨 변화가 매우 심한 특징을 보인다. 겨울철 한반도에 유입되는 눈구름대는 서해 해상 수증기에 의해 만들어지고 내륙으로 이동하여 많은 적설량을 기록하고 있으며, 특히, 한기 유입 시 가장 많은 적설량은 서해안 및 인접한 내륙이지만, 충청내륙까지 유입되는 사례가 빈번히 발생하고 있다.

겨울철 서해안에 나타나는 강설은 대부분 호수효과(lake effect)에 의해 대설 발생빈도가 가장 많은 유형으로 찬 공기가 따듯한 해수면 위로 이동하는 동안 해기차, 바람(취주거리 등) 등으로 대기가 불안정하여 눈 구름대가 발달하고, 지형효과까지 더해지면서 내륙까지 눈 구름대가 유입된다.

서해안 형은 주로 해기차에 의한 대설 사례연구가 주를 이루고 있다. 대표적인 것이 호수효과에 의한 사례분석이다. 우리나라에서는 대륙의 기단이 확장할 때 나타나는 Westerly(서풍류)에 의한 강설로 알려져 있다. Braham(1983), 박순웅과 정창희(1984), Ellenton and Danard(1979)는 수면위와 대기 기온과의 해기차이에 의해 강설운이 발생하며, 풍향, 취주거리, 지형적 특징에 의해 강설량이 결정됨을 제시하였다.

IPCC 보고서에 따르면 지구온난화가 진행되면서 전 세계적으로 이상기후가 발생하고 있다. 최근 중국, 미국 중서부 및 유럽지역 등 주로 고위도 북반구에서 지구온난화와 맞물려 폭설의 큰 피해가 발생된다. 우리나라도 폭설의 피해가 꾸준히 증가하여 눈에 의한 직접 피해 및 도로 빙판길로 교통사고 및 교통대란 등으로 도시기능 마비 등과 같이 간접적인 피해도 상당한 것으로 알려져 있다. 이러한 대설 원인, 발생지역 및 적설량을 사전에 정확히 예측하여 사전 대비하기 위한 충분한 시간 확보로 피해를 경감하고자 본 연구가 필요하다.

1.2. 호수효과의 정의

겨울철 동아시아 지역은 시베리아 기단의 영향을 받는 기단의 특징으로 한랭건조하다. 우리나라가 시베리아 기단의 영향을 받는다면 맑고 건조한 날씨를

보여야 하는데, 많은 눈이 내리는 경우가 있다. 눈이 내리기 위해서는 기단 속에 충분한 양의 수증기가 존재해야 하지만, 시베리아 기단의 영향을 받아 어느 조건에서는 습한 ‘호수효과 (lake effect)’와 관련이 있습니다.

“호수효과”는 정확히 언제인지 알 수 없지만, 미국 뉴욕주 버팔로시의 국립기상청(NWS : National Weather Service) 산하연구실에서 근무하던 Barny Wiggin의 발견으로 처음 등장했습니다. 그가 발견한 것은 겨울철 5대호(Great Lakes) 주변 지역에 나타나는 흥미로운 기상 현상으로 5대호 북쪽 지역은 맑은데 비해 남쪽 지역은 구름이 많고 심지어 눈이 내리는 모습을 보이는 특이한 것이었습니다. 호수를 경계로 북쪽과 남쪽 지역의 날씨가 전혀 다르게 나타나는 것이다. 현재 학계에서는 호수효과를 ‘늦은 가을에서 겨울에 걸쳐 차갑고 안정한 기단이 상대적으로 따뜻한 수면 위를 지나면서 강설이 형성되는 현상’이라고 말한다.

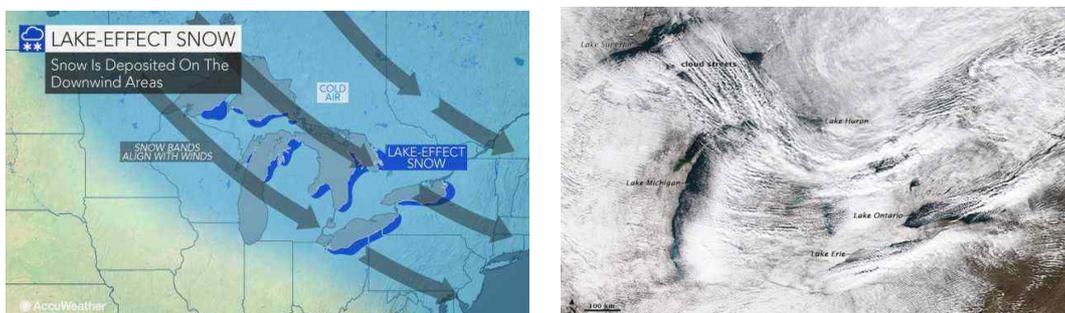


그림 1. 5대호 호수효과

호수효과는 정확히 정의된 기상용어가 아니다. 그저 학자들 간에 소통되는 말로 지역과 나라마다 호수효과를 부르는 용어가 각각 다르다. 일본이나 멕시코 만류가 흐르는 미국 남쪽 지역에서는 ‘바다 효과 (Ocean effect)’, 미국 체서피크나 메사추세츠 만이 있는 지역에서는 ‘해만 효과 (Bay effect)’라고 부른다.

우리나라는 호수효과가 서해상에서 발생한다. 어떻게 보면 바다 효과라고 말할 수 있는데, 서해 해상에서 구름이 만들어지는 현상이 호수 효과에 의해 나타난 구름으로 겨울철 우리나라 자주 등장한다.

호수효과가 일어나는 이유는 여러 가지가 있는데, 그 중에서 중요한 역할을 하는 한 가지 요소는 기온과 수온의 차이입니다. 우리나라에서 호수효과가 일어나려면 서해와 시베리아 기단의 온도차이가 커야 하는데, 서해가 육지의 영향

을 받아 온도차이가 작을 수밖에 없지요. 이러면 우리나라에서 호수효과에 의한 강설을 기대하기 어렵습니다.

쿠로시오 해류는 겨울철 서해에 다소 약한 영향을 미치지만, 가끔 크게 발달하여 서해상의 날씨를 변화시키기도 한다. 쿠로시오 해류는 북태평양 중위도 아열대 순환의 서안경계류로서, 저위도에서 고위도로 이동하는 난류인데요. 해수의 색이 검푸르게 보인다고 해서 일본에서는 ‘흑조(黑潮)’라고 부르고, 우리나라에서는 호수효과를 ‘흑조 현상’이라고도 부른다.

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

기류가 해수면을 지나 육지로 유입되는 지역에서는 마찰에 의한 수렴으로 상승기류를 유발시키고 구름은 더욱 강하게 발달해 많은 눈을 내리게 한다. 한편 대류와 혼합으로 인해 발달한 구름은 상부로 갈수록 단열냉각이 되므로 상부의 기온이 낮아져 그 위로는 ‘capping inversion(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 하층대기로의 열 공급은 더욱 커질 것이며, 서해상을 길게 이동할수록 많은 수증기 공급이 일어날 것이다. 또한, 강한 바람은 하층대기를 혼합시켜 열과 수증기 공급을 더욱 활발하게 해 불안정한 대기를 형성한다. 결국, 이러한 일련의 과정들이 복합적으로 어우러져 대류운을 발달시켜 강설로 이어지게 되는 것이다.

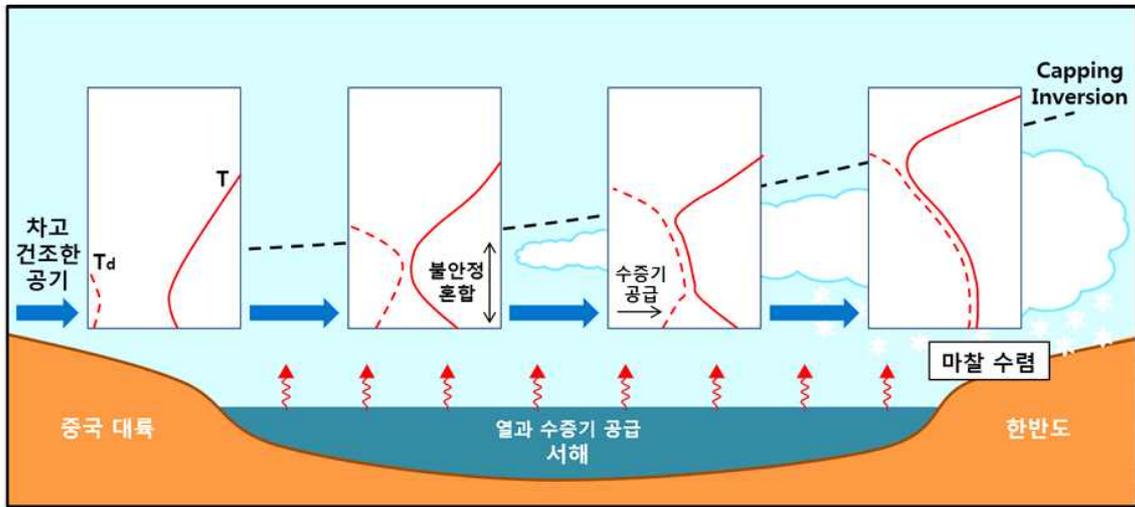


그림 2. 서해안 대설 모식도

1.3. 강설 발생 요인

1.3.1. 해기차

해수면 온도와 대기 기온의 차이로 서해상에서 대류에 의한 상승운동의 중요한 요인으로 상대적으로 따뜻한 해수면으로 가열과 수증기 공급은 대기 하층의 불안정한 연직구조 기온감율로 해기차가 클수록 불안정한 연직대기 구조가 형성된다.

북아메리카 오대호(Great Lakes) 지역은 850hPa 기온과 수온의 차이가 13°C 이상일 때 강설 발생 조건이라고 한다(Niziol, 1987). 북아메리카 오대호 부근과 우리나라는 850hPa 지위고도가 150gpm 높게 위치하여 있다. 15년(2003~2017년)까지 겨울철(11~2월) 칠발도 수온과 흑산도 850hPa 기온의 바탕으로 광주, 목포, 흑산도 중심으로 적설이 기록된 날을 기준으로 풍향이 300° 이상의 사례를 볼 때 해기차가 15°C 이상에서 적설이 발생하여, 17°C 이상에서 강설 발생 빈도가 가장 많이 나타났다.

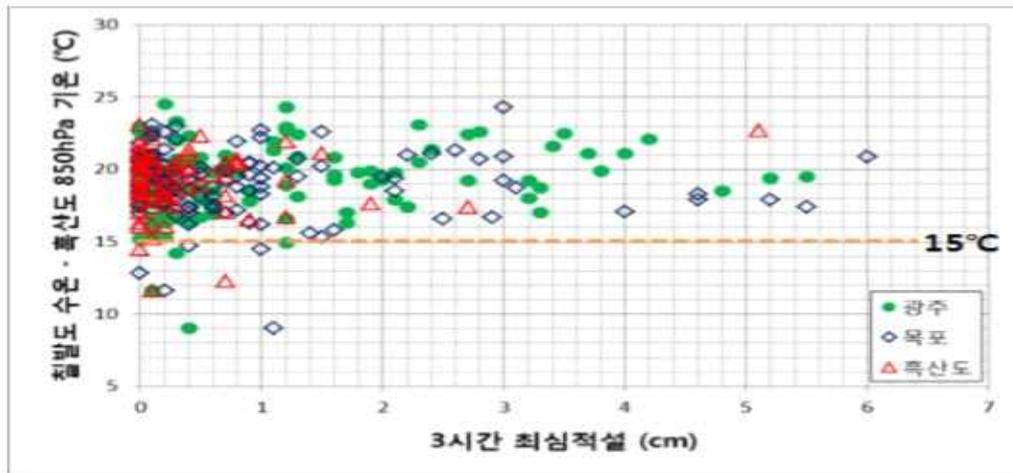


그림 3. 적설에 대한 칠발도 해기차

1.3.2. 연직두께 및 낮은 기온의 강설 판단

서해해상에서 구름은 발생되었으나, 내륙으로 유입되지 않는 경우가 있어 대체적으로 대류 혼합층의 두께는 1km 이상의 구름 연직 두께가 있어야 한다. 구름 내부의 기온이 매우 낮은 경우 얼음에 대한 포화 수증기압 초과 값이 감소하여 빙정이 성장이 활발하게 일어나기 어려워져 대개 -20°C 이하에서는 눈 결정체 부피가 작은 육각기둥 및 나뭇가지 형태로 나타나 미세물리과정을 고려해 불리한 조건이다.

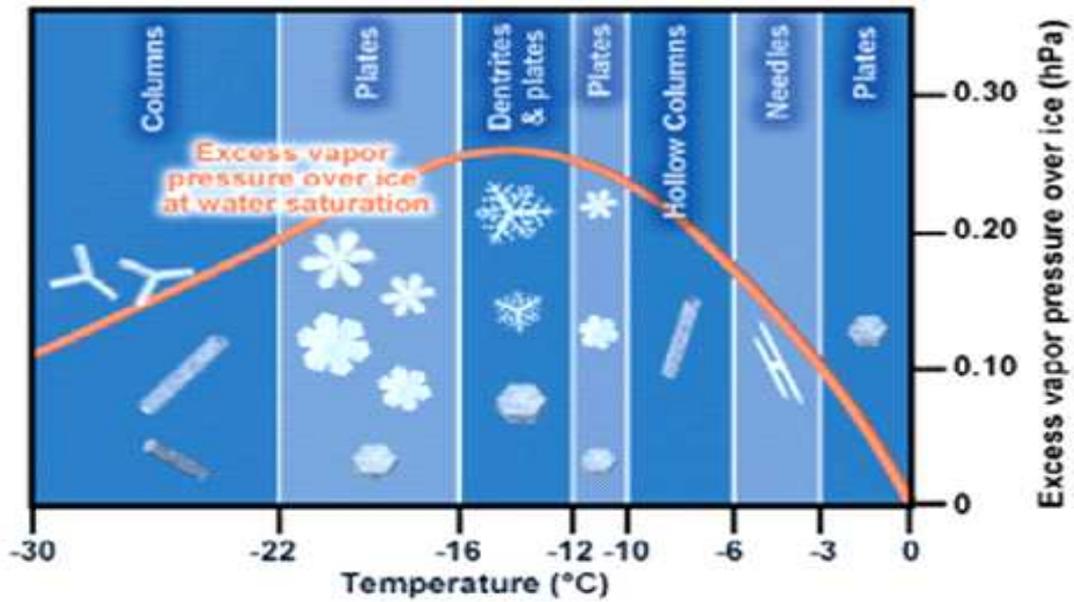


그림 4. 온도에 따른 눈 결정체

1.3.3. 바람과 취주거리

1.3.3.1. 풍향 및 풍속

서해해상에 강한 풍속이 나타나도 북풍에 가까운 흐름에서는 서해안으로 구름대가 유입되지 못하여 풍향에 따라 강설이 나타나는 지역이 다르며, 850hPa 풍향으로 도서 지역(흑산도) 및 해안지역(목포)은 340° 이하, 내륙 지역(광주)은 330° 이하로 강설빈도가 높게 나타났다.

풍속이 강할수록 많은 적설이 기록되는 경향이 있으나, 해안까지는 20kts 이상이고, 내륙(광주)까지 강하게 유입되기 위해서는 850hPa 풍속이 30kts 이상에서 강설이 나타났다.

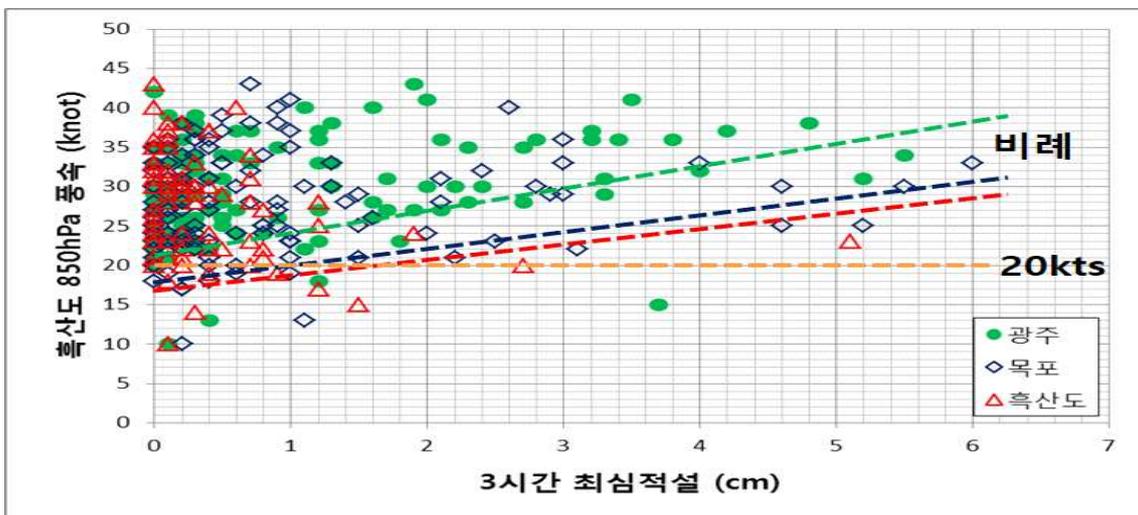


그림 5. 최심적설 대비 850hPa 풍속

1.3.3.2. 취주거리

따뜻한 해수면 위를 지나가는 찬 공기는 긴 거리를 이동해야 충분한 열과 수증기를 공급받아 하층 대기를 불안정하게 만들 수 있어 충분한 취주거리(fetch)를 확보하여야 강설이 발생할 수 있다. 그래서 웅진반도에 가로 막혀 있는 경기만에서는 충분한 해기차, 강한 풍속이 나타나도 호수효과가 약하다. 일반적으로 강설을 유발할 수 있는 최소 임계값은 80km이며, 일반적으로 160km 이상의 취주거리를 확보하여야 강설을 유발할 수 있다. 목포인 경우 요동반도에서 약 640km, 산둥반도에서는 440km의 매우 긴 취주거리를 확보하여 대표적인 강설 지역이다. 한편, 백령도는 요동반도에서 약 200km 정도의 취주거리로 열과 수증기의 공급이 적었다.

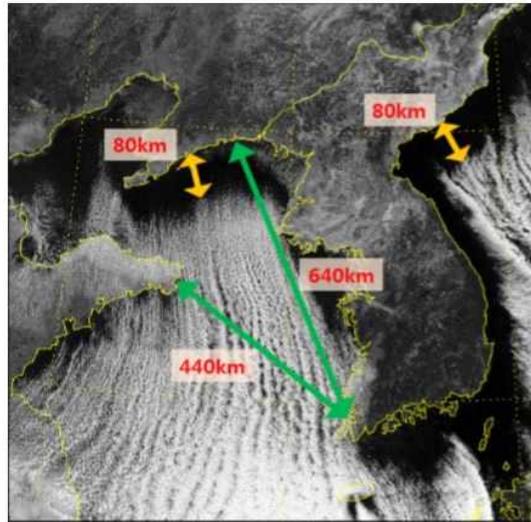


그림 6. 취주거리

1.3.3.3. 서해안 강설 기압계 유형

서해안 강설이 나타나기 위해서는 강한 한랭이류가 있어야 한다. 강한 북풍 계열의 고기압 전면 및 저기압 후면의 두 기압계 특징으로 첫째 고기압 전면에서는 서해안 강설의 강도는 약하게 나타나고, 고기압성 순환을 하면서 근상운(Cloud street)의 대류운이 나란히 나타난다.

둘째, 저기압 후면에서는 북동쪽에 위치한 저기압성 곡률을 따라 구름이 발달하고, 풍계는 서풍계열의 풍향이 우세하며, 내륙까지 유입되는 경우가 많다. 또한, 기압골이 동반되어 역전층도 3km로 비교적 높게 대류운이 발달한다.

대설의 발생 및 발달 과정을 보면 한반도 북쪽으로부터 한랭 건조한 공기가 상대적으로 따뜻한 바다 위를 이류하면서 호수 효과(Lake Effect)로 발생한 많은 수증기가 공급되어 층운형 눈구름을 만들어지고, 이 눈구름이 서해상에

도달하면서 남쪽으로부터 유입되는 온난 이류와 지면 마찰에 의한 강제 상승 효과로 인해 더욱 발달하여 대류성 눈구름을 발달시켰으며, 내륙으로 진출하면서 산악의 지형효과까지 더해져서 대설이 지속되었던 것으로 볼 수 있다. 결국 한반도에서 발생하는 전형적인 대설 형태인 서해상 한랭 기류 이류에 의한 호수효과와 지형 및 남서쪽으로부터의 온난 공기 이류에 의한 강제 상승의 복합과정이라고 할 수 있다.

1.3.3.4. 수렴에 의한 강설

호수 효과에 의한 강설이 대설(heavy snowfall)로 이어지기 위해서는 반드시 수렴이 동반되어야 한다. 겨울철 동아시아지역에서 상층저지(Blocking)에 의해 한기핵이 동반된 상층 저기압이 절리(Cut-off)되면서 기압계가 정체되는 경우, 절리된 저기압의 후면으로 찬 공기가 남하하여 2차 한기가 남하하는 경우 하층까지 시어역이 형성되면서 서해해상에서 기류 수렴의 영향으로 내륙까지 눈구름대가 유입되어 많은 눈이 내리는 경우가 있다.

또한, 강한 바람이 높은 산맥에 부딪혀 강한 상승기류가 나타나는 경우와 찬 대륙에서 해상으로 불어나가는 육풍이 발생하여 종관장과 부딪혀 수렴대가 형성되는 경우로 대륙고기압이 확장하여 서해해상과 우리나라로 강한 한랭이류로 종관적인 육풍 성분이 불면서 종관적인 북서풍과의 수렴대가 발생하여 많은 눈이 내리는 경우가 있으나, 육풍이 너무 강해 수렴대가 해상으로 밀려나오기도 한다.

1.4. 사례별 대설 유형

1.4.1. 한냉 종관 저기압형

300hPa 한대제트축 북쪽에 저기압이 위치하고, 저기압은 중국 중부 내륙에서 발생하여 발달하고 저기압 중심은 산둥반도 남쪽을 지나며 수증기를 공급한다. 강설구역은 저기압 중심 진로의 북쪽과 동쪽, 수상당량비 15이상이다.



그림 7. 한냉종관 저기압형 모식도

1.4.2. 온난 종관 저기압형

300hPa 한대제트축 남쪽에 저기압이 위치하고, 저기압 중심이 남해상으로 진출하면서 저기압 중심 북쪽에 강설현상 동반하고, 북서풍 기류로 바뀌면서 강설 종료하며, 수상당량비 10이하이다.

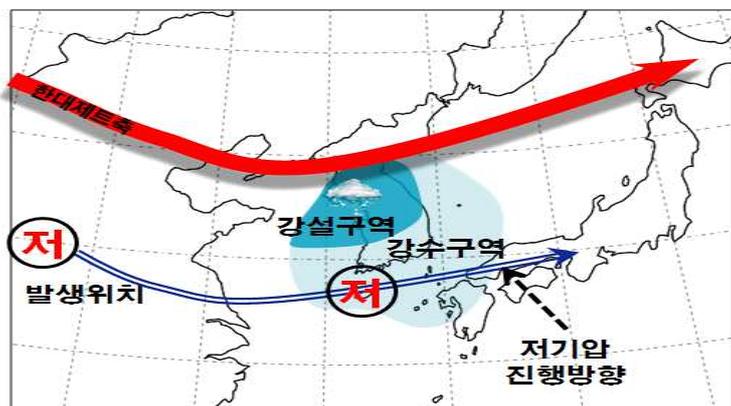


그림 8. 온난종관 저기압형 모식도

1.4.3. 발해만 저기압형

저기압이 300hPa 한대제트 축의 북쪽에 위치, 저기압은 발해만 부근에서 발생하고 저기압 중심은 뚜렷하지 않다, 한기를 동반한 단파골이 중상층을 통과, 700hPa 이하층 서풍류가 유입되었다. 저기압 중심 남쪽으로 회전하는 구름대가 있다. 강설구역은 저기압 중심에서 남쪽과 동쪽이고, 수상당량비 15이상이다.

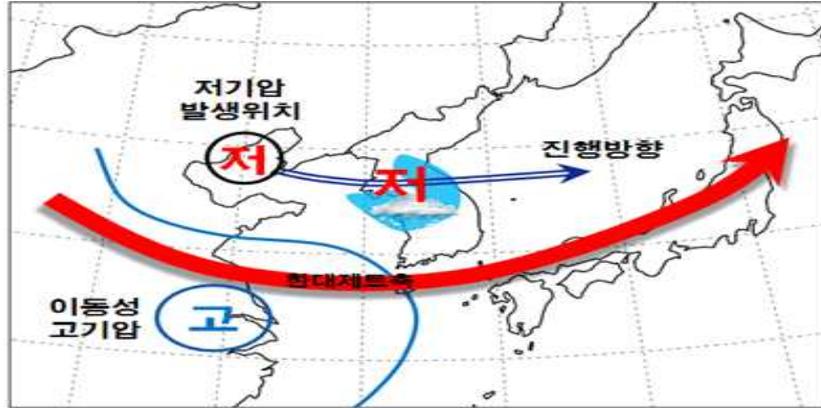


그림 9. 발해만 저기압형 모식도

1.4.4. 서해안형

저기압이 300hPa 한대제트축의 북쪽에 위치, 시베리아 고기압 확장 시 해기차에 의한 눈 구름 유입, 850hPa 풍속은 40kts 이상, 850hPa 기온과 수온은 15도 이상, 925 풍향이 중국 동해안에서 한반도로 유입 가능한 형태, 강설 구역은 한랭전선 통과시부터 온도골 지날 때까지 수상당량비 15이상이다.

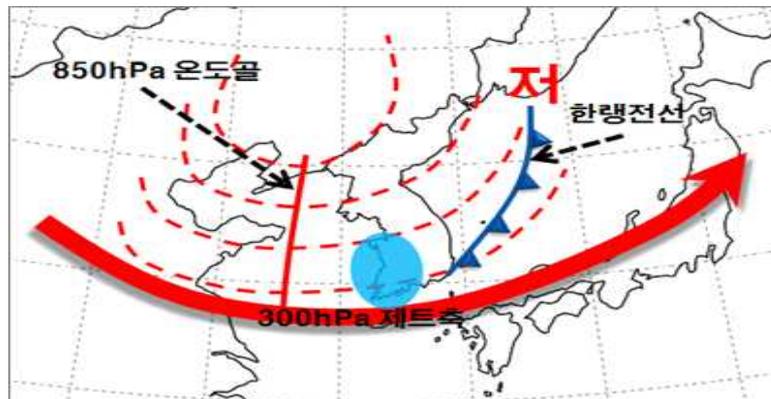


그림 10. 서해안형 모식도

1.4.5. 동해안형

저기압이 300hPa 한대제트축의 남쪽에 위치, 중국 내륙 저기압 발생, 저기

압 중심 뚜렷, 남해상 통과, 하층 한기, 중상층 난기 유입으로 매우 안정한 대기구조, 500이상까지 습윤, 지상 $\leq 0^{\circ}\text{C}$

저기압 중심의 북쪽에서 한대제트축 남쪽 수상당량비 10이하
(동풍 \rightarrow 북서 강설종료)

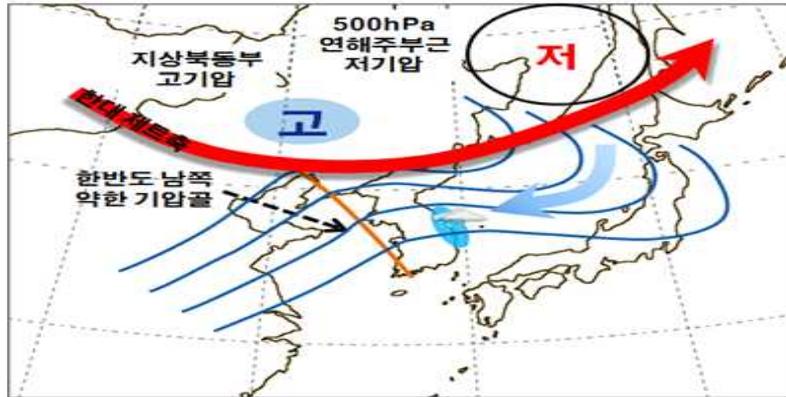


그림 11. 동해안형 모식도

1.4.6. 극저기압형

저기압이 300hPa 한대제트축의 북쪽에 위치

중상층 강한 와도 \rightarrow 급격한 저기압성 회전에 의해 발생

500 한기동반($-35^{\circ}\text{C} \geq$) 절리저기압, 와도축 $10 e^{-5} / \text{s}$ 이상

저기압은 바다에서 생성되고 육지에서 세력 급격히 약화

강설구역 500hPa 저기압 $10 e^{-5} / \text{s}$ 이상 와도 축 내부

강설량 1~2cm/h

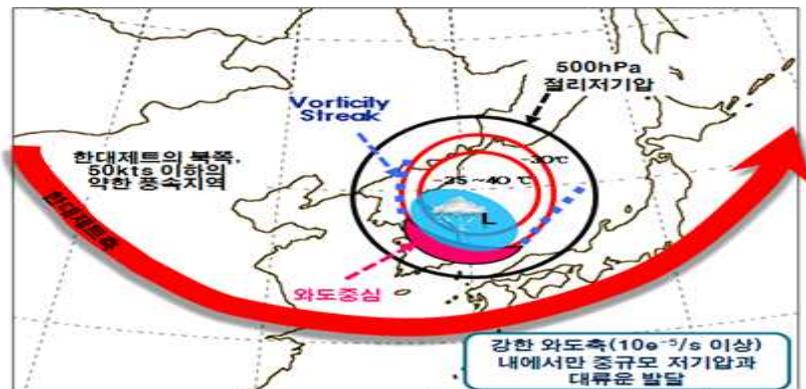


그림 12. 극저압형 모식도

2. 이론적 배경

2.1. 구름의 상승발달

강수발달은 크게 두 가지 과정으로 즉, 구름 입자 간의 충돌·부착에 의한 성장과 베르세론(Bergeron) 과정으로 구분 할 수 있다. 구름 입자 간의 충돌·부착은 입자의 크기에 따른 낙하 속도의 차이에 기인한 것이며, 베르세론(Bergeron)과정은 과냉각 수적과 빙정이 공존하는 층에서 포화수증기압 차에 의한 것이다.

대기 중에 있는 자연 상태에서 빙정핵이나 균질 핵생성 또는 과냉각 수적의 동결에 의해 형성된 빙정을 1차 빙정(Primary Ice)이라고 한다. 대기의 온도가 0°C 이하이고 과포화 상태에서 활성화되는 빙정의 수는 Fletcher의 실험식에 의하면

$$N_{ice} = A \exp(\beta \Delta T)$$

으로 주어진다. 여기서 N_{ice} 는 과냉각상태에서 대기의 단위체적 당 형성되는 빙정의 수를 나타내며, 여기서 실험 상수는 $A=10^{-5}(L^{-1})$, $\beta=0.6^{\circ} C^{-1}$ 이다. $\Delta T=T_0-T$ 는 과냉각(Supercooling)을 나타낸다. 대기가 과포화 상태에서 기온이 $-20^{\circ}C$, 즉 $\Delta T=20^{\circ}C$ 에서 활성화 되는 빙정핵의 수는 체적 1리터 당 1개 ($1L^{-1}$)로서 이를 1차 빙정의 수로 고려할 수 있다. 이 계산에 의하면 자연 상태의 대기에서 활성화 되는 빙정핵의 수는 응결핵에 비해 그 수가 매우 작으며 이로 인해 1차 빙정의 수 농도 역시 매우 작다. 그러나 실제 구름 속에 있는 빙정의 수를 관측하면 의외로 빙정수보다 훨씬 많은 빙정이 있는 경우가 있다.그림은 열대적운과 대륙적운에서 관측한 구름정상부의 온도에 대한 최대 빙정의 수 농도를 보여 준다. 그림에서 직선은 식에 의한 빙정의 수 농도 곡선이다. 그림에서 보는 바와 같이 운정 온도가 $-20^{\circ}C$ 미만인 경우에는 빙정핵의 수와 빙정수 사이에는 커다란 차이가 없으나, 운정 온도가 $-10^{\circ}C$ 인 경우에 어떤 구름에서는 자연 빙정의 수 농도의 10^4 에 해당하는 많은 빙정이 구름에 존재하고 있다. 그러면 자연빙정의 수를 크게 능가하는 빙정의 수를 어떻게 설명할 수 있을까? 이에 대한 설명으로 구름의 빙정증식을 고려하면, 빙정핵이나 과냉각수적의 동결에 의하지 않고 다른 원인에 의해서 빙정의 수가 증가하는 것을 의미하며, 이와 같이 형성된 빙정을 이차빙정(Secondary Ice)라고 한다.

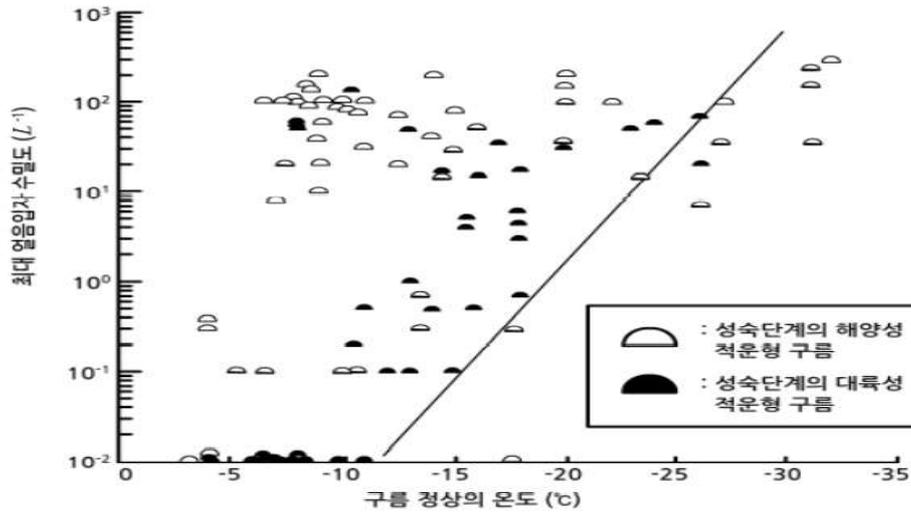


그림 13. 구름의 빙정 증식

현재 빙정 증식 과정으로 다음의 3가지 과정: (i) 빙정이 용해 고도 위·아래로 이동하는 경우 빙정의 작은 가지의 중간 부분이 녹아 부러지면서 생긴 이차빙정(Fracturing), (ii) 섬세한 구조를 가진 빙정들(예: 나무가지 모양, 별모양 빙정)이 충돌로 인해 빙정의 일부가 떨어져 나와 이차빙정이 생성되는 기계적 파편형성(Mechanical Fragmentation), 그리고 (iii) 빙정의 상고대(Riming)현상이 일어나는 동안 생긴 얼음파편(Ice Splinter) 형성되고, Hallett-Mossop과정을 고려하고 있다. Hallett-Mossop 과정에 의한 빙정 파편(Splinter)의 형성 조건은 다음과 같다 : ①대기 온도가 $-3^{\circ}\text{C} \sim -8^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 ②직경이 $13\ \mu\text{m}$ 이하와 $25\ \mu\text{m}$ 이상인 수적이 공존하며 ③직경이 적어도 0.5mm 이상 되는 싸락눈이 존재하여야 한다.



그림 14. Hallett-Mossop과정의 모식도

이 경우, 기온 -5°C 에서 하나의 싸락눈에 250개의 수적($D \geq 25\ \mu\text{m}$)이 부착될 경우 하나의 빙정 파편이 형성된다.

위 그림은 Hallett-Mossop 과정에서 빙정 파편이 형성되는 과정을 보여주는 모식도이다. 그림에서 싸락눈에 부착된 작은 수적과 큰 수적은 각각 $D \leq 13\mu\text{m}$, 그리고 $D \geq 25\mu\text{m}$ 인 수적이다. 그림에서 A의 경우는 싸락눈에 작은 과냉각 수적이 부착·동결된 다음에 큰 수적이 부착된 경우이다. 이 경우에는 동결된 작은 수적으로 인해 큰 수적이 동결이 표면에서 내부로 서서히 진행되면서 매우 얇은 빙각(Ice Shell)을 형성한다. 그리고 수적의 동결 시 방출되는 잠열로 인하여 내부 압력이 증가한다. 이로 인해 빙각이 깨어져 파편이 떨어져 나오면서 이차 빙정이 형성된다. 한편 그림에서 B의 경우는 싸락눈에 큰 과냉각 수적이 부착된 경우이다. 이 경우는 싸락눈과 과냉각 수적의 접촉면이 넓어서 과냉각 수적에서 동결 시 방출된 잠열이 싸락눈으로 바로 효과적으로 전달된다. 따라서 과냉각 수적이 빨리 동결되어 이차빙정이 형성되지 않는다. 이 모델에서 작은 수적은 이차빙정 형성에 결정적인 역할을 한다. 이차 빙정 형성 기구 중에서 충돌에 의한 기계적 파편 형성과 Hallett-Mossop 과정만이 상당한 양의 이차빙정을 생성할 수 있는 것으로 고려되고 있다.

빙정증식은 한랭운의 강수발달에 매우 중요하다. 그 이유는 빙정핵에 의해 형성된 빙정만으로는 강수발달에 반드시 필요한 빙정간의 충돌에 의한 성장이 효과적으로 일어나지 않기 때문이다.

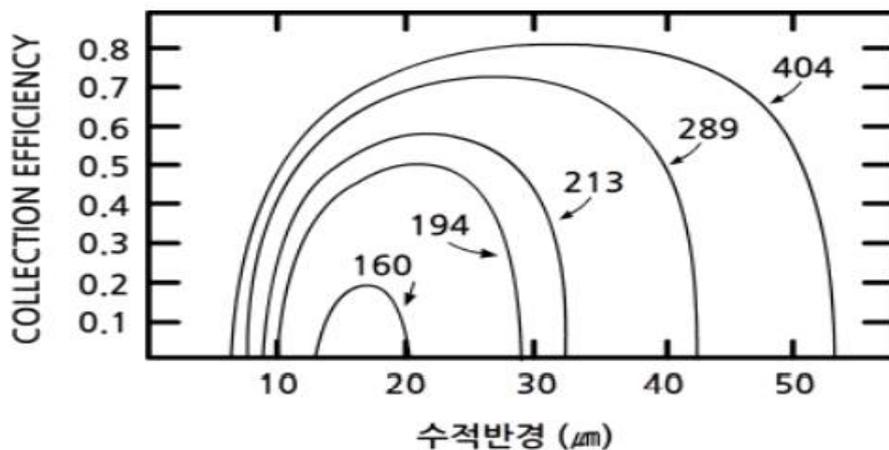


그림 15. 수적과 얇은 판상빙정과의 충돌 효율 (Pitter and Pruppacher, 1974)

부착에 의한 빙정의 성장은 위 그림에서 보는 바와 같이 빙정 표면 온도가 매우 낮아 그 표면이 건조한 경우보다 기온이 부근에서 물로 얇게 피복 (Coating)되어 있을 때 쉽게 일어난다. 그림에서 온도에 따른 얼음 입자의 부착확률이 -1°C 부근에서 거의 1이다. 따라서 구름에서 고도에 따른 온도분포가 한랭운의 강수발달에 매우 중요한 역할을 할 수 있다. 특히 운저 고도가 용

해 고도 보다 낮은 경우 한랭운의 강수발달에 매우 중요한 역할을 할 수 있다. 이와 같은 조건을 고려하면 큰 눈송이가 흑한의 겨울과는 반대로 초겨울에 덜 추울 때 더 자주 발생할 가능성이 높다. 상고대화와 응집은 수증기의 침적에 의한 빙정 성장 보다 훨씬 더 빨리 빙정을 성장시킨다. 사실 세 가지 과정의 결합(빙정과정, 상고대화, 응집)으로 초기 빙정형성 후 약 30분 이내에 고체상태의 강수입자가 만들어 질 수 있다.

2.2. 등온위면

온위(Potential Temperature)는 건조한 공기덩이가 압력이 표준기압 1000hPa 이 될 때까지 단열적으로 압축 또는 팽창하였을 때의 온도를 말한다. 온위는 θ 로 나타내며, 그 식은 다음과 같다.

$$\theta = T \left(\frac{1000}{P} \right)^K, \text{ 여기서 } K = \frac{R_d}{C_p}$$

모든 공기는 온위를 갖게 되며, 이 값은 건조단열 운동에서는 보존된다. 위의 식에서 볼 수 있듯이 같은 온위(등온위)라면, 기압 P가 증가(감소)함에 따라 기온 T도 증가(감소)한다. 또한 종관규모 운동은 강수지역을 제외하고는 대체적으로 단열 과정을 유지하므로, 온위는 종관규모 운동에서 보존량으로 볼 수 있다.

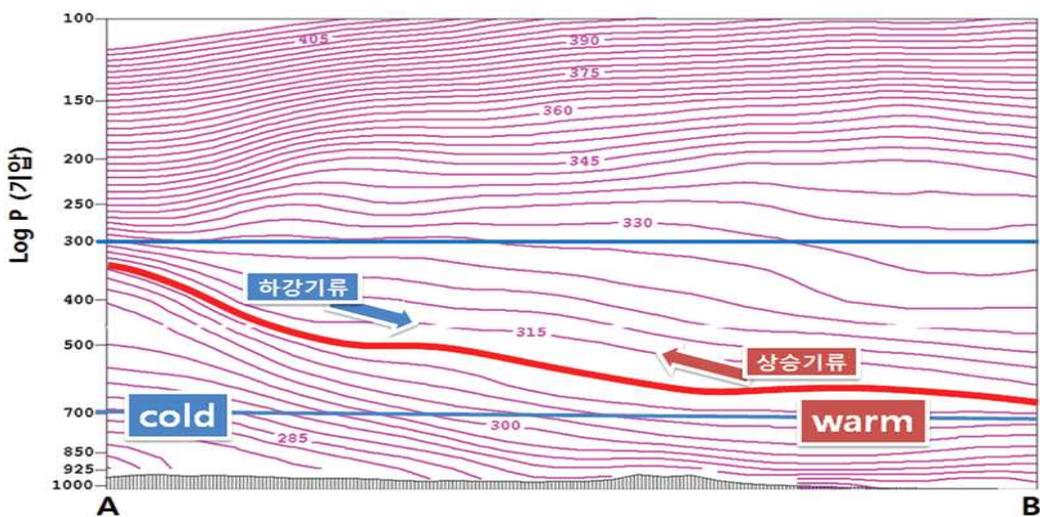


그림 16. 등온위 연직(기압고도)분포

그림 16과 같이 A와 B지점 상공으로 312K 온위선이 300~700hPa 고도 사이에 위치한다면, 700hPa 고도를 기준으로 A지점 상공의 기온은 B지점 상공의 공기보다 차갑다고 할 수 있다. A지점 상공 700hPa은 약 285K, B지점 상공은 약 308K이다. 또한, 312K 등온위선은 A와 B지점 사이에 약 300hPa과 700hPa 즉, 대기상층과 중·하층의 고도차이 만큼 기온 차이가 나타난다고 할 수 있다.

만약, A에서 B로 312K 등온위선을 따라 기류가 이동한다면, 하강기류와 함께 수평적으로는 한랭이류가 나타나고, B에서 A로 이동한다면 상승기류와 함께 온난이류가 나타난다. 여기에 수증기량을 이용하면, 기압면에서 해석하기 힘든 구름의 생성 및 강수 현상 등 대기운동을 이해하는데 도움이 된다.(출처 : 손에 잡히는 예보기술)

2.3. 하층제트(Low-Level Jet; LLJ)

하층제트는 850hPa이나 925hPa에 나타나며 하층대기에서 강화된 남서풍으로 10~12.5m/s(약 20~25kts) 풍속을 갖는다. 그림처럼 저기압성 곡률을 갖는 한대제트 앞쪽에서 2차 순환에 의해서 강화된다. 우리나라 주변에서는 주로 발달한 저기압에 동반되어 하층제트가 나타난다. 하층제트는 다량의 수증기와 열을 포함한 따뜻하고 습한 공기를 북쪽으로 이류 시키는데 중요한 역할을 하며 상·하층간의 대기 불안정을 강화 시킨다.

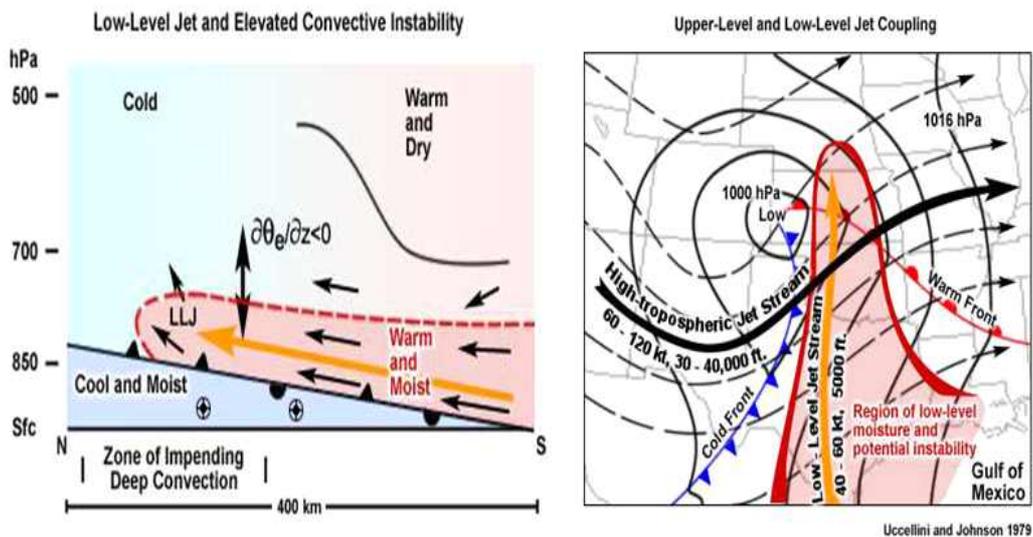


그림 17. (a)하층제트와 대류 불안정, (b)상층제트 커플링 모식도

2.4. 호수효과를 발생시키는 해기차

미국 오대호 호수효과 발생을 위한 해기차로 불안정한 구름대의 발달은 호수 표면에서 850mb 고도까지 13°C이상 해기차는 다음과 같이 초과해야 한다. 일반적인 겨울철 850MB 높이는 약 1.3km이고, 건조단열감율은 약 10°C/km 이므로

$$1.3\text{km} * 10^{\circ}\text{C}/\text{km} \approx 13^{\circ}\text{C}$$

이 값은 초과해야 해기차 의한 불안정이 발생한다.

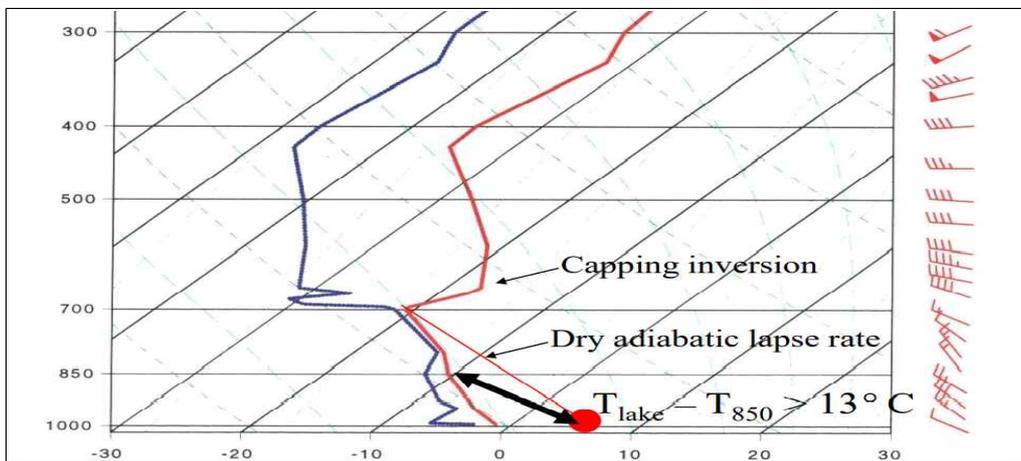


그림 18. 미국의 850hPa 기온과 해수면 기온차 범위

우리나라는 아래 그림에서 850hPa 최근 10년(2007~20016년) 평균 고도장에서 보듯이 미국 오대호 지역보다 150gpm 정도 높아서 미국보다 조금 높은 15°C 이상에서 눈 구름대가 발생된다.

850hPa CPH Recent 10 Years
01Nov-31Dec, 2007~2016

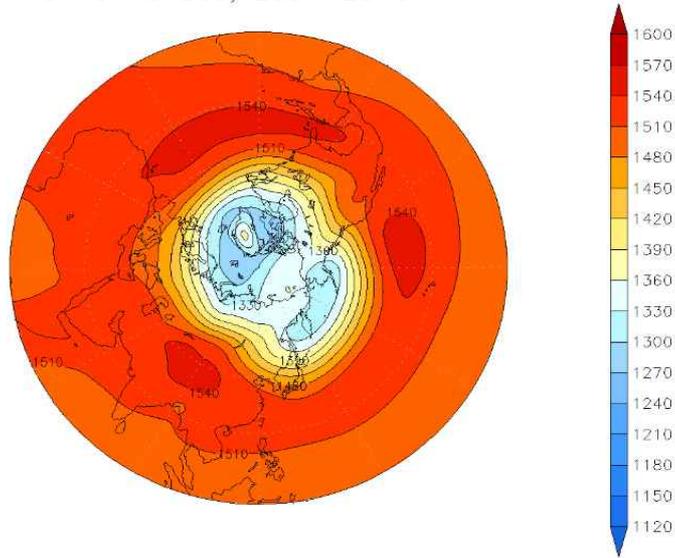


그림 19. 850hPa CPH Recent 10 Years

2.5. Capping inversion

대기 경계층의 Capping inversion은 대기 층간의 경계 구간으로 경계층의 상단의 대류권이 평균적으로 안정되어 있기 때문에 난류는 경계층 내에서 공기를 균질화하기 때문에 열의 보존에 의해 경계층의 상단에 안정적인 층 형태가 나타난다.

경계층의 하단은 난기류와 대기 오염 물질을 그 아래에 트랩한다. 경계층의 하단은 비교적 따뜻한 공기의 층으로 상단으로 올라가는 공기를 차단하고 억제하여 키 큰 구름대를 발달을 방지하거나 지연시키는 경우가 많습니다. 따라서, 그 아래 공기는 계속 따뜻해지고, 습윤할 수 있으므로 불안정이 증가하여 겨울철 낮은 고도에서 눈 구름대가 생성, 발달하여 계속적으로 눈이 내리는 결과가 나타난다.

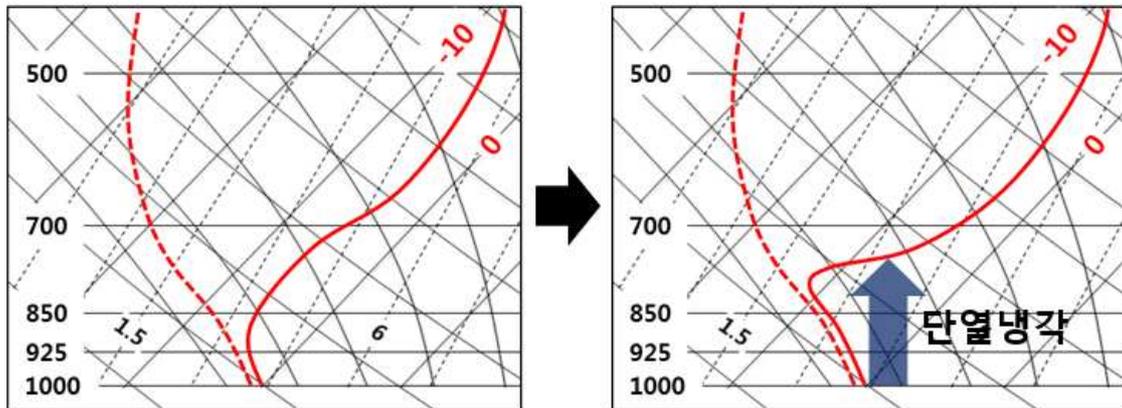


그림 20. Capping inversion(착모역전) 발생과정

2.6. 구름입자의 낙하속도

구름 입자는 수적, 빙정, 눈송이, 싸락눈, 우박 등으로 그 모양과 구성이 서로 다르고 속도는 그 모양, 밀도, 그리고 그 크기에 따라서 다르다.

눈과 빙정은 수적과 달리 그 주위에 공기 흐름이 복잡하다. 따라서 눈과 빙정의 정의 낙하속도는 그 모양, 크기, 밀도에 따라 크게 다르다. 관측 데이터에 의하면 눈과 빙정의 낙하속도(ω)는 다음과 같이 멱법칙(Power Law)으로 주어진다(Houze,1993).

$$\omega = \alpha L^\beta$$

빙정의 유형에 따른 낙하속도 80cms^{-1} 미만이다. 그리고 주어진 크기에 대해 낙하속도가 가장 큰 것은 주상빙정(Solid Column)이고 속도가 가장 작은 것은 정상(Stellar) 빙정으로 20cms^{-1} 이다. 가장 작은 것은 정상(Stellar) 빙정으로 이다. 그림에서 A는 Solid Column, B는 Thick Plate, C는 Simple Plate, D는 Sector Plate, E는 Broad Branch Plate, F는 Dendrite 그리고 G는 정상형 결정(Stellar Crystal)을 나타낸다.

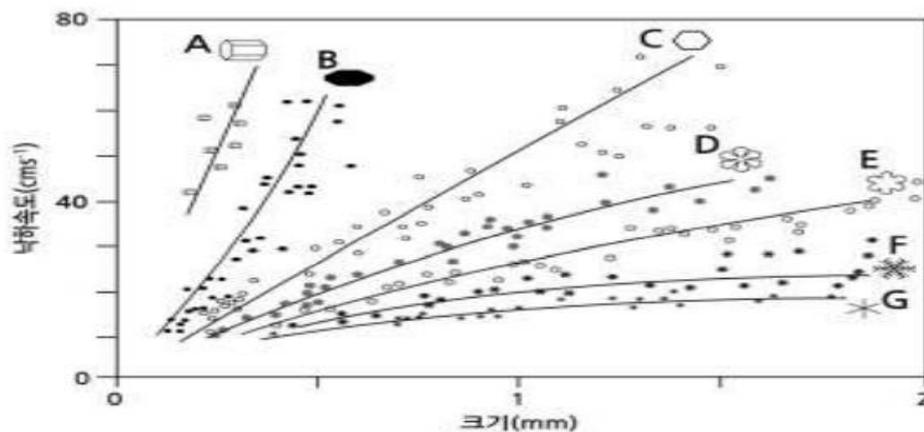


그림 21. 빙정의 유형에 따른 낙하속도(Lamb and Verlinde, 2011)

산 정상(-7도)에서 측정한 강설입자에 대해 질량과 면적에 대한 멱법칙(Power Laws)를 적용하여 구한 다양한 눈 입자의 낙하속도이다. 여기서 주의할 것은 실제로 낙하속도는 모수화에 의한 빙정의 낙하속도이므로 대기의 압력과 온도에 따라 다르다. A는 싸락눈(Lump Graupel), B는 결합된 기둥모양(Rimmed Columns), C는 기둥모양(Columns), D는 판상(Plates), E는 나뭇가지

모양 (Dendrites) 그리고 F는 결착된 나뭇가지 모양(Rimed Dendrites)을 나타낸다.

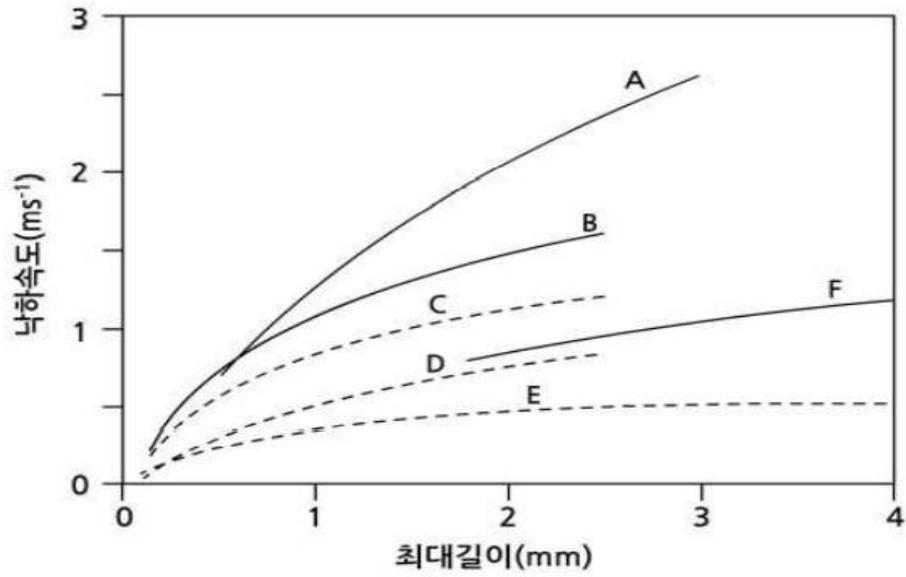


그림 22. 빙정의 낙하속도(Mitchell, 1996)

3. 자료조사 및 분석방법

3.1. 자료조사

3.1.1. 시간별 신적설 자료

2017년부터 2021년 사이의 겨울철(12월~3월)에 나타난 목측 및 레이저 적설계로 충청남북도 총 46개 중 충북이 26개소, 대전 및 충남이 20개소로 관측된 0.1cm 이상의 시간별 신적설 및 일별 신적설 최심을 추출한다.

3.1.2. 해상장비 관측자료

충청도 근해로 내륙으로 영향을 받을 것으로 예상되는 3개 지점(덕적도, 인천, 외연도)을 선정하여 신적설이 나타난 날 풍향 및 풍속, 수온을 추출하여 분석한다.

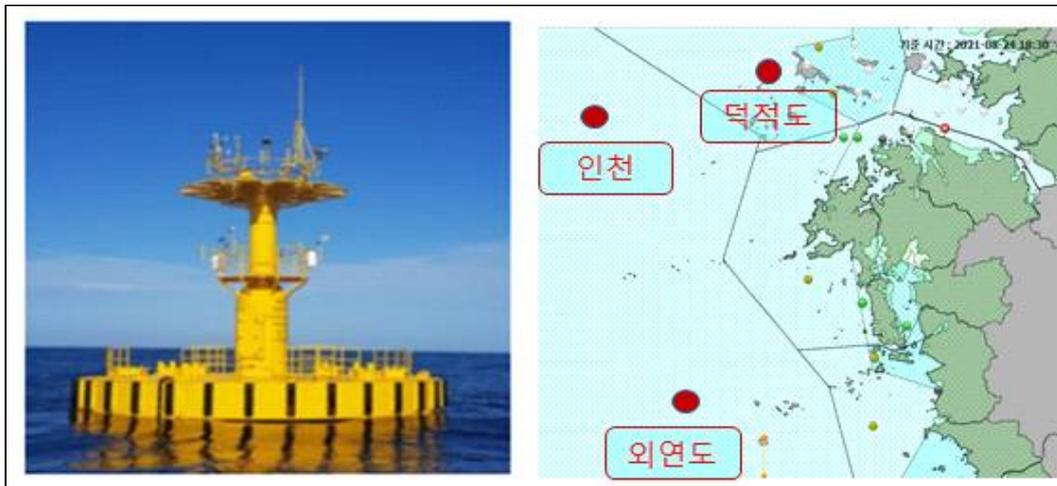


그림 23. 해상기상부이 및 위치

표 1. 해상기상부이 선정지점

지점	지점번호	위도	경도
덕적도	22101	37.24	126.02
인천	22185	37.09	125.43
외연도	22108	36.25	125.75

3.1.3. 임의 지점별 연직자료

충청지방에 고층 기상관측 자료가 없어서 UM 전지구 모델 초기장을 활용하여 관측지점에서 가까운 모델자료를 활용하여 각 고도별(925hPa, 850hPa, 700hPa, 500hPa)의 기온, 노점 온도, 풍향 및 풍속자료를 추출하여 눈이 쌓이는 일자의 00UTC, 12UTC의 해상기상부이 자료의 지점과 내륙의 대표지점 7개 소를 선정하여 층별 자료를 분석하였다.

표 2. 충청도 연직자료 대표지점

지점번호	대표지점	위도	경도	해당지역
127	충주	36.97038	127.9527	단양, 제천, 덕산, 수안보, 업정, 음성, 청천
129	서산	36.77661	126.4939	당진, 태안, 대산, 홍성, 서부
131	청주	36.63924	127.4407	진천, 위성센터, 증평, 상당
133	대전	36.372	127.3721	문화, 공주, 유구, 정안, 금산, 논산, 부여, 청양, 세종, 세종금남, 세종전의, 계룡
135	추풍령	36.22023	127.9946	영동, 보은, 옥천, 옥천청산
232	천안	36.77962	127.1191	아산, 예산, 천안
235	보령	36.32721	126.5574	서천, 홍성, 서부, 춘장대

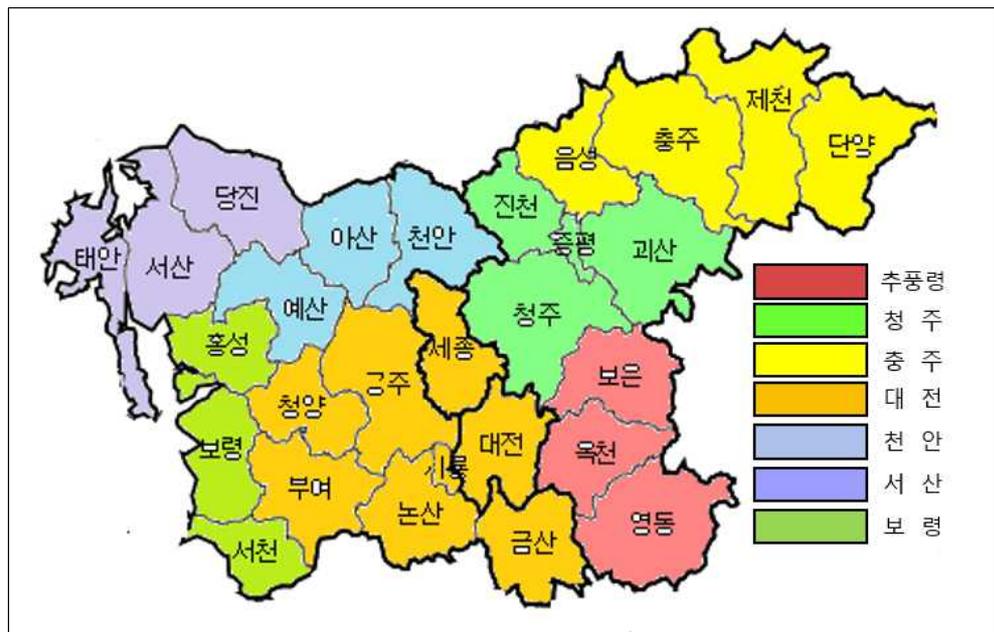


그림 24. 충청도 7개 구별 지역분포

3.2. 자료 분석방법

3.2.1. 신적설 자료 분석

연도별 신적설 일수를 추출하여 연도별 신적설 일수 변화량을 분석하고, “손에 잡히는 예보기술에 기술된 5개 유형모델”을 토대로 일별 유형모델을 분류하며, 일별 시간대로 신적설 일수를 추출하여 그동안 제시되었던 야간에 하층제트가 강화되어 눈이 많이 오는 것을 제시한다.

3.2.2. 해수온도와 각 층별 기온자료 분석

충청도 내륙의 대표지점의 신적설 일자에 해상기상부이 지점의 관측 자료를 이용하여 수온과 850hPa 기온 해기차를 분석해 제시된 해기차 15°C 이상에서 눈내리는 조건을 분석한다.

3.2.3. 연직자료의 습수층 및 바람자료 분석

모델 초기장에서 해상기상부이 3소의 기온과 노점온도를 이용하여 각 층의 차이가 4도 이하의 습수층을 분석하여 발달한 구름대와 덜 발달한 구름대가 내륙 어디까지 유입되는지를 분석하고, 바람 자료를 이용하여 풍향별 유입경로, 풍속 강도별 유입범위를 분석한다.

3.3. 사례분석 방법

분석된 자료를 토대로 대표 사례별 날짜에 대해 선정하여 분석한 내용과 일치하는가를 확인하고 검증한다.

4. 본론

4.1. 지역별 신적설 일수

4.1.1. 유형별 일수

조사기간('17.1.1.~'21.3.31.)에 적설 관측지점 총 46개 중 중복이 26개소, 대전 및 충남이 20개소로 적설일수는 가장 많은 위성센터(충북 진천)에 49일 관측되었고, 일 신적설 최심은 예산이 19.5cm(2018.1.9.) 기록되었다.

표 3. 충청지역 적설 관측지점

지역	지점	도입연도	신적설 일수	신적설		
				최심(cm)	나타난 일	유형별
충북 진천 (26개소)	괴산	2017	30	12	2018.03.08.	온난종관 저기압형
	청천	2019	15	6	2021.02.16.	발해만 저기압형
	단양	2017	34	9.4	2020.12.13.	발해만 저기압형
	보은	2019	8	10	2020.12.13.	발해만 저기압형
	영동	2019	7	4.3	2021.02.16.	발해만 저기압형
	추풍령	2014	26	11.7	2018.03.08.	온난종관 저기압형
	옥천	2017	25	7.7	2021.02.16.	발해만 저기압형
	옥천청산	2020	6	4.9	2021.01.01.	발해만 저기압형
	음성	2019	6	4	2021.03.02.	온난종관 저기압형
	덕산	2020	14	7.5	2021.03.02.	온난종관 저기압형
	수산	2018	10	8.4	2020.12.13.	발해만 저기압형
	제천	2019	13	10.7	2020.12.13.	발해만 저기압형
	증평	2015	9	4	2020.12.13.	발해만 저기압형
	위성센터	2016	49	10.5	2017.11.24.	발해만 저기압형
	진천	2015	38	8.2	2018.01.09.	서해안형
	상당	2018	15	4	2021.02.16.	발해만 저기압형
	대전 및 충남 충청도 (20개소)	청주	2020	45	9.2	2018.01.10.
수안보		2018	5	5.3	2020.12.13.	발해만 저기압형
충주		2015	35	8.3	2020.12.13.	발해만 저기압형
엄정		2020	16	8.2	2020.12.13.	발해만 저기압형
대전		2020	34	5.9	2018.01.11.	서해안형
문화		2019	5	5.6	2021.02.16.	발해만 저기압형
홍성		2020	35	9.7	2018.01.09.	서해안형
계룡		2015	40	12.7	2017.11.24.	발해만 저기압형
공주		2019	7	3.5	2021.02.16.	발해만 저기압형
유구		2018	12	4.8	2021.02.16.	발해만 저기압형
정안		2020	12	7	2021.02.14.	서해안형
금산		2019	10	6	2021.02.16.	발해만 저기압형
논산		2015	34	15.2	2018.01.09.	서해안형
당진		2019	4	3.3	2021.02.16.	발해만 저기압형
보령		2019	26	15.5	2021.02.16.	발해만 저기압형
부여		2019	4	10.5	2021.02.16.	발해만 저기압형
대산		2019	2	4.6	2021.02.16.	발해만 저기압형
서산		2014	17	10.7	2018.01.09.	서해안형
서천		2017	21	11.7	2018.01.10.	서해안형
출장대		2020	9	6.6	2020.12.30.	서해안형
아산	2016	28	6.7	2018.01.09.	서해안형	
예산	2017	19	19.5	2018.01.09.	서해안형	
천안	2019	32	9.5	2018.01.11.	서해안형	
청양	2019	12	4.7	2121.01.01.	발해만 저기압형	
태안	2019	8	4.8	2121.01.01.	발해만 저기압형	
서부	2019	8	3.9	2121.01.01.	발해만 저기압형	
세종	2019	12	4.7	2021.02.16.	발해만 저기압형	
세종전의	2020	16	10.6	2020.12.30.	서해안형	
세종금남	2017	12	7.6	2018.01.09.	서해안형	

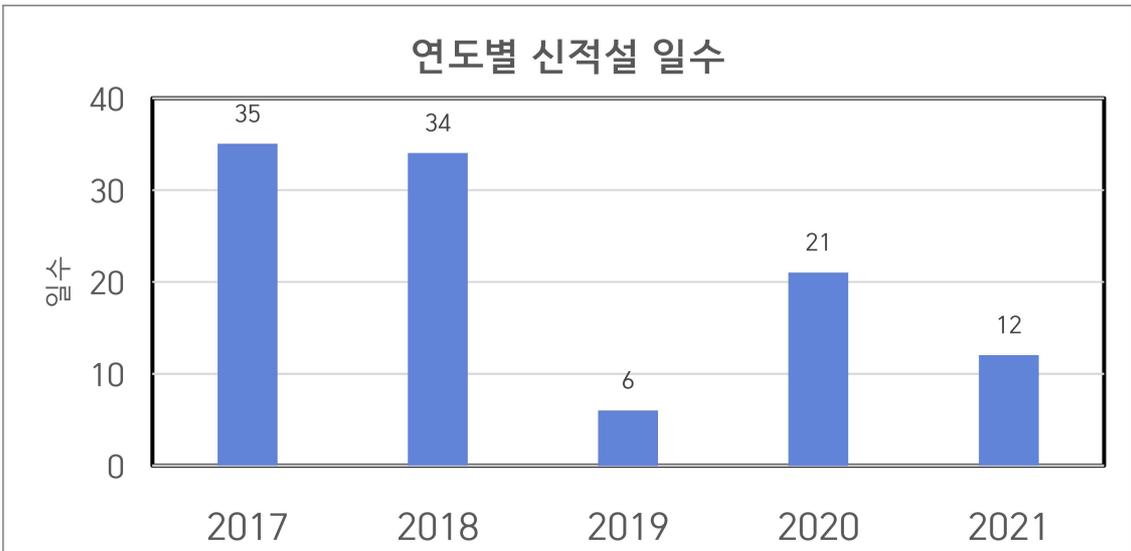


그림 25. 연도별 신적설 일수(2017.1~2021.03)

총 신적설 일수 108일 중 위 그림에서 연도별 신적설 일수는 2017년에 35일로 가장 많았으며, 2019년은 6일로 조사기간 중 가장 적은 신적설 일수를 기록하였다.

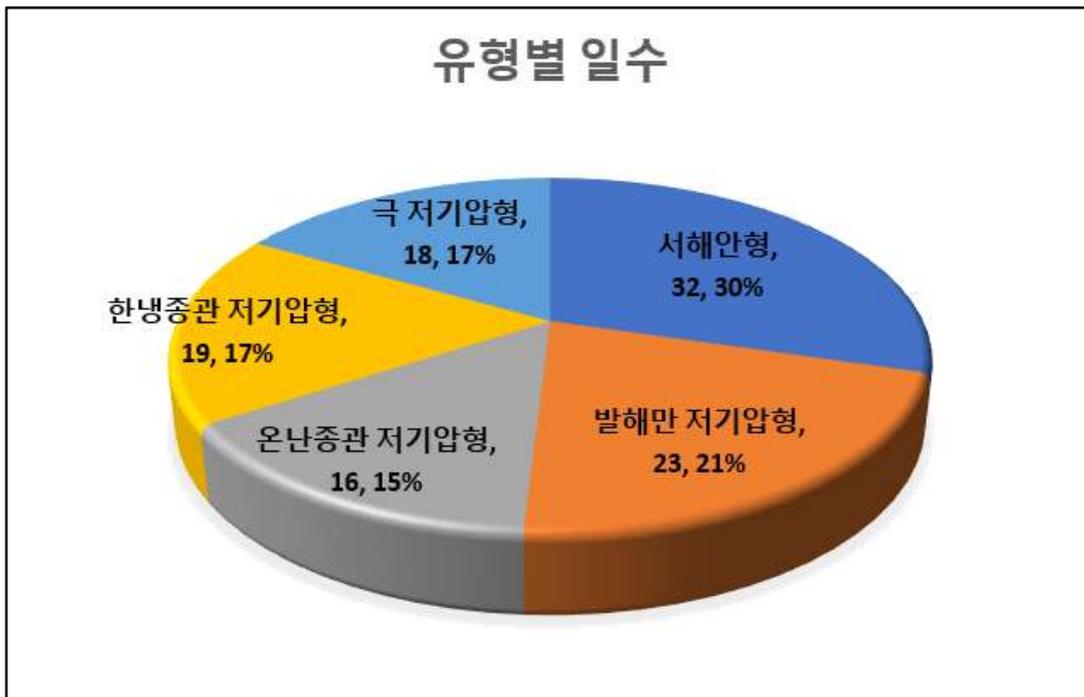


그림 26. 유형별 신적설 일수(2017.1~2021.03)

총 108개 중 손에 잡히는 예보기술에 기술된 5개 유형모델에 대입하

여 보면, 서해안형에서 32일(30%)로 가장 많이 나타났으며, 발해만 저기압형에서 23일(21%), 한냉종관 저기압형에서 19일(17%), 극 저기압형에서 18일(17%), 온난종관 저기압형에서 16일(15%) 순으로 나타났다.

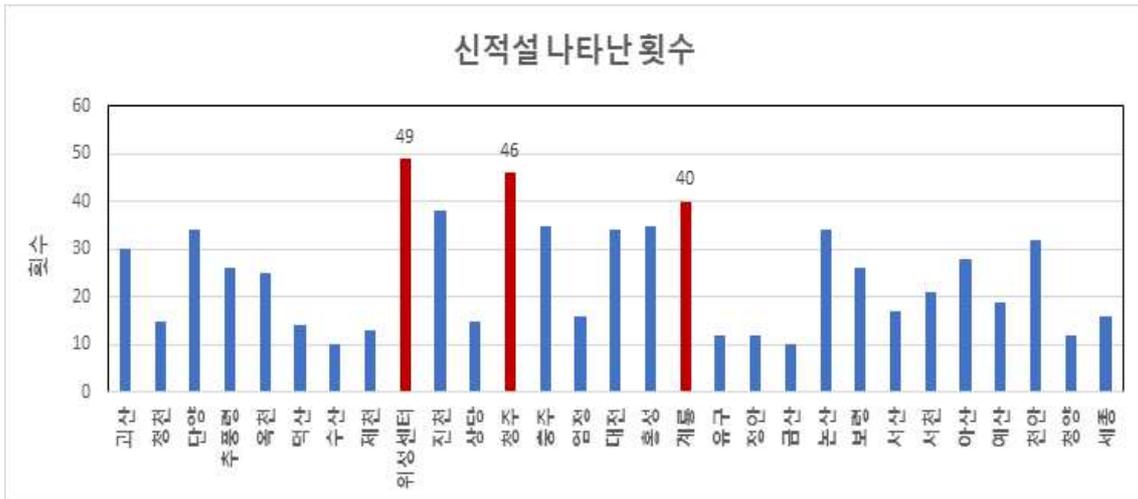


그림 27. 지점별 신적설 일수

위 그림은 충청도 지점별 신적설 일수를 보면 위성센터가 신적설일수가 49일로 가장 많이 눈이 내리는 지역이며, 그 다음으로 청주가 46일, 계룡이 40일로 그 뒤에 있으며, 구역별로 나누어 보면 충남 서해안 지방은 서산이 17일, 충남내륙은 계룡이 40일, 충북북부는 단양이 34일, 충북중부는 위성센터 49일, 충북남부는 옥천이 25일로 많은 눈이 내리는 지역이다.

4.1.2. 야간에 눈이 많이 내리는 경향

다음 그림은 낮에 보통 공기들이 지표면 가열로 상하층 움직임이 활발한 반면 밤에는 공기들이 냉각되어 상하층 움직임이 줄어들게 된다. 보통 하층제트는 태양이 없는 야간에는 북으로 이동하는 하층제트는 공기의 상하층 운동에 의한 마찰이 줄어들어 힘의 감소가 없이 빠르게 북으로 이동할수 있다. 따라서 마찰이 적은 밤에 하층제트에 의한 따뜻한 공기가 많은 수증기의 이동이 더욱 활발하여 낮보다 더 많은 구름대를 발달시킨다.

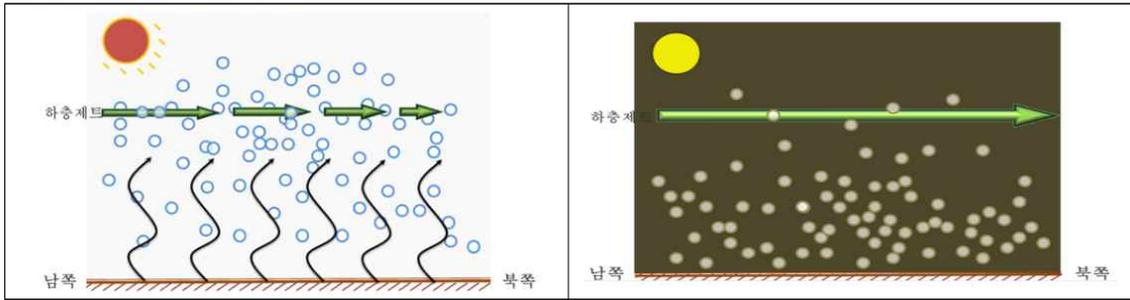


그림 29. 낮(좌측)과 밤(우측)의 하층제트 모식도

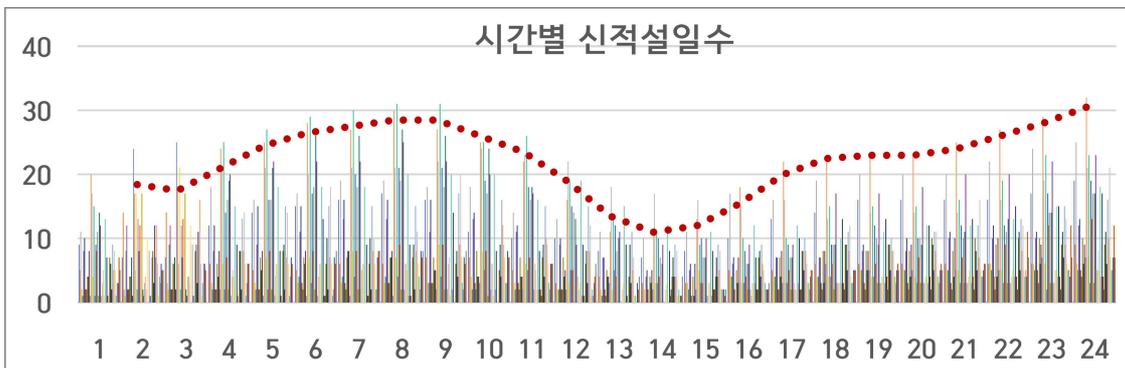


그림 30. 일 시간별 신적설 일수

위 그림은 충청 전 신적설 관측지점을 일 단위로 시간대별 신적설 일수를 보면, 야간에 증가하고, 주간 오후에 감소함을 볼수 있다. 주간 오후(13~15시)에 약 20회 이하로 감소하였다가 17시 이후부터 증가하기 시작하여 새벽(00~03시)에 일시 감소 하였다가, 아침(6~9시)에 최고 30회 이상으로 증가하여 오전 9시 이후에는 점차 감소하기 시작하여 오후(13~15시)에는 최저로 나타나 위에 제시한 야간에 눈이 오는 횟수가 많으며 대설을 유발시킨다.

4.2. 요소별 분석

4.2.1. 해기차 분석

충남북부 서해안(당진, 서산, 태안)에서 신적설이 3cm이상으로 나타난 날 11일을 기준으로 해상부이 3개소(인천, 외연도, 덕적도) 해수온도와 850hPa 고도 기온 차이를 산정한 그래프를 보면, 인천은 14.3~25.0도, 외연도는 16.7~24.6도, 덕적도는 17.3~24.5도의 분포를 보이고, 해기차 평균은 인천 19.5도, 외연도 19.5도, 덕적도 20도의 분포를 보이고, 대체적으로 15도 이상에서 3cm이상의 신적설이 나타나는 것을 볼 수 있다.

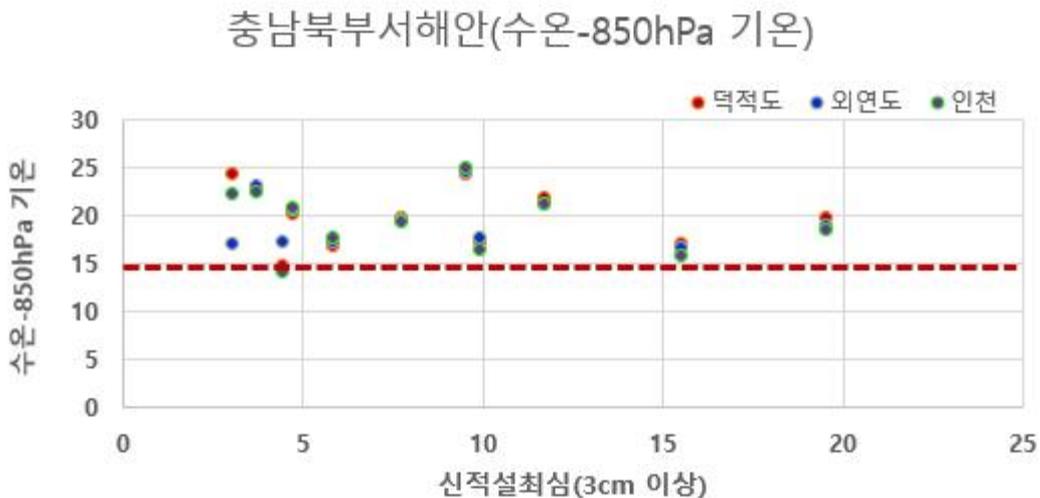


그림 31. 충남북부 서해안 기상부이 850hPa 고도와 해수온도 차이

충남남부 서해안(홍성, 보령, 서천, 춘장대, 서부)에서 신적설이 3cm 이상으로 나타난 날 21일을 기준으로 해상부이 3개소(인천, 외연도, 덕적도) 해수온도와 850hPa 고도의 기온 차이를 산정한 그래프를 보면, 인천은 15~27.4도, 외연도는 16.7~27.4도, 덕적도는 15.4~29.8도의 분포를 보이고, 해기차 평균은 인천 20.3도, 외연도 20.3도, 덕적도 20.7도의 분포를 보이고, 대체적으로 15도 이상에서 3cm이상의 신적설이 나타나는 것을 볼 수 있다.

충남남부서해안(수온-850hPa 기온)

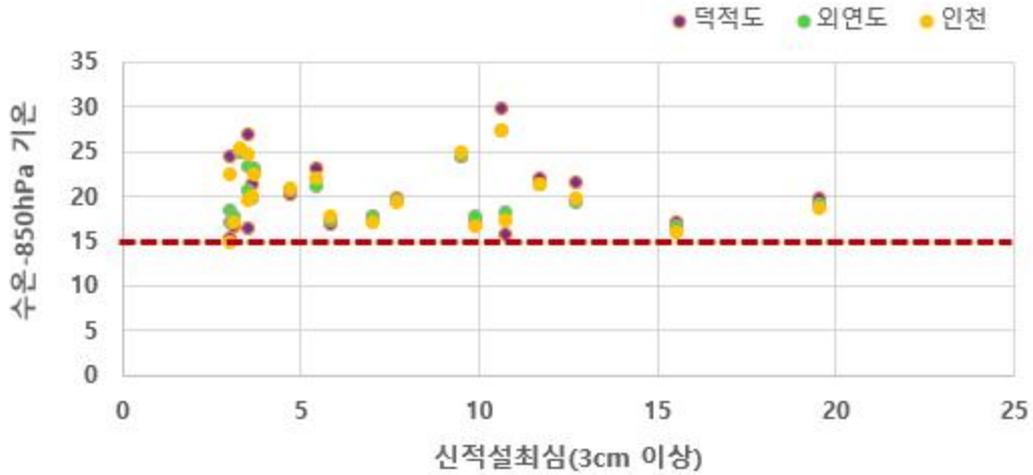


그림 32. 충남남부 서해안 기상부이 850hPa 고도와 해수온도 차이

충남북부내륙(아산, 예산, 천안)에서 신적설이 3cm이상으로 나타난 날 23일을 기준으로 해상부이 3개소(인천, 외연도, 덕적도) 해수온도와 850hPa 고도의 기온 차이를 산정한 그래프를 보면, 인천은 15.0~27.4도, 외연도는 16.7~27.4도, 덕적도는 15.4~29.8도의 분포를 보이고, 해기차 평균은 인천 20.4도, 외연도 20.6도, 덕적도 20.7도의 분포를 보이고, 대체적으로 15도 이상에서 3cm이상의 신적설이 나타나는 것을 볼 수 있다.

충남북부내륙(수온-850hPa 기온)

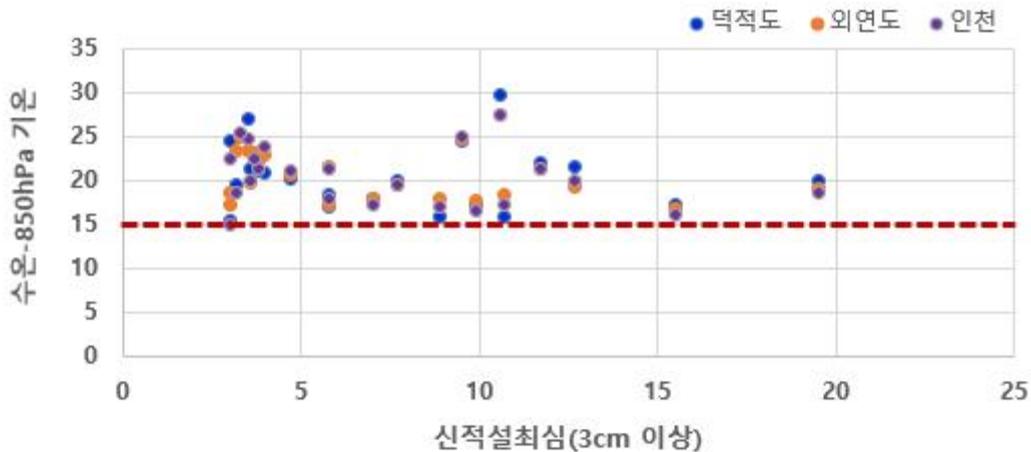


그림 33. 충남북부내륙 기상부이 850hPa 고도와 해수온도 차이

충남북부내륙(대전, 문화, 계룡, 공주, 유구, 정안, 금산, 논산, 부여, 청양, 세종)에서 신적설이 3cm이상으로 나타난 날 25일을 기준으로 해상부이 3개소(인천, 외연도, 덕적도) 해수온도와 850hPa 고도의 기온 차이를 산정한 그래프를 보면, 인천은 16.0~27.4도, 외연도는 16.7~27.4도, 덕적도는 15.9~29.8도의 분포를 보이고, 해기차 평균은 인천 20.8도, 외연도 20.9도, 덕적도 21.1도의 분포를 보이고, 대체적으로 15도 이상에서 3cm이상의 신적설이 나타나는 것을 볼 수 있다.

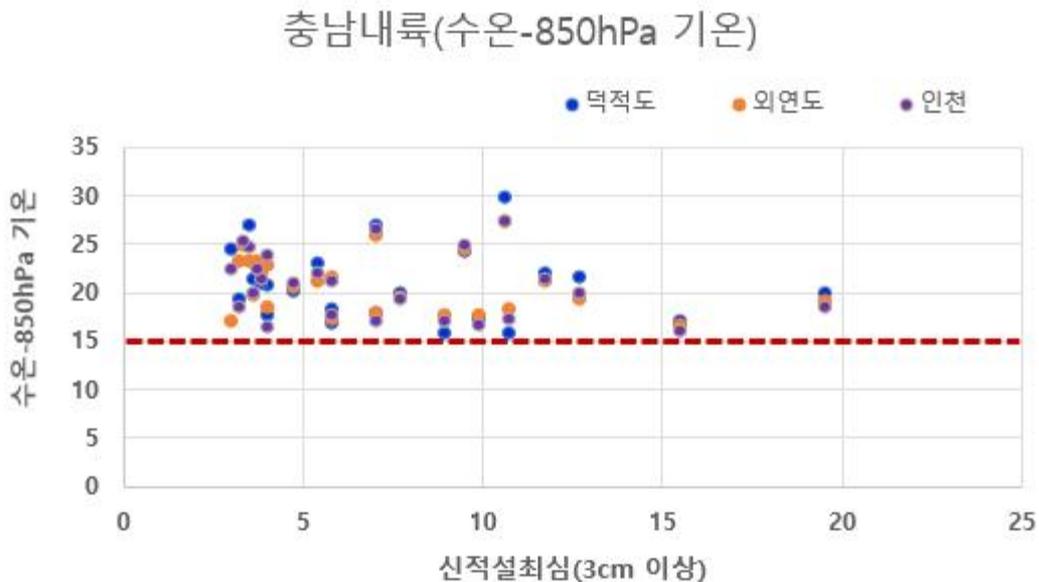


그림 34. 충남내륙 기상부이 850hPa 고도와 해수온도 차이

충북중부(괴산, 청천, 증평, 위성센터, 진천, 상당, 청주)에서 신적설이 3cm이상으로 나타난 날 26일을 기준으로 해상부이 3개소(인천, 외연도, 덕적도) 해수온도와 850hPa 고도의 기온 차이를 산정한 그래프를 보면, 인천은 15.0~27.4도, 외연도는 16.7~27.4도, 덕적도는 15.4~29.8도의 분포를 보이고, 해기차 평균은 인천 20.6도, 외연도 20.8도, 덕적도 20.8도의 분포를 보이고, 대체적으로 15도 이상에서 3cm이상의 신적설이 나타나는 것을 볼 수 있다.

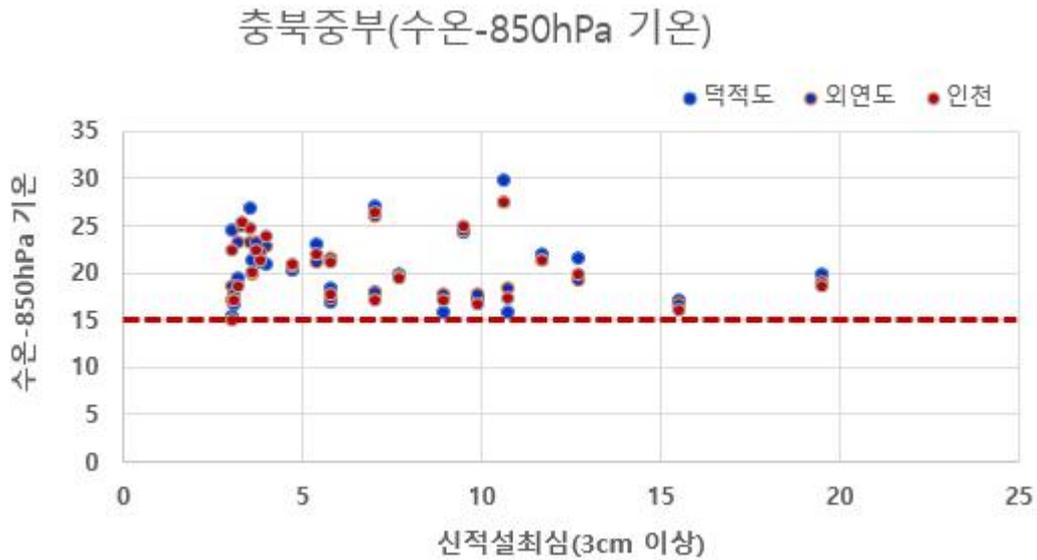


그림 35. 충북중부 기상부이 850hPa 고도와 해수온도 차이

충북북부(단양, 음성, 덕산, 수산, 제천, 수안보, 충주, 엄정)에서 신적설이 3cm이상으로 나타난 날 13일을 기준으로 해상부이 3개소(인천, 외연도, 덕적도) 해수온도와 850hPa 고도의 기온 차이를 산정한 그래프를 보면, 인천은 16.0~26.5도, 외연도는 16.7~26.0도, 덕적도는 15.9~27.0도의 분포를 보이고, 해기차 평균은 인천 20.9도, 외연도 20.7도, 덕적도 21.4도의 분포를 보이고, 대체적으로 15도 이상에서 3cm이상의 신적설이 나타나는 것을 볼 수 있다.

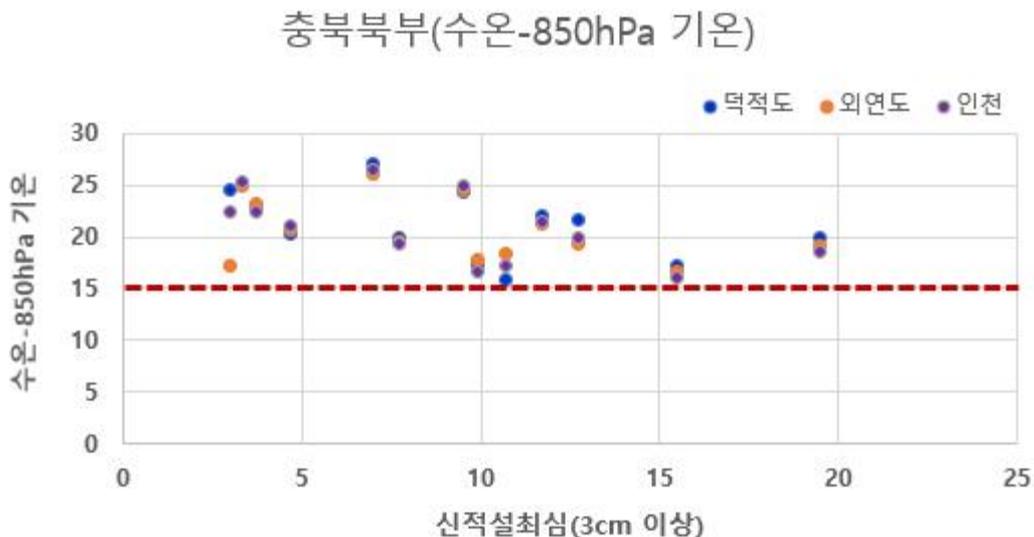


그림 36. 충북북부 기상부이 850hPa 고도와 해수온도 차이

충북남부(보은, 영동, 추풍령, 옥천, 옥천청산)에서 신적설이 3cm이상으로 나타난 날 13일을 기준으로 해상부이 3개소(인천, 외연도, 덕적도) 해수온도와 850hPa 고도의 기온 차이를 산정한 그래프를 보면, 인천은 16.0~25.0도, 외연도는 16.7~24.6도, 덕적도는 17.0~24.5도의 분포를 보이고, 해기차 평균은 인천 19.8도, 외연도 19.6도, 덕적도 20.5도의 분포를 보이고, 대체적으로 15도 이상에서 3cm이상의 신적설이 나타나는 것을 볼 수 있다.

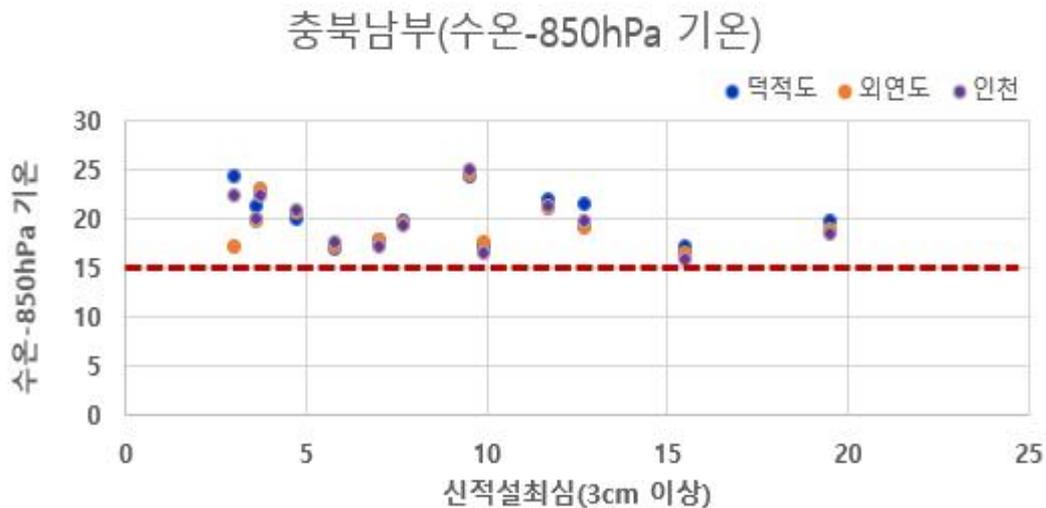


그림 37. 충북남부 기상부이 850hPa 고도와 해수온도 차이

충청도의 대표지점 서산(충남북부 서해안), 보령(충남남부 서해안), 천안(충남북부 내륙), 대전(충남내륙), 충주(충북북부), 청주(충북중부), 추풍령(충북남부)에서 신적설이 3cm이상 나타난 날을 기준으로 해상부이 3개소(인천, 외연도, 덕적도) 해수온도와 850hPa 고도의 기온차이 평균 분포는 3소 모두 20~21도의 분포로 인천 20.3도, 외연도 20.3도, 덕적도 20.7도를 보여 덕적도 해기차가 가장 크며, 대체적으로 충남 서해안 지방은 20도 내외의 분포, 충남북부 내륙은 20.5도 내외, 충남내륙 및 충북충북부는 20.5도 이상의 해기차가 있어야 신적설 3cm이상의 눈이 내릴 수 있다. 그러나, 해기차에 의한 충북남부 상관성 설명은 부족하였다.

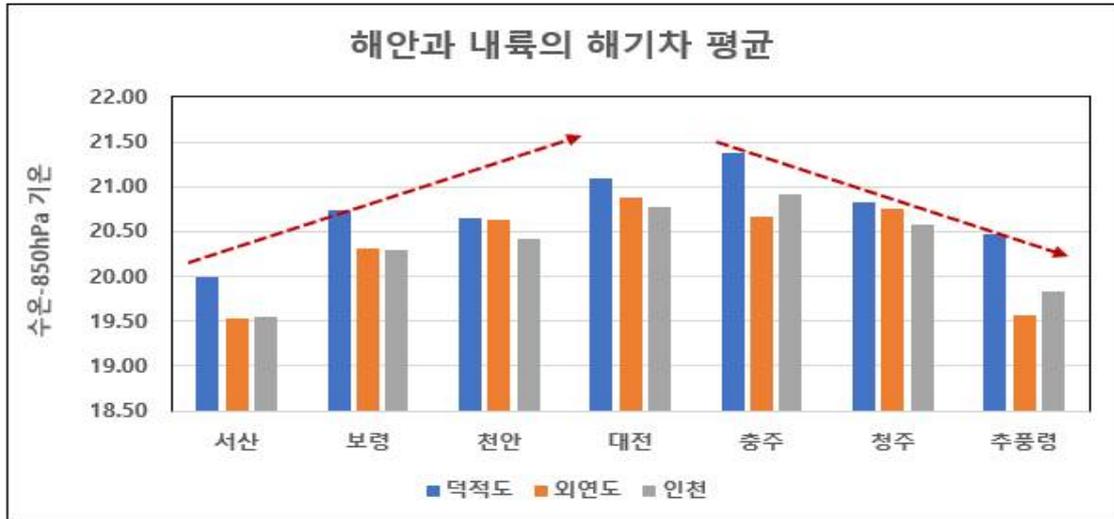


그림 38. 해안과 내륙의 해기차 평균

4.2.2. 해양의 층별 습수가 내륙까지 영향받을 상관성 분석

충청지방에 영향을 받을 수 있는 기상청 부이 3소(인천, 덕적도, 외연도)의 4개 층(925hPa, 850hPa, 700hPa, 500hPa)에서 09시와 21시 기온과 이슬점 온도가 4도 이하인 각 층의 자료로 각 지역이 신적설이 나타난 일자를 추출하여 상관성을 분석했다.

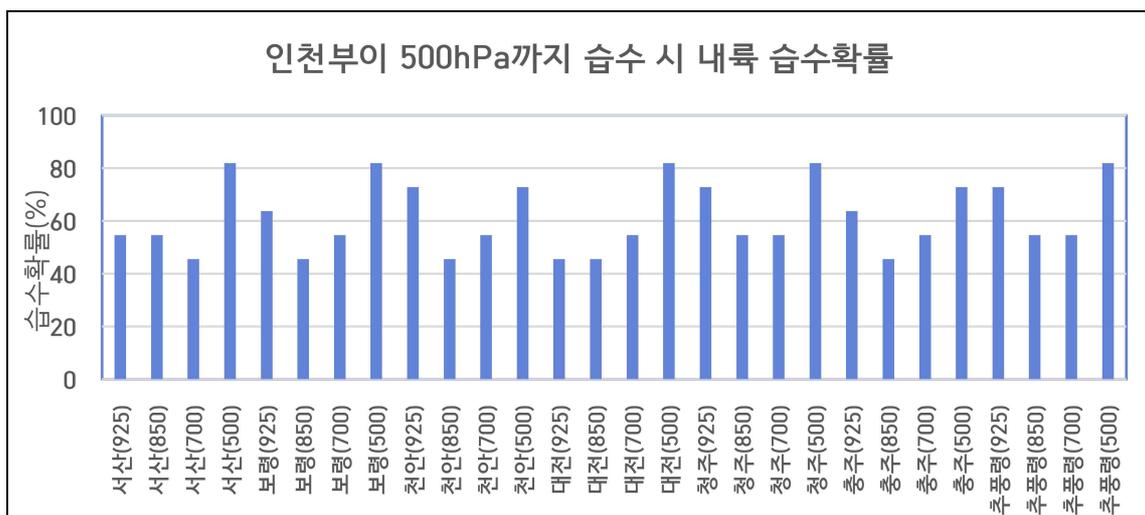


그림 39. 인천부이 500hPa까지 습수 시 각 지역별 습수 확률

위 그래프에서 인천부이의 500hPa까지 기온과 이슬점 온도의 차이가 4도 이하로 상층까지 포화되었을 시 충청내륙 전 지역에도 500hPa까지

포화되었다. 특히 서산, 보령, 대전, 청주, 추풍령이 포화될 확률이 80% 이상이고, 천안과 충주가 73%로 낮게 포화되었으나, 상층까지 해상에서 포화되었을 때에는 충청 전 지역에 포화돼 상관성이 높아 눈이 내릴 확률이 높다.

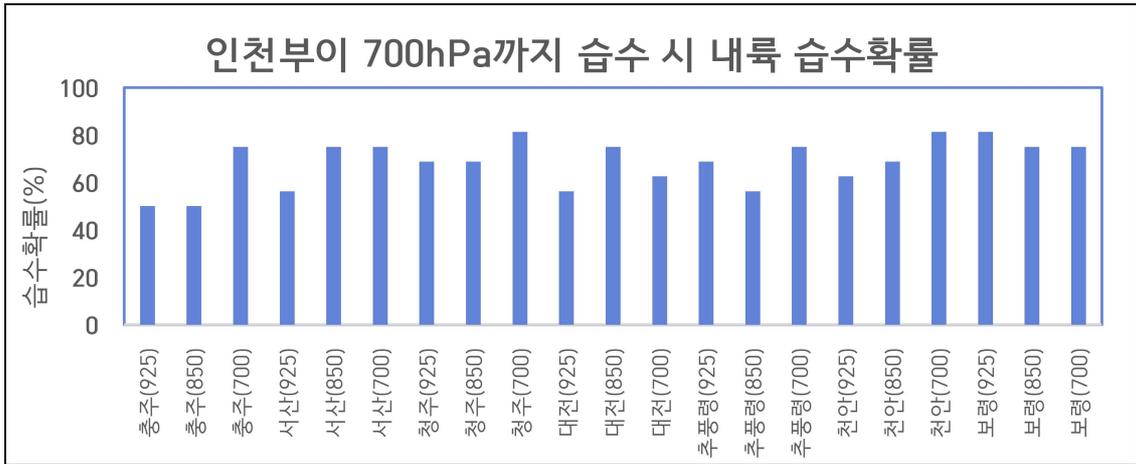


그림 40. 인천부이 700hPa까지 습수 시 각 지역별 습수 확률

위 그래프에서 인천부이의 700hPa까지 기온과 이슬점온도의 차이가 4도 이하로 중층까지 포화되었을 시 청주와 천안지역에서 포화될 확률이 80% 이상이고, 충주, 서산, 추풍령, 보령이 70%이상으로 충남 서해안 및 충북내륙이 700hPa까지 포화되어 상관성이 높아 눈이 내릴 확률이 높다.

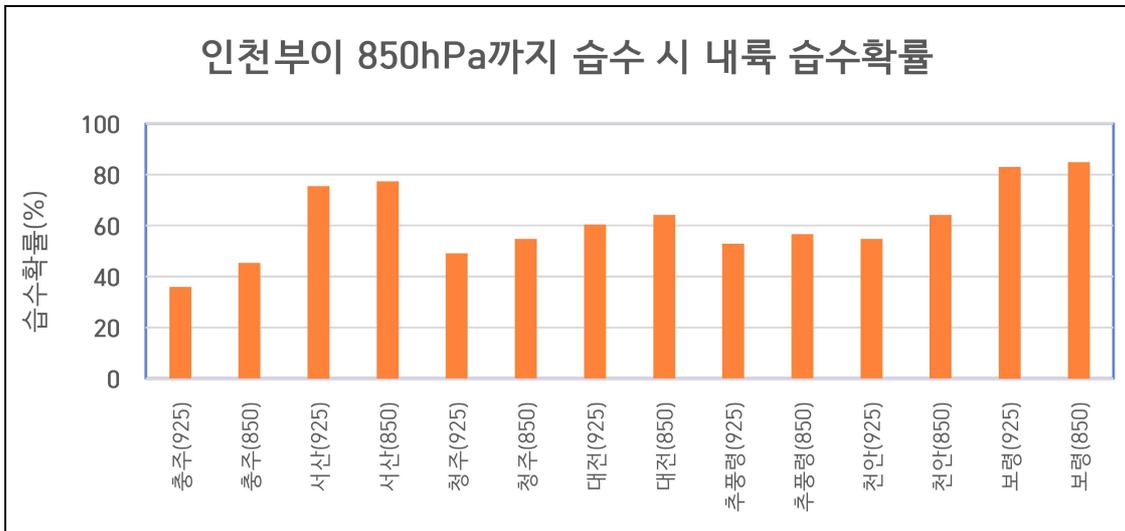


그림 41. 인천부이 850hPa까지 습수 시 각 지역별 습수 확률

위 그래프에서 인천부이의 850hPa까지 기온과 이슬점온도의 차이가 4도 이하로 하층까지 포화되었을 시 청주와 보령지역에서 포화될 확률이 80% 이상이고, 충주가 70%이상으로 충남남부 서해안 및 충북중북부 내륙이 850hPa까지 포화되어 상관성이 높아 눈이 내릴 확률이 높다.

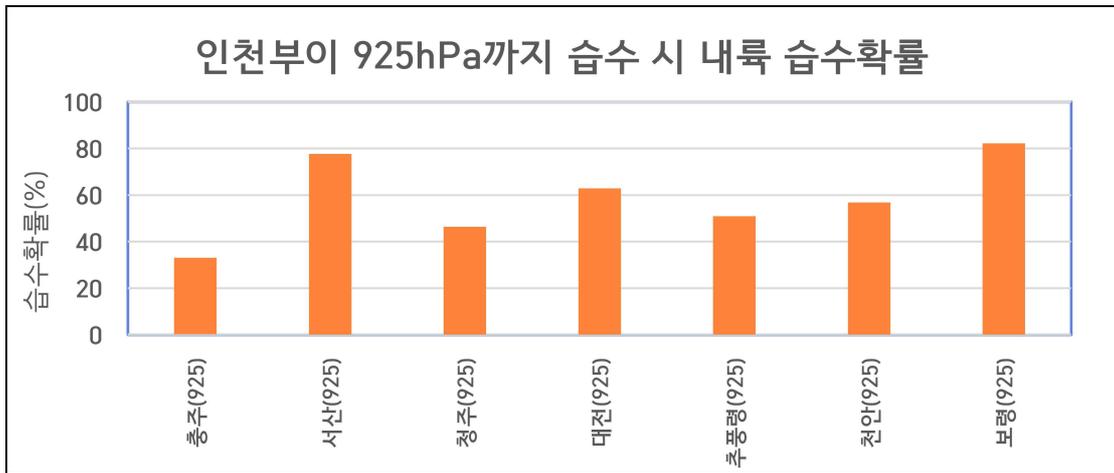


그림 42. 인천부이 925hPa까지 습수 시 각 지역별 습수 확률

위 그래프에서 인천부이의 925hPa까지 기온과 이슬점온도의 차이가 4도 이하로 하층까지 포화되었을 시 보령지역에서 포화될 확률이 80% 이상이고, 서산이 70%이상으로 충남 서해안을 중심으로만 925hPa까지 포화되어 상관성이 높아 눈이 내릴 확률이 높다.

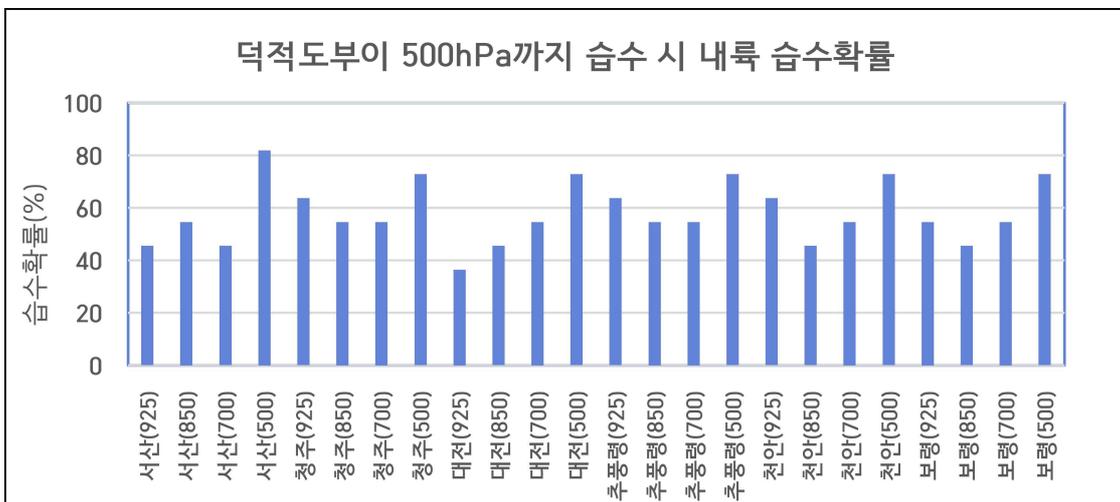


그림 43. 덕적도부이 500hPa까지 습수 시 각 지역별 습수 확률

위 그래프에서 덕적도부이의 500hPa까지 기온과 이슬점온도의 차이가 4도 이하로 상층까지 포화되었을 때 서산은 포화될 확률이 80% 이상으로 가장 높으며 청주, 대전, 추풍령, 천안, 보령이 70% 이상으로 포화되어 해상에 상층까지 포화되었을 때에는 충청 전 지역에 포화되는 상관성으로 눈이 내릴 확률이 높다.

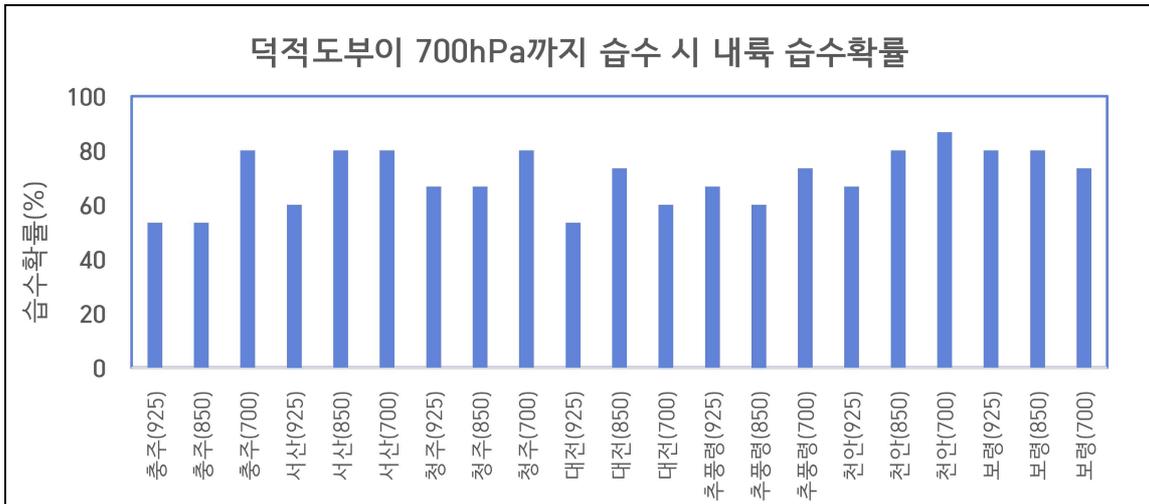


그림 44. 덕적도부이 700hPa까지 습수 시 각 지역별 습수 확률

위 그래프에서 덕적도부이의 700hPa까지 기온과 이슬점온도의 차이가 4도 이하로 중층까지 포화되었을 시 충주, 서산, 청주, 천안에서 포화될 확률이 80% 이상이고, 대전, 추풍령, 보령에서 70%이상으로 충청 전지역이 700hPa까지 포화되는 상관성을 보여 눈이 내릴 확률이 높다.

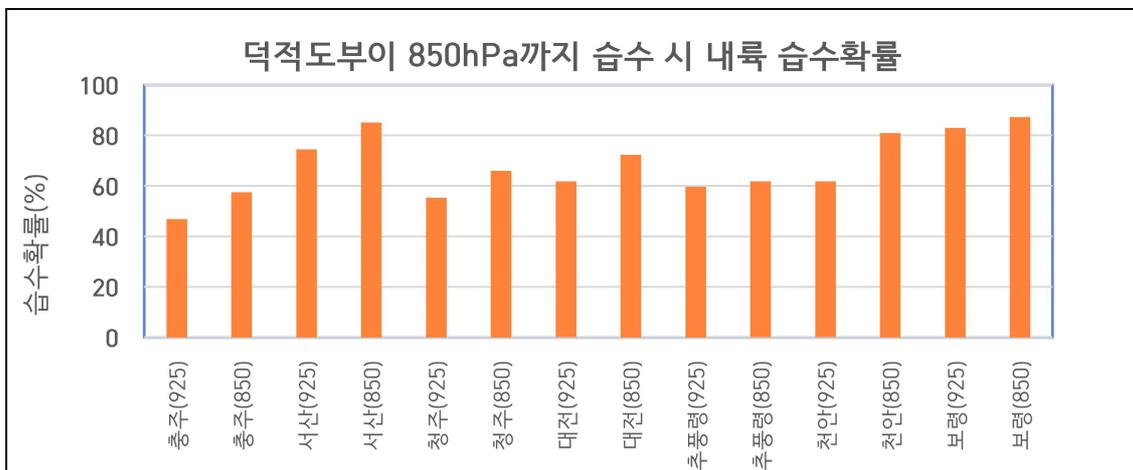


그림 45. 덕적도부이 850hPa까지 습수 시 각 지역별 습수 확률

위 그래프에서 덕적도부이의 850hPa까지 기온과 이슬점온도의 차이가 4도 이하로 하층까지 포화되었을 시 서산, 보령, 천안지역에서 포화될 확률이 80% 이상이고, 대전이 70%이상으로 충남 서해안 및 충남내륙에서 850hPa까지 포화되어 상관성을 보여 눈이 내릴 확률이 높다.



그림 46. 덕적도부이 925hPa까지 습수 시 각 지역별 습수 확률

위 그래프에서 덕적도부이의 925hPa까지 기온과 이슬점온도의 차이가 4도 이하로 하층까지 포화되었을 시 서산 및 보령지역에서 포화될 확률이 80% 이상으로 충남 서해안을 중심으로만 925hPa까지 포화되어 상관성을 보여 눈이 내릴 확률이 높다.

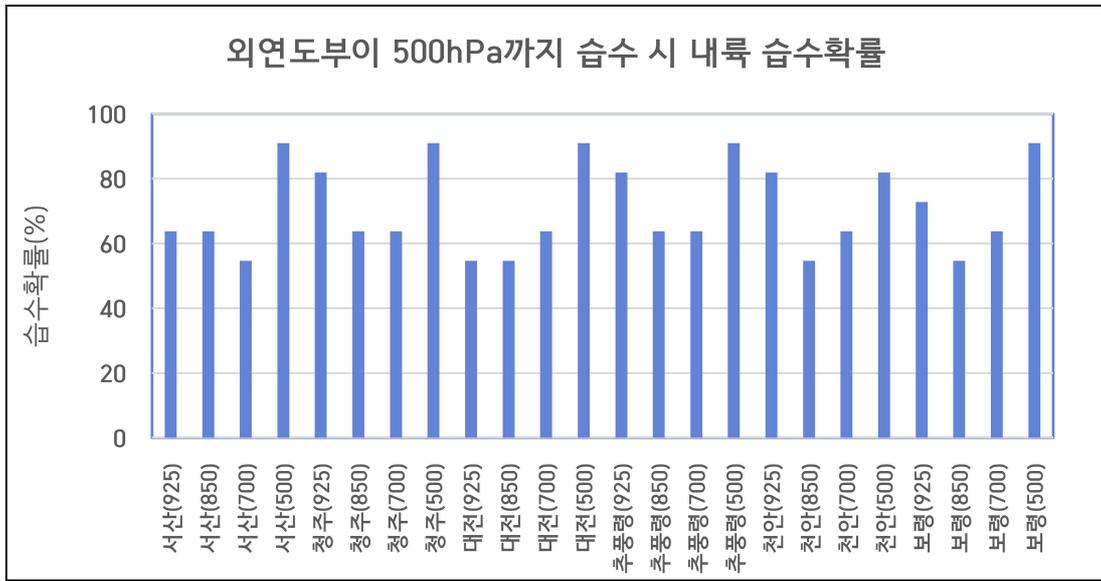


그림 47. 외연도부이 500hPa까지 습수 시 각 지역별 습수 확률

위 그래프에서 외연도부이의 500hPa까지 기온과 이슬점온도의 차이가 4도 이하로 상층까지 포화되었을 때 충청 전 지역에서 포화될 확률이 80% 이상으로 해상에 상층까지 포화되었을때에는 충청 전 지역에 포화되는 상관성으로 눈이 내릴 확률이 높다.

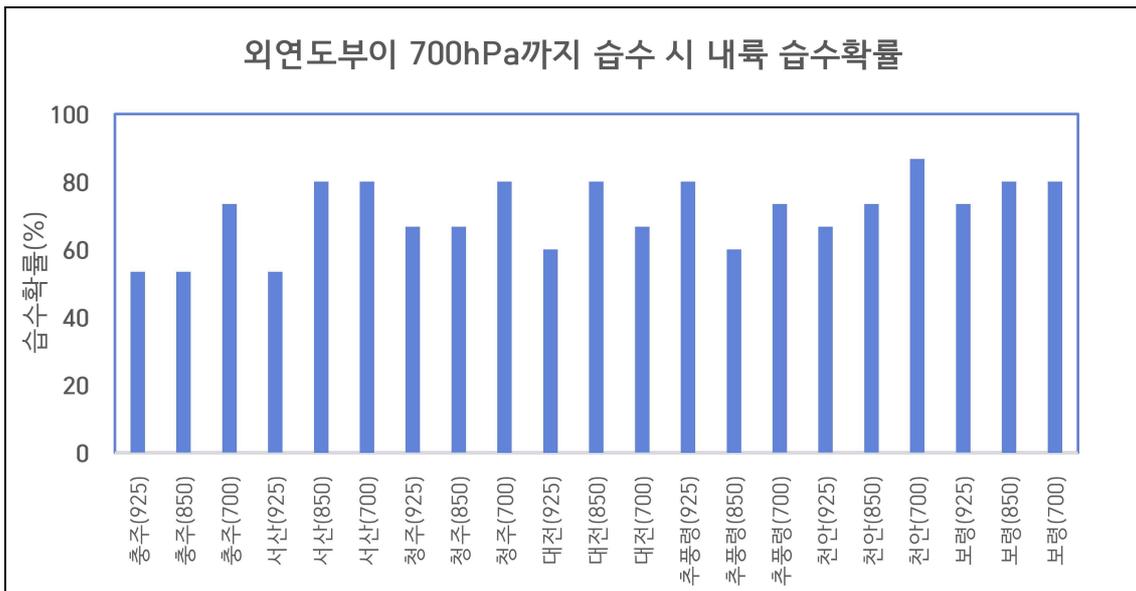


그림 48. 외연도부이 700hPa까지 습수 시 각 지역별 습수 확률

위 그래프에서 외연도부이의 700hPa까지 기온과 이슬점온도의 차이가 4도 이하로 중층까지 포화되었을 때 서산, 청주, 천안, 보령에서 포화

될 확률이 80% 이상이고, 충주, 추풍령에서 70%이상으로 충남 서해안, 충남북부 내륙과 충북내륙 전 지역에서 700hPa까지 포화되는 상관성을 보여 눈이 내릴 확률이 높다.

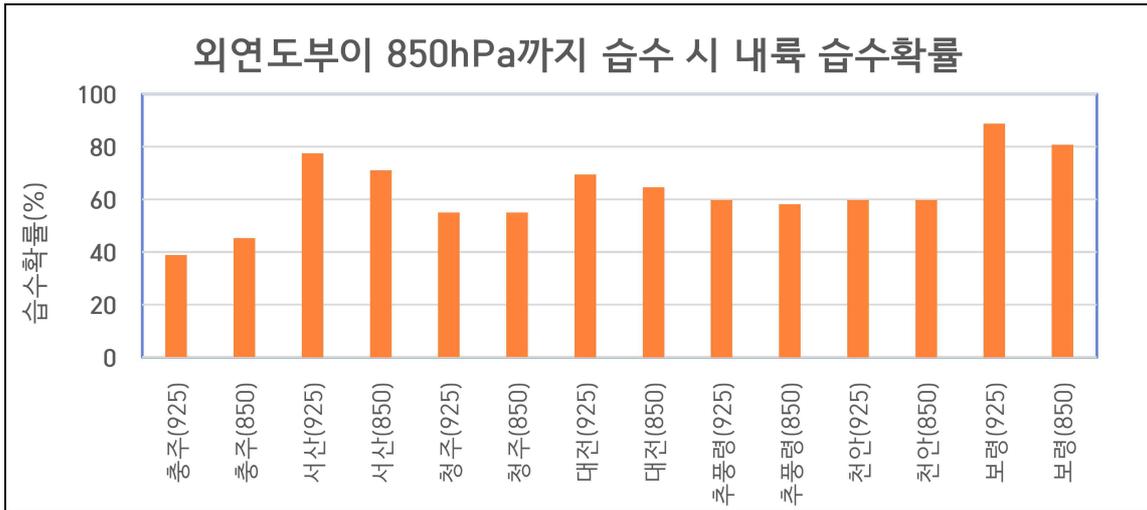


그림 49. 외연도부이 850hPa까지 습수 시 각 지역별 습수 확률

위 그래프에서 외연도부이의 850hPa까지 기온과 이슬점온도의 차이가 4도 이하로 하층까지 포화되었으면 보령에서 포화될 확률이 80% 이상이고, 서산이 70%이상으로 충남 서해안에서 850hPa까지 포화되는 상관성을 보여 눈이 내릴 확률이 높다.

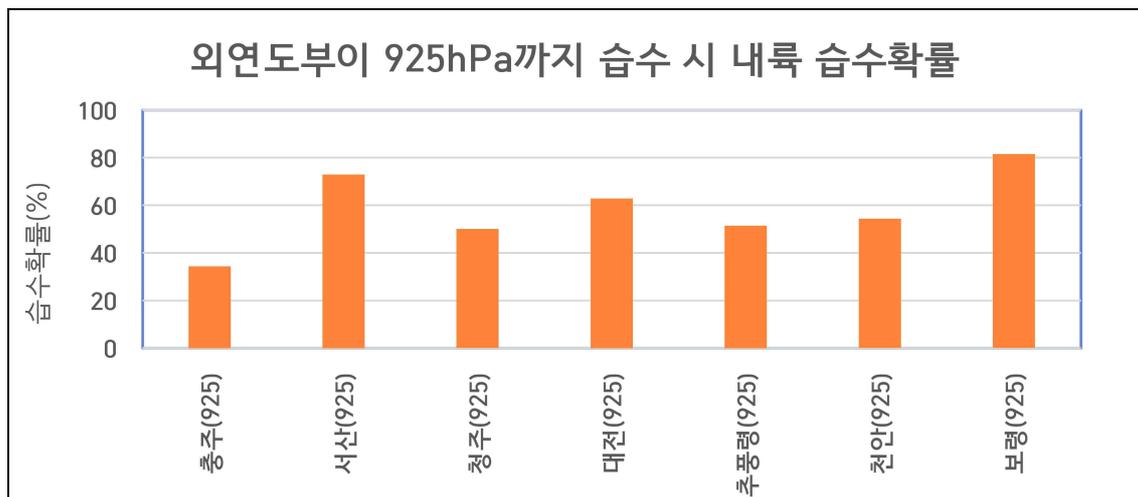


그림 50. 외연도부이 925hPa까지 습수 시 각 지역별 습수 확률

위 그래프에서 덕적도부이의 925hPa까지 기온과 이슬점온도의 차이가 4도 이하로 하층까지 포화되었을 시 보령지역에서 포화될 확률이 80% 이상, 서산에서 73% 이상으로 충남 서해안을 중심으로만 925hPa까지 포화되어 상관성을 보여 눈이 내릴 확률이 높다.

4.2.3. 바람에 따른 지역별 신적설

4.2.3.1. 풍향에 따른 지역별 신적설

충청도 지역별 신적설이 기록된 날 기준일에 기상청 해상부이 3소(인천, 덕적도, 외연도) 지역의 850hPa 층 풍향을 추출하여 각 풍향별 지역의 신적설 이 나타난 횟수를 백분율로 산정하여 각 지역이 어떤 풍향일 때 눈이 내리는 비율이 높은가 산정하였다.

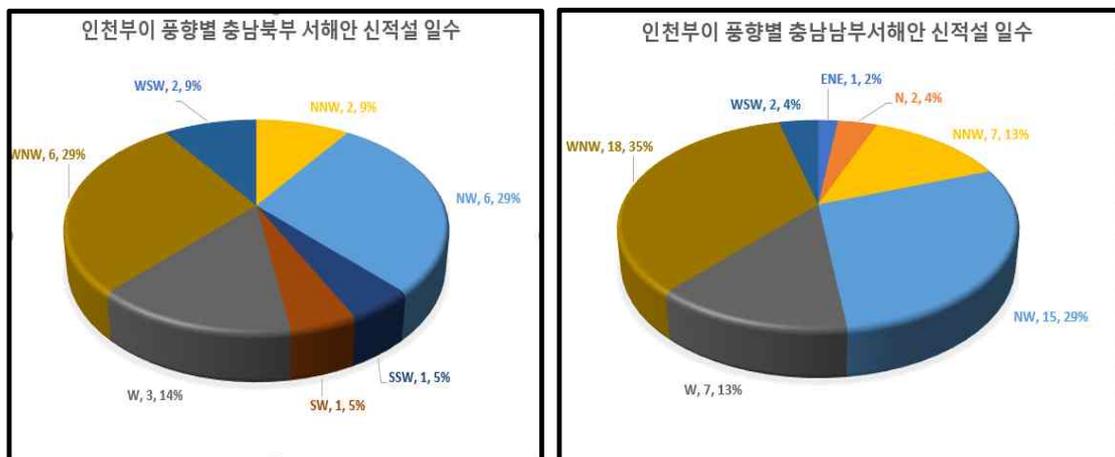


그림 51. 인천부이 풍향별 충남 서해안 신적설 일수

4.2.3.2. 인천부이 풍향별 지역 신적설 일수

인천 해상부이 850hPa 풍향에 따른 충남 서해안에 눈이 내려 쌓일 확률은 충남북부 서해안은 WNW풍과 NW풍이 29%, 충남남부 서해안은 WNW풍이 35%, NW풍이 29%로 가장 많으며, 그다음으로 W풍이 충남북부 서해안 14% , 충남남부 서해안 13%로 나타났다.

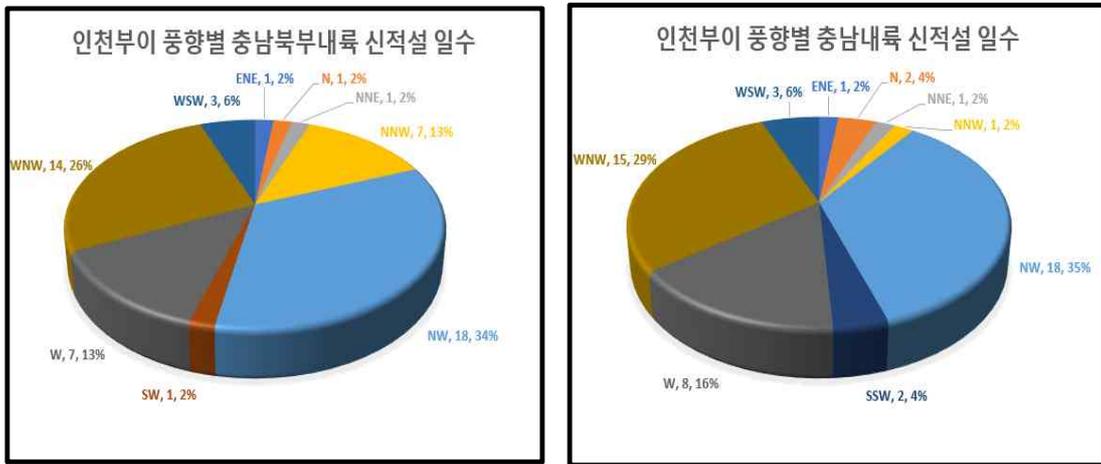


그림 52. 인천부이 풍향별 충남내륙 신적설 일수

인천 해상부이 850hPa 풍향에 따른 충남내륙에 눈이 내려 쌓일 확률은 NW풍이 충남북부 내륙이 34%, 충남 내륙이 35%, 가장 많으며, 그다음으로 WNW풍이 충남북부 내륙이 26%, 충남 내륙이 29%로 나타났다.

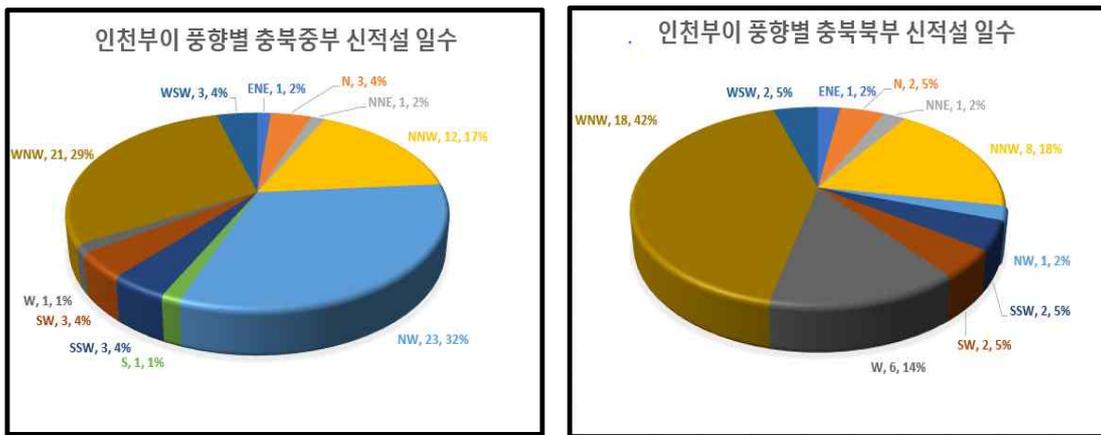


그림 53. 인천부이 풍향별 충북중북부 신적설 일수

인천 해상부이 850hPa 풍향에 따른 충북중북부에 눈이 내려 쌓일 확률은 충북중부는 NW풍이 32%, 충북북부는 WNW풍이 42%로 가장 많으며, 그다음으로 충북중부 WNW풍이 29%, 충북북부 NNW풍이 18%로 나타났다.

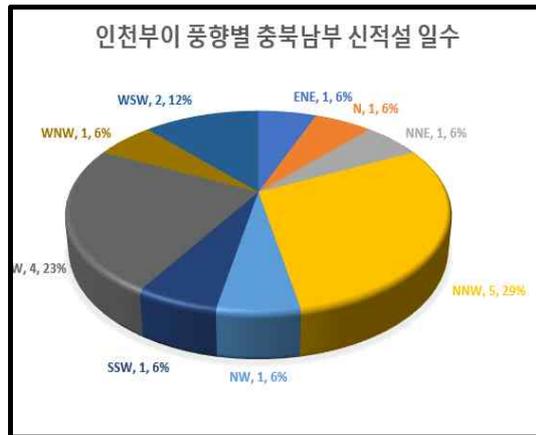


그림 54. 인천부이 풍향별 충북남부 신적설 일수

인천 해상부이 850hPa 풍향에 따른 충북남부에 눈이 내려 쌓일 확률은 NNW풍이 29%로 가장 많으며, 그다음으로 W풍이 23%로 나타났다.

4.2.3.3. 덕적도부이 풍향별 지역 신적설 일수

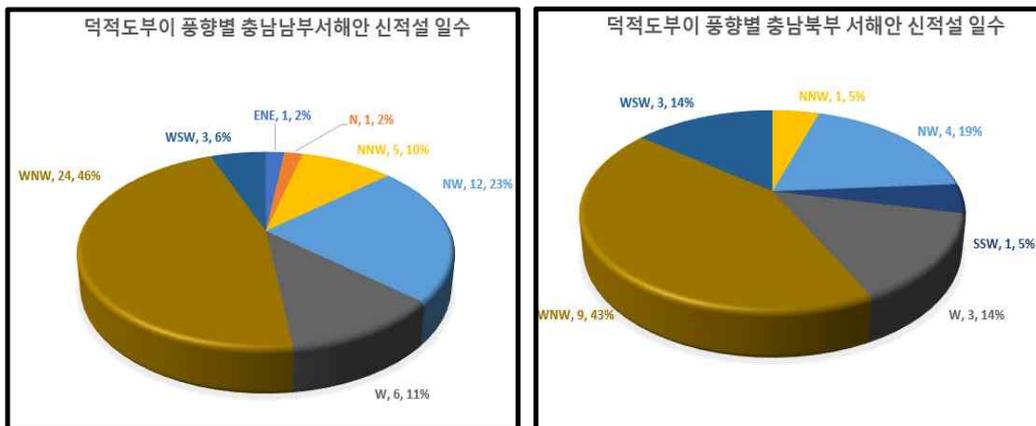


그림 55. 덕적도부이 풍향별 충남 서해안 신적설 일수

덕적도 해상부이 850hPa 풍향에 따른 충남 서해안에 눈이 내려 쌓일 확률은 충남북부 서해안은 WNW풍이 46%, 충남남부 서해안은 WNW풍이 43%로 가장 많으며, 그다음으로 NW풍이 충남북부 서해안 23%, 충남남부 서해안 19%로 나타났다.

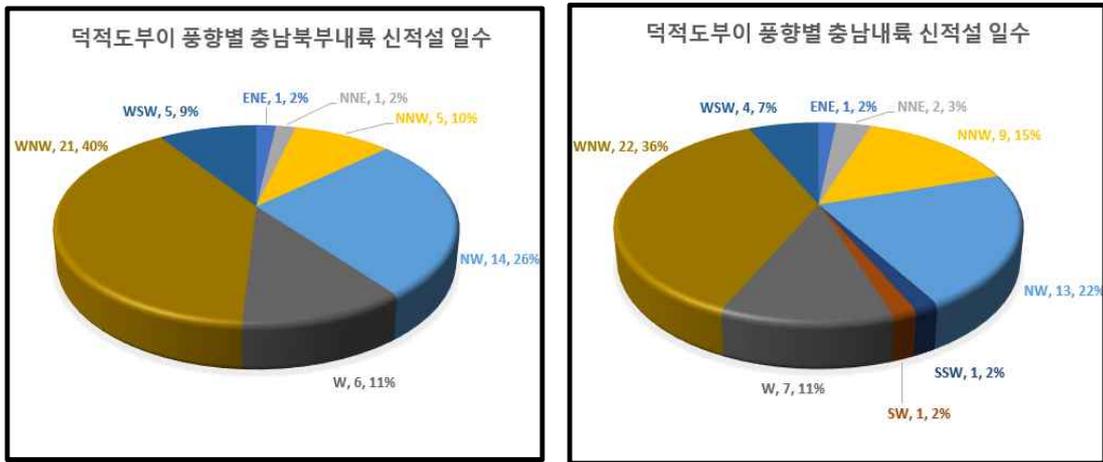


그림 56. 덕적도부이 풍향별 충남내륙 신적설 일수

덕적도 해상부이 850hPa 풍향에 따른 충남내륙에 눈이 내려 쌓일 확률은 WNW풍이 충남북부 내륙이 40%, 충남 내륙이 36%, 가장 많으며, 그다음으로 NW풍이 충남북부 내륙이 26%, 충남내륙이 22%로 나타났다.

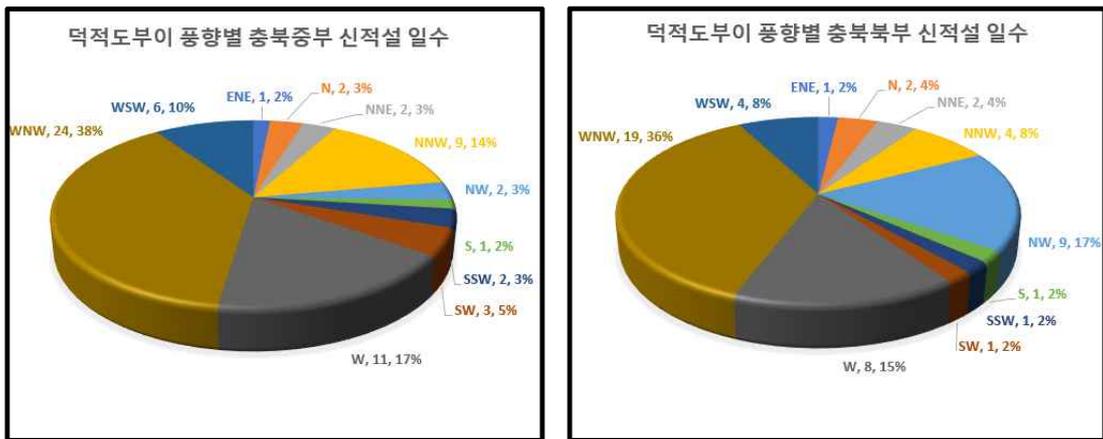


그림 57. 덕적도부이 풍향별 충북중북부 신적설 일수

덕적도 해상부이 850hPa 풍향에 따른 충북중북부에 눈이 내려 쌓일 확률은 WNW풍이 충북중부는 38%, 충북북부는 36%, 가장 많으며, 그다음으로 충북중부는 W풍이 17%, 충북북부는 NW풍이 17%로 나타났다.



그림 58. 덕적도부이 풍향별 충북남부 신적설 일수

덕적도 해상부이 850hPa 풍향에 따른 충북남부에 눈이 내려 쌓일 확률은 WNW풍이 40%로 가장 많으며, 그다음으로 NW풍이 23%로 나타났다.

4.2.3.4. 외연도부이 풍향별 지역 신적설 일수



그림 59. 외연도부이 풍향별 충남 서해안 신적설 일수

외연도 해상부이 850hPa 풍향에 따른 충남 서해안에 눈이 내려 쌓일 확률은 NW풍이 충남북부 서해안은 33%, 충남남부 서해안은 36%로 가장 많으며, 그다음으로 WNW풍이 충남북부 서해안 29%, 충남남부 서해안 35%로 나타났다.

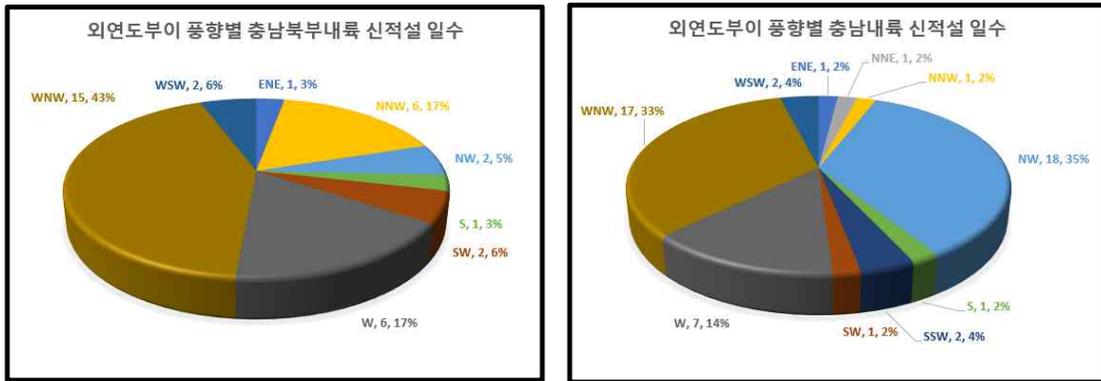


그림 60. 외연도부이 풍향별 충남내륙 신적설 일수

외연도 해상부이 850hPa 풍향에 따른 충남내륙에 눈이 내려 쌓일 확률은 충남북부 내륙은 WNW풍이 43%, 충남 내륙은 NW풍이 35%로 가장 많으며, 그다음으로 충남북부 내륙은 W풍과 NNW풍이 17%, 충남 내륙은 WNW풍이 33%로 나타났다.

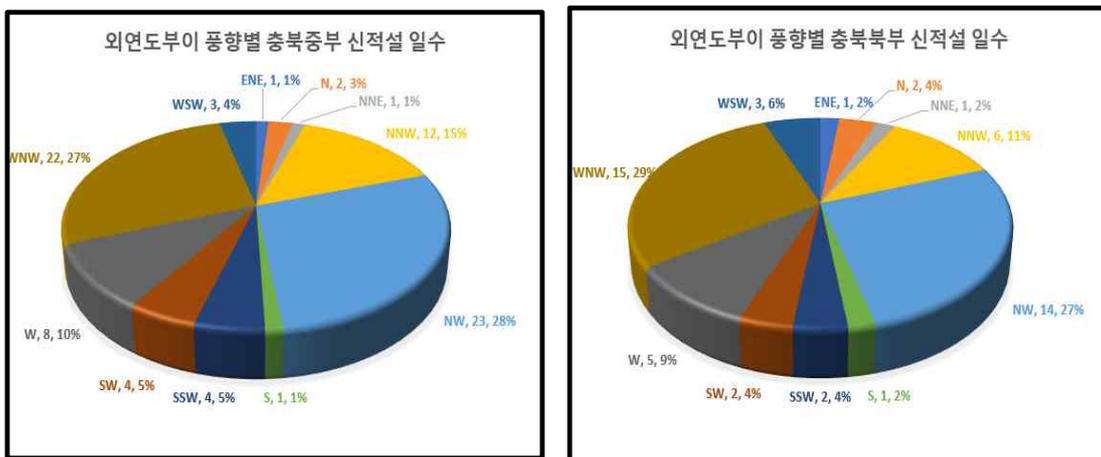


그림 61. 외연도부이 풍향별 중복중복부 신적설 일수

외연도 해상부이 850hPa 풍향에 따른 중복중복부에 눈이 내려 쌓일 확률은 중복중복부는 NW풍이 28%, 중복북부는 WNW풍이 29%로 가장 많으며, 그다음으로 중복중복부는 WNW풍이 27%, 중복북부는 NW풍이 27%로 나타났다.



그림 62. 외연도부이 풍향별 충북남부 신적설 일수

외연도 해상부이 850hPa 풍향에 따른 충북남부에 눈이 내려 쌓일 확률은 NW풍이 31%로 가장 많으며, 그다음으로 WNW풍이 23%로 나타났다.

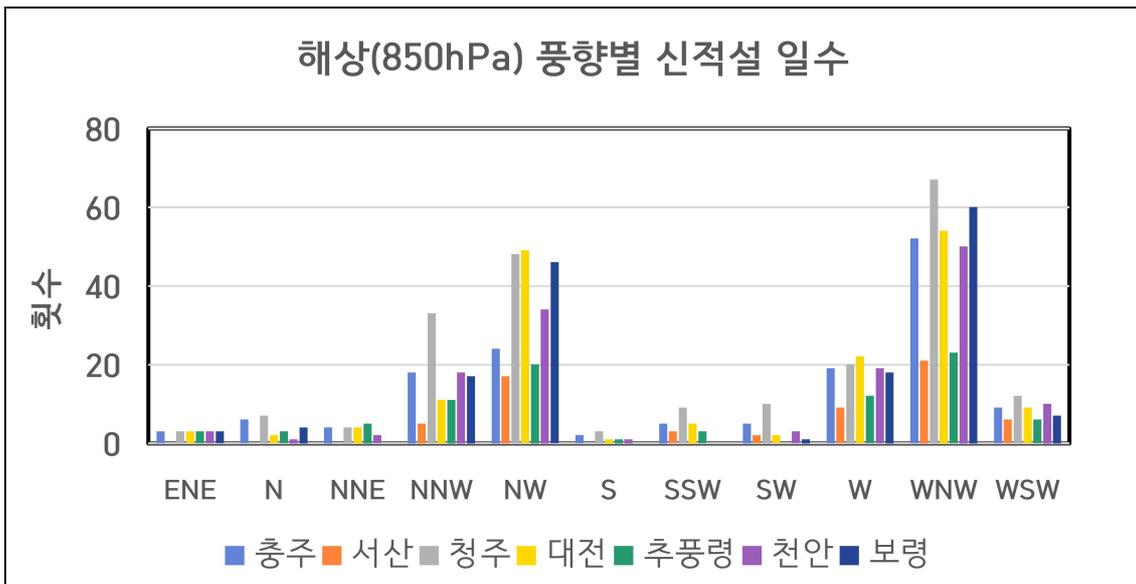


그림 63. 해상부이 풍향별 지역별 신적설 일수

해상부이 3소(인천, 덕적도, 외연도) 지역 풍향 대비하여 충청도 전 지역에서 눈이 내려 쌓이는 경우 WNW풍의 비율이 30%로 가장 많고, 그다음으로 NW풍이 25%, NNW풍이 16% 순으로 대체로 NW계열의 풍계가 지배적임을 알 수 있다.

4.2.4. 해상부이 하층풍속 대비 지역별 신적설

4.2.4.1. 풍속 강도에 따른 지역별 신적설 최심

충청도 지역별 신적설 최심을 기준으로 기상청 해상부이 3소(인천, 덕적도, 외연도) 지역의 925hPa과 850hPa 하층의 풍속을 추출하여 분포도와 지역별 신적설 대비 해상부이의 풍속 범위를 추출하였다.

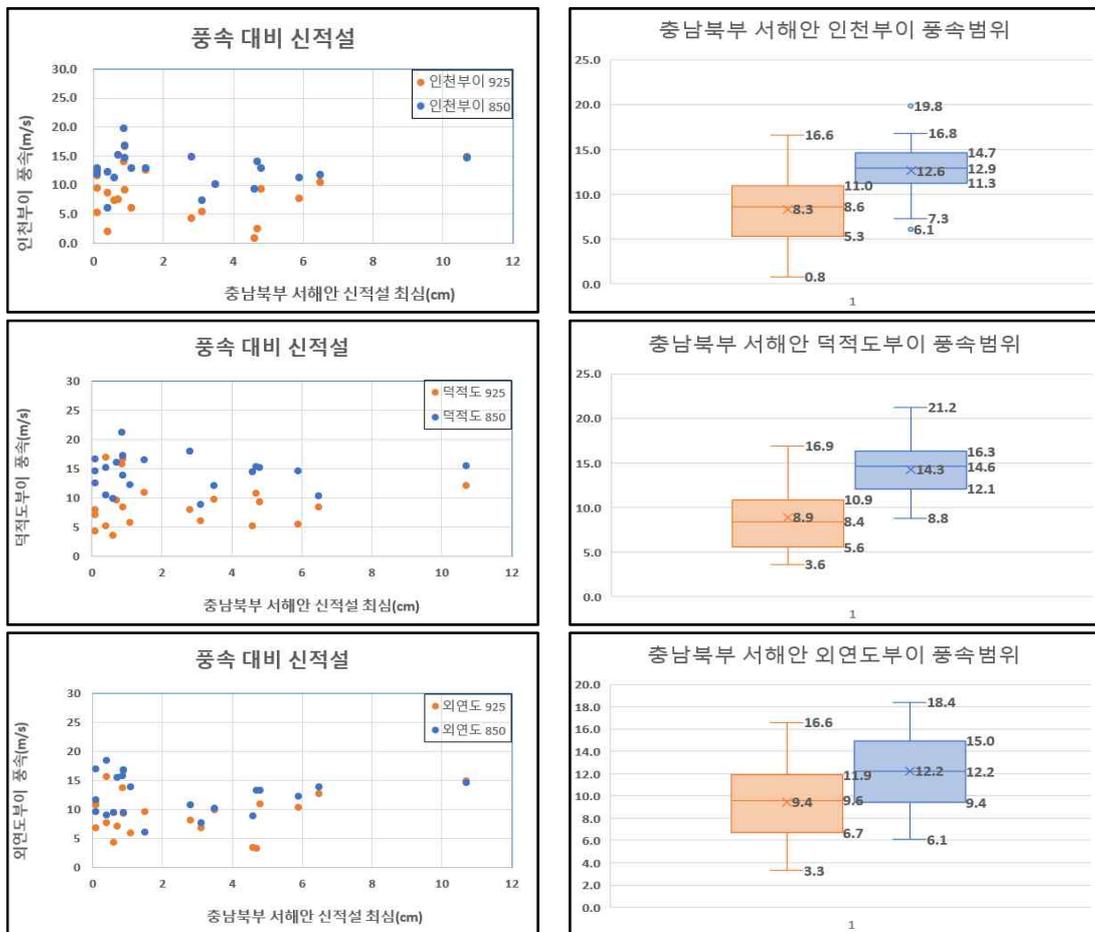


그림 64. 충남북부 서해안의 신적설 대비 하층 풍속

충남북부 서해안의 신적설이 나타난 날 해상부이 3소(인천, 덕적도, 외연도)의 925hPa 고도에서 25~75% 범위 최소풍속은 5.3~6.7m/s이고, 최대풍속은 10.9~11.9m/s이며, 850hPa 고도에는 25~75% 범위의 최소풍속은 9.4~12.1m/s이고, 최대풍속은 14.7~16.3m/s로 눈이 내려 신적설을 기록하기 위한 925hPa 해상풍속은 5.3m/s 이상이고, 850hPa 해상풍속은 9.4m/s 이상이다.

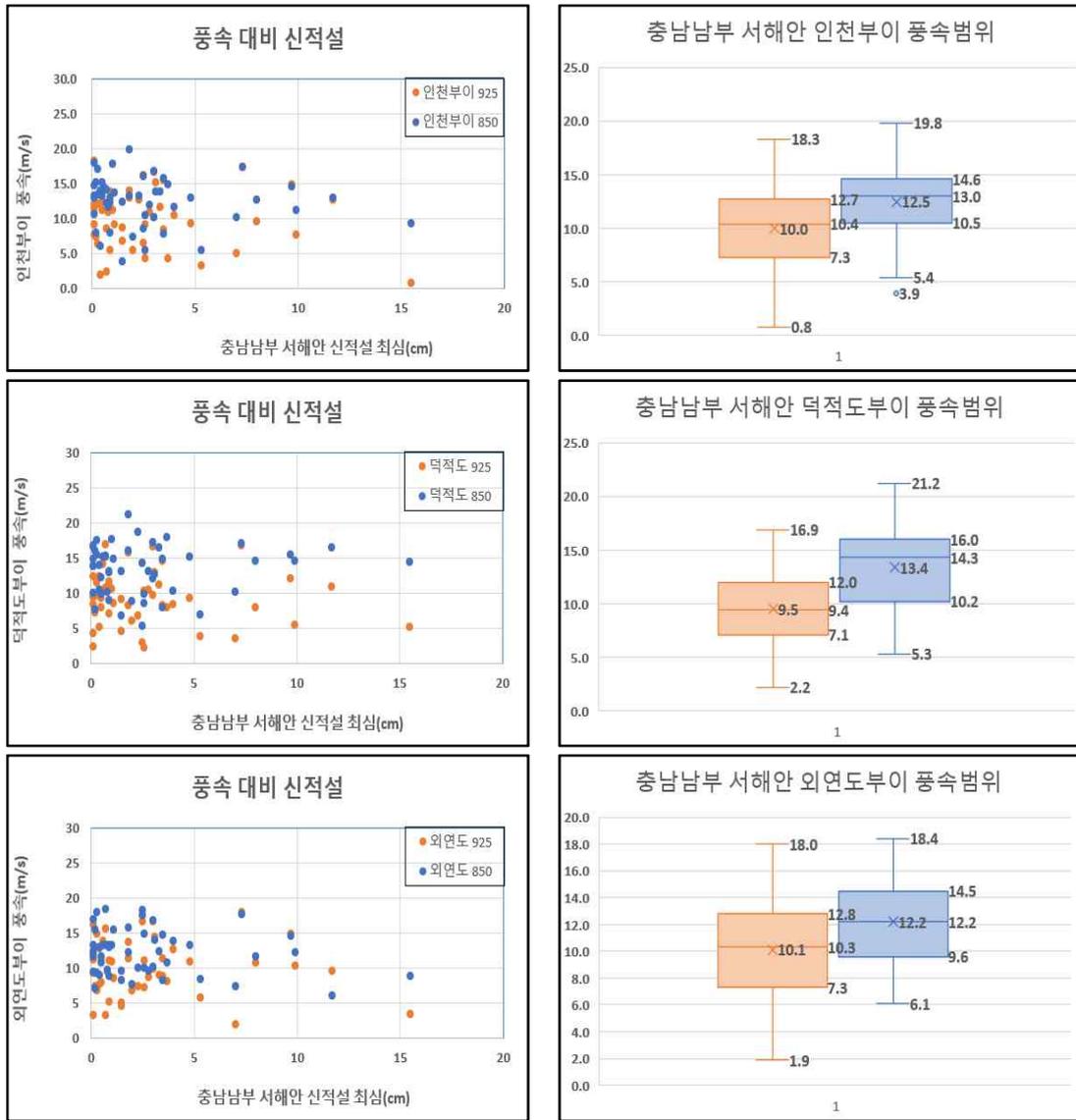


그림 65. 충남남부 서해안의 신적설 대비 하층 풍속

충남남부 서해안의 신적설이 나타난 날 해상부이 3소(인천, 덕적도, 외연도)의 925hPa 고도에서 25~75% 범위 최소풍속은 7.1~7.3m/s이고, 최대풍속은 12.0~12.8m/s이며, 850hPa 고도에는 25~75% 범위의 최소풍속은 9.6~10.5m/s이고, 최대풍속은 14.5~16.0m/s로 눈이 내려 신적설을 기록하기 위한 925hPa 해상풍속은 7.1m/s 이상이고, 850hPa 해상풍속은 9.6m/s 이상이다.

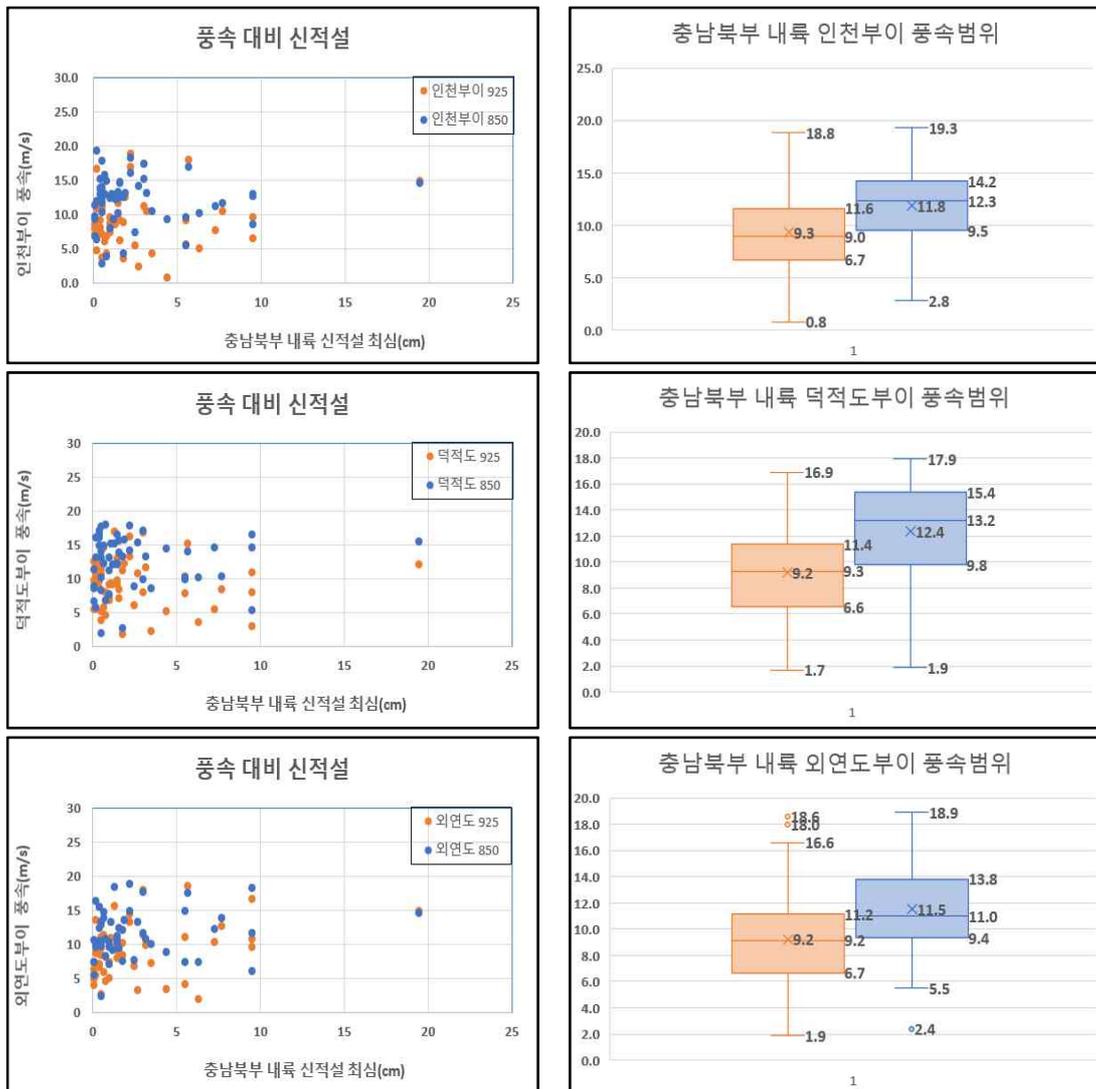


그림 66. 중남북부 내륙의 신적설 대비 하층 풍속

중남북부 내륙의 신적설이 나타난 날 해상부이 3소(인천, 덕적도, 외연도)의 925hPa 고도에서 25~75% 범위 최소풍속은 6.6~6.7m/s이고, 최대 풍속은 11.2~11.6/s이며, 850hPa 고도에는 25~75% 범위의 최소풍속은 9.4~9.8m/s이고, 최대풍속은 13.8~15.4m/s로 눈이 내려 신적설을 기록하기 위한 925hPa 해상풍속은 6.6m/s 이상이고, 850hPa 해상풍속은 9.4m/s 이상이다.

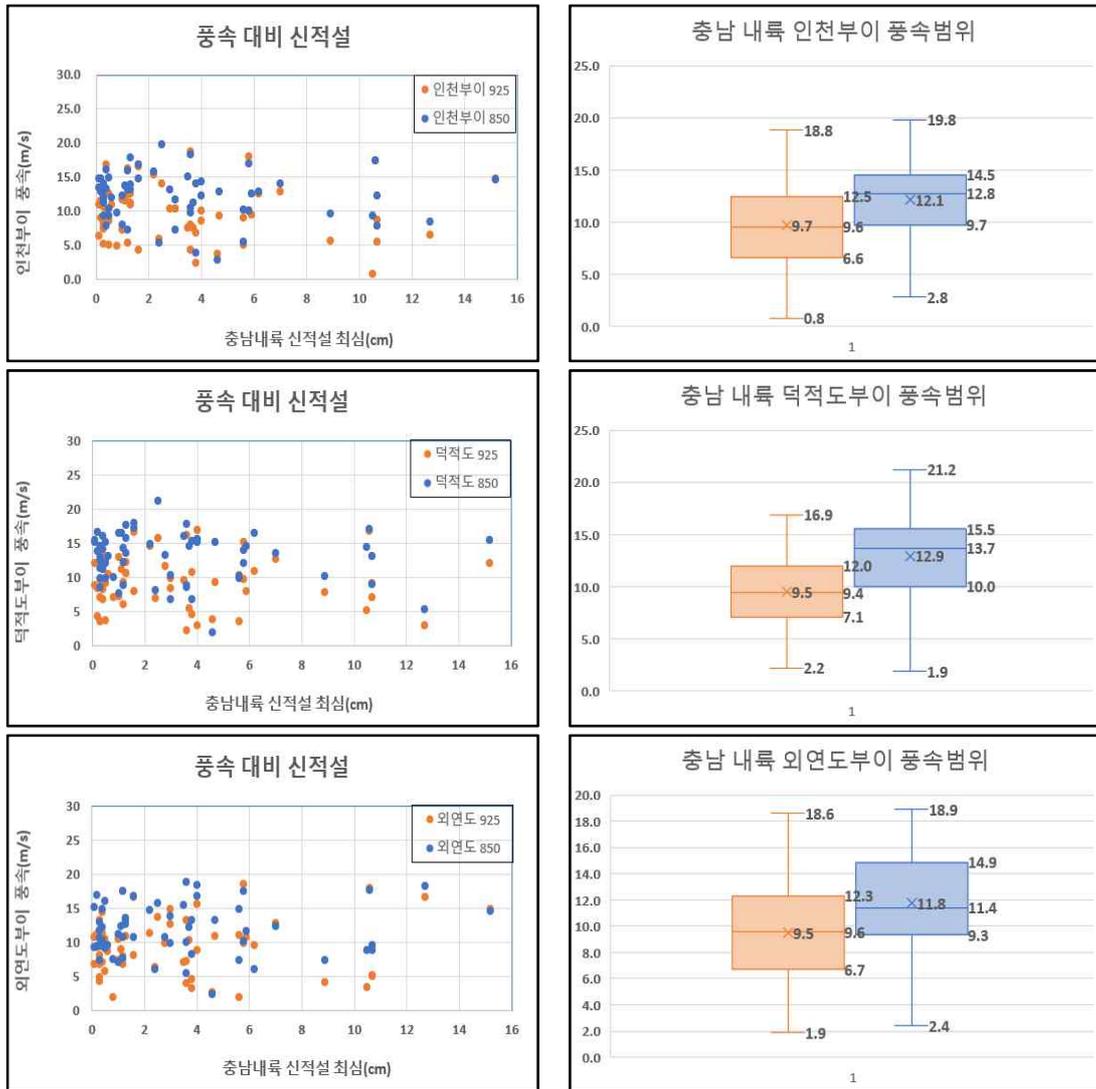


그림 67. 충남 내륙의 신적설 대비 하층 풍속

충남 내륙의 신적설이 나타난 날 해상부이 3소(인천, 덕적도, 외연도)의 925hPa 고도에서 25~75% 범위 최소풍속은 6.6~7.1m/s이고, 최대풍속은 12.0~12.5/s이며, 850hPa 고도에는 25~75% 범위의 최소풍속은 9.3~10.0m/s이고, 최대풍속은 14.5~15.5m/s로 눈이 내려 신적설을 기록하기 위한 925hPa 해상풍속은 6.6m/s 이상이고, 850hPa 해상풍속은 9.3m/s 이상이다.

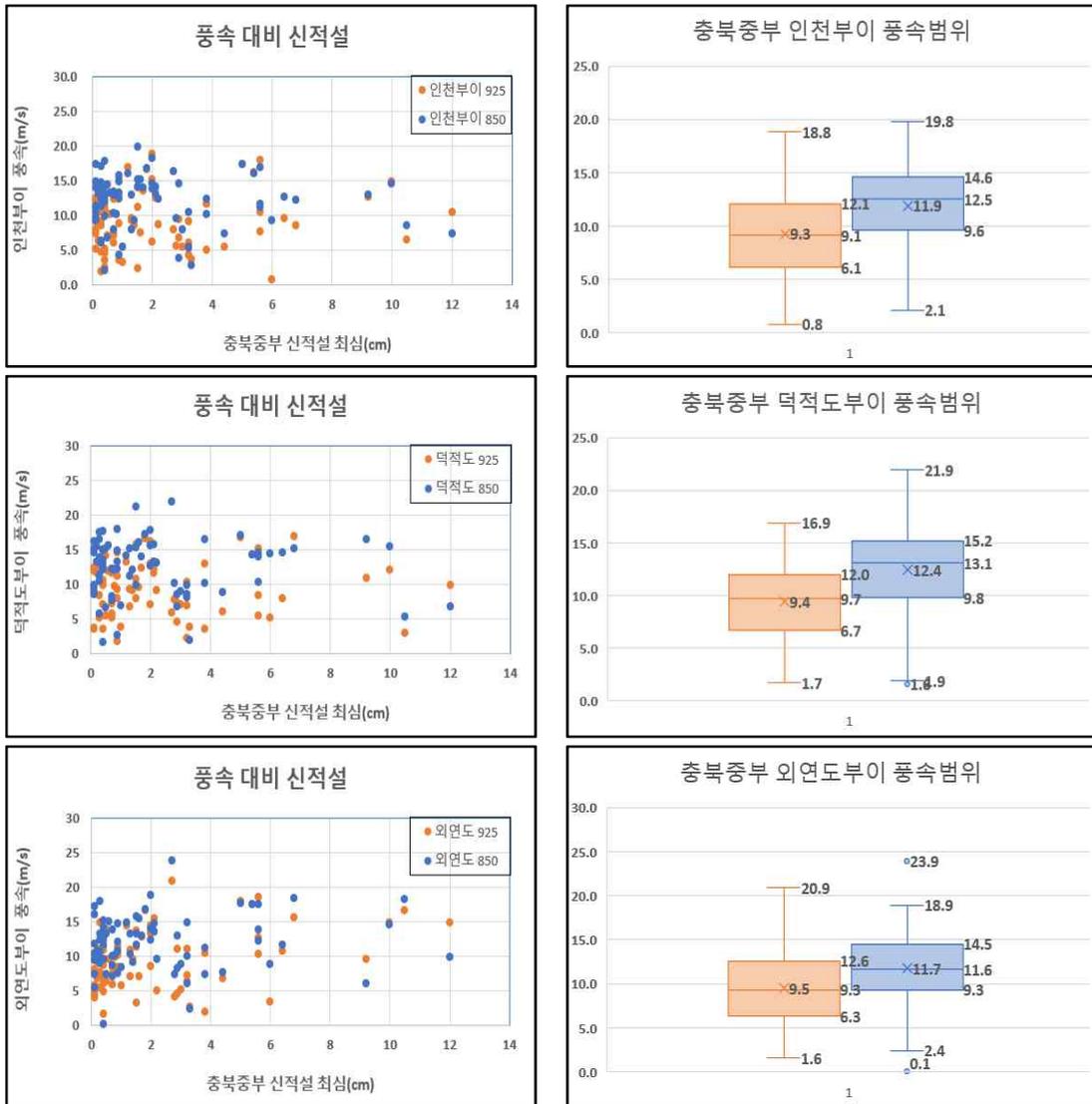


그림 68. 중북중부의 신적설 대비 하층 풍속

중북중부의 신적설이 나타난 날 해상부이 3소(인천, 덕적도, 외연도)의 925hPa 고도에서 25~75% 범위 최소풍속은 6.1~6.7m/s이고, 최대풍속은 12.0~12.6/s이며, 850hPa 고도에는 25~75% 범위의 최소풍속은 9.3~9.8m/s이고, 최대풍속은 14.5~15.2m/s로 눈이 내려 신적설을 기록하기 위한 925hPa 해상풍속은 6.1m/s 이상이고, 850hPa 해상풍속은 9.3m/s 이상이다.

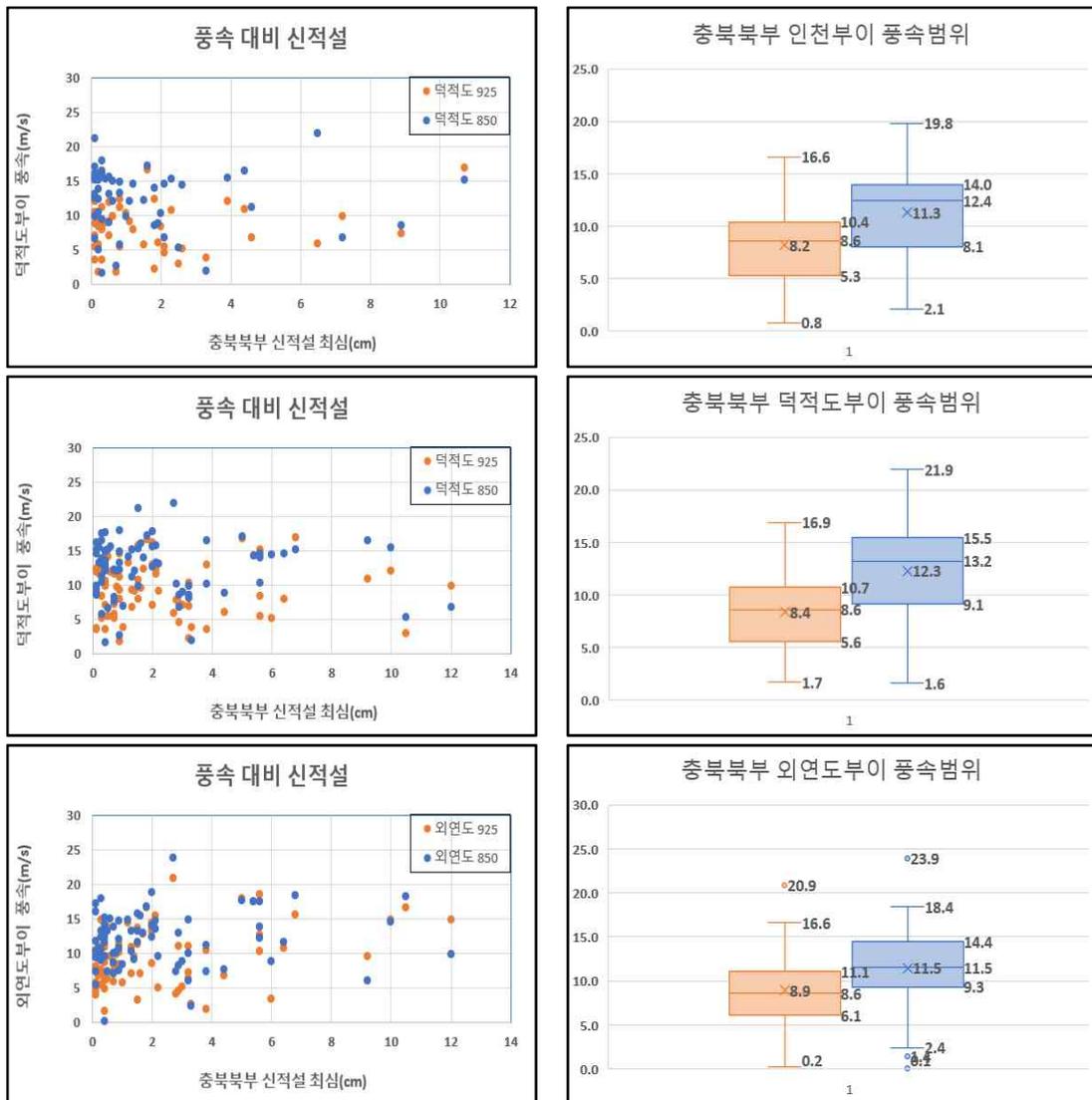


그림 69. 중북북부의 신적설 대비 하층 풍속

중북북부의 신적설이 나타난 날 해상부이 3소(인천, 덕적도, 외연도)의 925hPa 고도에서 25~75% 범위 최소풍속은 5.3~6.1m/s이고, 최대풍속은 10.4~11.1/s이며, 850hPa 고도에는 25~75% 범위의 최소풍속은 8.1~9.3m/s이고, 최대풍속은 14.0~15.5m/s로 눈이 내려 신적설을 기록하기 위한 925hPa 해상풍속은 5.3m/s 이상이고, 850hPa 해상풍속은 8.1m/s 이상이다.

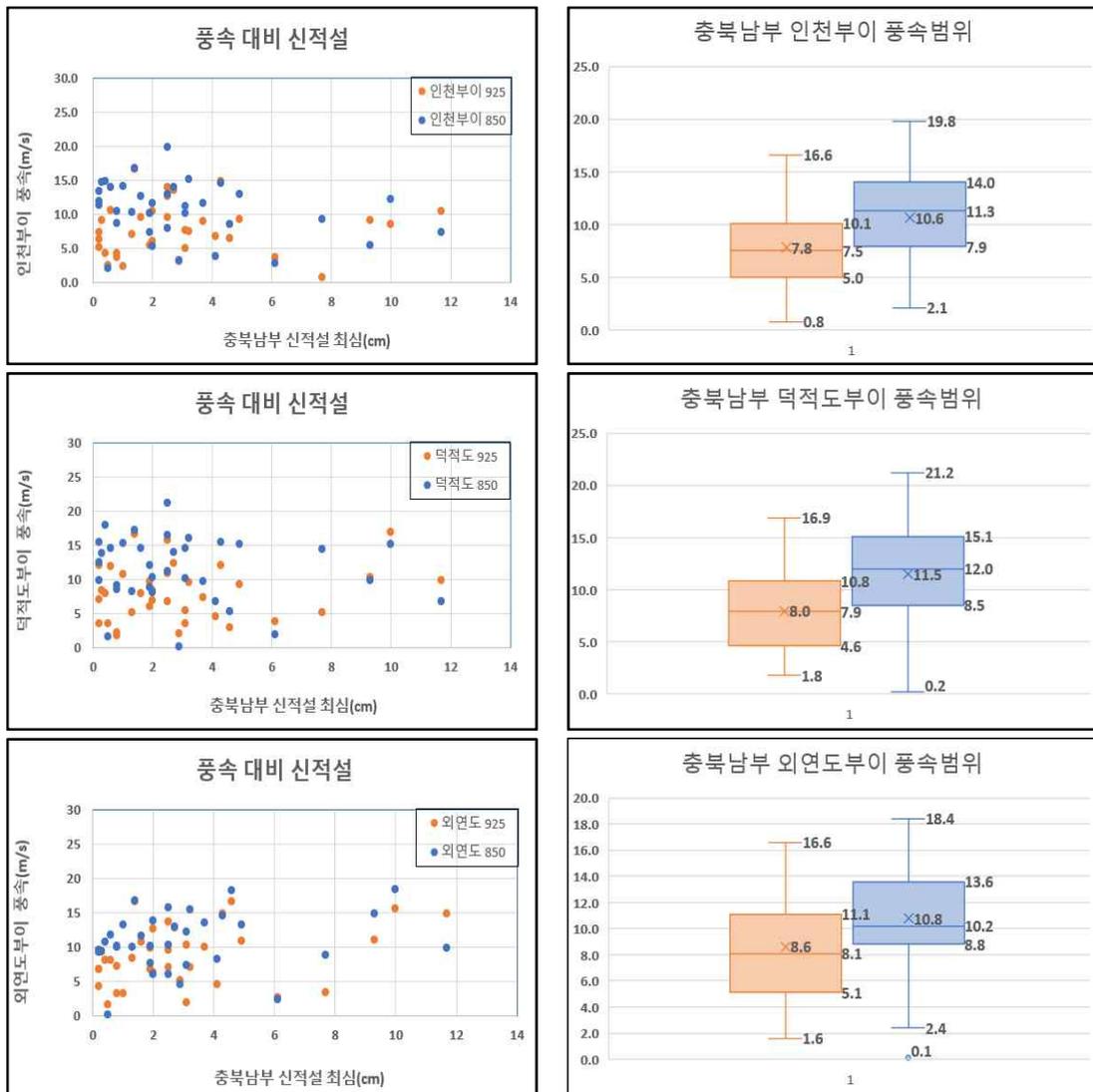


그림 70. 충청남부의 신적설 대비 하층 풍속

충청남부의 신적설이 나타난 날 해상부이 3소(인천, 덕적도, 외연도)의 925hPa 고도에서 25~75% 범위 최소풍속은 4.6~5.1m/s이고, 최대풍속은 10.1~11.1/s이며, 850hPa 고도에는 25~75% 범위의 최소풍속은 7.9~8.8m/s이고, 최대풍속은 13.6~15.1m/s로 눈이 내려 신적설을 기록하기 위한 925hPa 해상풍속은 4.6m/s 이상이고, 850hPa 해상풍속은 7.9m/s 이상이다.

4.2.4.2. 해상부이 풍속 10m/s 이상 시 지역별 눈 내리는 확률

충청도 지역별 신적설이 기록된 날을 기준으로 해상부이 3소(인천, 덕적도, 외연도)의 925hPa과 850hPa 풍속이 10m/s 이상에서 각 지역별 눈 내리는 확률을 분석하였다.

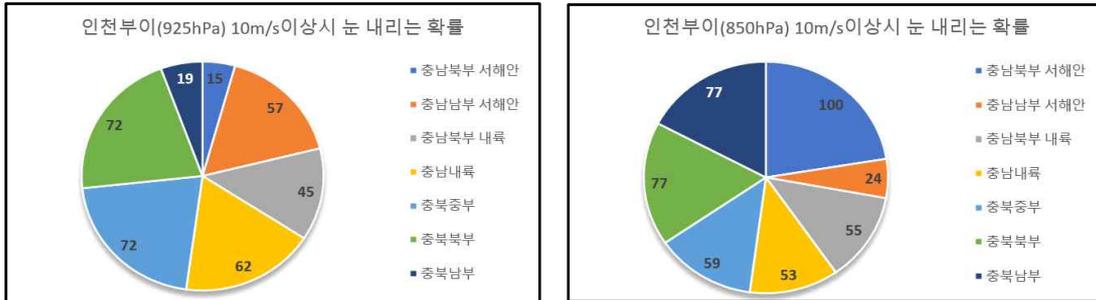


그림 71. 인천부이 하층풍속 10m/s 이상 시 지역별 신적설 확률

인천부이 925hPa과 850hPa 풍속이 10m/s 이상에서 925hPa은 충북중부와 충북북부에서 72%로 가장 높으며, 그다음으로 충남내륙 62%, 충남남부 서해안 57%, 충남북부 내륙 45%로 나타났으며, 850hPa은 충남북부 서해안 100%, 충북중부와 충북남부에서 77%로 가장 높으며, 그다음으로 충북중부 59%, 충남북부 내륙 55%, 충남내륙 53% 순으로 나타났다.



그림 72. 덕적도부이 하층풍속 10m/s 이상 시 지역별 신적설 확률

덕적도부이 925hPa과 850hPa 풍속이 10m/s 이상에서 925hPa은 충북중부와 충북북부에서 85%로 가장 높으며, 그다음으로 충남내륙 63%, 충남남부 서해안 56%, 충남북부 내륙 56%로 나타났으며, 850hPa은 충북중부와 충북북부에서 78%로 가장 높으며, 충남내륙 66%, 충남남부 서해안 63%, 충남북부 내륙 59% 순으로 나타났다.

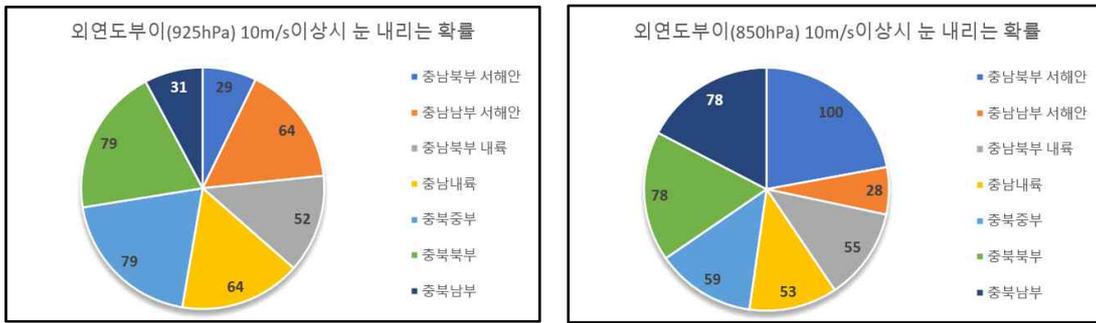


그림 73. 외연도부이 하층풍속 10m/s 이상 시 지역별 신적설 확률

외연도부이 925hPa과 850hPa 풍속이 10m/s 이상에서 925hPa은 충북 중부와 충북북부에서 79%로 가장 높으며, 그다음으로 충남내륙 64%, 충남남부 서해안 64%, 충남북부 내륙 52%로 나타났으며, 850hPa은 충남북부 서해안 100%로 가장 높으며, 충북북부 및 충북남부에서 78%, 충남북부 내륙 55%, 충남 내륙 53% 순으로 나타났다.

5. 사례분석

5.1. 2021년 2월 16~17일

5.1.1. 종관 기압계 분석

2021년 2월 16일부터 17일 사이에 발해만 저기압과 서해안형의 두 종류 기압계 패턴의 받았던 기간으로 충청지방에 많은 눈이 내렸던 사례로 일본열도 부근으로 상층 기압골에 동반된 강한 저기압이 자리하면서 2월 16일 발해만 부근에서 상층 기압골과 연관된 저기압이 형성되면서 서해해상을 지나 전북지방으로 이동하여 충청 전 지역에 1~10cm 내외, 특히 보령에 15.5cm의 많은 적설이 나타난 사례이다.

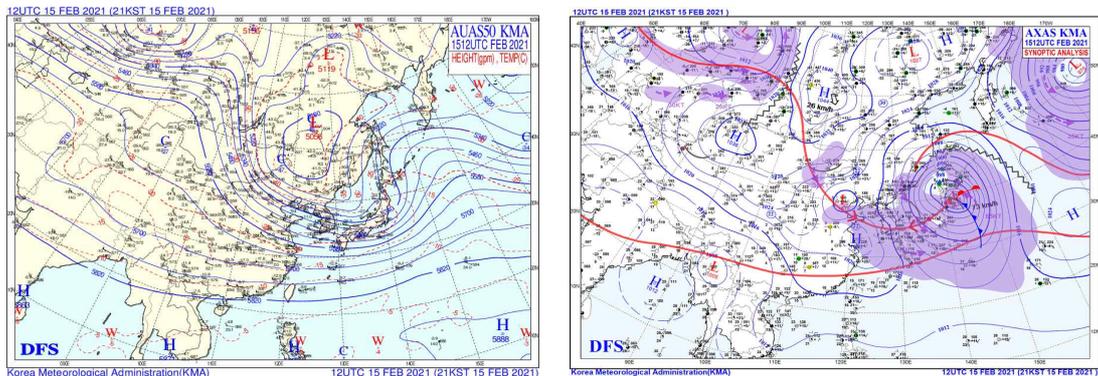


그림 74. 500hPa 및 지상일기도(15.12UTC)

2021년 2월 15일 12UTC에서 500hPa 상층 일기도에서 만주 북쪽에 영하 47도의 한기핵을 가진 저기압 중심이 위치하고, 동해상에 기압골에 연관된 하층에서 강한 저기압이 위치하여 몽고 남서쪽으로 2차 기압골에 의한 발해만 부근으로 하층 저기압이 위치하고 있다.

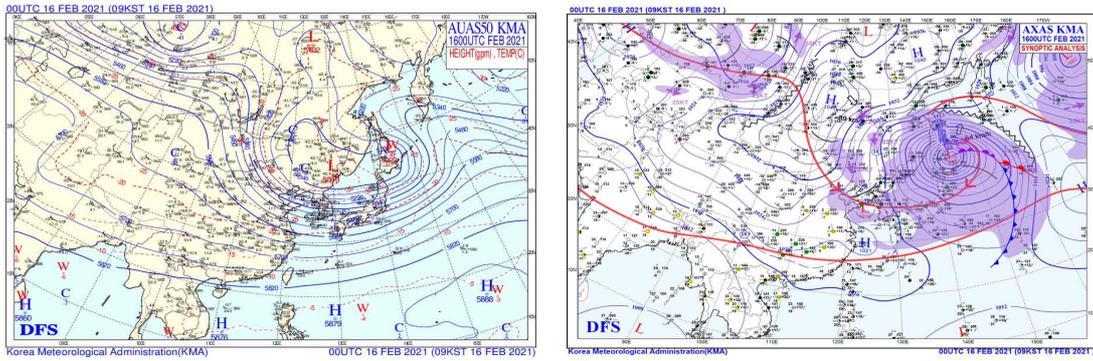


그림 75. 500hPa 및 지상일기도(16. 00UTC)

2021년 2월 16일 00UTC에서 500hPa 상층 일기도에서 저기압 중심이 한중국경 부근으로 남하하여 한반도 서쪽의 저기압은 젯트축을 따라 서해중부해상으로 이동하고, 상해부근으로 고기압이 확장하고 있다.

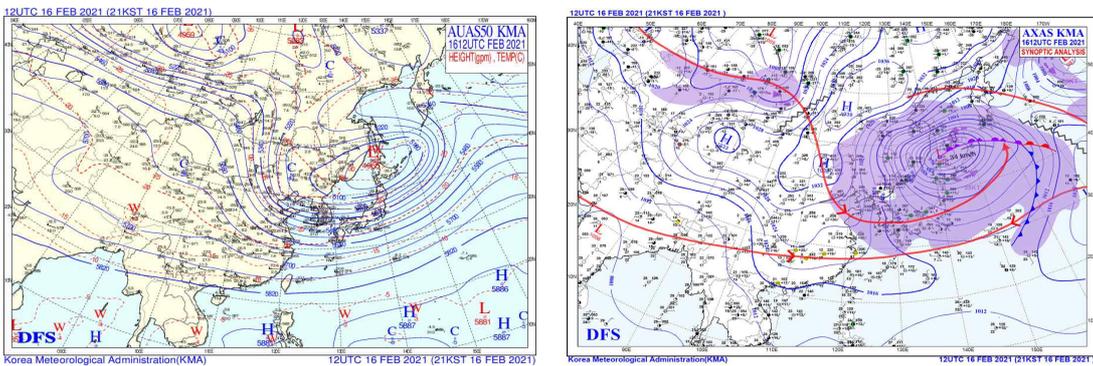


그림 76. 500hPa 및 지상일기도(16. 12UTC)

2021년 2월 16일 12UTC에서 500hPa 상층 일기도에서 저기압 중심이 사할린 부근으로 동진하고 한기와 젯트축의 남하로 서해해상으로 찬대륙 고기압의 영향을 받고 있다.

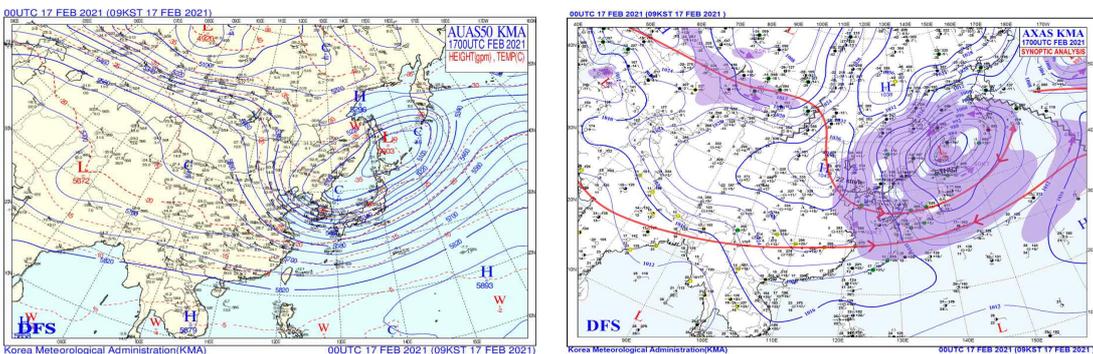


그림 77. 500hPa 및 지상일기도(17. 00UTC)

2021년 2월 16일 12UTC에서 500hPa 상층 일기도에서 저기압 중심이 사할린 부근 동해해상으로 빠져나가고, 동해해상에 한기핵이 위치한 가운데 한반도는 찬 대륙 고기압의 영향을 받고 있다.

5.1.2. 실황 및 수치예보 분석

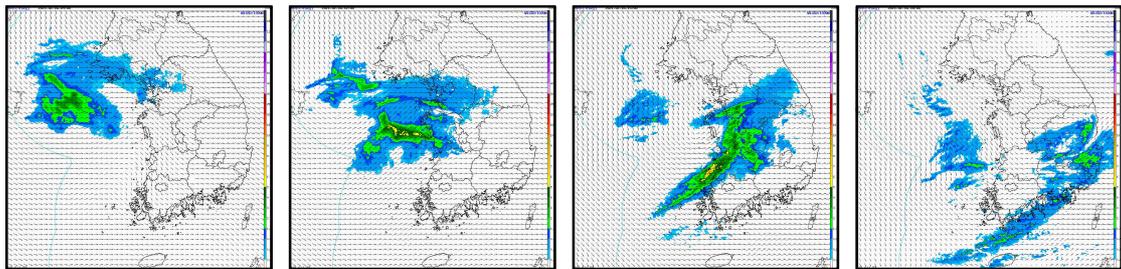


그림 78. 레이더 영상(16일 09시, 12시, 15시, 18시)

2021년 2월 16일 09시에 백령도부근에서 에코가 발달하여 한 축은 경기 서해안, 한 축은 태안반도 서쪽으로 진출하여 남동진하고, 12시에 경기 서해안에 위치한 에코는 서울 및 경기도 내륙까지 이동하고, 태안반도 서쪽에 위치하던 에코는 강하게 발달하여 충청 서해안에 영향을 주고 있으며, 한랭전선으로 발달하여 중부지방 및 남부지방까지 영향을 받은 후 빠져나갔다.

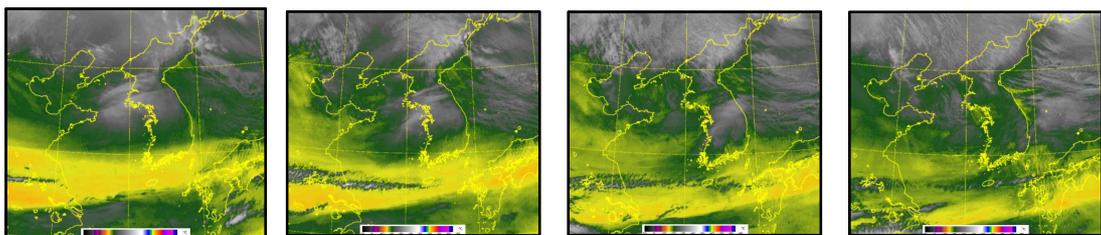


그림 79. 하층 수증기 영상(16일 09시, 12시, 15시, 18시)

2021년 2월 16일 09시에 상해북쪽에서 남해안을 중심으로 건조역이 위치한 가운데 웅진반도 부근에서 수증기역이 발달하여 점차 남동진하면서 중부 및 남부지방에 수증기 영향권에 위치한 가운데 그 후면으로 다시 건조역이 확장하면서 백령도 부근에서 해기차에 의한 수증기역이 발달하고 있다.

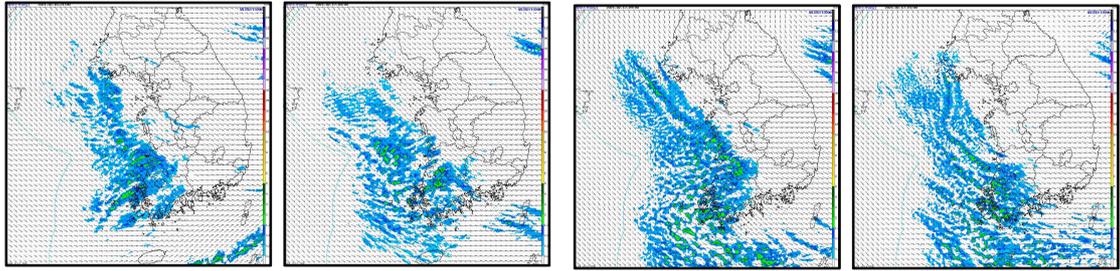


그림 80. 레이더 영상(16일 21시, 17일 03시, 09시, 15시)

2021년 2월 16일 21시 전부터 한기가 서해해상으로 남하하면서 에코가 발생하여 전라도 해안 및 내륙을 중심으로 강하게 영향을 주고 있으며, 주기적으로 충청 서해안 및 내륙까지도 영향을 받고 있다.

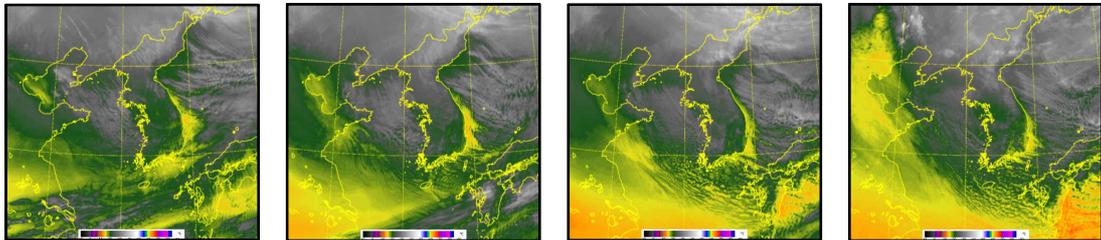


그림 81. 하층 수증기 영상(16일 21시, 17일 03시, 09시, 15시)

2021년 2월 16일 21시 전부터 서해북부해상에 발달한 수증기역은 점차 남하하여 충청 및 전라 해안까지 한기가 남하하면서 에코가 발생되어 영향을 받고 있으며, 중부 및 남부지방 서해안 및 내륙 일부 지역까지 수증기역의 영향권에 들고 있다.

2021년 2월 16일 12시부터 18시까지 24시간 신적설, 바람 벡터, 해상 바람 자료를 분석해보면 신적설 분포는 12시에 경기도 서해안 충남까지 남하하여 확대되고, 서해해상의 바람벡터 및 해상 바람은 충남 앞 바다를 중심으로 12시에 충남남부 해상에서 15~25kts 강한 남서풍이 불다가 15시에 북동계열, 18시에 북서풍계열로 바뀌었다.

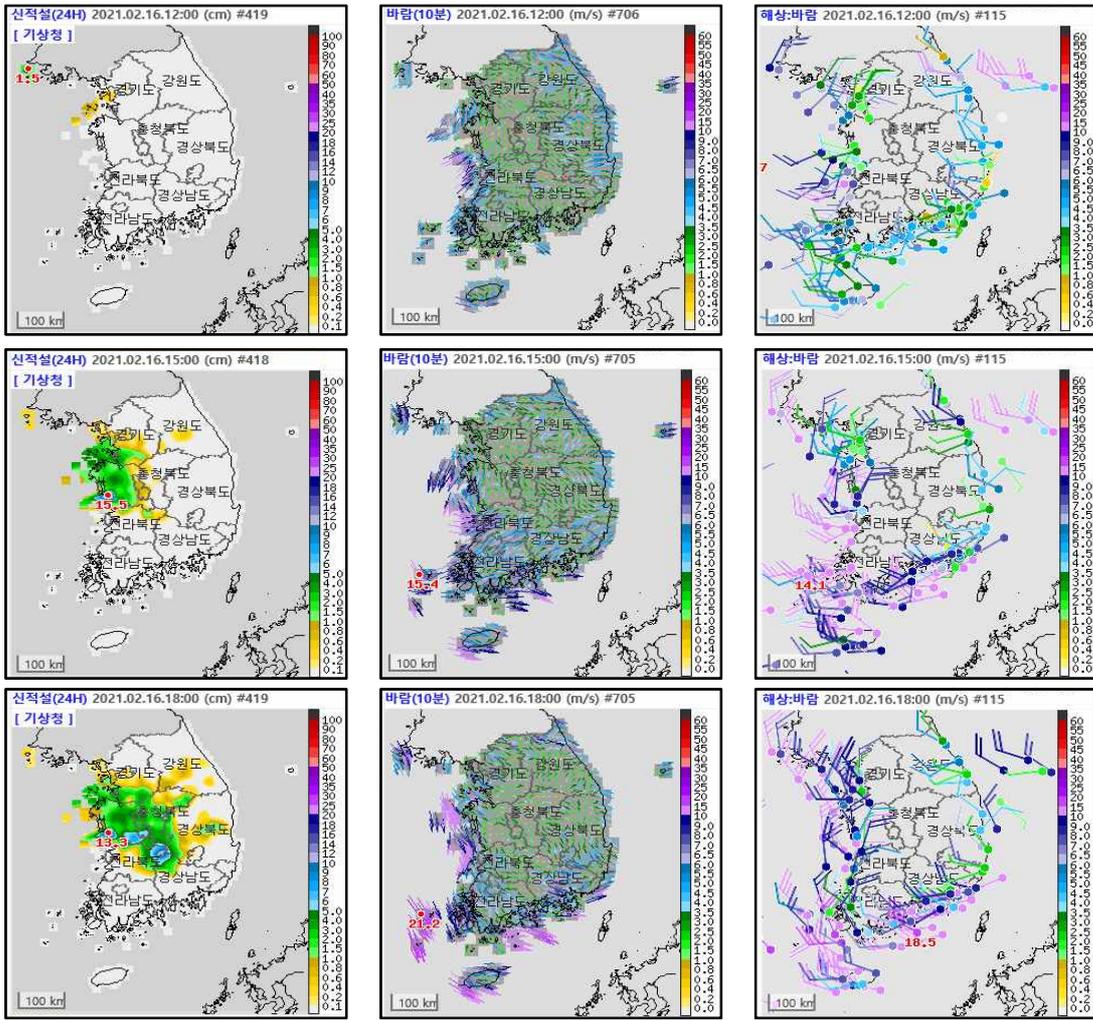


그림 82. 24시간 신적설, 바람벡터, 해상 바람(12시, 15시, 18시)

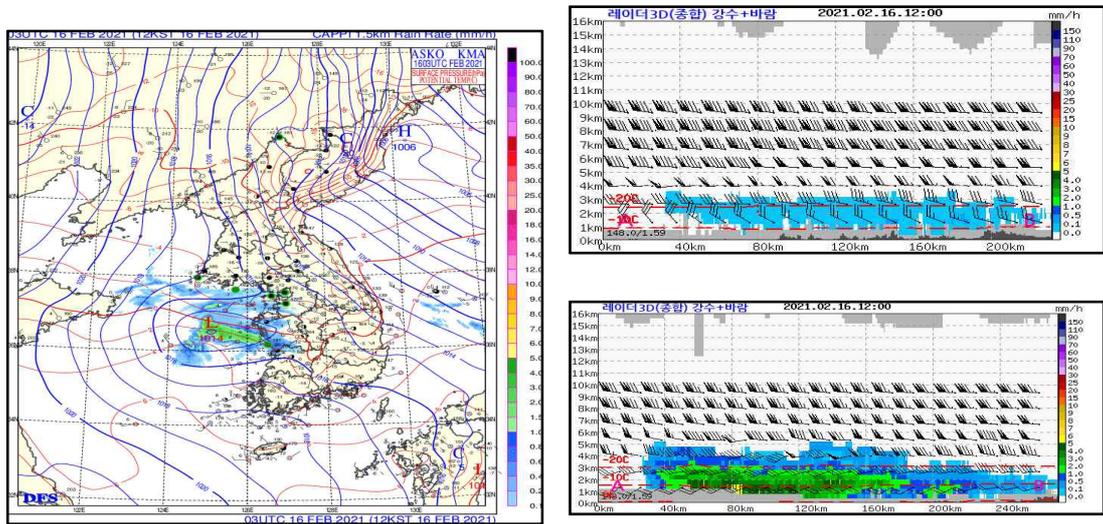


그림 83. 한반도 지상일기도+레이더+연직(위: 경기지방, 아래: 저기압 중심↔군산)

2021년 2월 16일 12시 태안반도 서쪽에 저기압 중심이 위치하고, 저기압을 중심으로 북쪽으로는 한기이류, 남쪽으로는 난기가 유입되어 온도 조밀구역으로 에코가 발달하고 있으며, 경기지방의 에코는 3km 고도에서 약하고, 태안반도 서쪽의 저기압 중심에서 군산쪽으로 5km 부근까지 강하게 발달한 에코가 유입되고 있음.

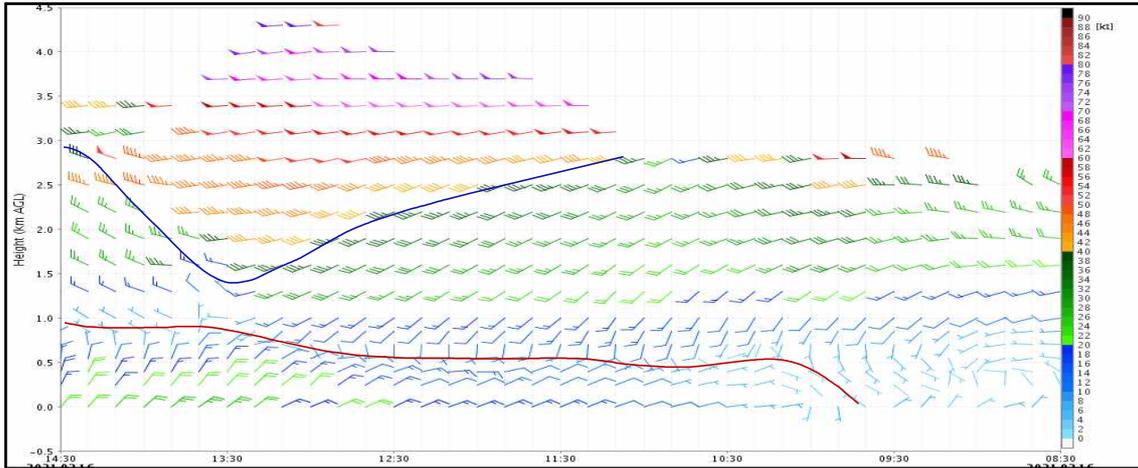


그림 84. 격렬비도 연직바람관측장비(2월 16일)

격렬비도 연직바람관측장비를 보면 1km이하의 하층 저기압에서 오전부터 남동에서 북동풍이 불고, 그 위층에서는 20kts 이상의 강한 남서풍 불면서 기압골은 3km 이하 층에서만 형성되어 13시 30분경 이후에는 북서풍으로 바뀌고 있음.

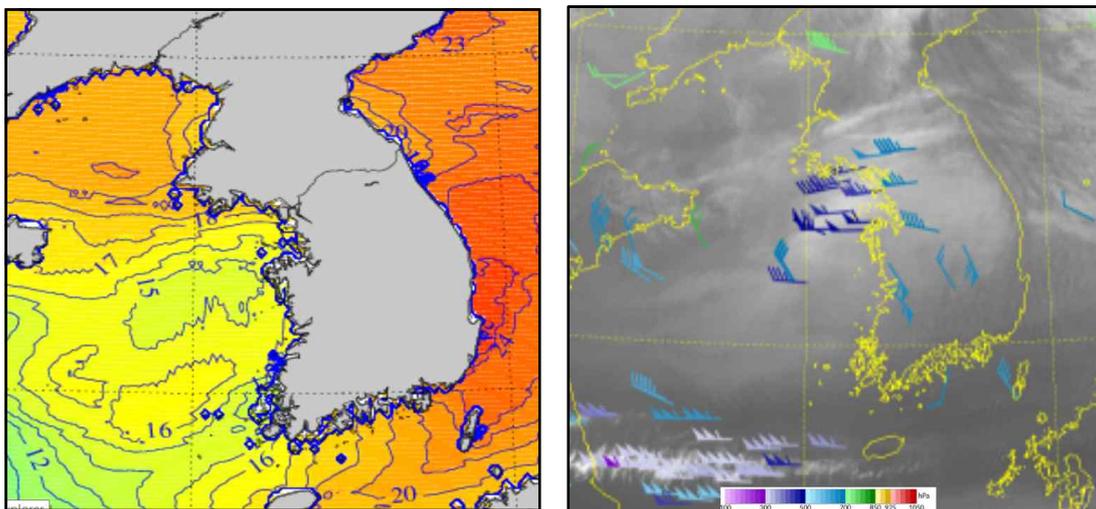


그림 85. 위성 SST 및 하층 수증기 대기운동벡터(2월 16일 12시)

위성자료의 SST(수온-850hPa 기온) 자료에서 저기압이 위치한 태안반도 서쪽으로 15도의 약한 해기차가 나타나고, 북쪽과 남쪽으로 16~17도 이상의 해기차가 위치하며, 하층 수증기 대기운동벡터에서 태안반도 서쪽에서 경기 해상쪽으로 50KTS 이상의 강한 바람이 불고 있음.

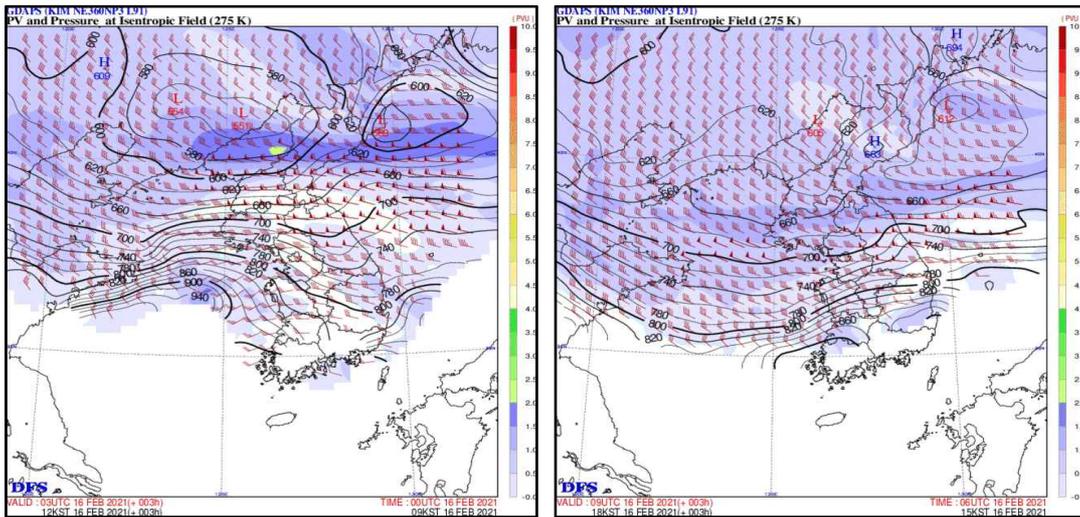


그림 86. UM 275K 등온위면 분석(2월 16일 12시, 18시)

UM 예상 일기도에서 275K 등온위면에서 12시에는 저기압이 태안반도 서쪽에 위치하여 서해해상에서 서해안까지 상승구역이고, 18시에서는 저기압이 빠져나가면서 중부지방은 하강구역으로 바뀌었다.

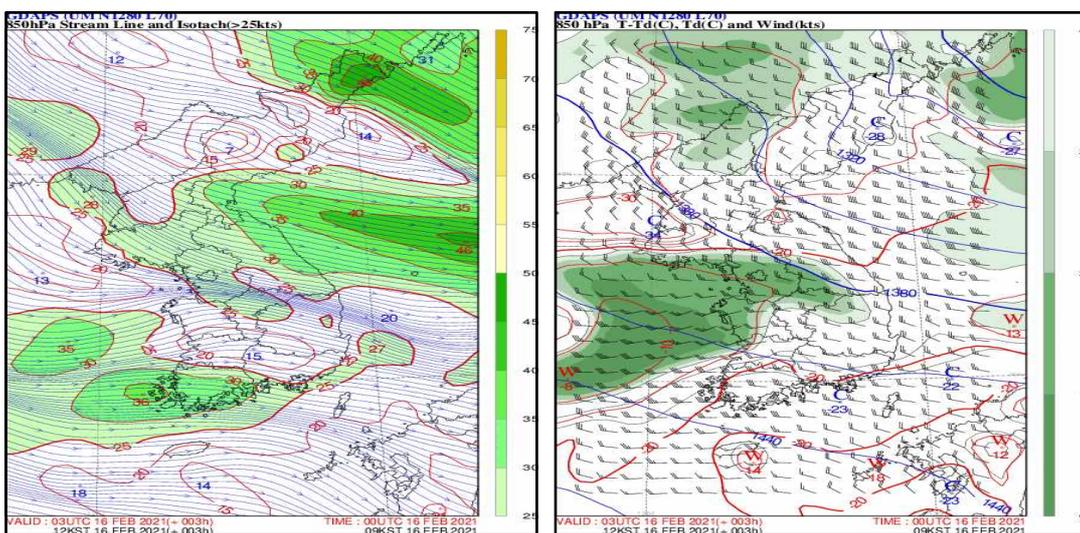


그림 87. UM 850hPa 유선, 풍속, 습수(2월 16일 09시, 12시 예상)

UM 유선 및 풍속 예상 일기도에서 경기도 및 충북지방으로 25kts의 강한 바람과 태안반도 서쪽으로 25~35kts 남서풍의 하층 강풍대가 위치하여 있고, 습수 분포도에서 서해중부와 경기도, 충북북부 및 충남 서해안으로 습수구역이 위치함.

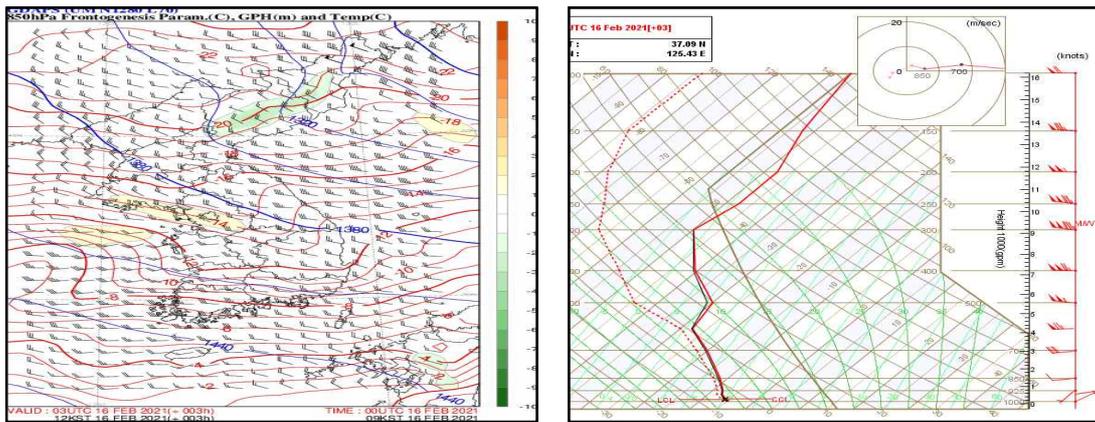


그림 88. UM 850hPa 전선강도 고도, 기온 및 인천부이 고층자료(2월 16일 09시, 12시 예상)

UM 고도 및 기온에서 태안반도 서쪽의 온도 조밀구역을 경계로 남쪽은 난기유입, 북쪽은 한기가 남하하고 있으며, 황해도 남해안과 경기도 지방의 온도 조밀구역과 태안반도 서쪽의 온도 조밀구역에서 구름대가 발달하고 있음.

고층자료에서 인천부이 지점에서 약 4km 부근까지 습수층이 위치하고, 850hPa 층에서 바람은 서남서풍이 10kts로 불고 있음.

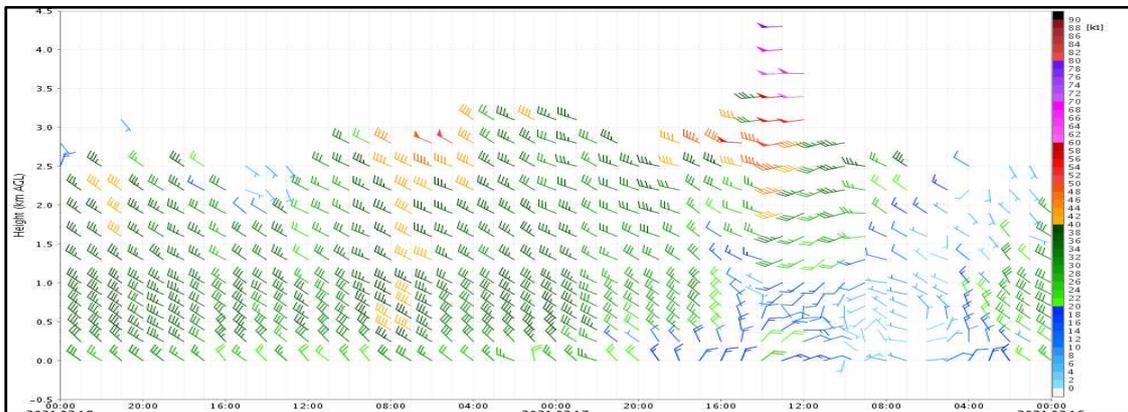


그림 89. 격렬비도 연직바람관측장비(2월 17일)

격렬비도 연직바람관측장비를 보면 16일 17시 이후부터 0.5km 부근에서 상층까지 30kts의 강한 북서풍이 자정까지 계속 불고 있음.

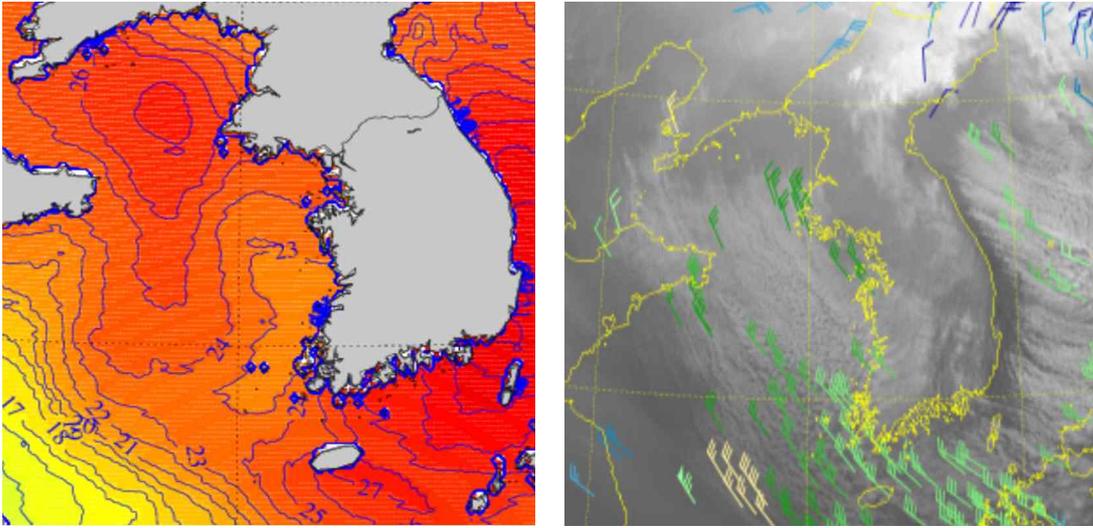


그림 90. 위성 SST 및 하층 수증기 대기운동벡터(2월 17일 10시)

위성자료의 SST(수온-850hPa 기온) 자료에서 서해해상은 23~26도의 강한 해기차가 나타나고, 하층 수증기 대기운동벡터에서 서해해상으로 해기차에 의한 수증기 구역이 넓게 분포하여 충청 및 전라 내륙까지 분포하며, 북서풍의 강풍대는 약 30kts의 강한 바람이 불고 있음.

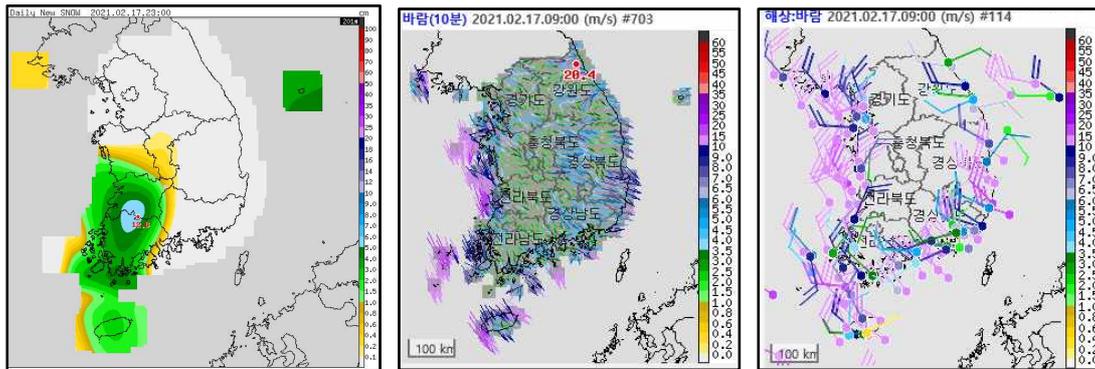


그림 91. 신적설, 바람벡터 및 해상 바람(17일 09시)

2021년 2월 17일 09시 24시간 신적설, 바람 벡터, 해상 바람 자료를 분석해보면 신적설 분포는 27일 09시에 전라도 내륙까지 확대되어 많은 눈이 내렸고, 서해해상의 바람벡터 및 해상 바람은 충남 앞바다를 중심으로 서해해상에 약 30kts 강한 북서풍 불고, 바람 벡터에서도 충청 내륙에서도 5m/s 내외의 풍속이 강해지면서 충청도 중남부 지방을 중심으로 2cm 미만의 신적설이 쌓였다.

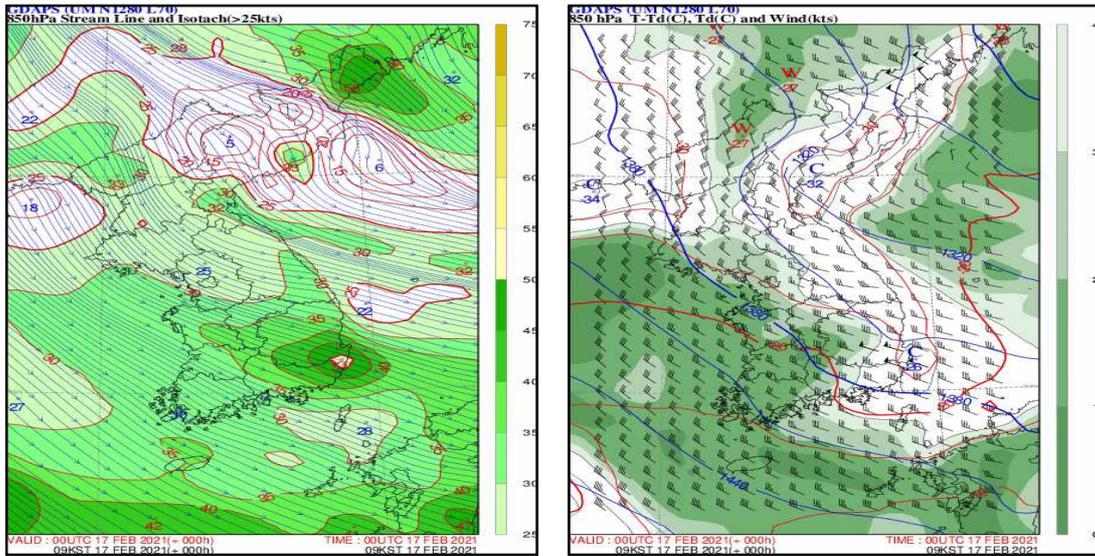


그림 92. UM 850hPa 유선, 풍속, 습수(2월 17일 09시 발표, 09시 예상)

UM 유선 및 풍속 예상 일기도에서 한반도 전역에서 25kts 바람이 불고, 30kts는 충청도 내륙, 35kts는 충청 남부지방으로 강한 바람이 불고 있으며, 습수 분포도는 경기도 및 충청도, 전라 및 경상 동쪽으로 습수 구역이 위치함.

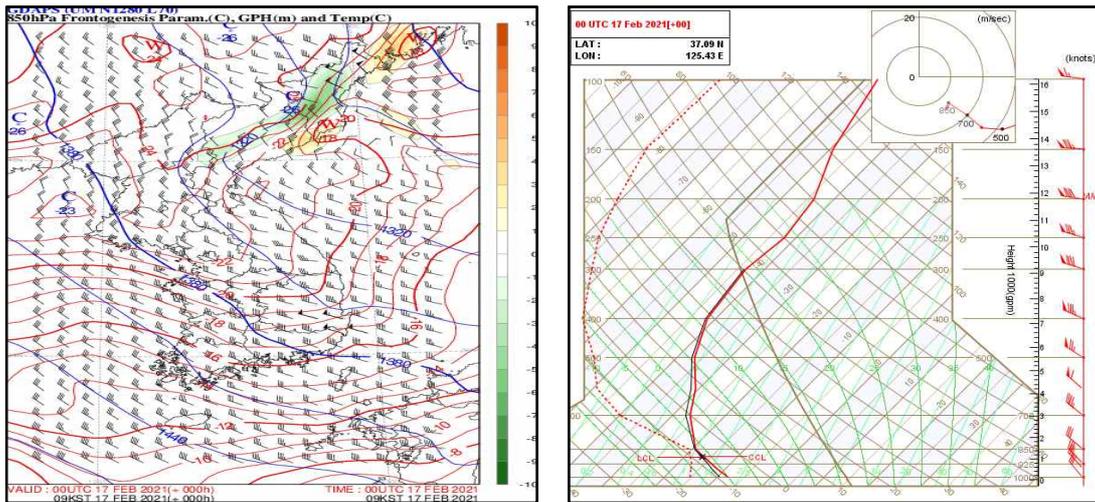


그림 93. UM 850hPa 전선강도 고도, 기온 및 인천부이 고층자료(2월 17일 09시, 09시 예상)

UM 고도 및 기온에서 한기 온도골이 경기내륙에서 경북내륙으로 형성되어 있고, 30kts 이상의 북서풍이 강하게 불고 있으며, 인천부이 지점의 고층자료에서 1km 부근까지 습수층이 위치해 30kts 이상의 강풍이 불고 있음.

6. 결론

6.1. 요약

충청지역의 신적설 일수를 “손에 잡히는 예보기술”에 기술된 5개 유형 모델별로 분류하면 2017년 1월부터 2021년 3월까지 총 826개 중 서해안형에서 282일(34%)로 가장 많이 나타났으며, 발해만 저기압형에서 240일(29%), 한냉종관 저기압형에서 135일(16%), 온난종관 저기압형에서 99일(12%), 극 저기압형에서 70일(8%) 순으로 나타났다.

각 지점별 적설일수는 위성센터가 신적설일 수가 49일로 가장 많이 눈이 내리는 지역이며, 그다음으로 청주가 46일, 계룡이 40일을 기록하였다.

일 기준 적설 시간대는 17시 이후부터 증가하기 시작하여 새벽(00~03시)에 일시 감소하였다가 아침(6~9시)에 30회 이상으로 가장 많이 증가하여 오전 9시 이후에는 점차 감소하기 시작하여 오후(13~15시)에는 최저로 나타나, 야간에 눈이 오는 횟수가 많았다.

해상부이 3개소(인천, 외연도, 덕적도) 해수 온도와 850hPa 고도의 기온 차이는 대체적으로 15도 이상에서 충청도 지방에 신적설을 기록하고, 해기차 평균 분포는 3소 모두 20~21도의 분포로 인천 20.3도, 외연도 20.3도, 덕적도 20.7도를 보여 덕적도 해기차가 가장 크게 나타나며, 대체적으로 충남 서해안 지방은 20도 내외의 분포, 충남북부 내륙은 20.5도 내외, 충남내륙 및 충북충북부는 20.5도 이상의 분포다.

해상의 700~500hPa 고도에서 습수 층이면 충청 전 지역에서도 70~80% 확률로 습수층을 보이고, 해상 850hPa 고도에서 습수 층이면 충남 서해안, 충남내륙, 충북충북부 지역에서 70~80% 확률로 습수 층을 보이지만, 해상 925hPa 고도에서 습수 층이면 충남 서해안 지역만 70~80% 확률로 습수 층을 보였다.

눈이 많이 내리는 풍향은 WNW풍 비율이 30%로 가장 많고, 그다음으로 NW풍이 25%, NNW풍이 16% 순으로 대체로 NW계열의 풍계가 지배적이다.

대체적으로 충청지역에 눈이 내려 신적설을 기록하기 위한 해상부이 3소(인천, 덕적도, 외연도)의 풍속은 925hPa 층의 최소풍속이 4.6~7.1m/s 이고, 850hPa 층의 최소풍속이 7.9~9.6m/s로 그동안 제시되었던 850hPa 해상에서 10m/s 이상보다 충청지방은 낮게 분포하고, 해상의 강한 풍속이 내륙 깊숙이 유입되는 상관관계는 없어 기압계 시스템과 지형적인 요인 등이 크게 작용한다는 것을 알 수 있다.

해상부이 3소의 925hPa 층에서 10m/s 이상의 바람이 불면 눈이 내려 쌓이는 확률은 충북중부와 충북북부에서 75~85%로 가장 높으며, 그다음으로 충남내륙, 충남남부 서해안, 충남북부 내륙에서 45~64%로 나타났고, 850hPa 10m/s 이상에서 충북중부와 충북북부, 충북남부, 충남북부 서해안에서 77~100%로 가장 높고, 그다음으로 충북중부, 충남북부 내륙, 충남내륙, 충남남부 서해안, 충남북부 내륙, 충북남부에서 53~78% 분포를 보였다.

6.2. 예보 현업에서 활용할 전략 제시

겨울철 대기 경계층 Capping inversion는 대기 층간의 경계 구간으로 경계층의 상단의 대류권이 평균적으로 안정되기 때문에 난류는 경계층 내에서 공기를 균질화해 기온이 낮은 겨울철에는 저층에서 열이 보존되어 경계층이 높이가 낮아지고, 그 아래 따뜻한 하층젯트에 의해 습윤하고 불안정이 증가하면 낮은 고도에서 눈 구름대가 생성 및 발달하기 때문에 눈을 예측하기가 어렵다.

서해해상에서 발생된 눈 구름대가 충청내륙으로 유입되기 위한 조건은 대체적으로 850hPa 해기차가 충남 서해안 지방은 15도 이상이지만 충남 내륙과 충북충북부 지방은 평균적으로 서해안 지방보다 0.5도 더 높은 분포가 나타나야 한다.

해상의 700~500hPa 고도 습수층은 충청도 전 지역에서도 70~80% 확률로 습수층을 보이거나, 해상의 850hPa 고도에서 습수 층이면 충남 서해안, 충남내륙, 충북충북부 지역에서 습수 층을 보이지만, 해상 925hPa 고도에서 습수 층이면 충남 서해안 지역에서만 습수층을 보인다.

눈이 많이 내리는 풍향은 대체로 NW계열의 풍계이고, 925hPa 층의 해상의 최소풍속이 4.6~7.1m/s이고, 850hPa 층은 7.9~9.6m/s로 그동안 제시되었던 850hPa 해상에서 10m/s 이상보다 충청지방은 풍속이 낮게 분포한다.

또한, 850hPa 층에서 10m/s 이상이면 충북충부와 충북북부, 충북남부, 충남북부 서해안을 중심으로 많은 눈이 내릴 수 있는 조건이다.

이에 앞으로 더 많은 연구 통해 눈이 내리는 기상요소를 추가 연구하고, 지형에 의한 향후 연구가 필요할 것으로 보인다.

이러한 연구를 통해서 충청내륙까지 유입되고, 발달하는 경향을 더 정확히 예측할 수 있다면 향후 예보에 도움이 될 것으로 보인다.

[참고문헌]

1. 기상청, 2020.12. Why? How! 겨울예보
2. 기상청, 2020.12. Why? How! 겨울철 사례분석
3. 후루키와 다케히코 및 오키 하이토 지음, 신찬 옮김, 2020. 9.10. 기상 예측 교과서
4. 청주기상지청, 2019.12. 충북예보통(通)_겨울
5. 이우진, 2019.07.31. 기상역학
6. 기상청, 2014.10.15. 예보관훈련용 기술서_대기분석 및 예보
7. Lutgens, Tarbuck , 2016.08.25. 대기과학
8. 기상청, 2014.10. 손에 잡히는 예보기술
9. 이순환 등, 집중호우의 관련된 하층제트의 민감도에 관한 수치연구
10. 김광식, 1992. 기상학사전(향문사)
11. 기상청, 2012, 예보기술팀 예보관 중급훈련교재
12. 민경덕 민기홍 역, 2009, 대기환경과학(시그마프레스)
13. 예보기술팀, 2011, 손에 잡히는 예보기술
14. 예보기술팀, 2011, 예보관핸드북시리즈 한눈에 보는 대설개념모델
15. 홍성길, 2006, 기상분석과 일기예보(교학연구사)