

2022년 예보관 과정 훈련보고서

소백산맥 풍하 효과에 의한 경북북부  
MCS 강화 메카니즘 분석

2022. 9. 30.

소속: 대구(청) 예보과  
성명: 석 인 준

# - 목 차 -

I. 서론 .....	3
1. 연구과제 개요 .....	3
2. 선행 연구 기술 현황 .....	10
3. 이론적 배경 .....	11
II. 본론 .....	25
1. 연구자료 및 방법 .....	25
1.1. 연구자료 .....	25
1.2. 연구방법 .....	25
2. 사례 분석 .....	26
III. 결론 .....	54
IV. 참고문헌 .....	55

# I. 서론

## 1. 연구과제 개요

### 1.1 연구 배경 및 목적

경북 북부는 소백산맥 풍하 측에 위치하여 기온과 풍향 등에도 영향을 받지만 가장 큰 특징은 풍상 측과 비교하면 상대적으로 적은 강수량의 분포를 보여 비 그늘(rain shadow)에 든다고 볼 수 있다.(그림 1)

그림 2의 풍하측 비 그늘 효과로 인해 여름철 평년 강수량을 비교해 보면 경북지역은 풍상측에 비해 2/3 수준임을 알 수 있다. 또한, 규모 면에서 차이가 나지만 해외 사례에서도 미국의 CASCADE 산맥과 SIERRA NEVADA 산맥의 평년 연 강수량을 비교해 보면 풍상측(100 inch)에 비해 1/20 (5 inch) 수준에 머무는 것을 보여준다.(그림 3)

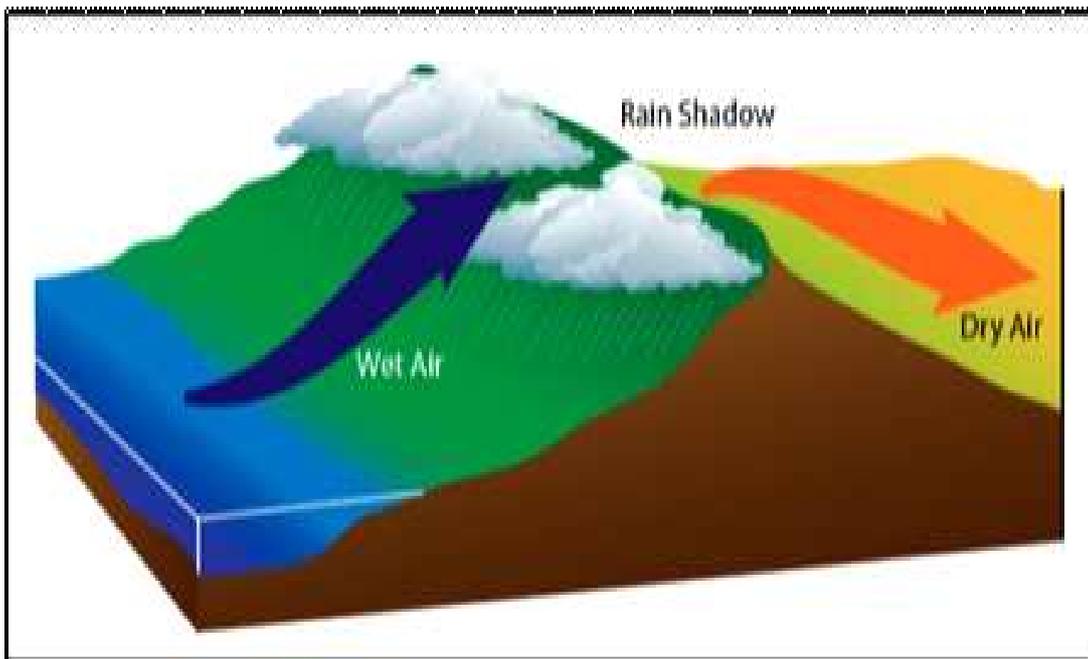
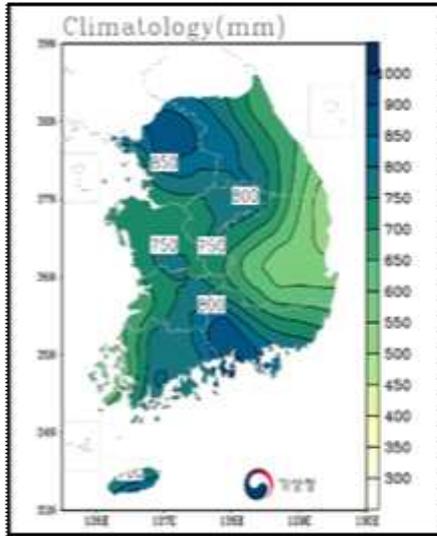


그림 1. 비 그늘 모식도(MetEd)

평년(6-8월)



년 강수량(2011년)

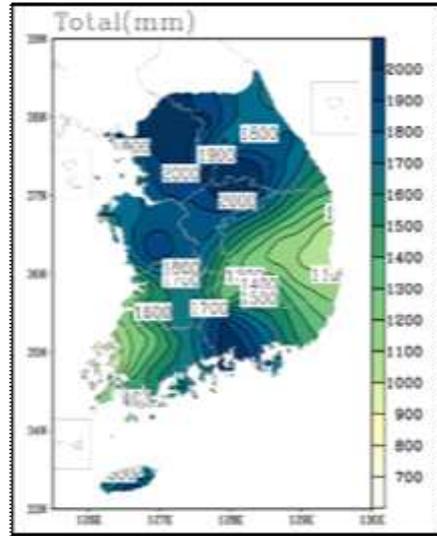


그림 2. 우리나라 평년 강수량 (좌) 여름철, (우) 연강수량

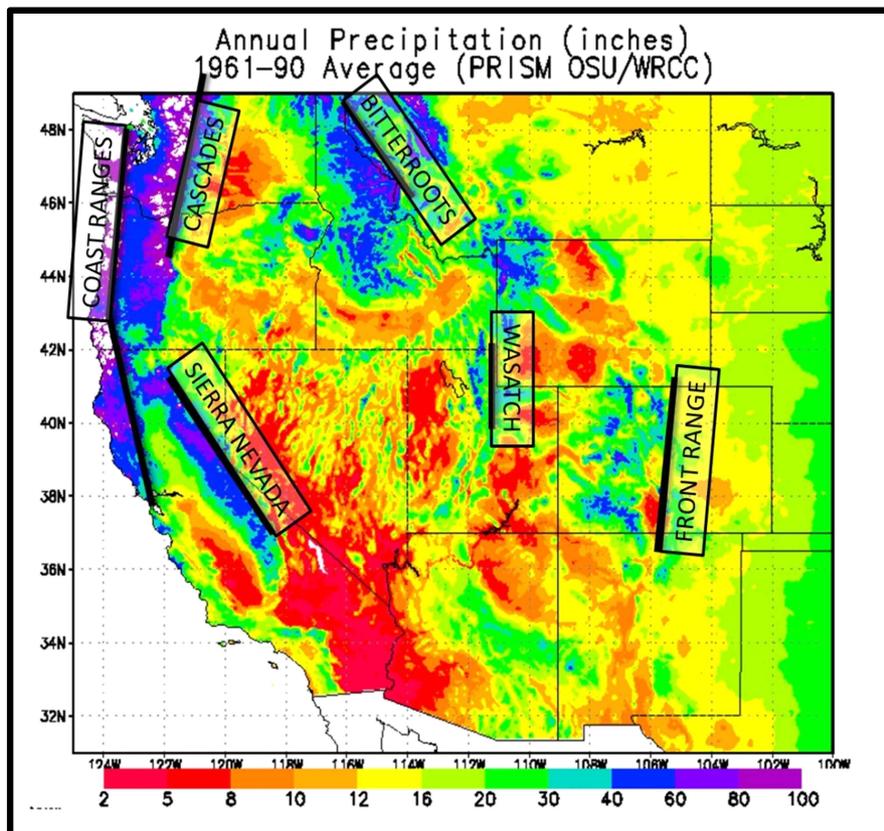


그림 3. 평년 강수량 분포도(미국)

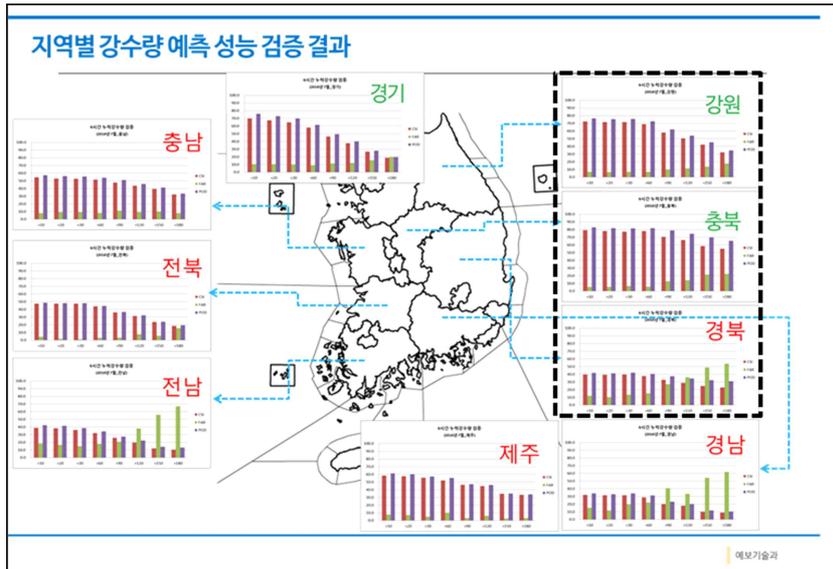


그림 4. 지역별 강수량 예측성능 검증 결과(예보기술과)

그림 4의 지역별 강수량 예측 성능 검증 결과(2016)에 의하면 경북지역의 CSI(임계성공지수)는 30%, POD(탐지율)은 40% 내외로 낮게 나타났으며, FAR(오보율)은 높게 나오고, 특히 시간이 경과 할수록 큰 폭으로 증가함을 보여주고 있다.

위에서 서술한 바와 같이 경북지역은 소백산맥의 차폐에 의해 편서풍에 동반된 강수계가 소산되거나 약화되면서 유입되는 경우가 대부분이지만, 산맥의 차폐에도 불구하고 풍하측에서 매우 강한 대류의 발달로 강한 비와 천둥과 번개, 돌풍, 우박 등을 야기하여 각종 시설물과 농작물에 상당한 피해를 주기도 하였다.(그림 5) 이의 원인으로 산악과에 의한 풍하 효과의 영향이 크다고 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 경북북부지역을 중심으로 영향을 준 한랭전선상의 뇌우와 관련하여 소백산맥 풍하측에서 MCS(중규모대류계)의 발달 과정을 잠재와도 보존으로 설명하고, 소백산맥을 넘을 때의 연직온위의 변위에 따른 풍하측의 강풍과 대류불안정의 강화로 뇌우의 발달과 우박 현상을 지상 및 원격관측자료(위성, 레이더 등)와 종관일기도, 연직자료 등을 활용하여 입체적으로 분석하였다.

또한, 중규모 대류시스템이 소백산맥을 넘으면서 소산 또는 약화되는 사례를 비교 분석하였으며, 향후 연구에서 도출된 결과를 예보 현업(특·정보) 업무에 활용하고자 한다.



news1 구독

### 우박으로 영주 농산물 피해

입력 2017.06.01. 오후 3:34 수정 2017.06.01. 오후 3:35 기사원본

🔊 🔍 📄 📌

news1

(영주=뉴스1) 이재윤 기자 = 1일 낮 12시30분~오후 1시30분 사이 경북 영주시 부석면과 단산면, 순흥면, 풍기읍, 이산면, 안정면, 문수면, 평은면 등 8개 읍·면에 지름 3cm 크기의 우박이 쏟아져 사과와 자두 등 총 1500ha의 농작물이 피해를 입었다. 영주시 단산면에 10분가량 쏟아진 우박(영주시 제공) 2017.6.1/뉴스1



그림 5. 우박 현상 관측 및 피해 현황(new1, 연합뉴스)

## 1.2 경상북도의 지리적 위치와 기후

경상북도는 한반도의 남동부를 차지하며, 북동부에 태백산맥, 북서부는 소백산맥으로 둘러싸였으며, 낙동강의 중상류 부분을 차지한 경상북도는 북부에 강원도, 서부는 충청북도와 전라북도, 그리고 남부와 동부는 경상남도와의 동해에 각각 인접하고 있다. 수리적 위치로는 울릉군 울릉읍 독도가 동경 131°52"로 경북의 동쪽 끝인 동시에 대한민국의 극동을 이루고, 서쪽 끝은 동경 127°148"인 상주시 화북면 홍리로서 동서단간의 경도차는 4°4"이다. 남쪽 끝은 청도군 청도읍 원동으로 북위 35°33"인데 남북단간의 위도차는 1°59"이다.

경북북부 지역은 안동을 중심으로 영주, 의성, 예천, 봉화, 영양, 청송이며, 주로 산악 지형이 많다.

그 밖에 동부 지역은 포항시를 중심으로 경주시, 영덕군, 울진군은 동해안에 위치하고. 울릉군은 동해상에 있다. 또한, 울진은 강원도 영동지방, 경주는 울산광역시 울주군과 접한다. 중서부 지역은 구미시를 중심으로 상주시, 김천시, 문경시, 군위군이다. 이 지역은 주로 분지 지형에 위치하며, 충청북도 중남부 지역과 접한다. 마지막으로 경산, 영천, 청도, 칠곡, 고령, 성주가 경북의 남부지역에 속한다.(그림 6, 7)

기후는 대한민국 남부 내륙형으로서 여름에는 상당히 덥고, 겨울에는 온난하다. 동해안 지방은 해류와 산맥의 영향으로 내륙보다 따뜻하다. 연평균 기온은 11~13도, 1월 평균 기온은 동해안 지방이 0.6~0.8℃이고, 영천 등 남부지방은 -1.6~-2.2℃, 영주·문경·청송 등 북부 내륙지방은 -4.0~-4.2℃로 가장 춥다. 8월 평균 기온은 24.9~26.9℃로 남부 내륙은 높고 동해안 지방은 낮은 편이다. 연 강수량은 900~1,100mm로 영천·청송·길안 등 내륙지방이 비가 가장 적고, 영주·경산·청도·고령 등은 1,000~1,100mm이다. 울릉도는 반도부와는 달리 해양성 기후로서 온난다습하여 연강수량이 1,700mm에 달하며 대한민국 최다우 지역의 하나를 이룬다. 특히 겨울철에 강설량이 많아 눈의 피해가 크며, 가옥구조도 특이하다.

### 1.3 경상북도의 지형

경상북도는 강원도에서 남하한 태백산맥은 경상북도 지방에 들어서면서 그 지세가 차차 약화 되어 낮은 산지로 바뀌어 형산강 지구대 부근에 이르러서는 산발적인 구릉지로 변한다. 한편, 태백산 부근에서 분기된 소백산맥은 소백산(1,421m)·연화봉(1,394m)·도솔봉(1,314m)·문수봉(1,162m)·백화산(1,064m)·속리산(1,057m)·민주지산(1,242m)·가야산(1,430m) 등의 명산과, 죽령(689m)·조령(새재, 642m)·이화령(548m)·추풍령(548m) 등의 큰 재를 만들면서 호남 및 호서지방과의 경계를 이루고 있다. 이 밖에도 경북 내륙에는 팔공산(1,192m)·운문산(1,200m) 등의 높은 산악으로 이루어져 있다.(출처: <https://ko.wikipedia.org>)

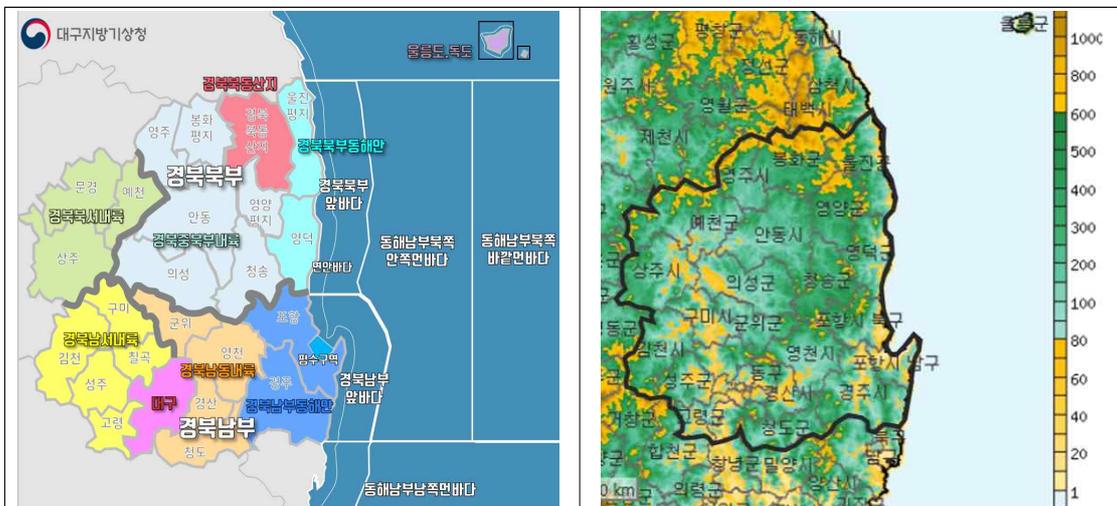


그림 6. 대구·경북 예보구역도 및 지형도

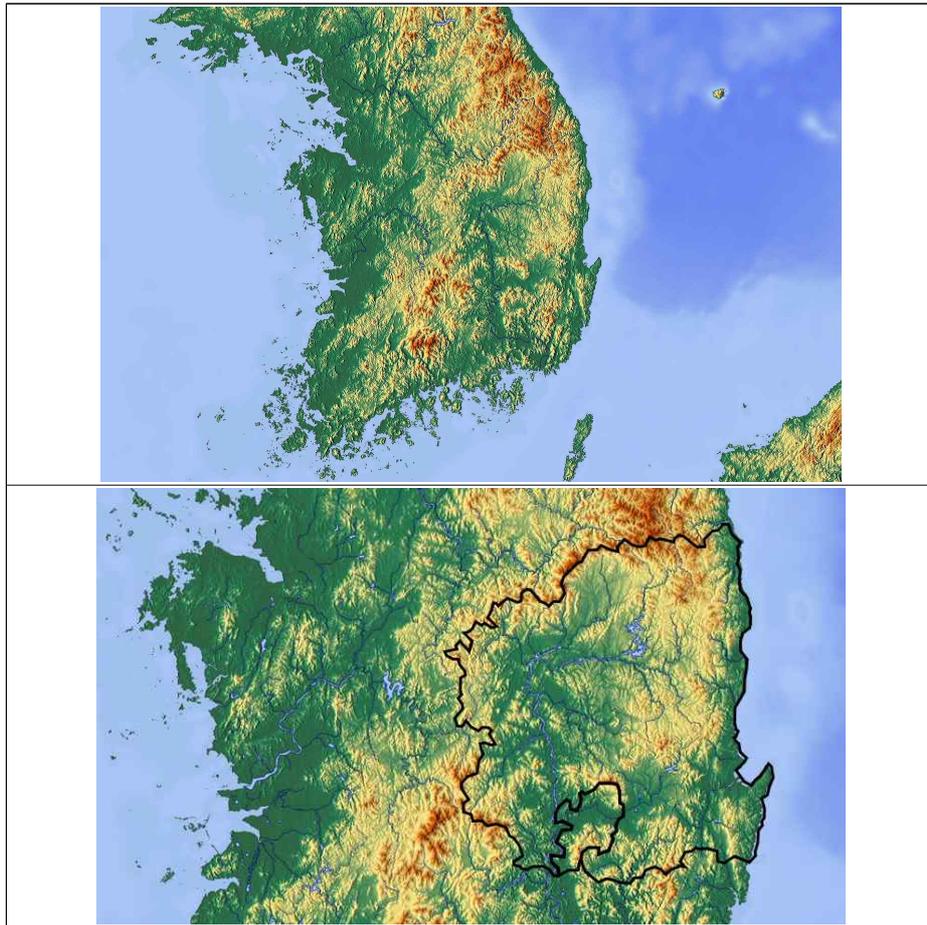


그림 7. 우리나라 지형도 및 경상북도 위치

## 2. 선행 연구기술 현황

산악파에 대한 선행 연구로 이재규(2003), 신기창(2011) 등에 의해 태백산맥과 소백산맥 풍하 측 강풍에 대한 연구가 있었고, 이 연구에서 강풍은 산맥과 거의 직각(약 30°이내)으로 유입 될 때 발생한다고 하였다. 김진욱, 윤대옥(2017)은 산맥을 넘어가는 기류가 산맥의 풍하측 상공에서 사행하는 현상인 편서풍 파동을 소백산맥 지역에 대하여 실제 관측 자료를 이용하여 이 현상이 발생하는지 확인하였고, 이론적으로 설명되는 현상이 실제 중규모에서도 발생하고 있음을 보여주었다.

또한, 이 연구에서 바람의 방향과 산맥이 교차하여 위치하는 경우, 즉 남북 방향으로 위치한 산맥을 서풍이 넘어갈 때 위치 소용돌이도 보존에 의해 파동을 형성할 수 있으며 우리나라는 이러한 조건에 부합하는 조건을 갖추었다고 분석하였다. 특히, 상층의 파동은 300hPa 지위고도

장에서도 확인하였으며, 이는 평균 해발고도 1000m 내외에 불과한 소규모 산맥이 9km 상공에서도 파동을 형성할 수 있는 사례를 보여줌으로써 이러한 크고 작은 산맥의 분포가 지상과 상층의 기압과 흐름을 변화시킬 수 있다는 것을 보여주었다. 하지만, 편서풍 파동이 발생하는 속도의 정량적인 분석과 파동의 생성을 수식적으로 유도하여 편서풍 파동의 생성 유무에만 중점을 두어 분석하였기 때문에 산맥 이외의 다양한 변수를 고려한 추가적인 연구가 필요하다고 하였다.

한편, 산악 효과와 강수에 대한 사례는 김동균·전혜영(2000)의 집중호우와 연관된 산악 효과에 대한 수치적 연구가 있다. 이 연구에서 발달한 대류계가 시간에 따라 풍하 사면의 상공에서 상승역과 하강역이 구분되고 풍하 측 강한 하강류로 인해 연직 상승운동이 강화됨에 따라 2차 강수를 발생시킨다고 하였으며, 임은하·이태영(1994)은 한반도 중부지방의 지형이 구름 및 강수 발달에 미치는 영향 연구에서 강한 조건부 불안정한 대기 상태일 때 산악의 영향으로 발생한 구름이 활발한 적운 대류 과정을 통해 많은 강수를 유발한다고 하였다.

### 3. 이론적 배경

#### 3.1. 소용돌이도

소용돌이도 또는 와도(vorticity)는 유체 회전의 한 척도이다. 이것은 단위면적당 순환과 같고  $\nabla \times \vec{V}$  로 정의되는 운동의 벡터적 성질이다. 종관규모에서는 수평 운동이 우세하다. 그러므로  $\zeta$  로 표시되는 연직 축에 대한 소용돌이도가 가장 중요하다.

순환은 유체 영역의 경계를 따라 적분한 거리 요소와 속도의 곱, 즉 속력  $\times$  거리이다.

공기가 정지해 있을 때에도 우주에서 관측하면 이 공기는 지구 소용돌이도  $f$ 를 갖는다. 만일 공기가 기압 중심에서 회전한다면 이 공기는 지구 소용돌이도 뿐만 아니라 지구에 상대적인 소용돌이도를 갖게 될 것이다.

절대 소용돌이도 = 상대 소용돌이도 + 지구 소용돌이도

$$\zeta_a = \zeta + f$$

지구 소용돌이도  $f$  값은 적도의 0부터 북극의  $1.46 \times 10^{-4} s^{-1}$  까지 변한다. 소용돌이도의 단위는  $s^{-1}$  이고 각속도의 단위와 같다.

소용돌이도가 반시계 방향이면 양의 값을, 시계 방향이면 음의 값을 갖는다. 따라서 저기압성 소용돌이도는 북반구에서 양의 부호(남반구에서 음의 부호)를 갖고, 반면 고기압성 소용돌이도는 북반구에서 음의 부호(남반구에서 양의 부호)를 갖는다.

북반구(우리나라)에서의 운동을 고려하면 지구 소용돌이도  $f$  는 양이고, 고기압성 흐름 지역에서 상대 소용돌이도  $\zeta$  는 음이다. 그러므로 절대 소용돌이도는  $\zeta_a = \zeta + f = (\text{음의 값}) + (\text{양의 값})$  이다.

### 3.2. 로스비파: 일정한 절대 소용돌이도 궤적

공기덩이가 북쪽으로 이동한다면 지구 소용돌이도  $f$  는 위도가 증가함에 따라 증가할 것이다. 이 경우, 절대 소용돌이도  $\zeta_a$  가 일정하게 유지되어야 한다는 조건을 만족시키기 위하여 상대 소용돌이도  $\zeta$  는 감소해야 한다. 따라서 고기압성 곡률이 생길 것이고 결국 공기덩이는 남쪽으로 향하게 될 것이다.(그림 8)

공기덩이가 남쪽으로 더 진행함에 따라  $f$  의 감소는  $\zeta$  의 증가로 보상되어야 한다. 따라서, 저기압성 소용돌이도가 생길 것이고 공기덩이를 다시 북쪽으로 향하게 할 것이고 이러한 과정이 반복될 것이다.

이와 같은 효과는 로스비파로 알려진 흐름에서 꾸준한 일련의 파동을 일으킨다. 흐름이 비발산적이라는 가정은 아마도 비발산 고도인 약 500hPa 또는 600hPa 고도에서 흐름을 고려할 때 가장 적절할 것이다. 로스비파는 큰 진폭을 갖고 천천히 이동하는 파동으로서 상층일기도에서 분명하게 볼 수 있다.

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}, \quad \zeta_a = \zeta + f$$

절대 소용돌이도:  $\zeta_a$ , 상대 소용돌이도:  $\zeta$ , 지구소용돌이도:  $f$

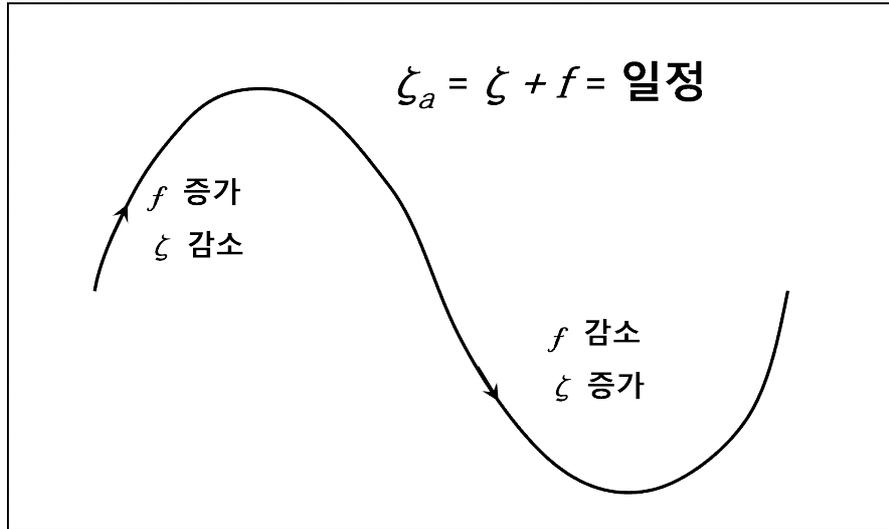


그림 8. 절대 소용돌이도 보존으로 형성되는 로스비파

### 3.3. 풍하저기압(lee cyclone): 위치 소용돌이도( $\zeta_a/\Delta p$ =일정) 보존

그림 9a는 직선 흐름으로 산맥을 횡단하여 서쪽에서 동쪽으로 넘어가는 공기덩이를 보이고 있다. 산맥을 횡단하면서 공기덩이는 연직으로 눌러진다. 지면 근처의 공기는 지면이 높아짐에 따라 강제 상승하지만 보다 높은 고도에 있는 공기는 수평으로 이동하려 한다. 이 현상이 심할수록 공기는 더욱 안정해진다. 이에 따라 기압( $\Delta p$ )은 감소하고 위치 소용돌이도 보존으로 절대 소용돌이도  $\zeta_a$  또한 감소한다. 동서 방향 흐름에서는  $f$ 가 일정하므로,  $\zeta$ 가 감소해야 하는데, 이는 결국 고기압성 흐름을 일으킨다. 풍하 쪽 경사를 따라 하강할 때는 기압  $\Delta p$ 과  $\zeta$ 는 증가하여 공기는 원래의 상대 소용돌이도 즉, 이 경우에는 0으로 돌아온다. 그림 9b는 결과적으로 나타나는 유선 또는 등압선 형태의 평면도를 보이고 있다. 기압이 풍상측보다 풍하측에서 더 낮다는 것을 알 필요가 있다. 기압장은 산의 영향을 넘어서서 교란되지 않은 상태로 되돌아가려 한다. 따라서 풍하 골이 형성되거나 심지어 풍하 저기압이 형성된다. 만일 흐름이 북쪽으로부터 남쪽으로 향한다면, 위

도에 따른  $f$ 의 감소에 의해  $\zeta$ 가 증가함으로써 기압골은 더 깊어진다. 산의 양쪽 경사면 사이에 기압차는 풍상측에 공기가 쌓이는 관성 효과 즉 기압 증가에 의해 더욱 현저해진다.(출처: 예보관 훈련용 기술서)

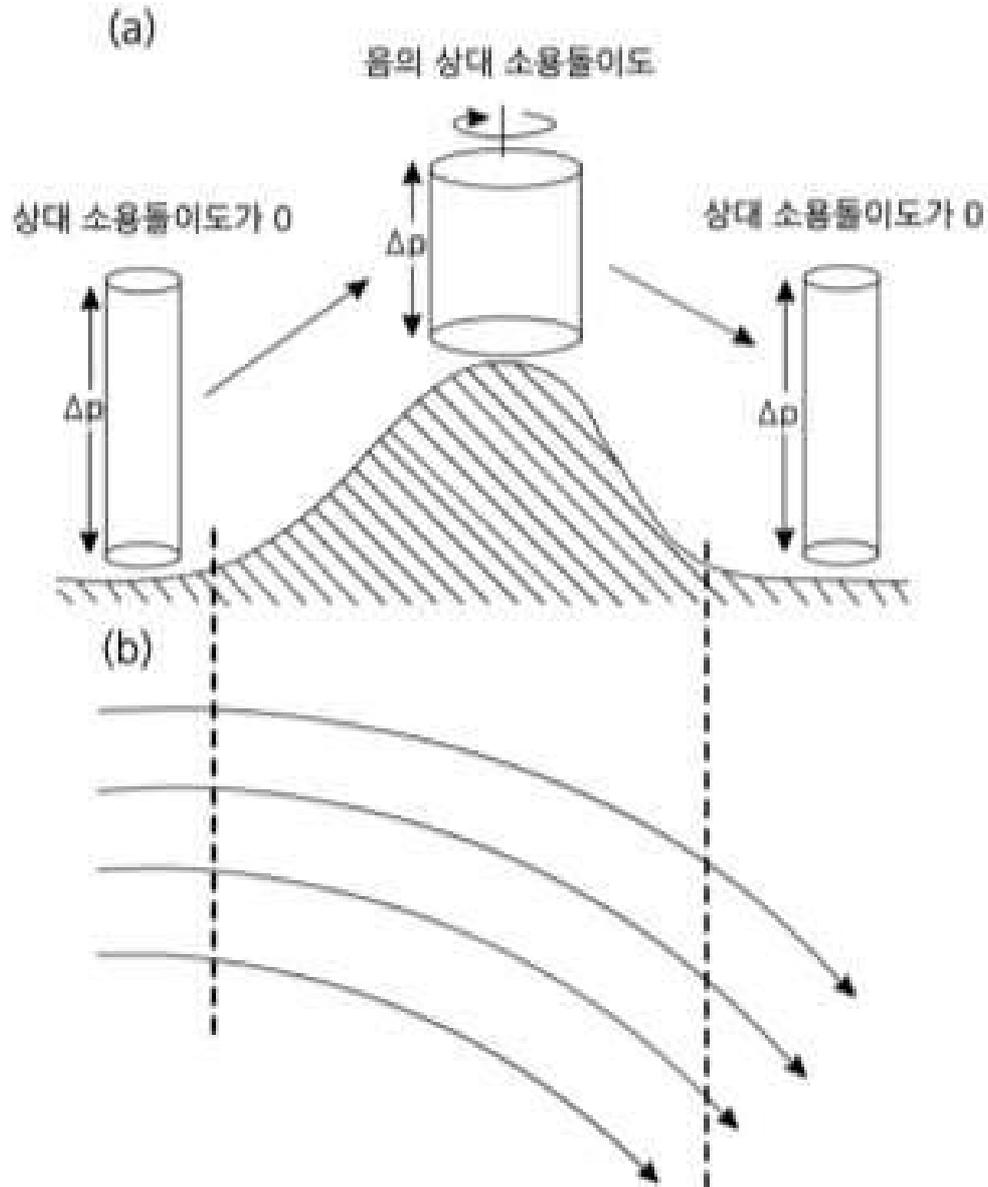


그림 9. (a) 안정한 상태에서 언덕을 넘어 지나가는 공기덩이가 연직으로 눌림으로써 생기는 고기압성 상대 소용돌이도. (b) a의 결과적으로 나타나는 유선 또는 등압선

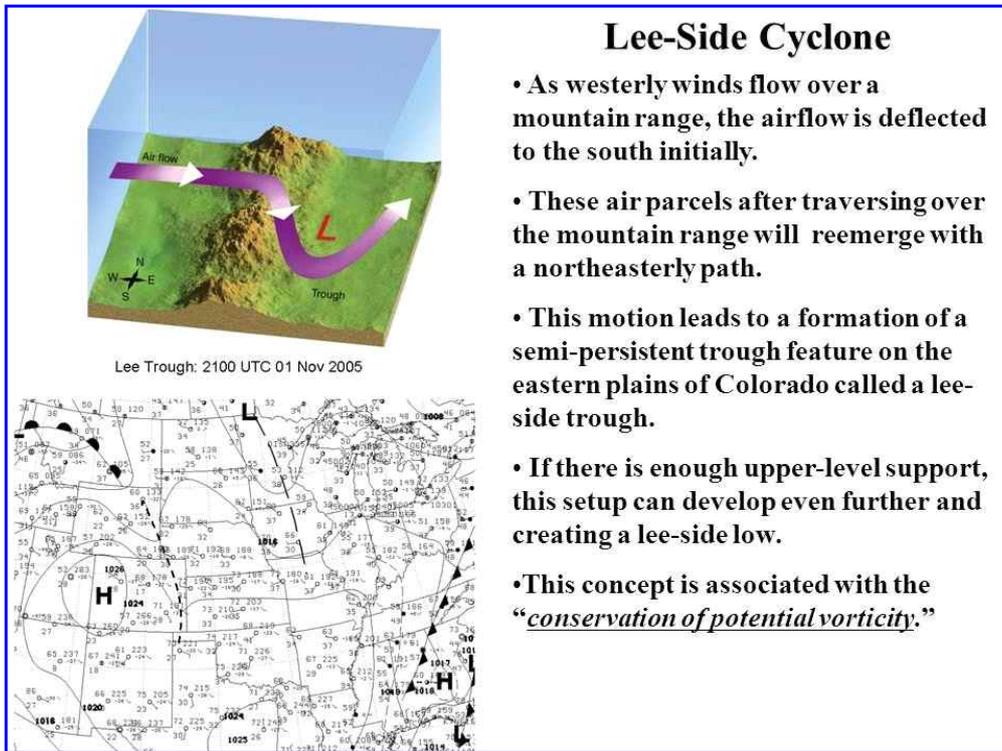


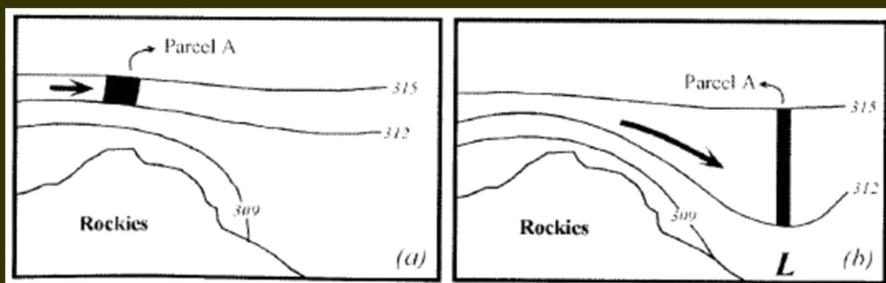
그림 10. 풍하 저기압(Lee-side cyclone) 개념 모델

### 3.3.1 풍하 저기압 발달(lee cyclogenesis)

규모가 큰 산악의 풍하측(lee side)에서 나타나는 저기압 발달을 의미한다. 지형성 저기압 발달로 부르기도 한다. 풍하측은 평균 배경 흐름에 대한 상대적 위치로 바람이 불어가는 산 뒤 쪽을 나타낸다. 풍하 저기압 발달은 미국의 록키 산맥과 유럽의 알프스 산맥 등 큰 규모의 산맥 풍하측에서 비교적 자주 관측되는 편이다. 특히, 록키 산맥의 동쪽 지역은 종관 규모의 저기압 발생에서도 중요한 발생 지역으로 꼽힌다. 이 외에도 아시아 지역의 Altai-Khangayn-Sayan 산맥 풍하측, 티벳 고원 동쪽 등지에서도 풍하 저기압 발달이 종종 관측된다. 상대적으로 작은 규모의 산악 뒤에서도 풍하 저압부가 흔히 관측되기는 하나 온대 저기압 규모의 저기압이 발생하지는 않는다. 한반도를 예를 들면, 겨울에는 개마고원을 포함한 북한 지역 산악의 풍하측 (산악의 남~남동쪽)에서는 기압골이 흔히 관측된다.(Lee et al., 1998. Monthly Weather Review), (기상학백과)

## Lee Trough Formation: PV Perspective

- $PV = g(\zeta_\theta + f)(-\partial\theta/\partial p)$
- $d(PV)/dt = 0$  for adiabatic flow
- Need component of flow normal to mountain barrier
- Flow across mountain barrier will subside on lee side
  - Adveacts higher  $\theta$  downward  $\rightarrow$  warming
  - $-\partial\theta/\partial p$  decreases  $\rightarrow \zeta_\theta$  must increase  $\rightarrow$  low level circulation



Martin (2006)

그림 11. 잠재와도 보존에 의한 풍하 기압골(Lee trough) 개념 모델

또한, 열역학적으로 산맥의 바람이 불어오는 쪽에서 가라앉는 공기의 단열 압축으로 인한 온난화에 의해 설명될 수 있고, 또는 동적으로 통과하는 기단의 수직 확장과 관련된 수평 수렴에 의한 저기압 순환의 생성에 의해 설명될 수 있다. 종종 절대와도의 보존으로 표현하고, 공기 기둥의 수직 신축은 상대적 와도의 증가에 의해 보상된다.

### 3.4 대기 중력파 (Atmospheric gravity waves)

안정한 대기에서 연직으로 부력을 받아 변위 된 공기괴가 중력에 의해 원래의 위치로 오려는 과정에서 일어나는 진동을 말한다. 대기 중력파는 우주에서 일어나는 중력파와는 구분되는 것으로 부력파 (buoyancy wave) 라고도 한다.(출처: 기상학백과)

대기 중력파는 주로 대류권의 산악, 구름, 제트류 및 전선에 의해 형성되며 연직으로 전파되면서 파의 소산이 일어나는 중간 대기(성층권 및 중간권)에 운동량과 에너지를 전달하는 역할을 함으로써 파가 형성되는 대류권과 파가 깨어지는 중간 대기 사이의 역학적 연계를 담당한다.

다. 대기 중력과 관측 방법은 지상기상관측, balloon 관측, remote sensing, 항공관측, airglow, 및 인공위성 등이 있다.(그림 12)



그림 12. 2017년 11월 2일 관측된 대기 중력과  
(출처: <https://pxhere.com/en/photo/681802>)

### 3.5 산악파

대기중에서 발생하는 정체파 중에서 일반적인 형태의 내부 중력파로서 안정한 상태의 공기가 산이나 산맥을 통과할 때 형성되는 파동을 말한다. 풍하 측에 형성되어 풍하파라고 하기도 하며 종종 풍하파의 마루에 고적운이나 렌즈형 구름이 형성되는데, 이를 산악파 구름이라고 한다.

또한, 산악파는 연직변화에 의해 기류의 기압, 기온, 고도를 주기적으로 변하게 만든다. 가끔은 산악파에 의해 풍하 측에서 강한 상승류로 인한 강수량을 증가 시키기도 한다.

가장 강한 산악파는 전면 장애물(산)의 상공에 대류 안정층이 존재하고, 그 위와 아래에 불안정층이 존재 할 경우에 나타난다고 한다.

종종 여러 산이 연결된 복잡한 지형의 경우 산악파 파동의 길이와 산과 산 사이의 거리 간의 관계에 따라 풍하파가 감쇠되거나 강화될 수 있다.(그림 13)

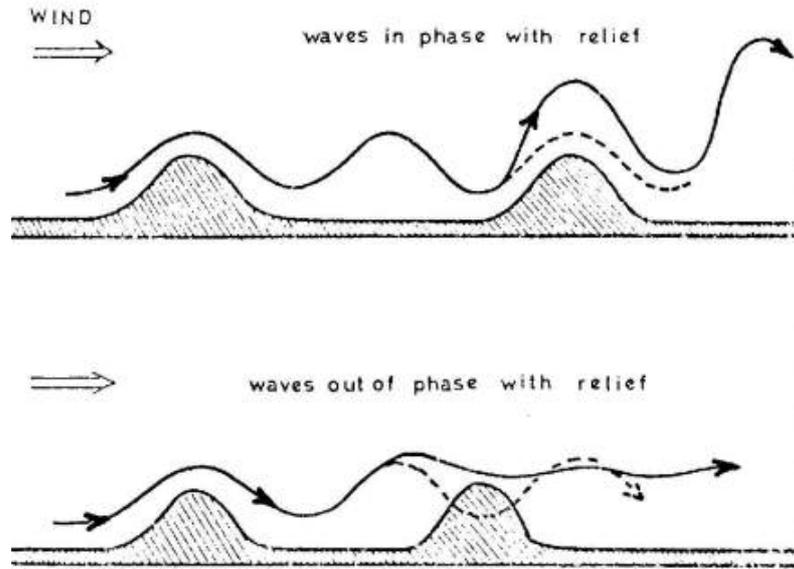


그림 13. 파장과 지형 간의 상호작용을 설명하는 개략도(WMO, 1978)

### 3.5.1 물뿔 메커니즘

Long(1953)에서 처음 제안된 물뿔 메커니즘은 풍상측에서 임계 이하적 흐름 (subcritical flow)이 산 정상을 넘어가면서 임계 초과적 흐름 (supercritical flow)으로 바뀌게 되고 위치에너지가 운동에너지로 지속적으로 전환되어 풍하측에서 강한 바람이 발생하게 되는 메커니즘이다.(그림 14, 15) 이 메커니즘은 산에 의해 흐름이 가질 수 있는 비선형성을 설명할 수 있으며 흐름의 상층으로 에너지가 전파되지 못하도록 고정되어 있는 경우에 발생할 수 있다.



그림 14. 댐의 물뿔(Hydraulic Jump)

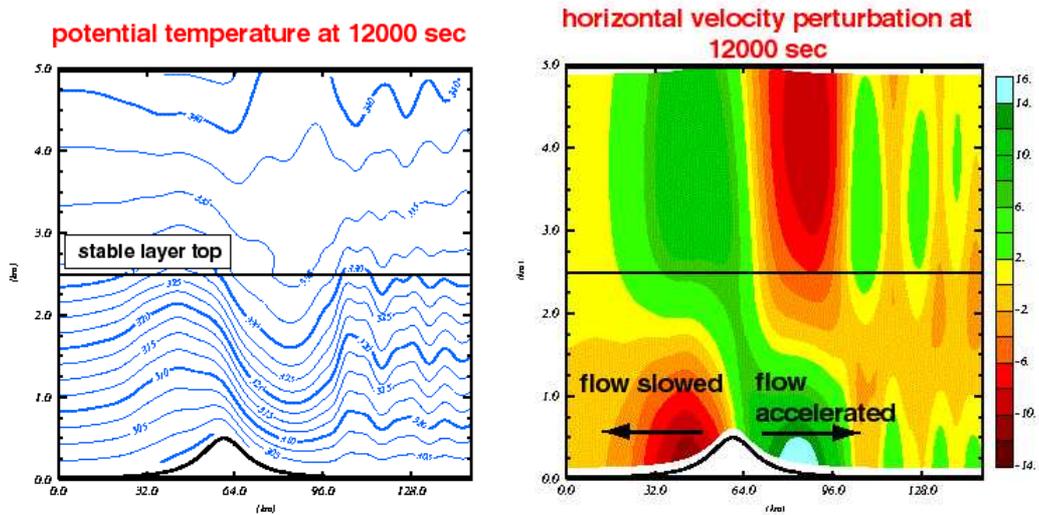


그림 15. (좌)연직 온위 분포, (우)연직 상승속도 분포  
(by Durran, 1986, J. Atmos. Sci.)

### 3.5.2 부분 반사 메커니즘

부분 반사 메커니즘은 대기안정도가 급격하게 변하는 경계면에서 파동의 부분 반사가 발생하여 상향 전파하는 중력파와 하향 전파하는 중력파의 중첩으로 인해 강풍이 발생하는 메커니즘으로 Klemp and Lilly (1975)에서 제안되었다. 이 이론은 실제 대기에서 안정도가 급격히 변하게 되는 대류권계면의 높이가 연직과장( $\lambda_z$ )의 1/2배가 될 때 강풍이 발생한다고 설명하였으며, 실제 대기의 풍속과 안정도에 쉽게 적용이 가능하다.(그림 16)

### 3.5.3 임계고도 반사 메커니즘

Clark and Peltier (1984)에서 제안된 임계고도 반사 메커니즘은 2차원 흐름의 가정하에 수평 바람의 방향이 역전 되는 임계고도 ( $Z_c$ )에서 리차드슨 수 (Richardson number, Ri)가 0.25보다 작은 값을 가지는 경우 상향 전파되는 파동의 반사가 일어나(Booker and Bretherton, 1967) 풍하측 강풍을 만드는 메커니즘이다. 이 이론에 의하면 상향 전파되는 파동과 임계고도에서의 반사에 의해 하향 전파하는 파동 사이의 공명이 일어날 때 풍하측 강풍이 발생하게 된다고 밝혔다.

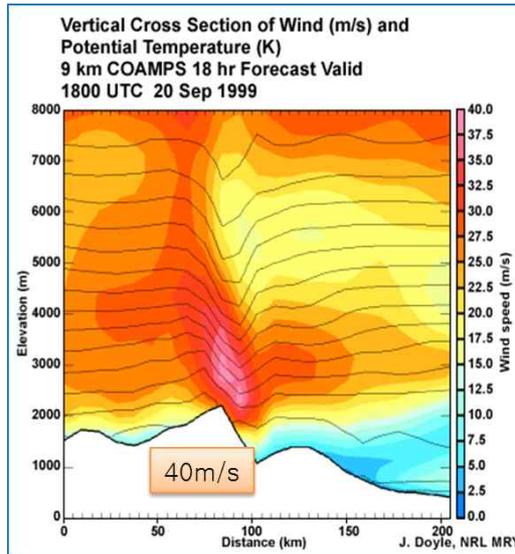


그림 16. 연직 바람과 온위 분포도(MetEd)

### 3.6 프라우드 수 (Froude Number)

산 위를 기류가 넘을 것인지 아니면 측면으로 우회할 것인지는 대기 안정도와 풍속의 우열에 달려 있다. 대기가 안정할수록 기류가 산을 넘기 어려워지는 반면, 풍속이 강하면 안정한 대기가 저항을 이겨내면 산을 넘기 유리하다. 또한, 산은 고도가 높을수록 기류가 산 정상을 넘기 어렵다. 기류의 풍속, 대기 안정도, 산 고도의 3가지 효과를 하나의 지수로 표현한 것이 프라우드 수(Froude Number)  $Fr$  이다.

$$Fr = \frac{uh}{N}$$

여기서  $u$ 는 산맥에 직각인 방향의 풍속,  $h$ 는 산의 높이이다.  $Fr$ 이 1보다 크면 바람이 안정한 대기의 저항을 이겨내고 기류가 산 위를 넘을 수 있게 된다. 이 값이 1보다 작으면 대기가 안정하거나 기류의 풍속이 약해 산 위를 넘지 못하고 우회하게 된다. 마지막으로  $Fr$ 이 1이면 산악과 공명하면서 매우 강한 파동을 일으키면서 풍하 사면을 따라 강한 폭풍을 일으키기도 한다.(그림 17)(기상학백과)

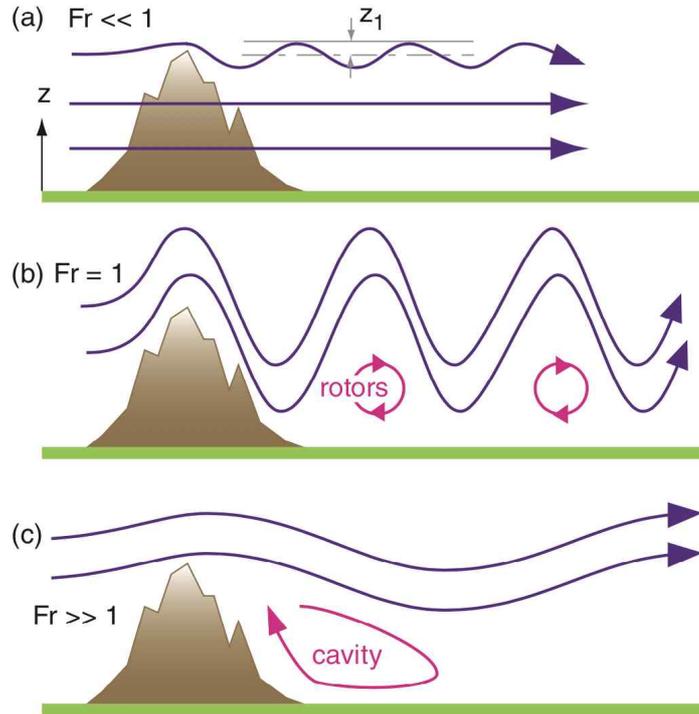


그림 17. 산악파의 파동과 프루드 수(출처: 지구과학도서관)

### 3.7 지형에 의한 강수 발달 및 증가

산의 경사를 따라 강제 상승시 수증기의 응결에 의한 강수는 크게 6 가지 유형으로 분류한 것이다.(그림 18)

(a) 풍하측 깊은 대류의 증대(Lee-side Enhancement of Deep Convection)는 산 정상을 통과하는 대기의 파동과 관련된 중층의 연직 운동과 열적으로 유도된 상향 경사류 (Upslope Flow)가 결합 된 효과

(b)상향경사 응결(Upslope Condensation): 산의 경사를 따라 강제 상승 시 수증기의 응결에 따른 강수

(c)대류의 상향경사 유발(Upslope Triggering of Convection): 산의 경사를 따라 상승하는 공기가 잠재 불안정(Potential Instability)상태에 있을 때 지형에 의한 치올림(Lifting)은 불안정을 해소 시킨다. 이 경우에 형성되는 구름은 적운 또는 적란운이다.

(d) 대류의 상류유발(Upstream Triggering of Convection)

(e)대류의 열적유발(Thermal Triggering of Convection): 주간에 산 정상 가열로 인해 열적인 직접 순환에 의한 구름이 발달한다.

(f) 풍하측 대류의 증가(Lee-side triggering of convection) : 고립된 지형 주위에 대기 흐름이 낮은 프라우드수(Froude Number)를 가질 때 산의 풍하 측에 구름이 발달한다.

이와 같은 효과는 미국의 Rocky산맥에서 상당히 많이 나타나며 이로 인해 중규모 대류 복합체(Mesoscale Convection Complex)가 형성된다.

(출처 : 예보관훈련용 기술서, Houze, 1993)

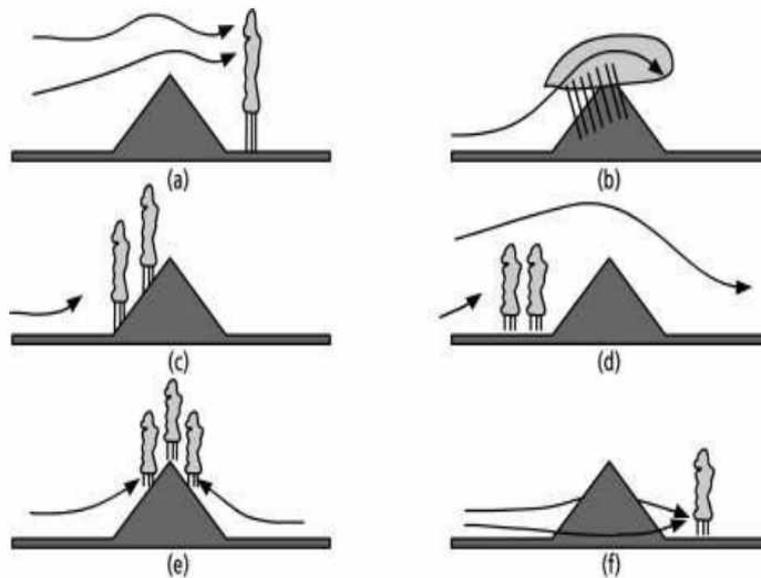


그림 18. 지형에 의한 강수 발달 모식도 (Houze, 1993)

### 3.8 OROGRAPHIC EFFECTS ON PRECIPITATING CLOUDS

지형에 의한 강수 발달(Houze,1993)를 한 단계 발전시킨 것으로 기류의 흐름을 조금 더 구체화 하고 세분화 하여 지형에 따른 강수구름의 발달을 12가지 유형으로 분류 한 것이다.(그림 19)

(a, b)Upslope Flow, Laminar, and Overturning

(c, d)Diurnal Forcing

(e, f)Cloud Layers Moving Over Small Terrain Features and the “Seeder Feeder” Mechanism

(g, h)Convection Associated With Wave Motions in the Wake of a Hill

(i, j)Blocking Effects on Precipitation

(k, l)Capping and Triggering of Intense Deep Convection

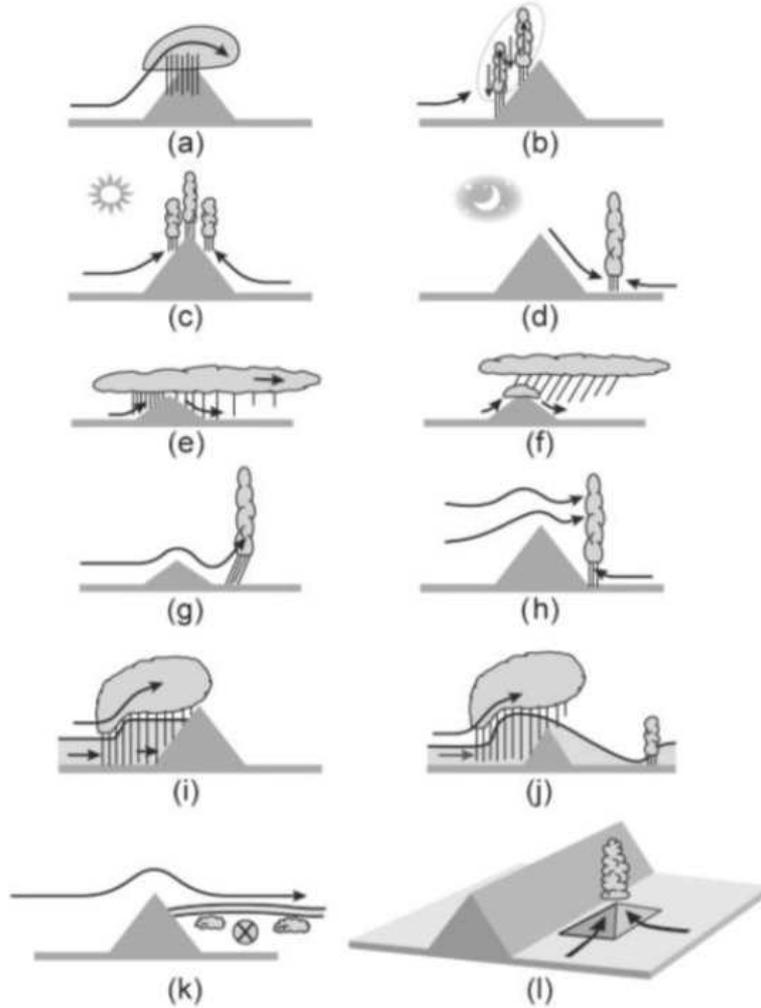


그림 19. 지형에 의한 강수 발달 모식도(Robert A. Houze Jr. 2011)

3.9 등온위면

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

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

모든 공기는 온위를 갖게 되며, 이 값은 건조단열 운동에서는 보존된

다. 위의 식에서 볼 수 있듯이 같은 온위(등온위)라면, 기압 P가 증가(감소)함에 따라 기온 T도 증가(감소)한다. 또한 종관규모 운동은 강수 지역을 제외하고는 대체적으로 단열과정을 유지하므로, 온위는 종관규모 운동에서 보존량으로 볼 수 있다.

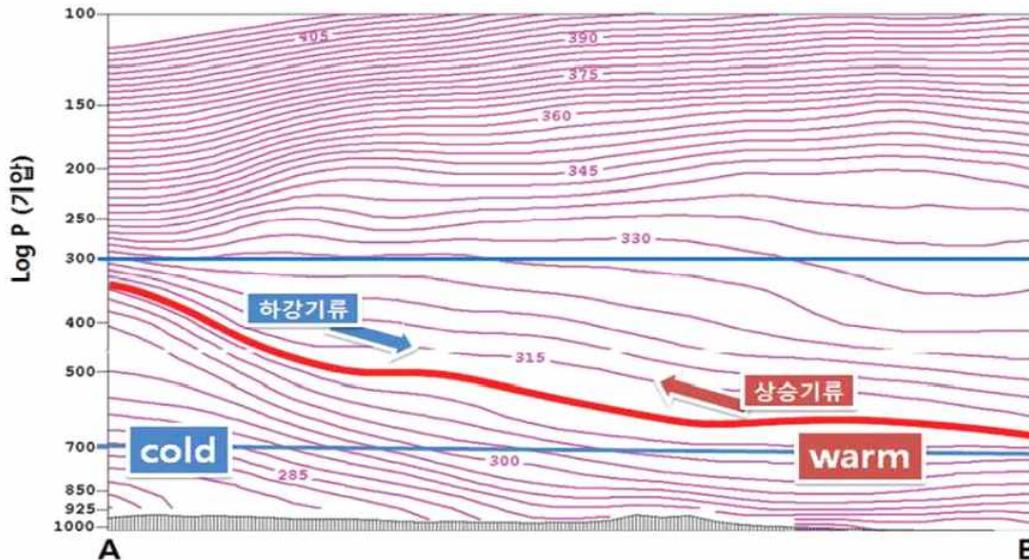


그림 20. 등온위선이 연직(기압고도)분포

그림 20과 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, 대기 상층과 중·하층의 고도 차이만큼 기온 차이가 나타난다고 할 수 있다. 만약, A에서 B로 312K 등온위선을 따라 기류가 이동한다면, 하강기류와 함께 수평적으로는 한랭기류가 나타나고, B에서 A로 이동한다면 상승기류와 함께 온난기류가 나타난다. 여기에 수증기량을 이용하면, 기압면에서 해석하기 힘든 구름의 생성 및 강수 현상 등 대기운동을 이해하는데 도움이 된다.(출처 : 손에 잡히는 예보기술)

## II. 본론

### 1. 연구자료 및 방법

#### 1.1. 연구자료

자료 분석을 위하여 2017년부터 2021년까지 최근 5년간 5월부터 9월까지 경상북도에서 우박을 동반한 뇌우 발생일 중 한랭전선이 소백산맥을 가로지르는 날을 연구 대상으로 하였으며, 레이더(수평, 연직)자료와 위성, 수치모델을 자료로 사용하였다.

#### 1.2. 연구방법

소백산맥 풍상측(충청도, 전라도, 강원도)에서 풍하측(경상북도)으로 넘어오는 뇌우의 발달 및 약화되는 사례를 구분하여 종관 및 국지, 지역적 영향의 상관성을 조사하였다. 분석 기준은 한랭전선이 경북지역을 통과하는 사례를 중심으로 분석하였다.(표 1)

표 1. 경북지역 우박 관측된 날(2017~2021년, 기상관측소 기준)

날짜	지역	비고(피해)
2017.05.13	안동	
2017.05.17	안동	
2017.06.01	청주, 안동, 봉화, 영주, 영양	5557ha (역대 2번째)
2017.09.19	청주, 안동	
2018.05.29	구미, 대구	
2018.05.30	대구	
2019.03.15	안동	
2019.06.15	대구, 안동, 영주, 청송	
2020.05.05	대구	
2020.05.29	안동, 영주, 봉화	
2021.04.29	대구, 경북, 포항	
2021.05.01	대구	
2021.05.02	안동	
2021.06.22	청주, 문경, 안동	
2021.07.10	안동, 의성, 대구	
2021.09.22	안동	

## 2. 사례분석

### 2.1 풍하측에서 발달하는 사례(2017년 5월 13일)

당시(2017.05.13.) 05시 예보와 실황을 살펴보면 전일(2017.05.12.) 21시에 중국 북동지방에 위치한 저기압의 중심이 동남동진하면서 우리나라 북한 지방으로 진출할 것으로 예상하고, 북쪽의 상층 기압골 영향을 받을 것으로 판단하였으며, 오전에는 중부지방, 오후에서 저녁 사이 중부지방과 경북북부를 중심으로 불안정이 강화될 것으로 예상하였다. 대기불안정 지수는 CAPE 400 이상, KI 30 이상, SSI 4 이하로 중부지방에는 돌풍과 우박 가능성을 예상하였으나, 경북북부를 중심으로 강한 천둥.번개를 동반한 직경 1~2cm의 우박이 내린 사례이다.

#### 2.1.1 지상일기도

09시에는 산둥반도 부근에 중심을 둔 저기압은 서해상에서 수증기를 공급 받아 발달하면서 한랭전선이 강화되고 있으며, 15시에는 한랭전선이 우리나라의 남북으로 형성되어 충청도를 중심으로 영향을 주고 있다.(그림 21)

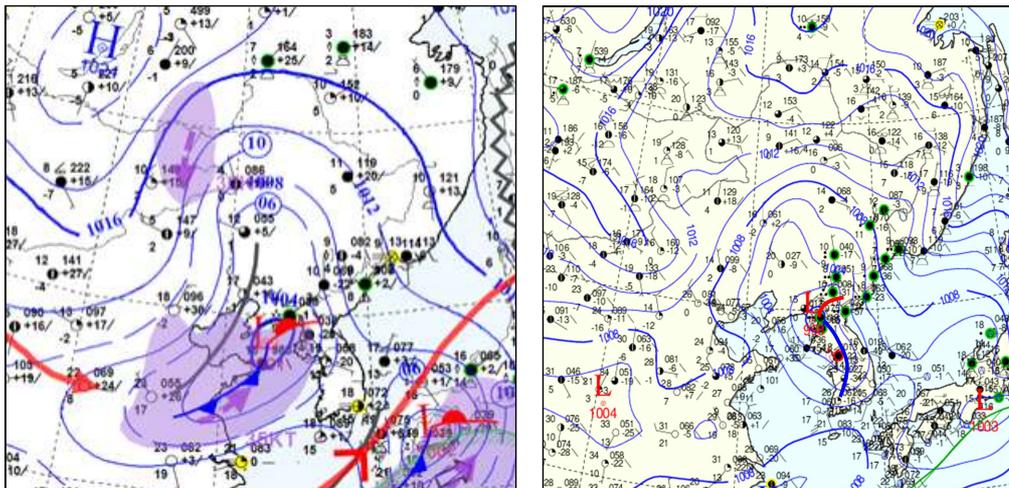


그림 21. 지상일기도(2017.05.13) (좌) 09시, (우) 15시

#### 2.1.2 850hPa 일기도

전선면을 따라서 09시부터 습윤역이 우리나라로 이동하여 15시에는 서해상안으로 접근하고 있으며, SW 45kts의 강한 하층 Jet가 유입되고

있어 온난 이류와 많은 수증기를 우리나라로 공급하고 있다.(그림 22)

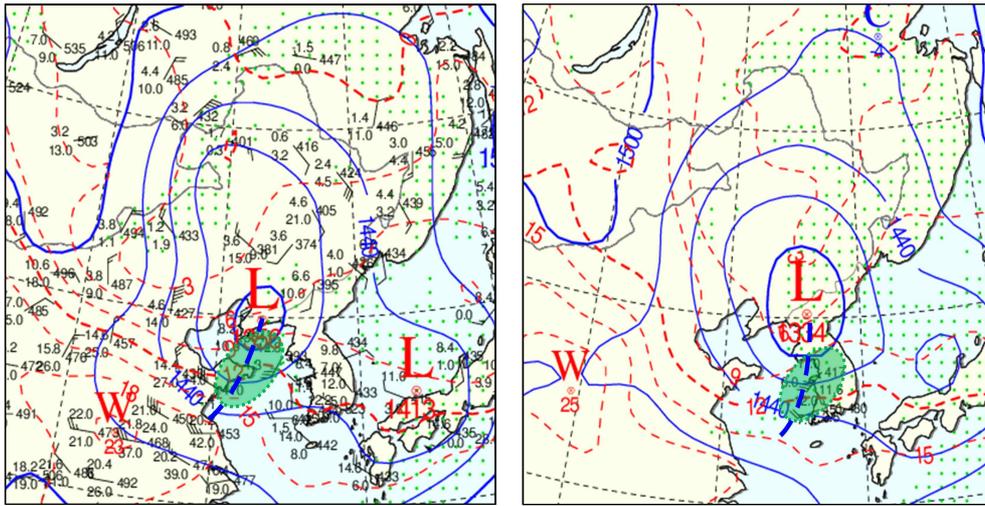


그림 22. 850hPa 일기도(2017.05.13) (좌) 09시, (우) 15시

### 2.1.3 700hPa 일기도

대기 중층인 700hPa 일기도에서도 기압골은 상층과 비슷한 위상을 가지고 우리나라로 접근하면서 09시에는 온난이류, 15시에는 등온선 0°C가 남하하면서 온난이류에서 한랭이류로 바뀌고 있어 지상의 한랭 전선을 강화시키는 역할을 하고 있다.(그림 23)

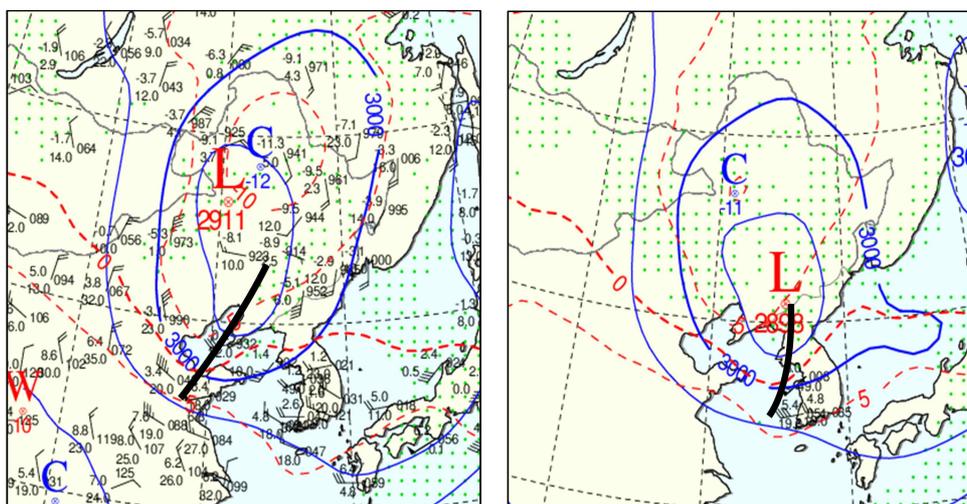


그림 23. 700hPa 일기도(2017.05.13) (좌) 09시, (우) 15시

### 2.1.4 300hPa, 500hPa 일기도

300hPa에서 우리나라를 중심으로 상층골의 전면에서 북한에서 만주까지 형성된 Jet의 입구에 위치하고, 기압골의 후면으로 중국 산둥반도를 거쳐 우리나라 서해상으로 제트류가 유입되어 출구가 위치하면서 중부지역을 중심으로 발산장이 형성되고 상승류가 강화되고 있다.

500hPa의 기압골은 300hPa과 위상차가 거의 없고 몽골 동쪽에 중심을 둔  $-30^{\circ}\text{C}$ 의 한핵으로부터 북서류를 타고 한기가 강하게 남하하고 있어 지상 기압골을 강화시키고 있다. 또한, 경북지방을 중심으로 기온이 500hPa는  $-15^{\circ}\text{C}$ , 지상은  $27^{\circ}\text{C}$ 로 상하층 기온차가  $40^{\circ}\text{C}$  이상으로 대기가 매우 불안정한 상태를 보여주고 있다.(그림 24)

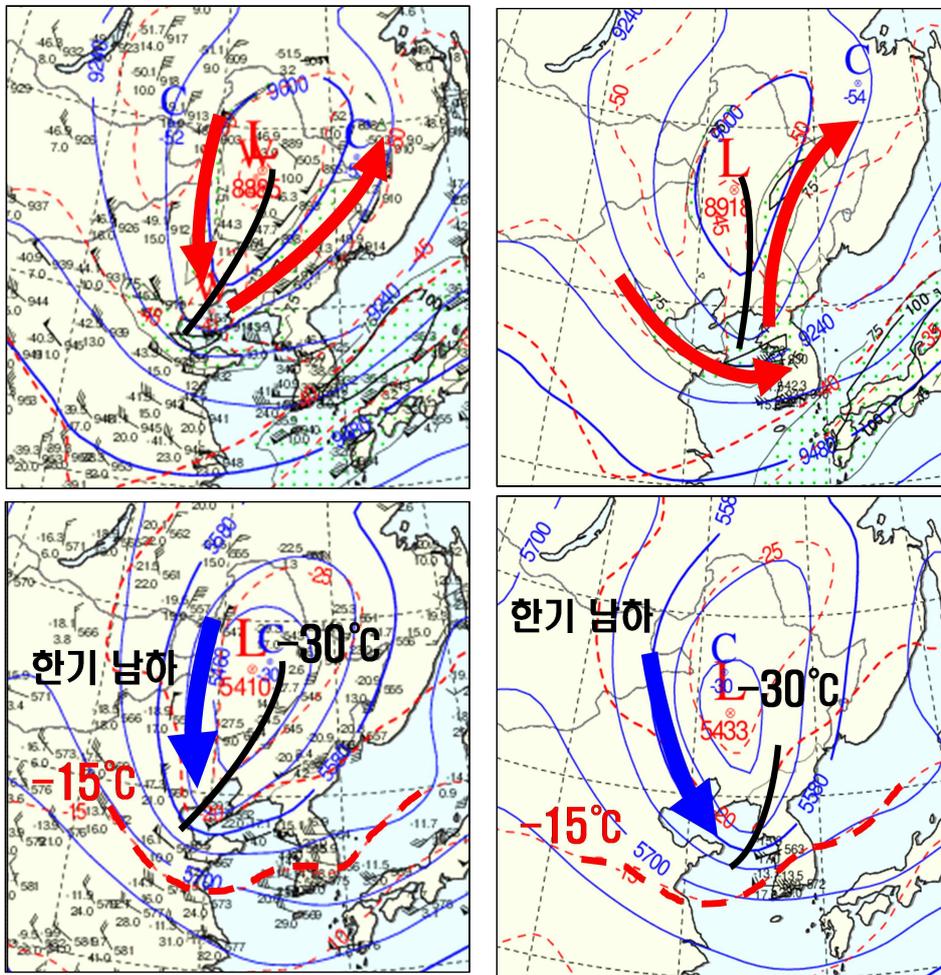


그림 24. (위) 300hPa 일기도, (아래) 500hPa 일기도(2017.05.13)  
(좌) 09시, (우) 15시

### 2.1.4 단열선도(포항)

850hPa에서 350hPa 사이에서 조건부불안정 상태를 보여주고 있으며, 15시에는 하층부터 중층까지 바람방향이 순전하면서 강한 온난이류를 보이고 있다.

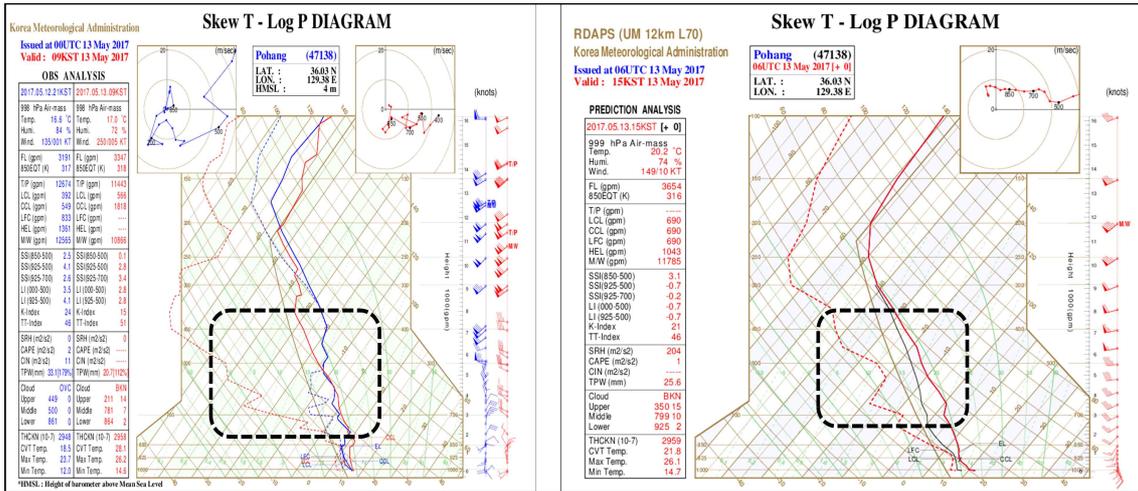


그림 25. 포항 단열선도(2017.05.13) (좌) 09시, (우) 15시 예상

### 2.1.4 현황분석

경북북부를 중심으로 수비(영양) 11.5mm, 안동 9.3mm, 석포(봉화) 6.0mm 등 5~10mm의 강수 분포를 보였으며, 일부 지역에는 낙뢰를 동반한 직경 1~2cm의 우박이 내렸다.(그림 26)

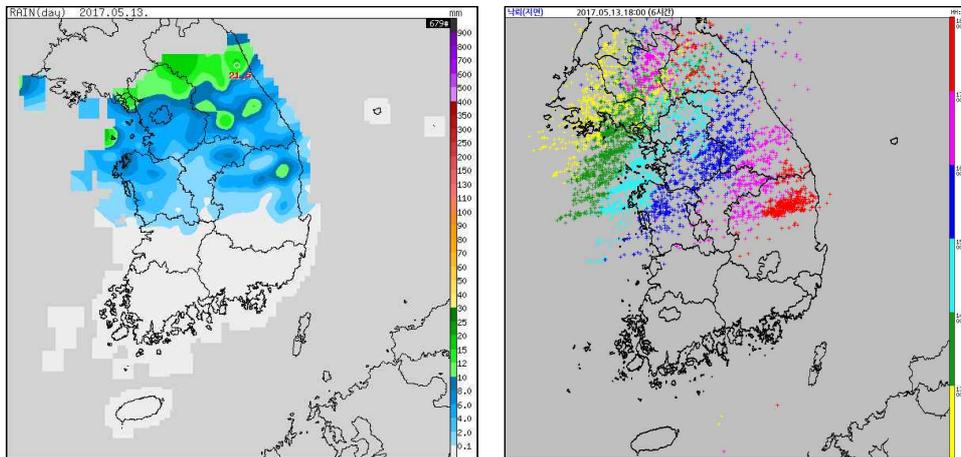


그림 26. (좌) 일강수량 분포(2017.5.13.), (우) 낙뢰분포(6시간 누적)

### 2.1.5 원격관측(레이더, 위성)

그림 27과 그림 28의 2017년 5월 13일 15시에는 한랭전선에 동반된 강수밴드가 서울.경기도를 중심으로 영향을 주고 있으며, 16시에는 충북지역에 영향을 주면서 경북서부지역으로 접근하고 있다. 수증기 위성영상에서도 한랭전선 후면으로 강한 건조역이 남동진하면서 전면 대류운을 강화시키고 있다. 16시 이후부터 17시까지 경북북부를 중심으로 강수대가 영향을 주면서, 안동지역 부근으로 시간당 100mm의 강한 레이더 반사도를 보여주고 있으나, 수증기 위성영상에서는 전 시간에 비해 대류 밴드의 구조가 약해지거나 소산 되는 경향을 보여주고 있다.

17시 20분에는 안동 동쪽지역을 중심으로 시간당 100mm 이상의 매우 강한 반사도를 보이는 영역이 넓어지고 있으며, 수증기 영상에서도 밝은 영역이 강화되면서 강한 대류에 의한 상승류를 보여주고 있다.

같은 시각의 소백산맥 풍하측에 위치한 영주에서 10분 평균 풍속 W 6.4m/s로 1시간 전에 비해 약 2배 이상이 증가했고, 풍상측의 단양(SSE 2.0m/s)에 비해 3배 이상의 풍속이 증가함을 보였다. 또한, 풍상측의 풍향은 SW~W, 풍하측의 풍향은 NW로 저기압성 곡률 흐름을 보이고 있으며, 레이더 영상에서도 풍하 사면의 강풍 역 전면에서 수렴역을 중심으로 강한 반사도를 가진 에코가 발달함을 보였고, 수증기 영상에서도 급격히 발달하는 대류운을 탐지(17시 15분)하고 있다. 이는 소백산맥을 넘을 때 발생하는 풍하저기압(Lee side cyclone) 발달로 분석된다.(그림 29)

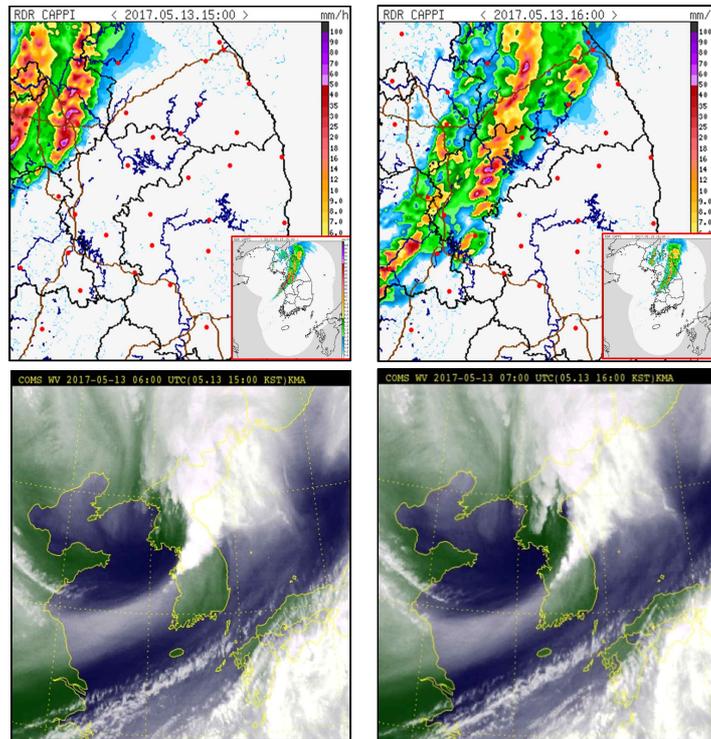


그림 27. 레이더/위성영상(2017.5.13.) (좌) 15시, (우) 16시

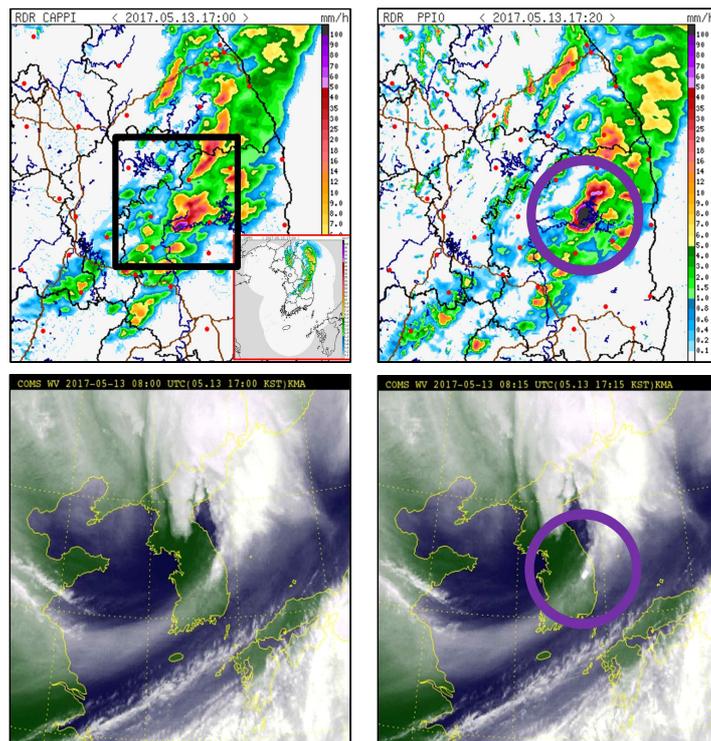


그림 28. 레이더/위성영상(2017.5.13.) (좌) 17시, (우) 17시 20분

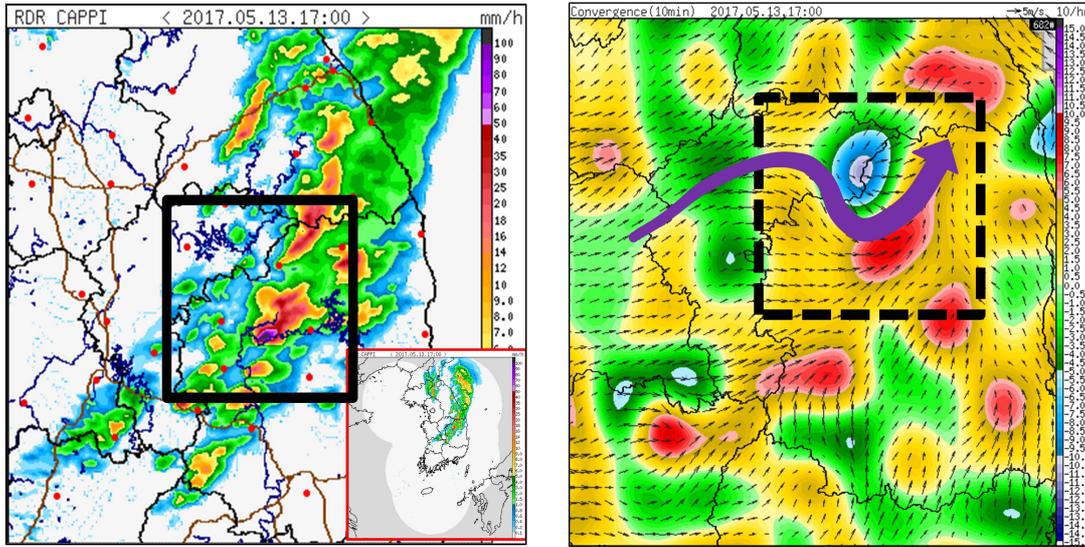


그림 29. 2017.5.13. 17시 (좌) 레이더영상, (우) AWS 바람장/수렴

그림 30에서는 대류계가 소백산맥 풍하측으로 진행하면서 강화되는 과정을 MCS의 경로를 따라 레이더 영상을 10분 간격으로 연직단면을 분석한 결과 16시 20분에는 소백산맥을 축으로 정상 부근과 풍하측에서 매우 강하게 발달하는 경향을 보였다(그림 5).

이후 대류계가 이동하면서 풍하측에서 발달한 후 50분이 경과 한 17시 00분에 2차로 매우 강하게 발달하는 현상을 보였고 10분 뒤(17시 10분)에는 시간당 100mm 이상의 강한 강도를 보여 직경 2.0cm의 우박이 내리기도 했다. 이 지역은 소백산맥 풍하 사면에서 60~80km 떨어진 위치로, 앞서 이론적 배경에서 설명한 풍하측 파장과 지형간의 상호작용으로 설명될 수 있다.

이 시각(17시 10분)의 레이더 입체 구조를 살펴보면 운정고도 18km로 매우 높게 발달했고, 대류 셀의 이동 방향 전면의 상승(습윤)역과 후면의 하강(건조)역의 분리로 지속적인 대류 셀의 발달을 유도할 수 있었다. 또한, 우박이 내릴 때의 특징인 Hail Spike를 보여주어 매우 강한 대류운으로 발달했음을 알 수 있다.(그림 31)

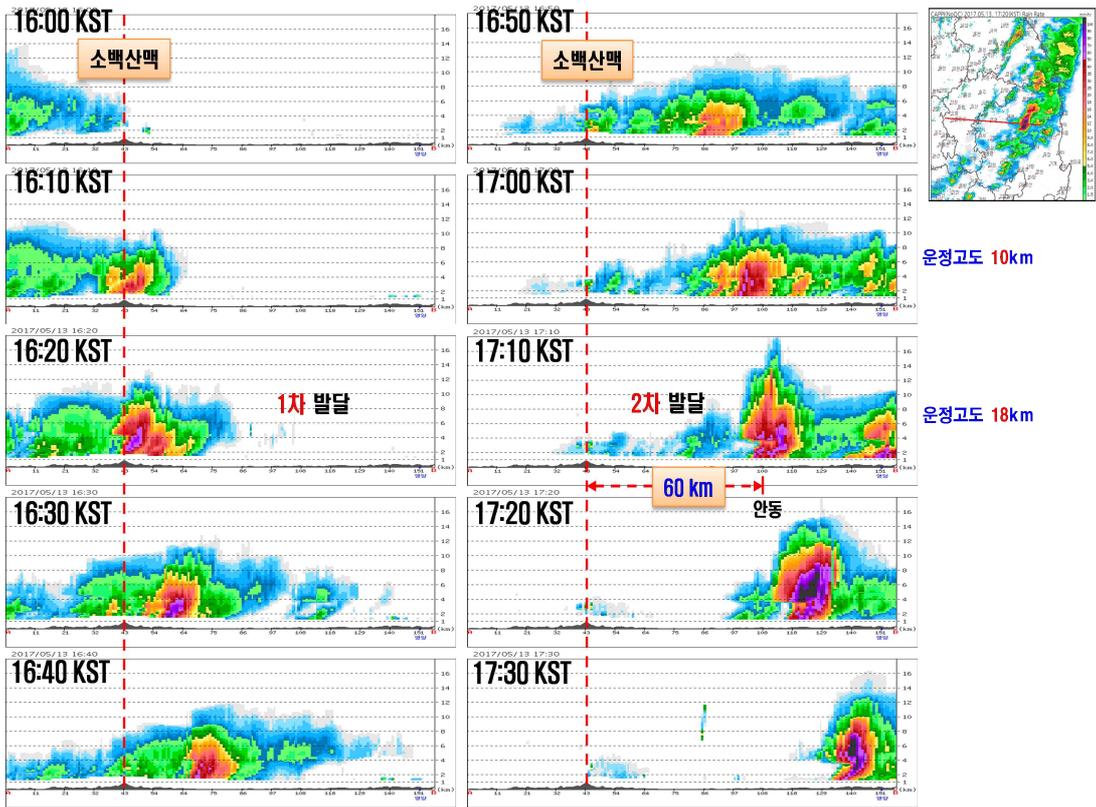


그림 30. 레이더 연직단면(2017.05.13., 에코 진행방향, 10분 단위)

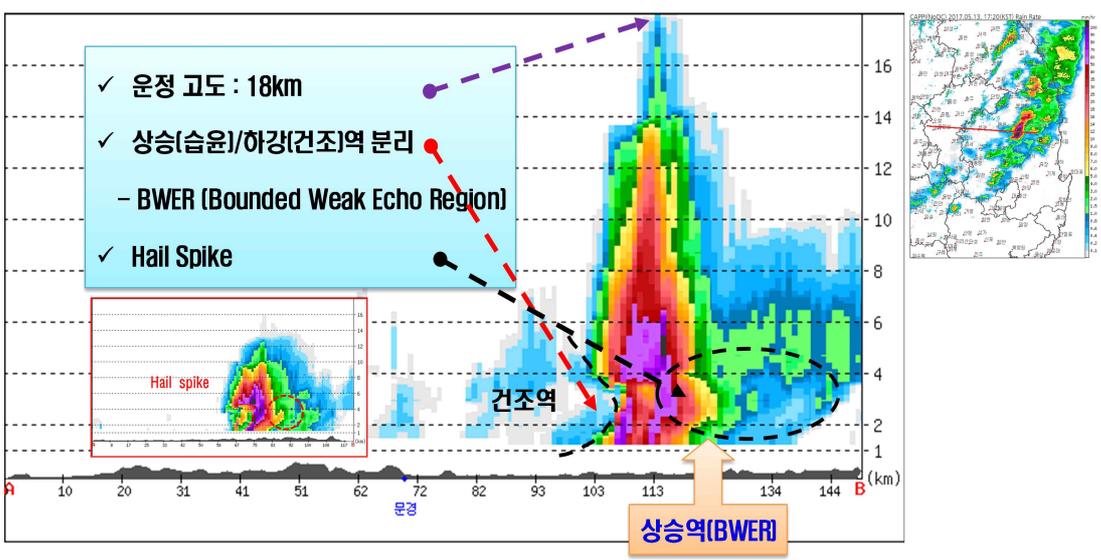


그림 31. 레이더 에코 연직단면 구조 분석(2017.05.13. 17:10)

### 2.1.6 수치모델 보조자료

연직 온위분포와 연직 속도를 살펴보면 그림 32의 풍하측에서 온위 값이 크게 증가하는 구간이 보인다. 이는 소백산맥 정상을 넘는 공기가 등온위 면을 따라 지표 부근으로 빠르게 강하하고 이는 위치에너지가 운동에너지로 바뀌면서 풍하 사면의 풍속이 강화되는 결과로 이어진다. 또한 온위의 증가 구역을 경계로 후면에는 하강역, 전면에는 강한 상승역이 형성되어 풍하측 대류계의 진행방향을 따라 대류불안정에 의한 중규모대류시스템(MCS)의 발달이 예상된다.(그림 33)

그림 34의 연직 온위 값의 변화와 연직속도를 살펴보면, 풍하측에서 온위 값의 상승구간 중 시간 변화량이 큰 구역의 전면에서 매우 강한 상승기류가 형성됨을 알 수 있다. 이 상황을 입체적으로 살펴보면 18시에 소백산맥을 중심으로 풍상측(북서쪽)의 하강류와 풍하측(남동쪽) 강한 상승류를 대조적으로 잘 보여준다.(그림 35)

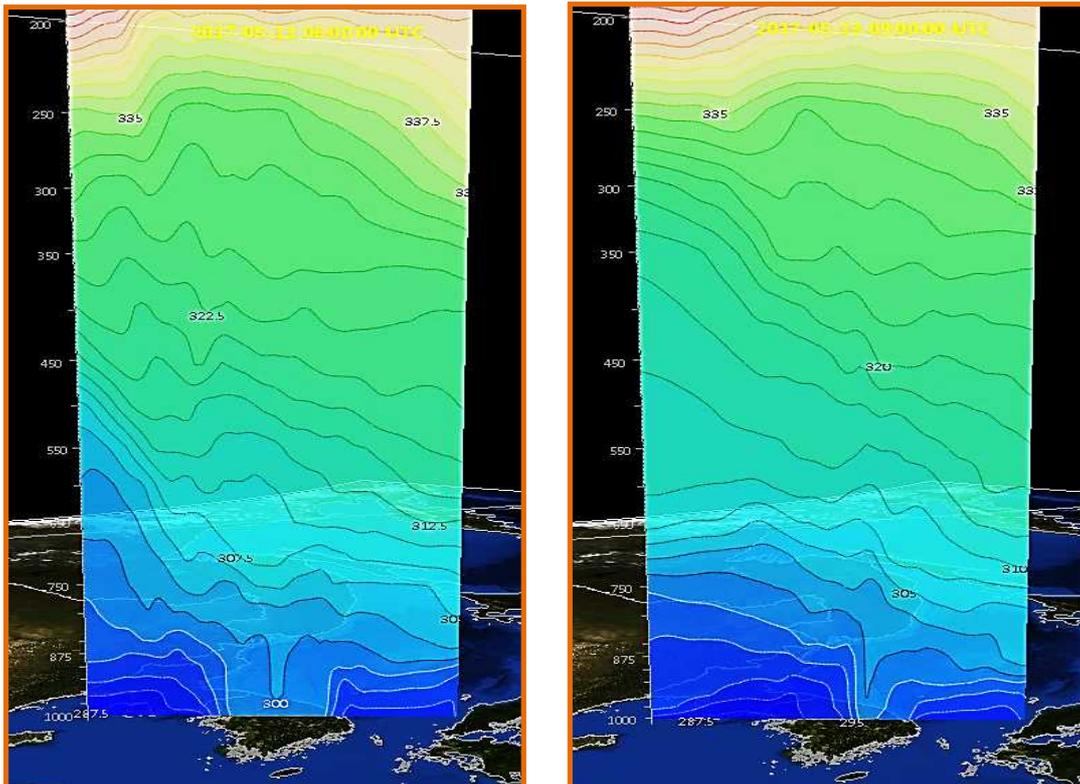


그림 32. 연직 온위분포(2017. 5. 13.) (좌) 15시, (우) 18시

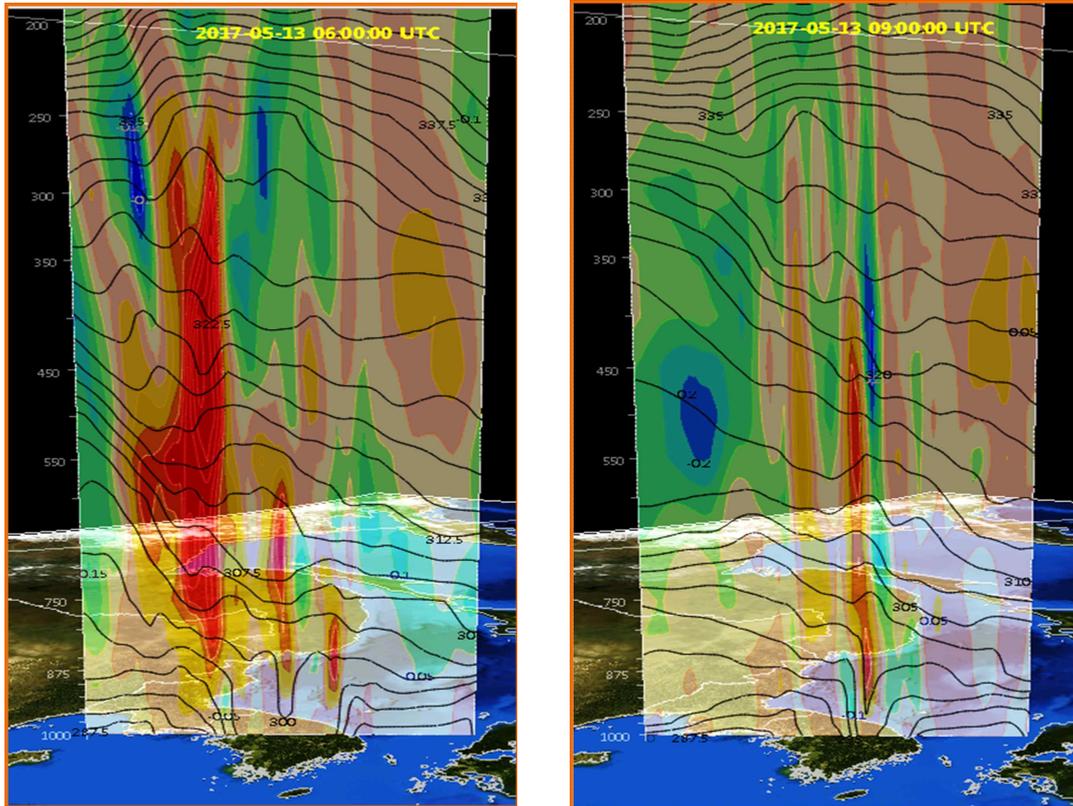


그림 33. 연직 온위분포와 연직속도(2017.05.13.) (좌) 15시, (우) 18시, 온위(검은색 선), 파란색(하강류), 붉은색(상승류)

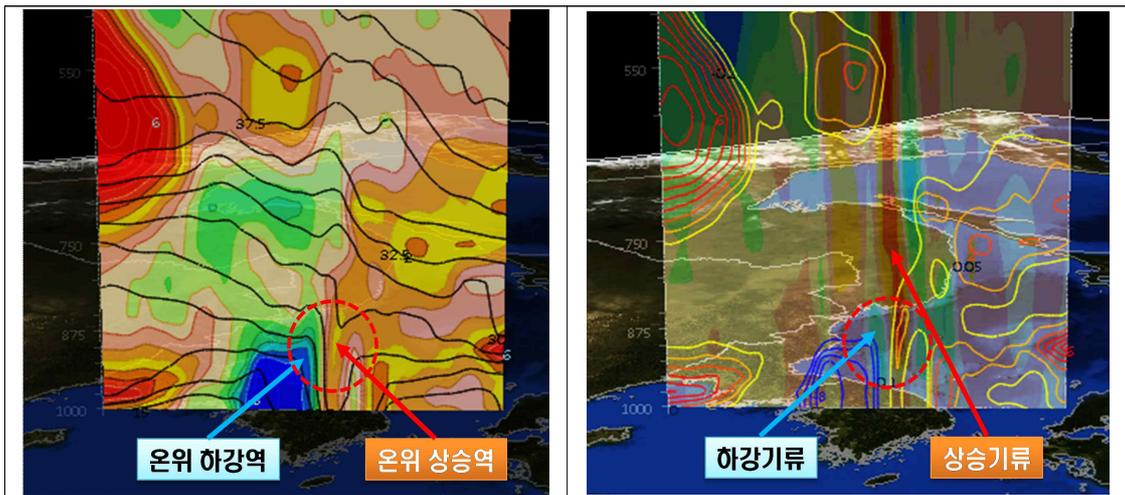


그림 34. (좌) 연직 온위 분포와 시간변화량, (우) 온위 시간변화량과 연직속도(2017.5.13. 18시)

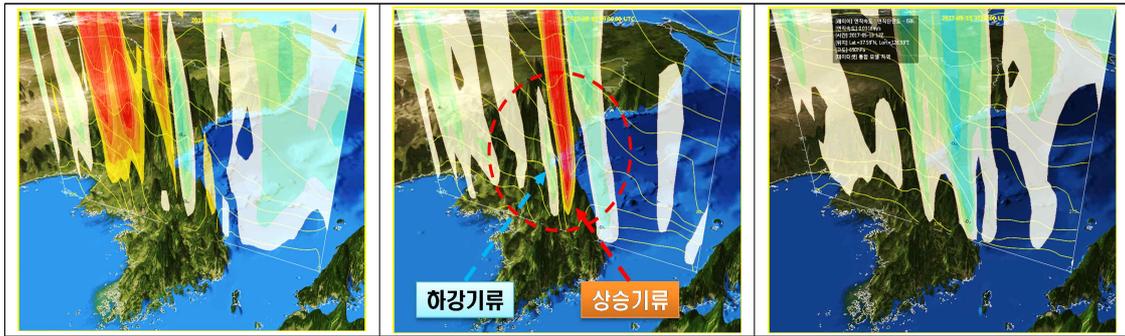


그림 35. 연직 온위 분포와 상승속도(입체지형도, 2017.05.13.)  
(좌) 15시, (중앙) 18시, (우) 21시

그림 36의 상당온위 분포를 살펴보면 15시에는 고상당온위역이 남해 서부해상에서 우리나라 내륙으로 유입되고, 6시간 동안 상당온위 변화 경향은 우리나라 중부지방을 중심으로 높아지는 경향, 서해안은 낮아지는 경향을 보이고 있고, 18시에는 경북지역으로 고 상당온위가 위치한 가운데 서해중부해상에서 우리나라 내륙으로 저 상당온위 역이 접근, 충북과 경북을 경계로 상당온위 변화 경향이 크게 낮아짐에 따라 한난의 경계가 소백산맥을 중심으로 형성되어 있다.

또한, 상당온위 연직 분포에서는 소백산맥 풍하측인 남동쪽에서 하층 상당온위가 높아지고, 그 북서쪽(풍상측) 상층으로부터 저 상당온위(붉은색 선)가 유입되고 있어 그 전면으로 강한 상승류가 형성될 것으로 예상된다.

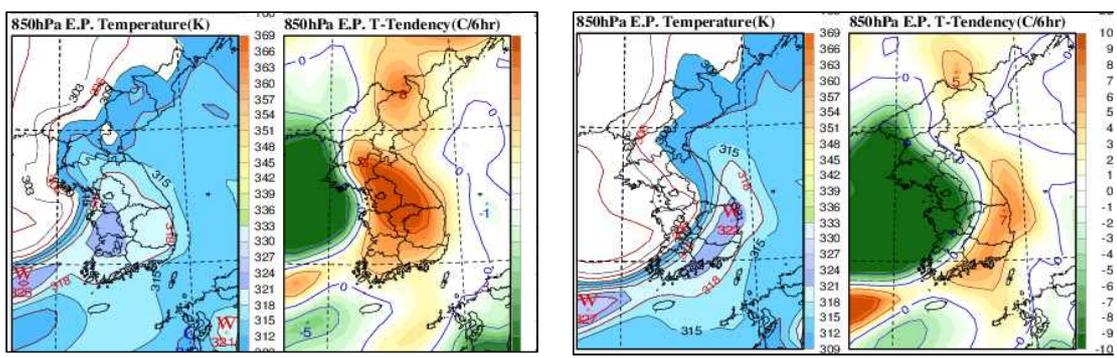


그림 36. 상당온위 및 상당온위 변화 경향(°C/6hr) (좌) 15시, (우) 18시

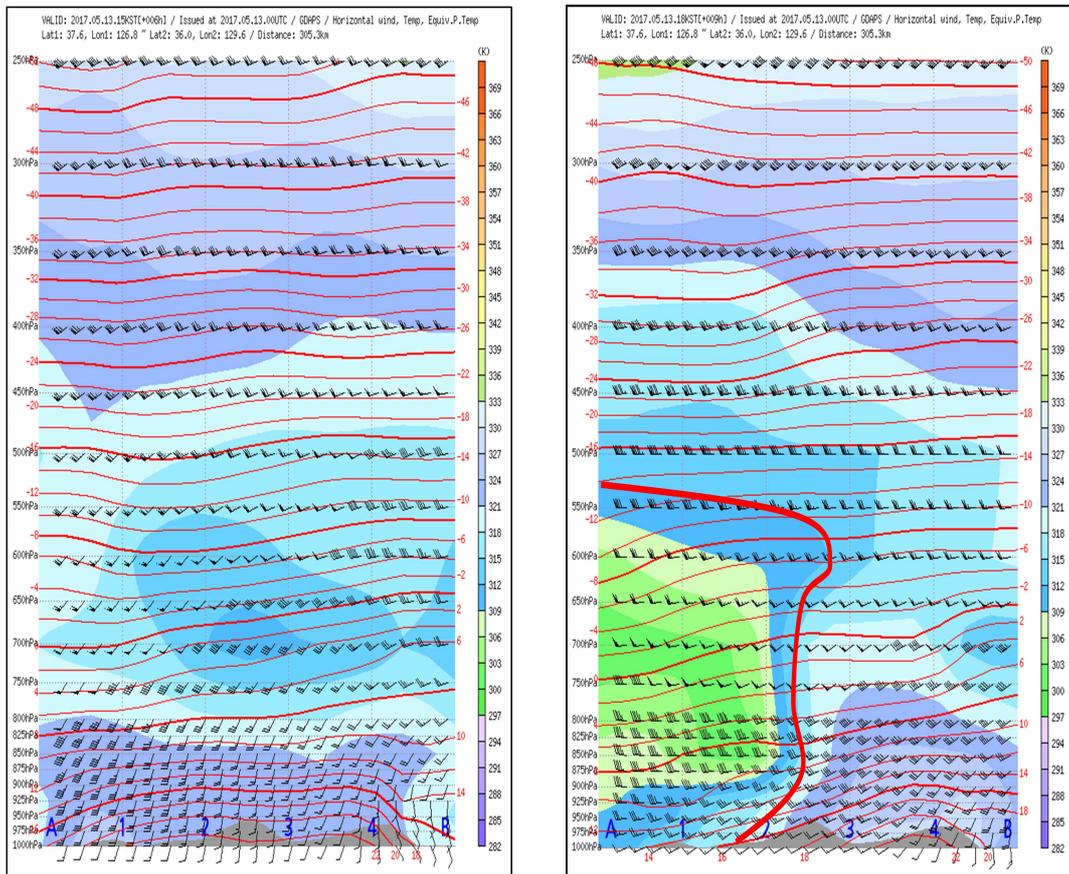


그림 37. 상당운위 연직 분포. (좌) 15시, (우) 18시

그림 37의 상승류의 연직 분포에서 18시에 소백산맥 풍하측으로 상승류가 있으며, 하강류는 상승구역의 북서쪽 상층에 위치하여 상하연직 운동이 원활할 것으로 예상된다. 또한, 풍속의 연직 분포에서는 소백산맥 북서쪽(풍상측)에 상층 강풍역이 위치하면서 원활하게 북서류가 소백산맥을 넘는 흐름을 예상할 수 있다.(그림 38)

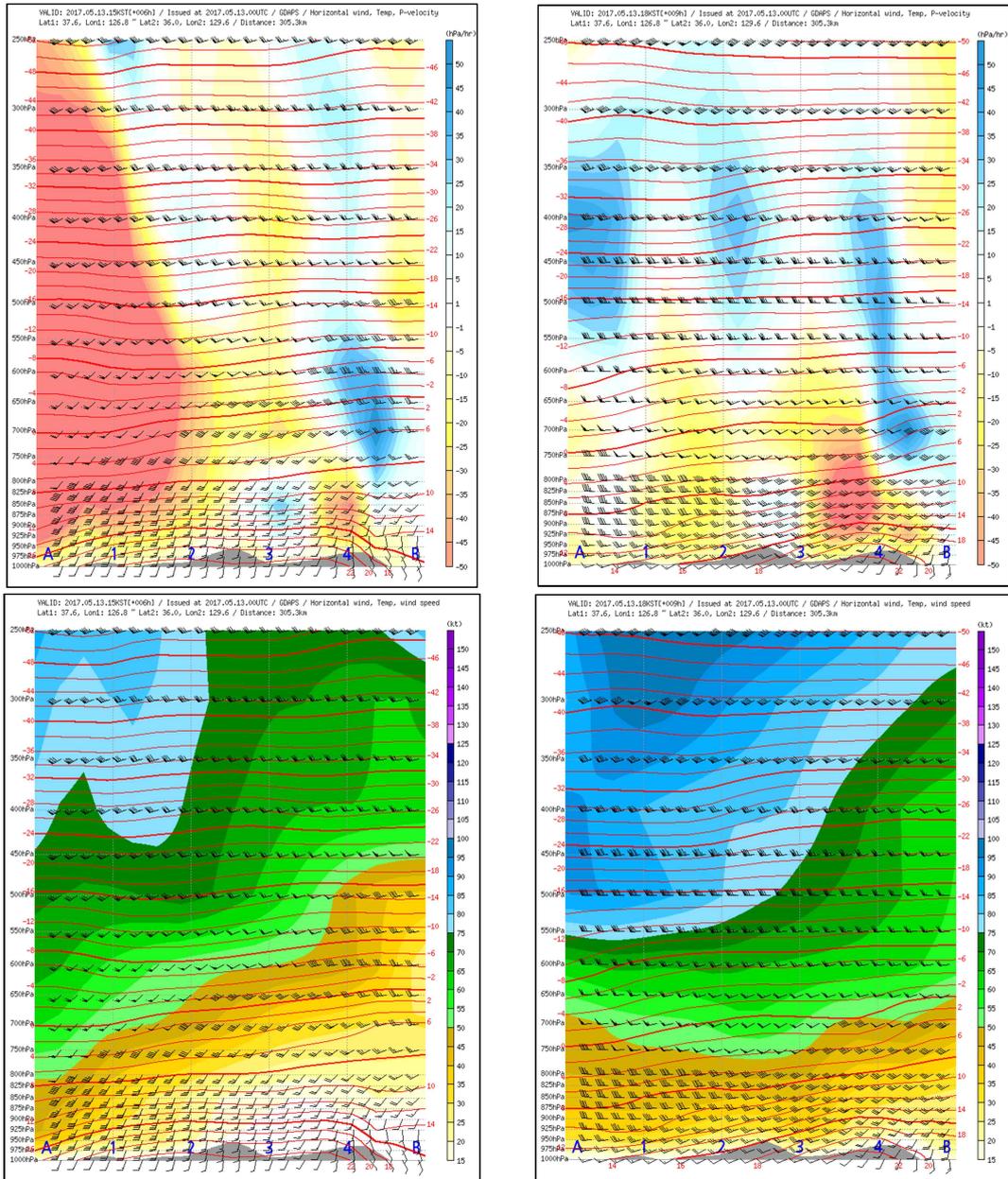


그림 38. (위) 연직 상승, (아래) 연직 풍속, (좌) 15시, (우) 18시

## 2.2 풍하측에서 발달하는 사례(2017년 6월 1일)

이번 분석은 소백산맥의 풍하측에서 중규모대류시스템이 발달하는 사례 중 위 사례(2017년 5월 13일)과 비슷한 경로를 보인 6월 1일 사례를 분석하였다. 이날 상·하층에서 우리나라 북쪽의 저기압이 남하하고 북쪽의 차고 건조한 공기가 남하하고 있으며, 상대적으로 남쪽에는

난기가 유입되면서 한난의 경계역을 중심으로 온도경도가 커지고 차차 불안정이 강화될 것으로 예상하였다. 경북지역에는 소나기와 돌풍, 천둥.번개, 우박의 가능성 높다고 판단했다.

### 2.2.1 지상 및 850hPa 일기도

우리나라 동해상에 중심을 둔 지상의 저기압은 동남동진하면서 남하하고 있으며, 850hPa의 -12℃선은 09시에는 북한, 15시에는 동해북부 해상에 위치하고, 그 남쪽은 온도 능에 들어 있어 강원남부와 경북북부지역을 중심으로 온도경도가 커지고 불안정이 강화되는 경향을 보여 주고 있다.(그림 39)

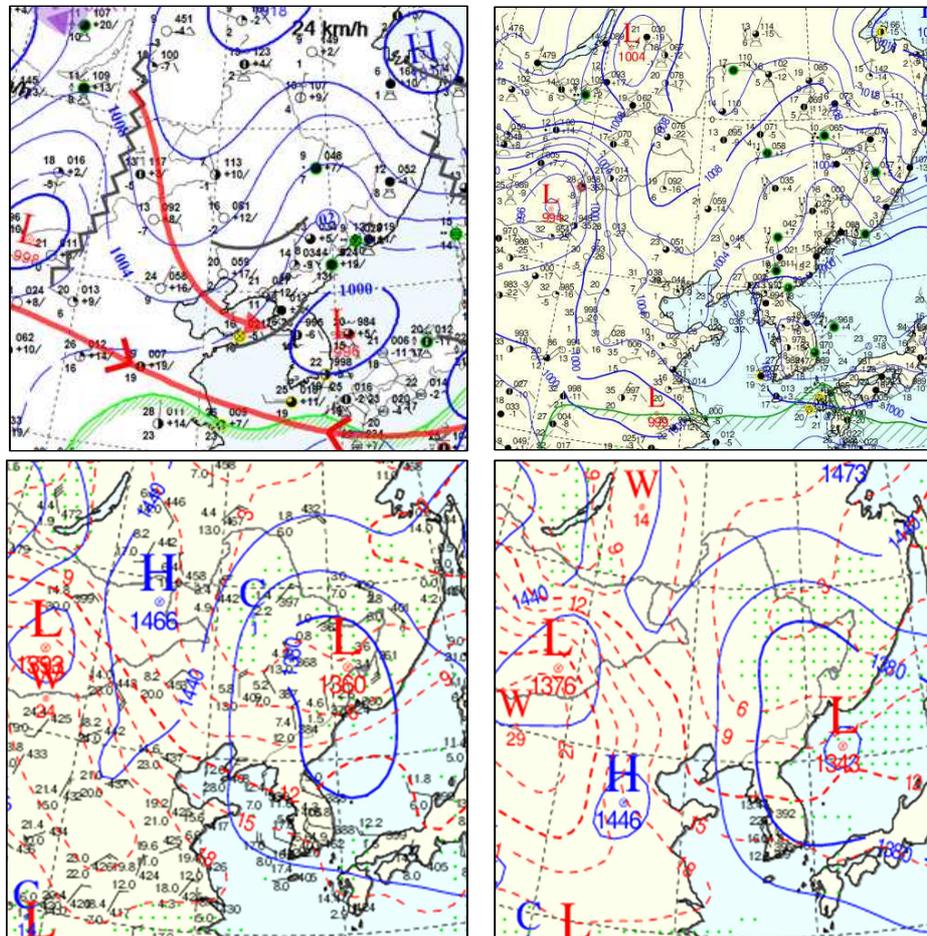


그림 39. (위) 지상일기도 (아래) 850hPa 일기도(2017.06.01.)  
(좌) 09시, (우) 15시

### 2.2.2 상층(500hPa, 300hPa) 일기도

500hPa의  $-28^{\circ}\text{C}$ 의 한핵을 동반한 절리저기압에 동반된 기압골은 회전하면서 남하하고 있어, 지상 저기압을 강화시키고 있으며,  $-15^{\circ}\text{C}$  선이 중부에서 남해안까지 빠르게 남하하는 경향을 보여주고 있어, 상하층의 기온차가  $45^{\circ}\text{C}$  이상(500hPa  $-15^{\circ}\text{C}$ , 지상  $30^{\circ}\text{C}$ )으로 커 대기 불안정이 강화되고 있다. 300hPa의 상층 Jet는 몽골 동쪽에서 발해만까지 남하하고 있고, Jet 출구 왼쪽에 위치한 중부지방은 발산장이 위치함에 따라 상승류가 강해지고 하층 저기압을 강화시키고 있다.(그림 40)

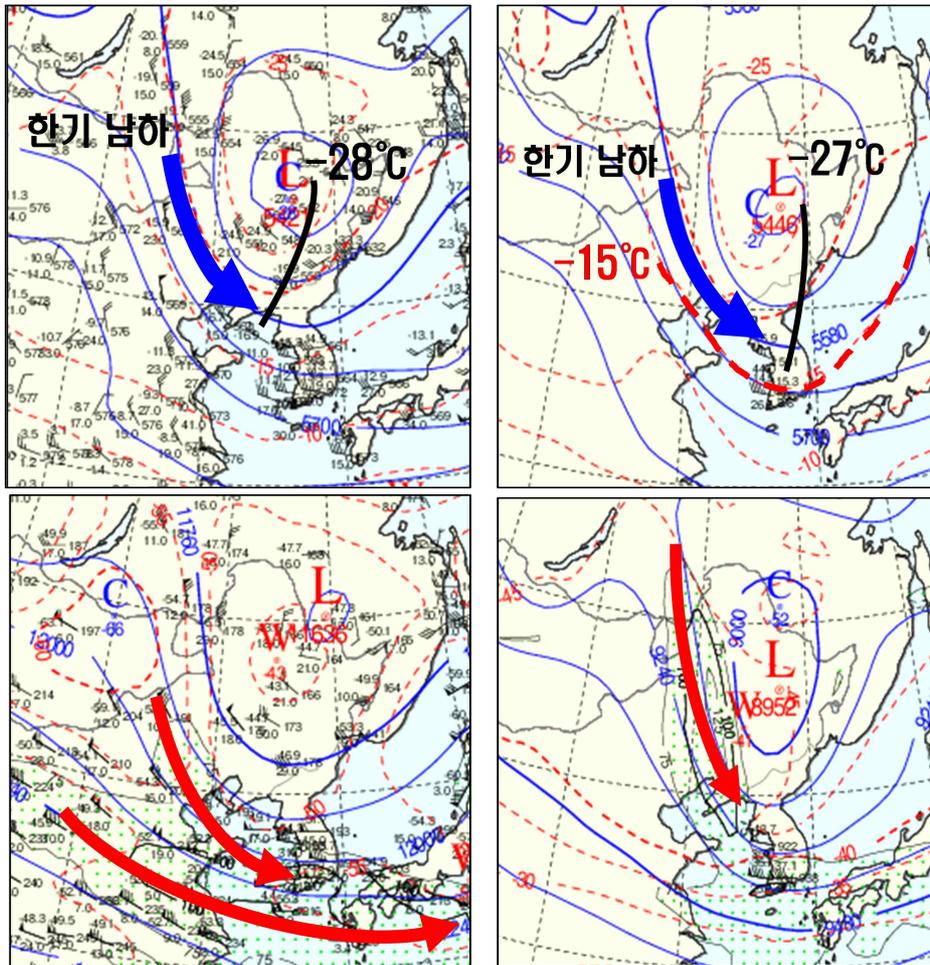


그림 40. (위) 500hPa 일기도, (아래) 300hPa 일기도(2017.06.01.)  
(좌) 09시, (우) 15시

### 2.2.3 단열선도(포항)

그림 41의 850hPa에서 350hPa 사이에서 조건부불안정 상태를 보여주고 있으며, 15시에는 CAPE(대류가용잠재에너지)가 1089로 높았으며, 하층(지상~850hPa)에는 바람 방향이 순전하면서 온난 이류, 중층(700~500hPa)에는 한랭 이류가 나타나고 있어 상하층의 온도경도가 커짐에 따라 연직 불안정이 강화되고 있다.

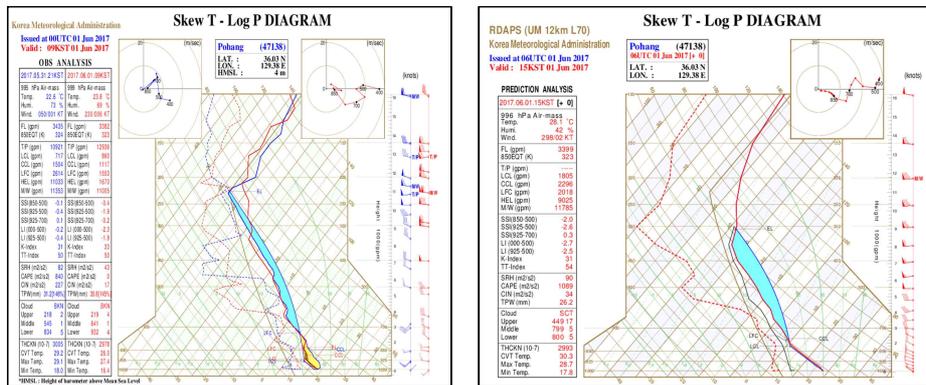


그림 41. 포항 단열선도 (좌) 2017.6.1. 09시, (우) 2017.6.1. 15시 예상

### 2.1.4 실태분석

발달한 대류계가 소백산맥 풍하측으로 이동 후 풍하 사면에 위치한 영주지역에 10분 평균 풍속 NNW 9.0m/s의 강풍이 불고, 그 전면에서 강한 수렴역을 형성하여 대기 불안정이 강화되면서 경북북부를 중심으로 온정(울진) 32.5mm, 수비(영양) 25.0mm, 부석(영주) 16.5mm 등 5~30mm의 강수 분포를 보였고, 낙뢰를 동반한 직경 1.5~3.0cm, 최대 5.0cm의 우박이 내렸다. (그림 42, 43)

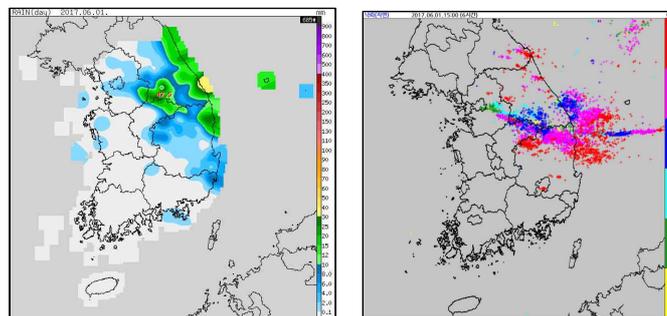


그림 42. (좌) 일강수량(2017.06.01.), (우) 낙뢰(6시간 누적, 15시)

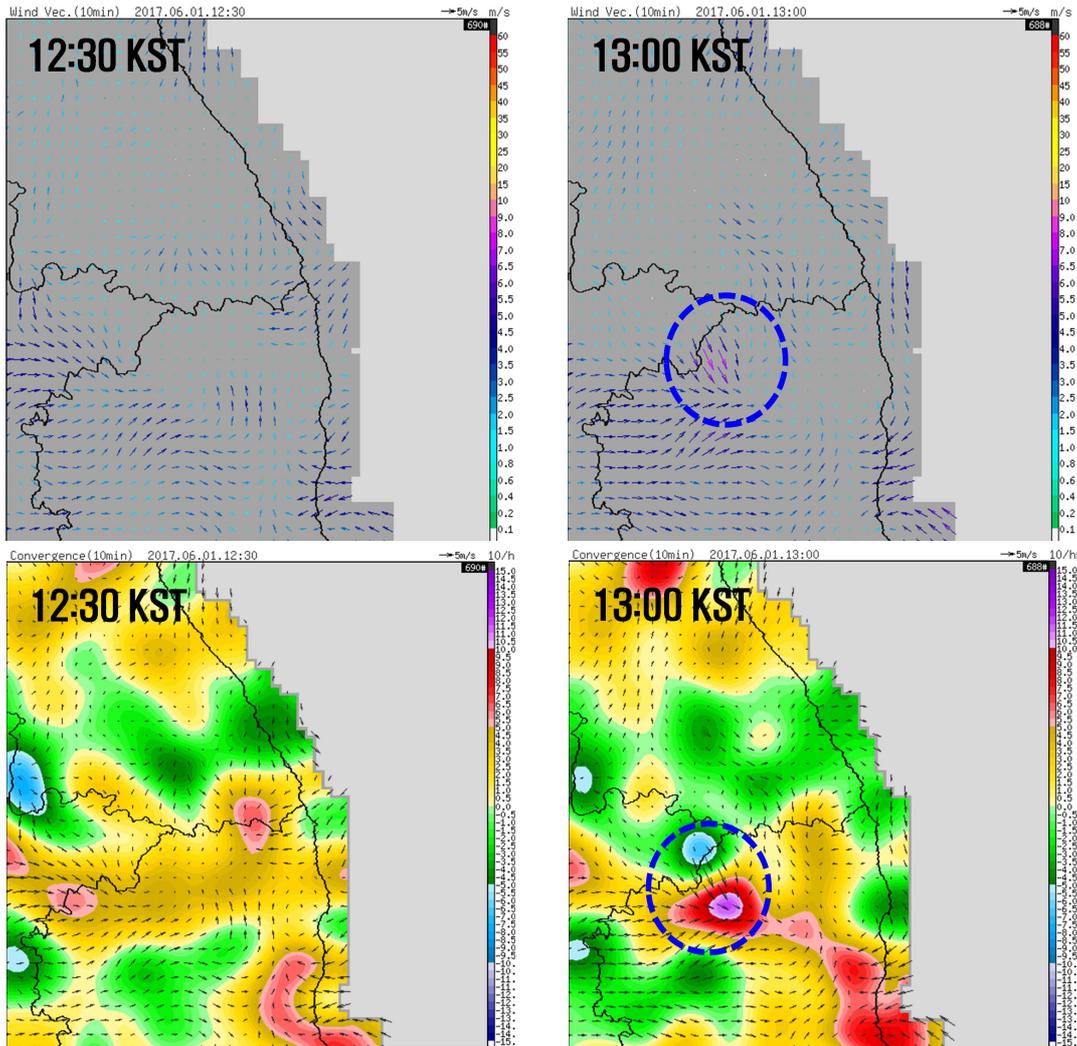


그림 43. (위) AWS 바람장, (아래) AWS 바람 및 수렴도

### 2.2.5 원격관측(레이더)

6월 1일 12시부터 충북북부에서 남동진하는 강수계는 20분 후에는 경북도 경계를 넘어 영주지역까지 영향을 주면서 시간당 100mm 이상의 강도를 보이고 있다.(그림 44)

이는 풍상측인 충북지역의 강수 에코 강도보다 더욱 강해졌음을 보여 주고, 이동 또한 소백산맥을 전후해서 빨라졌음을 알 수 있다. 12시 40분경에는 대류 세포가 더욱 강하고 넓게 발달하면서 14시를 전후로 경북북부동해안(영덕)까지 영향을 주고 있다.

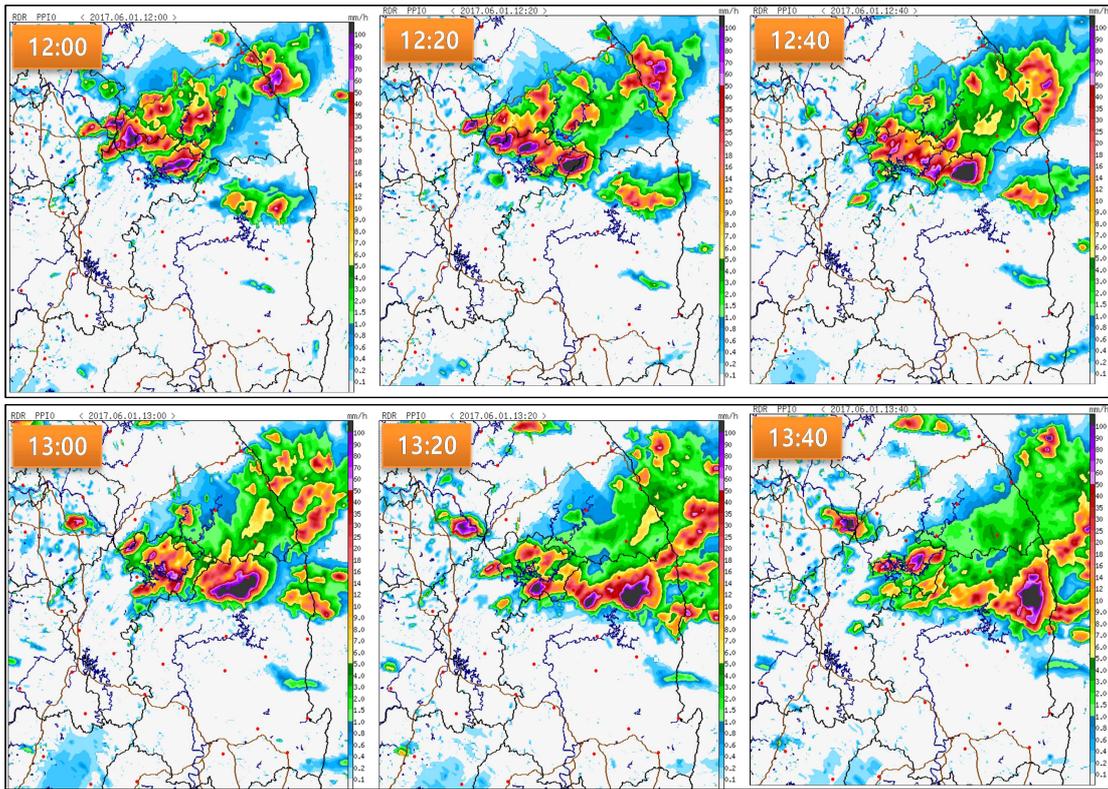


그림 44. 레이더 영상(12:00~13:40, 20분 단위)

레이더 영상의 연직단면을 분석(그림 45)한 결과 소백산맥의 풍상측에서 산 정상으로 접근하면서 발달하고 있으며, 풍하측에서는 매우 강하게 발달함을 알 수 있다. 특히, 풍하측으로 이동한 12시 30분~40분에는 강한 대류운의 낮은 고도 후면으로 반사도 강도가 약한(녹색) 구역이 나타나는데 이는 풍하 사면으로부터 불어 내려오는 건조한 하강류로 분석된다. 이 풍하측 건조역이 침강함에 따라 시간당 최대강도(100mm)의 대류 깊이는 10.5km로 산 정상에 위치할 때의 9km보다 더욱 깊어지고 있다.(그림 46)

따라서, 풍하측의 하강류는 전면의 대류 시스템을 더욱 강화시키는 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 이후(12시 50분)에는 대류계 전면의 상승역과 후면의 하강역이 분리되면서 대류 시스템은 지속적으로 발달하면서 이동하는 것으로 분석된다.

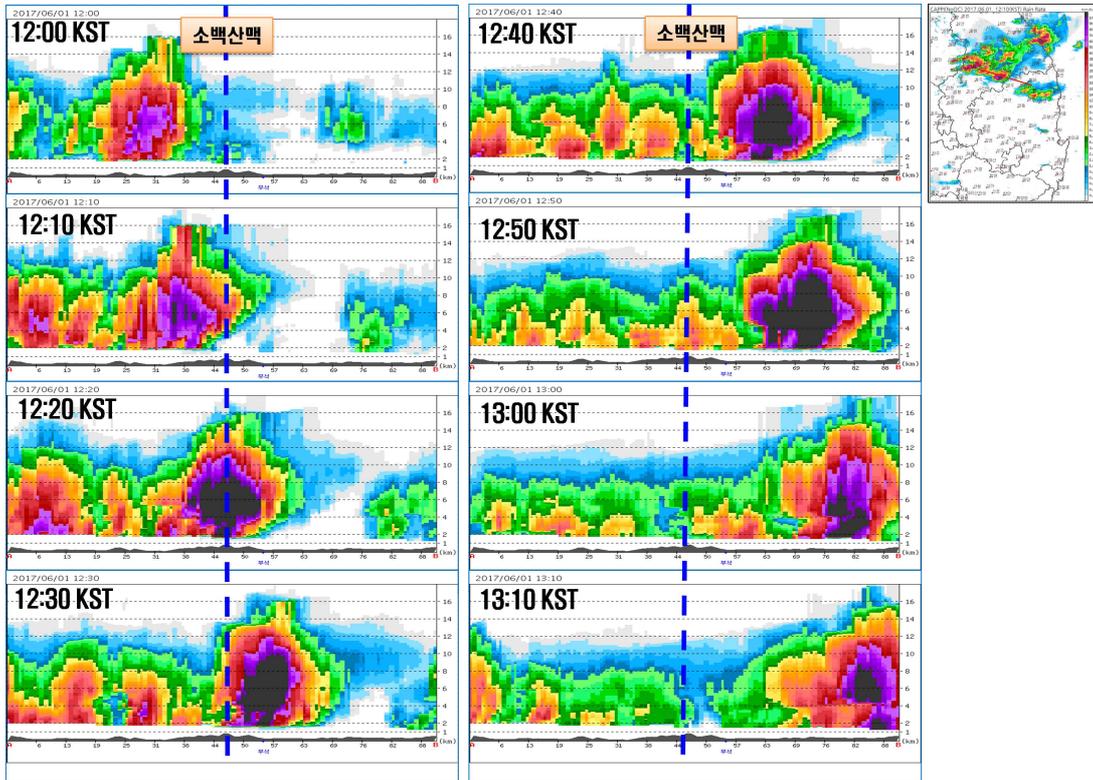


그림 45. 레이더 연직단면(에코 진행방향, 12:00~13:10, 10분 단위)

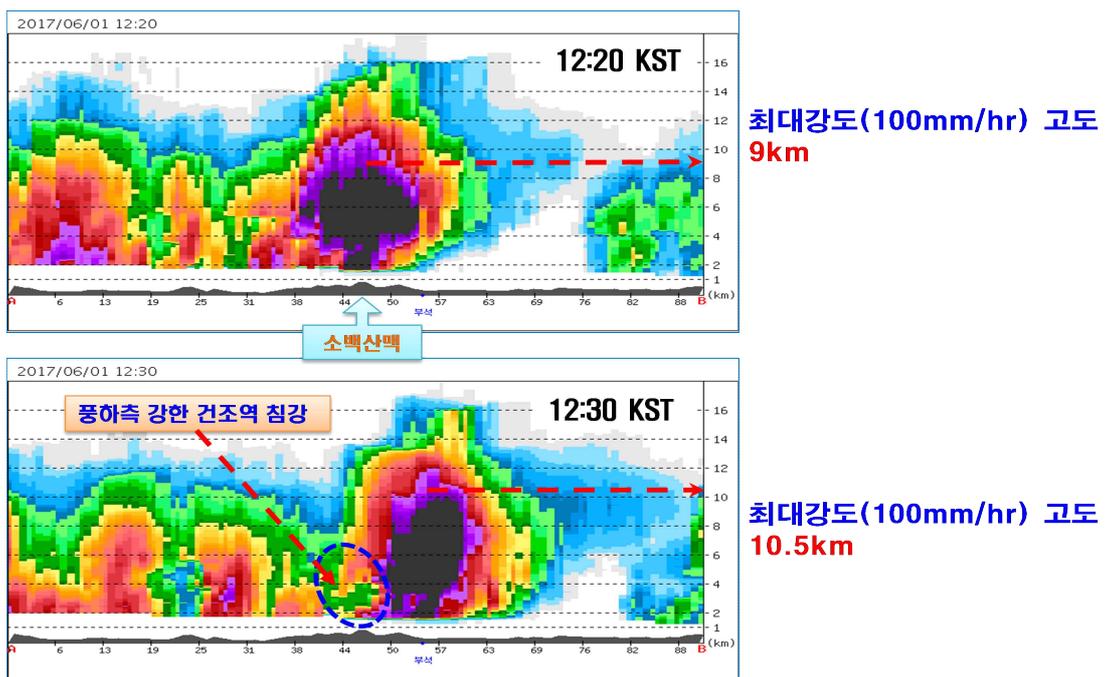


그림 46. 레이더 연직단면(12:20~12:30)

한편, 최대 강우 강도를 객관적으로 분석하기 위해 기상청 레이더의 뇌우감시추적시스템의 강우 강도를 분석 한 결과 소백산맥 풍상측보다 풍하측에서 최대 6배(400mm → 2,750mm) 이상의 강우 강도가 증가함을 보였으며, 산 정상 부근의 강우 강도(1,200mm)보다도 2배 이상 증가함을 알 수 있다.(그림 47)

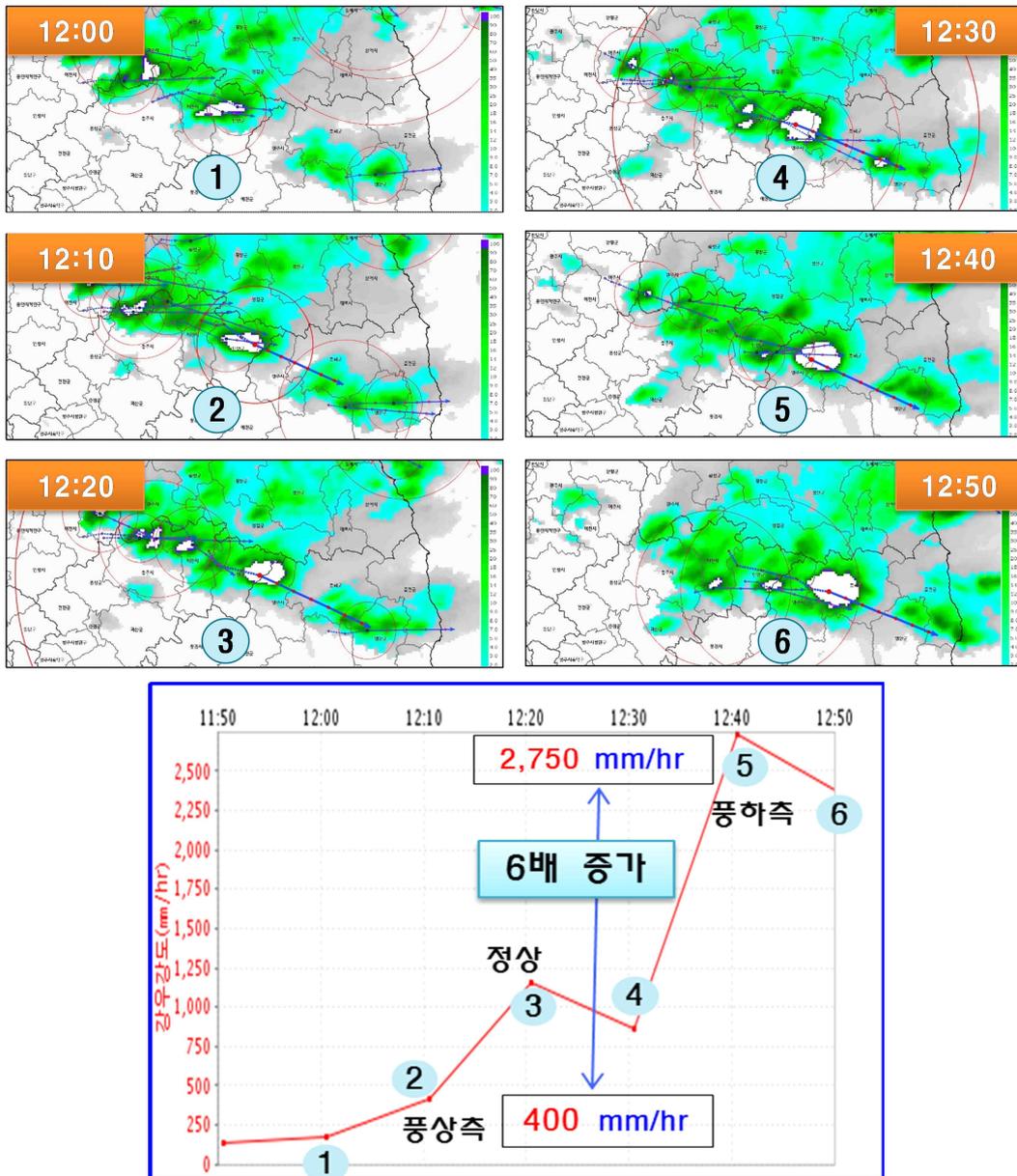


그림 47. 강우 강도(mm/hr) 분석(뇌우감시추적 시스템)

### 2.1.6 수치모델 보조자료

그림 48의 연직 온위분포와 연직 속도를 살펴보면 6월 1일 12시에 소백산맥 풍하측으로 온위가 상승(등온위 선의 하향)구간이 나타나기 시작하고, 같은 구간에서 연직 속도는 강한 하강류를 보여주고 있으며, 같은 시각 대기 하층(925hPa)의 바람장에서 소백산맥 풍하 사면에 위치한 영주 부근에서 강한 바람(붉은 색)을 모의하고 있다. 이는 대기의 기류가 등온위면을 따라 이동하기 때문에 소백산맥 풍하 사면에서 대기의 상층에서 하층으로의 흐름을 보여준다. 13시에는 풍하측을 중심으로 등온위의 하향과 상향의 파동이 커지고 상층부까지 전달되는 것을 잘 보여주고 있으며, 이를 물뿔(hydraulic jump) 현상으로 표현하기도 한다.

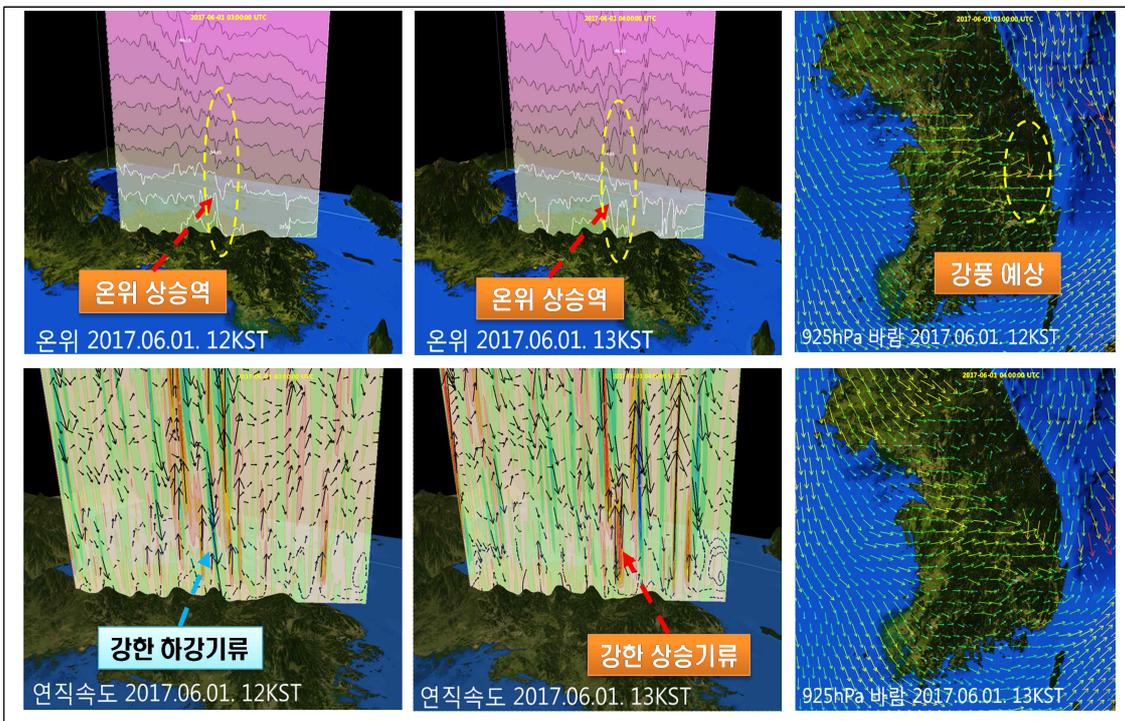


그림 48. (좌) 연직 온위분포, (중앙) 연직속도, (우) 925hPa 바람 예상

그림 49의 와도와 와도의 시간 변화량(이류)를 연직적으로 분석 한 결과 소백산맥 풍상측(산정상 부근)에서도 증가(56 E-5/s)하였지만 풍하측에서는 더 강한 양의 와도 이류(297 E-5/s)를 보이고 있으며, 이는 풍하저기압(Lee side cyclone)의 발달을 유도하는 결과를 보여준다.

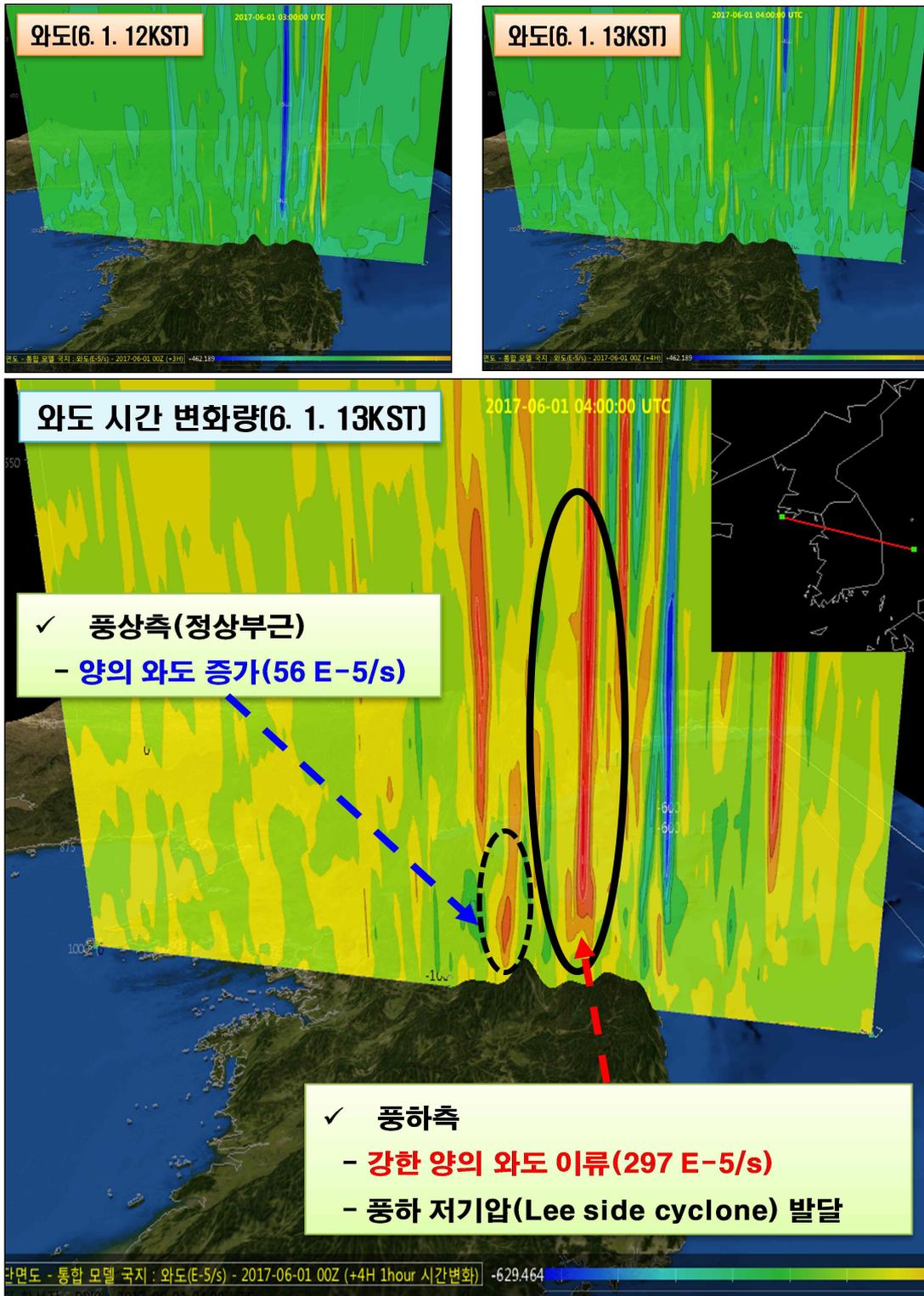


그림 49. (위) 와도 (12시, 13시), (아래) 와도 시간 변화량(13시)

산악파(Lee wave)의 영향으로 풍하측에서 풍하저기압에 의한 중규모 대류시스템이 형성된다면 대류셀의 예상 이동 속도보다 빠르게 풍하측의 대류계 발달로 이어질 것으로 판단되어 초단기 레이더 강수 예측(MAPLE)과 실황을 검증해 본 결과 6월 1일 12시를 초기장으로 하여 1시간 후(13시)의 예측 결과와 12시 30분의 실황의 위치가 일치하였고, 예측보다 강하게 발달해 있다는 것을 알 수 있었으며, 예측 최소 30분 빠르게 풍하측에서 대류시스템이 이동하거나 발달하고 있음을 보여준다. 이는 풍하측에서 예측보다 실황이 빠르게 진행됨을 알 수 있었고, 풍하측의 특성 파악으로 선제적 위험기상에 대응할 필요성이 있다고 판단된다.(그림 50)

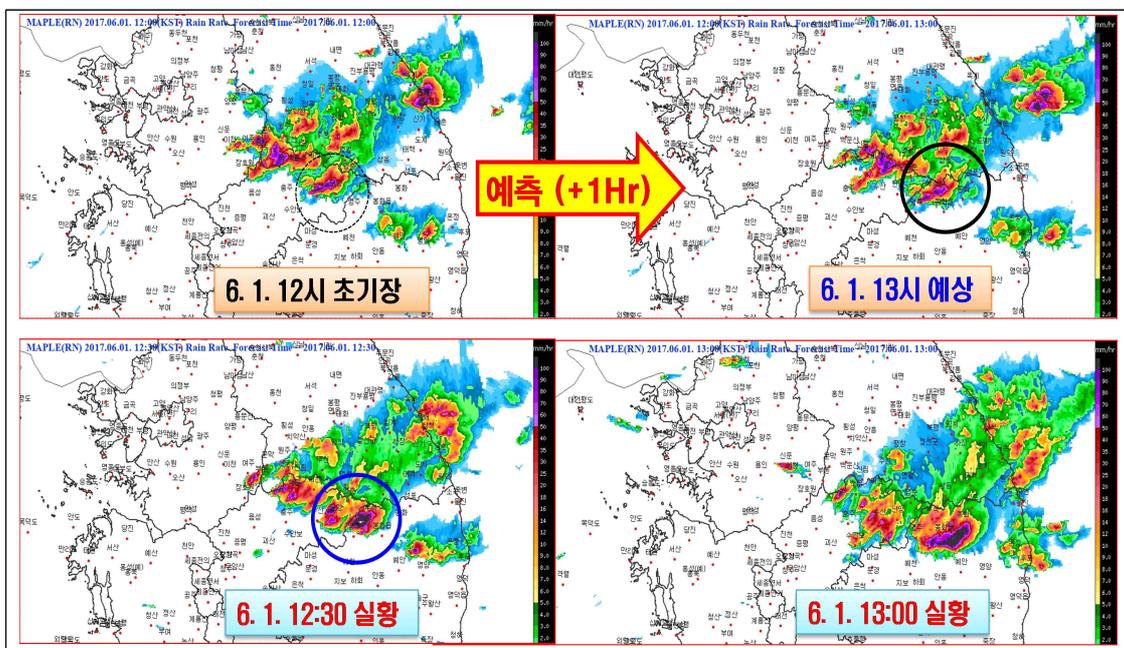


그림 50. 초단기 레이더 강수 예측(MAPLE)과 실황 검증(12시)

### 2.3 풍하측에서 소멸하는 사례(2020년 5월 24일)

이번 분석은 소백산맥 풍하측에서 발달한 2017년 5월 13일과 유사 사례로 한기를 동반한 상층 기압골이 우리나라를 통과하면서 중부지방부터 한랭전선이 남하하였으나, 소백산맥을 중심으로 전선에 동반된 비 구름대가 소산되었던 사례이다.

### 2.3.1 일기도 분석

지상저기압은 발해만에서 동진하여 우리나라 동해북부해상에 위치하고, 850hPa의 -12℃선이 중부지방에서 남부지방으로 남하하면서 약한 한기 이류가 있다. 500hPa의 상층 기압골은 북한지역을 통과하고 있으며, 300hPa의 상층 Jet는 중국내륙에서 발해남과 우리나라 서해상으로 형성되어 있으며, 중부지방은 Jet의 출구 왼쪽에 위치하면서 약한 대기불안정이 예상되었다.

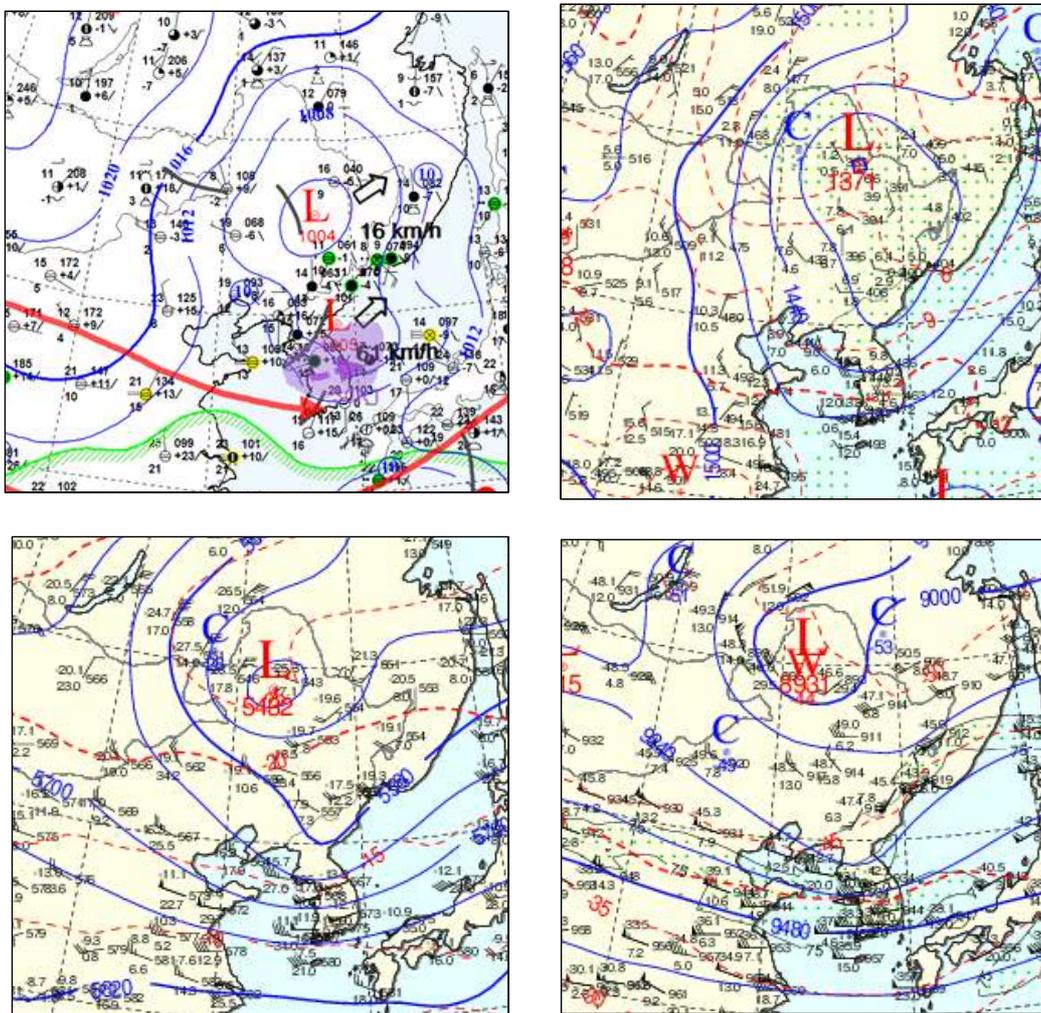


그림 51. (위) 지상/850hPa 일기도, (아래) 500hPa/300hPa 일기도(2017.06.01. 09시)

### 2.3.2 단열선도(포항)

850hPa에서 400hPa 사이에서 조건부불안정 상태를 보여주고 있으며, 하층에서 850hPa 사이에는 약한 온난이류, 850hPa에서 700hPa에서는 약한 한랭 이류가 있다.(그림 52)

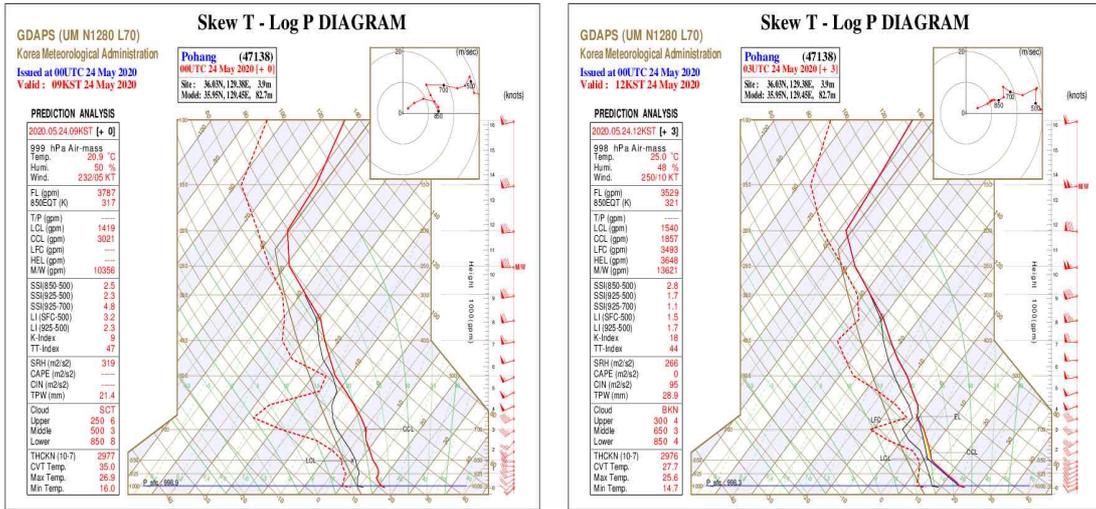


그림 52. 포항 단열선도 (좌) 2020.5.24. 09시, (우) 2020.5.24. 12시 예상

### 2.3.3 실태분석

강원도에서 서해상으로 발달한 대류계가 남하하였으나, 소백산맥 풍하측으로 이동하면서 약화되거나 소멸되는 경향을 보이면서 경북북부지방으로 5.0mm 미만의 강수를 내렸다(그림 53)

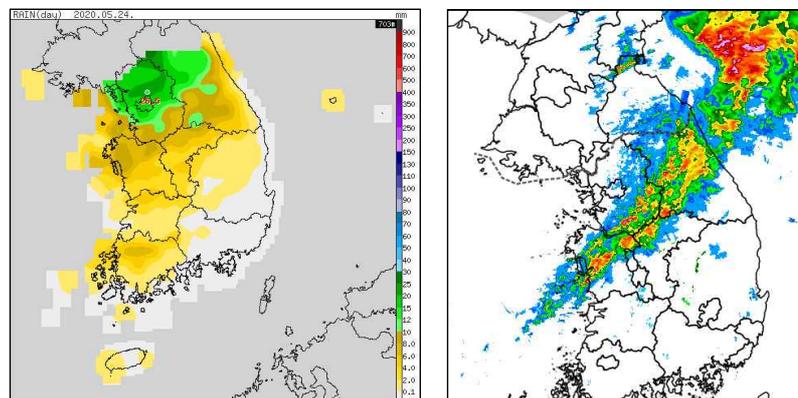


그림 53. (좌)일강수량(2020.5.24.), (우)레이더 영상(2020.5.24. 08시)

### 2.3.4 원격관측(레이더)

강원도에서 서해상으로 발달한 대류계가 남하하는 가운데 08시에는 다소 강한 세력을 유지하고 있었으나, 09시~10시에는 소백산맥을 넘어 풍하측으로 이동하면서 소산되거나 약화되는 경향을 보였다.(그림 54)

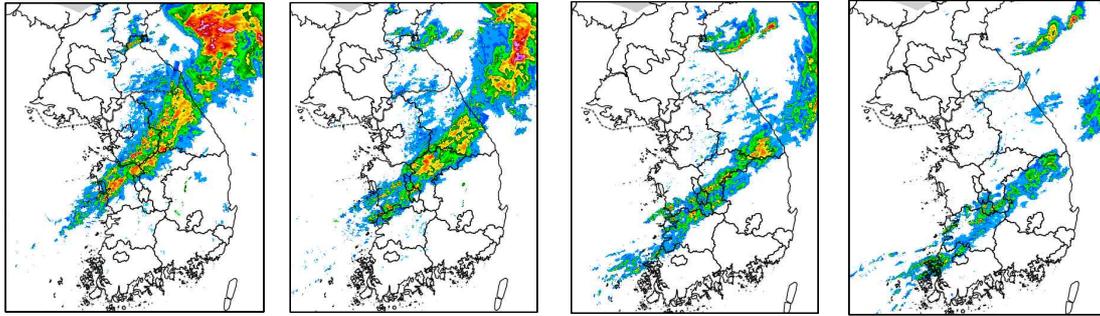


그림 54. 레이더 영상(2020.5.24. 08시~11시)

### 2.1.6 수치모델 보조자료

그림 55의 상당온위 분포에서 09시에 남부지방과 북부지방에는 저상당온위가 위치한 가운데 서해남부해상으로부터 고상당온위가 유입되고 있어 남부지방을 중심으로 상당온위는 높아지는 변화경향을 보여주고 있다. 12시에는 남부지방에는 고상당온위가 유입된 가운데 상당온위 경계가 소백산맥 주변으로 형성되어 있으며, 온도 경도가 강한 곳은 서해상으로 형성되어 있고, 전북에서 경북과 강원도로 강수룩 온도 경도는 약해지는 경향을 보여주고 있다.

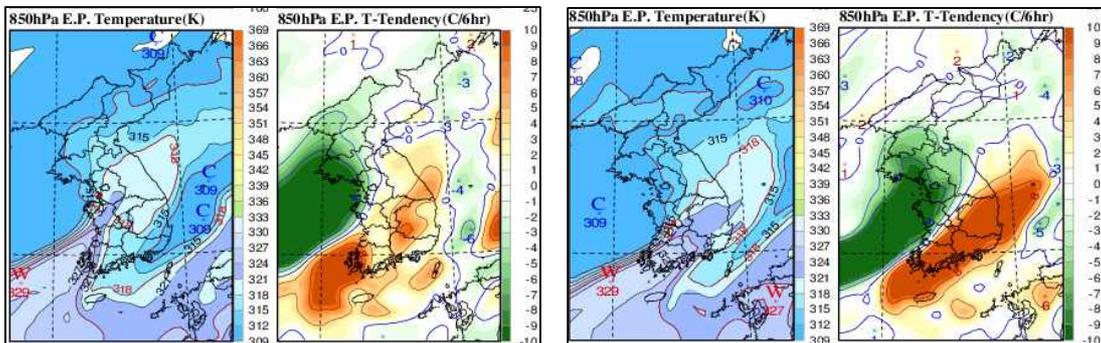


그림 55. 상당온위 및 상당온위 변화 경향(C/6hr) (좌) 09시, (우) 12시

또한, 상당온위 연직 분포(그림 56)에서 소백산맥 풍하측을 중심으로 09시에는 저 상당온위가 위치해 있고, 15시에는 하층은 고 상당온위가 위치해 있으나 소백산맥 풍상측 북서쪽으로 하층부터 상층(400hPa 부근)까지 저 상당온위가 폭 넓게 분포하고 있어 역학적으로 불안정 하나 상층의 강한 차고 건조한 공기가 분포해 있어 깊은 대류는 어려울 것으로 판단된다.

그림 57의 상승류의 연직 분포에서 09시에 소백산맥 풍상측으로 강한 상승류를 모의하나 풍하측은 약한 상승류가 있다. 12시에는 풍하측의 약한 상승기류 바로 상층에 폭 넓은 하강류가 위치하면서 상승기류의 발달을 저지할 것으로 판단된다. 또한, 풍속의 연직 분포에서 12시에는 소백산맥 북서쪽(풍상측)으로 대기 하층을 중심으로 전 시간(09시)에 비해 풍속이 약해 풍상측의 기류가 산맥을 넘기 어려울 것으로 판단된다.

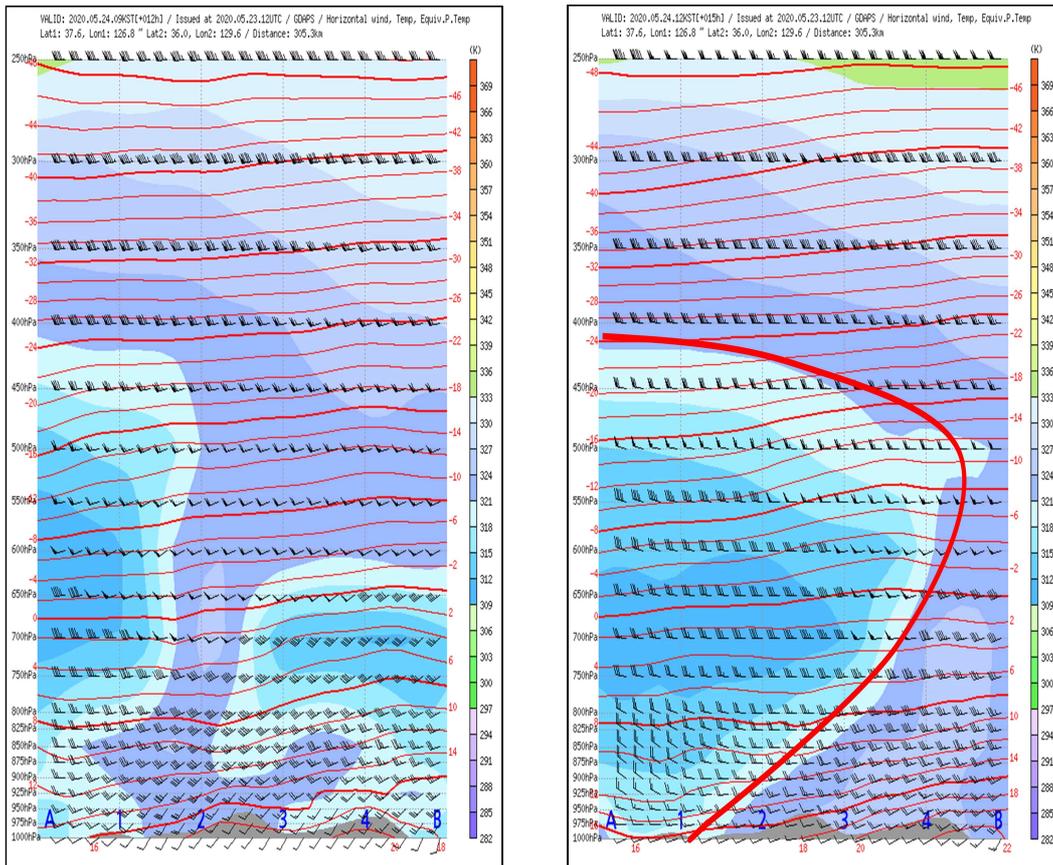


그림 56. 상당온위 연직 분포. (좌) 15시, (우) 18시

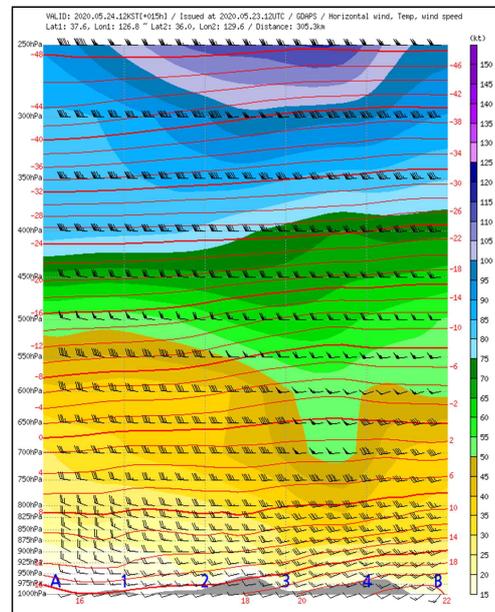
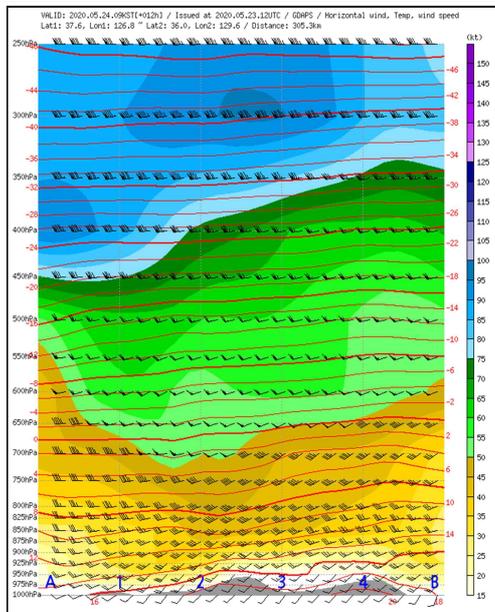
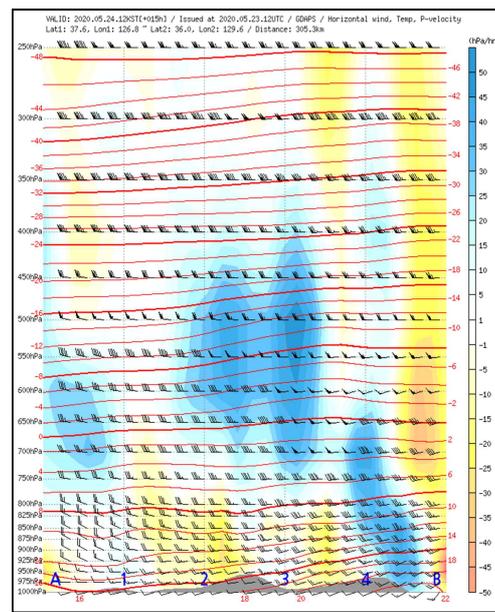
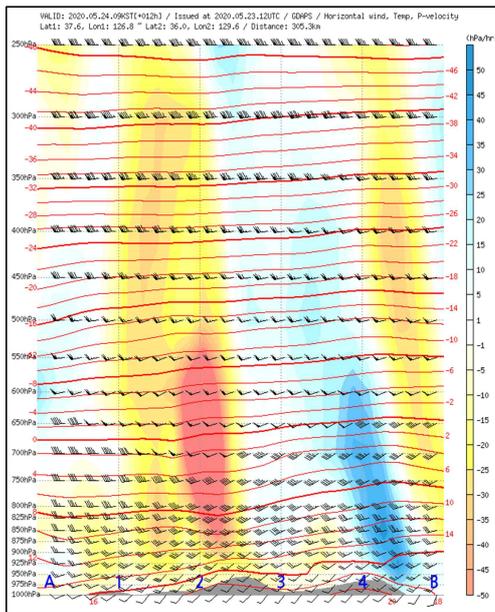


그림 57. (위) 연직 상승, (아래) 연직 풍속, (좌) 09시, (우) 12시

### Ⅲ. 결론

풍하 저기압(Lee Side Cyclone)의 효과로 풍하측 양의 소용돌이도 증가로 인한 저기압성 순환 강화되고, 연직 온위가 급격히 증가 후 감소되는 변위로 형성되는 풍하 사면의 하강 풍에 의한 물뿔(hydraulic jumps)현상이 발생(위치에너지→운동에너지)하였고, 강한 하강 풍의 전면에서 강제 상승류의 발생은 깊은 대류시스템을 형성한다고 판단된다. 또한, 풍하측에서 일정한 거리(40~80km)에서 더욱 강한 2차 대류시스템의 발달을 알 수 있었다. 이는 진행 방향 전면의 불안정역(고 상당온위, 고온, 습윤 등)에 의한 역학적 불안정 강화나, 파의 증첩에 의한 풍하 파의 증폭 또는 대류시스템 이동 전면에 위치한 동쪽 태백산맥의 지형효과에 의한 역학적 불안정이 강화되는 경우를 들 수 있겠다.

특히, 시간당 강우 강도를 분석한 결과 풍상측에 비해 풍하측에서 최대 6배(400 → 2,750mm) 이상의 증가를 보인 것은 유의미한 결과라 볼 수 있었다. 이러한 이유로 소백산맥 풍하지역에서 우박이나 돌풍 등의 위험기상 발생 가능성과 강도가 증가될 수 있음을 고려해야 한다. 유사한 조건에서 우박의 크기는 풍하측에서 풍상측보다 더욱 크게 성장했음을 알 수 있었다.

한편, 소백산맥 풍상측에 비해 풍하측에서 대류시스템이 약화되거나 소산되는 경향이 있는데 이는 이론적 배경에서 설명한 산을 넘는 임계치의 바람이 불어 주어야 함을 확인할 수 있었다.

이번 연구과제에서 다루고자 했던 소백산맥 풍상측에서 들어오는 대류시스템이 풍하측에서 더욱 발달하는 원인을 산악파에 의한 풍하 강풍을 기준으로 규명하고자 접근하였으나 산악 풍하 강풍은 대기가 안정함을 기초로 하였기 때문에 풍하측 대류시스템과는 변수 조건이나 대기 상태가 다른 시스템으로 판단된다. 따라서, 향후에 한랭전선 상의 대기 구조 등 다양한 변수를 고려한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

#### IV. 참고문헌

1. 이재규, 2003: 태백산맥의 지형적인 효과와 관련된 강릉지역의 강풍 사례에 대한 수치모의 연구. 한국환경과학회지, 12(12), 1245-1254.
2. 이재규, 2004: 태백산맥의 풍하측 강풍 현상에 대한 수치모의 연구. 한국기상학회 봄 학술대회 논문집, 136-137.
3. 신기창, 2013: 태백·소백 산맥 풍하측 강풍 및 산악파 연구. 국내박사학위논문 조선대학교, 제7장, 35~38.
4. 김동균, 전해영, 2000: 집중호우와 연관된 산악 효과에 대한 수치적 연구, 한국기상학회지, 36(4), 441-454
5. 김진욱, 윤대옥, 2017: 소백산맥에 의한 서풍 파동 발생. Korean Earth Sci. Soc., 38(1), 24-34
6. 예보관훈련용 기술서\_대기분석 및 예보(기상청,2014.10.15.)
7. 예보관훈련용 기술서\_대기역학(기상청,2014.10.15.)
8. 손에 잡히는 예보기술(기상청, 2014.10.)
9. Why ? How?(기상청, 2014.10.)
10. OROGRAPHIC EFFECTS ON PRECIPITATING CLOUDS(Robert A. Houze Jr. 2011)