

## 영동 지역에서 강설 특성 관측 및 이해

김병곤<sup>1)\*</sup> · 김미경<sup>1)</sup> · 권태영<sup>1)</sup> · 박균명<sup>2)</sup> · 한윤덕<sup>2)</sup> · 김승범<sup>3)</sup> · 장기호<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>강릉원주대학교 대기환경과학과, <sup>2)</sup>강원지방기상청 관측·예보과,  
<sup>3)</sup>국립기상과학원 재해기상연구부, <sup>4)</sup>국립기상과학원 융합기술연구부

(접수일: 2021년 5월 31일, 수정일: 2021년 8월 17일, 게재확정일: 2021년 8월 29일)

## Observation and Understanding of Snowfall Characteristics in the Yeongdong Region

Byung-Gon Kim<sup>1)\*</sup>, Mi-Gyeong Kim<sup>1)</sup>, Tae-Young Kwon<sup>1)</sup>, Gyun-Myung Park<sup>2)</sup>,  
Yun-Deok Han<sup>2)</sup>, Seung-Bum Kim<sup>3)</sup>, and Ki-Ho Chang<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Atmospheric Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

<sup>2)</sup>Observation-Forecast Division, Gangwon Regional Meteorological Office, Gangneung, Korea

<sup>3)</sup>High Impact Weather Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Gangneung, Korea

<sup>4)</sup>Convergence Meteorological Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

(Manuscript received 31 May 2021; revised 17 August 2021; accepted 29 August 2021)

**Abstract** Yeongdong has frequently suffered from severe snowstorms, which generally give rise to societal and economic damages to the region in winter. In order to understand its mechanism, there has been a long-term measurement campaign, based on the rawinsonde measurements for every snowfall event at Gangneung since 2014. The previous observations showed that a typical heavy snowfall is generally accompanied with northerly or northeasterly flow below the snow clouds, generated by cold air outbreak over the relatively warmer East Sea. An intensive and multi-institutional measurement campaign has been launched in 2019 mainly in collaboration with Gangwon Regional Office of Meteorology and National Institute of Meteorological Studies of Korean Meteorological Administration, with a special emphasis on winter snowfall and spring windstorm altogether. The experiment spanned largely from February to April with comprehensive measurements of frequent rawinsonde measurements at a super site (Gangneung) with continuous remote sensings of wind profiler, microwave radiometers and weather radar etc. Additional measurements were added to the campaign, such as aircraft dropsonde measurements and shipboard rawinsonde soundings. One of the fruitful outcomes is, so far, to identify a couple of cold air damming occurrences, featuring lowest temperature below 1 km, which hamper the convergence zone and snow clouds from penetrating inland, and eventually make it harder to forecast snowfall in terms of its location and timing. This kind of comprehensive observation campaign with continuous remote sensings and intensive additional measurement platforms should be conducted to understand various orographic precipitation in the complex terrain like Yeongdong.

**Key words:** Rawinsonde, snowfall, northeasterly, ESSAY, Yeongdong

\*Corresponding Author: Byung-Gon Kim, Department of Atmospheric Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, 7 Jukheongil, Gangneung, Gangwon 25457, Korea.  
Phone: +82-33-640-2326, Fax: +82-33-640-2320  
E-mail: bgk@gwnu.ac.kr

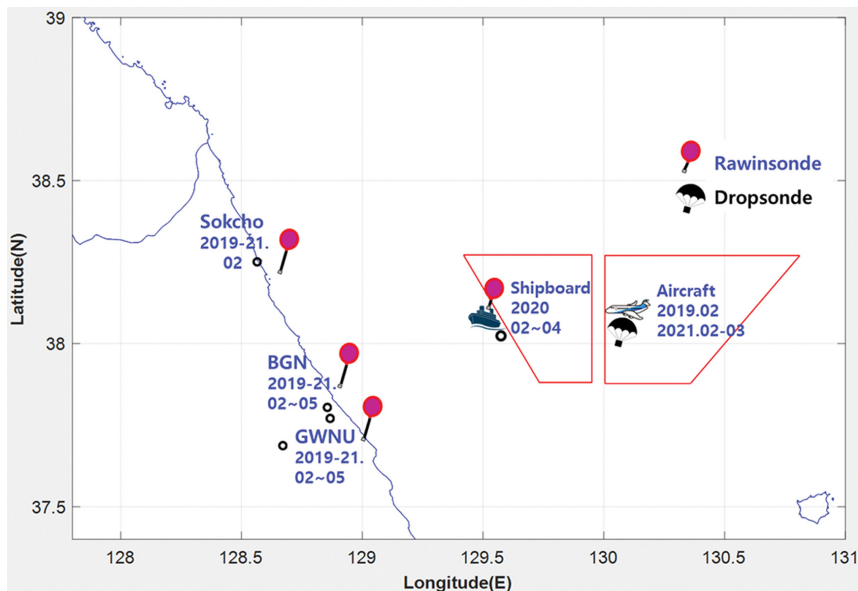
## 1. 서 론

영동지역은 동해와 태백산맥을 인접하고 있어 각종 기상현상이 증폭되어 나타나는 경향이 있다. 동해의 면적은 대략  $10^6 \text{ km}^2$ , 평균 깊이는 1,800 m로 여름철에는 영동지역으로 시원한 바람을 제공하고, 겨울철에는 따뜻한 수온으로 열 저장고 역할을 하면서 대기 중으로 수증기를 공급한다. 그리고 동해상에 발달한 눈구름은 영동지역과 태백산맥에 강설을 초래하게 되고, 산악지역에 쌓인 눈은 봄철까지 수자원의 저장고 역할을 할 뿐만 아니라 봄철 건기에 강풍과 함께 발생하는 산불 예방에도 큰 도움이 된다(Murakami et al., 2003; Nam et al., 2014). 영동지역 기상현상에 큰 영향을 미치는 태백산맥은 북한 함경남도부터 부산까지 약 600 km 이상에 걸쳐 뻗어 있는 한반도에서 가장 긴 산맥이다. 평균 해발고도가 800~1,000 m에 이르며, 서쪽으로는 완만한 경사이지만 동쪽으로는 급경사를 이루며 동해와 만나게 된다.

겨울철 시베리아 고기압이 강하게 남동쪽으로 진출하는 초겨울에는 주로 한반도의 남서쪽, 특히 호남 지방에 강설이 빈발하지만, 2~3월의 늦겨울에는 영동지역에 강설이 주로 발생하는 경향이 있다(Nam et al., 2014). 겨울 절정기를 지나면서 약화된 시베리아 고기압이 한반도 남쪽을 지나는 이동성 저기압과 호응하면서 동해상에 북풍에서 북동풍 계열의 한기가 유입되기 때문에 동해상에 해기차가 증가하게 된다(Seo

and Jhun, 1991; Park et al., 2009; Lee et al., 2012). 결국 대류불안정에 의한 눈구름이 동해상에 발달하여 영동지역에 대설이 유발되는 경향이 있다(Lee and Lee, 1994; Lee et al., 2012). 지난 영동지역 강설 연구를 살펴보면 강설 메커니즘을 종합적으로 해석할 수 있는 집중 관측이 부족하였기 때문에 일차적으로 종관 분석에 기반한 강설 구역과 기압배치 연관성을 분석하여 해안형 혹은 산악형 강설 분류 연구나 강설 사례에 대한 수치 모델링 연구가 대부분이었다(Lee and Park, 1996; Lee and Lee, 2003; Kim et al., 2005). 최근 2018년에는 평창 동계올림픽 기간을 전후하여 국제공동 관측 캠페인(International Collaborative Experiment for Pyeongchang Olympic and Paralympics)을 통해 산악지역 부근 강설 입자 및 특성 연구(Gehring et al., 2020), 산악지역에서 시어와 난류가 강설 입자에 미치는 영향 연구(Kim et al., 2021a) 등이 수행된 바 있다.

이상의 선행 연구들로 인하여 뚜렷한 종관장의 지배를 받는 강설 사례들의 예보 정확도는 크게 향상된 측면이 있지만, 종관 강제력이 약한 경우 지형효과가 두드러지게 되어 종관 강제력이 강한 경우 보다 강설 예보의 어려움이 큰 것으로 알려져 있다(Kwon et al., 2020). 특히 영동지역은 태백산맥 정상부근에서 동해까지 경사가 급하기 때문에 산맥과 동해 효과가 강화되어 나타나는 경향이 있다. 그러므로 한반도와 같이 좁은 면적에 바다를 인접하고 있으며 복잡한 지형으로 이루어진 지역의 일기예보 개선을 위해서는 지형



**Fig. 1.** Analysis domain and rawinsonde launch sites along with shipboard and aircraft measurements for the YES-WEX campaign. The ESSAY campaign had been made mainly at GWNU only for the winter season of 2014~2019.

효과의 지배를 받는 중규모(mesoscale) 기상 차원의 분석과 이해가 요구되지만, 국내에서는 아직 중규모 관측 및 분석이 부족한 실정이다. 그러므로 영동지역과 같이 복잡한 지형으로 이루어진 자연 실험실(natural laboratory)에서 산맥과 동해 효과에 의한 중규모 기상 이해를 위한 목적 지향(target oriented) 통합 집중관측은 필수적이라 할 수 있다.

이런 측면에서 강원 영동지역 강설 이해를 목적으로 영동지역에서는 2014-2019년까지 강설 현상시에 장기간의 대설관측 캠페인(Experiment on Snow Storms At Yeongdong: ESSAY)이 수행되어 왔으나, 한 지점(강릉원주대학교)에서 라디오존데 관측을 통한 대기의 열역학적인 특성을 주로 분석하였기 때문에 공간적인 특징이나 연속적인 변화를 이해하는 데에는 한계가 있었다(Seo et al., 2015; Ko et al., 2016; Kim et al., 2018a). 이를 보완하고 강설현상의 보다 정교한 시·공간적 해석을 위해 2019년부터 겨울철과 봄철에(주로 2~4월) 강원지방기상청, 국립기상과학원, 강릉원주대학교 등 여러 기관이 동시에 참여하는 ‘강원영동 공동 입체기상관측 캠페인’이 수행되고 있다(Kim et al., 2021b). 참고로 2019년 강설 관측은 일부 기존 ESSAY 캠페인과 연계하여 이루어졌다. 새로운 관측 캠페인은 영문 이름이 따로 정해진 바는 없지만 본 논문에서는 편의상 Yeongdong Extreme Snowfall - Windstorm Experiment (YES-WEX)로 부르기로 한다. YES-WEX 캠페인은 영동지역에 가장 큰 피해를 초래하는 겨울철 대설과 봄철 강풍 메커니즘 이해를 위한 집중관측 프로그램이다. Figure 1은 ESSAY 캠페인과 YES-WEX 캠페인 분석 영역과 레윈존데 탐측(sounding) 지점 그리고 선박 및 항공 관측 영역을 함께 제시한 것이다.

본 논문은 강설과 강풍 두가지 주제 중에서 주로 강설관련 분석을 주로 소개한다. 그리고, 영동지역에서 진행되었던 선행 관측캠페인 ESSAY와 최근 수행되고 있는 YES-WEX 강설 예비결과를 비교·정리하고, 최종적으로 영동지역과 같은 복잡한 지형에서 강설 메커니즘 이해를 위한 관측방법론과 향후 관측 캠페인 개선방안 등도 함께 제안하고자 한다.

## 2. ESSAY 주요 결과

### 2.1 전형적인 동해 효과 강설

지난 2014년부터 ESSAY 캠페인의 일환으로 영동지역에 강설이 예보될 경우 강설 이전부터 강설 기간 중에 3시간 간격으로 레윈존데 관측을 수행하였다(Ko et al., 2016; Kim et al., 2018a). ESSAY 캠페인은 강릉원주대학교에서 레윈존데 관측을 통한 장기간의 대기 열역학 구조 변화와 강설 특성을 이해하는 것이 주요 목적이었고, 2017년 부터는 강설 입자인 눈결정을 고

해상도 카메라(Multi-Angle Snowflake Camera: MASC)로 대기중에서 직접 촬영한 후 이미지 분석을 통해 눈결정의 성장, 정량적인 크기 및 낙하속도 등의 분석이 추가되었다(Kim et al., 2019).

지난 ESSAY 캠페인 결과를 요약하면, 영동지역 강설은 기본적으로 차가운 한기가 따뜻한 동해상을 통과하면서 강한 대류불안정에 의해 강설구름이 발달하게 되고, 북풍 혹은 북동풍 바람과 함께 영동 내륙으로 진입하면서 강설이 발생한다는 선행 연구결과를 시간간격이 조밀한(3시간 간격) 레윈존데 관측을 통해 재차 확인하였다(Seo and Jhun, 1991; Lee and Lee, 1994; Lee et al., 2012). 이를 국내에서는 동해 효과라고 부른다(Nam et al., 2014). 국외에서는 미국 오대호 주변 남쪽이나 동쪽 풍하측 지역(Kristovich et al., 2017, 2018), 유타주 솔트레이크 주변(Alcott and Steenburgh, 2013; Veals and Steenburgh, 2015), 그리고 유럽의 내륙 호수 주변 등(Kindap, 2010)에서 대설 현상이 주로 보고되고 있다. 이는 동해 효과와 유사하게 상대적으로 따뜻한 호수에 의해 유발된 강설 현상이므로, 국외에서는 호수 효과(lake effect)라고 부른다. 하지만 지구상에서 호수 효과 강설이 가장 강하게 발생하는 지역은 바로 동해와 인접한 일본 북서부 지역이다. 일본 기상청 발표에 따르면 1981~2010년 기준 Joetsu, Aomori, Sapporo 연평균 누적 적설량이 각각 6.4 m, 6.7 m, 6.0 m였다(Steenburgh and Nakai, 2020).

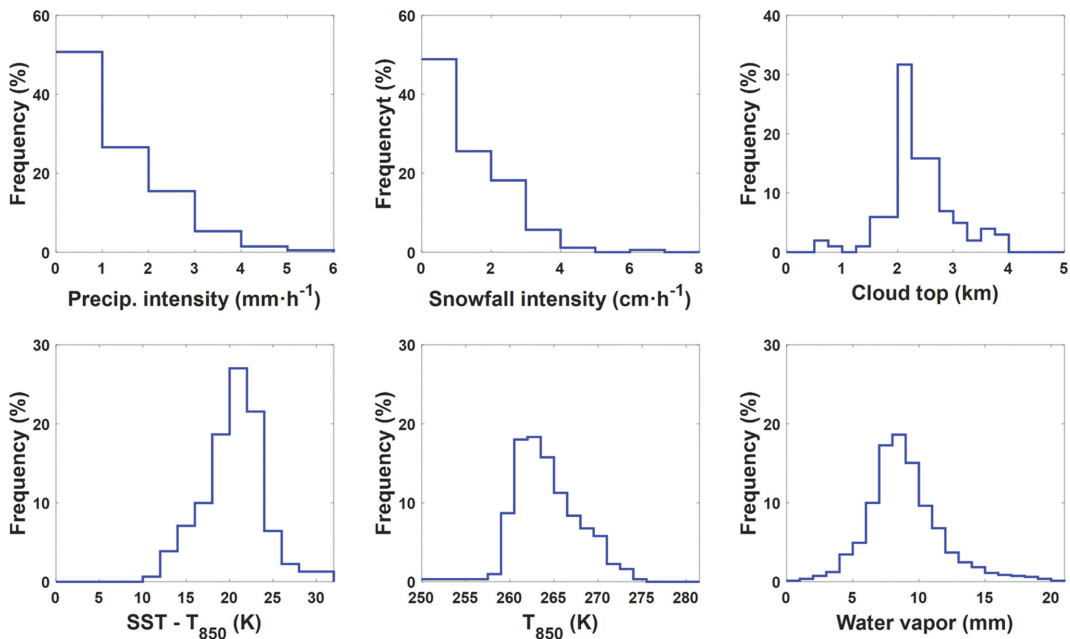
강원 영동지역의 전형적인 동해 효과에 의한 강설의 특징은 하층 2~3 km 이내에서 북풍 또는 북동풍과 함께 유입되는 한기로 인하여 동해상에 대류불안정에 의한 눈구름이 형성되는 데, 이 때 하층 한기유입으로 인하여 경계층 구름 위에는 강한 역전층이 발생하는 경향이 있다(Kim et al., 2018a). 그래서 동해상에 대류불안정에 의해 발생한 눈구름은 형태학적으로 층운 내지 층적운을 띄게 된다. 강설시에 동풍에 의해 강설이 유발되는 것으로 알려져 있지만 ESSAY 관측결과에 의하면 대설을 유발하는 바람은 주로 북풍 내지 북동풍 계열의 바람이 주를 이루었다.

전체 ESSAY 사례는 2014-2019년까지 총 51개 사례중에서 전형적인 동해 효과에 의한 강설은 총 28개 이었다. 이들에 대한 강설 특성을 분석한 결과, 시간당 평균 강설량(강수량)은  $0.9 \text{ cm h}^{-1}$  ( $0.9 \text{ mm h}^{-1}$ )이었다. Table 1은 28개 동해 효과 강설사례들의 강설 특성과 강설구름 운정고도, 850 hPa 온도, 해기차(850 hPa 온도와 해수면온도 차이), 가강수량 등을 정리한 표이고, Fig. 2는 각 변수들의 분포도를 히스토그램으로 제시한 것이다. 운정고도와 850 hPa 온도와 ESSAY 기간중 레윈존데 탐측자료를 이용하여 추정된 값이고, 해수면 온도는 NOAA (National Ocean and Atmospheric

**Table 1.** Statistics of snowfall, cloud, sea surface temperature, 850 hPa temperature, and precipitable water vapor of East Sea effect snowfall only for the ESSAY period.

	PI (mm h <sup>-1</sup> )	SI (cm h <sup>-1</sup> )	CTH (km)	SST-T <sub>850</sub> (K)	T <sub>850</sub> (K)	PWV (mm)
Number	207	176	101	310	310	811
Mean ± SD	0.9 ± 0.9	0.9 ± 0.9	2.3 ± 0.6	19.5 ± 3.5	263.5 ± 3.7	8.5 ± 2.8
Median	0.5	0.6	2.2	19.9	263.0	8.2
Geomean	0.4	0.4	2.2	19.2	263.5	8

PI Precipitation Intensity, SI Snowfall Intensity, CTH Cloud top height, SST Sea Surface Temperature, T<sub>850</sub> 850 hPa temperature, PWV Precipitable Water Vapor, SD Standard Deviation.

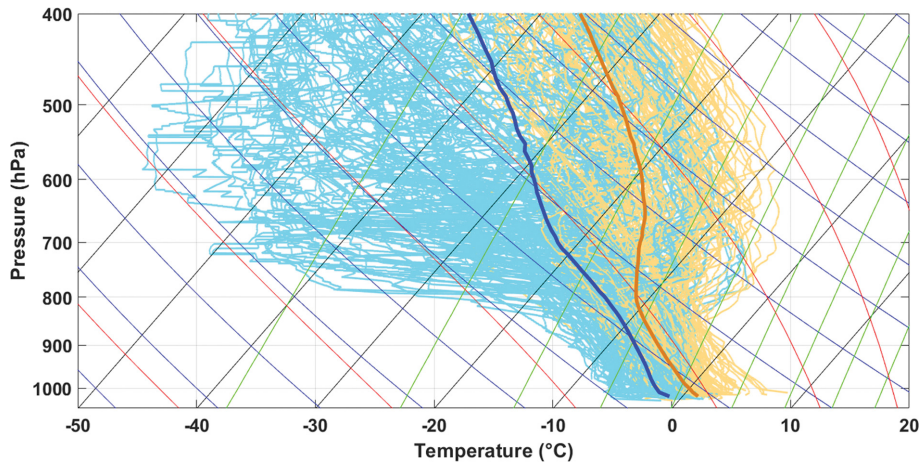
**Fig. 2.** Histograms of precipitation intensity, snowfall intensity, cloud top height, air-sea temperature difference ( $SST - T_{850}$ ), 850 hPa temperature, and precipitable water vapor of East Sea effect snowfall only (28 events) for the ESSAY period.

Administration) OI (Optimal Interpolation) SST (Sea Surface Temperature) 자료를 이용하였다. 그리고 가강수량은 위성항법시스템(Global Navigation Satellite System, GNSS)을 통해 구하는 데, GPS (global Positioning System) 위성을 이용하여 대기 중에 존재하는 수증기에 의해 GPS 신호경로가 굴절되어 지상의 수신기까지 지연되는 정도로 가강수량을 산출한다. 이상의 분석방법은 Lee et al. (2012), Ko et al. (2016), 그리고 Kim et al. (2018a) 등에 자세히 설명되어 있다.

동해 효과 강설기간 중의 850 hPa 평균 온도는 263.5 K이었고, 평균 해기차(850 hPa 온도와 해수면온도 차이)는 19.5 K로 Nam et al. (2014) 연구결과와 유사한 수준이었다. 이는 선행 연구결과에서도 제시된 바와 같이 동해상의 해기차는 영동지역 동해 효과에 의한

강설 발생의 첫번째 필수 조건이라고 할 수 있다. 강설기간동안 레윈존데로 관측한 평균 운정 고도는 지상 2.3 km이고, 2.0~2.5 km 부근에서 최빈값이 나타나고 있다. 전반적으로 영동지역 전형적인 강설시에 눈구름은 높게 발달하지 못하고 2~3 km 이내에 국한되는 경향이 있지만(Nam et al., 2014; Kim et al., 2018a), 전형적인 동해 효과 강설 이외의 2.2절에서 제시할 대류권계면 하강이나 강한 경압불안정을 동반하는 특이 강설사례시에는 구름이 3 km 이상, 최고 7 km까지도 발달하는 것을 확인할 수 있었다(Kim et al., 2019).

Figure 3은 ESSAY 전체기간 중에서 강설기간 중의 154개 레윈존데 탐측 관측결과를 모두 그린 것이다. 갈색 실선이 온도이고, 시안색 실선이 이슬점 온도인데, 뚜렷하게 하층 800 hPa (약 2 km) 이하 고도에서

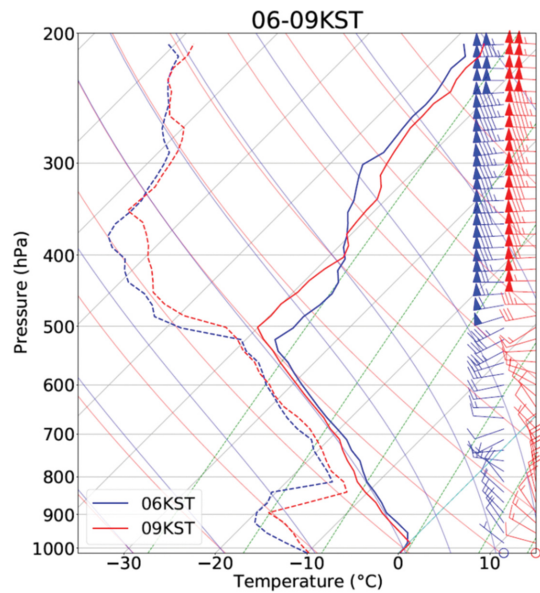


**Fig. 3.** Vertical profiles of temperature (yellow line) and dew-point temperature (cyan line) for the 154 whole rawinsonde soundings during the snowfall period only. Thick solid brown and blue lines indicate layer-average profiles of temperature and dew-point temperature, respectively.

온도와 이슬점 온도가 서로 근접해 있어 습윤한 구름 층이 잘 발달해 있는 것을 보여준다. 이는 Table 1에서 제시한 운정 고도 값과도 잘 일치하는 결과이다. 그리고 경계층 눈구름 위로는 상당히 변동폭이 크지만, 대체로 온도와 이슬점 온도차가 크게 증가하여 건조한 층이 존재하는 것을 알 수 있다. 또한, ESSAY 캠페인 기간 스마트폰 카메라에 확대경을 부착하여 눈결정 성장 및 물리적 특성을 분석하였는데, 그 결과 영동지역 눈결정은 주로 나뭇가지형(dendrite) 눈결정이 부착된(aggregate) 형태로 존재하였고, 자주 결착형(riming) 입자도 관측되었다(Seo et al., 2015). Kim et al. (2018a)은 눈결정 관측과 CRESS (Cloud Resolving Storm Simulator) 모형을 이용하여 850 hPa 온도가 점차 감소함에 따라 눈결정이 결착형 입자에서 부착형 입자로 변하는 것을 관측과 모의결과에서 확인하였다.

### 2.2 특이 강설 사례

2.1절에서 언급한 전형적인 동해 효과에 의한 강설 사례 이외에 강한 강설을 동반하는 특이 강설 사례도 ESSAY 캠페인 기간 자주 관측되었다. 우선 2017년 1월 20일은 저기압이 한반도를 통과하는 과정에서 폭발적으로 발달하면서 강설이 유발된 사례인데, 특이 사항은 기압이 하루 동안 13 hPa까지 감소하면서 겨울철에는 드물게 천둥과 번개를 동반하였다. 강릉에서 약한 강설이 10시 30분부터 관측되기 시작하였으며, 11시와 13시 사이에 운정고도가 약 7km까지 발달하였다. 그리고, 겨울철에 이례적으로 천둥 번개를 동반한 시간당 10 cm 이상의 강설이 관측되었다(총 누적강설량 31.3 cm). 이와 같은 갑작스러운 폭설로



**Fig. 4.** Vertical profiles of temperature and dew-point temperature for 0600 and 0900 KST 20 January 2017 just before the thunder snowfall was observed around at noon.

인하여 제설이 원활하게 이루어지지 않아 고속도로상에 수많은 차량이 갇히는 피해가 속출하였다. Figure 4는 뇌설(thunder snow)이 발달하기 바로 전 시간대인 0600 KST와 0900 KST 시간대의 레윈존데로 관측한 대기열역학 구조를 나타낸 것인데, 온도와 이슬점 온도의 연직 구조가 토네이도 발생시의 주로 나타나는

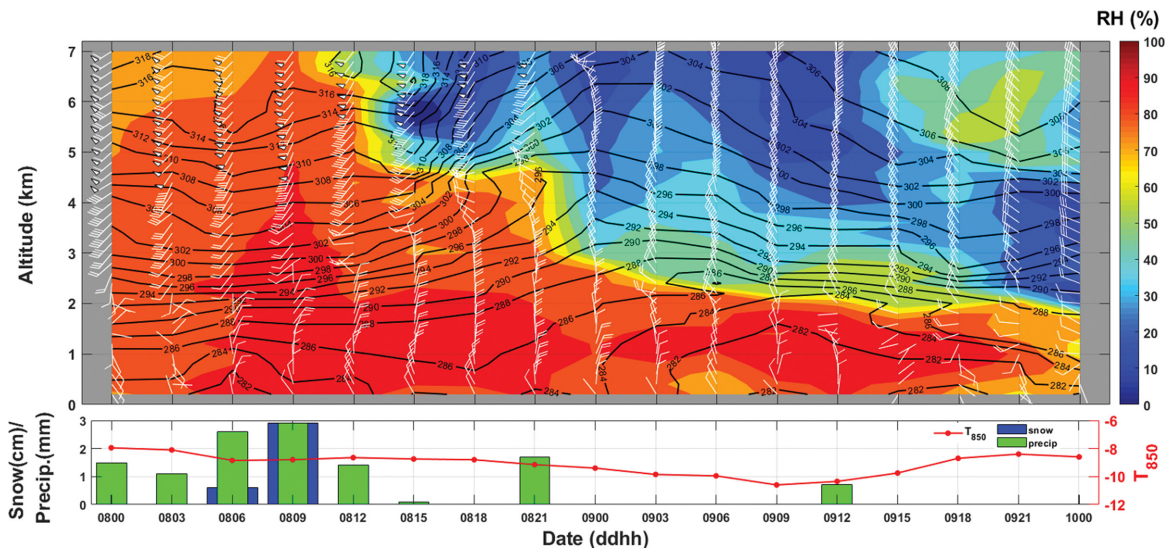
삼각형(inverted V) 형태와 대략 500 hPa 고도까지 혼합층(관측 온도선이 건조단열선과 평행)이 잘 발달해 있는 것을 알 수 있다(Ribeiro and Bosart, 2018). Kim et al. (2018b)은 WRF 활용 등온위면 잠재 와도 분석을 통해 대류권계면 하강에 따른 상층의 큰 잠재와도(1.5 Potential Vorticity Unit)가 약 5 km 고도까지 내려와 지상 저기압을 급격히 발달시키는 데 기여한 것으로 해석하였다(Lee et al., 2002). 그리고 동해상의 해수면 온도가 평년보다 3°C 가량 높았고(Kim et al., 2018b), Fig. 4에 제시된 바와 같이 0900 KST에 900~700 hPa 고도 부근의 북풍 기류와 연관된 강한 한랭이류에 의해 하층의 대기불안정을 증가시켰을 것으로 판단된다.

또한, 2018년 3월 8~9일에는 상층에 300 hPa까지 발달한 큰 기압골과 함께 이동성 저기압이 한반도 남해상을 통과하면서 대기 중하층에 강한 경압불안정이 발생한 사례로써 영동지역에는 2일 동안 눈·비 혼합형 강수가 지속되었다. 북강릉 관측소에서 3월 8일에 강수(설)량은 10.5 mm (3.6 cm)이었다. Figure 5는 레윈존데 관측자료를 활용하여 상대습도, 상당운위 그리고 바람 연직구조의 시간변화를 나타낸 것이다. 상층 기압골이 한반도를 통과하기 전인 8일에는 하층(2~3 km 이내)에서는 북풍 계열이, 반면에 그 위 상층에서는 약 7 km까지 남서풍 계열의 바람이 관측되었다. 한반도 상층으로 잘 조직화된 기압골이 통과하면서 경압 불안정에 의해 연직으로 구름이 약 6 km까지 높게 발달하였다가 이후 3월 9일에는 눈구름이 약

2 km 이하로 낮아지면서 전형적인 동해 효과 강설 패턴으로 바뀌었다. 이 사례는 초기에 높게 발달한 구름 상부의 낮은 온도에서 생성된 나뭇가지, 기둥, 컬럼 모양의 눈결정이 낙하하면서 부착으로 성장한 후, ESSAY 전체 평균에 비해 따뜻한 하층(850 hPa 온도 -4~-6°C)을 통과하면서 녹아 혼합형(mixed) 강수가 관측되었다.

마지막 특이 사례는 단시간에 스콜선(squall line)을 동반한 강수현상과 기온이 20°C에서 약 10시간 동안 0°C까지 급감하면서 자정 무렵 강설이 일부 관측된 2018년 3월 15일이다. 850 hPa 일기도를 보면 한반도 북쪽에 동서 방향으로 조밀한 등온선이 있고 남북방향으로 등고선이 거의 직각으로 교차하여 강한 경압성을 보이는 것을 알 수 있다(일기도는 제시하지 않음). 본 사례의 레윈존데 관측결과를 Fig. 5와 동일한 방식으로 Fig. 6에 제시하였다. 3월 15일 15~18시 사이에 하층의 풍향이 서풍계열에서 북풍으로 급격하게 바뀌면서 온도 경도가 크게 강화되었다. 또한 풍속 증가와 함께 한기의 유입은 18~21시경에 상층 1~2 km 층에서도 나타났으며, 구름은 약 4 km 고도까지 높게 발달하였다. 한기층 위에는 서풍 내지 남서풍 계열의 바람이 관측되었다. 이후 구름은 서서히 낮아져 구름 두께가 약 1 km까지 감소하였다. Figure 6에 제시된 상당운위 등치선의 조밀한 간격으로 판단할 때 강하게 발달한 스콜선(squall line)이 빠른 속도로 영동지역을 통과한 것으로 보인다.

이와 같은 특이(extreme) 강설사례들은 겨울철(혹은



**Fig. 5.** Time series of thermodynamic profiles, and snow and precipitation amounts along with 850 hPa temperature for 8~9 March 2018. The white flag, shading, and black line in the upper plot denote wind ( $m s^{-1}$ ), relative humidity (%), and equivalent potential temperature (K), respectively. In the figure, ddhh denotes day and hour, respectively.

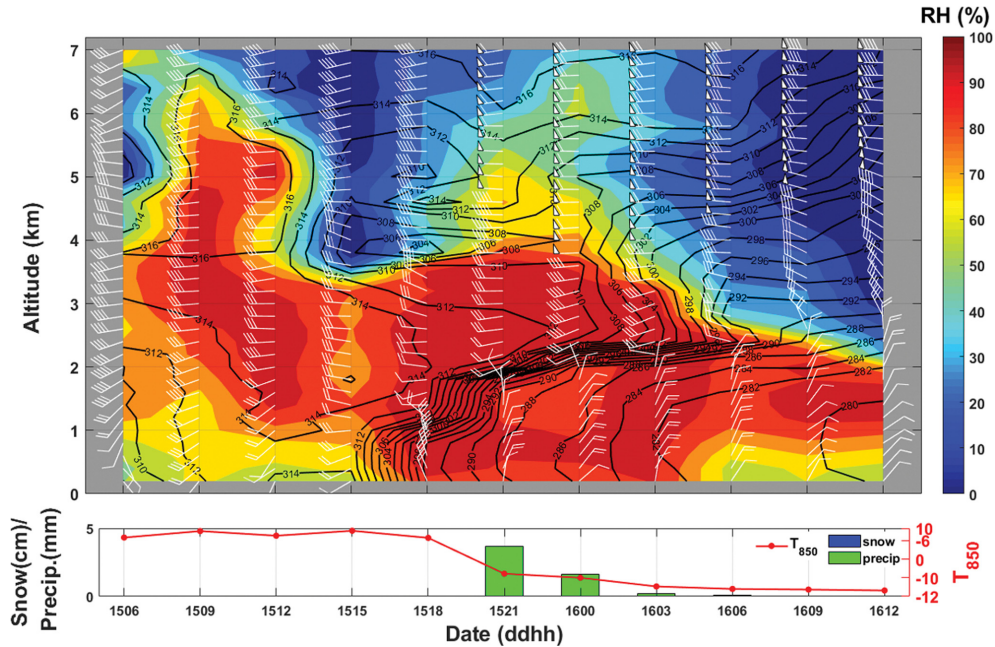


Fig. 6. The same as in Fig. 3 except for 15 March 2018.

초봄)임에도 불구하고 눈구름이 경계층 내에 제한되지 않고 두꺼운 대류운이 발달하며 단기간에 폭설을 유발하거나 갑작스러운 온도 급감으로 인하여 강설예보를 어렵게 하기 때문에, 영동지역 주민들과 관광객 모두에게 다양한 불편과 사회·경제적인 피해를 초래하고 있다.

### 3. YES-WEX 예비결과

#### 3.1 배경 및 개요

영동지역은 동해를 인접하고 있기 때문에 따뜻한 바다의 영향을 많이 받는다. 특히 겨울에는 인접 바다의 해수온도가 약 8~10°C 내외로 대기 온도에 비해 따뜻한 경향이 있다(Lee et al., 2012). 이로 인하여 시베리아 고기압이 절정기인 초겨울에 비해 늦겨울로 갈수록 시베리아 고기압의 세력이 약화되면서 한반도 남해 상을 지나는 저기압과 호응하는 과정에서 영동지역에 북풍 내지 북동풍 계열의 한기가 유입될 때 강설이 유발되는 경향을 보인다. 그러므로 동해상 해기차가 강설구름 생성에 중요한 영향을 미치지 않지만(Lee et al., 2012; Nam et al., 2014), 강설 특성이 해기차에 의해 선형적으로 결정되는 것은 아니다. 즉, 동해 효과 강설 현상에는 해기차가 필수조건으로 작용하지만 강설량, 강설의 위치 및 시간 그리고 강도에는 동해 효과 이외에 태백산맥에 의해 유도되는

국지적인 기상 메커니즘이 작용하게 된다. 그리고 지형적인 효과에 의한 약한 강설이나 해안선 부근의 강설 위치 등에 대한 예보는 여전히 어려운 실정이다.

ESSAY 캠페인 주요 결과에 의하면 동해 효과 강설은 주로 종관 규모 일기 패턴에 의해 지배를 받기 때문에 거시적인 규모에서 강설예보의 정확도는 높은 편이다. 하지만 종관 강제력이 강하지 않은 사례들의 강설 예보는 특히 어려운 데, 이는 주로 지형적인 요인에 의해 기인한다. 예를 들면, 늦겨울 또는 초봄(2~3월)에 북쪽 혹은 북동쪽에서 내려오는 한기가 태백산맥에 부딪칠 때 대기가 정적으로 매우 안정하기 때문에 태백산맥을 넘지 못하고 북북서에서 남동쪽 방향으로 산맥을 따라 평행하게 바람이 불게 된다. 이는 해외에서도 보고된 바 있는 산맥의 장벽효과에 의한 강풍(barrier jet)의 일종이라고 할 수 있다. 세계적으로 잘 알려진 장벽 제트(barrier jet)로는 북미대륙 서쪽 시에라 네바다 산맥을 따라 평행하게 북쪽으로 부는 바람(Kingsmill et al., 2013), 남미 안데스 산맥을 따라 남쪽으로 부는 바람 등이 있다(Garraud and Munoz, 2005). 이와 같은 바람은 수천 km에 해당하는 종관 규모 바람이지만 영동지역은 백 km 이내의 중규모 현상에 가깝다. 장벽 제트와 더불어 영동지역에서 고려해야 할 중규모 기상현상이 바로 한기축적(Cold Air Damming: CAD) 현상이다. CAD는 산맥에 수직으로 부는 바람이 산맥과 평행하게 저위도 방향

으로 풍향이 바뀌어 불면서 상대적으로 차가운 공기가 산사면에 축적되는 현상으로 정의된다(Dunn, 1987; Bell and Bosart, 1988). CAD는 겨울철 강수 입자의 성장(phase)을 변화시킬 수 있으며, 한랭전선을 형성하여 강설 위치를 변화시킬 수 있는 것으로 보고되고 있다(Stark et al., 2013). 국내에서도 Lee and Kim (2008)과 Lee and Xue (2013)는 수치모의를 통해 영동 해안지역에 한기축적으로 인한 전선 형성 모델을 최초로 제시한 바 있지만 정밀한 관측이 부족하여 종관분석과 수치모형을 활용한 연구에 그쳤다.

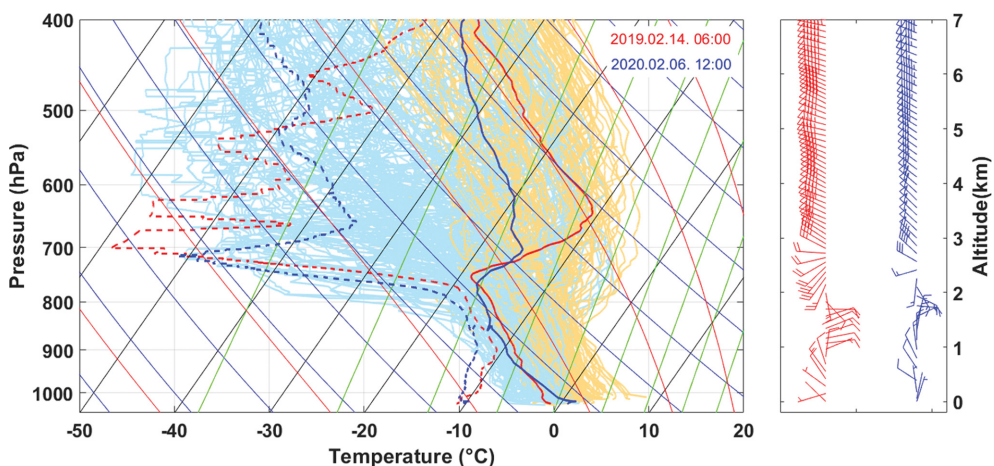
장벽 제트나 CAD와 같은 중규모 기상현상을 이해하기 위해서는 넓은 지역에 고르게 분포한 관측망, 시간간격이 조밀한 레윈존데 탐측, 고해상도의 상시 대기원격관측(레이더와 위성) 등이 동시에 필요하다. 이러한 측면에서 지상, 상층, 동해 상공 등에서 동시에 통합집중 관측캠페인, ‘강원영동 공동 입체기상관측(YES-WEX)’ 캠페인이 시작되었다(Kim et al., 2021b). 자세한 관측지점, 관측방법 및 기간 등은 특별호 Kim et al. (2021b), Kim and Kwon (2021) 등에 상세히 소개되어 있다. 현재까지 진행된 YES-WEX 캠페인 강설 연구의 중요 성과중의 하나는 태백산맥 동쪽 산사면에 한기가 축적되는 CAD 현상이 일부 확인된 것이다. Kim et al. (2021c)은 YES-WEX 캠페인 기간중에 한기축적 사례인 2019년 2월 14일과 2020년 2월 6일에 대해 집중 분석하였다.

### 3.2 주요 예비결과

Figure 7은 YES-WEX 캠페인으로 확인된 두가지 CAD 사례의 온도, 이슬점 온도와 바람의 연직구조를

나타낸 것이다. CAD 사례시 대기열역학적인 구조와 일반 동해 효과 강설사례들과 비교하기 위하여 그림 배경에 Fig. 3에 제시된 강설기간 154개 탐측(sounding) 온도와 이슬점 온도의 연직구조를 함께 제시하였다. CAD 사례시 하층의 온도가 ESSAY 전체 강설기간에 비해 가장 낮은 범위에 해당되는 것을 잘 보여주고 있다. 참고로 두 개 CAD 사례 모두 850 hPa 평균 온도는 약  $-13\sim-12^{\circ}\text{C}$ 로 한기 강도는 비슷했지만, 2019년 2월 14일 CAD 사례가 역전층 강도와 두께는 각각 5 K, 1.5 km로, 2020년 2월 6일 CAD 사례의 2.0 K, 0.7 km 보다 두 배 가량 강하게 나타났다. 고도 1 km 이하에서 북서풍 계열의 바람이 불고 있었으며, 바로 위층에 북동풍 내지 북풍계열의 바람이 나타나고 있었다. 하층의 바람은 일반적인 장벽 제트보다 약한 약  $5\text{ m s}^{-1}$  이하의 북서풍이 일정하게 불고 있었고, 북동풍 계열 바람 층보다 두껍게 형성된 것을 잘 보여주고 있다. Kim et al. (2021c)은 이를 종관장에 의해 유발된 북동풍 계열의 한기가 태백산맥에 가로막혀 산맥을 따라 나란히 부는 장벽 제트(북서풍 계열)를 타고 남하하면서 태백산맥 동쪽 산사면 부근에 한기 축적(CAD)을 형성한 것으로 설명하였다. 그리고, 강설 예보를 어렵게 하는 CAD의 중요 특징으로 다음과 같은 4가지 정량적인 기준을 제시하였다.

- 1) 850 hPa 온도는 263 K 이하,
  - 2) 하층 북서풍계열 층 두께가 북풍 내지 북동풍계열 층 두께보다 큰 경우,
  - 3) 하층 구름위에 역전층 강도는 1.5 K 이상,
  - 4) 역전층 두께는 500 m 이상
- 하지만, 위 기준은 2개 CAD 사례를 기준으로 제시



**Fig. 7.** Vertical profiles of temperature (solid line) and dew-point temperature (dashed line) for the CAD events of 14 February 2019 and 06 March 2020 in comparison with the whole soundings of typical snowfall period (same as in Fig. 3) for the ESSAY campaign.



된 것이기 때문에 향후 지속적인 관측과 수치모델링 분석을 통해 보다 정량적인 기준이 제시되어야 할 것이다. 그리고 강설 예보 향상을 위해서는 추가 CAD 사례들을 확보하여 한기 및 역전층의 정량적인 강도, 그리고 태백산맥을 따라 부는 하층 북서풍 기류 층의 두께에 따른 강설 구름의 발달 정도 및 강설 위치, 동해상과 영동 해안가 사이의 온도 경도 등의 정량적인 지표가 필요하다.

#### 4. 요약 및 제안

##### 4.1 요약

겨울철 영동지역은 한반도에서 강설의 영향을 가장 강하게 받는 지역이다. 이러한 강설의 중요성으로 영동 지역의 강설 연구는 꾸준히 수행되었지만, 기존 선행 연구들은 관측 및 인프라 등의 부족으로 대부분 종관분석이나 수치모델 기반의 접근이었고 2010년대 이후 점차 강설 관측 캠페인이 시작되었다. 대표적인 캠페인이 ESSAY 관측(2014~2019) 이었고, 2019년에는 ‘강원 영동 공동 입체기상관측(YES-WEX)’이 시작되었다. 본 연구에서는 ESSAY 주요 관측결과를 간략하게 정리하였고, 2019년부터 시작된 YES-WEX 캠페인의 주요 예비결과를 소개하였다.

영동지역 강설은 일차적으로 동해상의 해기차에 기인한 전형적인 동해 효과에 의해 주로 영향을 받지만, 이외에도 지형적인 효과에 의해 강설이 강화되는 사례들이 자주 관측된다. 예를 들면 본문에서도 제시된 바와 같이 대류권계면 하강으로 인한 뇌전을 동반한 깊은 대류운에서의 단기 폭설(2017년 1월 20일), 강하게 발달한 기압골 통과에 따른 연직대류운과 경압불안정을 동반한 강설(2018년 3월 8~9일), 그리고 강하게 발달한 스콜선 통과에 따른 12시간 이내의 20°C 가량의 온도 급감을 동반한 강수(2018년 3월 15일) 현상 등이 있다.

이와 더불어 종관 강제력이 상대적으로 약하게 작용하는 조건에서는 동해 효과와 태백산맥에 의한 장벽 제트나 한기축적(CAD) 현상과 같은 중규모 기상 현상이 강설량뿐 만 아니라 강설 위치나 시간 등에도 중요한 역할을 하고 있음을 YES-WEX 캠페인에서 확인할 수 있었다. 하지만 장벽 제트와 CAD 메커니즘을 정량적으로 이해하기 위해서는 현재 진행중인 YES-WEX 캠페인이 지속되어야 하며, 새로운 관측성과를 기반으로 관측 캠페인의 보완 및 개선이 필요하다.

강설 예측성 측면에서 살펴볼 때, 강한 종관장의 지배를 받는 조건의 전형적인 동해 효과 강설 현상은 상대적으로 강설 예보의 정확도가 높은 편이지만 종관장이 약한 조건에서 동해와 지형적인 영향을 받는 중규모 기상 현상이 두드러지게 나타날 때는 강설 위

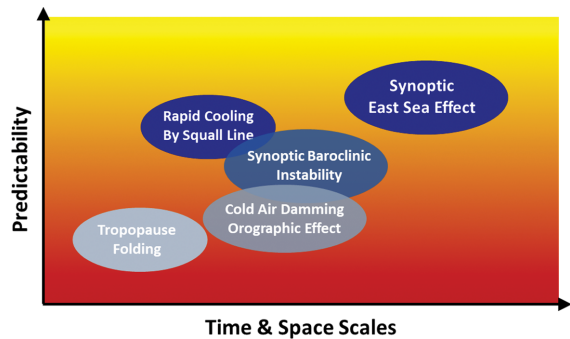


Fig. 8. Diagram of overall predictability against time and space scales for the various snowfall episodes based on the observation. Yellow to red coloring in the background denotes societal and economic damages inversely proportional to predictability.

치나 강도 변화가 크기 때문에 강설 예보의 어려움이 큰 실정이다. 결국 지형적인 영향을 많이 받는 강원 영동지역에서 겨울철 강설 예보 정확도 향상을 위해서는 지형적인 영향이 반영된 중규모 기상현상 이해가 필수적이라 할 수 있다. Figure 8은 ESSAY와 YES-WEX 캠페인 관측 성과를 기반으로 정성적인 측면에서 시-공간 규모에 대한 강설 예측가능성을 개략적으로 제시한 것이다. 본문에서도 강조한 바와 같이 종관 규모의 전형적인 동해 효과 강설은 상대적으로 예측가능성이 큰 편이지만 태백산맥 장벽효과로 인한 한기축적을 동반한 강설(2019년 2월 14일과 2020년 2월 6일)이나 대류권계면 하강과 연관된 강설 현상(2017년 1월 20일 사례)은 예측가능성이 상대적으로 낮은 수준에 머물고 있다. 반면에 강한 스콜선(squall line)을 동반하여 온도 급감에 따른 강설(2018년 3월 15일)이나 경압불안정에 의한 중규모 강설현상(2018년 3월 8~9일)은 지형효과에 의한 강설보다는 예측가능성이 좋은 것으로 판단된다. 강설 예측가능성이 낮을수록 강설로 인한 사회·경제적인 피해는 반비례해서 커질 수밖에 없기 때문에 지형적인 영향을 크게 받는 YES-WEX와 같은 중규모 기상현상 집중관측은 중요하다.

##### 4.2 제안

향후 YES-WEX 캠페인의 추진 방향은 기본적으로 모든 필요 관측장비들의 지속적인 운영에 한계가 있기 때문에 상시관측과 집중관측을 병행하는 관측설계가 필요하다. 상시관측은 영동지역 겨울철에 AWS (Automatic Weather Station)와 ASOS (Automatic Synoptic Observation Station)기반의 지상관측과 더불어 레이더 및 위성 원격관측을 통해 지속적인 모니터

링이 이루어져야 한다. 특히 관측대상 핵심지역으로 중요 관측기기가 집중 배치된 강원지방기상청 북강릉 지점과 강릉원주대학교 지점을 슈퍼사이트(super site)로 선정하여 관측 캠페인의 중심(center) 역할을 해야 한다. 또한 영동지역에는 2018 동계올림픽때 평창 산지에 설치되었던 24대의 통합기상관측장비를 강릉시 주변에 이전 배치시켜 운영 중에 있기 때문에 (Hwang et al., 2020), 이들은 슈퍼사이트의 보조 관측 지점들로서 지형효과로 인해 강수 변동성이 큰 영동 지역에서 향후 수십 km 이내 강수량 수평분포 파악에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

그리고 YES-WEX 예비결과에서도 알 수 있듯이 특이 강설사례가 예상되는 특정 에피소드에 대해 YES-WEX와 같이 학연관 공동으로 조밀한 시간 간격(3시간) 레원존데 관측, 그리고 에피소드 발생 이전 시간대에 슈퍼사이트의 풍상측 지역이라고 할 수 있는 동해상의 기상항공기 ‘나라’호 드롭존데 관측 및 ‘기상 1호’ 선박에서 레원존데 관측이 동시에 수행되어야 한다. YES-WEX 캠페인은 동풍에 의한 강설 사례시의 눈구름이 생성되는 풍상측에서의 관측이나 강설 발생 이전 시간대의 탐측이 특히 중요하다. 여기서 풍상측은 강릉(super site)을 기준으로 볼 때 주로 북쪽 방향인 속초나 북동쪽 방향인 동해상을 의미한다. 눈구름이 발달하는 에너지 생성 영역의 레원존데 탐측은 습윤정적에너지를 평가하는 핵심 자료이면서, 강릉 지점과의 비교 탐측으로써 의미가 있다. 물론 현재 캠페인에서도 풍상측 탐측이 이루어졌지만, 시간이 일치하지(co-location) 않거나 샘플이 부족한 문제가 있었다. 또한 YES-WEX 캠페인에 보완되어야 할 관측은 구름 레이더 관측과 항공기 활용 구름 미세물리 관측이다. 현재 강수 레이더 관측은 이루어졌지만 강설 이전의 눈구름 발달 메커니즘 이해를 위해서는 구름속의 빙정 생성 및 성장 등 미세물리특성에 대한 이해가 필수적이다.

영동지역에서 지금까지 수행된 관측 캠페인 성과로 판단할 때, 2019년부터 시작된 YES-WEX 캠페인은 복잡한 지형효과에 의해 유발되는 중규모 기상현상을 이해하는 기본 플랫폼(platform)이 될 것이다. 향후 YES-WEX 캠페인의 다양한 관측 방법이나 주요 연구성과는 지형이 복잡한 한반도의 다른 지역에서 관측캠페인 계획 수립이나 수행에 중요한 본보기가 될 것으로 기대된다. 또한 나아가 YES-WEX의 입체적인 상세 집중관측결과는 수치모델 검증이나 개선에도 크게 기여할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

이 연구는 강원지방기상청 연구개발사업인 ‘강원영

동 동풍·강풍의 특화된 관측·예보기술 개발’ 사업과 국립기상과학원 융합기술연구부의 ‘인공강우 실험 수치모델링기술 개발 연구’ 사업의 지원으로 수행되었습니다. 그리고, 본 논문의 개선을 위해 좋은 의견 및 조언을 해 주신 두 분 심사위원께 감사드립니다.

## REFERENCES

- Alcott, T. I., and W. J. Steenburgh, 2013: Orographic influences on a Great Salt Lake-effect snowstorm. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 2432-2450, doi:10.1175/MWR-D-12-00328.1.
- Bell, G. D., and L. F. Bosart, 1988: Appalachian cold-air damming. *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 137-161.
- Dunn, L., 1987: Cold air damming by the front range of the Colorado Rockies and its relationship to locally heavy snows. *Wea. Forecasting*, **2**, 177-189.
- Garreaud, R. D., and R. C. Munoz, 2005: The low-level jet off the west coast of subtropical South America: Structure and variability. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 2246-2261, doi:10.1175/MWR2972.1.
- Gehring, J., A. Oertel, É. Vignon, N. Jullien, N. Besic, and A. Berne, 2020: Microphysics and dynamics of snowfall associated with a warm conveyor belt over Korea. *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, 7373-7392, doi:10.5194/acp-20-7373-2020.
- Hwang, H., S.-H. Eun, B.-G. Kim, S.-J. Park, and G.-M. Park, 2020: Occurrence characteristics of sea breeze in the Gangneung Region for 2009~2018. *Atmosphere*, **30**, 221-236, doi:10.14191/Atmos.2020.30.3.221 (in Korean with English abstract).
- Kindap, T., 2010: A severe sea-effect snow episode over the city of Istanbul. *Nat. Hazards*, **54**, 707-723, doi:10.1007/s11069-009-9496-7.
- Kristovich, D. A. R., and Coauthors, 2017: The Ontario Winter Lake-Effect Systems field campaign: scientific and educational adventures to further our knowledge and prediction of lake-effect storms. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 315-332, doi:10.1175/BAMS-D-15-00034.1.
- \_\_\_\_\_, L. Bard, L. Stoecker, and B. Geerts, 2018: Influence of Lake Erie on a Lake Ontario lake-effect snowstorm. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **57**, 2019-2033, doi:10.1175/JAMC-D-17-0349.1.
- Kim, J.-E., T.-Y. Kwon, and B. Y. Lee, 2005: Characteristics of sensible heat and latent heat fluxes over the East Sea related with Yeongdong heavy snowfall events. *Ocean and Polar Res.*, **27**, 237-250 (in Korean with English abstract).

- Kim, Y.-J., B.-G. Kim, J.-K. Shim, and B.-C. Choi, 2018a: Observation and numerical simulation of cold clouds and snow particles in the Yeongdong region. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 499-510, doi:10.1007/s13143-018-0055-6.
- Kim, H.-M., S.-P. Jung, S.-R. In, and B.-C. Choi, 2018b: A case study of heavy snowfall with thunder and lightning in Yeongdong area. *Atmosphere*, **28**, 187-200, doi:10.14191/Atmos.2018.28.2.187 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.-H., D.-H. Ko, D.-K. Seong, S.-H. Eun, B.-G. Kim, B.-J. Kim, C.-G. Park, and J.-W. Cha, 2019: Quantitative analysis of snow particles using a multi-angle snowflake camera in the Yeongdong region. *Atmosphere*, **29**, 311-324, doi:10.14191/Atmos.2019.29.3.311 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.-J., and T.-Y. Kwon, 2021: Analysis of spatial variability of surface wind during the Gangwon Yeongdong Wind Experiments (G-WEX) in 2020. *Atmosphere*, **31**, 377-394, doi:10.14191/Atmos.2021.31.4.377 (in Korean with English abstract).
- Kim, K., W. Bang, E.-C. Chang, F. J. Tapiador, C.-L. Tsai, E. Jung, and G. Lee, 2021a: Impact of wind pattern and complex topography on snow microphysics during International Collaborative Experiment for PyeongChang 2018 Olympic and Paralympic winter games (ICE-POP 2018). *Atmos. Chem. Phys.*, **21**, 11955-11978, doi:10.5194/acp-21-11955-2021.
- Kim, J.-E., T.-Y. Kwon, G.-M. Park, Y.-D. Han, and D.-H. Shin, 2021b: Gangwon Yeongdong Wind Experiments (G-WEX) Pilot Study: Downslope windstorms in the Taebaek Mountains, South Korea. *Atmosphere*, **31**, 361-376, doi:10.14191/Atmos.2021.31.4.361 (in Korean with English abstract).
- Kim, M. G., B.-G. Kim, S.-H. Eun, Y.-J. Chae, J.-H. Jeong, Y.-G. Choi, and G.-M. Park, 2021c: Analysis of the Relationship of Cold Air Damming with Snowfall in the Yeongdong Region. *Atmosphere*, **31**, 421-431, doi:10.14191/Atmos.2021.31.4.421 (in Korean with English abstract).
- Kingsmill, D. E., P. J. Neiman, B. J. Moore, M. Hughes, S. E. Yuter, and F. M. Ralph, 2013: Kinematic and thermodynamic structures of Sierra barrier jets and overrunning atmospheric rivers during a landfalling winter storm in Northern California. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 2015-2036, doi:10.1175/MWR-D-12-00277.1.
- Ko, A.-R., B.-G. Kim, S.-H. Eun, Y.-S. Park, and B.-C. Choi, 2016: Analysis of the relationship of water vapor with precipitation for the winter ESSAY (Experiment on Snow Storms At Yeongdong) period. *Atmosphere*, **26**, 19-33, doi:10.14191/Atmos.2016.26.1.019 (in Korean with English abstract).
- Kwon, T.-Y., and Coauthors, 2020: Development of observation and forecast technology for easterly snowfall and strong windstorm in the Yeongdong region. Gangwon Regional Office of Meteorology, 144 pp (in Korean).
- Lee, H., and T.-Y. Lee, 1994: The governing factors for heavy snowfalls in Yeongdong area. *J. Korean Meteor. Soc.*, **30**, 197-218 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.-R., K.-E. Kim, J.-M. Yoo, and W.-J. Lee, 2002: Tropopause undulation associated with explosive development of a cyclone. *J. Korean Meteor. Soc.*, **38**, 431-463 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.-G., and J.-S. Lee, 2003: A numerical study of Yeongdong heavy snowfall events associated with easterly. *J. Korean Meteor. Soc.*, **39**, 475-490 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, and Y. J. Kim, 2008: A numerical simulation study using WRF of a heavy snowfall event in the Yeongdong coastal area in relation to the northeasterly. *Atmosphere*, **18**, 339-354 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, and M. Xue, 2013: A study on a snowband associated with a coastal front and cold-air damming event of 3-4 February 1998 along the eastern coast of the Korean Peninsula. *Adv. Atmos. Sci.*, **30**, 263-279, doi:10.1007/s00376-012-2088-6.
- Lee, J.-W., S.-H. Eun, B.-G. Kim, and S.-O. Han, 2012: An analysis of low-level stability in the heavy snowfall event observed in the Yeongdong region. *Atmosphere*, **22**, 209-219, doi:10.14191/Atmos.2012.22.2.209 (in Korean with English abstract).
- Lee, T.-Y., and Y.-Y. Park, 1996: Formation of a mesoscale through over the Korean peninsula during an excursion of Siberian High. *J. Meteor. Soc. Jpn. Ser. II*, **74**, 299-323.
- Murakami, M., Y. Yamada, T. Matsuo, K. Iwanami, J. D. Marwitz, and G. Gordon, 2003: The precipitation process in convective cells embedded in deep snow bands over the Sea of Japan. *J. Meteor. Soc. Jpn. Ser. II*, **81**, 515-531.
- Nam, H.-G., B.-G. Kim, S.-O. Han, C. Lee, and S.-S. Lee, 2014: Characteristics of easterly-induced snowfall in Yeongdong and its relationship to air-sea temperature difference. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 541-552, doi:10.1007/s13143-014-0044-3.
- Park, J.-H., K.-E. Kim, and B.-H. Heo, 2009: Comparison

- of development mechanisms of two heavy snowfall events occurred in Yeongnam and Yeongdong regions of the Korean peninsula. *Atmosphere*, **19**, 9-36 (in Korean with English abstract).
- Ribeiro, B. Z., and L. F. Bosart, 2018: Elevated Mixed Layers and associated severe thunderstorm environments in South and North America. *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 3-28, doi:10.1175/MWR-D-17-0121.1.
- Seo, E.-K., and J.-G. Jhun, 1991: A case study of the heavy snowfalls occurred in the Korean peninsula from 29 January to 1 February 1990. *Atmosphere*, **27**, 165-179 (in Korean with English abstract).
- Seo, W.-S., S.-H. Eun, B.-G. Kim, A.-R. Ko, D.-K. Seong, G.-M. Lee, H.-R. Jeon, S.-O. Han, and Y.-S. Park, 2015: Study on characteristics of snowfall and snow crystal habits in the ESSAY (experiment on snow-storms at Yeongdong) Campaign in 2014. *Atmosphere*, **25**, 261-270 (in Korean with English abstract).
- Stark, D., B. A. Colle, and S. E. Yuter, 2013: Observed microphysical evolution for two east coast winter storms and the associated snow bands. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 2037-2057, doi:10.1175/MWR-D-12-00276.1.
- Steenburgh, W. J., and S. Nakai, 2020: Perspectives on sea- and lake-effect precipitation from Japan's "Gosetsu Chitai". *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **101**, E58-E72, doi:10.1175/BAMS-D-18-0335.1.
- Veals, P. G., and W. J. Steenburgh, 2015: Climatological characteristics and orographic enhancement of lake-effect precipitation east of Lake Ontario and over the Tug Hill Plateau. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 3591-3609, doi:10.1175/MWR-D-15-0009.1.