

ESSAY 캠페인 기간 중 발생한 영동 지역 폭설사례 분석

김예지¹⁾ · 김병곤^{1)*} · 박석우²⁾ · 하현재¹⁾ · 김희영¹⁾ · 김지혜¹⁾

¹⁾강원대학교 대기환경과학과, ²⁾국립기상과학원 기상응용연구부

(접수일: 2026년 4월 29일, 수정일: 2026년 6월 12일, 게재확정일: 2026년 7월 1일)

Case Study of the Extreme Snowfall Events over the Yeongdong Region during the ESSAY Campaign

Ye-Ji Kim¹⁾, Byung-Gon Kim^{1)*}, Seok-Woo Park²⁾, Hyeon-Jae Ha¹⁾,
Hee-Young Kim¹⁾, and Jee-Hye Kim¹⁾

¹⁾Department of Atmospheric and Environmental Sciences, Kangwon National University, Gangneung, Korea

²⁾Meteorological Applied Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Seogwipo, Korea

(Manuscript received 29 April 2026; revised 12 June 2026; accepted 1 July 2026)

Abstract A long-term ESSAY (Experiment on Snow Storms At Yeongdong) campaign has been made since 2014 to understand the mechanism of severe snowfall hazard. Among the 57 events, two extreme cases exhibited snowfall rates exceeding three times the mean ($\sim 0.8 \text{ cm h}^{-1}$) of typical East Sea effect snowfall events. This study investigates characteristics of these two episodes (EP1: 20 Jan 2017 and EP2: 17 Mar 2025), and provides a quantitative analysis of snowflake properties. A comprehensive analysis was conducted using synoptic weather charts, reanalysis data, radiosonde, satellite image and Multi-Angle Snowflake Camera (MASC) data. The main common features are as follows: 1) A trough accompanied by a cold core at the upper level moved toward the Korean Peninsula. 2) Radiosonde observations confirmed northeasterly inflow between 800–500 hPa and showed an inverted-V shaped vertical thermodynamic structure. 3) A backdoor cold front formed over the East Sea and moved southwestward with northeasterly winds in the middle troposphere. 4) A 4.5 PVU (potential vorticity unit, $10^{-6} \text{ K m}^2 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$) on the 305 K isentropic surface advected to Yeongdong region. Finally, 5) MASC observations showed a large number of smaller graupels with complexity values close to 1.3, suggesting the possible occurrence of fragmentation. To improve the forecast of extreme snowfall events in the Yeongdong region, further investigation should be conducted for the mechanisms of backdoor cold front and orographic effect.

Key words: Tropopause folding, Backdoor cold front, Yeongdong snowfall, Radiosonde, Multi-Angle Snowflake Camera

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

1. 서 론

강원도 영동 지역은 동해와 태백산맥에 인접하고 있어 가뭄, 편(Foehn), 폭설, 폭우, 강풍 등 국지적 재해 기상현상이 다른 지역에 비해 자주 발생한다. 특히 겨울철 국지적 대설로 인한 교통사고, 비닐하우스와 가건물 파손과 같은 인명 및 재산 피해를 크게 입는다. 이로 인한 피해를 줄이기 위해서는 영동 지역의 다양한 강설 사례에 관한 체계적인 연구가 절실히 요구된다.

영동 강설과 관련된 국내 연구를 살펴보면 Lee (1999)는 역전층 고도가 낮고 상층부는 건조하며 동해상에 뚜렷한 온도골이 위치하고, 850 hPa과 해수면 온도의 기온 차이가 클수록 강릉의 강설량이 대관령보다 더 크게 나타남을 제시한 바 있다. Kwak and Yoon (2000)은 시베리아 고기압의 확장과 동해 또는 일본 부근 저기압 후면의 대기 불안정이 영동 대설을 유발하고, 강릉은 남서풍 그리고 속초는 북서풍 유입 시 대설이 발생하는 경향을 확인하였다. Nam et al. (2014)는 강설 강도를 분류하여 대류 불안정 구조와 해기차에 따른 열역학적 특성을 관측 및 재분석 자료를 통해 분석하였다. 또한, 선행 연구결과에 의하면 영동 지역의 강설 구름은 북풍 또는 북동풍과 함께 나타나는 동해효과의 영향으로 고도 1~2 km의 경계층에서 자주 형성되었다(Lee and Kim, 2008; Kwon et al., 2015; Ko et al., 2016; Seo et al., 2016; Kim et al., 2021a). 그러나 Cho and Kwon (2014)은 영동 지역 강설이 중규모 대류운에 의해서도 발생할 수 있음을 제시하였다. Kwon et al. (2014)는 동해상 부저기압에 의한 극한 대설 사례를 분석하여 중관 기상 조건 기반의 예보 가이드스를 제시한 바 있다. 최근 연구에 따르면, 한기 축적이 영동을 중심으로 강하게 나타날 경우 눈구름이 내륙으로 진입하지 못하고 해안가 또는 동해상에 제한되어 영동 지역에 실제 예보 보다 적은 강설이 발생한 반면에, 한기 축적이 약하게 나타날 경우 내륙과 산 중턱에서 강설이 나타날 수도 있다(Kim et al., 2021b). Chae et al. (2024)는 영동 지역에서 관측된 얼음 싸라기(ice pellet)를 포함한 혼합상(mixed-phase) 강수가 하층 한랭 공기 위에 온난 공기층이 위치하는 뒤집어진 S (reversed-S) 형태의 열역학 구조를 동반함을 국내에서는 최초로 확인하였다. Choi et al. (2024)는 2개의 영동 지역 강설 에피소드를 집중 분석한 결과, 하층의 급격한 기온 하강이 눈 결정 습성과 성장 변화를 초래하였고, 이러한 기온 급감은 지형적 요인에 의해 유발된 6시간 이내의 중규모 기상현상과 연관이 있음을 제시하였다.

한편, 2014년부터 현재까지 매년 겨울철마다 강원

영동 지역에서 장기간의 대설 관측 캠페인(Experiment on Snow Storms At Yeongdong, ESSAY)이 수행되고 있다(Ko et al., 2016; Kim et al., 2021a). ESSAY 캠페인에서 겨울철 해기차에 의한 동해효과 강설이 대다수 관측되었고, 일부는 동해효과로 생성된 하층운과 서쪽에서 넘어온 상층운이 상호작용하여 증설되는 Seeder-Feeder 현상, 그리고 한기 축적 현상 등 총 약 57 여 개의 사례가 관측되었다. 이 사례들 중, 동해효과 강설 강도의 3배 이상의 강도를 보이는 특이 사례가 두 차례 관측되었다. 첫 번째 사례는 2017년 1월 20일로, 뇌전과 뒷문 한랭전선(backdoor cold front)을 동반한 극저기압이 북강릉에 3시간 신적설 약 19.3 cm(강설 강도 6.43 cm h⁻¹)의 기록적인 강설을 유발하였다. Ahn et al. (2019)은 하층의 강한 경압 불안정이 저기압 발달에 기여하였음을 보였고, 라디오존데에서 강한 연직 시어와 약 300 hPa까지 발달한 두꺼운 습윤층을 확인하였다. 또한 상층 양의 위치 소용돌이도 아노말리가 한반도로 남동진하면서 동해상에 강한 저기압성 소용돌이도가 형성되었고, 하부 성층권 공기가 중·상부 대류권으로 유입되어 저기압의 발달을 강화했으며, 대류권계면 접합이 동반되었음을 제시하였다. Kim et al. (2018a)은 중관 일기도와 수치 모의를 통해 강한 동풍 유입으로 해기차가 크게 형성되었고, 잠열 방출로 인한 응결열에 따른 대기 불안정 강화로 저기압이 급격히 발달할 수 있었음을 밝혔다. 또한 Kwon et al. (2018)은 연직바람 관측장비와 라디오미터, 그리고 라디오존데를 이용해 강수 시점의 연직 바람과 기온의 특징을 조사하였고 본 사례가 강한 대기 불안정과 중위도 한랭 전선형 강수임을 보였다. 이상의 선행연구들은 2017년 1월 20일 사례에서 저기압 발달과 강설 발생에 기여한 중관, 열·역학적 요인을 규명하는데 초점을 두었으나 강설 입자의 모양, 크기 분포 등 강설의 미세물리적 특성에 대한 분석은 충분히 이루어지지 않은 한계가 있었다.

두 번째 사례는 2025년 3월 17일로, 북강릉 3시간 신적설 약 17.4 cm(강설 강도 5.80 cm h⁻¹)를 기록하며 2017년 1월 20일 사례와 유사한 강설 강도를 보였으나, 해당 사례에 대한 분석은 아직 충분히 이루어지지 않았다. 이에 본 연구는 지난 10년간 ESSAY 집중 관측 사례 중 단시간 강한 강설이 나타난 2017년 1월 20일(EP1)과 2025년 3월 17일(EP2), 두 사례의 강설 및 주요 기상학적인 특성을 이해하고, Kim et al. (2019)의 눈 결정 정량 분석 방법을 적용하여 극한 강설 사례에서 나타나는 눈 결정 특성을 정량적으로 제시하고자 한다. 또한 대류권계면 접합을 동반한 극한 강설 사례와 영동 지역의 일반적인 동해효과 강설과의 차이를 분석하여 향후 유사 폭설 사례의 예보 향상에 기여하고자 한다.

2. 연구 자료 및 방법

2.1 연구 자료

본 연구에서 극한 강설 사례의 기상학적 특성을 이해하기 위하여 에피소드별로 기상청에서 발행한 지상, 500 hPa 일기도, 위성, 그리고 통합 모델(Unified Model, UM)과 한국형수치예보모델(Korean Integrated Model, KIM) 기반의 초단기예보모델(Korea Local Analysis and Prediction System, KLAPS) 자료를 사용하였다. 누적 강수량, 적설 및 3시간 신적설은 북강릉 종관기상관측자료(Automated Synoptic Observing System, ASOS)에서 수집된 자료를 사용하였다. 폭설이 발생한 북강릉을 중심으로 연직 대기의 열역학적 특성을 진단하기 위하여 ESSAY 캠페인 동안 강원지방기상청 북강릉 관측소(BGN)와 강원대학교 강릉캠퍼스(KNUG)에서 수집된 라디오존데 자료를 사용하였다. 각 에피소드의 라디오존데 해상도는 집중 관측 기간에는 3시간 간격, 그 외 기간에는 6시간 간격이다.

극한 강설 사례의 눈 결정을 정량적으로 분석하기 위해 고해상도 눈 결정 카메라(Multi-Angle Snowflake Camera, MASC)를 사용하였으며 MASC 관측은 강원대학교 강릉캠퍼스 옥상에서 이루어졌다. MASC는 자유 낙하(free fall)하는 대기 수상체(hydrometeor)의 고해상도 이미지를 촬영함과 동시에 낙하 속도를 측정하는 장비이다. MASC 내부에는 눈 결정 각각도 촬영을 위해 3개의 카메라가 서로 36° 각도로 설치되어 있으며, 각 카메라는 약 10 cm 떨어진 동일 지점에 초점을 맞춘다. 또한 약 1 m s⁻¹로 빠르게 떨어지는 눈 결정을 촬영하기 위해 1/25000초의 속도로 카메라가 작동되고 야간 촬영이 가능하도록 LED 조명이 있으며, 카메라 작동 및 입자 낙하 속도 측정을 위해 얼음 형태의 작은 입자까지 감지할 수 있는 근적외선 동작 감지 장치가 내장되어 있다. MASC의 작동 원리와 구체적 사양은 Garrett et al. (2012)과 Kim et al. (2019)에 상세히 기술되어 있다.

영동 지역 분석에서 라디오존데 관측의 공간 대표성 한계를 보완하고자 ERA5 (ECMWF Reanalysis v5)를 사용하였다(<https://cds.climate.copernicus.eu>). ERA5는 ECMWF에서 제공되는 전구 자료로, 등압면, 단일면 그리고 등온위면 자료를 제공하며 0.25° × 0.25° 수평 해상도를 가진다. 등온위면 자료는 265 K부터 850 K까지 총 16개의 등온위면으로 구성되어 있으며, 분석에 사용된 주요 등온위면 변수는 위치 소용돌이도(potential vorticity), 등온위면의 바람 동서성분(u)과 남북성분(v), 그리고 기압 등이다. 등압면 자료는 1,000 hPa부터 1 hPa까지 총 37개의 기압 연직 층을 가지며, 분석에 사용된 주요 등압면 변수는 발산, 연직속도, 그리고 기압 등이다. 본 연구에서는 극한 강설 발

생 시 동반되는 대류권계면 접힘을 분석하기 위하여 등온위면 및 등압면 자료를 활용하였으며, EP1 (2017년 1월 19일 0900 LST~2017년 1월 21일 0800 LST)과 EP2 (2025년 3월 16일 0900 LST~2025년 3월 18일 0800 LST) 각각 48시간에 대해 분석하였다.

2.2 연구 방법

대류권계면 부근 상부 대류권 및 하부 성층권에서는 단일 운동 가정 시 공기가 등온위면을 따라 이동할 수 있다(Rasmussen and Turner, 2003; Lee et al., 2016). 즉 대류권계면 접힘(tropopause folding) 현상 발생 시, 양의 위치 소용돌이도 아노말리를 가진 하부 성층권의 공기가 등온위면을 따라 중·상부 대류권으로 유입될 수 있음을 의미한다(Lee et al., 2001). 이때 지상에서는 저기압성 순환이 유도되어 하층 저기압을 강하게 발달시킬 수 있다(Lee et al., 2002). 따라서 본 연구에서는 등온위면 위치 소용돌이도(isentropic potential vorticity)의 수평 분포를 분석하여 등온위면을 따라 이동하는 양의 위치 소용돌이도 아노말리의 흐름을 이해하고자 하였다. 또한 특정 지점의 위치 소용돌이도 연직 분포를 바탕으로, 하부 성층권 공기의 하강에 따른 역학적 대류권계면 고도 변화를 분석하였다. 세계기상기구(WMO, 1986)의 정의에 따라, 305 K 등온위면에서 위치 소용돌이도가 1.6 PVU (Potential Vorticity Unit, PVU, 10⁻⁶ K m² kg⁻¹ s⁻¹)인 곳을 역학적 대류권계면으로 정의하여, 1.6 PVU 이상의 값을 보이는 곳은 성층권으로 간주하였다. 열역학적 대류권계면은 기온 감률이 2°C km⁻¹ 이하로 감소하는 가장 낮은 고도로 정의하였다.

3. 연구 결과

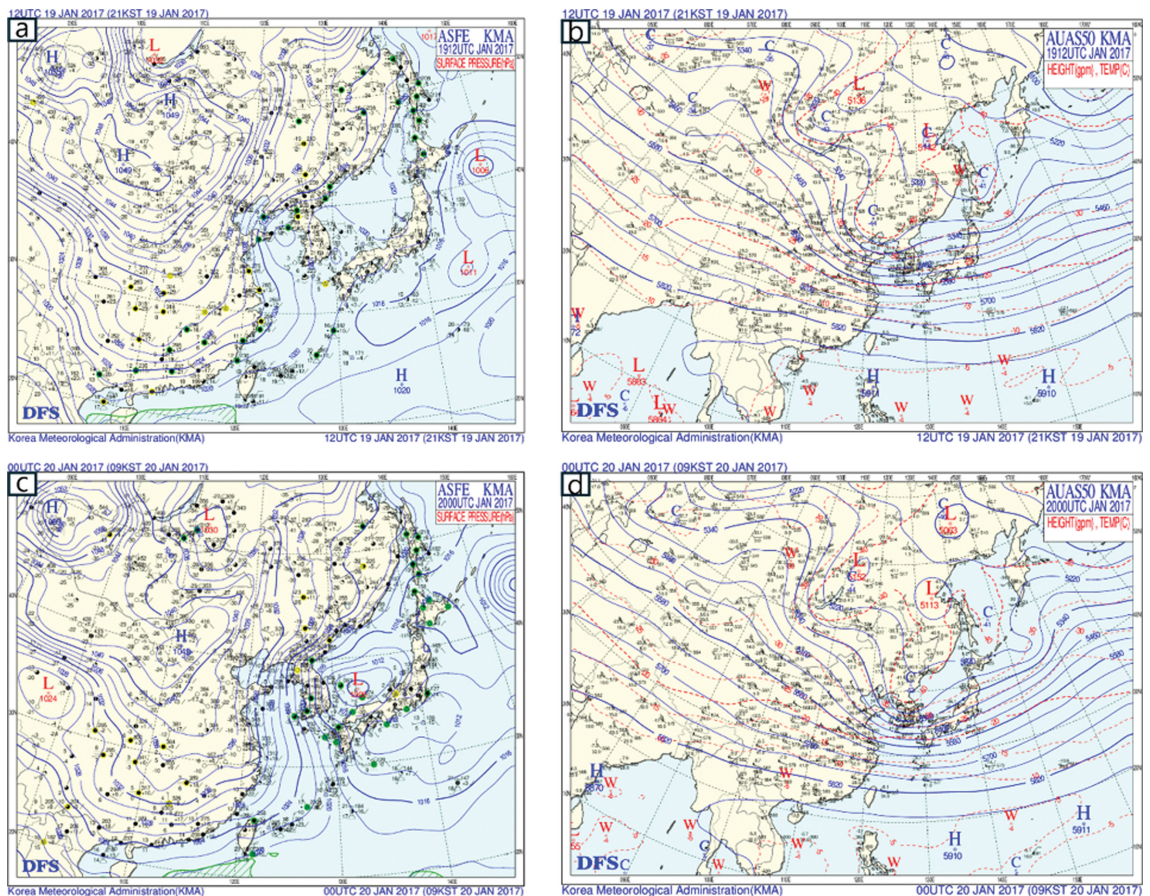
3.1 극한 강설 특성과 종관 조건

약 10년 간 축적된 57여 개의 관측 사례 중, 2017년 이후 관측된 동해효과 강설 17개와 극한 강설 2개 사례의 특징을 비교하여 Table 1에 제시하였다. 동해효과 강설과 극한 강설 사례의 해기차, 850 hPa 기온 및 풍속, 그리고 가강수량 평균은 대체로 유사한 반면, 강수 및 강설강도 모두 극한 강설 사례가 1.8 mm hr⁻¹, 3.0 cm hr⁻¹로 동해효과 대비 약 3배 크게 나타났다. 즉 동해효과와 극한 강설 사례는 주요 대기 환경 변수에서는 유사한 값을 보였으나, 강수(설) 강도 측면에서는 뚜렷한 차이를 보였다.

Figures 1과 2는 2017년 1월 20일과 2025년 3월 17일 각 에피소드별 12시간 간격 지상 일기도와 500 hPa 상층 일기도를 제시한 것이다. EP1에서는 2017년 1월 20일 0000 LST부터 전국적으로 눈·비가 관측되었고 누적 적설량이 원주 7.7 cm, 속초 33.6 cm, 동

Table 1. Comparison of main characteristics of this study's extreme snowfall events with East Sea effect snowfalls.

		Precipitation intensity (mm h ⁻¹)	Snowfall intensity (cm h ⁻¹)	Air-sea temperature difference ² (°C)	850 hPa		Precipitable water vapor ³ (mm)
					Temperature (°C)	Wind speed (m s ⁻¹)	
East Sea Snowfall (17)	Median	0.5	0.2	19.9	-8.3	6.0	7.2
	Mean ± std ¹	0.7 ± 0.8	0.8 ± 1.0	19.7 ± 4.0	-7.9 ± 3.8	7.2 ± 5.4	8.0 ± 3.4
Extreme Snowfall (2)	Median	0.9	2.0	19.2	-7.9	7.1	7.3
	Mean ± std	1.8 ± 1.9	3.0 ± 2.3	19.8 ± 3.2	-8.0 ± 2.0	8.6 ± 4.3	8.0 ± 3.1

¹Std denotes standard deviation.²Air-sea temperature difference indicates temperature difference between 850 hPa and sea surface.³Precipitable water vapor is obtained from radiosonde sounding.**Fig. 1.** (a, c) Surface and (b, d) 500 hPa synoptic weather charts of EP1 at (a, b) 2100 LST 19 Jan and (c, d) 0900 LST 20 Jan 2017 issued by Korea Meteorological Administration (KMA).

해 18.9 cm, 올진 8.8 cm, 강릉 31.3 cm로 강한 강설이 발생하였다. 1월 19일 2100 LST부터 홋카이도 근방 저기압이 발달하면서 도쿄 앞바다 저기압과 세력

이 합쳐졌다(Fig. 1a). 합쳐진 저기압 세력은 더욱 발달하여 우리나라 동해에 중심 기압 1015 hPa의 부저기압이 형성되었고, 1월 20일 0000 LST~20일 1200

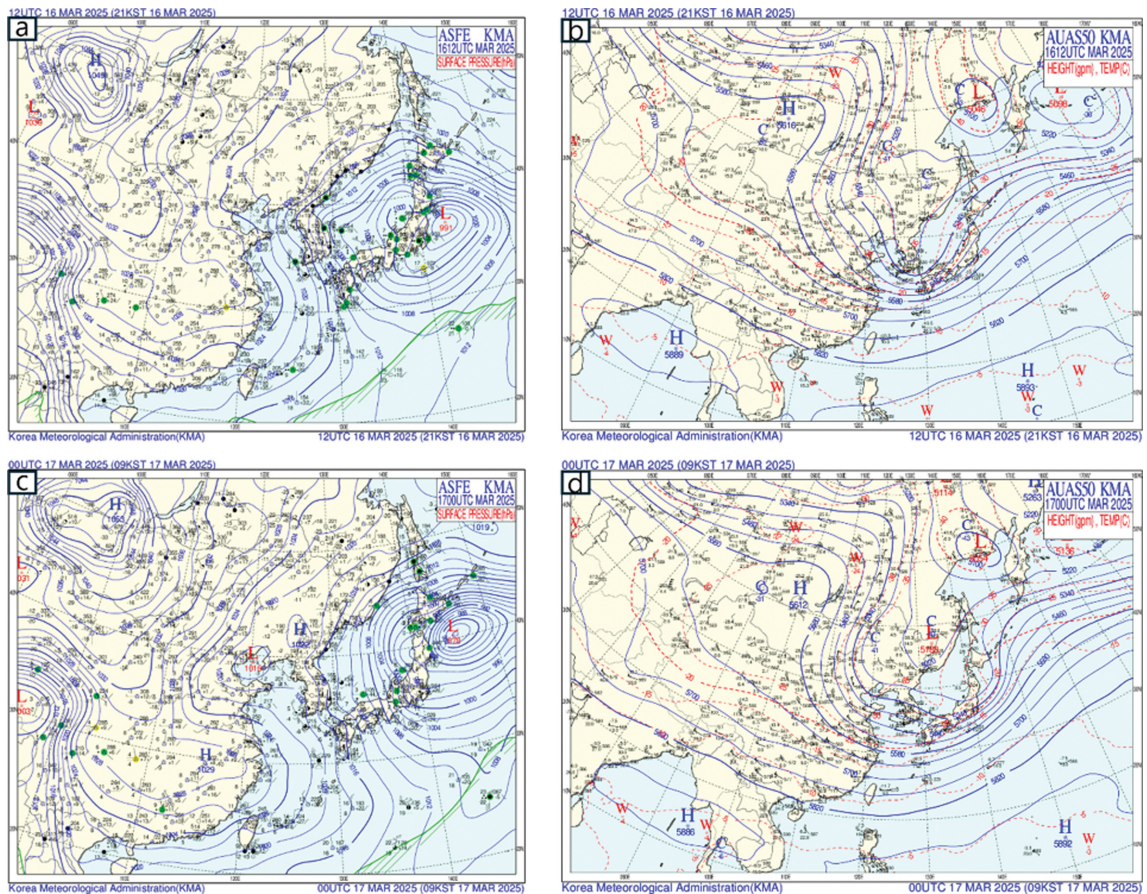


Fig. 2. The same as in Fig. 1 except for EP2 at (a, b) 2100 LST 16 Mar and (c, d) 0900 LST 17 Mar 2025.

LST 사이 기압이 약 13 hPa 하강하며 폭발적으로 성장하여 북강릉 부근에 뇌전을 발생시켰다(Fig. 1c). 이때 상층에는 -40°C 이하의 강한 한기핵을 동반한 질리지기압이 만주에서 한반도 북부로 이동하였고, 부저기압 서쪽에 위치하며 지상 저기압 발달을 도운 것으로 판단된다(Figs. 1b, d).

EP2는 2025년 3월 16일에 경기도·경상북도·강원도를 중심으로 강수가 나타났고, 3월 17일에는 울릉도·대관령·속초·북강릉·동해 등 영동 지역을 중심으로 강수가 관측된 반면, 적설은 북강릉과 울릉도에서만 확인되었다. 3월 16일에는 동중국해에서 발달한 지상 저기압이 한반도 남부를 지나 이와테현 앞바다로 북동진하면서 강수를 유발하였다. 3월 16일 1500 LST 경, 북강릉 강수는 잠시 소강 상태로 접어들었고 이때 주(主) 저기압으로부터 연장된 기압골이 동해상에 위치했다. 3월 16일 2100 LST 경, 시간 경과에 따라 동해상의 기압골은 이전보다 깊어졌다(Fig. 2a). 상층에서는 단파 기압골이 한반도 남부 해상에 위치하였고, 온

도골이 함경도부터 한반도 중남부 지방까지 뻗으며 한기가 한반도로 유입되었다(Fig. 2b). 이후 주저기압의 북진에 따라 동해상 기압골은 점차 약화되어 강수는 종료되었고 상층 단파 기압골은 일본 오사카 부근으로 동진하였다(Figs. 2c, d).

3.2 대기 열역학 구조

극한 강설 기간의 대기 열역학 구조를 이해하고자 북강릉과 강원대학교 라디오존데 사운드링 자료를 분석하였다. Figure 3은 EP1의 3시간 간격 사운드링, Fig. 4는 EP2의 6시간 간격 사운드링 자료이다. EP1에서 적설이 시작된 1월 20일 0900 LST 경, 지상-700 hPa 사이에서 바람의 순전(veering)이 나타나 하층에는 온난이류가, 700-500 hPa 상층에는 바람의 반전(backing)으로 한랭 이류가 확인되었다(Fig. 3). 1200 LST에는 약 800-500 hPa에서 북북동풍이 관측되었는데, 이는 하층 2-3 km 이내 북동풍이 불고, 약 3 km 이상에서는 주로 서풍이 부는 동해효과 사례들과 다른 풍향

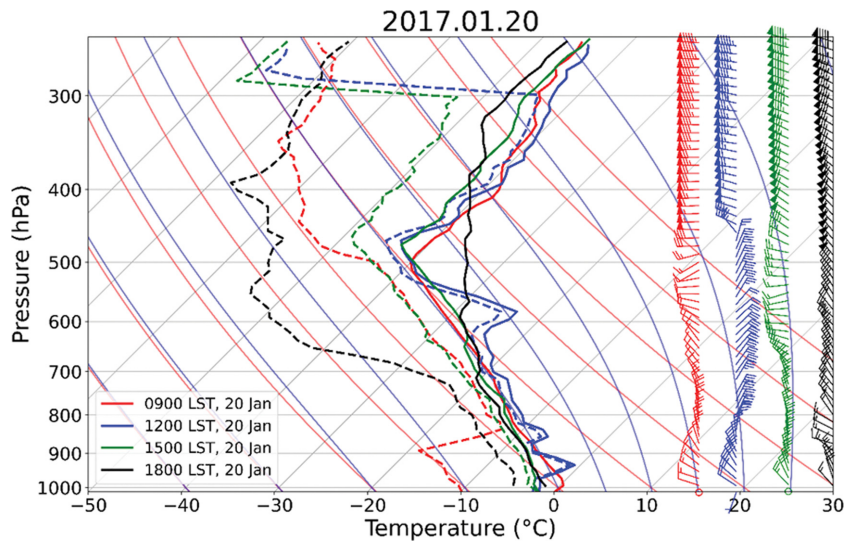


Fig. 3. Skew-T log-P diagram from 0900 to 1800 LST, 20 Jan 2017. Each time is represented by a different color, and wind speed is in knots. The temperature is solid line and dew point temperature is dashed line.

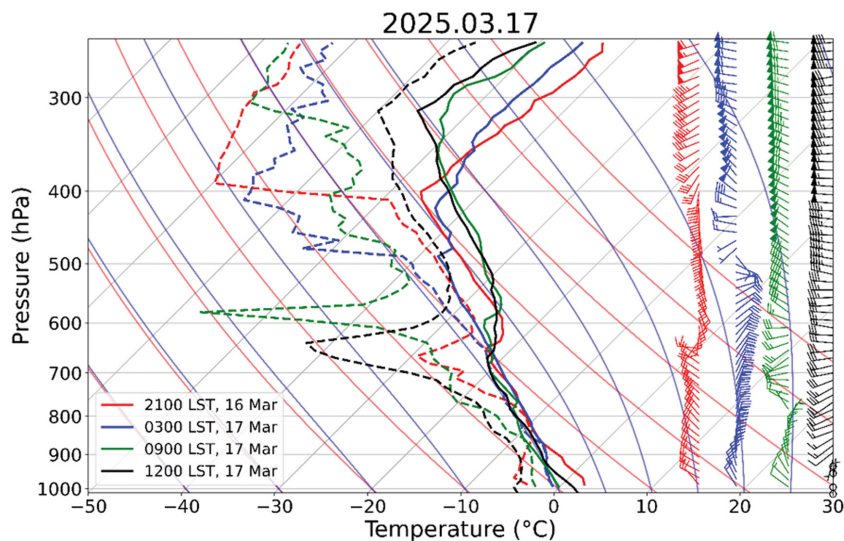


Fig. 4. The same as in Fig. 3 except for 2100 LST 16 Mar to 1200 LST 17 Mar 2025.

분포이다(Kim et al., 2018b; Kim et al., 2021a). 또한 3시간 이내 590-510 hPa 사이에서 절대불안정($\Gamma_e \approx 15.4 \text{ K km}^{-1}$)이 나타나 대류권 중층에서 강한 상승이 유발되었다. 그 결과 상승류가 대류권계면을 뚫고 플룸(plume) 형태의 구름을 하부 성층권까지 성장시킨 것으로 해석된다(overshooting). 사운딩에서 약 300 hPa 까지 형성된 포화층과, 위성 영상의 대류운 중심부의 온정온도 약 -42°C ($\sim 9 \text{ km}$)가 이를 뒷받침한다(Kim et al., 2018a). 또한 0900-1500 LST 사운딩에서 대류

권계면 하강이 뚜렷하게 관측되었으며 열역학적 대류 권계면이 해당 시간 동안 약 470 hPa까지 하강한 것으로 나타났다.

EP2는 강설 시작 3시간 전, 3월 16일 2100 LST에 약 640 hPa에서 풍향의 급격한 반전이 나타나며 남풍이 관측되었다(Fig. 4). EP1과 같이 영동 강설 사례에서 보기 드문 풍향 분포인데, 이는 상층 절리저기압의 영향으로 생각된다. 또한 약 690 hPa 부근에 약한 건조층이 존재하였으나 대기는 전반적으로 습윤하

여 라디오존데 관측에서 포화층이 약 400 hPa까지 발달하였고 위성 영상에서 대류운 중심부의云顶온도가 약 -40°C 로 확인되었다. 3월 17일 0300 LST 경 850-500 hPa에서 북북동풍이 관측되어 EP1과 유사한 풍향 분포를 보였다. 사운딩에서 3월 16일 2100 LST~3월 17일 0300 LST 기간 동안 대류권계면 하강이 뚜렷하게 관측되었고 열역학적 대류권계면은 최대 약 440 hPa까지 하강하였다. EP2는 EP1과 달리 대기 중층에서 절대불안정은 나타나지 않았고 전반적으로 중

립 상태를 유지한 점이 특징이다.

한랭전선 부근에서는 대류성 구름이 발달하여 뇌우, 집중호우 등 악기상이 유발될 수 있다. Carr (1951)은 일반적으로 북동진하는 한랭전선과 달리 미국 동부 지역에서 남서진하는 뒷문한랭전선(backdoor cold front)을 보고하였다. 당시 예보 지역 북동쪽에 정체한 고기압과 상층 절리저기압의 영향으로 찬 공기가 애팔래치아 산맥 동쪽 산사면에 축적되었고, 저층 한기는 산맥을 따라 남/남서쪽으로 이동하였다. 또한 700-500

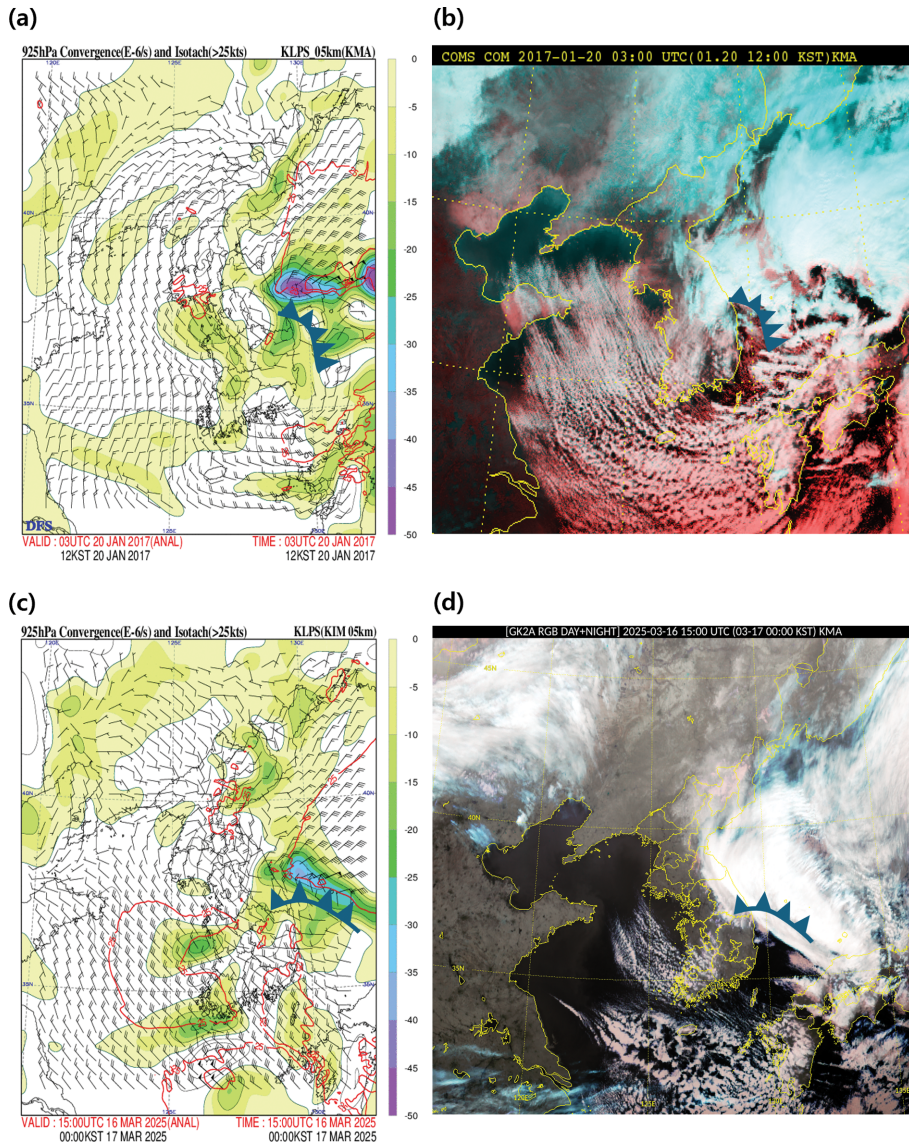


Fig. 5. (a, c) Horizontal distribution of 925 hPa convergence (10^{-6} s^{-1}) with isotach indicative of wind speed greater than 25 knots reproduced by KLAPS, and (b, d) satellite RGB composite image issued by KMA for (a, b) EP1 at 1200 LST 20 Jan 2017 and (c, d) EP2 at 0000 LST 17 Mar 2025. Blue icons of each figure indicate location of backdoor cold fronts.

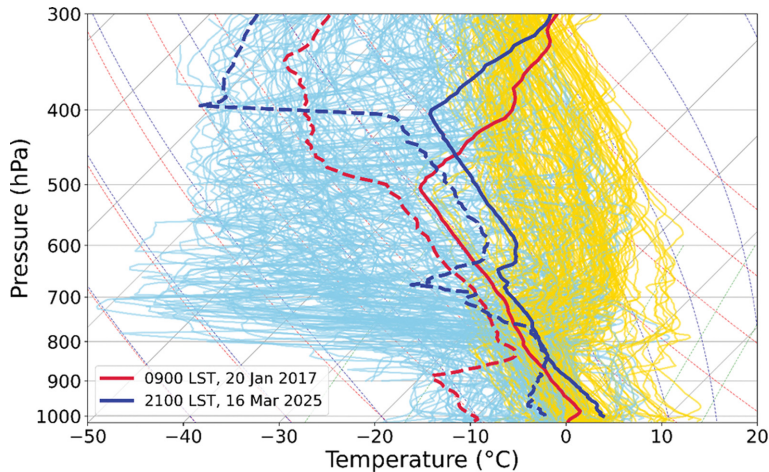


Fig. 6. Vertical profiles of temperature (yellow) and dew-point temperature (light blue) from a total of 147 radiosonde soundings for the East Sea snowfall events. In addition, thick red and blue lines indicate those of temperature (solid) and dew-point temperature (dashed) of 3 hours before the maximum snowfall rate on 20 Jan 2017 (EP1) and 16 Mar 2025 (EP2), respectively.

hPa의 지속적인 북풍 계열 흐름은 뒷문한랭전선의 남하를 더욱 촉진시킨 것으로 제시되었다.

EP1에서도 지상 및 850 hPa의 바람 불연속과 남서진하는 시스템을 근거로 뒷문한랭전선의 형성이 보고되었다(Kim et al., 2018a). 당시 한반도 북서쪽 고기압, 동해상 저기압, 그리고 상층 절리저기압이 함께 작용하면서 한기가 태백산맥 동쪽 산사면에 축적되었을 것으로 판단된다(Figs. 1c, d). 특히 EP1에서 강한 강설이 시작된 1월 20일 1200 LST 무렵(Fig. 3, blue line), 대기 중층에서 나타난 북동풍 계열 흐름은 지상 한기 남하를 촉진시켜 Carr (1951)의 사례에서 언급한 것처럼 태백산맥 동쪽 사면에 한기가 축적되는 데 역할을 한 것으로 보인다. EP2에서도 유사한 중관구조가 나타났고(Figs. 2c, d), 3월 17일 0300 LST (Fig. 4, blue line) 무렵 대기 중층에 북동풍 흐름이 발생함에 따라 지상 부근 한기의 남하를 촉진시키는 상층 흐름이 존재했음을 보여준다.

Figure 5는 사례별 강한 강설이 시작된 시기의 KLAPS 925 hPa 수렴 및 풍속장과 기상청 위성 영상을 나타낸 것이다. Kim et al. (2018a)에서 제시된 바와 같이, EP1에서 동해상 바람 불연속이 확인되었고 위성 영상에서도 동일한 위치에 구름대가 확인되었다(Figs. 5a, b). EP2에서도 동해상 바람 불연속이 나타났고, 이와 대응하여 띠 형태의 구름대가 위성 영상에서 뚜렷하게 관측되었으며 운정온도가 약 -40°C 로 나타났다(Figs. 5c, d). 이상의 결과를 종합하면, EP1과 동일하게 EP2에서도 뒷문한랭전선이 동해상에 형성된 것으로 사료된다. 마지막으로 극한 강설 사례의 대기

열역학 구조와 일반 동해효과 강설 사례들과 비교하기 위하여, EP1과 EP2 사례의 강한 강설 3시간 전 시간대의 대기 열역학 구조와 147개 동해효과 강설의 연직구조를 Fig. 6에 함께 제시하였다. EP1 (red)과 EP2 (blue) 모두 일반적인 동해효과와는 달리 대기 하층에 뒤집어진 V (inverted-V) 형태의 열역학 구조가 나타났다(Ribeiro and Bosart, 2018; Kim et al., 2021a). 또한, 일반적인 동해효과 사례에서는 대기 하층(약 800-700 hPa)까지 습윤단열적으로 중립인 혼합층이 잘 발달한 반면, EP1과 EP2에서는 혼합층이 중층 대기(약 500-400 hPa)까지 높게 발달한 것이 확인되었다.

3.3 위치 소용돌이도 및 대류권계면 변화

영동 지역 극한 강설 현상의 상층 흐름을 파악하기 위해, 각 사례에서 강설 시작 시점과 12시간 전의 305 K 등온위면 위치 소용돌이도와 바람장을 분석하였다(Fig. 7). Lee et al. (2001, 2002)에 의하면, 305 K 등온위면은 상부 대류권과 하부 성층권이 맞닿는 층으로 한반도 겨울철 역학적 대류권계면의 변화를 잘 반영한다고 보고된 바 있다. ERA5 등온위면 자료는 300 K과 315 K 자료를 제공하므로, 본 연구에서는 305 K 면을 보간하여 사용하였다. 그림에서 검은 실선은 1.6 PVU 등치선으로 역학적 대류권계면을 의미한다.

EP1의 1월 20일 0000 LST (Fig. 7a)를 보면, 4.5 PVU 이상의 강한 양(+)의 위치 소용돌이도가 만주를 중심으로 동서로 넓게 분포하였다. 이때 최대 양의 위치 소용돌이도 풍상측인 만주에 중심을 두고, 1.6 PVU는 더 남쪽인 한반도 중남부에 위치하므로 시간에 따

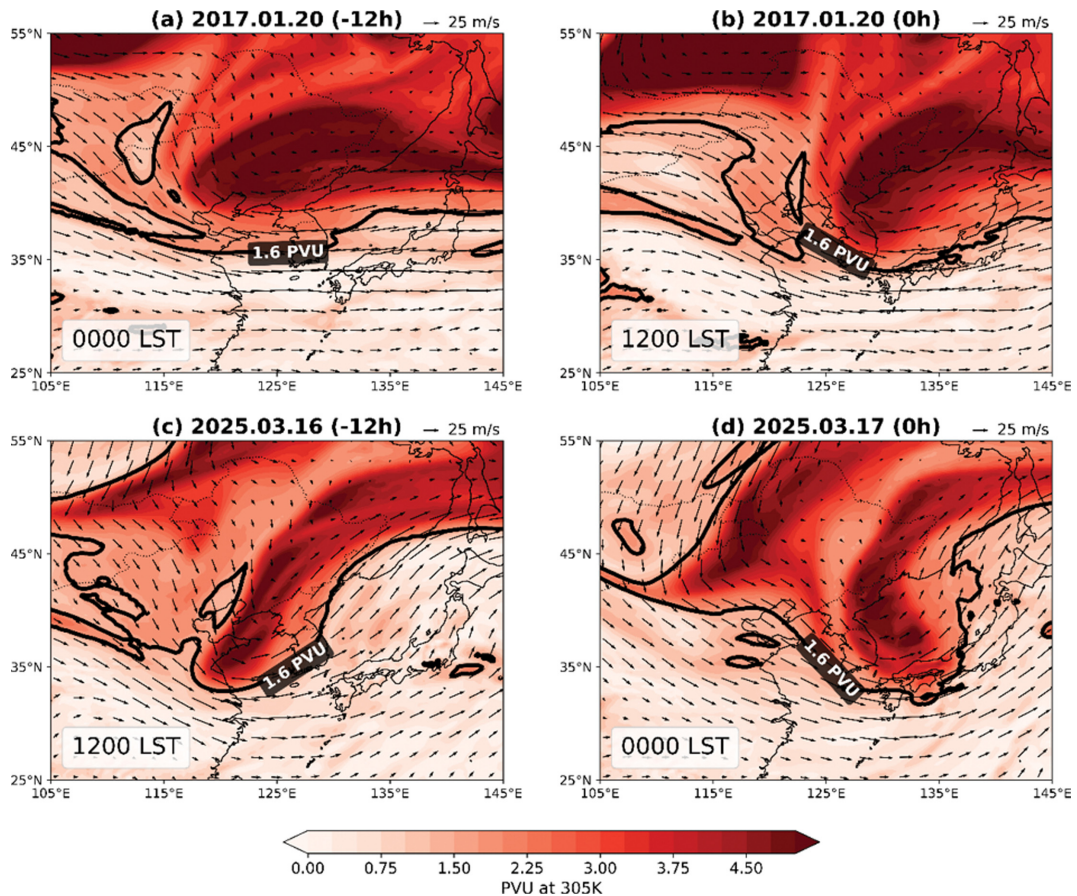


Fig. 7. 305 K isentropic surface wind fields from ERA5 reanalysis data, for EP1 (20 Jan 2017) and EP2 (16-17 Mar 2025) at -12 h and 0 h relative to heavy snowfall onset: (a) 0000 LST 20 Jan 2017, (b) 1200 LST 20 Jan 2017, (c) 1200 LST 16 Mar 2025 and (d) 0000 LST 17 Mar 2025. Shading shows PVU and the black solid line represents 1.6 PVU indicative of dynamical tropopause.

라 하부 성층권 공기가 풍하측 상공으로 유입될 것으로 보였다. 12시간 이후, 강한 양의 위치 소용돌이도가 남동진하여 함경남도부터 강원 영동을 따라 남북으로 길게 분포하였고 1.6 PVU 등치선은 남부 해상까지 남하하였다(Fig. 7b).

EP2의 3월 16일 1200 LST (Fig. 7c)에는 강한 양의 위치 소용돌이도가 중심이 띠 모양으로 요동반도에 위치하였고 1.6 PVU는 수평적으로 전라도에서 강원도를 가로지르는 분포를 보였다. 12시간 후(Fig. 7d), 양의 위치 소용돌이 중심은 동진하여 동해상으로 이루어졌고, 1.6 PVU는 제주도 남쪽 해상과 일본 부근까지 남하하였다. 이때 동해에 주저기압으로부터 연장된 기압골이 위치하였는데, 양의 위치 소용돌이 이루어 따라 동해상에 하부 성층권 공기가 유입되어 대기 불안정이 급격히 강화되었을 것으로 판단된다.

다음으로 1.6 PVU 등치선의 변화를 통해 대류권계면 움직임 파악하고자, 북강릉(37.8°N, 128.8°E)을 기준으로 대류권계면 시계열을 분석하였다. Figure 8은 사례별 북강릉 지점의 시간에 따른 위치 소용돌이도 변화를 나타내며, 굵은 실선은 1.6 PVU 등치선(역학적 대류권계면), 막대그래프와 숫자는 북강릉 3시간 신적설을 의미한다. EP1 (Fig. 8a)에서 1월 19일 2100 LST~20일 0000 LST 경 대류권계면이 약 300 hPa에서 500 hPa로 급격히 하강하며 하부 성층권 공기가 중부 대류권으로 급격히 유입된 것으로 판단된다. 이는 Fig. 7에서 확인된 바와 같이, 풍상측에 중심을 둔 최대 양의 위치 소용돌이도가 시간 경과에 따라 풍하측 상공으로 이루어져 하부 성층권 공기의 유입이 진행되었음을 의미한다. 이후 대류권계면은 대체로 500 hPa 고도를 유지하다, 강설이 가장 강했던 20일 1200

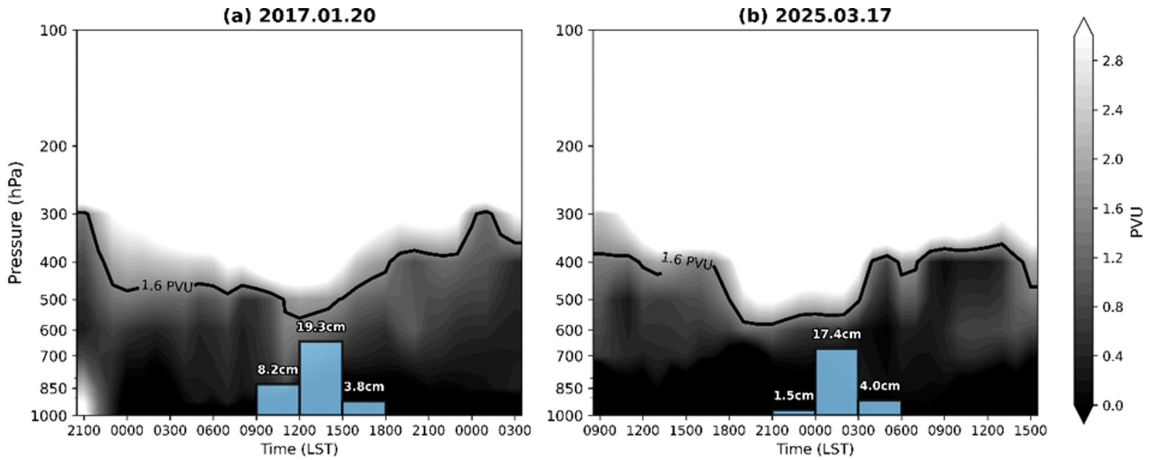


Fig. 8. Time variations of potential vorticity from ERA5 reanalysis data, for each episode (a) 20 Jan 2017 and (b) 17 Mar 2025 at Bukgangneung, along with 3-hourly snowfall shown as bar graph. Shading indicates PVU and the black solid line represent 1.6 PVU defined as dynamical tropopause.

LST에 약 550 hPa까지 하강하였고, 1500 LST 이후 강설이 종료되면서 점차 원래 고도로 복귀하였다.

EP2 (Fig. 8b)에서는 3월 16일 1800-2100 LST에 대류권계면이 400 hPa에서 600 hPa까지 하강하며 EP1보다 더 깊게 하강하였다. EP2에서도 하부 성층권 공기가 중부 대류권으로 급격하게 유입되었음이 시계열에 나타났고, 대기불안정이 강하게 유도되었을 것으로 해석된다. 이어 대류권계면은 17일 0000-0300 LST 동안 낮은 고도를 유지하였고, 강설 종료 후 급격히 원래 고도로 복귀하였다. 약 하루 동안 발달한 대류권계면 파상운동의 진폭을 대략 추정하면 EP1은 약 250 hPa, EP2는 약 200 hPa로, Lee et al. (2001, 2002)에서 제시된 대류권계면 하강 진폭과 유사한 결과이다.

마지막으로 강한 대류운 발달을 유도한 상승류를 확인하기 위해 연직속도(ω)를 분석하였다. EP1은 3시간 신적설 19.3 cm가 관측된 1월 20일 1200-1500 LST 구간을, EP2는 3시간 신적설 17.4 cm가 관측된 3월 17일 0000-0300 LST 구간을 분석하였다(Fig. 9). EP1은 연직속도가 1200 LST에 1 km 부근에서 최대 -3.75 Pa s^{-1} 로 가장 강하게 나타났고, 이후 1300-1500 LST에 -3.41 Pa s^{-1} 에서 -2.23 Pa s^{-1} 로 시간 경과에 따라 연직속도 강도가 약화되었다. EP2는 연직속도가 0000-0200 LST에 -1.2 Pa s^{-1} 에서 -4.68 Pa s^{-1} 로 나타났고, 0100-0200 LST 사이 연직속도가 약 2배 가까이 강하게 발달하였다. EP2에서 강한 연직속도가 나타나는 수직 및 수평 범위가 EP1보다 넓게 나타났는데, 이는 EP1 사운딩에서 3시간 이내의 짧은 시간 동안 발생한 절대불안정이 ERA5에서 잘 재현되지 못하여 EP2

대비 연직속도의 강도와 공간 범위가 과소 모의된 것으로 보인다.

3.4 눈 결정 정량적 특성

앞서 살펴본 급격한 저기압 발달에 수반된 강설의 눈 결정 특성을 정량화하기 위해 MASC 분석을 수행하였다. MASC에서 산출되는 주요 변수는 습성 비율(proportion), 입자 최대 지름($D_{\max}$), 낙하 속도(fall speed), 복잡도(complexity), 종횡비(aspect ratio)이며, 각 변수는 30분 이동 평균을 적용하여 평균과 표준편차를 산출하였다. 습성 비율은 총 6개 종류 - 작은 입자(small particle, SP), 바늘과 기둥 모양 입자(columnar crystal, CC), 판상 모양 입자(planar crystal, PC), 부착형 입자(aggregate, AG), 싹라눈(graupel, GR), CC와 PC가 조합된 입자(combination of columnar and planar crystal, CPC) -로 분류된다. 낙하 속도는 카메라 시야 내에 수직 32 mm 간격으로 배치된 두 개의 연속 트리거를 통과하는 시간차로부터 산출된다(Garrett et al., 2012; Garrett and Yuter, 2014; Praz et al., 2017; Kim et al., 2019). 복잡도(χ)는 아래 식으로 정의된다.

$$\chi = \frac{P}{2\pi r_{eq}} \quad (1)$$

여기서 P 는 수상체의 둘레(perimeter), r_{eq} 는 입자 단면적의 유효 반지름(equivalent radius)을 의미하며 $r_{eq} = \sqrt{\sigma/\pi}$ (σ : 눈 결정 단면적)이다(Garrett et al., 2012; Garrett and Yuter, 2014). χ 의 값이 1에 가까울수록 구에 가까운 형태, 1보다 커질수록 눈 결정 형

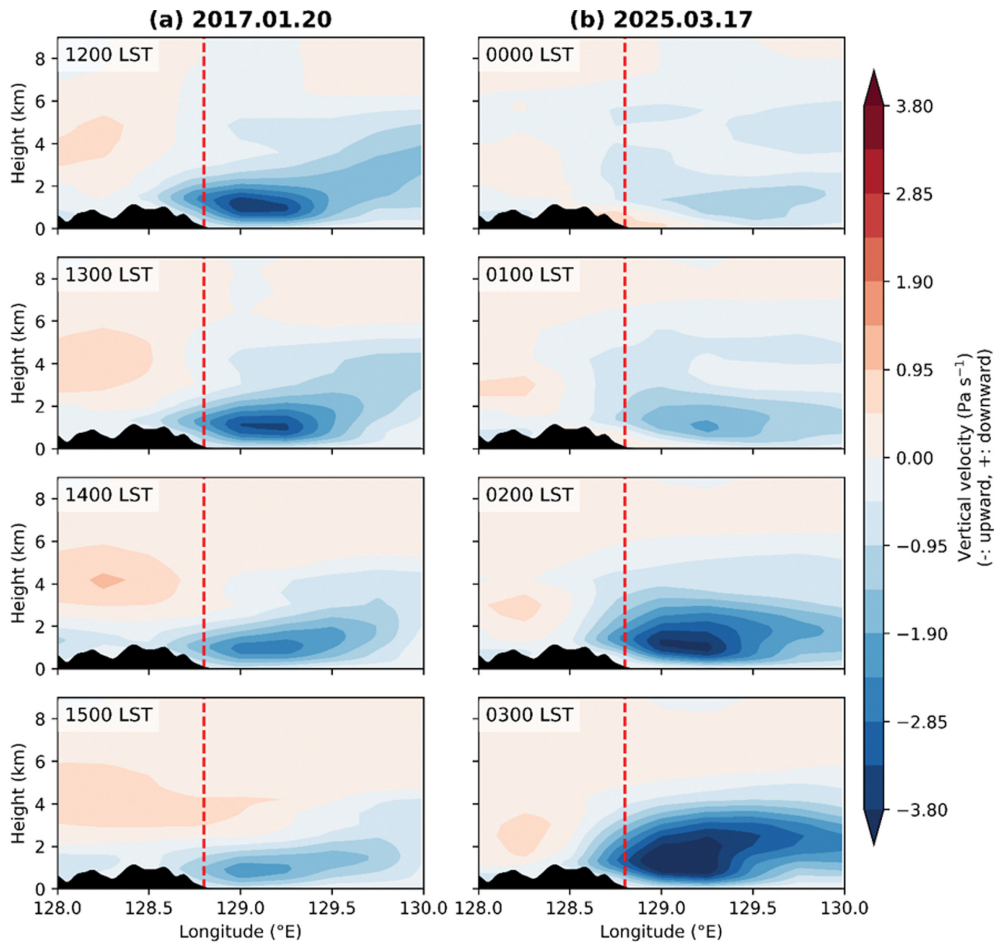


Fig. 9. Vertical cross sections of vertical velocity (Pa s^{-1}) from ERA5 reanalysis data, along 37.8°N for (a) 20 Jan 2017 and (b) 17 Mar 2025. The vertical red line represents Bukgangneung (37.8°N , 128.8°E). The color shading indicates upward (–) and downward (+) velocity, respectively.

태가 복잡한 AG 습성 빈도가 증가함을 의미한다. 마지막으로 종횡비는 눈 결정 이미지에서 추출된 입자 윤곽에 타원 근사를 적용해 장축과 단축의 길이 비로 계산된다.

EP1의 MASC 눈 결정 변수의 시간 변화를 살펴보면(Fig. 10), 1월 20일 1200–1300 LST에 GR 습성의 비율이 급격히 증가하였다. 이후 1500 LST부터는 AG 습성이 전체의 50% 이상을 차지하였다. GR 습성이 우세했던 1200–1400 LST에는 $D_{\max}$ 의 평균과 편차가 모두 작았고, 복잡도 평균도 약 1.4로 나타나 비교적 구형에 가까운 입자가 주로 관측되었다. EP1 전체 분석 기간에는 $D_{\max}$ 가 2–3 mm인 입자가 가장 많이 관측되었고 전체 평균은 약 2.5 mm였다. 2 mm 이하 입자는 시간대별 전체 입자 개수 대비 평균 약 20%를 차지하였으나, 강한 상승 기류가 나타난 1200–1400

LST (Fig. 9)에는 해당 크기 입자 비율이 최대 45%까지 증가하였다.

EP2의 눈 결정 변수의 시간 변화를 살펴보면(Fig. 11), 3월 17일 0000–0200 LST에 SP와 AG 습성이 대부분을 차지하였다. 이 기간 동안 6 mm 이하 다양한 크기의 입자가 주로 관측되었으나, 일부 약 10 mm 크기의 큰 AG 입자도 관측되며 $D_{\max}$ 의 평균과 편차가 크게 나타났다. 0200 LST 이후에는 GR 습성의 비율이 다소 증가하여 $D_{\max}$ 의 평균과 편차가 감소하였고, 복잡도 평균도 약 1.3으로 감소하였다. EP2에서도 강한 상승 기류가 나타난 0200–0300 LST (Fig. 9) 기간에, 2 mm 이하의 입자 수가 급격히 증가하면서 시간대별 전체 입자 개수 대비 해당 크기 입자 비율이 56%까지 증가하였다.

두 사례의 MASC 관측 결과를 종합하면, 최대 연

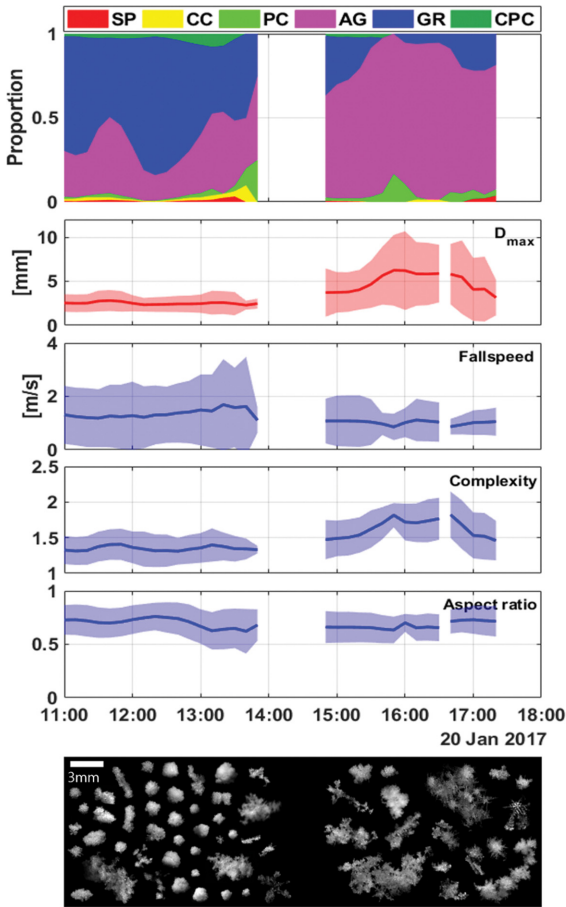


Fig. 10. The quantitative analysis (habit proportion, $D_{\max}$, fall speed, complexity, aspect ratio) of snow crystals observed by MASC for EP1 from 1100 LST to 1800 LST 20 Jan 2017, along with main snow crystal photographs below. Solid lines indicate each variable averaged with a 30-min moving window, with shading representing its standard deviation.

직속도가 나타난 시기에는 AG 습성보다 GR 습성이 상대적으로 우세하였으며, 입자 크기와 복잡도가 작게 나타났다. 두 사례는 일반적인 동해효과 강설에서 주로 나타나는 하층운과 달리, 구름이 짧은 시간 동안 빠르게 발달하여 온정 온도가 약 -40°C 이하로 높은 고도까지 성장하였다. 이러한 환경에서 강한 상승 기류에 의해 강설 입자의 성장이 촉진되었을 것으로 예상하였으나, 실제 관측 결과 2 mm 이하의 작고 구형에 가까운 입자가 다수 확인되었다. 즉 강한 상승류로 인해 빙정 간 충돌이 나타나고, 그 과정에서 입자 표면이 둥글게 깎이거나 일부 파편화가 동반되었을 것으로 추정된다.

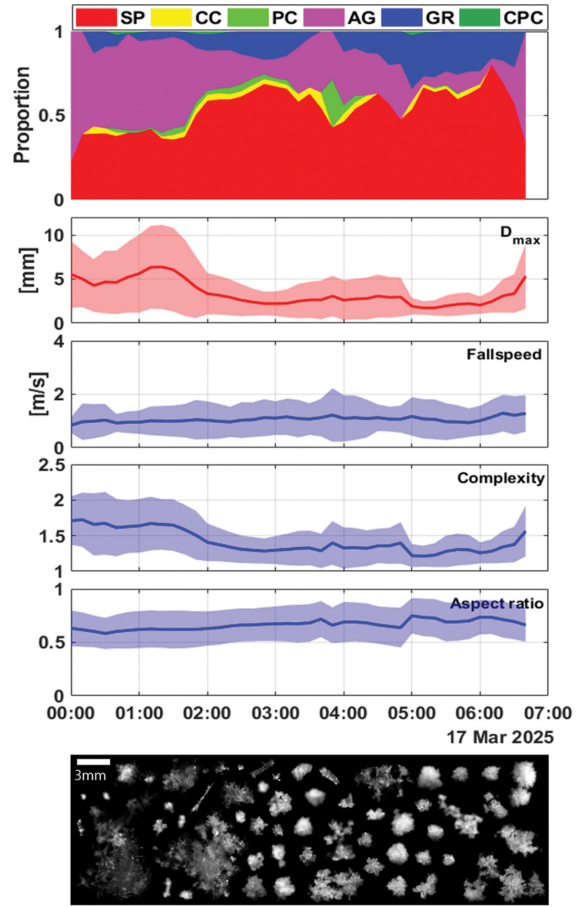


Fig. 11. The same as in Fig. 10 except for EP2 from 0000 LST to 0700 LST of 17 Mar 2025.

4. 요약 및 결론

본 연구는 영동 지역에서의 지난 10년간 관측된 강설 사례 중, 최대 강설 강도를 기록한 EP1(2017년 1월 20일, 3시간 최대 신적설 19.3 cm)과 EP2(2025년 3월 17일, 3시간 최대 신적설 17.4 cm) 사례의 기상학적 특성 및 강설의 미세물리적 특성을 분석하였다. 단기간 폭설 사례 분석을 위하여 종관일기도, 재분석장, 라디오존데 사운딩, 위성 영상, 그리고 눈 결정 카메라(MASC)를 활용하였다.

이상의 분석 결과를 종합하면 영동 지역 극한 강설 사례의 특징은 다음과 같다. 1) 상층(500 hPa)에서 -35°C 미만의 한기핵을 동반한 절리저기압이 한반도로 남하하면서 동해상 대기 불안정이 강화되었다. 2) 일반적인 동해효과 강설과 달리 북북동풍이 800-500 hPa의 대기 중층까지 유입되며 혼합층이 높은 고도까지 잘 발달하였고, 대기 하층에 뒤집어진 V 형태의

열역학 구조가 확인되었다. 3) 동해상 바람 불연속과 강수대, 수렴대 등을 분석한 결과, 뒷문한랭전선이 형성된 후 영동 지역을 향해 남서진하였다. 특히 대기 중층의 북동풍 계열 흐름은 저층 한기가 태백산맥 동쪽 사면을 따라 축적 및 남하하는 데에 기여하였고, 뒷문한랭전선의 남서진을 촉진한 것으로 판단된다. 4) 305 K 등온위면에서 4.5 PVU 이상의 강한 양의 위치 소용돌이가 영동 지역으로 이루어짐에 따라 하부 성층권 공기가 대류권 상부로 유입된 것으로 판단된다. 이는 대류권계면 연직 시계열에서도 확인되었고, 결과적으로 영동 지역에 대기 불안정이 강화되는 데 도움을 주었다. 5) MASC 분석에서, 두 사례 모두 눈 결정 입자는 부착형(AG)과 2-3 mm 크기의 싸락눈(GR) 습성이 다수 관측되었다. 또한 최대 연직속도가 나타난 시점에 북잡도가 1.3(구형)에 가까웠고, 2 mm 이하의 작은 싸락눈(GR) 습성 입자 비율이 증가하였다. 영동 지역 극한 강설사례의 종관적, 열·역학적 특성, 그리고 눈 결정 특성을 종합적으로 분석한 결과, 영동 지역 극한 강설 사례는 일반적인 동해효과 강설과 주요 대기 환경 변수에서는 유사한 특징을 보였으나, 강설 강도가 약 3배 이상 크게 나타나며 3-6시간 이내의 짧은 시간 규모에 강설이 집중되는 경향을 보였다. 하지만 이러한 단시간 변화는 현행 재분석자료와 관측으로는 충분히 포착하기 어려웠다. 따라서 향후 극한 강설 예보를 위해서는 6시간 간격보다 더 조밀한 고층 관측을 통해 단시간 내 발생하는 대기의 절대불안정을 확인할 필요가 있다. 또한 두 사례 모두 뒷문한랭전선을 동반하였다는 점에서, 향후 영동 지역 극한 강설 예보에서 동해상 바람 불연속과 수렴대, 그리고 상층 저리저기압에 의해 유도되는 대기 중·하층 북/북동풍 계열 흐름에 의한 뒷문한랭전선의 남서진 가능성을 함께 고려할 필요가 있다. 다만 동해상 뒷문한랭전선의 발생 원인과 발달 메커니즘에 대해서는 추가적인 사례 분석과 수치실험을 통한 후속 연구가 요구된다.

감사의 글

이 연구는 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(RS-2025-16065527). 또한, 강원영동 북잡지형이 반영된 대설 및 강풍 개념모델 개발·개선(II) 사업의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

Ahn, B.-Y., J.-S. Lee, B.-J. Kim, and H.-W. Kim, 2019: A study on the synoptic structural characteristics of heavy snowfall event in Yeongdong area that

- occurred on 20 January, 2017. *J. Environ. Sci. Int.*, **28**, 765-784, doi:10.5322/jesi.2019.28.9.765.
- Carr, J. A., 1951: The east coast "backdoor" front of May 16-20, 1951. *Mon. Wea. Rev.*, **79**, 100-105, doi:10.1175/1520-0493(1951)079<0100:TECBFO>2.0.CO;2.
- Chae, Y.-J., B.-G. Kim, Y.-G. Choi, J.-H. Jung, J.-Y. Kim, B.-H. Lim, and K.-H. Chang, 2024: Observation of ice pellets and its association with meteorological conditions in the Yeongdong region of Korea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **60**, 329-343, doi:10.1007/s13143-024-00361-9.
- Cho, Y.-J., and T.-Y. Kwon, 2014: Cloud-cell tracking analysis using satellite image of extreme heavy snowfall in the Yeongdong region. *Korean J. Remote Sens.*, **30**, 83-107, doi:10.7780/kjrs.2014.30.1.8.
- Choi, Y.-G., B.-G. Kim, J.-Y. Kim, T.-Y. Kim, J.-H. Han, G. Lee, K. Kim, K.-H. Kim, and B.-H. Lim, 2024: Episode analysis of the habit and phase changes of snow crystals in the wintertime Yeongdong region. *Atmosphere*, **34**, 139-151, doi:10.14191/Atmos.2024.34.2.139.
- Garrett, T. J., C. Fallgatter, K. Shkurko, and D. Howlett, 2012: Fall speed measurement and high-resolution multi-angle photography of hydrometeors in free fall. *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, **5**, 2625-2633, doi:10.5194/amt-5-2625-2012.
- _____, and S. E. Yuter, 2014: Observed influence of riming, temperature, and turbulence on the fallspeed of solid precipitation. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 6515-6522, doi:10.1002/2014GL061016.
- Kim, B.-G., M.-G. Kim, T.-Y. Kwon, G.-M. Park, Y.-D. Han, S.-B. Kim, and K.-H. Chang, 2021a: Observation and understanding of snowfall characteristics in the Yeongdong region. *Atmosphere*, **31**, 461-472, doi:10.14191/Atmos.2021.31.4.461.
- Kim, H.-M., S.-P. Jung, S.-R. In, and B.-C. Choi, 2018a: 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.
- Kim, M.-G., B.-G. Kim, S.-H. Eun, Y.-J. Chae, J.-H. Jeong, Y.-G. Choi, and G.-M. Park, 2021b: 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.
- 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.
- Kim, Y.-J., B.-G. Kim, J.-K. Shim, and B.-C. Choi, 2018b: 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.
- 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.
- Kwak, B.-C., and I.-H. Yoon, 2000: Synoptic analysis on snowstorm occurred along the east coast of the Korean peninsula during 5-7 January, 1997. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **21**, 258-275.
- Kwon, J.-H., T.-Y. Kwon, and B.-G. Kim, 2018: Sounding observation with wind profiler and radiometer of the Yeongdong thundersnow on 20 January 2017. *Korean J. Remote Sens.*, **34**, 465-480, doi:10.7780/kjrs.2018.34.3.3.
- Kwon, T.-Y., Y.-J. Cho, D.-H. Seo, M.-G. Choi, and S.-O. Han, 2014: Synoptic environment associated with extreme heavy snowfall events in the Yeongdong region. *Atmosphere*, **24**, 343-364, doi:10.14191/Atmos.2014.24.3.343.
- _____, J.-Y. Park, B.-C. Choi, and S.-O. Han, 2015: Satellite image analysis of low-level stratiform cloud related with the heavy snowfall events in the Yeongdong region. *Atmosphere*, **25**, 577-589, doi:10.14191/Atmos.2015.25.4.577.
- Lee, H.-R., K.-E. Kim, J.-M. Yoo, and W.-J. Lee, 2002: Tropopause undulation as sociated with explosive development of a cyclone. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **38**, 431-463.
- _____, _____, _____, and K.-D. Min, 2001: A study on a severe winter weather occurred in the Korean peninsula by tropopause undulation. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **37**, 195-224.
- Lee, J.-G., 1999: Synoptic structure causing the difference in observed snowfall amount at Taegwallyong and Kangnung: case study. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **35**, 319-334.
- _____, H.-M. Kim, and Y.-J. Kim, 2016: A case study on the polar low developed over the sea near Busan on 11~12 February 2011. *Atmosphere*, **26**, 301-319, doi:10.14191/Atmos.2016.26.2.301.
- _____, and Y.-J. Kim, 2008: A numerical case study examining the orographic effect of the Taebaek Mountains on snowfall distribution over the Yeongdong area. *Atmosphere*, **18**, 367-386.
- 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.
- Praz, C., Y. A. Roulet, and A. Berne, 2017: Solid hydrometeor classification and riming degree estimation from pictures collected with a multi-angle snowflake camera. *Atmos. Meas. Tech.*, **10**, 1335-1357, doi:10.5194/amt-10-1335-2017.
- Rasmussen, E. A., and J. Turner, 2003: *Polar lows: Mesoscale weather systems in the polar regions*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 612 pp.
- 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, W.-S., and Coauthors, 2016: Intercomparison between temperature and humidity sensors of radiosonde by different manufacturers in the ESSAY (Experiment on Snow Storms At Yeongdong) campaign. *Atmosphere*, **26**, 347-356, doi:10.14191/Atmos.2016.26.2.347.
- WMO, 1986: Atmospheric Ozone 1985: *Global Ozone Research and Monitoring Report*, Rep. No. 16, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 392 pp.