

## 겨울철 영동지역 눈 결정 습성과 성상 변화 에피소드 분석

최영길<sup>1)</sup> · 김병곤<sup>2)\*</sup> · 김지윤<sup>2)</sup> · 김태연<sup>2)</sup> · 한진현<sup>2)</sup> ·  
이규원<sup>3)</sup> · 김권일<sup>4)</sup> · 김기훈<sup>1)</sup> · 임병환<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup>국립기상과학원 관측연구부, <sup>2)</sup>강릉원주대학교 대기환경과학과,  
<sup>3)</sup>경북대학교 지구시스템과학부, BK21 위험기상 교육연구팀, 대기원격탐사연구소,  
<sup>4)</sup>스토니브룩대학교 해양대기과학부, <sup>5)</sup>국립기상과학원 재해기상연구소

(접수일: 2024년 2월 23일, 수정일: 2024년 4월 3일, 게재확정일: 2024년 4월 6일)

## Episode Analysis of the Habit and Phase Changes of Snow Crystals in the Wintertime Yeongdong Region

Young-Gil Choi<sup>1)</sup>, Byung-Gon Kim<sup>2)\*</sup>, Ji-Yun Kim<sup>2)</sup>, Tae-Yeon Kim<sup>2)</sup>, Jin-Heon Han<sup>2)</sup>,  
GyuWon Lee<sup>3)</sup>, Kwonil Kim<sup>4)</sup>, Ki-Hoon Kim<sup>1)</sup>, and Byung-Hwan Lim<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup>Observation Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

<sup>2)</sup>Department of Atmospheric Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

<sup>3)</sup>BK21 Weather Extremes Education & Research Team, Department of Atmospheric Sciences,  
Center for Atmospheric REmote sensing (CARE), Kyungpook National University, Korea

<sup>4)</sup>School of Marine and Atmospheric Sciences, Stony Brook University, New York, USA

<sup>5)</sup>High Impact Research Laboratory, National Institute of Meteorological Sciences, Gangneung, Korea

(Manuscript received 23 February 2024; revised 3 April 2024; accepted 6 April 2024)

**Abstract** The Yeongdong region has suffered from severe snowstorms and the relevant damage such as traffic accidents on slippery roads, and the collapse of greenhouses and temporary buildings. While a lot of research on snowfall has been conducted, the detailed study of snow crystals' phase and habit through intensive observations and the relevant microphysical analysis is still lacking. Therefore, a snowflake camera, PARSIVEL, and intensive radiosonde soundings were utilized to investigate phase and habit changes in solid precipitation. Two remarkable episodes of phase and habit changes were selected such as 19 March 2022 and 15 February 2023. Both events occurred in the synoptic condition of the High in the north and the Low passing by the south, which was accompanied by rapid temperature cooling below 2.5 km. During the events of a short period between 3 to 6 hours, the temperature at 850 hPa decreased by about 4 to 6°C. This cooling led to a change in the main habit of snow particles from riming to aggregate, identified with both MASC and PARSIVEL. Meanwhile, the LDAPS model analyses do not successively represent the rapid cooling and short-term variations of solid precipitation, probably by virtue of overestimating low-level equivalent potential temperature during these periods. The underlying causes of these the low-level temperature variations within 6 hours, still remain unclear. It might be associated with mesoscale orographic phenomenon due to the mountains and East Sea effects, which certainly needs an intensive and comprehensive observation campaign.

**Key words:** Phase and habit changes, Riming, Aggregate, Rapid cooling

\*Corresponding Author: Byung-Gon Kim, Department of Atmospheric Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, 7 Jukheon-gil, Gangneung, Gangwon 25457, Korea.  
Phone: +82-033-640-2326, Fax: +82-033-640-2320  
E-mail: bgk@gwnu.ac.kr

## 1. 서 론

영동지역은 서쪽에는 태백산맥과 동쪽으로는 동해를 인접하고 있어 지형에 의해 유도되는 중규모 기상 현상들이 자주 발생하며, 겨울철에는 많은 강설로 인하여 사회적·경제적으로 큰 피해를 초래하고 있다. 특히 겨울철 태백산맥 동쪽 산사면으로 한기가 유입되면, 단기간 온도가 급감하면서 실제 예보보다 일찍 성장 변화가 일어나거나 짧은 시간 동안 강한 강설이 발생할 수 있다(Kim et al., 2021a; Chae et al., 2024). Kwon et al. (2003)에 의하면 겨울철 영동지역은 영서지역에 비해 강수량이 2배, 강수강도는 약 2~2.7배 정도 크다고 제시한 바 있으며, 강한 강설로 교통사고나 건축물 피해를 자주 겪고 있다. 이러한 피해를 줄이기 위해서는 단기간 내에 변하는 중규모 기상현상과 강설 성장 변화 및 눈 결정 입자 변화에 주목할 필요가 있다.

영동지역에 발생하는 강설에 대한 연구는 모델과 관측자료를 이용하여 활발히 진행되었는데, Lee and Lee (1994)는 Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) 모델을 이용하여 영동지역 폭설의 요인으로 산맥을 향하는 하층 바람의 방향과 속도, 기단의 변질, 지형의 높이, 중관 배치 지속 여부에 따라 폭설이 발생한다고 제시하였다. Lee and Kim (2008)은 산맥에 의한 강제상승 메커니즘을 분석하기 위해 Weather Research and Forecasting (WRF) 모델을 활용하여 태백산맥의 유무에 따른 대관령의 강설량 증가를 확인한 바 있다. 또한, Nam et al. (2014)은 장기간 라디오존데 관측자료와 모델자료를 활용하여 강한 강설 시 해기차와 대류 불안정과의 연관성을 제시하였고, Kim et al. (2018a)은 뇌설 사례를 바탕으로 영동지역에서도 대류운으로 인한 강설이 발생할 수 있음을 확인하였다. 최근 연구에 의하면, 한기축적현상(Cold Air Damming, CAD)이 겨울철 태백산맥 동쪽 산사면 중심으로 자주 발생한다고 제시된 바 있다. CAD 현상은 산맥에 수직으로 불던 바람이 산맥에 가로막혀 산맥과 평행하게 불면서 한기가 축적되는 현상이다(Bailey et al., 2003). Nam et al. (2020)은 관측자료와 수치모델 자료를 활용하여 영동지역의 한기축적 사례를 분석하여 수평연직 규모를 계산하였고, Kim et al. (2021a)은 영동지역에서 한기 축적이 강하게 일어날 경우 눈구름이 내륙으로 진입하지 못하여 실제 예보 보다 적은 강설 혹은 무강설을 초래한다고 제시한 바 있다. 반면에 한기 축적이 약한 경우, 눈 구름이 내륙까지 진입하지만 연직 온도 구조의 급격한 변화에 따라 성장(phase) 및 습성(habit)의 변화를 초래하기도 한다. Chae et al. (2024)는 영동지역에서 하층의 급격한 한기 유입에 따른 대기열역학구조(reversed-S profile)의 형성에 따라

지상에서 얼음싸라기(ice pellet)를 관측한 바 있다. 이러한 중규모 현상은 수시간 이내의 단기간에 발생하는 경향이 있기 때문에, 모델에서 제대로 재현하기 어려워 강설 예보 시 큰 어려움을 겪고 있다.

이와 같이 영동지역 강설의 원인인 태백산맥과 동해효과 등에 대한 다양한 연구가 진행되었지만, 눈 결정 특성에 대해서는 여전히 이해가 부족한 실정이다. Judson and Doesken (2000)는 눈의 밀도가 구름의 온도, 눈 결정 크기, 모양 그리고 결착(riming) 정도에 따라 달라진다고 설명한 바 있고, Bailey and Hallett (2009)은 장기간 구름챔버 실험을 통해 과포화도와 온도에 따라 생성되는 다양한 형태의 눈 결정을 습성을 체계적으로 분류한 바 있다. 겨울철 강수의 경우 강수량, 강수 위치 및 지속시간 등의 예보 향상을 위해서는 눈 결정의 밀도와 낙하속도 정보가 중요하기 때문에 개별 눈 입자 관측 연구가 활발하다. Garrett et al. (2012)는 Multi-Angle Snowflake Camera (MASC)를 이용하여 세 방향에서 눈 결정을 촬영하여 눈 결정 크기와 낙하속도 등을 정량 분석하였다. 최근 Rees et al. (2021)은 Differential Emissivity Imaging Disdrometer (DEID)를 개발하여 MASC 와 함께 눈 결정 밀도와 낙하속도 관측 방법을 개선한 바 있다.

국내에서는 Seo et al. (2015)이 강설 사례를 스마트폰과 Digital Single-Lens Reflex (DSLR) Camera로 강릉지역에 내리는 눈 결정 특성을 정성적으로 분석하였고, Kim et al. (2018b)은 눈 결정 관측과 중규모 구름모델을 활용하여 850 hPa 온도변화에 따른 눈 결정의 형태 변화를 설명한 바 있다. 최근 국내에서도 Kim et al. (2019)이 MASC를 활용하여 눈 결정의 지름, 낙하속도, 중횡비, 방향성, 복잡도 등을 정량 분석하였지만, 눈 결정 관측에 초점이 맞춰져 있어 습성 변화에 대한 구체적인 분석은 이루어지지 않았다. 영동지역 강설 특성을 파악하기 위해서는 짧은 시간 동안 눈 결정 변화에 주목해야 하기 때문에 보다 정밀한 시공간 해상도의 관측이 필요할 것이다. 본 연구에서는 2019년부터 2023년까지 영동지역에서 진행된 Yeongdong Extreme Snowfall and Wind Experiment (YES-WEX) 관측 캠페인 기간 중 3일 동안 강수가 지속되면서 위에서 언급한 강설의 성장 및 습성 변화가 있었던 두 가지 사례(2022년 3월 17~19일과 2023년 2월 13~15일)를 선정하고, 이 기간 동안의 집중 관측자료와 모델 분석장을 활용하여 눈 결정 성장 및 습성 변화를 분석하고 이러한 변화가 발생한 기간의 하층 기상 특성을 분석하였다.

영동지역은 지형적인 영향으로 하층의 단기간 온도가 급감하면서 강설 성장 및 눈 결정 입자 변화가 발생하거나 짧은 시간 동안 강한 강설이 발생하여 주변 지역에 큰 피해를 초래할 수 있다. 그래서 본 연구에

서는 이러한 피해를 줄이기 위해서 조밀한 시간 간격의 상층 라디오존데 관측과 지상에서 강설 직접 관측을 동시에 수행하여 눈 결정 습성 및 성장 변화를 분석하고 이를 초래한 하층 대기열역학 특성을 이해하고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1 관측기기 및 분석자료

2019년부터 2023년까지 영동지역에서 강설과 강풍 예보 정확도 향상을 위하여 국립기상과학원, 강릉원주대학교, 강원지방기상청 주도로 학·연·관이 함께 YES-WEX 관측 캠페인을 수행하였다(Kim et al., 2021b). YES-WEX 캠페인 기간 동안 조밀한 시간 간격의 라디오존데 관측을 통해 영동지역에서 강설과 강풍 발생 시 열역학적인 특성을 확인하고자 하였다. 라디오존데는 기상 변수(기압, 온도, 습도, 바람 등)를 관측할 수 있는 센서와 GPS를 탑재하여 풍선과 함께 비양하면서 상층대기 특성을 관측하는 기기이다. 본 연구에서는 2개의 관측 지점에서 존데 관측이 진행되었으며 강릉원주대(GWNU) 지점에서 0000, 0600, 1200, 1800 KST, 북강릉(BGN) 지점에서는 0300, 0900, 1500, 2100 KST에 6시간 간격의 관측을 진행하여 강릉 지점에서 3시간 간격의 조밀한 상층기상자료를 얻을 수 있었다. 강릉원주대와 북강릉 지점의 위치는 Fig. 1에 제시하였다.

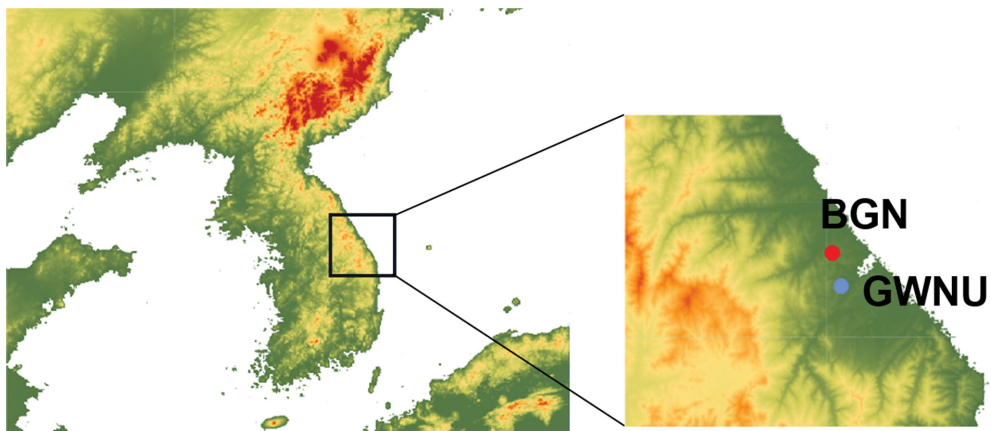
또한, 라디오존데 관측과 동시에 눈 결정의 특성을 파악하기 위해 MASC와 함께 광학우적계(PARticle SIze and VELOCITY, PARSIVEL)을 사용하여 눈 결정 관측도 함께 수행되었다. MASC는 36° 각도로 설치된 3대의 카메라가 3방향에서 가운데 뚫린 틀 안쪽으

로 낙하하는 눈 결정을 촬영하는데, 눈 결정이 틀 안쪽으로 통과할 때 걸리는 시간을 통해 낙하속도를 계산한다. 관측한 눈 결정 사진을 Praz et al. (2017)이 제시한 방법을 사용하여 눈의 형태학적 특징을 분류하였고 최대 지름(maximum diameter), 종횡비(aspect ratio), 방향성(orientation), 유효 반지름(equivalent radius), 복잡도(complexity) 등을 정량 분석하였다. 자세한 원리와 분석방법은 Kim et al. (2019)에 설명되어 있다. 파시벨은 MASC와 유사하게 강수 입자의 특성을 관측하는 기기이며 레이저 빔의 강도에 따라 강수 입자의 낙하속도와 입자 크기를 산출한다. PARSIVEL의 레이저빔 파장은 780 nm, 측정 가능한 면적 48 cm<sup>2</sup>, 최대 직경 30 nm, 낙하속도 범위는 0.1-20 m s<sup>-1</sup>이다(Löffler-Mang and Joss, 2000; Bang et al., 2019). Bang et al. (2019)이 제시한 연구방법을 토대로 본 연구에서는 아래 식(1)을 이용하여 관측자료 중 강수 입자들을 제거하였다(Atlas et al., 1973).

$$Va(D) = 9.65 - 10.3 \exp(-0.6D) \quad (1)$$

여기서 Va는 낙하속도, D는 강수입자의 지름이다. PARSIVEL은 경북대학교의 지원을 받아 관측을 진행하였으며, 본 연구에서 사용한 MASC와 PARSIVEL의 자세한 사양과 관측 지점은 Table 1에 제시하였다.

각 사례별 지상 기상 특성을 분석하기 위해 북강릉에 위치한 중관기상관측시스템(Automated Synoptic Observed System, ASOS)의 자료 중 강설, 강수, 온도 등의 자료를 사용하였다. 또한, 모델 성능 평가와 기상조건의 시공간적인 변화를 이해하기 위해서 국지수치예보모델(Local Data Assimilation and Prediction System, LDAPS)의 분석장을 활용하였다. 국지수치예보모델은 공간 해상도 1.5 km, 연직으로 40 km로 총



**Fig. 1.** Study domain and the main observation sites enlarged. BGN denotes BukGangNeung, and GWNU indicates Gangeneung-Wonju National University.

**Table 1.** Detailed information of MASC and PARSIVEL.

	Site	Manufacturer (Model)	Variables	Specifications
MASC	GWNU	Particle Flux Analytics	Proportion, Diameter, Fall speed ( $\text{m s}^{-1}$ ), Complexity	12.5 mm / 1.3MP (Camera lens / Body) 34 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ (Image resolution) 35.7 mm (Horizontal field of view) 13.4 mm (Depth of field)
PARSIVEL	GWNU	OTT Parsivel <sup>2</sup>	Dmax (mm), Fall speed ( $\text{m s}^{-1}$ )	780 nm (Laser diode wavelength) 30 mm $\times$ 1 mm $\times$ 160 mm (Light sheet size) 48 $\text{cm}^2$ (Measuring area) 0.3-30 (0.1-10) mm (Measuring range diameter) 0.1-20 $\text{m s}^{-1}$ (Measuring range velocity)

**Fig. 2.** Pictures of MASC (Multi-Angle Snowflake Camera), PARSIVEL (PARticle SIze and VELOCITY), and radiosonde used in this study.**Table 2.** Summary of primary instrumentation and stations.

Instruments	Site	Manufacturer (Model)	Variable	Time (KST)
Radiosonde	GWNU	GRW (DFM-09)	Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), Pressure (hPa), Direction ( $^{\circ}$ ), Wind speed ( $\text{m s}^{-1}$ ), Humidity (%), Dewpoint ( $^{\circ}\text{C}$ )	0000, 0600, 1200, 1800
	BGN	Vaisala (RS41-SG)	Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), Pressure (hPa), Direction ( $^{\circ}$ ), Wind speed (knot), Humidity (%), Dewpoint ( $^{\circ}\text{C}$ )	0300, 0900, 1500, 2100
ASOS	BGN	OTT Pluvio	Snowfall (cm), Precipitation (mm)	0000, 0300, 0600, 0900, 1200, 1500, 1800, 2100

70개의 층으로 나뉘 구성되어 있고,  $\eta$ 좌표계 등압면 자료의 고도, 온도, 상대습도, 수평 바람(u, v) 자료를

사용하였다. 본 연구에서는 모델 분석장의 성능 평가를 위해서 라디오존데 관측 지점과 최대한 비슷한 모

델 격자점의 자료를 산출해야 하기 때문에 강릉과 북강릉 지점에서 가장 가까운 좌표인 동경 128.855~128.876°E, 37.784~37.795°N 범위 내의 격자점을 사용하였다. 본 연구에서 주요 관측기기는 Fig. 2에 제시하였고 Table 2에 라디오존데 및 ASOS의 관측 지점과 주요 기상 변수를 나열하였다.

**2.2 분석 사례 선정 방법**

본 연구에서는 우선 YES-WEX 관측 캠페인 기간인 2019년부터 2023년 사례 중 강설과 눈·비 혼합형 강수가 내린 사례만을 선정하였으며, 각 사례의 종관장, 강설량, 강수량과 850 hPa(온도, 풍향, 풍속, 최대풍속) 그리고 역전층(뚜께, 강도) 특성을 Table 3에 제시하였다. 종관 특징은 Ko et al. (2016)에서 제시한 분류 방법에 기반하여 저기압 관통형(Low Crossing, LC), 저기압 통과형(Low Passing, LP), 정체형(Stagnation, ST)으로 각각 분류하였다. 저기압 관통형(LC)은 저기압이 한반도를 관통하면서 한반도 전역에 강수가 내리는 형태이며, 저기압 통과형(LP)은 한반도 남쪽으로 저기압이 통과하고 북쪽에 시베리아 고기압이 위치하여 북고남저의 기압분포를 가져, 영동지역과 제주 및 남부 일부 지역에 강수가 내리는 유형이다. 마지막으로 정체형(ST)은 시베리아 고기압이 한반도 북동쪽으로 확장하며 일본 남쪽 저기압의 영향으로 영동지역 중심

으로만 강수가 집중되는 유형이다. 종관형태는 저기압 관통형 2개, 저기압 통과형 6개, 정체형이 9개이며, 강수 형태 중 강설 사례는 10개, 눈·비 혼합형 강설 사례는 7개로 분류되었다. 본 연구에서는 눈·비 혼합형 강수 사례 중 2022년 3월 17일~3월 19일과 2023년 2월 13일~2월 15일, 2개의 사례를 최종 선정하였다. 이 사례들은 공통적으로 저기압 통과형에서 정체형으로 바뀌는 종관형태를 보였으며, 지상 온도가 0°C 부근에 분포하여 눈 결정 변화가 뚜렷하였다. 특히하게 3시간 이내에 온도가 급강하하는 시간대가 존재하였고, 그 시간대에 온도 하강과 함께 습성 변화도 잘 나타났다. 각 사례의 기간 중 2022년 3월 19일과 2023년 2월 15일에 습성 변화가 잘 나타났기 때문에 각각을 HC1 (Habit Change 1), HC2로 정의하고 분석하였다.

**3. 연구결과**

**3.1 사례별 종관 및 열역학 구조 특성**

선정된 사례들의 종관 일기조건을 파악하기 위하여 각 사례들의 지상 일기도를 Fig. 3에 제시하였다. 사례들의 종관장은 정체형 형태로 풍향은 주로 북동풍 계열이었고 동해안 중심으로 강수가 있었다. 또한, 약한 종관장의 지배를 받기 때문에 등고선이 조밀하지 않고 바람이 약해 지형적인 영향에 의한 중규모 현상

**Table 3.** Summary of the meteorological variables for the YES-WEX campaign.

No	Period of event	Synoptic	Phase	Snow (cm)/ precipitation (mm)	850 hPa (°C)	Inversion		Water Vapor		Remark
						Depth (m)	Strength (°C)	IWV (mm)	IWV <sub>Max</sub> (mm)	
1	2019.01.25.~26.	ST	Snow	3.5/1.3	-10.6	433	1.7	4	6.7	
2	2019.01.31.~02.01.	LP	Snow	17.1/15.8	-8.4	1172	2.6	7	10.9	
3	2019.02.13.~14.	ST	Snow	0.4/0	-11.7	N/A	5.2	4.6	6.4	
4	2019.03.15.~16.	LC	Mixed	0.5/4.9	-4.4	8.1	N/A	8.5	10.3	
5	2020.01.30.~31.	LP	Snow	0.7/8.1	-7.2	424	2.8	9.5	14	
6	2020.02.05.~06.	ST	Snow	-/0	-12.9	700	1.9	3.9	5.7	
7	2020.02.08.~09.	ST	Snow	4.2/1.2	-9.1	347	1.7	6.4	6.7	
8	2020.03.15.~16.	ST	Snow	7.9/8.1	-7.9	N/A	N/A	6.7	7.6	
9	2021.03.01.~02.	LC	Mixed	43.3/72.7	-8.1	520	3.6	10.9	21.1	
10	2021.03.06.~07.	ST	Snow	2.3/4.9	-6.3	151	5.1	10.6	11.9	
11	2021.12.24.~25.	ST	Snow	37.0/31.7	-7.7	285	1.2	9.3	11.6	
12	2022.01.19.~20.	ST	Snow	6.0/4.5	-12.5	395	0.4	5.5	7.2	
13	2022.02.13.~15.	ST	Mixed	-/1.7	-5.8	138	1	8.7	10.9	
14	2022.03.17.~19.	LP	Mixed	9.8/65.1	-4.8	408	2.4	13.5	18.1	HC1
15	2023.01.14~15	LP	Mixed	16.8/62.3	-6.9	351	2.4	13.56	16.8	
16	2023.02.13.~14.	LP	Mixed	1.4/18.2	-6.2	250	1.8	9.3	16.3	
	2023.02.15.	ST	Snow	28.1/21.6	-11.1	360.3	3	6.4	7.4	HC2
17	2023.02.24.~25.	ST	Mixed	2.2/4.5	-8.5	340	1.5	6.7	7.2	

YES-WEX (Yeongdong Extreme Snowfall and Wind Experiment), LC (Low Crossing), LP (Low Passing), ST (Stagnation), HC (Habit Change), N/A (Not Available), IWV (Integrated Water Vapor)

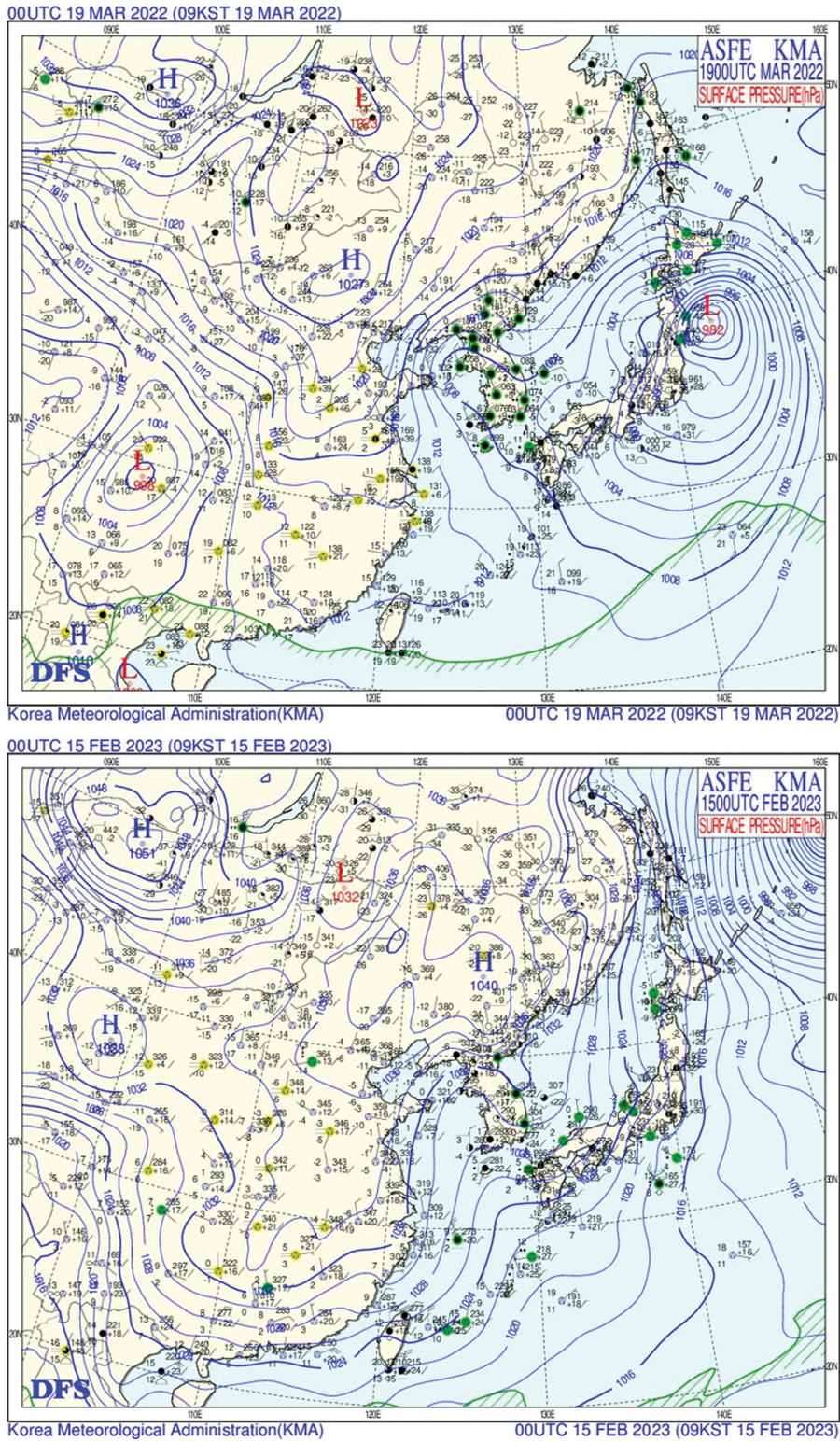


Fig. 3. Surface weather maps of HC1 (1500 KST 19 Mar 2022) and HC2 (0900 KST 15 Feb 2023).

이 지배적일 것으로 판단된다. Figure 4는 각 사례의 ASOS와 라디오존데에서 관측된 기온, 850 hPa 온도, 강설량, 강수량 자료를 제시한 것이다.

HC1(2022년 3월 19일) 사례는 지상 온도가 0°C 부근에 분포하였고, 기온이 하강하는 0300~0600 KST

기간에 지상 기온이 2°C 가량 떨어지면서 비에서 눈으로 정상 변화가 있었다. 그리고, 0900~1000 KST에 일시적으로 눈에서 혼합형 강수로 바뀌었다가 1000~1200 KST 기간에 850 hPa 온도가 -10°C까지 급감하면서 다시 눈으로 바뀌었다. 이후 온도가 상승하면서

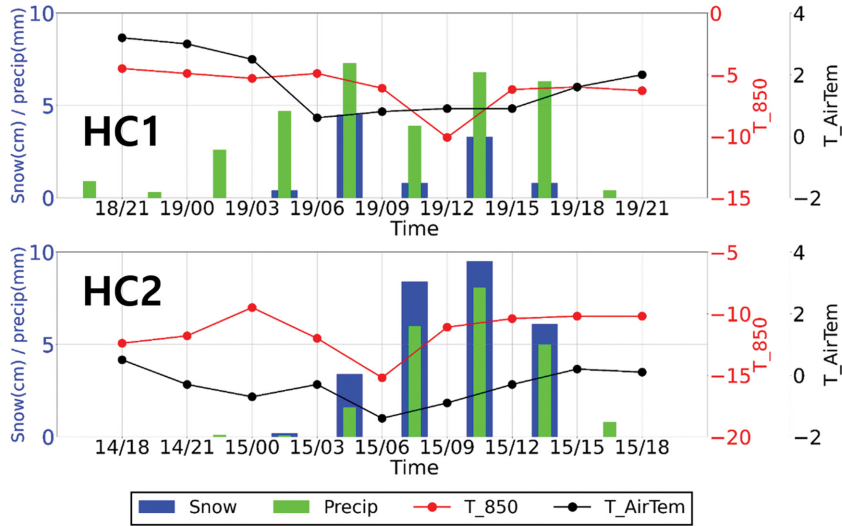


Fig. 4. Time series of snowfall and precipitation amounts along with 850 hPa and surface temperature for HC1 and HC2.

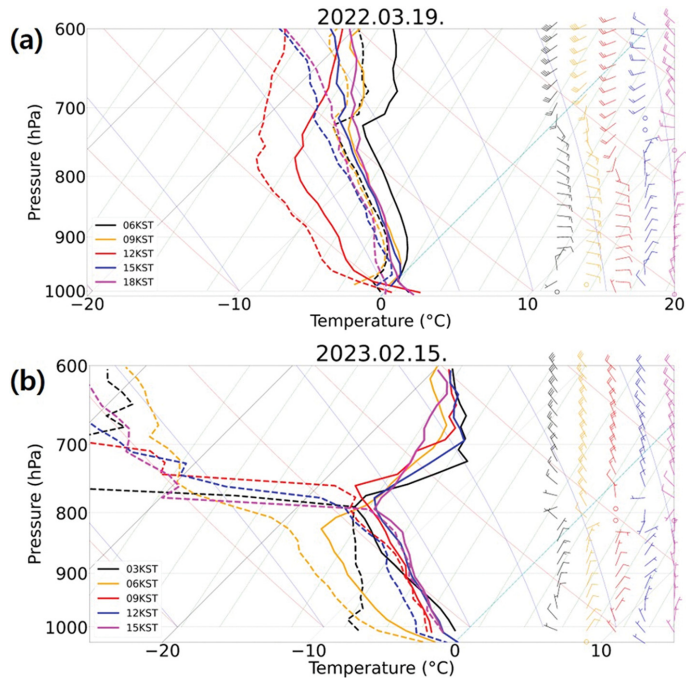
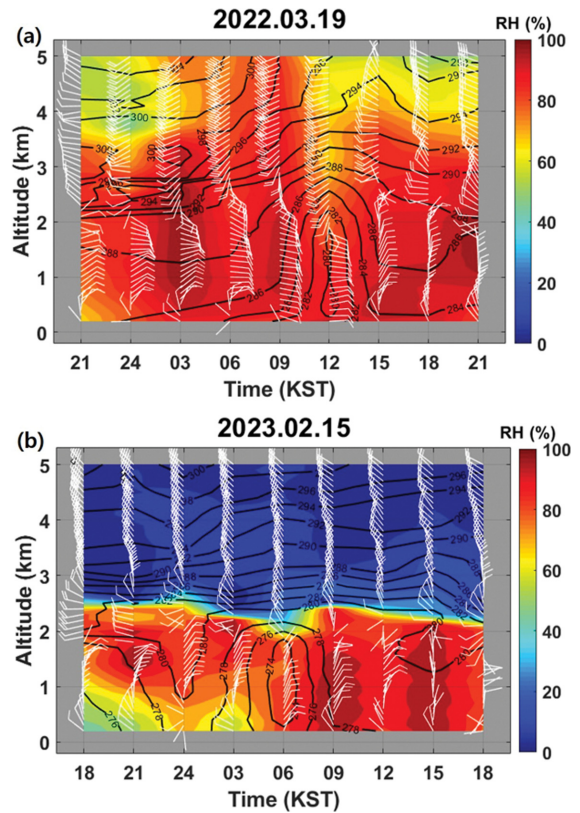


Fig. 5. Vertical profile of temperature (solid line), dew-point temperature (dashed line) and wind obtained from radiosondes of HC1 (19 Mar 2022) and HC2 (15 Feb 2023).

1700 KST에 또 한번의 성상 변화가 나타났으며, 하루 동안 총 4번의 성상 변화가 관측되었다. 반면에, HC2 사례(2023년 2월 15일)는 강수 내내 지상 온도가 0°C 이하 분포를 보이며 눈 형태의 강수가 지속되었다. 강설이 시작되는 0000~0600 KST 기간에는 850 hPa 온도가 -9°C에서 -15°C까지 감소하면서 강설량이 증가하였고, 일 신적설량이 28 cm 가량 기록하면서 많은 눈이 내렸다.

다음은 대기열역학 특성에 따른 눈 습성 변화를 이해하기 위하여 HC1과 HC2 사례의 단열선도를 Fig. 5에 제시하였고, Fig. 6은 상당운위, 상대습도와 바람에 대한 연직구조의 시간변화를 함께 나타낸 것이다. 또한, HC 사례들의 시간 별 자세한 비교를 위해 라디오존데 관측값을 기반으로 850 hPa의 온도, 노점온도, 풍속과 북동풍 계열 두께, 역전층 고도, 역전층 두께를 Table 4에 정리하였다.

HC1 사례는 약 2.5 km 이하 하층에서 대체로 동풍 계열 바람, HC2 사례는 약 2 km 이하 하층에서 북동풍 계열 바람이 불어 들어왔으며, HC2 사례에서 비교적 온도가 낮고 북동풍이 최대 약 1600 m 이상 두껍게 발달하였다. 또한, HC1 사례는 연직으로 완만한 온도 감소에 따라 약한 역전층이 형성되었고 상층까지 습윤한 반면에, HC2 사례는 약 800 m 두께의 강한 역전층이 발달하였으며 역전층 이상 고도에서는 상대적으로 건조하였다(Fig. 5). 이러한 연직구조는 Fig. 6에서도 나타났으며, HC1 사례에서 5 km 고도까지 높은 상대습도로 비교적 두꺼운 구름이 형성되었지만, HC2 사례는 2.5 km 이상 고도에서 상대습도가 낮은 분포를 보이며 얇은 눈구름이 잘 발달하였던 것으로 판단된다. 또한, 각 사례의 1200 KST (HC1)과 0600 KST (HC2)에 약 2.5 km 이하 고도에서 3시간 동안 4~6 K 가량 상당운위의 하강이 뚜렷하게 나타났고 지상까지 북동풍계열의 바람이 유입되었다(Fig. 6).



**Fig. 6.** Time series of vertical profiles of equivalent potential temperature (black line), wind, and relative humidity (shading) for HC1 (19 Mar 2022) and HC2 (15 Feb 2023) from radiosonde soundings.

**3.2 사례별 눈 결정의 특성**

겨울철 영동지역은 북동풍의 유입으로 발생하는 강수 현상은 급격한 기온 하강으로 인해 비에서 눈으로

**Table 4.** Summary of HC1 and HC2 radiosonde measurements.

Event	Time (KST)	850 hPa Temperature (°C)	850 hPa Dew point (°C)	850 hPa Wind speed (m s <sup>-1</sup> )	Northeasterly wind depth (m)	Inversion depth (m)	Inversion layer (m)
HC1	06	-4.9	-6.6	7.3	1143	658	2400
	09	-6.0	-7.0	8.5	1393	331	2640
	12	-10.1	-12.2	5.6	1270	129	2074
	15	-6.5	-7.4	6.2	1471	95	2815
	18	-6.0	-7.0	6.7	1261	789	2085
HC2	03	-12.0	-13.5	6.0	1206	565	2150
	06	-15.2	-17.3	2.3	1688	509	1779
	09	-11.1	-11.4	1.7	1613	847	2365
	12	-10.4	-11.6	2.7	1283	748	2308
	15	-10.2	-10.5	2.0	1156	845	2185

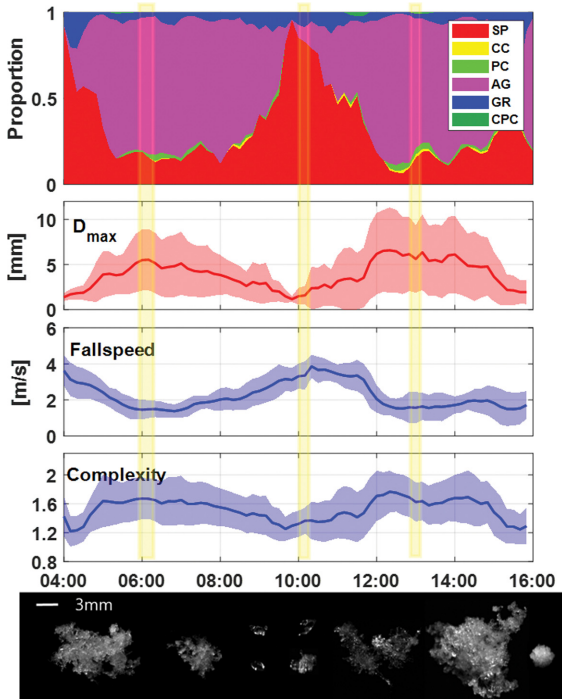


성상 변화가 자주 일어난다. Kim et al. (2019)에 의하면 한기 유입을 동반한 강설 초기 단계에서 과냉각 수적의 존재 가능성이 크며, 눈의 습성은 결착 형태였던 눈 결정이 온도가 하강하면서 부착(aggregate) 형태로 변하는 경향이 있다고 주장하였다. 눈 결정이 결착형일 경우에는 입자 크기와 복잡도는 작고 낙하속도가 큰 반면에, 부착형은 입자 크기와 복잡도는 크고 낙하속도는 상대적으로 작은 편이다. Figs. 7-8은 각 사례의 눈 입자 습성 변화, 최대 지름, 낙하속도, 복잡도, 중형비 그리고 시간 별 MASC로 촬영된 주요 눈 결정 사진을 제시한 것이다. 눈 결정 습성은 Praz et al. (2017)과 Kim et al. (2019)을 참조하여 부착형 Aggregate (AG), 작은 입자들의 집합 Small Particle (SP), 바늘과 컬럼모양 Columnar Crystal (CC), 편평한 판 모양 Planar Crystal (PC), CC와 PC로 혼합형 CPC 그리고 싸락눈 Graupel (GR) 등 6가지 종류로 분류하였다. 먼저 HC1 사례(Fig. 7)의 0300~0600 KST 기간에 비에서 눈으로 성상 변화가 있을 때 과냉각 수적들이 결착형으로 빙결되고 충돌과정에서 부

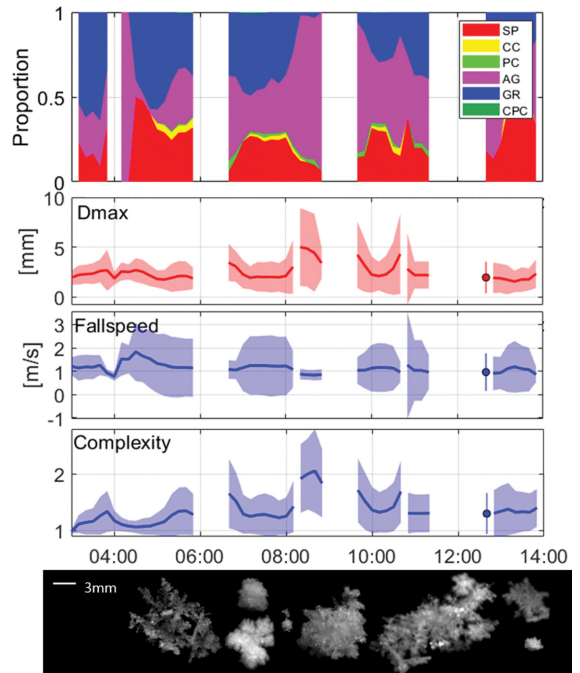
착되어 큰 입자로 관측된 반면에, 0900~1000 KST 기간에는 이전 시간 대비 입자가 어둡고 둥근 형태(낮은 복잡도)의 결착형 입자가 주로 관측되었다. 이후 온도 감소와 함께 입자 크기가 다시 커지면서 부착형으로 습성 변화가 나타났다.

Figure 8는 HC2 사례의 MASC 분석결과를 제시한 것인데, 이 기간 MASC 기기의 오작동으로 중간에 결측이 많았지만, 촬영된 눈 결정 사진과 각 변수들의 변화로 보았을 때 눈 결정 습성 변화를 확인할 수 있었다. 온도가 감소한 0600 KST 전·후로 낙하속도, 복잡도, 입자 크기 등의 변화가 뚜렷하였는데, 주로 부착형 형태의 눈 결정이 관측되었다. 그리고 온도 상승 이후 다시 결착형 형태가 나타났으며, 0800 KST 이후 온도가 낮아 대부분 부착형 형태가 관측되었다.

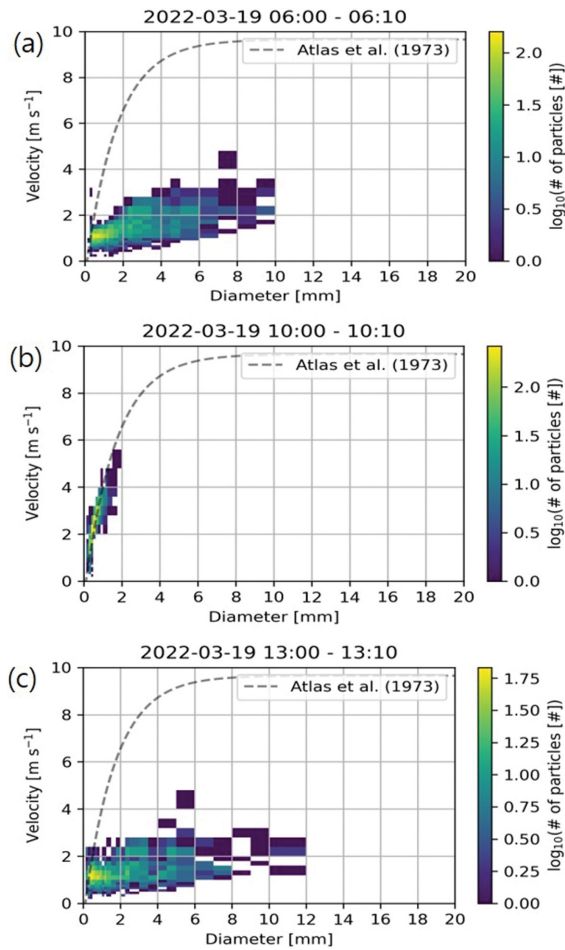
Figure 9는 HC1 사례의 강수 입자를 PARSIVEL로 관측하여 입자의 크기와 낙하속도를 제시하였다. 여기에서 3개의 시간(0600, 1000, 1300 KST)대는 Fig. 7에 노란색 음영 처리된 기간의 10분 동안 자료를 분석한 것이다. 첫 번째 기간인 0600 KST에 입자크기는 컸지만 낙하 속도가 느린 반면에, 1000 KST에는



**Fig. 7.** Variations of snow crystal habit, its diameter, fall speed, and complexity in the case of HC1 (19 Mar 2022) using a Multi Angle Snowflake Camera (MASC) at GWNU. SP denotes Small Particle; CC Columnar Crystal; PC Planar Crystal; CPC Combination of column and Plate Crystal; AG Aggregate; GR Graupel.



**Fig. 8.** Variations of snow crystal habit, its diameter, fall speed, and complexity in the case of HC2 (15 Feb 2023) using a Multi Angle Snowflake Camera (MASC) at GWNU. SP denotes Small Particle; CC Columnar Crystal; PC Planar Crystal; CPC Combination of column and Plate Crystal; AG Aggregate; GR Graupel.

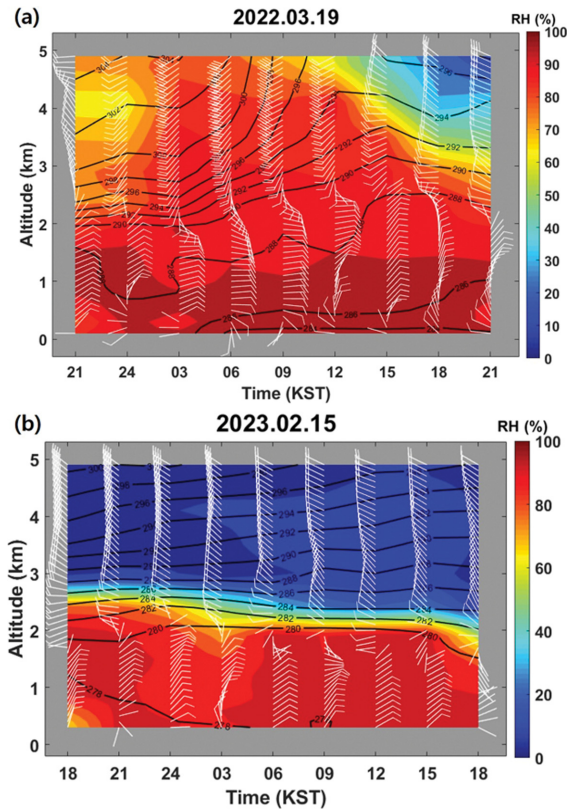


**Fig. 9.** The distribution of particle frequencies on fall velocity vs. diameter space obtained from PARSIVEL for (a) 0600~0610 KST, (b) 1000~1010 KST, and (c) 1300~1310 KST of HC1 (19 Mar 2022). Dashed line indicates the empirical formula of rain (Atlas et al., 1973).

입자 크기는 작아지면서 낙하 속도가 증가하였다. 이후 1300 KST에는 다시 입자 크기는 증가하고 낙하속도가 감소하는 패턴을 보였는데, 이는 MASC 분석과 일치된 결과를 나타낸 것이다(Fig. 7).

**3.3 모델 비교 분석 및 토의**

앞서 제시한 연구결과를 통해 대기열역학 구조가 변하면서 습성 변화가 뚜렷하게 나타난 것을 확인하였다. 이러한 6시간 이내 중규모적 기상 변화는 조밀한 시간(3시간) 간격의 사운딩이 있었기에 단기간 변화를 확인할 수 있었다. 이와 같이 급변하는 중규모 기상 현상을 시공간적 확장하여 이해하고, 모델 분석장이 관측결과를 잘 재현하는지 확인하기 위하



**Fig. 10.** Time series of vertical profiles of equivalent potential temperature (black line), wind, and relative humidity (shading) for HC1 (19 Mar 2022) and HC2 (15 Feb 2023) using LDAPS analysis data.

여 현업 모델인 LDAPS 분석장을 활용하였다. Figure 10은 Fig. 6과 유사하게 LDAPS 분석장의 상당운위, 상대습도와 바람에 대한 연직구조를 3시간 간격의 시계열 그래프로 제시하였다. 두가지 HC 사례 모두 온도가 급격하게 떨어진 시간대를 제외하면 전체적으로 비슷한 구조를 보였다(Fig. 10). HC1 사례(Fig. 10a)의 경우, 1200 KST에 500 m 이하 고도에서 관측장은 북동풍이 관측되었지만, 모델 분석장에서는 북서풍을 모의하였고 관측장(280 K)이 모델 분석장(284~286 K)에 비해 상당운위를 대략 4~6 K 가량 과대 모의하는 경향을 보였다. 또한, 모델 분석장이 1500~2100 KST 사이 3 km 이상 고도에서 관측장에 비해 상대습도가 급격히 낮아지며 비교적 구름을 얇게 모의하였다.

HC2 사례(Fig. 10b)에서도 유사하게 모델 분석장이 0900~1800 KST 기간에 1 km 이하의 하층 바람을 북동풍으로 모의하여 북풍 계열의 관측장과 차이를 보였다. 온도 급감이 있는 0600 KST에 바람은

비슷한 형태를 보였지만, 상당운위는 모델 분석장이 278 K로, 관측장(274 K 내외)에 비해 약 4 K 가량 과대 모의하는 경향이 있었다. 결과적으로 HC 사례들은 6시간 이내의 급변하는 온도 변화를 LDAPS 분석장이 제대로 모의하지 못한 것으로 판단된다. 실제로 겨울철에 이러한 온도 차이가 발생할 경우, 비가 눈으로의 성상 및 습성 변화가 일어나 도로 교통사고, 농가 비닐하우스 혹은 가건물 붕괴 등의 피해를 유발할 수 있다.

기존 선행 연구에서는 관측과 모델을 활용하여 영동지역에서 강설의 종관 규모 메커니즘에 초점을 맞추어 주로 태백산맥과 동해 효과에 대한 연구가 진행되어 왔다. 이러한 연구들은 강설 시 열역학적인 특성 분석과 에너지와 관련된 대류불안정 등 강설 메커니즘을 이해하는 데 도움이 되었지만, 직접적인 피해를 유발하는 눈 결정의 습성 및 변화에 대해서는 국내에서 많은 연구가 진행되지 않았다. 그래서 본 연구에서는 온도 급감이 발생한 특정 사례를 선정하여 온도 급변에 따른 눈 결정 변화를 분석하였다. 그 결과, 단기간의 온도 급감에 따라 눈 결정 역시 결정형에서 부착형으로 변화가 나타났는데, 이는 영동지역에서 한기 유입 시 눈 결정이 결정형에서 부착형으로 변하는 경향이 있다는 Kim et al. (2018b)의 선행 결과와도 일치하였다. 하지만 온도 하강의 원인과 이를 초래한 중규모 메커니즘에 대한 원인을 규명하지는 못하였다. 더불어 현업 모델에서 단기간 내의 온도 하강을 제대로 모의하지 못하는 한계점 역시 확인할 수 있었다. 위에서 언급한 바와 같이 영동지역에서 단기간의 급격한 온도 변화는 강설 성상 및 습성 변화를 일으켜 주변 지역에 여러 피해를 유발할 수 있기 때문에 본 캠페인과 같은 3시간 간격의 조밀한 사운드링 관측과 눈 결정에 대한 정량 분석은 겨울철 지형적 요인으로 발생하는 중규모 기상 현상을 이해하는 데에 필수적이다. 나아가 이와 같은 관측결과를 모델 내 빙정 수치모의과정 개선에 반영하기 위해서는 현재 관측 이외에 구름 및 강수 레이더, 항공 직접(in-situ) 관측 등의 정밀한 집중(intensive) 관측이 필요하다. 그리고 모델 개선을 위한 지속적인 피드백 과정을 통해 풍상측의 한기 유입과정 및 중규모 와도 발생 역학과정, 빙정 미세물리과정 등을 이해하기 위한 통합(comprehensive) 관측 캠페인 역시 필요하다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 2019~2023년까지 진행한 YES-WEX 공동 관측 캠페인에서 얻은 18개 강설 사례 중에서 눈 결정 성상 및 습성 변화가 나타난 2개의 사례를

선정하여 집중 분석하였다. 두 사례는 2022년 3월 19일(HC1)과 2023년 2월 15일(HC2)이었으며 저기압 통과형(LP)에서 정체형(ST)으로 바뀌는 유사한 종관 조건에서 동해안 중심으로 눈·비 혼합형 강수가 있었다. 본 사례들은 전반적으로 2.5 km 이하 고도에서 북동풍 계열의 한기가 유입되면서 온도가 급감하는 형태를 보였다. HC1과 HC2 사례의 운정 고도는 각각 5 km, 2.5 km으로, 큰 차이를 보였으며 역전층은 HC2 사례가 더 강하게 형성되었다. HC1 사례는 HC2 사례에 비해 지상 온도가 0°C 부근으로 상대적으로 높았기 때문에, 습성 변화가 뚜렷하게 나타났다. HC 사례들은 공통적으로 눈 결정 습성은 사례별 온도가 급격히 낮아지는 시간대(HC1: 0900~1200 KST, HC2: 0300~0600 KST)에 결정형에서 부착형으로 변화가 있었고 이후 온도가 상승하면서 다시 결정형으로 습성 변화가 나타났다. LDAPS 분석 결과에서는 관측장과 비슷한 열역학 구조를 보였지만, 온도가 급감하는 시점에 두 사례 모두 모델 분석장이 관측장에 비해 상당운위를 4~6 K까지 과대 모의하는 경향을 보이며 온도를 제대로 모의하지 못하였다.

연구결과 하층의 급격한 온도 하강이 눈 결정의 습성 및 성상 변화를 초래하였지만, 어떤 요인에 의해 온도의 급격한 감소를 일으켰는지는 아직 확인할 수 없었다. 다만 6시간 이내의 지형적인 요인에 의해 발생한 중규모 기상현상 때문으로 추정된다. 현업 모델인 LDPAS 분석장에서도 온도 변화가 뚜렷하게 나타나지 않았으며, 이는 모델이 단기간 중규모 기상 변화를 잘 모의하지 못하는 것을 의미한다. 그러므로 눈 결정의 시·공간적 변화와 성상 변화를 제대로 모의하기 위해서는 지형적 요인과 중규모적 기상 현상의 상호 작용 이해가 필수적이다. 향후 영동지역 강설 예보 향상을 위해서는 본 캠페인과 같이 조밀한 시간 간격의 관측과 지형 효과를 고려한 시·공간적 관측망 구성이 필요하고, 지속적인 강설 관측 캠페인이 이루어져야 할 것이다.

#### 감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「국가 기상관측 장비 및 관측자료 표준화」(KMA2018-00221)의 지원과 예보연구부 학술연구용역 지원으로 수행되었습니다. 또한, 이 성과는 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(NRF-2022R1F1A1063196).

#### REFERENCES

Atlas, D., R. S. Srivastava, and R. S. Sekhon, 1973: Doppler radar characteristics of precipitation at vertical

- incidence. *Rev. Geophys.*, **11**, 1-35, doi:10.1029/RG011i001p00001.
- Bailey, C. M., G. Hartfield, G. M. Lackmann, K. Keeter, and S. Sharp, 2003: An objective climatology, classification scheme, and assessment of sensible weather impacts for Appalachian cold-air damming. *Wea. Forecasting*, **18**, 641-661, doi:10.1175/1520-0434(2003)018<0641:AOCSSA>2.0.CO;2.
- Bailey, M. P., and J. Hallett, 2009: A Comprehensive habit diagram for atmospheric ice crystals: Confirmation from the laboratory, AIRS II, and other field studies. *J. Atmos. Sci.*, **66**, 2888-2899, doi:10.1175/2009JAS2883.1.
- Bang, W., K. Kim, D. Yeom, S.-J. Cho, C.-L. Lee, D. Lee, B.-Y. Ye, and G. Lee, 2019: Characteristics analysis of snow particle size distribution in Gangwon region according to topography. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **40**, 227-239, doi:10.5467/JKESS.2019.40.3.227.
- 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.*, doi:10.1007/s13143-024-00361-9.
- 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.*, **5**, 2625-2633, doi:10.5194/amt-5-2625-2012.
- Judson, A., and N. Doesken, 2000: Density of freshly fallen snow in the central Rocky Mountains. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **81**, 1577-1587, doi:10.1175/1520-0477(2000)081<1577:DOFFSI>2.3.CO;2.
- 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 Youngdong area. *Atmosphere*, **28**, 187-200, doi:10.14191/Atmos.2018.28.2.187 (in Korean with English abstract).
- 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.
- 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, M.-G., B.-G. Kim, S.-H. Eun, Y.-J. Chae, J.-H. Jeong, Y.-G. Choi, and G.-M. Park, 2021a: 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).
- Kim, B.-G., M.-G. Kim, T.-Y. Kwon, G.-M. Park, Y.-D. Han, S.-B. Kim, and K.-H. Chang, 2021b: Observation and understanding of snowfall characteristics in the Yeongdong region. *Atmosphere*, **31**, 461-472, doi:10.14191/Atmos.2021.31.4.461 (in Korean with English abstract).
- 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., J.-E. Kim, and K.-B. Jeong, 2003: Relationship between winter precipitation in the Yeongdong region and the wind direction in the lower troposphere. *Atmosphere*, **13**, 366-369.
- Lee, H., and T.-Y. Lee, 1994: The governing factors for heavy snowfalls in Youngdong area. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **30**, 197-218 (in Korean with English abstract).
- Lee, J. G., 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.
- Löffler-Mang, M., and J. Joss, 2000: An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **17**, 130-139, doi:10.1175/1520-0426(2000)017<0130:AODFMS>2.0.CO;2.
- 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.
- \_\_\_\_\_, J. Jung, H.-U. Kim, J.-K. Shim, B.-J. Kim, S.-B. Kim, and B.-G. Kim, 2020: An analysis on the spatial scale of Yeongdong Cold Air Damming (YCAD) in winter using observation and numerical weather model. *Atmosphere*, **30**, 183-193 doi:10.14191/Atmos.2020.30.2.183.
- 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.
- Rees, K. N., D. K. Singh, E. R. Pardyjak, and T. J. Garrett, 2021: Mass and density of individual frozen hydro-

meteors. *Atmos. Chem. Phys.*, **21**, 14235-14250, doi: 10.5194/acp-21-14235-2021.

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, doi:10.14191/Atmos.2015.25.2.261 (in Korean with English abstract).