

영동지역 기상조건이 구름 및 강설 모의에 미치는 영향: 이상 실험 기반의 사례 연구

김유준* · 안보영 · 김백조 · 김승범

국립기상과학원 재해기상연구부

(접수일: 2021년 4월 8일, 수정일: 2021년 5월 25일, 게재확정일: 2021년 6월 14일)

Effects of Meteorological Conditions on Cloud and Snowfall Simulations in the Yeongdong Region: A Case Study Based on Ideal Experiments

Yoo-Jun Kim*, Bo-Yeong Ahn, Baek-Jo Kim, and Seungbum Kim

High Impact Weather Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Gangneung, Korea

(Manuscript received 8 April 2021; revised 25 May 2021; accepted 14 June 2021)

Abstract This study uses a cloud-resolving storm simulator (CReSS) to understand the individual effect of determinant meteorological factors on snowfall characteristics in the Yeongdong region based on the rawinsonde soundings for two snowfall cases that occurred on 23 February (Episode 1) and 13 December (Episode 2) 2016; one has a single-layered cloud and the other has two-layered cloud structure. The observed cloud and precipitation (snow crystal) features were well represented by a CReSS model. The first ideal experiment with a decrease in low-level temperature for Episode 1 indicates that total precipitation amount was decreased by 19% (26~27% in graupel and 53~67% in snow) compared with the control experiment. In the ideal experiment that the upper-level wind direction was changed from westerly to easterly, although total precipitation was decreased for Episode 1, precipitation was intensified over the southwestern side (specifically in terrain experiment) of the sounding point (128.855°E, 37.805°N). In contrast, the precipitation for Episode 2 was increased by 2.3 times greater than the control experiment under terrain condition. The experimental results imply that the low-level temperature and upper-level dynamics could change the location and characteristics of precipitation in the Yeongdong region. However, the difference in precipitation between the single-layered experiment and control (two-layered) experiment for Episode 2 was negligible to attribute it to the effect of upper-level cloud. The current results could be used for the development of guidance of snowfall forecast in this region.

Key words: Cloud-resolving storm simulator, Yeongdong, rawinsonde, ideal experiment

1. 서론

영동지역은 동해(Ease Sea)와 인접해 있고, 해안선을 따라 높은 태백산맥이 위치하는 등 복잡한 지형

특성으로 인해 겨울철 강설 예보에 많은 어려움을 겪고 있다. 강설량이 많을 경우, 누적된 강설의 무게로 인한 가건물 및 비닐하우스 붕괴, 도로 살얼음으로 인한 교통 사고와 그로 인한 대규모 교통정체 상황을 야기시키는 등 사회/경제적으로 큰 영향을 미치고 있다. 뿐만 아니라 등산 등의 레저 활동, 관광 산업, 동계 스포츠 등과도 밀접하게 연관되어 있다. 반면 강설량이 적을 경우, 봄철 건조한 대기 상태로 인한 대형 산불 발생 등 또 다른 자연 재난 및 재해를 유발

*Corresponding Author: Yoo-Jun Kim, High Impact Weather Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, 7 Jukheon-gil, Gangneung 25457, Korea.
Phone: +82-33-913-1058, Fax: +82-33-644-2657
E-mail: yoojun@korea.kr

할 수 있다. 이는 산불 진화의 핵심인 소방헬기 용수 확보 문제 등 산불피해 방재 대책 수립 차원에서도 중요한 문제이기 때문에 영동지역 강설 이슈로 인한 파급 효과는 규모가 상당하다고 볼 수 있다.

한편 기상학적인 관점에서 살펴보면, 강설의 가장 기본 요소인 눈결정은 강설 입자의 낙하속도 및 산란·흡수 특성에도 영향을 미치기 때문에 구름 및 강수 물리에 있어 중요한 역할을 한다. 눈결정 특성은 수치 모델에서 강수 강도와 위치를 변화시킬 수 있고 (Lin et al., 2011), 산란(scattering) 및 흡수(absorbing) 특성이 제각각 다르기 때문에 위성과 레이더와 같은 원격관측 측면에서도 중요한 역할을 한다(Molthan et al., 2010; Cooper et al., 2017). 눈결정은 일반적으로 빙정핵이 존재하는 상황에서 다양한 비균질 핵화 과정에 의해 형성되게 된다. 그리고 영하인 조건에서 과냉각 수적(supercooled water droplets)이 빙정에 달라 붙어 결착(riming)되거나, 빙정들이 상호 부착(aggregate) 과정을 거쳐 성장하게 된다. 결착 성장 과정은 지형성 강설 형성에 매우 중요하게 작용할 수 있으며 (Harimaya and Nakai, 1999), 부착 과정 또한 낙하하는 눈송이의 질량 증가에 간접적으로 기여하게 된다고 보고된 바 있다(Houze Jr. and Medina, 2005).

부착 및 결착 과정은 복잡한 산악 지역에서 빈번하게 발생하며 강설 형성에 있어 중요하게 작용될 수 있다. Schneebeli et al. (2013)은 X-밴드 이중편파 레이더 관측이 스위스 동부 산악지역의 온도와 수증기량에 의해 야기된 강설의 주요 미세물리 기작을 이해하는데 유용할 수 있음을 보여주었다. Grazioli et al. (2015)는 편광 레이더 및 직접(in-situ) 관측을 통해 결착 과정이 누적 강설량과 상호 연관성이 있음을 주장하였다. 또한 극지역 혼합구름을 대상으로 레이더 차등 반사도 및 낙하 속도 자료를 활용하여 강설입자 종류를 판별하는 데 활용한 바 있다(Oue et al., 2016). 이와 같이 국외의 활발한 연구들에 비해 국내의 눈결정 특성에 관한 관측 및 모델링 연구는 부족하지만 영동지역을 중심으로 몇몇 연구들이 수행되었다. Seo et al. (2015)는 2014년 Experiment on Snow Storms At Yeongdong (ESSAY) 캠페인 기간 레윈존데와 확대경이 부착된 카메라를 이용하여 강설 및 눈결정 특성을 제시하였으며, Kim et al. (2019)는 Multi-Angle Snowflake Camera (MASC)를 활용한 눈결정의 형태학적 분류 및 다양한 물리 변수들의 정량적 분석 결과를 소개한 바 있다. 또한 최근에는 집중관측 및 구름 모델링 기반의 분석을 통해 영동지역 겨울철 기상 조건에 따른 강설 입자 특성 차이를 규명한 연구 결과가 보고되었다(Kim et al., 2018, 2021).

영동지역은 앞서 언급하였듯이 지역적인 특수성으로 인해 주변 기상 조건을 고려한 구름 미세물리 특

성 및 강설 입자 형성 메커니즘을 이해할 필요성이 있다. 최근에도 평창 국제공동연구(ICE-POP 2018) 및 강원영동 공동 입체기상관측 프로젝트 기간 고해상도 집중 관측 수행 등을 통해 강설 예측의 정확도 향상을 위해 지속적으로 노력하고 있으나 빙정 형상(ice-phase) 강수의 복잡한 미세물리 과정에 대한 이해는 여전히 부족한 실정이다(Gehring et al., 2020; Jeoung et al., 2020). 본 연구의 목적은 집중 관측 및 고해상도 구름 모델링의 통합 연구를 통해 영동지역의 눈결정 특성을 이해하고 강설 미세물리 기작을 규명하는 것이다. Kim et al. (2018)은 전형적인 종관 패턴(저기압 정체형)을 가지는 서로 다른 두 가지 강설 에피소드를 선정하여 고해상도 구름분해모델을 활용한 재현 실험을 수행하였지만 지형적인 영향을 고려하지 못하였다(Kim et al., 2021). 따라서 본 연구에서는 다른 인자들이 통제된 상태에서 영동지역 강설에 미치는 주요 기상 인자들의 개별적인 영향에 대해 분석하기 위해 이상적인 대기 조건에서 기온, 습도, 바람 등을 바꾸어가며 수치 실험을 수행한 후 이들 변화가 구름 및 강설 모의에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 수치 모델과 실험 설계

본 연구에서 사용한 수치 모델은 일본 나고야 대학교의 대기물순환연구센터(HyARC)에서 개발한 Cloud Resolving Storm Simulator (CRSS) 모델로, 강수 모의 성능은 선행연구들(Lee et al., 2010; Im et al., 2013)의 결과에서 이미 입증된 바 있다. CRSS는 3차원 비정역학 모델이며, 중규모 시스템을 현실적으로 모의하기 위하여 기본적으로 디자인되었다(Tsuboki and Sakakibara, 2001, 2002). 또한 구름 미세물리 방안을 위해 Bulk cold rain 스킴을 적용하였다(Murakami et al., 1994). CRSS 모델의 미세물리 과정은 상(phase)의 핵화(nucleation) 확산에 의한 성장 및 증발과 같은 액체상 물과 얼음상의 과정들, 그리고 입자들 간의 충돌·병합에 의한 과정의 3가지 기본 분류를 포함하고 있다(Murakami, 1990; Murakami et al., 1994; Lee et al., 2010). 또한 모델의 지면 강수는 입자의 밀도 및 낙하 속도에 의해 운빙(cloud ice), 눈(snow), 싸락눈(graupel), 우박(hail)의 4가지 유형의 고체상 강수와 비(rain)의 액상 강수로 구분된다(Tsuboki and Sakakibara, 2007). 여기서 눈결정 관측과의 비교를 위해 주안점을 두고 분석한 강수는 snow와 graupel이며, 낙하 속도는 각각 1 m s^{-1} 와 $1\sim 4 \text{ m s}^{-1}$ 으로 구분된다. 참고로 Lee et al. (2015)의 연구 결과에서도 보여주었듯이 실제 관측된 눈결정이 CRSS 모델에서 구분한 고체 강수 유형과 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 그러나, 모델에서 graupel의 낙하 속도는 넓은 범위에 속

Table 1. Configuration of ideal experiments using the CReSS (Version 3.5.0) model.

Model Parameters	Setup
Horizontal dimension	320 × 320 (160 km × 160 km)
Horizontal resolution	500 m
Vertical layer	50 layers
Vertical resolution	200 m
Time step	1.5 s
Integration period	10800 s (3 h)
Integration interval	300 s (5 min)
Bubble (Potential temperature perturbation)	5 K
Radius of bubble (rx, ry, rz)	10 km (rx), 10 km (ry), 5 km (rz)

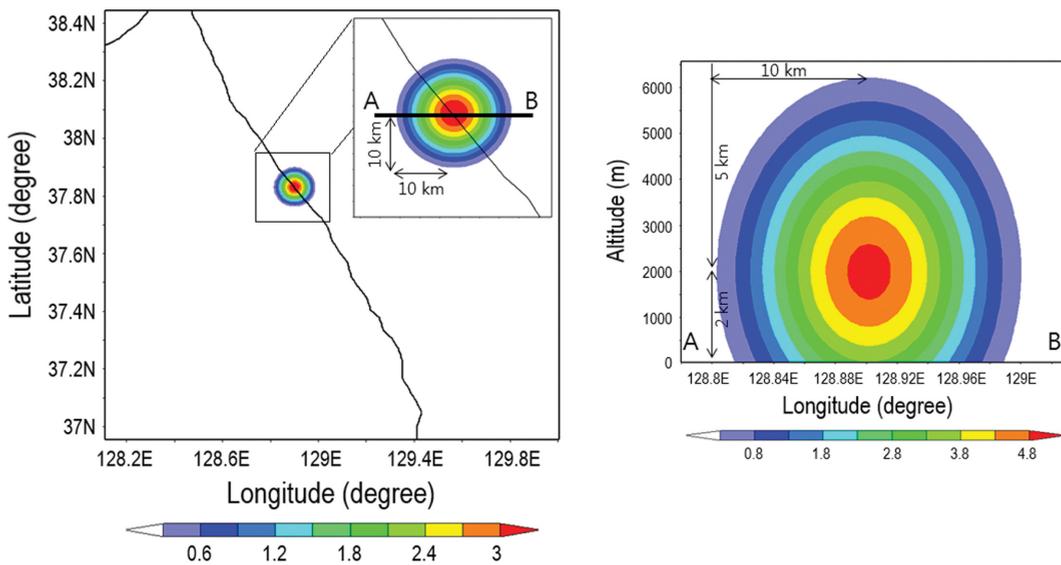


Fig. 1. Perturbation fields of horizontal (left) and vertical (right) warm bubbles (potential temperature) at the initial time.

해 있기 때문에 실제 관측에서는 다양한 눈결정(결착형, 부착형 등)이 포함될 수 있다.

이상(Ideal) 실험은 CReSS 모델의 고층자료 활용 수치모의(sounding run)을 기반으로 설계하였다. 연직 대기의 기압, 기온, 상대습도, 동서(u)와 남북(v) 성분의 바람까지 총 5개의 기상요소를 초기 조건으로 사용하여 수평적으로 균일한 3차원 대기장을 구성한다. 또한 초기 사운드링 조건에 인위적인 요란(Bubble)을 주어 특정 대기상태에서 발달할 수 있는 강설 구름의 효과적인 모의가 가능하다. 요란은 온위(potential temperature)의 변화를 통해 발생되며, 따뜻한 요란(warm bubble)이 초기 조건에 주어진다면 주변 대기보다 가볍고 습윤하기 때문에 상승하여 강설 구름으로 발달이 가능하다. 사운드링 자료의 연직 대기 상태를 반영하고자 하였으며 영동지역의 지형적인 특수성

을 고려하기 위해 지형을 포함하는 조건(TERR)과 지형 없는 조건(NOTR)으로 구분하여 실험을 설계하였다. 모델의 수평과 연직 해상도는 각각 500 m(320 × 320 격자)와 200 m(50개의 시그마층)으로 설정하였으며, 적분 시간과 간격은 각각 10800초(3시간)과 300 초로 설정하였다(Table 1). 초기장의 도메인 중심(사운드링 지점)에 수평 반지름 10 km, 연직 높이 5 km(중심 고도 2 km)까지 온위의 요란을 주었으며 요란 중심은 주변 대기보다 5 K 높은 온위 값을 설정하였다(Fig. 1). 요란의 온도 및 수평/연직 규모 설계는 실제 관측 구름의 현실성을 반영하여 최적화된 값을 적용하였으며, 지형 효과의 고려를 위해 도메인 영역을 영동지역을 대상으로 설계하여 사운드링 지점(강릉원주대학교 사이트; 128.855°E, 37.805°N)과 요란 중심의 위치를 일치시켰다.

Table 2. Summary of numerical experiments for the sounding run.

	Experiments	Topography	Temperature	Wind	Humidity
Episode 1	CTRL_NOTR	No terrain	Same as OBS [#]	Same as OBS	Same as OBS
	CTRL_TERR	Terrain	-	-	-
	TEMP_NOTR	No terrain	-3°C (≤ 3 km)	-	-
	TEMP_TERR	Terrain	-3°C (≤ 3 km)	-	-
	EAST_NOTR	No terrain	Same as OBS	E (> 2 km)	-
	EAST_TERR	Terrain	-	E (> 2 km)	-
Episode 2	CTRL_NOTR	No terrain	Same as OBS	Same as OBS	Same as OBS
	CTRL_TERR	Terrain	-	-	-
	EAST_NOTR	No terrain	-	E (> 2 km)	-
	EAST_TERR	Terrain	-	E (> 2 km)	-
	CLD1_NOTR	No terrain	-	-	10% (> 3 km)
	CLD1_TERR	Terrain	-	-	10% (> 3 km)

[#]OBS denotes initial sounding profile for each episode.

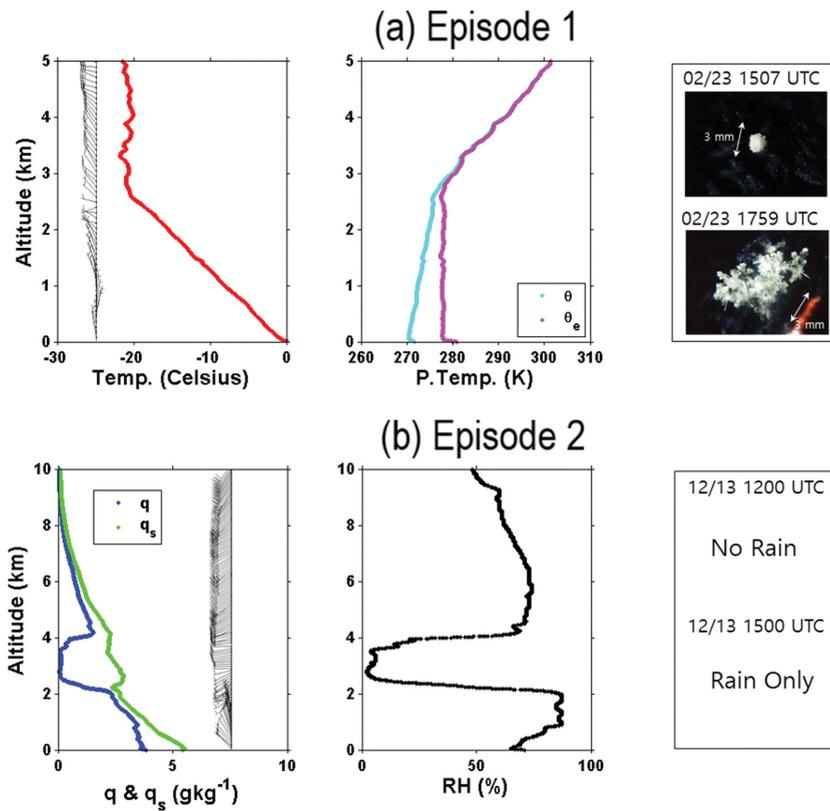


Fig. 2. Initial temperature, moisture, and wind profiles in control (CTRL) experiment for the sounding run of (a) Episode 1 and (b) Episode 2, and temporal changes of main snow crystal habit.

기존 연구에서는 주로 중규모 모델을 활용하여 영동지역 강설에 영향을 주는 인자로 지형 또는 SST의 효과를 중심으로 민감도 실험을 설계한 바 있다(Ahn et al., 1998; Lee and Kim, 2008; Jung et al., 2012).

본 연구에서는 기존 연구들과는 다르게 구름의 상세한 시간발달 모의가 가능한 구름분해모델을 이용하여 레원존데 관측 사운딩 자료 기반의 이상 실험을 수행하고자 하였다. Kim et al. (2018)의 연구에서 선정했

던 두 가지 강설 에피소드에 대해 지형 유무에 따른 실험을 구분한 후 온도, 바람, 습도 변수를 조절하며 민감도 실험을 설계하였다(Table 2). 우선 Episode 1의 기준(CTRL) 실험을 위한 초기장은 상·하층간 풍향의 시어(shear)가 뚜렷하며 강설이 발생하기 시작하였던 2016년 2월 23일 1500 UTC 자료를 사용하였으며(Fig. 2a), 전체 도메인에 균질하게 들어가도록 고층 자료 활용 수치모의를 수행하였다. 온도(TEMP) 실험은 관측에서 구름층이 생성되는 고도와 눈결정 특성이 변화했던 온도 범위를 참고하여(Kim et al., 2018) 초기 사운딩 자료에서 3 km 이하 고도만 3도 냉각시켜 하층 기온 및 역전층 강도의 효과를 살펴보고자 하였다. 다음으로 동풍의 유입 고도와 상층 바람의 영향을 확인해보고자 2 km 이상 고도의 바람을 서풍에서 동풍 계열(단, 풍속의 크기는 CTRL 실험과 같음)로 변경해 주었다(EAST 실험). 한편 Episode 2의 고층자료 활용 수치모의를 위한 초기장은 강수 이전 두 층 구름 구조가 가장 뚜렷하게 나타났던 2016년 12월 13일 1200 UTC의 레인존데 관측 자료를 사용하였다(Fig. 2b). 단층인 조건(Episode 1)에서 EAST 실험의 결과와 상호 비교를 위해 동일한 방법으로 Episode 2에 대한 EAST 실험을 설계하였으며, 영동지역 겨울철 두 층 구름의 효과를 규명하고자 3 km 이상 고도의 상대습도를 10%로 변경함으로써 두 층 구조를 단층 형태로 바꾸었다(CLD1 실험).

3. 결과 및 고찰

3.1 강설 사례의 관측 특징

Episode 1은 2016년 2월 23~24일의 강설 사례로써 ‘북고 남저형’ 또는 ‘저기압 정체형’의 전형적인 영동지역 동해 효과 강설 패턴이다(Lee et al., 2011; Ko et al., 2016). 이러한 중관 조건하에서 동풍에 의한 구름 시스템이 강화될 수 있었으며, 한반도의 동해안을 따라 강수가 집중되었던 특징을 보였다. 레인존데 관측으로부터 하층 구름 상부에 상당온위의 강한 역전층이 존재함을 확인하였고, 구름층 이내의 하층에는 북풍 또는 북동풍 계열, 상층에는 서풍 계열의 바람을 나타내며 풍향의 시어 효과가 뚜렷하였다(Fig. 2a). 눈결정은 강설 초반(2월 23일 1500 UTC) 싸락눈(graupel) 형태에서 3시간 이후 850 hPa 고도 기온이 -13°C 까지 하강하면서 나뭇가지결착형(Rimed dendrites) 또는 나뭇가지부착형(Aggregates of dendrite)이 주로 관측되었다.

한편 Episode 2는 Episode 1과 마찬가지로 저기압 정체형의 유사한 중관 패턴을 나타냈지만 시베리아 고기압이 한반도 쪽으로 덜 확장하였으며, 한반도 상에 상대적으로 따뜻한 열적 기압골이 존재하였다. 그

로 인해 모의 실험 기간 실제 관측된 강수는 무강수 또는 액상(rain)의 형태로만 나타났으며, Fig. 2b의 레인존데 관측 결과(비습과 포화비습 차이 및 상대습도 분포)에서 보여주듯이 두 층 구름 구조가 뚜렷함을 확인할 수 있었다. 이 밖에 상·하층간 풍향의 시어, 상당온위의 역전 현상 등은 Episode 1과 유사한 특징을 나타냈다.

3.2 모의 결과 분석

3.2.1 온도(TEMP) 실험

먼저 하층 기온 냉각에 따른 강수 및 강설 입자 특성에 관한 상세한 이해를 위해 Episode 1의 초기 사운딩 관측 자료를 기반으로 이상 실험을 수행하였다. Figure 3a는 지형이 없는 조건(NOTR)에서 기준(CTRL) 실험에 대한 3시간 누적 강수 분포를 보여주고 있다. 이상 실험임에도 불구하고 토지 이용(land use) 자료를 사용하였기 때문에 해안선과 위·경도를 표시하였으며 분석 영역도 영동지역에 초점을 맞추었다. 분석 결과, 영동 해안지역을 중심으로 최대 강수량은 1.6 mm의 값을 나타냈는데 이는 실제 관측된 강수량(1.3 mm, 북강릉)과도 비교적 잘 일치하는 수준이었다. 한편 TERR 실험의 경우, 지형 고도의 부재로 인해 강수시스템이 강화되지 못했던 NOTR 실험과는 다르게 풍하층으로 강수 영역이 더욱 확장하였으며 산악 지역으로도 1 mm 이하의 약한 강수가 증가하는 특징을 나타냈다(Fig. 3b).

다른 인자들은 통제된 상태에서 사운딩 초기장의 하층 온도를 3도 냉각시킨 온도(TEMP) 실험의 3시간 누적 강수량 분포는 Fig. 3c에 제시하였다. CTRL 실험 결과와 비교하여 강수 중심(core) 영역은 소폭 감소, 전체 강수 영역은 남동쪽 방향으로 약간 확장하였다. 이는 하층 기온이 감소함에 따라 상대적으로 가벼운 눈(snow) 입자가 주풍향을 따라 풍하층 지역으로 이동한 것에 기인한 결과로 판단된다. TERR 실험에서는 이러한 특징들이 더욱 뚜렷하게 나타났다. CTRL 실험에 비해 강수 영역이 남서쪽으로 확장하였으며 산악 지역에서도 약한 강수가 더욱 증가하였다. 즉, TEMP 실험은 지형 유무와 상관없이 강수 중심 영역은 감소, 전체 강수 분포 면적은 다소 증가시키는 것으로 분석되었다.

다음으로 CTRL 실험과 TEMP 실험의 강수 시계열 분석 결과를 Fig. 4와 Table 3에 제시하였다. 각 모의 시간의 대표성을 제고시키고 강수 시스템의 이동 가능성을 고려하기 위해 Fig. 3의 도메인 영역($37.6\sim 37.9^{\circ}\text{N}$, $128.6\sim 129.1^{\circ}\text{E}$) 평균값을 사용하였다. 두 실험 모두 30~35분 사이에서 최대 강수량을 나타냈으며, 125~145분까지 모의 후 강수가 종료한 NOTR과는 다르게 TERR에서는 강수 후반부(120~180분)까지 시간당 약

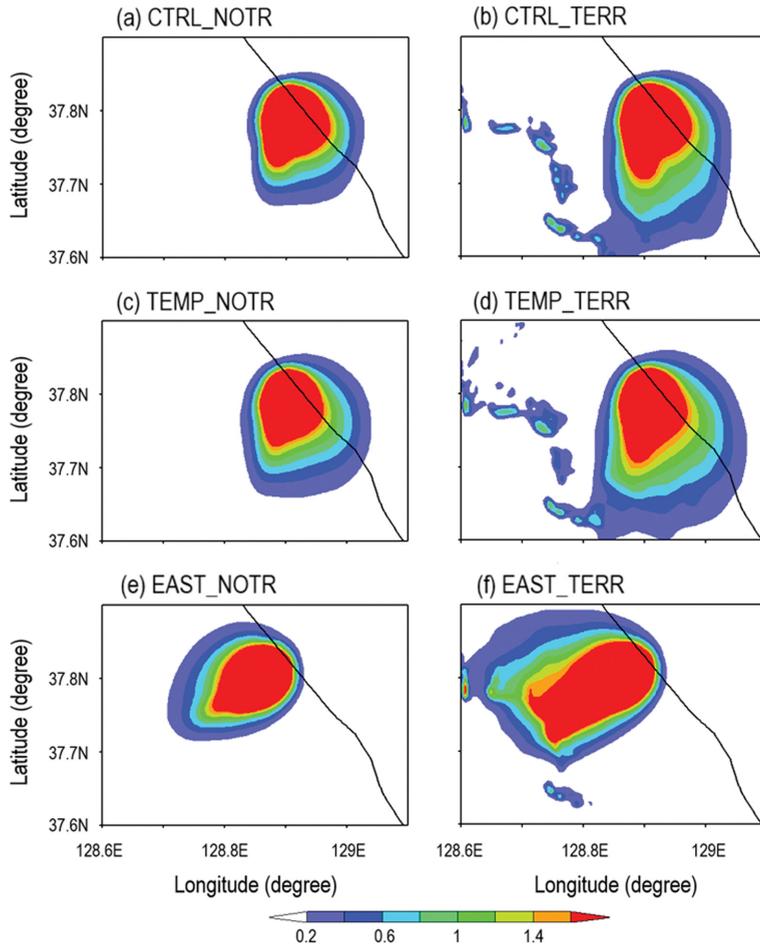


Fig. 3. Total accumulated (3-h) precipitation (units: mm) derived from (a, b) control (CTRL), (c, d) TEMP, and (e, f) EAST simulations for Episode 1. The experiments were divided into no terrain (left; NOTR) and terrain (right; TERR).

Table 3. Summary of precipitation for different ideal experiments. Units: mm.

			Rain	Graupel	Snow	Total
Episode 1	NOTR	CTRL	0.07 [§]	1.74	0.15	1.96
		TEMP-CTRL	-0.02	-0.46	+0.10	-0.38
		EAST-CTRL	+0.01	-0.32	-0.02	-0.33
	TERR	CTRL	0.11	1.83	0.17	2.11
		TEMP-CTRL	-0.01	-0.49	+0.09	-0.41
		EAST-CTRL	0.00	-0.32	+0.24	-0.08
Episode 2	NOTR	CTRL	0.63	0.04	0.00	0.67
		EAST-CTRL	0.00	+0.01	0.00	+0.01
		CLD1-CTRL	0.00	0.00	0.00	0.00
	TERR	CTRL	0.59	0.04	0.00	0.63
		EAST-CTRL	+0.56	+0.22	+0.07	+0.85
		CLD1-CTRL	0.00	0.00	0.00	0.00

[§]The value denotes accumulated domain-averaged precipitation.

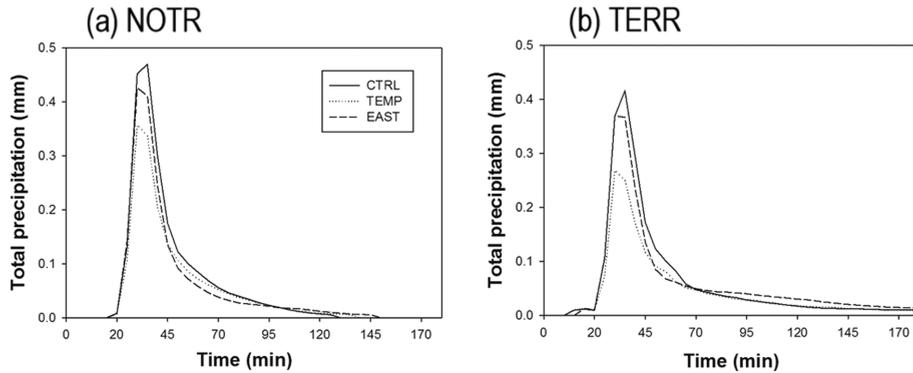


Fig. 4. Time series of simulated total precipitation at each experiment (a) without (NOTR) and (b) with terrain (TERR) for Episode 1.

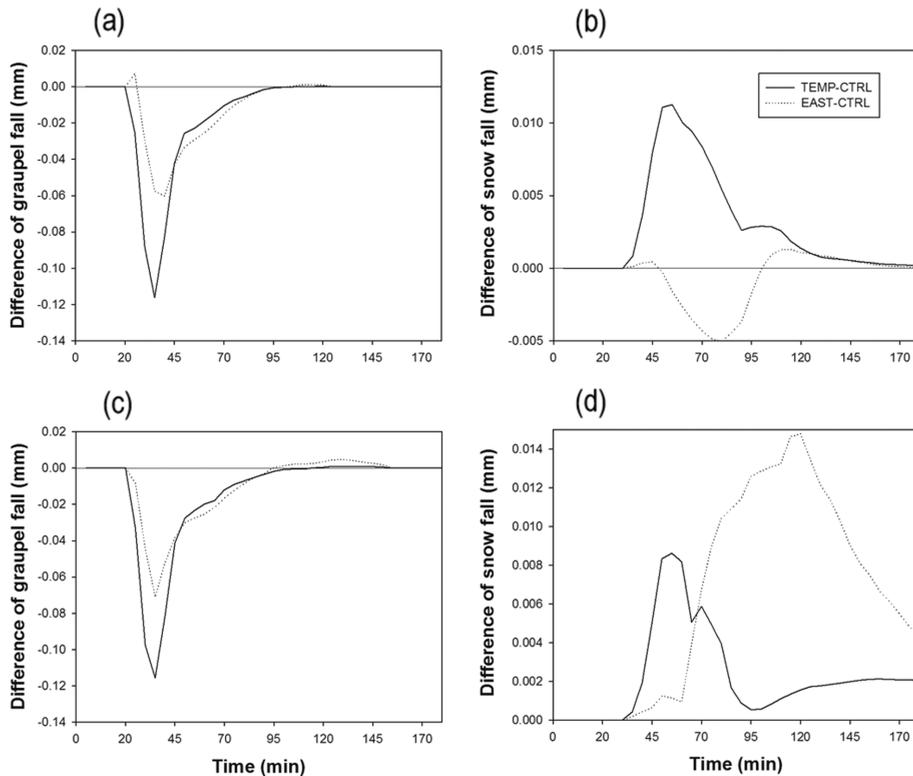


Fig. 5. Time series of differences in (a, c) graupel and (b, d) snow fall between CTRL and each experiment for Episode 1. The upper and lower panels denote NOTR and TERR, respectively.

0.14 mm의 약한 강수를 지속적으로 모의하였다(전체 누적 강수도 증가). 강수강도 측면에서도 TERR 실험이 NOTR 실험에 비해 시간당 0.04-0.05 mm 더 많은 강수를 모의하였다. 또한 지형 유무와는 상관없이 TEMP 실험이 CTRL 실험에 비해 강수량을 약 19% 적게 모의하는 경향을 나타냈다(Table 3). 하층 기온

냉각 효과가 강설 입자 특성에 미치는 영향을 살펴보고자 지면 강수 중 graupel과 snow에 대해 TEMP 실험과 CTRL 실험 결과의 차이를 추가 분석하였다(Fig. 5). 흥미롭게도 NOTR과 TERR 모두 graupel은 26~27% 감소, snow는 53~67% 증가하는 상반된 특징을 보였다(Table 3). 이는 Fig. 2a의 관측 결과에서 보여

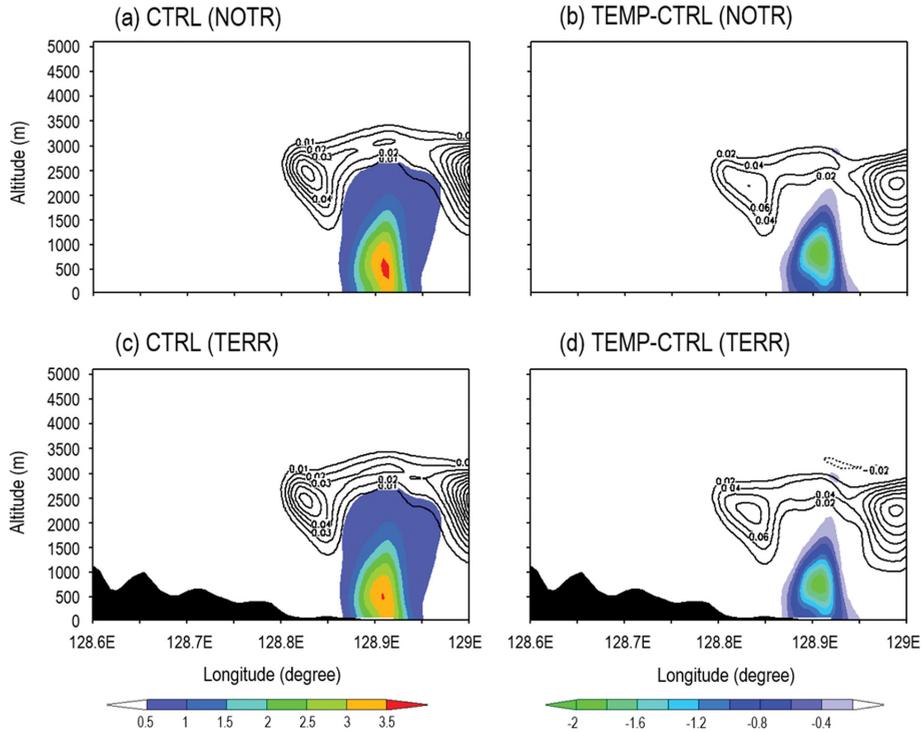


Fig. 6. (a, c) Vertical cross-sections of the mixing ratios (units: g kg^{-1}) of graupel (shading) and snow (black contour lines) derived from CTRL simulations, and (b, d) difference fields between TEMP and CTRL experiments at the simulation time of 30-min for Episode 1. The upper and lower panels denote NOTR and TERR, respectively.

준 눈결정 특성에 미치는 하층 온도의 중요성을 뒷받침하는 결과라고 생각된다.

Figure 6a는 앞서 CTRL 실험의 시계열 분석에서 최대 강수량을 모의했던 시간(30분)에서 graupel과 snow 혼합비에 대한 동서 방향의 연직 단면도를 보여주고 있다. 128.8~129°E 경도선을 중심으로 Episode 1의 관측된 구름 높이(2~3 km)까지 연직 혼합비가 잘 분포하고 있음을 확인하였다. 상층에는 0.01~0.06 g kg^{-1} 범위의 snow 혼합비가 분포하고 있으며 하층에는 snow 대신 graupel 혼합비가 상대적으로 높은 값(0.5~3.5 g kg^{-1})을 나타내고 있다. 그러나, NOTR과 TERR 실험 간의 뚜렷한 결과 차이는 확인할 수 없었다(Figs. 6a, c). 대기수상체(ice phase)의 연직 혼합비 분포 특성 변화를 확인하기 위해 Fig. 6b와 같이 두 실험장간의 차이를 제시하였다. 약 1.5 km 고도 이하의 하층에는 graupel 혼합비가 최대 2 g kg^{-1} 가까이 감소, 1.5~3 km 사이의 상층 고도에서는 snow 혼합비가 0.02~0.14 g kg^{-1} 범위에서 증가하는 경향을 나타냈다. 즉, 대기 하층의 온도를 냉각시켰을 때 대기경계층 하부의 결착(riming) 과정은 약화되고 상부의 snow 혼합비는 증가시켜 지면에 도달하는 snow 입자를 증가시켰던 것

으로 판단된다(Fig. 5b).

3.2.2 동풍(EAST) 실험

Figure 2a의 CTRL 실험 초기 바람장에서도 볼 수 있듯이 Episode 1의 하층 바람은 북풍 계열, 중·상층은 서풍 계열로 나타났다. 상·하층간 풍향의 시어 효과에 관한 실험은 Kim et al. (2021)의 연구 결과에서도 제시한 바 있다. 동풍 유입 고도 강화와 상층 바람(서풍) 시스템의 변화가 영동지역 강설 특성에 미치는 영향을 추가적으로 살펴보고자 상층(2 km 이상) 고도의 풍계를 모두 동풍으로 바꾸어 이상 실험을 수행하였다. 단, 풍속의 크기는 CTRL 실험과 동일하게 주었다. 먼저 동풍(EAST) 실험의 총 누적 강수량 분포를 살펴보면, 강수 중심이 해안 가까이 붙어있던 CTRL 실험과 비교하여 강수 분포가 남서 방향으로 이동 및 확장하였다(Figs. 3a, e). TERR의 조건에서 EAST 실험은 NOTR에 비해 강수 영역이 남서 방향으로 더욱 확장하였으며, 같은 조건의 CTRL 실험과 비교해서는 강수 영역의 차이가 뚜렷한 것을 확인할 수 있다(Figs. 3b, e, f). 이러한 특징은 EAST 실험에서 3 km 고도 이상까지 동풍 고도가 확장, 상층 바람장이 서풍이 아

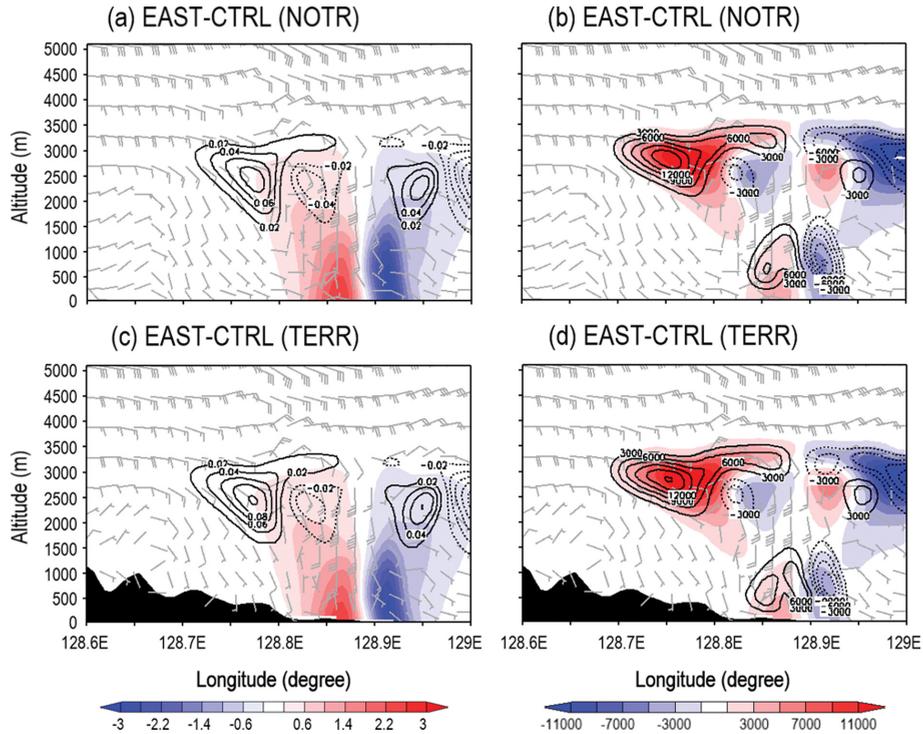


Fig. 7. The same as in Figs. 6b and 6d except for difference fields of (a, c) vertical mixing ratios (units: g kg^{-1}) and (b, d) number concentrations (units: counts kg^{-1}) between EAST and CTRL experiments. The gray wind barbs denote wind fields of u-w components (units: m s^{-1}) for EAST experiment.

닌 동풍으로 설정되었기 때문에 내륙쪽으로 강수를 더욱 강화시켰던 것으로 판단된다(Fig. 7). 앞서 TEMP 실험과 마찬가지로 EAST 실험에서도 TERR (지형)의 영향으로 인해 강수가 증가하였던 특징은 잘 나타났다.

다음으로 EAST 실험에서 모의된 강수 시계열 분석 결과는 Fig. 4에 제시하였다. NOTR과 TERR 조건 모두 CTRL 실험에 비해 최대 강수는 적게 모의하였으나 강수 지속 시간이 길어 강수 후반부에 더 많은 강수량을 모의하였다(특히 TERR 실험). Figure 5는 graupel과 snow 입자에 대한 EAST 실험과 CTRL 실험의 강수 시계열 결과 차이를 보여주고 있다. 대부분의 모의 시간에서 graupel은 CTRL 실험에 비해 감소하였으며, snow 역시 전반적으로 감소 경향은 보였지만 강수 후반부(100분 이후)에 미미하게 증가하는 특징을 보였다(Figs. 5a, b). 전체 누적 강수 측면에서도 graupel과 snow는 각각 약 18%와 0.1% 감소하였다(Table 3). EAST 실험에서 graupel이 감소했던 이유로는 동풍의 강화로 인해 강수 중심이 남서 방향으로 이동함에 따라 상대적으로 동해에서부터 이동하는 충분한 양의 액체상 물(liquid water)가 공급되지 못했기 때문으로 생각된다(Figs. 3a, e). 한편 TERR 조건의

경우, 전체 누적 graupel의 양은 NOTR과 비교하여 차이가 없었으나 snow의 양이 강수 후반부에 급격히 증가하였다(Table 3, Fig. 5d). 이러한 특징은 강수 후반부(모의시간 120분) EAST 실험과 CTRL 실험에서 모의된 연직 대기수상체 수농도의 차이장을 통해서도 잘 확인할 수 있었다(Fig. 8). NOTR과 비교하여 TERR 실험에서 snow 입자의 수농도가 풍하층에 단위 kg 당 약 200~1000개가 증가하였다. 이는 EAST 실험의 강수 후반부에 복잡한 산악 지형을 만나면서 연직 상승 기류가 강화되고 바람이 불어오는 경사면에 snow 입자가 증가하였던 것으로 사료된다(Medina and Houze Jr., 2015).

EAST 실험과 CTRL 실험간의 대기 미세물리 특성 차이를 확인해 보고자 Fig. 6b와 마찬가지로 Episode 1의 최대 강수 시간에서 graupel과 snow 혼합비와 수농도의 연직 단면도 분석 결과를 Fig. 7에 제시하였다. 흥미롭게도 두 개의 대기수상체 모두 풍상층과 풍하층의 뚜렷한 경향 차이를 확인할 수 있었다. 특히 graupel의 경우, 128.9°E 경도선을 기준으로 풍하층($\sim 3 \text{ km}$ 고도)으로는 최대 3 g kg^{-1} (11000 개 kg^{-1})의 수준으로 연직 혼합비(수농도)가 증가하였으나 풍상

측에는 같은 차수 범위에서 graupel의 혼합비(수농도)가 감소하였다(Figs. 7a, b). 반면 snow 입자는 약 1.5~3.5 km 고도 범위에서 지역적으로 연직 혼합비와 수농도의 변동성이 크게 나타났다. 강설 입자가 상대적으로 가볍기 때문에 동풍 강화로 인해 풍하측 먼 쪽까지 혼합비($0.02\sim 0.8\text{ g kg}^{-1}$)와 수농도($\sim 15000\text{ 개 kg}^{-1}$)가 증가한 것으로 보이며, 풍상측 가까운 지역에도 소폭의 증가 경향(혼합비: $\sim 0.06\text{ g kg}^{-1}$, 수농도: $\sim 6000\text{ 개 kg}^{-1}$)을 보였다. TERR 조건에서는 풍하측 먼 쪽 방향으로 snow 혼합비와 수농도가 각각 단위 kg당 0.02 g과 3000개 이상 증가하는 특징을 보였으나, 상층 graupel의 혼합비와 수농도는 NOTR과 비교하여 큰 변화가 없었다(Figs. 7c, d).

대기수상체의 연직 수농도와 혼합비 분포는 전반적으로 유사한 경향을 나타냈지만 128.9°E 경도선 인근에서 상층 graupel 입자가 단위 kg당 약 1000~7000개 수준으로 가까운 풍하측으로는 감소, 가까운 풍상측에는 증가하는 특성을 보여주었다(Figs. 7b, d). 즉, 3

km 고도 이상의 상층 동풍 강화가 동해로부터 액체 상 물을 충분히 공급함에 따라 가까운 풍하측의 결착 과정을 촉진시킬 수 있었으며, 강수 셀과 관련된 난류의 강화로 인해 부착 과정 또한 활발해져 강설 입자가 지면으로 빠르게 낙하할 수 있었던 조건이 형성될 수 있었다. 그로 인해 강설 입자가 기존에 하던 구름층에는 감소하였고 지면 근처의 하층에서는 증가(snow: 3000~9000개, graupel: 1000~5000개)한 것으로 판단된다. 반면 가까운 풍상측에는 내륙쪽으로 유입되지 못한 상층 구름의 강설 입자가 지면에 낙하하지 못하고 과냉각 수적(graupel: 1000~7000개)의 형태로 남아있었던 것으로 추정된다. 여기서 주목할만한 점은 상층의 역학적인 풍계 변화가 지면 근처의 풍하측으로는 강설 입자의 증가와 풍상측에는 강설 입자의 감소와 같이 지역적인 강수 위치를 변화시킬 수 있었으나(Figs 7b, d), 도메인 전체 강수량을 증가시키지는 못하였다(Table 3).

두 층 구름 조건일 때 동풍 효과를 추가적으로 분석하고자 Episode 2에 대한 EAST 실험을 수행한 후

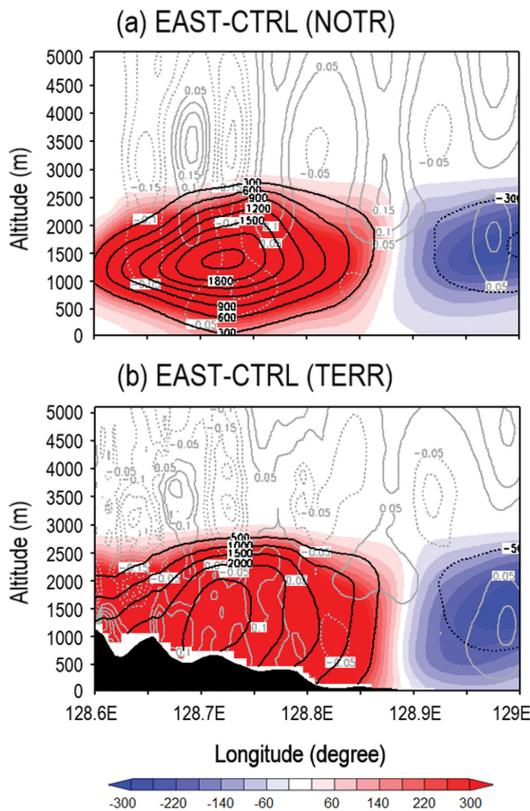


Fig. 8. The same as in Figs. 7b and 7d except for the simulation time of 120-min for Episode 1. The gray contour lines denote the fields of vertical velocity (units: m s^{-1}) for EAST experiment.

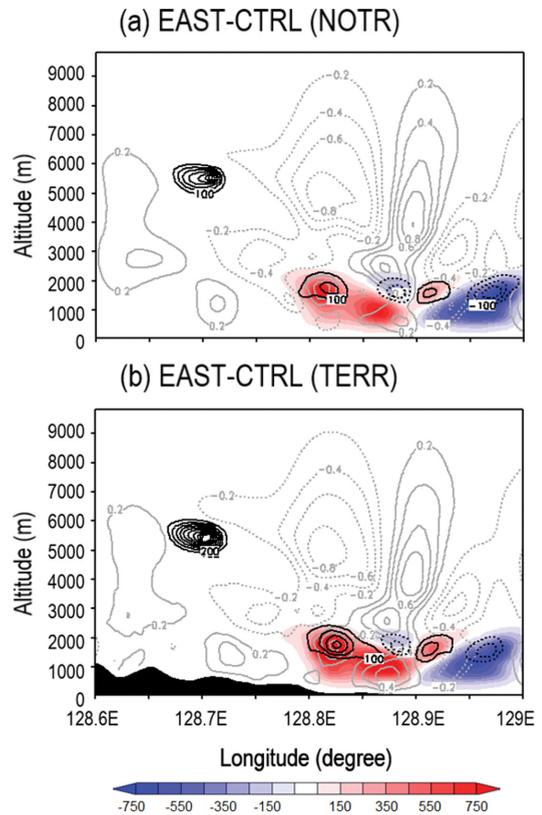


Fig. 9. The same as in Fig. 8 except for difference fields between EAST and CTRL experiments at the simulation time of 30-min for Episode 2.

단층 구름 사례(Episode 1)의 결과와 상호 비교하였다. Episode 1과 마찬가지로 2 km 고도를 기준으로 상·하층간 풍향의 시어가 뚜렷한 특성이 반영된 CTRL 모의 실험과 Fig. 2b에서 관측된 두 층 구름 조건은 그대로 통제된 상태에서 2 km 고도 이상의 상층 바람을 서풍에서 동풍으로 변경한 EAST 실험을 수행 후 두 결과의 누적 강수량 차이를 Table 3에 요약하였다. Episode 1의 결과와는 다르게 EAST 실험에서 강수가 증가하는 경향을 확인하였다. 특히 TERR의 조건에서 강수가 2.3배 강화되었는데 이 중 rain과 graupel 입자가 차지하는 비중이 각각 78%와 18%으로 전체 강수 중 대다수를 차지하였다. 두 실험간의 연직 대기수상체 특성 차이 및 지형 효과를 확인해 보고자 Fig. 9와 같이 입자 수농도 및 연직 속도의 단면도 분석을 추가적으로 수행하였다. 분석 결과, NOTR과 비교하여 TERR의 조건에서 연직 속도가 산사면을 따라 0.2 m s⁻¹ 이상 강화되었으며 약 2.5 km 고도 이하의 graupel과 snow 수농도 역시 풍하측 방향으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 5~6 km 고도에서 snow 입자는 CTRL 실험에 비해 EAST 실험에서 단위 kg당

500개 이상 증가하였으며, 특히 TERR의 조건에서는 snow 입자가 2배 이상 증가하였다(Fig. 9). 이러한 특징은 동풍에 의한 지형성 상승기류의 강화가 기존에 하던 상층 구름의 병합(coalescence) 및 결착(riming) 과정에 영향을 미쳐 강수 성장을 촉진시켰던 것에 기인한 결과로 해석된다. 또 한가지 흥미로운 점은 지형이 있는 조건에서 두 층 구름 사례(Episode 2)의 경우 상층 동풍 효과가 두드러지게 나타났다는 것이다. 상층 구름이 존재하지 않았던 단층 사례(Episode 1)와는 다르게 Episode 2는 상층 구름층이 존재하는 상황에서 풍계가 서풍에서 동풍으로 바뀌었기 때문에 지형성 강수를 강화시켰던 것으로 판단된다.

3.2.3 단층(CLD1) 실험

장기간 영동지역 강설 사례의 형태학적 분류 결과, 앞서 Episode 1과 같이 단층 구름의 비중이 높았지만 두 층 구름 유형도 비교적 높은(약 30%) 빈도 분포를 나타냈다(Kim, 2018). 따라서, 이번 절에서는 상층의 서풍에 의한 구름 시스템이 지상 강수에 미치는 영향을 살펴보고자 Episode 2에 대해 단층(CLD1) 모

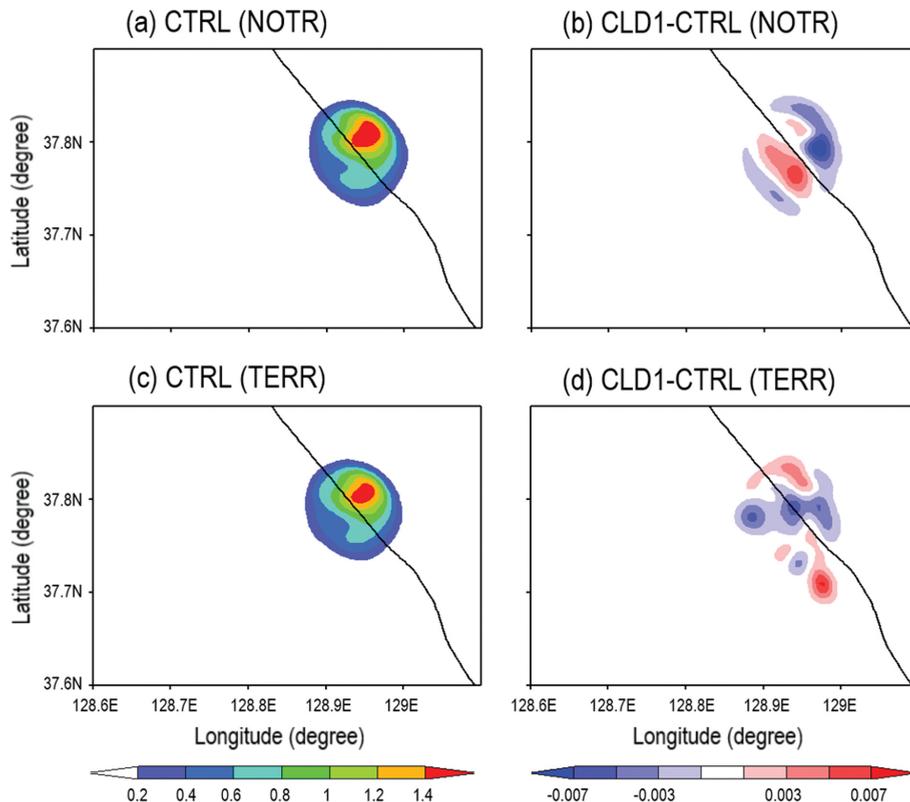


Fig. 10. The same as in Fig. 3 except for (a, c) CTRL and (b, d) difference fields between CLD1 and CTRL simulations for Episode 2. The upper and lower panels denote NOTR and TERR, respectively.

의 실험을 수행한 후 기준(CTRL; 두 층 구조) 실험 결과와 상호 비교하였다. Figure 2b의 레윈 존데 관측 결과를 통해 약 4 km 이상 고도에서는 서풍에 의한 구름층이 존재함을 확인할 수 있다. 반면 2 km 이하 고도에서는 북풍 내지 북서풍 계열 바람에 의해 약 1.2 km 두께의 하층 구름이 발달하기 시작하였다. CLD1 실험의 고층자료 활용 수치모의를 위한 초기장(2016년 12월 13일 1200 UTC)에는 강수가 발생하지 않았지만 3시간 이후 누적 강수는 1.9 mm, 강수 유형은 비(rain)으로 관측되었다(Fig. 2b). 비록 강수 초반 강설 입자는 관측되지 않았지만 영동지역의 겨울철 빈번하게 발생하는 강수 특징(rain to snow)을 보여주었던 사례이다.

Episode 2에 대한 CTRL 실험과 CLD1 실험의 3시간 누적 강수 분포 비교는 Fig. 10에 제시하였다. Episode 1과는 다르게 CTRL 실험의 강수 영역은 Bubble 중심 위치에서 약간 오른쪽(동해 방향)에 분포하는 특징을 나타냈는데, 이는 사운딩 초기장에서 북서풍 계열의 하층(1.5 km 이하 고도) 바람 특징이 모델 강수 모의에 반영된 것으로 생각된다(Fig. 10a). 그러나, 강수 중심 지점의 3시간 모의 강수(1.4 mm 이상)는 Episode 2의 관측 결과(1.9 mm)와 비교적 잘 일치하

였으며, 모델의 지면 강수 유형 또한 주로 rain을 모의하는 등(snow는 모의되지 않음) 관측과 흡사하였다. 즉, 이상 실험을 위한 사운딩 배경장이 모델 결과에 잘 반영된 것으로 생각된다. 흥미롭게도 TERR의 조건에서 강수 중심영역이 NOTR에 비해 감소하였으며, 모의 시간에 따른 도메인 평균 누적 강수량도 약 6% 감소하였다(Table 3). 이처럼 지형 효과가 나타났지 않았던 이유는 Episode 1과 비교하여 강수 분포 영역도 작고 강수셀이 내륙 산악 지역으로 이동하지 못하고 해안 지역에 머물렀기 때문으로 판단된다. 한편 CLD1 실험의 강수 공간 분포를 살펴보면, 지형 유무와는 상관없이 CTRL 실험의 경향과 유사하였으며 강수량 또한 CTRL 실험과의 차이가 없음을 확인할 수 있었다(Fig. 10, Table 3).

전체 강수량에 대한 시계열 분석 결과에서는 TERR 실험의 강수 후반부(70~95분에 약한 강수가 증가하는 특징을 나타냈으나 CTRL 실험과 CLD1 실험의 시계열 경향(강수 최대 시간 등)은 잘 일치하였다. 각 대기 수상체별 시계열 분석 결과를 통해서도 두 실험 간의 뚜렷한 특성 차이는 제시할 수 없었다(Table 3). Figure 11은 CTRL 실험의 연직 혼합비 분포와 두 실험간의 차이장에 대한 연직 단면도 분석 결과를 보여

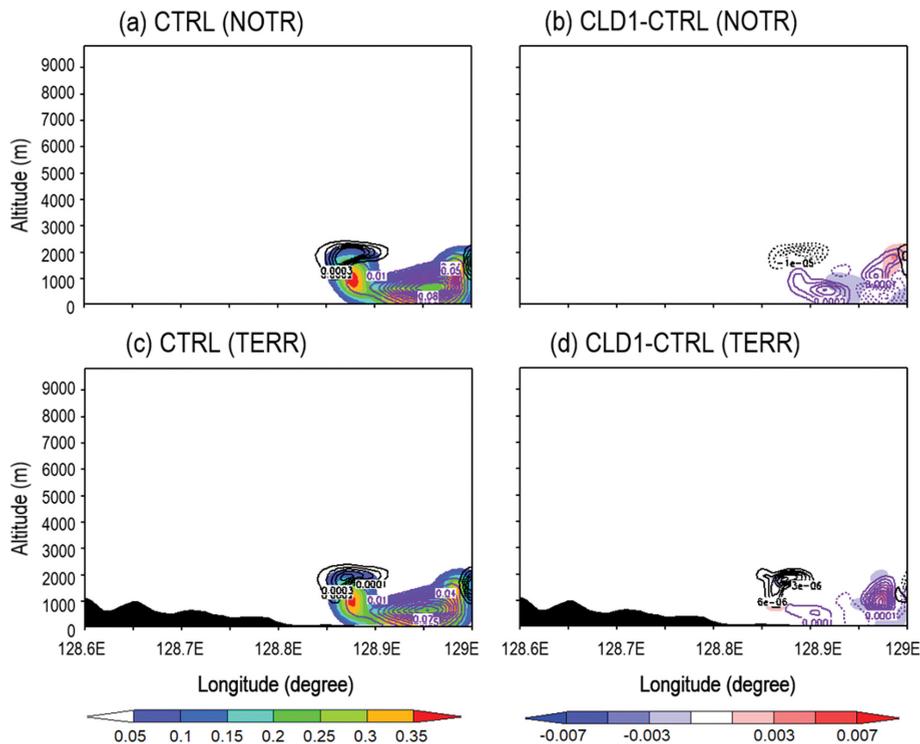


Fig. 11. The same as in Fig. 6 except for difference fields between CLD1 and CTRL experiments for Episode 2. The shading denotes rain mixing ratio (units: g kg^{-1}), and black and purple contour lines indicate snow and graupel mixing ratios (units: g kg^{-1}).

주고 있다. CTRL 실험에서는 2 km 고도 근처에 적은 양의 snow 입자가 존재하였고, 1.5 km 고도 아래에서는 graupel 혼합비가 최대 0.1 g kg^{-1} 의 값을 나타내며 지면 근처까지 분포하였다. 또한 약 700 m(용해 고도) 아래에는 $0.2\sim 0.35 \text{ g kg}^{-1}$ 수준의 rain 혼합비가 존재함으로써 지면 강수 유형이 주로 비(rain)임을 유추할 수 있었다(Fig. 11a). 그러나, CLD1 실험과 CTRL 실험 결과의 차이는 매우 미미한 수준이었으며 지형(TERR)의 영향도 크지 않음을 확인하였다(Figs. 11b, d). 영동지역의 겨울철은 상층이 건조하기 때문에 4 km 고도 이상에 존재하던 상층 구름층이 지상 강수에 미치는 영향은 거의 없었던 것으로 판단되며, 이러한 특징은 Kim et al. (2021)의 연구 결과와 잘 일치한다.

4. 요약 및 토의

본 연구는 영동지역의 강수 및 강설 입자 특성에 미치는 주요 기상 인자들의 개별적인 영향을 이해하기 위해 두 개의 강설 에피소드를 선정 후 CRESS 모델을 활용하여 레윈존데 관측 사운드 기반의 이상 실험을 수행하였다. Episode 1은 전형적인 동해(East Sea) 효과 강설 패턴으로써 하층 기온의 중요성과 상층 풍계 변화의 영향을 파악하고자 온도(TEMP) 실험과 동풍(EAST) 실험을 수행하였다. 반면 Episode 2는 두 층 구름 형태이면서 강수 유형이 비에서 눈으로 바뀐 사례으로써 두 층 구름 조건에서 상층의 동풍 영향과 구름 효과를 살펴보고자 동풍(EAST) 실험과 단층(CLD1) 실험을 각각 수행한 후 기준(CTRL) 실험 결과와 상호 비교하였다.

먼저 단층 사례인 Episode 1의 3 km 고도 이하 온도를 3도 냉각시킨 TEMP 실험이 CTRL 실험에 비해 전체 강수량을 약 19% 적게 모의하였으며 graupel은 26~27% 감소, snow는 53~67% 증가하는 상반된 특징을 보여주었다. 대기수상체의 연직 혼합비 분포 분석을 통해서도 두 실험간의 상·하층간 특성 차이(상층 snow: $0.02\sim 0.14 \text{ g kg}^{-1}$ 증가, 하층 graupel: $\sim 2 \text{ g kg}^{-1}$ 감소)가 뚜렷함을 확인하였다. 상층 구름층이 존재하지 않는 조건에서 상층의 풍계를 서풍에서 동풍으로 변경한 EAST 실험의 강수 분포는 CTRL 실험과 비교하여 남서 방향으로 이동 및 확장하였으나(특히 TERR 조건) 전체 누적 강수량을 증가시키지는 못하였다. 대신 풍하층($\sim 3 \text{ km}$ 고도)의 graupel 혼합비($\sim 3 \text{ g kg}^{-1}$)와 수농도($\sim 11000 \text{ 개 kg}^{-1}$) 증가와 풍상층($1.5\sim 3.5 \text{ km}$ 고도) 인근의 snow 혼합비($\sim 0.06 \text{ g kg}^{-1}$)와 수농도($\sim 6000 \text{ 개 kg}^{-1}$) 증가와 같이 지역적인 강설 입자 특성을 변화시킬 수 있었다. 한편 Episode 2의 EAST 실험은 Episode 1의 결과와는 다르게 강수가 증가하는 경향을 나타냈다. 즉, 서풍에 의해 형성된 상층 구

름계를 동풍으로 변경한 두 층 구름 사례의 경우, 상층 동풍 효과가 TERR 조건에서 강수를 2.3배 강화시킬 수 있었다. 마지막으로 Episode 2의 CTRL 실험 초기 경계장을 두 층에서 단층으로 변경한 CLD1 실험은 CTRL 실험과 비교하여 강수량 차이는 무시할 만한 수준이었으며 지형 효과도 크지 않음을 확인하였다.

본 연구는 제한적인 강설 사례를 대상으로 이상 실험에 국한된 분석이 이루어졌음에도 불구하고 3시간 이내의 단시간에 급변하는 관측된 강수 특성(강수량, 눈결정 등)을 모델이 잘 모의하였다는 점에서 의의가 있다. 또한 기존 연구(Kim et al., 2021)의 재현 실험에서 발생했던 동풍 실험의 한계(기압 경도력의 우세 문제 등)를 개선할 수 있었으며, 두 층 및 단층 사례를 구분하여 EAST 실험 결과를 비교할 수 있었다. 영동지역의 하층 기온과 역학적인 풍계 변화가 결착 및 부착 등의 눈결정 입자 성장 과정을 변화시킬 수 있었으며 지형에 의한 연직 상승기류는 구름의 발달과 강수 분포에 큰 영향을 끼쳤다. 이는 구름 미세물리 과정을 탐지할 수 있는 보다 정교한 관측이 요구됨을 시사한다. 또한 구름 모델의 여러 가지 매개변수를 정확하게 추정하기 위해서는 구름층 내의 난류, 상승/하강 속도, 입자 크기 등의 복잡한 과정들을 고려해야 한다(Zerr, 1997; Pinsky and Khain, 1998).

따라서 강원영동 공동 입체기상관측 프로젝트 기간 기상항공기를 이용한 직접(in-situ) 관측 또는 기상레이더 및 Multi-Angle Snowflake Camera (MASC) 등 원격 관측을 추가 활용한 영동지역 중규모 집중관측 자료 기반의 통합 분석이 필요하다(Tsai et al., 2018; Kim et al., 2019; Jung et al., 2020). 본 연구 결과는 영동지역 강설 예측 가이던스 개발 및 중규모 관측망 제언을 위한 기초 자료로써 활용 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 감사를 드립니다. 이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원기술개발연구」 “재해기상 감시·분석·예측기술 지원 및 활용연구(KMA2018-00123)”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Ahn, J.-B., J.-H. Oh, and E.-H. Cho, 1998: A mesoscale atmosphere/ocean coupled model experiment for a heavy snowfall event in Korean peninsula. *J. Korean Meteor. Soc.*, **34**, 652-663 (in Korean with English abstract).

- Cooper, S. J., N. B. Wood, and T. S. L'Ecuyer, 2017: A variational technique to estimate snowfall rate from coincident radar, snowflake, and fall-speed observations. *Atmos. Meas. Tech.*, **10**, 2557-2571, doi:10.5194/amt-10-2557-2017.
- 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.
- Grazioli, J., G. Lloyd, L. Panziera, C. R. Hoyle, P. J. Connolly, J. Henneberger, and A. Berne, 2015: Polarimetric radar and in situ observations of riming and snowfall microphysics during CLACE 2014. *Atmos. Chem. Phys.*, **15**, 13787-13802, doi:10.5194/acp-15-13787-2015.
- Harimaya, T., and Y. Nakai, 1999: Riming growth process contributing to the formation of snowfall in orographic areas of Japan facing the Japan Sea. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **77**, 101-115.
- Houze, Jr., R. A., and S. Medina, 2005: Turbulence as a mechanism for orographic precipitation enhancement. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 3599-3623.
- Im, E.-S., S.-R. In, and S.-O. Han, 2013: Numerical simulation of the heavy rainfall caused by a convection band over Korea: a case study on the comparison of WRF and CRess. *Nat. Hazards*, **69**, 1681-1695, doi:10.1007/s11069-013-0779-7.
- Jeoung, H., G. Liu, K. Kim, G. Lee, and E.-K. Seo, 2020: Microphysical properties of three types of snow clouds: implication for satellite snowfall retrievals. *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, 14491-14507, doi:10.5194/acp-20-14491-2020.
- Jung, S.-H., E.-S. Im, and S.-O. Han, 2012: The effect of topography and sea surface temperature on heavy snowfall in the Yeongdong region: A case study with high resolution WRF simulation. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **48**, 259-273, doi:10.1007/s13143-012-0026-2.
- Jung, S.-P., C. Lee, J.-H. Kim, H. J. Yang, J. H. Yun, H. J. Ko, S.-E. Hong, and S.-B. Kim, 2020: Thermodynamic characteristics of snowfall clouds using dropsonde data during ICE-POP 2018. *Atmosphere*, **30**, 31-46, doi:10.14191/Atmos.2020.30.1.031 (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., 2018: Characteristics of cold clouds and snow crystal habits with the different meteorological conditions in the Yeongdong region. Ph. D. Thesis, Gangneung-Wonju National University, 35 pp (in Korean with English abstract).
- _____, B.-G. Kim, J.-K. Shim, and B.-C. Choi, 2018: Observation and numerical simulation of cold clouds and snow particles in the Yeongdong region. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 499-510.
- _____, S.-R. In, H.-M. Kim, J.-H. Lee, K. R. Kim, S. Kim, and B.-G. Kim, 2021: Sensitivity of snowfall characteristics to meteorological conditions in the Yeongdong region of Korea. *Adv. Atmos. Sci.*, **38**, 413-429, doi:10.1007/s00376-020-0157-9.
- 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).
- 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 (in Korean with English abstract).
- _____, S.-D. Kim, and Y. J. Kim, 2011: A trajectory study on the heavy snowfall phenomenon in Yeongdong region of Korea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **47**, 45-62, doi:10.1007/s13143-011-1004-9.
- Lee, J.-E., S.-H. Jung, H.-M. Park, S. Kwon, P.-L. Lin, and G. W. Lee, 2015: Classification of precipitation types using fall velocity-diameter relationships from 2D-video distrometer measurements. *Adv. Atmos. Sci.*, **32**, 1277-1290, doi:10.1007/s00376-015-4234-4.
- Lee, K.-O., S. Shimizu, M. Maki, C.-H. You, H. Uyeda, and D.-I. Lee, 2010: Enhancement mechanism of the 30 June 2006 precipitation system observed over the northwestern slope of Mt. Halla, Jeju Island, Korea. *Atmos. Res.*, **97**, 343-358, doi:10.1016/j.atmosres.2010.04.008.
- Lin, Y., L. J. Donner, and B. A. Colle, 2011: Parameterization of riming intensity and its impact on ice fall speed using ARM data. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 1036-1047, doi:10.1175/2010MWR3299.1.
- Medina, S., and R. A. Houze Jr., 2015: Small-scale precipitation elements in midlatitude cyclones crossing the California Sierra Nevada. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 2842-2870, doi:10.1175/MWR-D-14-00124.1.

- Molthan, A. L., W. A. Petersen, S. W. Nesbitt, and D. Hudak, 2010: Evaluating the snow crystal size distribution and density assumptions within a single-moment microphysics scheme. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 4254-4267, doi:10.1175/2010MWR3485.1.
- Murakami, M., 1990: Numerical modeling of dynamical and microphysical evolution of an isolated convective cloud - The 19 July 1981 CCOPE Cloud. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, **68**, 107-128.
- _____, T. L. Clark, and W. D. Hall, 1994: Numerical simulations of convective snow clouds over the Sea of Japan; Two-dimensional simulations of mixed layer development and convective snow cloud formation. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, **72**, 43-62.
- Oue, M., M. Galletti, J. Verlinde, A. Ryzhkov, and Y. Lu, 2016: Use of X-band differential reflectivity measurements to study shallow arctic mixed-phase clouds. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **55**, 403-424, doi:10.1175/JAMC-D-15-0168.1.
- Pinsky, M. B., and A. P. Khain, 1998: Some effects of cloud turbulence on water-ice and ice-ice collisions. *Atmos. Res.*, **47**, 69-86.
- Schneebeil, M., N. Dawes, M. Lehning, and A. Berne, 2013: High-resolution vertical profiles of X-band polarimetric radar observables during snowfall in the Swiss Alps. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **52**, 378-394, doi:10.1175/JAMC-D-12-015.1.
- 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).
- Tsai, C.-L., K. Kim, Y.-C. Liou, G. Lee, and C.-K. Yu, 2018: Impacts of topography on airflow and precipitation in the Pyeongchang area seen from multiple-doppler radar observations. *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 3401-3424, doi:10.1175/MWR-D-17-0394.1.
- Tsuboki, K., and A. Sakakibara, 2001: CReSS user's guide 2nd edition, 212 pp.
- _____, and _____, 2002: Large-scale parallel computing of cloud resolving storm simulator. *Proc. 4th International Symposium on High Performance Computing*, Kansai Science City, Japan, 243-259, doi:10.1007/3-540-47847-7_21.
- _____, and _____, 2007: Numerical prediction of high-impact weather systems. The 17th International Hydrological Program (IHP) Training Course, Nagoya, Japan, 273 pp.
- Zerr, R. J., 1997: Freezing rain: An observational and theoretical study. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **36**, 1647-1661.