Atmosphere. Korean Meteorological Society
Vol. 31, No. 4 (2021) pp. 421-431
https://doi.org/10.14191/Atmos.2021.31.4.421
pISSN 1598-3560 eISSN 2288-3266

연 구 논 문
(Article)

영동 지역 한기 축적과 강설의 연관성 분석

김미경[1] · 김병곤[1]* · 은승희[1] · 채유진[1] · 정지훈[1] · 최영길[1] · 박균명[2]
[1]강릉원주대학교 대기환경과학과, [2]강원지방기상청 관측과

(접수일: 2021년 6월 1일, 수정일: 2021년 7월 29일, 게재확정일: 2021년 8월 6일)

Analysis of the Relationship of Cold Air Damming with Snowfall in the Yeongdong Region

Mi-Gyeong Kim[1], Byung-Gon Kim[1]*, Seung-Hee Eun[1], Yu-Jin Chae[1], Ji-Hoon Jeong[1], Young-Gil Choi[1], and Gyun-Myeong Park[2]

[1]Department of Atmospheric Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea
[2]Observation Division, Gangwon Regional Meteorological Office, KMA, Gangneung, Korea

(Manuscript received 1 June 2021; revised 29 July 2021; accepted 6 August 2021)

Abstract The Yeongdong region is frequently vulnerable to heavy snowfall in winter in terms of societal and economical damages. By virtue of a lot of previous efforts, snowfall forecast has been significantly improved, but the performance of light snowfall forecast is still poor since it is very conducive to synoptic and mesoscale interactions, largely attributable to Taeback mountains and East Sea effects. An intensive observation has been made in cooperation with Gangwon Regional Meteorological Office and National Institute of Meteorological Studies in winter seasons since 2019. Two distinctive Cold Air Damming (CAD) events (14 February 2019 and 6 February 2020) were observed for two years when the snowfall forecast was wrong specifically in its location and timing. For two CAD events, lower-level temperature below 2 km ranged to lowest limit in comparisons to those of the previous 6-years (2014~2019) rawinsonde soundings, along with the stronger inversion strength (> 2.0°C) and thicker inversion depth (> 700 m). Further, the northwesterly was predominant within the CAD layer, whereas the weak easterly wind was exhibited above the CAD layer. For the CAD events, strong cold air accumulation along the east side of Taeback Mountains appeared to prevent snow cloud and convergence zone from penetrating into the Yeongdong region. We need to investigate the influence of CAD on snowfall in the Yeongdong region using continuous intensive observation and modeling studies altogether. In addition, the effect of synoptic and mesoscale interactions on snowfall, such as nighttime drainage wind and land breeze, should be also examined.

Key words: Cold Air Damming (CAD), snowfall, rawinsonde, Yeongdong, LDAPS

*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

강원도 영동지역은 서쪽에는 태백산맥이 존재하고, 동쪽에는 동해가 위치하여 복잡한 지형에 의한 다양한 형태의 기상 현상이 증폭되어 나타나는 경향이 있고, 그 중에서도 겨울철 강설에 의한 피해가 자주 발생하고 있다. 이러한 이유로 영동지역에서 강설 연구는 활발히 진행되었는데, 기존 선행 연구들을 통해 한기가 따뜻한 동해상을 통과하면서 해기차 증가로 야기된 대류불안정에 의해 영동지역에 대설이 유발되는 것을 확인하였다(Seo and Jhun, 1991; Lee and Lee, 1994; Park et al., 2009; KMA, 2019). Kim et al. (2005)은 영동지역 겨울철 강수를 산악형, 한기-해안형, 난기형 등으로 분류하고 강수유형과 현열·잠열속 연관성을 분석하였다. 한편 태백산맥 지형효과에 의한 대설 메커니즘을 이해하기 위하여 Lee and Kim (2008)은 WRF 모델을 이용한 고분해능(2 km) 수치모의를 수행한 바 있다. Lee et al. (2012)과 Nam et al. (2014)은 장기간의 레윈존데 관측자료를 기반으로 강설에 영향을 주는 동해의 하층안정도, 해기차 그리고 대류불안정 등을 분석한 바 있고, Ko et al. (2016)은 강설관측 캠페인 기간 동안 다양한 구름 원격관측기기(MWR, GNSS, Rawinsonde, Ceilometer 등)를 통해 가강수량과 강설량과의 연관성을 분석하였다.

이상의 선행연구들은 주로 대설 사례 분석에 초점을 맞추었기 때문에 대설 예보의 정확도가 크게 향상되었지만, 약한 강설의 경우는 예보 정확도가 대설사례에 비해 여전히 낮은 수준이다. 특히, 해안선을 따라 발생하는 약한 강설의 경우 종관강제력 및 중규모 기상 현상의 상호작용으로 인해 예보가 더 어려워지는데, 이러한 원인 중 하나가 영동지역에서 자주 발생하는 한기 축적 현상(Cold Air Damming: CAD)이다. 한기 축적 현상은 산맥에 수직 방향으로 부는 바람이 산맥으로 인한 저지효과로 산맥에 평행하게 불면서 한기가 축적되는 현상으로 정의하고 있다(Dunn, 1987; Bailey et al., 2003). 미국 애팔래치안(Appalachian) 산맥에서 50년의 기간 동안 지상 기상관측과 레윈존데 관측을 통해 한기 축적 현상은 겨울철에 월 3~5회 빈도로 발생하는 것으로 알려졌다(Bell and Bosart, 1988). Bailey et al. (2003)은 애팔래치안의 한기 축적 현상을 지상 온위와 해면기압 자료를 이용하여 한기가 누적되는 산사면 주변의 해면기압과 온위의 Laplacian 분석방법을 제시하였다. 국내에서는 Lee (2001)이 수치모의 연구를 통해 영동 해안지역에서 산악 저지(blocking) 효과에 의한 한기 축적 현상이 해안 전선을 형성하는 것을 최초로 제시하였다. 이후 Lee and Xue (2013)은 수치모델 분석을 통한 사례분석으로 한기축적 현상과 강설 발생 메커니즘을 설명하고 영동 해안 지역에서 한기 축적에 의한 전선 발생 개념 모식도를 제시하였다. 최근 Nam et al. (2020)은 영동지역의 자동지상관측 자료와 수치모델 분석장을 활용하여 영동 지역 한기 축적 사례를 선별하고, 사례별 수평·연직 규모를 제시한 바 있다.

영동지역에서 발생하는 한기 축적 현상은 관측 자료의 불충분으로 인하여 종관규모 측면에서 수치모델 분석이 주로 이루어져 왔다. 본 연구에서는 2019년부터 2020년 2월까지 강릉원주대학교, 강원지방기상청, 국립기상과학원(재해기상연구부) 등이 공동으로 수행한 입체공동관측 자료를 활용하여 중규모 측면에서 한기 축적과 강설의 연관성을 이해하고자 한다. 입체공동관측은 강릉, 속초, 동해상에서 레윈존데 관측이 수행되었으며, 2019년부터 2020년 관측 기간동안 총 2 차례 뚜렷한 한기 축적 현상이 관측되었다. 본 연구에서는 각 지점별 자료를 활용하여 한기 축적 사례별로 온도와 바람의 시·공간적인 변화를 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 관측 지점 및 자료

2019~2020년 2월에는 학·연·관이 공동으로 '강원 영동 공동 입체기상관측'이 수행되었다. 참여한 기관은 총 9개 기관이지만, 본 논문에서는 주로 강릉원주대학교, 강원지방기상청, 국립기상과학원, 기상청 등의 관측자료를 활용하였다. 영동 지역 재해기상의 공간적인 특성을 알기 위해서 강릉, 동해바다, 속초 지역에서 6시간 간격으로 레윈존데 관측을 수행하였다. 주요 분석지점인 강릉은 강원지방기상청은 03, 09, 15 그리고 21시에, 강릉원주대학교는 00, 06, 12, 그리고 18시에 각각 6시간 간격으로 레윈존데 사운딩을 수행하여 결과적으로 강설사례 기간에 3시간 간격의 대기열역학구조를 얻을 수 있었다(Table 1 참조). 주요 관측 지점별 해안선으로부터의 거리는 강릉원주대(GWNU) 5.3 km, 북강릉(BGN) 3.6 km, 속초(SC) 0.4 km이며, 기상1호(GS1)의 경우 속초 항구에서부터 약 50 km 정도 떨어진 동해상에서 관측하였다. 주요 변수는 각 지점의 레윈존데에서 관측된 기온, 기압, 습도, 풍향, 풍속 등이 있고, 북강릉 지점에 위치한 종관기상관측시스템(Automated Synoptic Observed System: ASOS)에서 3시간 간격으로 관측되는 강설(수)량을 활용하였다. 관측 지점의 위치와 장비에 대한 상세 정보는 Fig. 1과 Table 1에 제시하였다.

본 연구에서는 관측이 이루어지지 않는 지점의 온도와 바람에 대한 수평 및 연직 분포를 이해하기 위해서 기상청 현업 국지수치예보모델(Local Data Assimilation and Prediction System: LDAPS) 분석장을 활용하였다. 국지예보모델의 공간 해상도는 1.5 km이며, 연직으로

Table 1. Detailed information of the analysis stations.

Instruments	Site	Latitude (N°)	Longitude (E°)	Time (KST)	Variables
Rawinsonde	Sokcho (SC)	38.251	128.565	0300, 0900, 1500, 2100	Temperature, pressure, wind direction, wind speed, humidity, dew-point temperature
	Gisang 1 (GS1)	38.225	129.208	0300, 0900, 1500, 2100	
	Gangneung Wonju National University (GWNU)	37.771	128.867	0000, 0600, 1200, 1800	
	Bukgangneung (BGN)	37.805	128.855	0300, 0900, 1500, 2100	
ASOS	Bukgangneung (BGN)	37.805	128.855	0000, 0300, 0600, 0900, 1200, 1500, 1800, 2100	Snowfall, precipitation

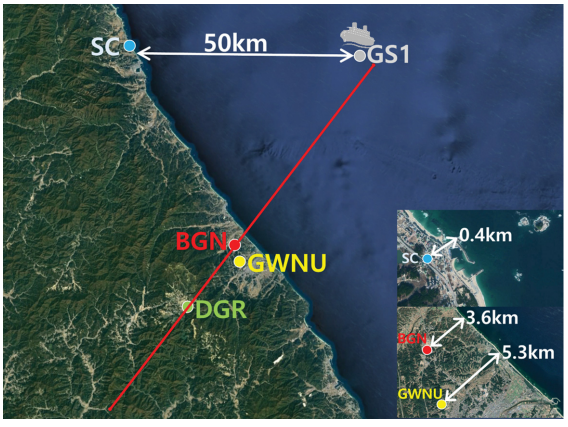

Fig. 1. Location of the main observation sites. Red line indicates the cross-section of Fig. 8 and Fig. 10 (SC: Sokcho, BGN: Bukgangneung, GWNU: Gangneung Wonju National University, DGR: Daegwallyeng, GS1: Gisang 1).

약 40 km까지 70개의 층으로 구성되어 있다. 산출 자료는 등압면 자료와 단일면 자료 2종류로 제공되는데, 본 연구에서는 η 좌표계의 등압면에 따른 온도와 바람(u, v)자료를 활용하였다. 그리고 분석에 활용한 영역은 태백산맥의 동쪽 산사면과 영동지역, 동해상 일부를 포함하기 위하여 동경 128.4°~129.4°, 북위 37.4°~38.4°로 정하였다. LDAPS에 대한 자세한 내용은 Table 2에 제시하였다.

2.2 강원 영동지역의 한기 축적 사례 선정 방법

2019년부터 2020년까지 관측한 강설 사례는 총 12개 사례이었으며, 이를 종관적인 특징, 성상, 강설(수)량, 850 hPa 온도, 풍향, 풍속, 역전층, 동풍 등을 정리하여 Table 3에 제시하였다. 종관적인 특징은 Ko et al. (2016)이 제시한 분류방법을 참고하였으며, 이는 기본적으로 강설 기간 동안 저기압이 통과하는 경로와 한반도의 강수 분포를 고려하여 분류하는 것이다.

Table 2. Detail specifications of numerical weather prediction model (LDAPS).

Horizontal resolution	1.5 km 602 (east to west) × 781 (south to north)
Vertical layers	L70 (Top of Height ~40 km)
Prediction period	36 hours – 0000, 0600, 1200, 1800 UTC 3 hours – 0300, 0900, 1500, 2100 UTC
Variables	Vertical Velocity (Pressure Level) U-component of wind V-component of wind Geopotential Height (Pressure Level) Temperature (Pressure Level) Relative Humidity

Table 3. Summary of 2019~2020 snowfall events observed at Gangneung-Wonju National University.

	Period of event	Synoptic	Phase	Snow (cm)/ precipitation (mm)	850 hPa		925 hPa		Inversion		Remark
					T (°C)	WD	T (°C)	WD	Depth (m)	Strength (°C)	
1	2019.01.25~01.26	ST	Snow	3.5 / 1.3	−11	NW	−5.2	NNW	287	1.67	
2	2019.01.31~02.01	LP	Snow	17.1 / 15.8	−8.4	NNW	−2.3	NW	433	2.57	
3	2019.02.13~02.14	ST	Snow	0.4 / 0	−11.7	ENE	−6.7	N	1172	5.22	CAD1
4	2019.02.22~02.23	ST	ND	- / 0	−5.5	NE	1.3	N	587	0.91	
5	2019.03.15~03.16	LC	Mixed	0 / 4.9	−4.4	NE	−0.4	NW	ND	ND	
6	2020.01.17~01.18	ST	Rain	- / 0.9	−4	N	−0.3	NNW	ND	ND	
7	2020.01.30~01.31	LP	Snow	0.7 / 8.1	−7.2	N	0.1	NNW	424	2.8	
8	2020.02.06	ST	Snow	- / 0	−12.9	NNE	−8.9	NNW	700	1.86	CAD2
9	2020.02.08~02.09	ST	Snow	4.2 / 1.2	−9.1	N	−4.5	NNW	347	1.65	CONT
10	2020.02.15	ST	ND	- / 0	0.3	ESE	4.9	N	501	3.22	
11	2020.02.25~02.26	LC	Rain	- / 48.5	−5.4	NNE	−0.2	NE	300	1.99	
12	2020.03.15~03.16	ST	Snow	7.9 / 8.1	−7.9	N	−2.7	NNW	ND	ND	

ND: Not Determined
CAD1: Cold Air Damming 1st event
CAD2: Cold Air Damming 2nd event
CONT: The Contrast Event

총 3가지 종관장으로 분류하며, 저기압 관통형(Low Crossing: LC)은 한반도를 저기압이 관통하면서 한반도 전역에 걸쳐 강수가 관측되는 패턴이고, 저기압 통과형(Low Passing: LP)은 한반도 남쪽으로 저기압이 통과하면서 북쪽의 시베리아 고기압과 호응하는 과정에서 북동풍계열이 유발되며 이로 인하여 영동지역과 남부지역에 강수가 발생하는 패턴, 마지막 정체형(Stagnation: ST)은 시베리아 고기압의 한반도 확장 및 일본 방향에 정체한 저기압의 영향으로 북동풍에 의해 영동 해안지역에만 강수가 제한되는 패턴을 의미한다. 2019~2020년 강설 사례들의 종관적인 특징은 LC, LP 그리고 ST 사례가 각각 2, 2, 8로 분류되었다. 강수의 성상은 주로 눈이 7회 관측되었고, 눈·비 혼합형이 1사례, 강우가 2사례, 무강설이 2사례이었다.

이 중에서 강설 예보가 있었는데도 강설이 없었거나 예상보다 적게 내렸던 사례들은 역전층이 강하게 발달하고, 대기 하층의 온도가 낮았던 공통된 특징을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 이러한 특징으로 영동지역 강설이 영향을 받은 사례들을 한기 축적 현상(CAD)으로 정의하고(Kwon et al., 2020), 2019년 2월 14일을 CAD1, 2020년 2월 6일을 CAD2로 선정하였다. 그리고 대조 사례(CONT)로 2020년 2월 8일 사례를 함께 제시하였다. 두 개의 CAD와 대조(CONT) 사례 모두 종관장 조건은 정체형(ST)으로 분류되었다.

CAD 현상 발생시에는 북동풍 계열의 한기가 태백산맥 동쪽 산사면에 막혀 남하하면서 산맥 동쪽 산사면에 축적되기 때문에 해양에서 발달한 눈구름이 내륙으로 진입하지 못하는 경향이 있다. 이러한 현상을

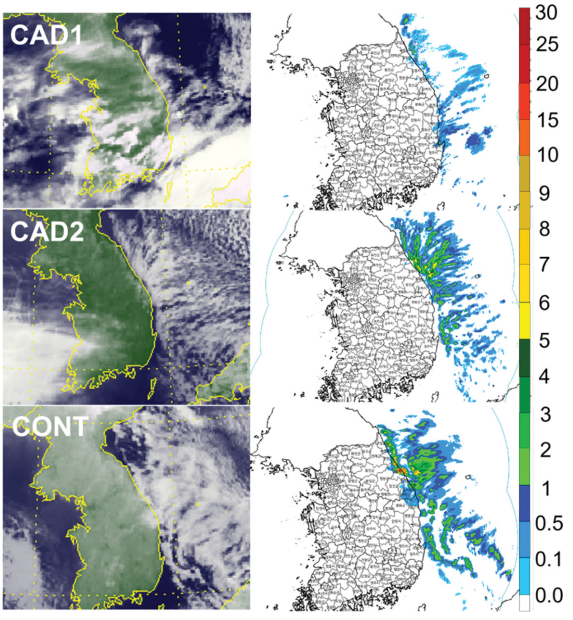

Fig. 2. Satellite infrared images (left), and radar reflectivity (right) for CAD1 (14 February 2019), CAD2 (6 February 2020) and CONT (8 February 2020).

확인하기 위하여 천리안 위성의 적외 영상과 레이더 자료를 분석하여 Fig. 2에 제시하였다. Figure 2는 하층이 차갑고, 역전층이 발달한 3개 사례들의 구름 위치를 확인한 그림인데, 이 중에서 2019년 2월 14일과 2020년 2월 6일의 전형적인 CAD 사례는 구름대가 내

륙으로 전혀 진입하지 못하고 해안선을 따라 머무르는 형태가 잘 나타나고 있다.

3. 연구결과

3.1 사례별 종관 특성 및 연직 구조 특성

Figure 3은 2개 CAD 사례와 1개 대조사례(CONT)의 850 hPa 종관 일기도를 제시한 것이다. CAD 사례의 경우, 한반도 주변의 등치선 간격이 조밀하지 않은 것이 잘 나타나고 있다. 이는 종관 강제력이 약하게 작용하여 영동지역에서 중규모 기상 현상인 한기축적 현상이 뚜렷하게 작동할 수 있었을 것으로 판단된다. 이와 다르게 대조사례(CONT)인 2020년 2월 8일의 경우는 한반도가 잘 발달된 기압골과 경압불안정의 영향을 받은 사례이다. 3개 사례들의 상호 비교를 위하여 Fig. 4에 각 사례별 레윈존데 사운딩 자료를 제시하였으며, 동시에 지난 2014년부터 2019년까지 강릉원주대학교에서 자체 관측한 전체 154개 사운딩 자료를 배경에 함께 제시하였다. CAD 사례의 경우, 전체 사운딩 자료와 비교하였을 때 고도 2 km 이내에 온도가 가장 낮은 한기층이 존재하고 있으며(CAD1 850 hPa 온도 −12°C, CAD2 850 hPa 온도 −13°C), 운정고도 바로 위에 약 0.7~1.2 km 두께의 역전층이 뚜렷하게 발달하는 것을 알 수 있었다. 구체적으로 CAD1의 경우 약 0.9 km 이하 고도에서는 북서풍 계열이 두껍게 발달하고 있으며, 1.0~1.6 km 기층에서는 북동풍계열 바람, 그리고 1.9~2.4 km 기층에는 남서풍 계열 바람이 분포하고 있는 특징이 있었다. CAD2 경우는 CAD1 사례 보다 동풍층은 얇게(1.6~2.0 km) 그리고 북서풍 계열 기층은 1.2 km 고도까지 두껍게 발달하고 있었다. 반면에 CONT 사례는 전체 사운딩과 비교하였을 때 3 km 이내의 하층 온도가 차가운 편에 속하지만 CAD 사례에 비해 상대적으로 따뜻하고(850 hPa 온도 −9°C), 역전층 또한 0.3 km 두께로 상대적으로 약하게 생성된 것을 확인할 수 있었다. 연직 바람 구조는 CAD 사례와 마찬가지로 1 km 이내에 북서풍 계열 바람이 발달하였지만, 1~3 km 고도에서 북동풍계열 바람이 훨씬 더 두껍게 발달하였다.

Figures 5-7은 CAD1 (2019년 2월 14일), CAD2 (2020년 2월 6일), CONT (2020년 2월 8일) 사례들 각각의 레윈존데 자료를 이용하여 상당온위, 상대습도, 그리고 바람의 연직 구조를 3시간 간격(레윈존데 관측 시간 간격)으로 나타낸 그림이다. 먼저, CAD1 사례는 강설 시간대인 14일 오전 6시부터 9시까지 운정고도가 약 2.5 km이고, 풍계는 0.9 km 이하에서 북서풍, 1.0~1.6 km는 북동풍, 1.9~2.4 km 기층에는 남서풍이 관측되었다. 이 사례는 대설 예비 주의보가 발표되었던 사례이지만, 새벽 시간에 강설량이 북강릉 기

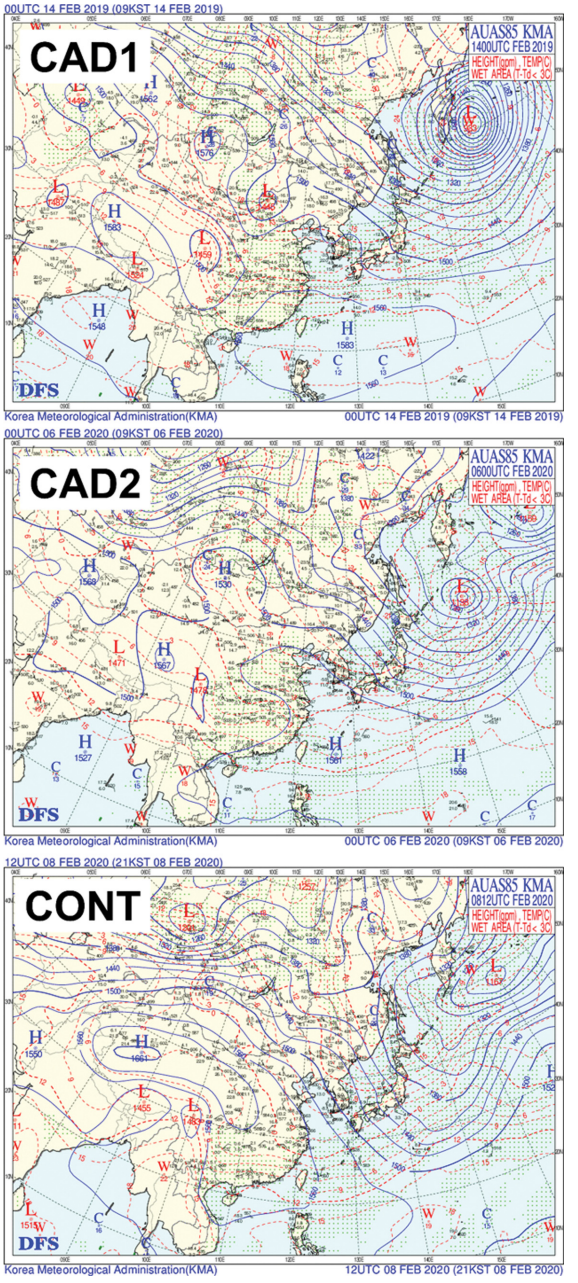

Fig. 3. 850 hPa synoptic charts on CAD1 (0900 KST 14 February 2019), CAD2 (0900 KST 6 February 2020) and CONT (2100 KST 8 February 2020).

준으로 0.4 cm로 적은 양이 관측되었다. 이는 종관적으로 발생한 북풍 내지 북동풍계열의 바람이 태백산맥에 가로 막혀(blocking), 산맥을 따라 나란히 부는 북서풍 계열의 바람(일종의 barrier jet)이 유도되면서 산맥의 동쪽 산사면 하층에 한기 축적(CAD) 현상이

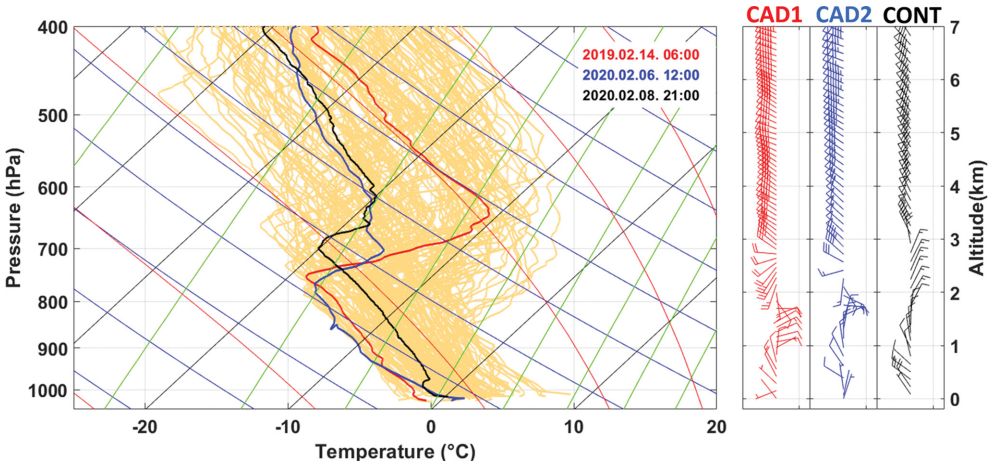

Fig. 4. Vertical profile of temperature and wind of CAD1 (14 February 2019), CAD2 (6 February 2020) and CONT (8 February 2020). Temperature profiles of 154 soundings are also shown in yellow on the background for the comparison with the CAD profiles. Black, blue, red, and green lines indicate isothermal, dry adiabat, wet adiabat, and saturation mixing ratio lines, respectively, in the thermodynamic diagram.

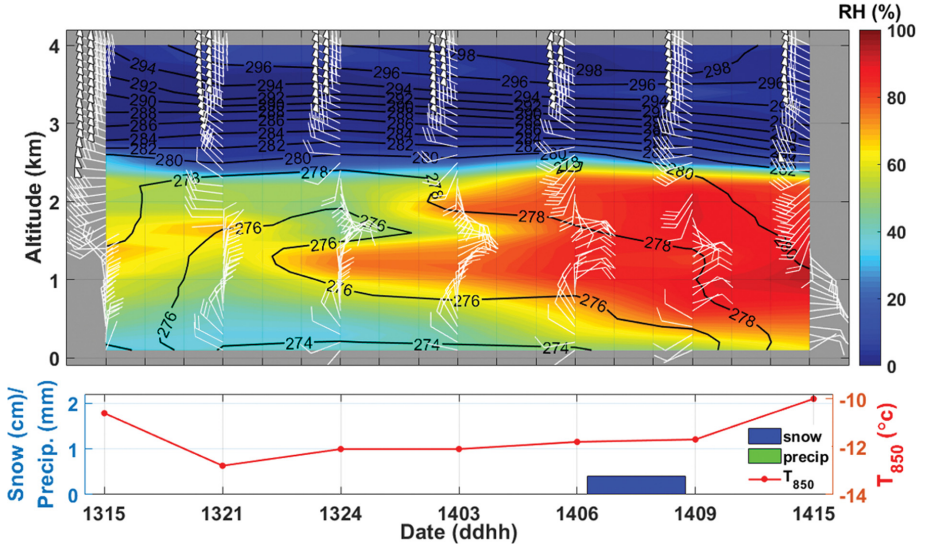

Fig. 5. Time series of thermodynamic profiles, and snow and precipitation amounts along with 850 hPa temperature for CAD1 (13~14 February 2019). The white flag, shading, and black line in the upper plot denote wind (m s^{-1}), relative humidity (%), and equivalent potential temperature (K), respectively. In the figure, ddhh denotes day and hour, respectively.

유발되었을 것으로 판단된다. 이와 더불어 강설 시간대가 이른 아침 6~9시경이기 때문에 야간에 태백산맥 정상부근의 복사냉각으로 인한 한기 하강풍이 CAD 현상을 강화시켰을 것으로 추정된다.

CAD2 사례 경우, 강원 중남부 동해안을 기준으로 12시에서 15시 사이에 예상 적설(강수)이 1 cm(5 mm) 미만으로 예보되었던 사례로, 실제 12~14시경에 해안가에 눈이 날리는 것이 육안으로 관측되었지만, 강설이 내륙으로 진입하지 못하여 강설은 기록되지 않았다. Figure 6의 대기 열역학구조를 보면 하층에 한기가 위치하고 있으며, 850 hPa 온도는 –12.9°C로 가장 낮은 범위에 해당하였다. 강설 시간대인 12~15시의 운정 고도는 약 2 km 정도이었으며, 구름층 위의 고도에서 강한 역전층이 나타났다. 연직 바람의 분포는

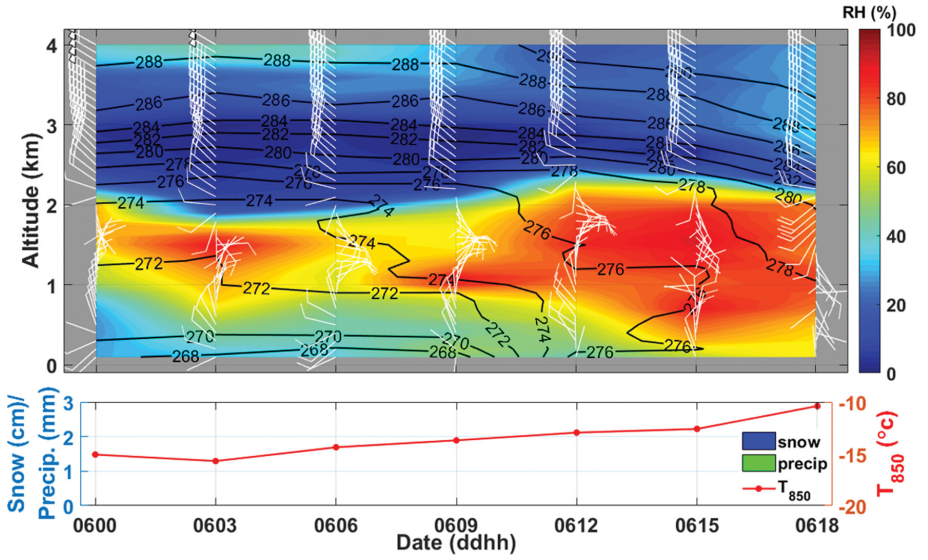

Fig. 6. The same as in Fig. 5 except for CAD2 (6 February 2020).

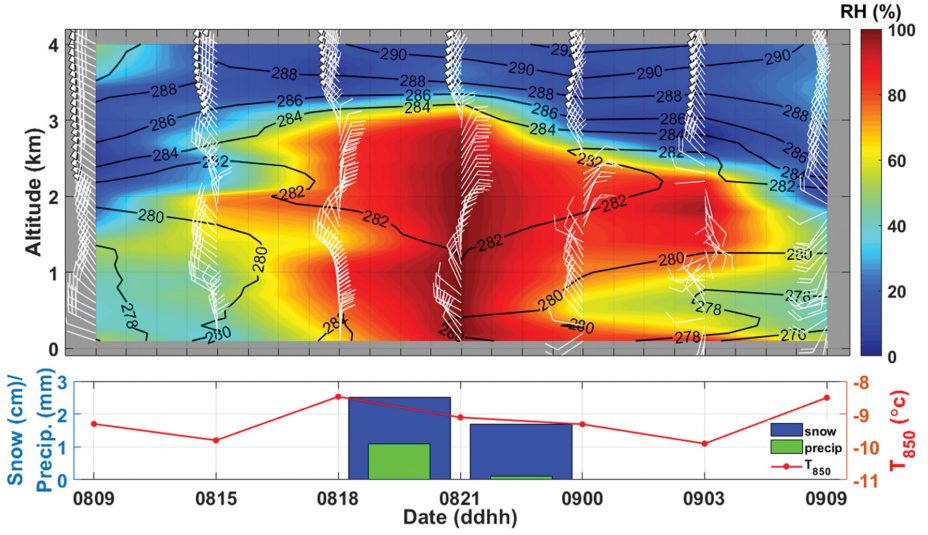

Fig. 7. The same as in Fig. 5 except for CONT (8~9 February 2020).

1.2 km 이하에서 북서풍, 1.6~2 km에서 북동풍, 2 km 이상은 서풍으로 CAD1 사례와 유사한 패턴을 보였다. 대조사례인 2020년 2월 8일(CONT)의 대기 열역학 구조는 Fig. 7에 제시하였다. CONT 사례는 종관 강제력의 영향을 받아 한기 축적 현상이 2개 CAD 사례에 비해 약했던 것으로 추정된다. Figure 7을 보면 하층에 한기가 CAD 사례에 비해 뚜렷하지 않았고 (850 hPa 온도 –9.1°C), 강설 기간인 8일 18시부터 자정까지 운정고도가 약 3 km까지 높게 발달하였다. 그리고 강설 이전 시간대(15시)에는 2 km까지 북서풍이 강하게 발달하여 눈구름이 내륙으로 진입하지 못하였지만, 18시 이후에는 북풍과 함께 구름대가 점차 내륙으로 유입되면서 강설이 시작되었다. 눈이 강하게 내렸던 21시에는 약 1.5~3 km 고도에 북동풍계열 바람이 뚜렷하게 발달한 것을 알 수 있었다. 자정부터는 하층의 북서풍계열 바람이 다시 강해지면서 눈구름이 다시 동해상으로 물러났다.

위에서 언급한 CAD 사례시 온도와 바람 특징을 고

려하여 다음과 같은 CAD 정량적 기준을 제시하고자 한다. 하지만, 제시된 기준은 관측 캠페인을 통해 강설예보가 있었으나 실제로 강릉 기준으로 무강설이나 0.4 cm 이하의 강설이 관측된 2개 CAD 사례들을 기준으로 정한 값들이기 때문에 향후 추가 CAD 사례 관측을 기반으로 기준값들의 수정·보완이 필요하다.

1) 850 hPa 온도는 263 K 이하,
2) 하층 북서풍계열의 바람층이 북풍 내지 북동풍계열 층 두께보다 큰 경우,
3) 하층 구름위에 역전층 강도는 1.5 K 이상,
4) 역전층 두께는 500 m 이상

3.2 CAD의 시공간적 특성

CAD 발생시 온도와 바람장의 수평 및 연직 분포를 이해하기 위하여 LDAPS 자료를 분석하였다. 연직분포는 대관령 관측소부터 기상1호 관측 지점까지 태백산맥과 수직하게 이은 선을 따라 단면도를 분석하였다(Fig. 1의 빨간색 실선). 먼저, CAD1 사례 03~12시까지의 온위 및 바람의 연직 구조를 Fig. 8에 제시하였다. 앞 절에서도 제시한 것처럼 태백 산맥의 동쪽 산사면에 한기가 축적되어 돔(Dome) 형태가 유지되면서 06~09시에 가장 강화되어 동해상인 129E선에 바람의 수렴대가 위치하였다. 이렇게 축적된 한기로

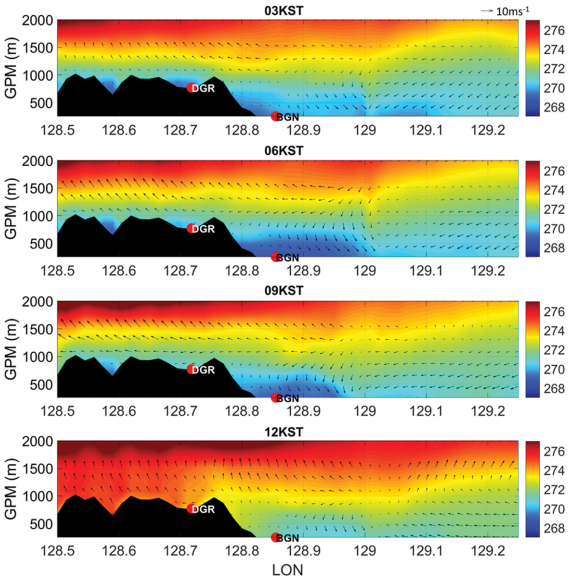

Fig. 8. Vertical cross sections over the Yeongdong region on CAD1 (14 February 2019). The color shading and vectors denotes potential temperature (K) and wind field, respectively. BGN and DGR indicate Bukgangneung and Daegwallyeng, respectively.

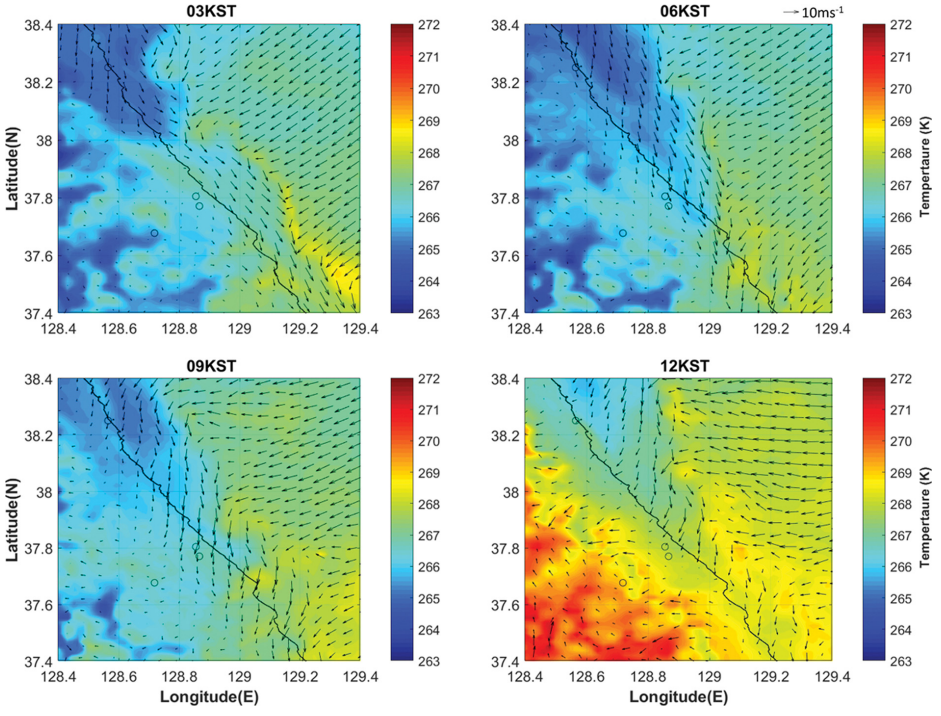

Fig. 9. Horizontal distribution of potential temperature (color shading) and wind field (vectors) on the 950 hPa level over the Yeongdong region for CAD1 (14 February 2019).

인해 하층의 동풍계열 바람이 내륙으로 깊이 진입하지 못하였다. 이는 3.1절에서 설명한 바와 같이 태백산맥 동쪽 산사면에 가로 막힌(blocking) 북동풍 계열의 차가운 공기가 태백산맥을 따라 나란히 부는 북서풍과 함께 남하하면서 태백산맥 동쪽 산사면에 한기축적을 형성한 것으로 보인다. Figure 9는 CAD1 사례의 시간에 따른 온위와 바람의 수평분포를 제시한 것이다. 03시에서 06시로 시간이 경과함에 따라 한기가 점차 남하하고 있으며, 축적된 한기로 인해 Fig. 8에서 보았던 것처럼 해안선 바깥 동해상 129E에 바람의 수렴대가 위치한 것이 잘 나타나고 있다. CAD2 사례는 유사한 특성을 보여 본문에 제시하지 않았다.

대조사례(CONT)인 2020년 2월 8일 사례의 온위 및 바람의 연직구조(Fig. 10)를 살펴보면 1 km 이내 하층에서 북풍이 불면서 18시와 21시경에 동해 상공이 영동지역보다 온도가 더 낮은 것을 알 수 있었다. 이는 CONT 사례가 CAD 사례들과 달리 영동 내륙지역에 한기축적이 발생하지 않았음을 의미하고, 18시 이후 북동풍 계열의 영동 내륙 진입으로 강릉에 동시간대에 4.2 cm의 강설이 관측되었다. 21시부터는 영동 내륙에도 복사냉각에 의해 한기가 축적되면서 이후 다시 수렴대가 동해상으로 점차 밀려났다. 이러한 연직구조의 시간에 따른 변화는 수평분포에서도 잘 나타나고 있다. CONT 사례의 바람의 수평분포(Fig. 11)에

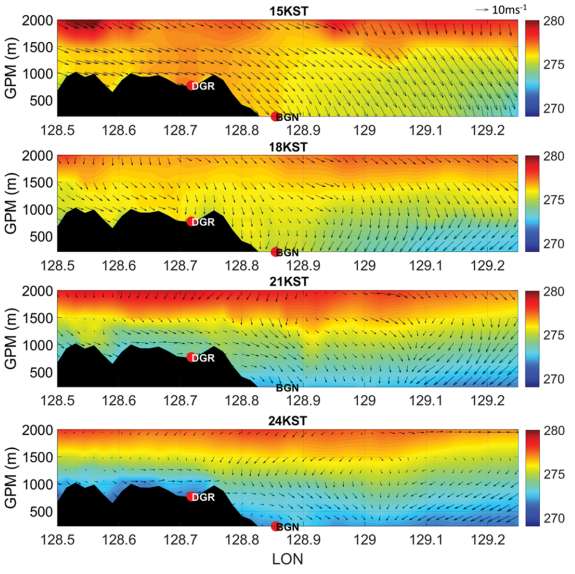

Fig. 10. The same as in Fig. 8 except for CONT (8 February 2020).

서는 18시 북풍계열의 바람이 내륙 깊숙이 진입하면서 강설이 관측되었다. 21시에는 풍계가 영동내륙에서 점차 북서풍계열로 바뀌기 시작하여 24시에는 강

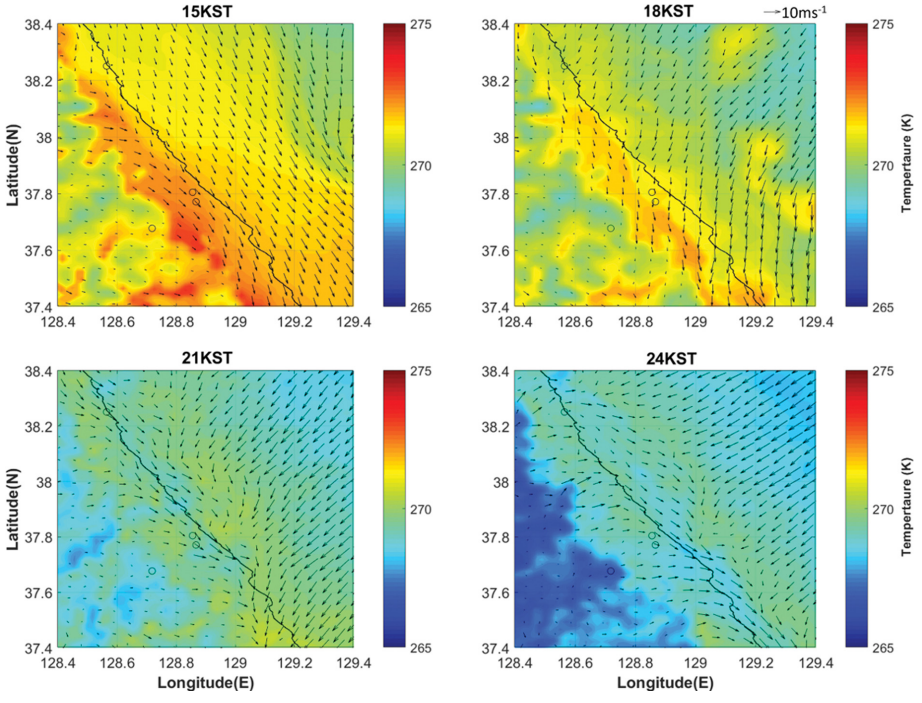

Fig. 11. The same as in Fig. 9 except for CONT (8 February 2020).

설이 종료되었다. 이는 야간에 태백산맥 정상부근의 복사냉각으로 인한 한기하강이 강화되어 눈구름대를 동해상으로 다시 밀어냈을 것으로 추정된다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 2019년부터 2020년까지 강릉, 속초, 동해상에서 공동으로 수행한 공동입체관측 자료를 이용하여 영동지역에서 발생하는 한기 축적 현상(CAD)을 분석하였다. 공동입체관측 기간 동안 강설 사례는 총 12 사례이었으며, 강설 사례시 주요 종관장은 정체형으로 시베리아 고기압의 한반도 확장 및 한반도 남서쪽에 정체한 저기압의 영향으로 영동 해안 지역에서 강설이 발생하는 패턴이었다. 공동입체관측 기간에 대설이 발생하지는 않았지만, 강설 예측이 상대적으로 어려운 2가지 한기 축적 사례(2019년 2월 14일과 2020년 2월 6일)와 대조사례로 경압불안정이 강했던 2020년 2월 8일 사례를 함께 비교 분석하였다.

두 CAD 사례 모두 850 hPa 온도가 −12°C 이하까지 감소하여, 전체 강설 사례들(2014~2019년) 중에서 가장 온도가 낮은 한기축적 사례였다. CAD 사례시 운정 고도는 약 1.5~2 km이었으며, 운정 고도 위로는 역전층이 강하게 발달하는 공통점이 있었다. 연직 바람 구조는 약 1.0~1.2 km 이하에서 북서풍 계열 바람이 불고, 이 층 위에는 약 0.4~0.6 km 두께의 북동풍 계열 바람이 상대적으로 약하게 발달하는 경향이 있었다. LDAPS 재분석장을 활용하여 온위와 바람의 수평 및 연직 분포를 분석한 결과, 강설 시간대에 수렴대가 해안가 부근에 위치하는 것을 확인할 수 있었고, 태백산맥 동쪽 산사면의 하층부근에 한기가 뚜렷하게 축적되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 종관장에 의해 유발된 북동풍 계열의 한기가 태백산맥에 가로막혀 산맥에 나란히 부는 장벽 제트(북서풍 계열의 barrier jet)를 타고 남하하면서 태백산맥 동쪽 산사면 부근에 한기 축적(CAD)을 형성한 것으로 판단된다. 그리고 이와 더불어 야간에는 산정상 부근의 복사냉각에 의한 한기 하강풍이 CAD를 더욱 강화시켰을 것으로 추정된다. 반면에 대조사례인 2020년 2월 8일 사례는 종관장의 영향을 받아 한기 축적 현상이 약했으며, 이로 인해 북동풍과 함께 눈구름이 내륙 진입으로 인하여 영동지역에 4.2 cm 적설이 관측되었다.

영동지역 공동 입체공동관측을 통하여 한기 축적 현상 발생시에 한기 축적 현상으로 인해 눈구름대와 강설 위치가 영동 내륙으로 진입하지 못하고 해안가나 동해상에 제한되는 것을 확인할 수 있었다. 향후 지속적인 집중관측과 모델링을 활용하여 한기축적이 강설의 위치나 강설량에 미치는 영향에 대한 추가 분석이 이루어진다면 강설 예측성 향상에 크게 기여할 것이다. 또한 야간 산 정상 부근 복사냉각에 의한 한기 하강풍과 따뜻한 동해 수온으로 인한 육풍 효과 등이 CAD 사례와 더불어 발생할 때 강설에 미치는 영향에 대한 연구 등도 필요하다.

감사의 글

이 연구는 강원지방기상청 연구개발사업인 “강원영동 동풍·강풍의 특화된 관측·예보기술 개발” 사업의 지원으로 수행되었습니다. 그리고, 본 논문의 개선을 위해 좋은 의견 및 조언을 해 주신 두 분 심사위원께 감사드립니다.

REFERENCES

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. *Mon. Wea. Rev.*, **18**, 641-661.

Bell, G. D., and L. F. Bosart, 1988: Applachian 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.

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).

KMA, 2019: *Winter forecast guidance (Why? How!)*. Korea Meteorological Administration, 277 pp (in Korean).

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 Youngdong area. *J. Korean Meteor. Soc.*, **30**, 197-218 (in Korean with English abstract).

Lee, J. G., 2001: A numerical simulation of a heavy snowfall event occurred along the Yeongdong coastal area.

J. Korean Meteor. Soc., **37**, 1-12 (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.

_____, 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.-H., 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).

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 (in Korean with English abstract).

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).

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).