

## 관측과 모델 자료를 활용한 겨울철 영동지역 한기 축적(Yeongdong Cold Air Damming; YCAD)의 공간 규모 분석

남형구<sup>1)\*</sup> · 정종혁<sup>1)</sup> · 김현욱<sup>1)</sup> · 심재관<sup>1)</sup> · 김백조<sup>1)</sup> · 김승범<sup>1)</sup> · 김병곤<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>국립기상과학원 재해기상연구부, <sup>2)</sup>강릉원주대학교 대기환경과학과

(접수일: 2020년 4월 8일, 수정일: 2020년 5월 16일, 게재확정일: 2020년 5월 20일)

### An Analysis on the Spatial Scale of Yeongdong Cold Air Damming (YCAD) in Winter Using Observation and Numerical Weather Model

Hyoung-Gu Nam<sup>1)\*</sup>, Jonghyeok Jung<sup>1)</sup>, Hyun-Uk Kim<sup>1)</sup>, Jae-Kwan Shim<sup>1)</sup>,  
Baek-Jo Kim<sup>1)</sup>, Seung-Bum Kim<sup>1)</sup>, and Byung-Gon Kim<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>High Impact Weather Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, KMA, Korea

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

(Manuscript received 8 April 2020; revised 16 May 2020; accepted 20 May 2020)

**Abstract** In this study, Yeongdong cold air damming (YCAD) cases that occur in winters have been selected using automatic weather station data of the Yeongdong region of Korea. The vertical and horizontal scales of YCAD were analyzed using rawinsonde and numerical weather model. YCAD occurred in two typical synoptic patterns such that low pressure and trough systems crossing and passing over Korea (low crossing type: LC and low passing type: LP). When the Siberian high does not expand enough to the Korean peninsula, low pressure and trough systems are likely to move over Korea. Eventually this could lead to surface temperature ( $3.1^{\circ}\text{C}$ ) higher during YCAD than the average in the winter season ( $1.6^{\circ}\text{C}$ ). The surface temperature during YCAD, however, was decrease by  $1.3^{\circ}\text{C}$ . The cold air layer was elevated around 120 m~450 m for LP-type. For LC-type, the cold layer were found at less than approximately 400 m and over 1,000 m, which could be thought of combined phenomena with synoptic and local weather forcing. The cross-sectional analysis results indicate the accumulation of cold air on the east mountain slope. Additionally, the north or northeasterly winds turned to the northwesterly wind near the coast in all cases. The horizontal wind turning point of LC-type was farther from the top of the mountain (52.2 km~71.5 km) than that of LP-type (20.0 km~43.0 km).

**Key words:** Cold air damming, Yeongdong area, Siberian High, synoptic weather patterns

## 1. 서 론

한기 축적 현상(Cold Air Damming; CAD)은 산맥에 수직으로 불어 들어 오는 바람이 산맥과 평행한 저위도 방향으로 전향되어 상대적으로 차가운 공기가

산사면에 축적 되는 현상으로 주로 정의되고 있다(Dunn, 1987; Bailey et al., 2003). 한기 축적은 겨울철 지상으로 낙하하는 강수 입자의 형태(rain to snow)와 성상을 변화시키고 한랭 전선을 형성하여 강설 구역을 변화시키는 등 강설에 미치는 영향이 큰 것으로 보고되고 있다(Lee and Kim, 2008; Stark et al., 2013).

국외에서 지상 및 원격관측 자료, 그리고 수치모델을 이용해 한기 축적의 생성, 발달, 소멸 메커니즘과 겨울철 강설에 미치는 영향을 분석하는 연구가 진행되었다. Bell and Bosart (1988)는 애팔래치안(Appalachian)

\*Corresponding Author: Hyoung-Gu Nam, High Impact Weather Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, 7 Jukheon-gil, Gangneung 25457, Korea.  
Phone: +82-33-913-1061, Fax: +82-33-644-2657  
E-mail: hyounggu@korea.kr

산맥 동서지역의 50년간 지상기상관측 및 레윈존데 자료를 이용해 한기 축적을 기후학적으로 분석한 결과를 보고하였다. 그 결과 한기 축적은 내륙이 해안에 비해 냉각되는 겨울철 월 3~5회 빈도로 발생하는 것을 확인하였고, 한기 축적으로 생성되는 지표인근 한기돔(Cold dome)에 대한 개념모델을 제시하였다. Bailey et al. (2003)은 아팔래치안 한기 축적 발생을 객관적으로 정의하기 위해 지상 온위와 해면기압 자료를 이용하는 방법을 제시하였다. 이는 한기가 누적되는 산사면 주변 해면기압과 온위의 등치선이 “U” 혹은 이와 반대 모양으로 나타나는 것에 착안하여 Laplacian ( $\nabla^2$ )을 산출한 뒤 해석하는 방법이다. 또한, 한기 축적 발생 메커니즘을 중관 강제력에 기반한 단열 과정, 태양복사 차폐와 구름하부(sub-cloud)의 증발로 인한 비단열 과정으로 나누고 대표 중관장을 제시하였다. Rackley and Knox (2016)는 Bailey et al. (2003)이 제시한 방법에 따라 한기 축적을 동일한 방법으로 분류하고 북미지역에 한기돔의 확장 영역과 발생 빈도를 분석하였다. 한편, 지표인근 한기 축적 시, 강수 유형의 변화와 전선면 형성으로 인한 강수 구역 변화가 분석되었다. Theriault et al. (2010)은 수치모델로 모의된 연직 온도와 항공기 강수입자 관측 자료를 이용해 겨울철 강수의 형태와 강도는 융해고도 아래 차가운 대기층인 재결빙고도(refreezing layer)에 의존성이 크다고 제시하였다. Zerr (1997)은 도플러 레이더, 항공기관측, 레윈존데 자료를 이용해 어는 비(freezing rain)가 내릴 때 보편적인 지표 재결빙고도 위에 융해고도가 위치한다고 제시하였고, 강설 입자 변화 모의 결과와 비교하여 겨울철 강수 형태의 예측 가능성을 보고하였다. Srock and Bosart (2009)는 아팔래치안 한기 축적이 북미 남동부에 해안 전선을 만들고 이것이 해안에서 불어 들어오는 기류를 상승시켜 내륙에 강수를 강화시키는 메커니즘을 설명하였다.

국내에서도 서쪽으로 태백산맥과 동쪽으로 동해에 인접한 복잡지형을 가진 영동지역에서 한기 축적이 강설에 미치는 영향이 분석되었다. Lee (2001)는 수치모델 분석을 통해 영동 해안지역에서 한기 축적이 해안전선을 형성하는 것을 최초로 제시하였으며, 이를 통해 영동 산악지역보다 해안지역에서 강설이 더 많은 이유를 두 가지로 설명하였다. 첫째는 중관 강제력으로 생성된 북동계열의 바람이 내륙으로 들어올 때 태백산맥에 의하여 막혀 한기 축적이 일어나게 되고 동쪽 산사면에 축적된 밀도가 큰 찬 공기가 쉽게 상승하지 못하는 것이고, 둘째는 해상에서 중관 강제력에 의한 북동기류와 태백산맥의 저지효과로 인해 생성된 북서계열의 바람이 마주치면서 수렴이 일어나고 해안전선이 형성되는 것인데, 이를 영동지역에서

산악지역 보다 해안가에 강설이 많은 이유로 제시하였다. Lee and Kim (2008)와 Lee and Xue (2013)은 수치모델을 활용한 사례분석을 통해 영동지역에서 한기 축적과 강설 발생메커니즘을 설명하고 상호작용을 연구하여 영동해안지역 전선 발생에 따른 강설개념 모식도를 제시하였다.

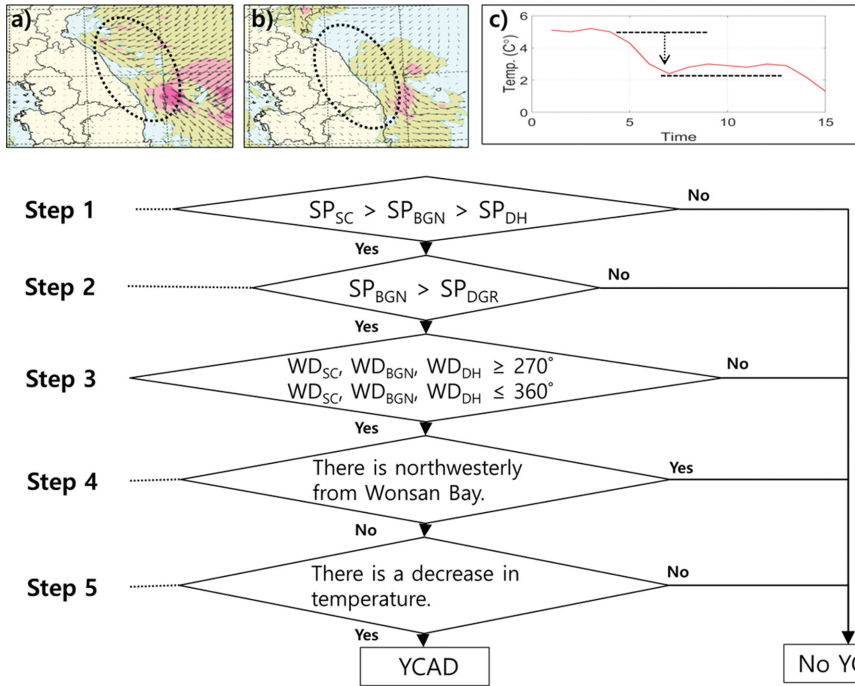
영동강설 메커니즘을 이해하는데 한기 축적이 중요함에도, 동해상과 산악지역에 중규모 현상을 이해하기 위한 관측자료가 충분하지 않기 때문에 수치모델을 활용한 일부 사례 중심의 연구만이 진행되었다. 일부 사례 분석을 통해 한기 축적이 영동강설에 미치는 영향이 보고되었으나 국지 규모로 발생하는 한기 축적이 지상기상요소(온도, 풍속 등) 변화에 미치는 영향과 그 발생 규모에 대한 연구는 여전히 부족하다. 특히, 영동강설의 심도 있는 이해(해안과 산악의 강수 입자 유형 변화와 국지적인 해안 전선 형성)를 위해 한기 축적 발생 시 지상기상요소의 변화와 그 발생 규모 분석과 같은 기초 연구가 필요한 실정이다.

본 연구의 목적은 1) 영동지역에 한기 축적을 유발하는 대표 중관장을 제시하고 2) 지상 기상요소들의 변화 및 공간규모 분석결과를 제시하여 연구자들의 현상 이해를 돕고자 하는 것에 있다. 따라서 본 연구에서 한기 축적 사례를 선별한 기준을 제시하고, 현상 발생 시 지상 기상 요소들의 관측 값 변화와 연직 수평 규모 분석 결과를 제시하고자 한다. 따라서, 이 논문의 2장에서는 본 연구자가 영동 한기 축적을 정의한 방법과 분석 자료 및 연구방법을 기술하였으며, 3장에서는 영동 한기 축적 시 지상관측 값의 변화와 연직 수평 규모의 분석결과를 기술하였다. 마지막으로 4장에서 결과를 요약하고 토의하였다.

## 2. 분석 방법

### 2.1 영동 한기 축적(Yeongdong Cold Air Damming; YCAD)의 정의

북반구에서 산맥이 수직으로 불어오는 지균풍류가 지형에 의해 감속될 때, 기압경도력이 유지되는 상태에서 지균풍류의 감속을 보상하기 위해 전향력(Coriolis force) 또한 감소된다. 지균풍류는 동쪽 산사면에 평행한 남쪽으로 전향되고 상대적으로 찬 북쪽의 바람이 남쪽으로 이류된다. 이때 산사면을 따라 한기가 축적되는 현상이 발생하는데 이를 한기 축적(Cold Air Damming; CAD)으로 정의하고 있다(Forbes et al., 1987; Bell and Bosart, 1988; Bailey et al., 2003). 기존 선행연구에서 지상일기도의 등압선이 “U” 형태, 온위가 이와 반대 형태, 고저기압 중심부의 위치, 그리고 산사면과 해안 지역의 온도 및 기압차를 근거로 한기 축적 발생 사



**Fig. 1.** Flowchart of classification of Yeongdong cold air damming (YCAD) cases. The circles in (a) and (b) are the areas where northwesterly wind from Wonsan Bay is determined over the East sea. And (c) shows an example of temperature change in the YCAD case.

례를 선별하였다(Bell and Bosart, 1988; Bailey et al., 2003). 그러나 이와 같은 연구들에서 한기 축적이 일어나는 규모는 수백 키로(500 km 이상) 범위로 그 규모가 수십 키로 범위인 영동지역에 적용하기는 어렵다. 특히, 한기 축적이 일어나는 태백산맥(산사면) 풍상측인 동해상과 산악지역의 관측자료가 부족하기 때문에 국외 선형연구 방법을 그대로 적용하기에 무리가 있는 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서 영동 한기 축적 발생을 Fig. 1의 방법으로 판단하고 사례를 선별하였다. Figure 1에서 SP와 WD는 해면기압(Surface Pressure; SP)과 풍향(Wind Direction; WD)이며, 각 아래첨자는 속초(SC), 북강릉(BGN), 동해(DH)를 나타낸다. 영동 한기 축적 발생을 판단한 방법은 다음과 같다. 첫째, 북쪽(고위도)의 차가운 기류가 태백산맥 산사면을 따라 축적되어 이루어 되는 과정이므로(Bailey et al., 2003), 속초, 북강릉, 동해 순으로 해면기압이 높아야 한다(step 1). 둘째, 대기는 한기가 축적(밀도 축적)되어 연직으로 강하게 안정된 구조이므로, 북강릉의 해면기압이 대관령의 해면기압보다 높아야 한다(step 2). 셋째, 한기 축적 시 산사면과 수평한 바람이 존재해야 함으로(Forbes et al., 1987), 속초, 강릉, 동해에서 북서풍

(270°~360°)이 동시에 존재하여야 한다(step 3). 넷째, 원산면에서 동해로 강하게 흐르는 북서기류(지상 ~925 hPa)가 동해에서 영동지역으로 불어오는 북동류를 막아 동해상에 전선을 형성 하는 사례는 한기 축적 발생의 메커니즘과 분리되어야 함으로(KMA, 2015), UM 분석장의 유선도(Figs. 1a, b)를 참고하여 원산면에서 동해상으로 불어나오는 바람이 북동풍을 막는 경우를 제거한다(step 4). 다섯째, 위 단계로 선별된 사례의 지상 온도 시계열(북강릉)을 분석(Fig. 1c)하여 한기 축적 시작 시간 이후 온도 감소가 뚜렷해야 한다(step 5).

**2.2 자료 및 분석방법**

본 연구의 목적은 영동 한기 축적이 발생하였을 때 지상의 온도 변화와 수평·수직 규모를 정량적으로 제시하여 YCAD 메커니즘을 이해하는 것이다. 분석 사례 선정을 위해 앞 절에서 제시한 영동 한기 축적 분류기준(Fig. 1)을 바탕으로 YCAD 사례를 선정하였다. 2010~2019년 겨울철(1, 2, 12월) 속초, 북강릉, 동해, 대관령에서 관측된 해면기압, 온도, 풍향, 풍속 자료를 수집하여 분석 사례를 선별하였다. 여기서, SP<sub>SC</sub>, SP<sub>BGN</sub>, SP<sub>DH</sub>, SP<sub>DGR</sub>는 속초, 북강릉, 동해, 대관령의

**Table 1.** Case date, duration time, and synoptic type selected by YCAD.

Cases	Starting time	Duration time (hr)	Synoptic type
1	2010.02.25.20	17	LC
2	2010.12.21.14	4	LP
3	2011.02.11.06	3	LP
4	2012.12.15.00	6	LC
5	2012.12.28.10	8	LP
6	2014.01.25.13	9	LC
7	2014.02.01.13	6	LC
8	2015.01.15.11	6	LP
9	2015.01.22.00	4	LP
10	2015.01.27.16	3	LP
11	2015.02.17.14	4	LP
12	2015.12.11.01	3	LP
13	2016.02.13.20	12	LC
14	2016.12.14.13	3	LP
15	2016.12.22.07	12	LC

해면기압이며  $WD_{SC}$ ,  $WD_{BGN}$ ,  $WD_{DH}$ 는 속초, 북강릉, 동해에서 풍향이다. Figures 1a, b는 현업 수치예보모델인 Unified Model (UM)에서 제공되는 바람벡터를 한반도 영역으로 시각화한 자료로 기상예보관들이 현업 예보에 참고하는 자료이다. 이것을 참고하여 원산만에서 불어나오는 북서풍이 존재하는 사례를 제거하였다. Figure 1c는 북강릉 지상온도 변화의 예인데, YCAD 시작과 함께 온도가 감소( $> -1^{\circ}C\ hr^{-1}$ )한 경우 사례로 선별하였다. Table 1에 사례 전후의 연직 온도, 풍속, 풍향 변화 값을 제시하였다. 한기 축적 발생 시 연직 규모를 파악하기 위하여 속초( $N38.28^{\circ}$ ,  $E128.56^{\circ}$ ), 북강릉( $N37.80^{\circ}$ ,  $E128.86^{\circ}$ ), 강릉원주대학교( $N37.77^{\circ}$ ,  $E128.87^{\circ}$ )에서 비양된 레윈존데 자료를 활용하였으며, 각각의 관측소는 수평으로 55.8 km(속초-북강릉), 3.6 km(북강릉-강릉원주대학교) 떨어져있다. 관측자료가 부족한 영동지역에서 한기 축적의 수평·연직 규모를

파악하기 위해 기상청 현업 국지수치예보모델(LDAPS)의 분석장을 활용하였으며 모델의 자세한 내용은 Table 2와 같다. 수치모델을 활용한 분석영역은 영서 내륙 지역, 태백산맥의 동쪽 산사면, 그리고 동해상에서 바람장과 온위 분포의 분석을 위해 영서지역과 동해상 일부를 포함하는  $E128.50^{\circ}\sim E129.45^{\circ}$ ,  $N37.45^{\circ}\sim N38.50^{\circ}$ 로 정하였다. 또한, 대관령과 북강릉 기상관측소를 포함하는 산맥에 수직한 연직 단면(Fig. 6)의 온위와 바람장을 이용해 고도에 따른 풍향의 변화 및 한기층을 분석하였다.

### 3. 결 과

#### 3.1 영동 한기 축적 발생 시 지상 기상관측 값의 변화

2.1 절에서 제시된 방법을 2010년부터 2019년까지 속초, 북강릉, 동해, 대관령 지상관측 자료에 적용한 결과 총 15사례의 한기 축적 사례(YCAD)가 선별되었다(Table 1). 지속시간은 최소 3시간부터 최대 17시간이었으며 평균 지속 시간은 6.6시간이다. 영동 한기 축적을 발생시키는 종관장은 크게 두 가지로 나눌 수가 있었다(Fig. 2). 첫 번째, 서해상에서 발달한 저기압이 한반도를 관통하는 유형(Low Crossing; LC)과, 두 번째, 한반도 남해상과 일본의 남동해상을 통과하는 저기압에서 뺏어져 나온 기압골이 한반도에 위치하는 유형(Low Passing; LP)이다(Ko et al., 2016). 두 종관장은 시베리아 고기압이 연해주 방향으로 확장하여 북고남저 기압패턴을 형성할 때 영동지역에 북동풍이 유입되어 강설이 발생하는 전형적인 영동강설 패턴이다(Jhun et al., 1994; Ko et al., 2016; Kim et al., 2019). Kim et al. (2019)은 영동 지역 대설 주의보와 경보 시 관측된 동해 부이, 북강릉 지상관측 자료, 그리고 레윈존데 자료를 비교해 동해상에 북동풍이 산맥에 의해 북서로 전향되는 결과를 보고하였으며, Lee (2001)도 수치모의를 통해 북동풍이 북서로 전향되어 발생한 한기 축적이 영동 강설 메커니즘에

**Table 2.** Detail specifications of numerical weather prediction model (Local Data Assimilation and Prediction System; LDAPS).

Horizontal resolution	1.5 km/744 (east to west) × 928 (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
Data assimilation method	3DAVAR
Radiation physic scheme	Spectral band radiation (general 2-stream and radiation)
PBL physic scheme	Non-local scheme with revised diagnosis of K profile depth
Convention physic scheme	None
Micro physic scheme	Mixed-phase scheme with graupel
Gravity wave physic scheme	Gravity wave drag due to orography

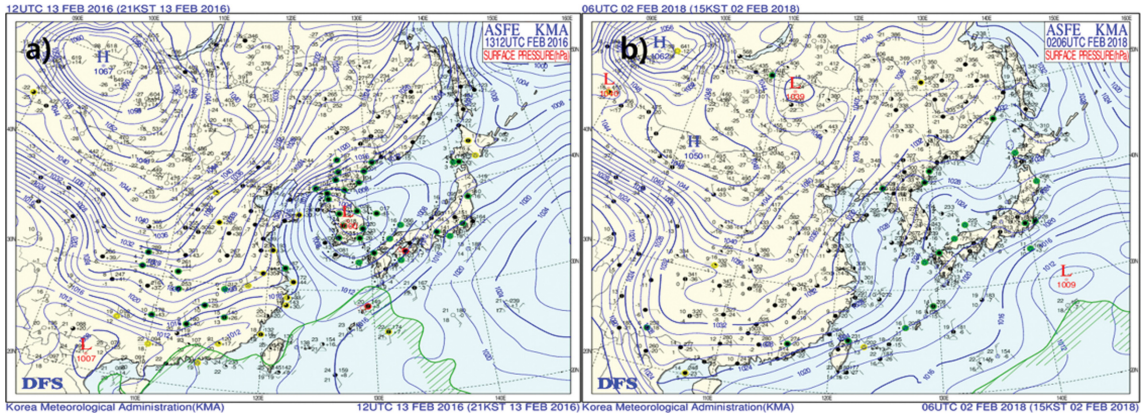


Fig. 2. The typical synoptic patterns (Low Crossing; LC (a), Low Passing; LP (b)) that result in YCAD.

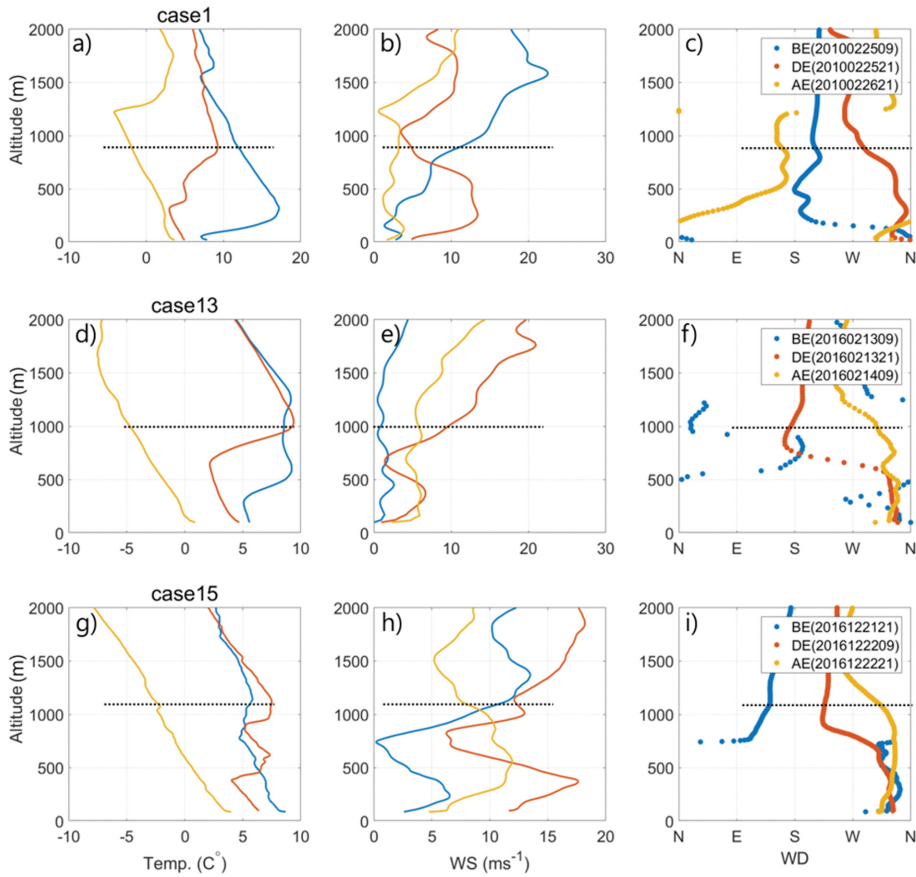
Table 3. Quantitative changes in mean values of Bukgangnueng weather observation site during YCAD period (DE), before YCAD period (BE), and after YCAD period (AE).

Case	Temperature			Wind direction			Wind speed			Rainfall amount			Humidity			Surface pressure			Snowfall amount		
	BE	DE	AE	BE	DE	AE	BE	DE	AE	BE	DE	AE	BE	DE	AE	BE	DE	AE	BE	DE	AE
1	8.6	4.6	4.6	204.7	297.3	291.6	1.5	2.4	1.1	0.0	0.5	0.0	89.3	93.5	87.4	1007.1	1014.6	1017.1	0.0	0.0	0.0
2	7.6	7.5	5.4	310.8	306.8	284.5	3.0	3.9	3.3	0.0	0.0	0.0	58.0	67.2	75.4	1015.2	1014.0	1014.7	0.0	0.0	0.0
3	-0.7	-0.8	-0.6	295.3	322.1	284.4	2.7	2.0	1.8	7.4	4.0	5.5	99.6	99.4	99.9	1020.4	1020.3	1020.3	3.0	5.5	5.3
4	4.0	3.9	3.9	306.3	314.5	309.4	3.9	4.6	3.7	5.0	1.5	0.5	83.1	86.8	89.5	1016.4	1016.0	1017.1	0.0	0.0	0.0
5	1.9	0.8	1.4	309.9	131.7	323.3	2.9	3.5	2.9	0.5	4.0	0.5	77.4	91.5	85.9	1024.7	1023.6	1024.9	0.5	2.2	0.1
6	5.1	3.2	2.1	258.9	324.5	295.4	2.0	2.8	1.4	2.5	4.5	0.0	86.8	88.1	91.5	1014.5	1015.0	1018.0	0.0	0.0	0.0
7	6.1	2.7	1.4	330.3	338.5	280.2	1.9	1.9	1.7	0.0	2.5	4.0	54.6	83.2	88.2	1019.9	1018.5	1017.5	0.0	0.0	0.0
8	3.4	3.2	3.1	323.3	323.6	293.7	2.2	1.9	1.0	0.5	1.0	0.0	86.0	87.3	86.8	1023.1	1022.5	1022.7	0.0	0.0	0.0
9	3.2	2.5	1.6	312.0	310.2	325.2	1.2	2.3	2.3	0.0	1.0	3.0	74.3	81.5	86.8	1020.7	1019.8	1019.2	0.0	0.0	0.0
10	0.5	0.0	-1.0	240.5	325.8	287.6	2.5	1.1	0.7	0.0	4.0	1.0	86.9	59.6	91.8	1022.2	1022.2	1022.8	0.0	3.2	2.7
11	3.0	2.5	1.7	228.2	339.6	328.6	4.1	3.7	3.6	0.0	0.0	0.0	85.0	83.6	83.0	1013.4	1014.6	1017.0	0.0	0.0	0.0
12	8.2	7.2	7.0	332.9	331.8	358.6	2.3	3.8	3.8	0.0	1.0	4.0	80.2	85.2	78.8	1014.6	1014.1	1015.6	0.0	0.0	0.0
13	5.2	3.1	1.0	323.7	316.4	310.7	1.4	3.6	1.8	0.3	8.6	0.0	99.0	99.0	99.0	1006.1	1003.9	1007.6	0.0	0.0	0.0
14	0.6	0.5	0.3	312.9	311.4	199.9	1.4	2.0	1.2	9.0	5.7	0.1	99.0	99.0	93.2	1020.9	1020.1	1020.2	6.0	6.0	0.5
15	8.9	5.6	4.0	246.2	318.2	303.0	1.9	4.7	3.9	6.5	4.1	0.0	99.0	89.5	89.5	1005.7	1007.3	1010.4	0.0	0.0	0.0
LP	3.6	3.1	2.6	297.4	299.5	301.2	2.6	3.0	2.5	15.0	18.2	9.1	81.1	82.4	85.7	1019.0	1018.5	1019.4	6.5	11.4	3.3
LC	5.5	3.1	2.1	276.5	319.5	294.2	1.9	2.9	2.0	16.7	24.2	9.5	88.1	92.1	92.6	1012.3	1013.3	1015.2	3.0	5.5	5.3

영향을 준다고 보고하였다. 따라서 겨울철 영동지역 강설 시 영동지역으로 북동풍이 불 때 한기 축적이 발생하기 유리한 조건임을 유추할 수 있다. 지상의 온도 분석에서 영동지역 10년(2010~2019)간 겨울철(1, 2, 12월)의 평균기온은 1.6°C 이었으나, 특히하게도 한기 축적이 발생했을 때 북강릉의 평균온도는 3.1°C로 오히려 평균 기온보다 높았다. 이는 시베리아고기압이 한반도와 중국의 화중·화남 지방으로 확장하였을 때 한반도에 북서기류가 지배적이며 기온이 낮는데 (KMA, 2019), 이러한 중관 상황에서는 태백산맥 서쪽에서 영동지역으로 넘어오는 바람이 우세하여 한기 축적이 발생하지 않는다. 요약하면, 시베리아 고기압이 연해주 쪽으로 확장하고 상대적으로 남쪽(한반도)으로 확장하지 못하였을 때, 한반도는 상대적으로 온

도가 높고 저기압 통과 혹은 기압골의 영향을 받기 유리한 중관장이 형성된다. 이때 발생하는 북동풍으로 강설 및 한기 축적이 발생한다.

한기 축적 발생에 따른 지상기상요소의 변화를 분석하고자, 북강릉 지상관측자료를 한기 축적 발생 전, 발생 시간, 발생 후로 나눠 비교하였다. 태양복사(낮과 밤)로 변화하는 온도의 일변화 추세의 영향을 최소화하기 위해 현상 YCAD 발생 전후 3시간 평균 값을 분석하였다. 온도는 한기 축적 전 평균 4.4°C에서 한기 축적 발생 시 3.1°C로 1.3°C 하강한 뒤 사례 종료 후 2.4°C로 낮아졌다(Table 3). 한기 축적 발생 후에도 온도가 낮아지는 경향이 나타났지만 온도 감소(0.9°C)는 작았다. 이는 한기 축적의 원인 북동풍을 유발하는 저기압 혹은 기압골이 한반도를 통과한 뒤 차



**Fig. 3.** Vertical profiles of temperature, wind speed, and wind direction observed during YCAD cases with synoptic pattern of low crossing (LC). Blue color denotes the before YCAD, orange color means the YCAD period, and yellow color indicates the after YCAD. The black dot line is top height of YCAD.

가운 고기압이 다시 한반도로 확장하면서 지상온도에 영향을 준 결과로 판단된다. 예로 지상해면기압의 변화 추세를 보면 1016.3 hPa에서 1016.4 hPa이던 기압이 사례 종료 후 1017.7 hPa로 상대적으로 큰 증가(1.3 hPa)를 보였다. 풍속과 습도의 경우 한기 축적이 시작되면서 각각  $2.3 \text{ m s}^{-1}$ 에서  $2.9 \text{ m s}^{-1}$ , 83.9%에서 86.3%로 증가하였다. 한편 선별된 한기 축적 사례 중 강우·설이 관측된 사례는 13사례(86.7%)로 앞서 언급한 대로 영동지역 강수 발생과 한기 축적이 동시에 발생할 수 있음을 나타낸다. 한기 축적 시 강설은 평균 3.2 cm에서 4.2 cm로 증가하고 강우의 경우 평균 4.0 mm에서 3.3 mm로 감소하는 경향을 보였다. 한편, LC형의 경우 LP형에 비해 한기 축적 발생 전 지상의 온도가 높지만( $5.5^\circ\text{C}$ ) 한기 축적 발생 시 큰 폭으로 감소( $3.1^\circ\text{C}$ )하였다. 풍속 역시 한기 축적 전 LC형에서 낮지( $1.9 \text{ m s}^{-1}$ )만 한기 축적이 발생하는 시간에 증가( $2.9 \text{ m s}^{-1}$ )하였다.

### 3.2 영동 한기 축적(Yeongdong Cold Air Damming; YCAD)의 연직 규모

온도 및 바람의 연직 프로파일 분석을 통해 영동 한기 축적의 연직 규모를 파악하고자 하였다. 이를 위해 영동지역(속초, 북강릉, 강릉원주대학교)에서 비양된 레윈존데 자료가 활용하였다. 레윈존데는 시간이 지남에 따라 비양 지점에서 멀어져 시공간 일치성이 떨어지게 되는데, 지상관측 자료와의 시공간 불일치 문제를 보완하고자 다양한 연구자들이 관측기준을 제시하였다(Eom and Suh, 2010; Jung et al., 2015). 본 연구에서는 Eom and Suh (2010)이 제시한 기준을 적용해 한기 축적 발생 2시간 전부터 발생 1시간 후까지 비양된 관측자료를 한기 축적 사례의 대기로 판단하였다. 속초와 북강릉에서는 일 2회(0000, 1200 UTC) 레윈존데를 비양하였고, 한기 축적으로 선별된 15사례 중 7사례(case 1, 3, 8, 9, 10, 13, 15)가 강릉원주대학교에서 수행중인 영동강설 집중관측캠페인 사례

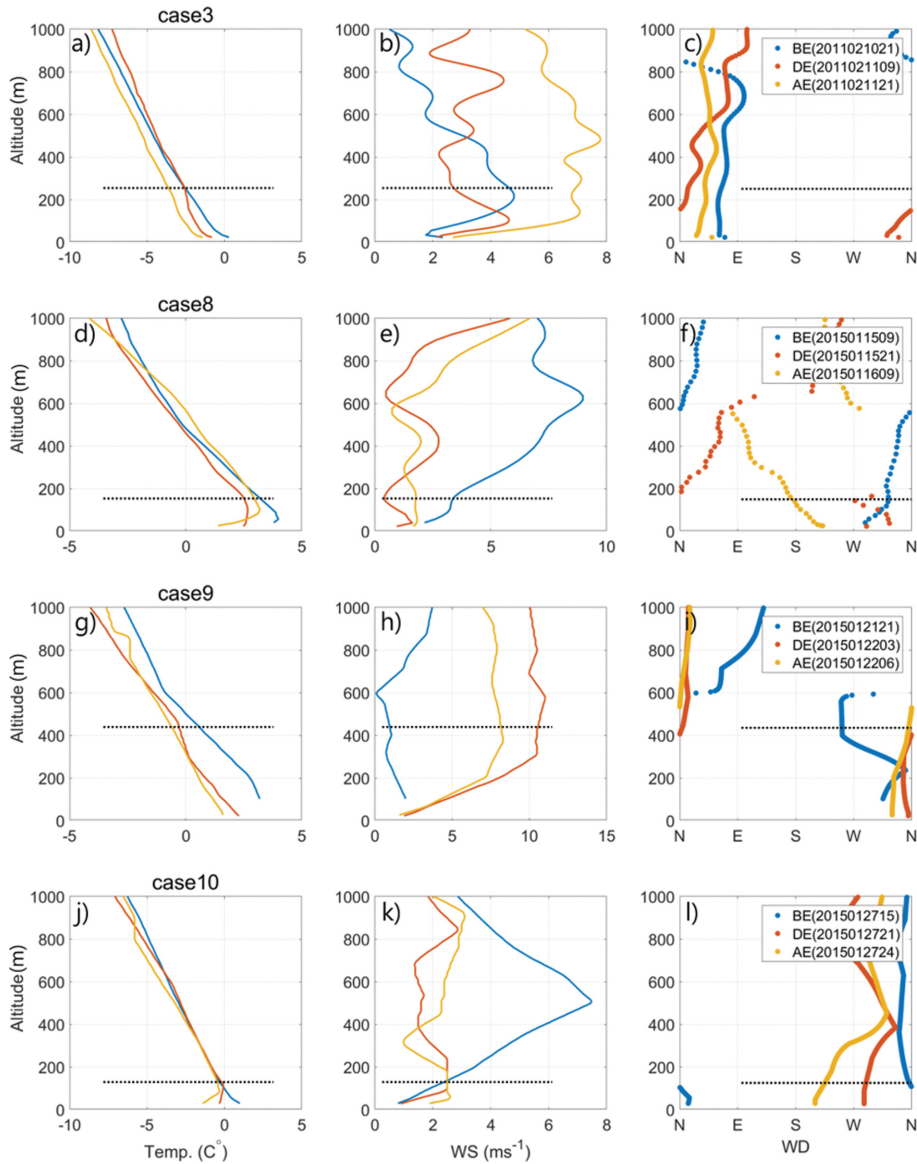
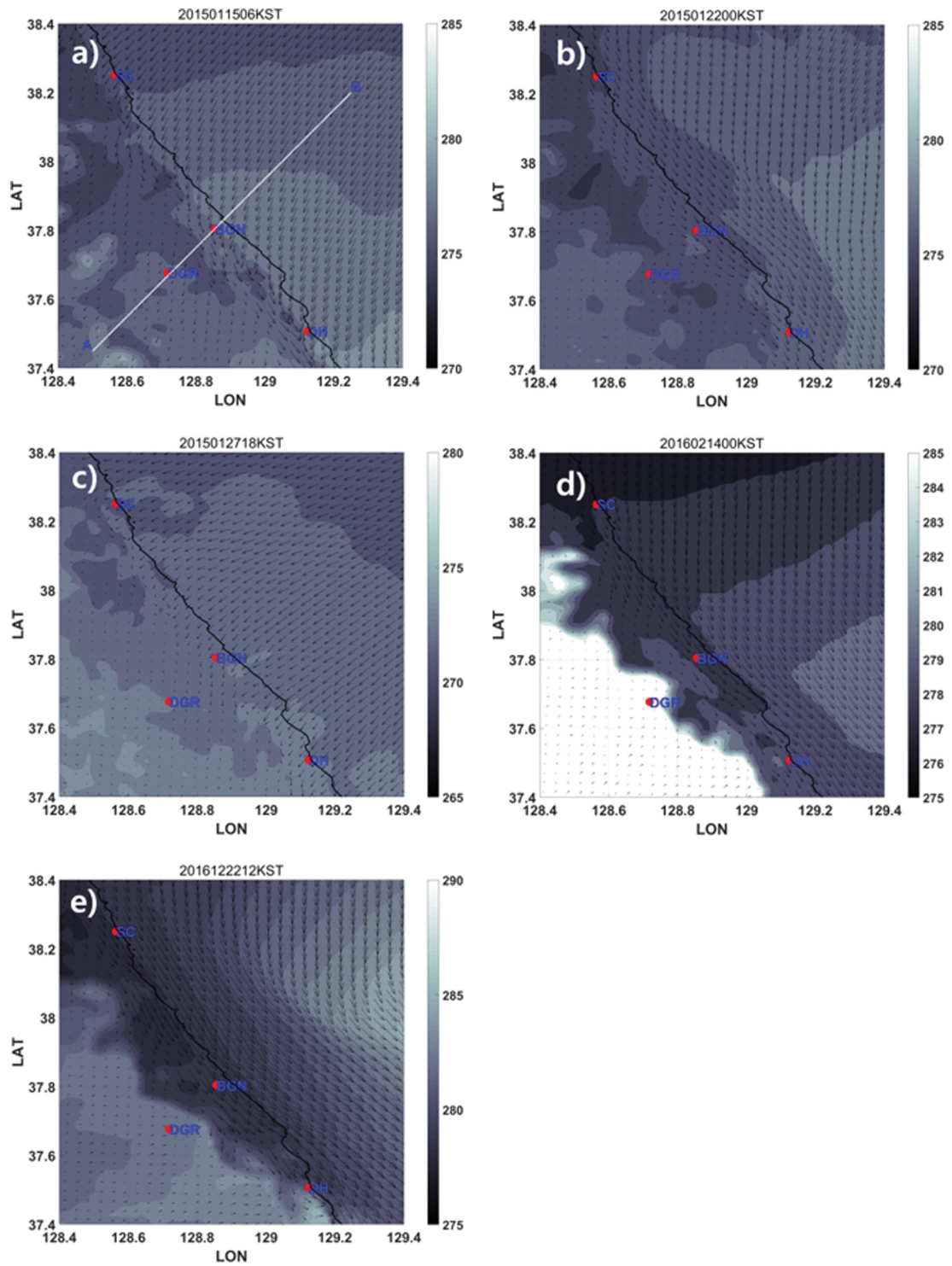


Fig. 4. Same as the Fig. 3 with synoptic pattern of low passing (LP).

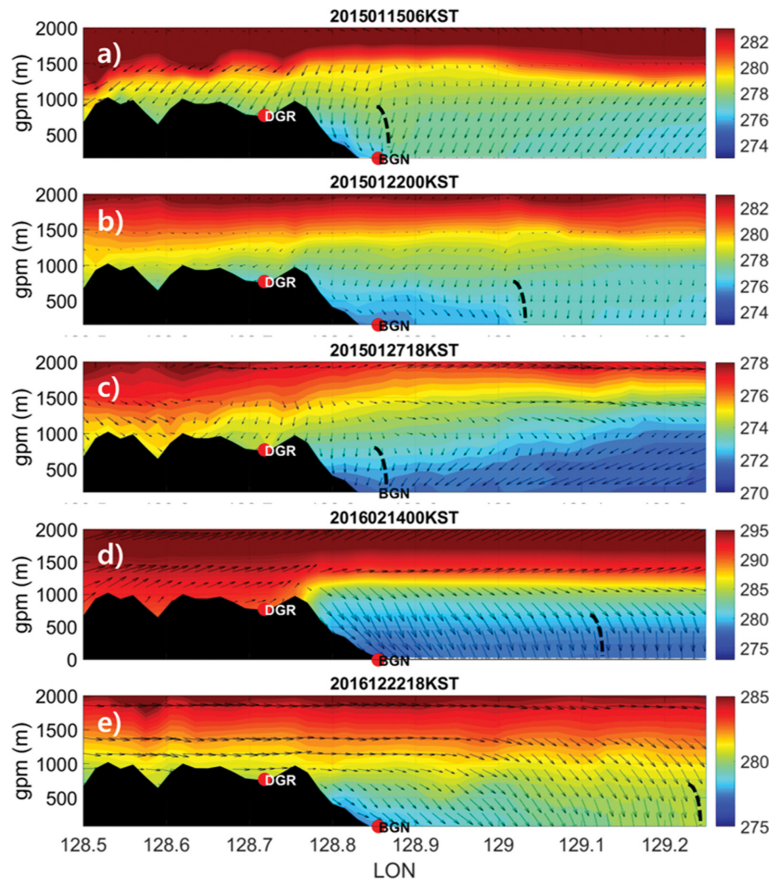
와 일치하여 3 시간 간격의 레윈존데 자료를 확보할 수 있었다. Figures 3, 4는 한기 축적 전(Before Event; BE)과 후(After Event; AE), 그리고 발생 시(During Event; DE)의 LC 형과 LP 형의 온도, 풍속, 풍향의 연직 프로파일이며, 온도와 풍향(북서)의 연직프로파일을 참고하여 한기 축적이 일어나는 고도를 추정하였다(검정 점선). LC 형인 case 1, 13, 15의 경우 각각 약 900 m, 1000 m, 1100 m 이하 고도에서 한기 축적이 발생하였으며, 이때 사례에서 모두 강한 역전층이 존재하고 북서풍이 강했다. 또한, case 1과 case 15

의 경우 약 400 m 고도에서 약한 한기 축적이 나타났다. case 1, 13의 경우(Figs. 3a, d) 한기 축적이 종료된 후에도 기온이 감소하였는데, 이때 바람은 남동풍 내지 남서풍이 나타나고 태백산맥 고도 보다 높은 1000 m 이상 고도에서 강한 역전층이 존재하였다. 그리고 동시에 400 m 이하의 고도에서는 약한 온도 감소와 북서풍이 나타났다. 하지만, 한기 축적은 산사면에 평행한 바람이 특징적으로 나타나는 경향이 있기 때문에 1100 m 고도의 한기층은 지표 ~400 m 고도에 발생하는 한기층과 분리되는 메커니즘으로 판단된다.



**Fig. 5.** Distribution of potential temperature (color shading) and wind field (vectors) during Yeongdong cold air damming (YCAD) events. The white line in (a) denotes vertical cross section line of Fig. 6. The red dots indicate the location of observation sites (Sokcho, SC; Bukgangneung, BGN; Donghae, DH; Deagwallyeng, DGR).





**Fig. 6.** Vertical cross section over the Yeongdong region during YCAD. The color shading and vectors denotes potential temperature and wind field, respectively. The dashed line is the point where the northeasterly turns to the northwesterly.

LP 형의 경우 LC 형에서 나타났던 강한 기온역전층과 강한 북서풍은 뚜렷하게 나타나지 않았다. 하지만 case 3, 8, 9, 10의 경우 지표에서 각각 250 m, 180 m, 450 m, 120 m 고도까지 한기 축적 전 보다 약한 기온 감소를 보였다(Figs. 4a, d, g, and j). LC 형과 유사하게 북서풍의 유입고도와 온도감소고도가 일치하는 경향이 나타났다. 요약하면 LC 형(저기압 관통)의 경우 영동 산맥 보다 높은 고도(1000 m 이상)에서 온도가 감소하였으며 400 m 이하 고도에서 온도가 다시 감소하였다. 산맥보다 높은 고도에서 기온의 감소는 중관 강제력으로 인한 기온감소(저기압 후면에서 한기 이류)와 국지적인 한기 축적이 함께 관측된 결과로 판단된다. 또한 LP 형(기압골 영향)의 경우 국지적인 한기 축적 현상이 지상에서 연직 120 m~450 m 고도까지 나타났다.

### 3.3 수치예보모델 분석장을 이용한 분석

본 연구에서는 수평 1.5 km 해상도와 연직 40 km까

지 70개층으로 구성되어, 3시간 간격으로 예측을 수행하는 기상청 현업 국지예보모델(LDAPS)의 분석장을 활용하여 영동 한기 축적의 수평 규모를 분석하였다(Table 2). LDAPS는 2011년 7월 1일 0000 UTC 시험운행을 시작으로 2012년 5월 15일 0000 UTC부터 현업운영이 시작되었다. LDAPS 분석장은 관측자료가 부족한 해양 및 산악에서 기상요소들의 물리과정변화를 연구하는데 활용되고 있다(In et al., 2018; Choi et al., 2020). 본 연구에서도 관측자료가 부족한 동해상의 온도 및 바람자료를 분석하기 위해 LDAPS의 분석장을 사용하였다. LDAPS의 관측자료 데이터베이스 및 관측자료 전처리 과정에서 모델에 입력되는 관측자료는 AWS, 레이더, 고층, 항공기, 지상, 위성관측자료이다(Choi et al., 2020). 본 절에서는 레인존데로 분석된 7사례(case 1, 3, 8, 9, 10, 13, 15) 중 LDAPS 자료가 존재하는 case 8, 9, 10, 13, 15 사례를 분석하였다. Figure 5는 영동 한기 축적이 발생한 시간 LDAPS로 모의된 975 hPa 등압면의 온위 분포와 바람장이다.

975 hPa 등압면 자료를 분석에 사용한 이유는 상대적으로 따뜻한 동해가 대기에 미치는 영향을 최대한 제거하는 동시에 지형으로 바람이 전향되는 경향을 분석할 수 있는 고도로 판단했기 때문이다. Figures 6a-c는 LP 형(case 8, 9, 10)의 사례이며 Figs. 6d, e는 LC 형(case 13, 15)사례이다. 모든 사례에서 동해상의 북~동풍( $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ )이 영동지역으로 접근하면서 저위도 방향으로 전향되거나, 산맥에 평행하게 북서계열 바람이 강해지는 특징이 나타난다. Figure 6은 북강릉과 대관령 관측소를 포함하여 태백산맥과 수직한 대기연직 단면도(Fig. 5a의 A-B 실선)를 나타낸 것이다. case 8, 10 (Figs. 6a, c)에서 바람의 전향은 E128.87°에서 부근에서 시작되었으며, 이는 대관령 관측지점에서 직선거리로 약 20 km 떨어진 지점이다. case 8 (Fig. 6b)의 경우 대관령에서 약 43 km 떨어진 지점에서 바람의 전향과 동쪽 산사면에 온위가 낮은 공기(찬 공기)의 축적이 시작되었다. LC 형(Figs. 6d, e)에서 바람의 전향은 LP 형 보다 대관령에서 멀리 떨어진 52.2 km와 71.5 km로 나타났다. 지상 바람은 LC 형(case 13, 15;  $3.6\text{ m s}^{-1}$ ,  $4.7\text{ m s}^{-1}$ )이 LP 형(case 8, 9, 10;  $1.9\text{ m s}^{-1}$ ,  $2.3\text{ m s}^{-1}$ ,  $1.1\text{ m s}^{-1}$ )에 비해 상대적으로 높았다. 이때 모든 사례에서 산사면에 한기가 축적되는 것(낮은 온위)을 확인할 수 있으며 바람의 전향과 온위가 낮아지는 위치가 유사한 경향을 보였다. 요약하면 LP 형은 대관령에서 50 km 내(20.0 km~43.0 km)에서 바람의 전향과 한기의 축적(낮은 온위)이 나타났으며, LC 형의 경우 50 km 보다 먼 52.2 km, 71.5 km 까지 한기가 축적되는 특징을 보였다. 이때 지상의 온도는 LP 형이 낮았으며, 풍속은 LC 형이 상대적으로 강한 특징을 보인다.

#### 4. 요약 및 토의

본 연구에서 영동지역의 AWS 지상관측(속초, 강릉, 동해, 대관령) 자료와 수치모델 분석장을 활용하여 영동 지역 한기 축적 사례를 선별하였다. 사례 시 비양된 레원존데와 모의된 수치모델 분석장으로 영동지역 한기 축적의 공간 규모를 정량화하고자 하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 아래와 같다. 영동지역의 한기 축적은 시베리아고기압이 만주를 넘어 연해주로 확장할 때, 저기압과 기압골이 한반도에 영향을 미치기 유리한 종관장이 형성되면서 영동지역에 북동풍이 유입되어 발생한다. 찬 시베리아 고기압이 한반도에 상대적으로 약한 영향을 주고 있어, 한기 축적이 일어날 때 기온( $3.1^{\circ}\text{C}$ )은 겨울철 평균( $1.6^{\circ}\text{C}$ )보다 높았다. 한기 축적이 발생하면서 지상의 온도는 약  $1.3^{\circ}\text{C}$  낮아지고 북서풍이 강해지는 경향을 보였다. LC 형(저기압 관통) 경우 약 700 m~1100 m 고도에서 1차적인 온

도감소를 보인 뒤, 약 400 m 고도에서 한번 더 온도 감소가 존재하였다. 이는 종관 강제력으로 인한 1차 기온감소(저기압 후면에서 한기 이류)와 산사면에 한기가 누적되어 국지적인 한기 축적이 함께 관측된 결과로 사료된다. LP 형(기압골 영향)의 경우 국지적인 한기 축적 현상이 연직 120 m~450 m 규모로 나타났다. 지상에서 온도의 감소는 LC 형이 LP 형 보다 크게 나타났다. 이는 앞서 언급한 대로 LC 형은 저기압 통과에 의한 한기 유입과 국지적으로 산사면에 한기가 누적되는 현상이 동시에 발생한 결과로 사료된다. 수치모델로 파악한 수평규모에서 LC 형과 LP 형의 수평 한기 축적 규모는 각각 52.2 km~71.5 km와 20.0 km~43.0 km로 종관 패턴에 따라 수평 규모를 50 km 내외로 분리할 수 있었다.

본 연구 결과 국외에서 연구된 한기 축적(Cold Air Damming)과 영동지역의 한기 축적은 큰 차이를 보인다. 종관 강제력으로 인해 수백 키로 규모로 발생해 강수의 형태를 변화시키는 국외(Appalachian)의 사례와 달리 영동 한기 축적은 불과 수십 키로(20.0 km~71.5 km) 범위에서 나타났다. 국지적인 현상으로 강설 일부 사례에서 그 특징이 나타났으며 영상의 온도 범위에서 주로 발생하여 강수의 성상 변화(rain to snow)에 기여하기 힘들 것으로 판단된다. 하지만, Lee and Xue (2013)가 언급한 대로 강설 구역에 따라 분류되는 해안형 강설과 산악형 강설에 한기 축적 현상이 주요한 메커니즘이기 때문에 이를 과학적으로 이해하는 것은 중요하다. 본 연구에서 분석 사례가 제한적이기 때문에 연구 결과를 일반화하는 것에는 무리가 있다고 판단된다. 그러나 영동 지역 한기 축적 현상을 선별하는 방법론과 사례별 수평·연직 규모를 제시한 것은 향후 영동 한기 축적 분석 시 도움이 될 것으로 판단된다. 향후, 국지적 현상인 영동 한기 축적을 분석할 수 있는 고해상도의 관측망 구성이 필요하다.

#### 감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「재해기상 감시·분석·예측기술 개발 및 활용연구」(KMA2018-00223)의 지원으로 수행되었습니다.

#### 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: Appalachian cold-air

- damming. *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 137-161.
- Choi, D.-Y., Y.-J. Hwang, and Y.-H. Lee, 2020: Observing sensitivity experiment based on convective scale model for upper-air observation data on GISANG 1 (KMA research vessel) in summer 2018. *Atmosphere*, **30**, 17-30, doi:10.14191/Atmos.2020.30.1.017 (in Korean with English abstract).
- 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.
- Eom, H.-S., and M.-S. Suh, 2010: Analysis of stability indexes for lightning by using upper air observation data over South Korea. *Atmosphere*, **20**, 467-482 (in Korean with English abstract).
- Forbes, G. S., D. W. Thomson, and R. A. Anthes, 1987: Synoptic and mesoscale aspects of an Appalachian ice storm associated with cold-air damming. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 564-591.
- In, S.-R., H.-G. Nam, J.-H. Lee, C.-G. Park, J.-K. Shim, B.-J. Kim, 2018: Verification of planetary boundary layer Height for local data assimilation and prediction system (LDAPS) using the winter season intensive observation data during ICE-POP 2018. *Atmosphere*, **28**, 369-382, doi:10.14191/Atmos.2018.28.4.369 (in Korean with English abstract).
- Jhun, J.-G., D.-K. Lee, and H.-A. Lee, 1994: A study on the heavy snowfalls occurred in South Korea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **30**, 97-117 (in Korean).
- Jung, S.-P., S.-R. In, H.-W. Kim, J.-K. Sim, S.-O. Han, and B.-C. Choi, 2015: Classification of atmospheric vertical environment associated with heavy rainfall using long-term radiosonde observational data, 1997~2013. *Atmosphere*, **25**, 611-622, doi:10.14191/Atmos.2015.25.4.611 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.-M., S.-R. In, J.-H. Lee, C.-G. Park, and B.-J. Kim, 2019: Characteristics of meteorological elements change associated with heavy snowfall in the Yeongdong area, Gangwon Province in the past five years. *J. Climate Change Res.*, **10**, 227-236, doi:10.15531/KSCCR.2019.10.3.227 (in Korean with English abstract).
- KMA, 2015: A study of development convergent cloud band over the East Sea in winter and its effect on the snowfall over the Yeongdong region. Korea Meteorological Administration, TRKO201500013461, 45-52 (in Korean).
- \_\_\_\_\_, 2019: Winter forecast guidance (Why? How!). Korea Meteorological Administration, 75-79 (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).
- Lee, J. G., 2001: A numerical simulation of a heavy snowfall event occurred along the Yeongdong coastal area. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **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.
- Rackley, J. A., and J. A. Knox, 2016: A climatology of southern Appalachian cold-air damming. *Wea. Forecasting*, **31**, 419-432, doi:10.1175/WAF-D-15-0049.1.
- Srock, A. F., and L. F. Bosart, 2009: Heavy precipitation associated with southern Appalachian cold-air damming and Carolina coastal Frontogenesis in advance of weak landfalling tropical storm Marco (1990). *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 2448-2470, doi:10.1175/2009MWR2819.1.
- Stark, D., B. A. Colle, and S. E. Yuter, 2013: Observed microphysical evolution for two east coast winter storms and the associated snow bands. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 2037-2057, doi:10.1175/MWR-D-12-00276.1.
- Thériault, J. M., R. E. Stewart, and W. Henson, 2010: On the dependence of winter precipitation types on temperature, precipitation rate, and associated features. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **49**, 1429-1442, doi:10.1175/2010JAMC2321.1.
- Zerr, R. J., 1997: Freezing rain: an observational and theoretical study. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **36**, 1647-1661.