

2016년 1월 폭설을 동반한 제주도 한파의 원인 재고찰

한광희¹⁾ · 구호영¹⁾ · 배호준^{1),2)} · 김백민^{1)*}

¹⁾부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학 전공, ²⁾극지연구소 대기연구본부

(접수일: 2022년 6월 7일, 수정일: 2022년 8월 5일, 게재확정일: 2022년 8월 27일)

Revisit the Cause of the Cold Surge in Jeju Island Accompanied by Heavy Snow in January 2016

Kwang-Hee Han¹⁾, Ho-Young Ku¹⁾, Hyo-Jun Bae^{1),2)}, and Baek-Min Kim^{1)*}

¹⁾*Division of Earth Environmental System Science Major of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan, Korea*

²⁾*Division of Atmospheric Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon, Korea*

(Manuscript received 7 June 2022; revised 5 August 2022; accepted 27 August 2022)

Abstract In Jeju, on January 23, 2016, a cold surge accompanied by heavy snowfall with the most significant amount of 12 cm was the highest record in 32 years. During this period, the temperature of 850 hPa in January was the lowest in 2016. Notably, in 2016, the average surface temperature of January on the Polar cap was the highest since 1991, and 500 hPa geopotential height also showed the highest value. With this condition, the polar vortex in the northern hemisphere meandered and expanded into the subtropics regionally, covering the Korean Peninsula with very high potential vorticity up to 7 Potential Vorticity Unit. As a result, the strong cold advection, mostly driven by a northerly wind, around the Korean Peninsula occurred at over 2σ . Previous studies have not addressed this extreme synoptic condition linked to polar vortex expansion due to the unprecedented Arctic warming. We suggest that the occurrence of a strong Ural blocking event after the abrupt warming of the Barents/Karas seas is a major cause of unusually strong cold advection. With a specified mesoscale model simulation with SST (Sea Surface Temperature), we also show that the warmer SST condition near the Korean Peninsula contributed to the heavy snowfall event on Jeju Island.

Keywords: Cold surge, Blocking, WRF, Extreme weather, Heavy snow

1. 서 론

2015/16겨울은 북극 고온현상(Kim et al., 2017)과 엘니뇨 현상이 동시에 발생하여 중위도 지역으로 이상기상이 나타나는 양상을 보였다(Jeong et al., 2016). 2016년 1월 23일 18 KST 강원도 영동 산악지역을 제외한 한반도 전역으로 한파특보가 발효되고 서해안과

제주도는 대설특보가 추가로 발효되었다. 32년 만에 가장 많은 양의 눈이 내린 제주 관측소는 23일 하루 중 눈이 가장 두껍게 쌓인 깊이인 일최심신적설이 12 cm가 기록되었고 한라산은 100 cm가 넘는 적설이 기록되었다. 또한, 23~25일 폭설로 인해 제주공항이 폐쇄되어 9만여 명의 체류객이 발생하였고, 약 20억 원에 달하는 시설물 피해가 발생하였다(연합뉴스, 2016). 한반도 최남단에 위치한 섬인 제주도는 겨울철에도 상대적으로 따뜻하며 제주도 연안지역은 강설이 드문 기상현상이다(Lee and Jeon, 2014). 그러나 본 사례에서는 이례적인 한파와 폭설이 발생하였다. 2016년 1월 제주도 한파 패턴은 한반도 남부지역까지 한파가

*Corresponding Author: Baek-Min Kim, Division of Earth Environmental System Science Major of Environmental Atmospheric Sciences, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Korea.
Phone: +82-51-629-6641, Fax: +82-51-629-6638
E-mail: baekmin@pknu.ac.kr

발생하는 패턴으로 분류되며(Sung and Kim, 2020), 블로킹(blocking)에 의해 시베리아 고기압이 강화되어 발생한다(Zhang et al., 1997; Takaya and Nakamura, 2005; Park et al., 2014; Park et al., 2015). 서해안 및 제주도에 대설이 발생하는 경우 주로 서해안형 대설 패턴으로 분류되며, 대륙고기압의 확장과 서해상에서 호수 효과(Lake effect)로 대설이 발생한다(Cheong et al., 2006). 호수 효과에 의한 강설량은 해기차에 크게 의존한다(Peace and Sykes, 1966; Holroyd, 1971; Hjelmfelt, 1990; Kristovich and Laird, 1998). 본 연구 사례와 관련된 선행연구로는 2016년 1월 차가운 대륙고기압의 확장에 따른 제주도 폭설 발생 과정을 열역학과 수문학적으로 분석한 연구(Yeo and Ha, 2017)와 2016년 1월 대설 사례에서 서해를 육지로 변화시킨 모델 실험으로 서해 및 호수 효과가 강설에 미치는 영향을 정리한 연구(Lee and Min, 2018)가 진행되었다. 2016년 1월 북극지역 및 유라시아 지역의 기압계 특징을 분석한 연구로는 Kim et al. (2017)에서 2015년 말 강력한 폭풍 Frank의 북극권 유입 이후 바렌츠-카라해의 급격한 온난화 현상과 상층 고기압의 발달에 따른 유라시아 대륙의 강한 블로킹 및 극한기상 발생을 시사하였다. Overland and Wang (2016)은 2016년 1월 북극지역의 급격한 온난화 이후 극소용돌이(Polar Vortex)의 분할이 중위도 지역 기상에 기여함을 보였다. 또한, 2016년 1월 초 평년보다 약 1°C가량 높았던 서해의 해수면온도(Sea Surface temperature, SST)는 호수 효과로 인한 강설량 증가의 원인으로 지목되었다(Jeong et al., 2016; Yeo and Ha, 2017). 본 연구에서는 Yeo and Ha (2017)에서 분석하였던 대륙고기압 확장에 따른 한기 이류와 호수 효과로 강설이 발생하는 메커니즘을 기반으로 하되 국지적인 분석에 국한하지 않고, Kim et al. (2017)에서 시사하였던 2016년 1월 북극지역의 기상학적 특이성을 조사하고 고위도 기온 및 기압계 변화가 중위도 기압계에 미치는 영향을 포함하는 중관 규모 분석을 진행하였다. 추가로 2016년 1월 23~24일 제주도의 폭설 발생 과정에 평년보다 높았던 해수면온도가 미치는 영향을 보기 위해 2016년 1월 한반도 주변 해수면온도를 조사하였으며, 중규모 모델 실험을 실시하였다. 모델 실험은 동일한 대기조건 하에 해수면온도 차이에 따라 모의되는 적설을 비교 분석하는 민감도 실험으로 진행하였다.

2. 자료 및 분석 방법

2.1 연구 자료

제주도 기상분석에는 한국기상청(Korea Meteorological Administration, KMA) 제주 관측소(지점번호 184)의 중관 기상관측 장비(Automatic Synoptic Observation

System, ASOS)로 관측된 기상관측 값과 적설계의 적설관측 값을 활용하였다. 적설 분석에는 제주 관측소를 포함하여 기상청의 성산 관측소(지점번호 187), 고산 관측소(지점번호 185), 서귀포 관측소(지점번호 189) 관측 값과 제주시에서 관리하는 윗세오름 관측 값을 활용하였다. 2016년 1월 Polar cap 지역(65°N 이상)의 기후학적 특이성과, 유라시아 대륙의 기압계 및 한파 분석에는 유럽중기 예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)의 고해상도 재분석 자료(ECMWF Reanalysis v5, ERA5)의 지오폠펜설(Geopotential), 동서방향 바람 성분(U velocity), 남북방향 바람 성분(V velocity), 기온(Temperature), 해수면온도를 사용하였으며, 극소용돌이 분석에는 ECMWF의 ERA-interim 재분석 자료의 잠재와도(Potential vorticity)를 사용하였다. 본 연구의 평년값은 1991년부터 2020년의 30년 평균값으로 정의하였다. 해수면온도 분석에는 국립해양조사원(Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, KHOA)에서 관측한 해양 관측 자료와 ERA5 재분석 자료의 해수면온도를 활용하였으며, 해류 분석에는 전지구 해양 재분석 자료(HYbrid Coordinate Ocean Model, HYCOM)를 사용하였다.

2.2 분석 방법

Kim et al. (2017)은 2015년 말 폭풍의 북극권 유입 이후 바렌츠-카라해의 급격한 온난화 현상과 상층 고기압의 발달이 중위도 지역 악기상에 영향을 미치는 것으로 시사하였다. 본 연구에서는 2016년 1월 Polar cap 지역의 고온현상과 상층 기압계의 특이성을 분석하기 위해 ERA5 재분석 자료를 활용하여 1991년부터 2021년의 1월 평균 지상 기온 아노말리(anomaly)와 평균 500 hPa 지위고도 아노말리를 생산하였다. 또한 북극지역의 이상기상현상이 중위도 지역 기상에 미치는 영향을 보기 위해 330 K 등온위면의 극소용돌이를 분석하였다. 2016년 1월 유라시아 대륙 기압계의 변화 경향 분석에는 5일 단위로 평균한 500 hPa 지위고도 아노말리와 지상의 해면기압(Mean Sea Level Pressure, MSLP) 아노말리 합성 자료를 활용하였다. 블로킹 분석에는 Kim and Kim (2019)에서 소개된 남북방향 지위고도 경도로 블로킹을 탐지하는 LAR 탐지 기법(Large-scale reversal method; Masato et al., 2013)을 적용하여 2016년 1월 북반구 상공의 블로킹을 탐지하였다. 유라시아 대륙 기압계 변화와 중위도 지역 한파의 연관성을 보기 위하여 5일 단위로 평균한 대기 하층(850 hPa)의 남북방향 온도 이류를 분석하였다. 2016년 1월 한반도 주변의 해수면 특징 분석에는 ERA5 해수면온도를 영역 평균한 일별 아노말리 시계열과 HYCOM 해양 재분석 자료로 계산된 2016

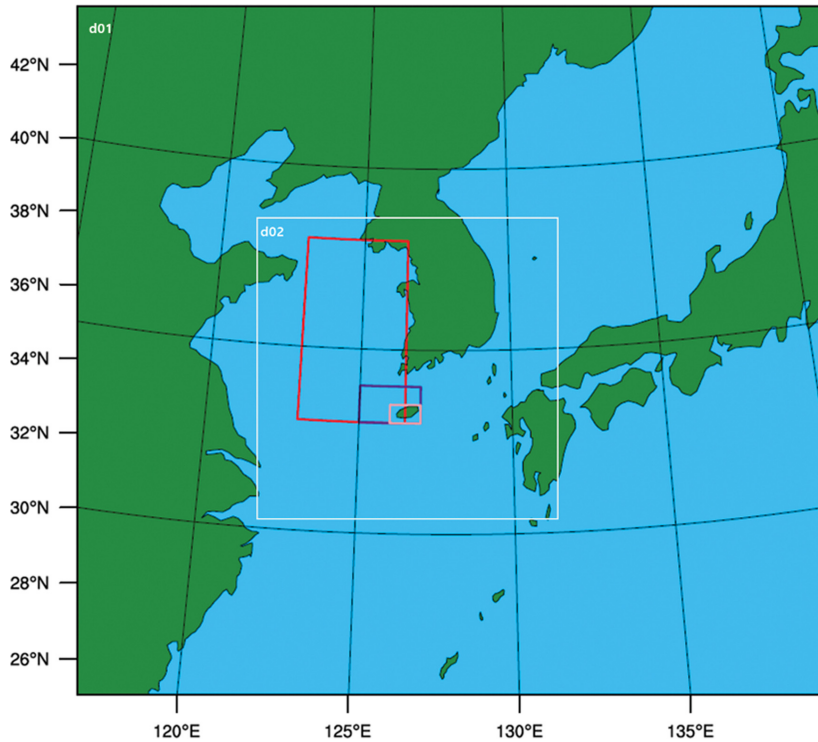


Fig. 1. Model domain for WRF used in the present experiment (d01, d02), and areas used for analysis. The red box is the West Sea of Korea (123-126.5°E, 33-38°N), the purple box is around Jeju (125-127°E, 33-34°N), and the pink box is Jeju (126-127°E, 33-33.5°N).

년 1월 한반도 주변의 평균 해류 및 해수면온도 아노말리를 활용하였다. Figure 1은 본 연구의 분석 및 모델 실험 영역이다. 분석에 활용된 영역은 Fig. 1에서 붉은색 영역인 서해(123-126.5°E, 33-38°N), 분홍색 영역인 제주도(126-127°E, 33-33.5°N) 및 보라색 영역인 제주도 부근(125-127°E, 33-34°N)이다.

2.3 모델실험

본 연구에서는 해수면 온도가 적설량에 미치는 영

향을 분석하기 위해 중규모 모델을 활용하여 민감도 실험을 진행하였다. 연구에서 사용된 모델은 미국 국립대기과학 연구소(National Center for Atmospheric Research, NCAR)의 수치예보모델(The Weather Research and Forecasting, WRF; Skamarock et al., 2019)이다. 모델의 수치 모의 영역은 9 km * 9 km 격자로 설정된 한반도를 포함한 동아시아 영역 1 (Domain1)과 3 km * 3 km 격자로 설정된 남한 및 서해상을 포함하는 영역 2 (Domain2)로 설정하였다(Fig. 1). 실험에

Table 1. Model settings for WRF used in the present experiment.

Configuration	Domain1	Domain2
Horizontal resolution	9 km	3 km
Domain size	250 × 230	301 × 301
Planetary boundary layer physics	Yonsei University (YSU) PBL scheme (Hong et al., 2006)	
Microphysics	WRF Single-Moment 6-class Microphysics (WSM6) scheme (Hong and Lim, 2006)	
Longwave physics	Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) scheme (Mlawer et al., 1997)	
Shortwave physics	Dudhia scheme (Dudhia, 1989)	
Cumulus parameterization	Kain-Fritsch (new-eta) scheme (Kain, 2004)	Not used

사용되었던 WRF 모델의 모수화 기법은 적은 모수화 (cumulus physics)를 제외하고는 Domain1과 Domain2가 동일한 기법을 사용하였다. 행성경계층(Planetary boundary layer physics)의 경우 Yonsei University (YSU) PBL scheme (Hong et al., 2006), 미세물리 과정(Micro physics)의 경우 WRF Single-Moment 6-class Microphysics (WSM6) scheme (Hong and Lim, 2006), 장파복사(Longwave physics)는 Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) scheme (Mlawer et al., 1997), 단파복사(Shortwave physics)는 Dudhia scheme (Dudhia, 1989)이다. 적은 모수화의 경우 Domain1에서만 Kain-Fritsch (new-eta) scheme (Kain, 2004)를 사용하였다

(Table 1). 이는 Domain2에서 발생하는 과모의를 방지하기 위한 것으로 모델 수행 과정에 5 km보다 작은 규모의 격자는 모수화를 사용하지 않고 대류 모의가 가능하다고 연구되었다(Lee and Lee, 2011).

3. 결과 및 분석

3.1 한파 분석

3.1.1 고위도 기압계 분석

Jeong et al. (2016)과 Kim et al. (2017)에서 2016년 1월 한반도 이상기후의 원인으로 북극 고온현상을 지목하였다. 북극지역 고온현상의 원인은 2015년 12월

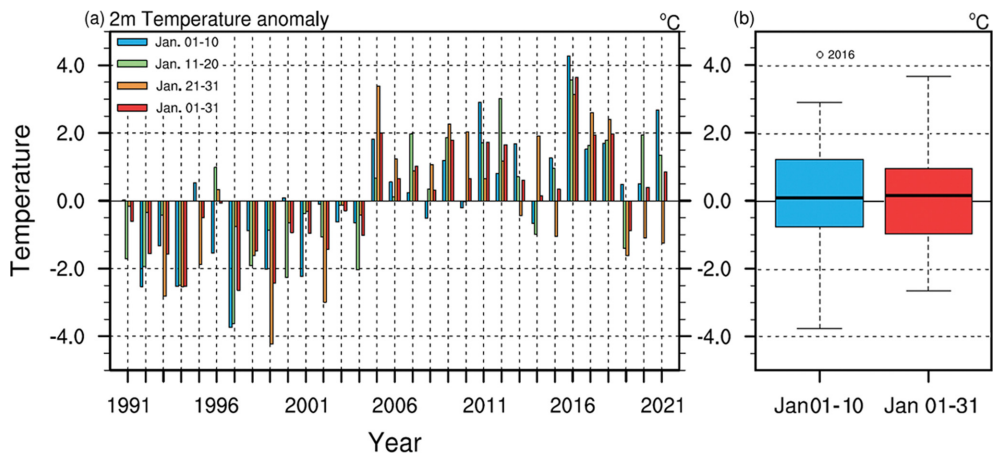


Fig. 2. (a) Polar cap (north of 65°N) 2 m temperature anomalies in January from 1991 to 2021. In the color bar, blue is the average from Jan 1st to 10th, green is the average from Jan 11th to 20th, yellow is the average from Jan 21st to 31st, and red is the average from Jan 1st to 31st. (b) 2 m Temperature anomaly boxplot from 1991 to 2021, blue is the average from Jan 1st to 10th, and red is the average from Jan 1st to 31st.

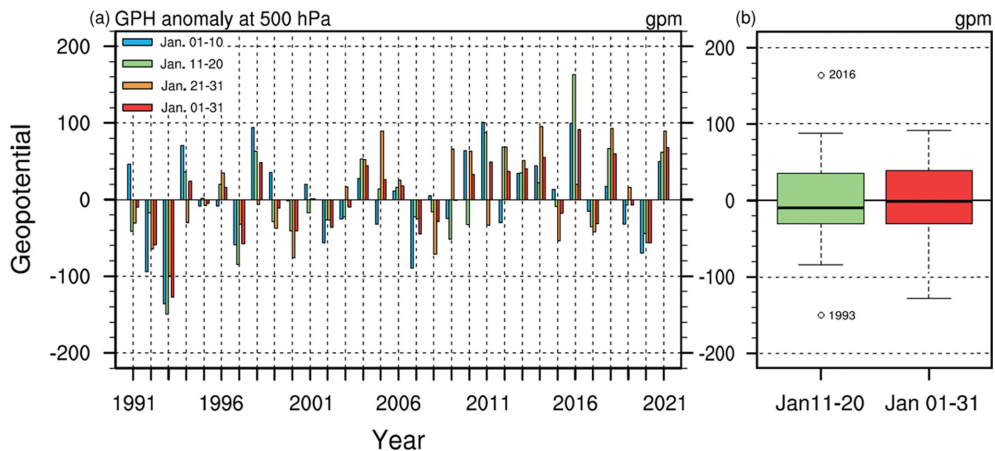


Fig. 3. Same as in Fig. 2 but for 500 hPa geopotential height anomalies and (b) green is the average from Jan 11th to 20th.

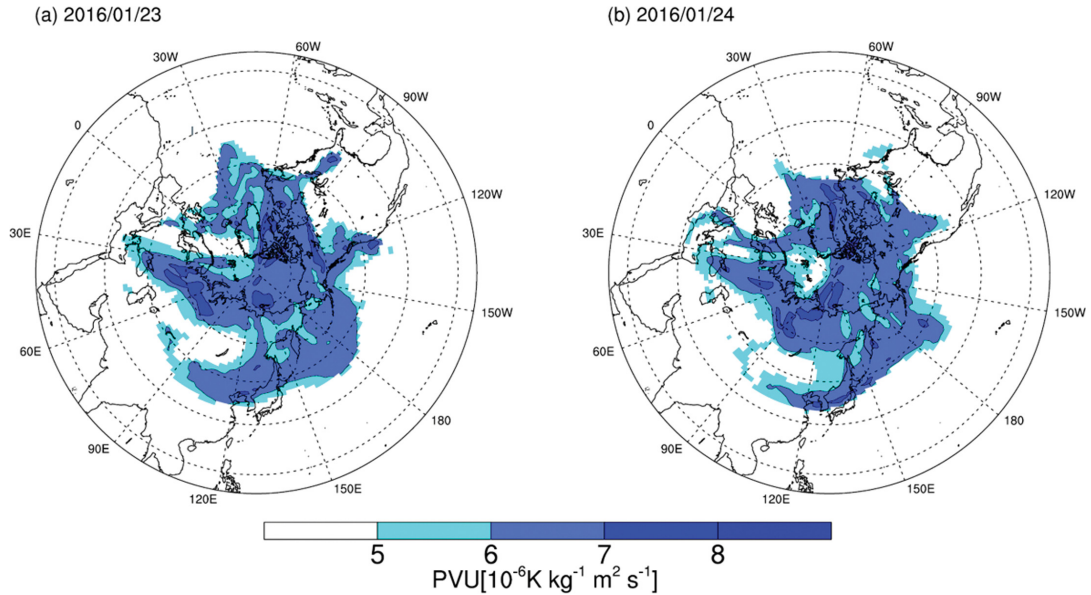


Fig. 4. Polar vortex map prepared using PVU (potential vorticity unit) of 330 K isentropic surface. (a) Jan 23rd, 2016, (b) Jan 24th, 2016. shading when the PVU value was above 5.

말 폭풍 Frank의 북극권 유입으로 분석하였으며, 이후 Polar cap 지역의 상층 고기압과 블로킹 발달에 따른 동아시아 한파의 발생을 시사하였다(Kim et al., 2017). Figure 2는 Polar cap 지역의 1991~2021년 사이의 1월 평균기온 아노말리를 나타낸다. 폭풍의 유입 이후 Polar cap 지역의 2016년도 1월 기온은 평년보다 3.6°C 높았으며, 이는 1991~2021년 사이에 1월 평균기온 아노말리가 가장 높게 기록된 값이다. 특히 1월 초에 해당하는 1일에서 10일까지의 평균기온은 평년보다 4.3°C가 높았다(Fig. 2a). Figure 2b에서 1월 전체 평균과 1월 초의 제1사 분위(Q1) 값과 제3사 분위 값(Q3)이 각각 -1°C, +1°C 내외로 분석되고, Q3 + 1.5 IQR (Interquartile range)로 계산된 1월의 최댓값은 3.6°C로 2016년 1월의 평균기온 아노말리 값이다. 평년보다 4.3°C 높았던 2016년 1월 초의 평균기온은 이상치로 분류되어 1월 초 극지역에 이례적인 고온 현상이 발생한 것을 보여준다(Fig. 2b). Figure 3은 Polar cap 지역의 1991년부터 2021년 사이의 1월 500 hPa 지위고도를 나타낸다. 2016년 1월은 평년보다 91 gpm 높은 값으로 관측되었으며, 1월 11일~20일 사이에는 평년보다 163 gpm 높은 값이 관측되었다(Fig. 3a). 지위고도의 1월 전체 평균과 1월 중순의 제1사 분위와 제3사 분위 값(Q3)이 각각 -30 gpm, +40 gpm 내외로 분석되고, 163 gpm 해당하는 2016년의 1월 중순의 값은 이상치로 분류되었다(Fig. 3b). 이는 2016년 1월 중순 극지역의 상층에 이례적으로 고기압성이 강화

게 발달하였던 것을 보여준다. 2016년 polar cap 지역의 기상학적 특징은 Kim et al. (2017)의 분석과 같이 2015년 말 폭풍의 북극권 유입 이후 1월 초 급격한 고온현상이 선행되고, 이후 상층으로 고기압성이 강해지는 형태를 보였다. 극지역의 기온 및 상층 고기압성의 변화는 극소용돌이를 변화시켜 동아시아 지역 기상에 영향을 준다(Woo et al., 2015; Overland and Wang, 2016). Figure 4는 본 연구의 사례일에 해당하는 2016년 1월 23일과 24일의 극소용돌이의 분포이다. 북반구 고위도 지역인 시베리아 지역과, 북미 대륙 고위도, 북유럽 지역 등으로 PVU (Potential vorticity unit; $10^{-6} \text{ K kg}^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) 값이 5 이하로 관측되며, 한반도를 포함한 동아시아 지역으로 5 PVU 이상의 영역이 관측된다. 또한 24일에는 한반도 인근으로 7 PVU가 넘는 영역이 관측되기도 하였다(Fig. 4). Kim et al. (2014)에 따르면 약화된 성층권 극소용돌이 변화는 지상의 음의 북극진동을 유발한다(Baldwin and Dunkerton, 2001; Gerber et al., 2012; Mitchell et al., 2013). 또한 성층권의 잠재와도와 남북방향 대기 순환에 영향을 미쳐 북반구 대륙의 차가운 지상 기온을 야기하였다(Hartley et al., 1998; Thompson et al., 2006). Table 2는 ERA5 재분석 자료를 활용하여 제주도 부근 해상의 1991년부터 2020년 1월 일평균 850 hPa 기온과 해수면온도를 분석한 것이다. 극소용돌이의 사행이 깊었던 2016년 1월 24일과 23일은 극지역의 차가운 공기가 남하하여 일평균 850 hPa 기

Table 2. Ranking of the lowest daily mean temperatures at 850 hPa in January over the sea around Jeju (125-127°E, 33-34°N) from 1991 to 2020.

Rank	Year	Day	T850 (°C)	SST (°C)	SST-T850 (°C)
1	2016	23	-14.55	13.07	27.62
2	2016	24	-14.52	12.84	27.36
3	2001	14	-14.09	13.46	27.55
4	2004	21	-14.09	12.84	26.93
5	2018	24	-14.05	13.46	27.51
6	2011	15	-13.80	13.50	27.30
7	2001	15	-13.77	13.59	27.36
8	2009	23	-13.67	13.48	27.14
9	2011	16	-13.38	13.47	26.85
10	2003	29	-13.30	12.75	26.06

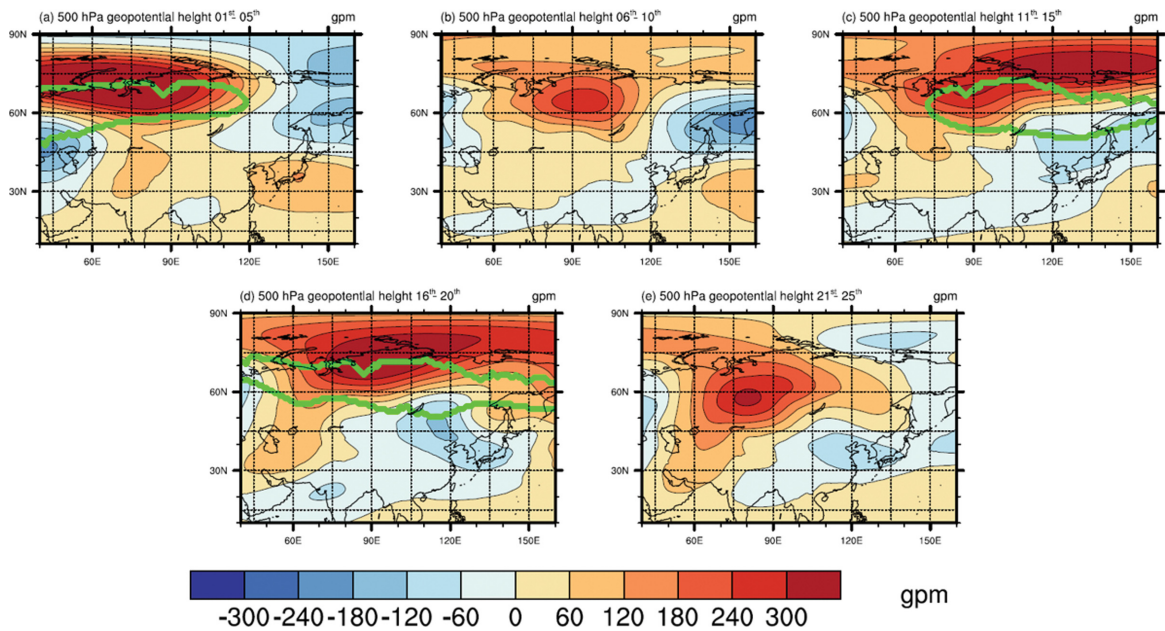


Fig. 5. January 2016, daily mean 500 hPa geopotential height anomaly 5 day composite map, the shading indicates GPH anomaly. The green line indicates the detected blocking line when blocking was most widely distributed during the period. (a) Jan 1st-5th (blocking 3rd), (b) Jan 6th-10th, (c) Jan 11th-15th (blocking 15th), (d) Jan 16th-20th (blocking 16th), (e) Jan 21st-25th.

온이 -14°C 이하로 1991년 이후 가장 낮았던 1, 2위로 기록되었다(Table 2).

3.1.2 기압계 패턴 및 블로킹 분석

Figure 5는 극지역의 고온현상 및 기압계 변화가 유라시아 대륙 기압계에 미치는 영향을 살펴보기 위해 5일 단위로 평균한 2016년 1월 500 hPa의 지위고도 합성 자료이다. 1월 1일에서 5일의 500 hPa 지위고도 합성 자료에서 우랄산맥 주변으로 상층 고기압이 강하게 발달하였고 블로킹 탐지 방법에서 우랄 블로킹

이 탐지되었다. 우랄 블로킹은 1월 3일 동시베리아 지역까지 확장하여 가장 광범위하게 탐지된다(Fig. 5a). 6일에서 10일의 합성 자료에서 우랄 블로킹은 해제되고 고기압의 이동이 발생하여 시베리아 상공에 위치하게 된다(Fig. 5b). Polar cap 지역의 상층 고기압성이 증가하였던 11일에서 15일 사이 동시베리아 고위도 지역으로 고기압성이 강화되며 동시베리아 블로킹이 탐지되었다(Fig. 5c). 동시베리아 블로킹은 16일에서 20일 사이 유라시아 대륙을 동서로 덮을 만큼 넓은 지역으로 확장하였으며, 상층 고기압 중심 또한 동

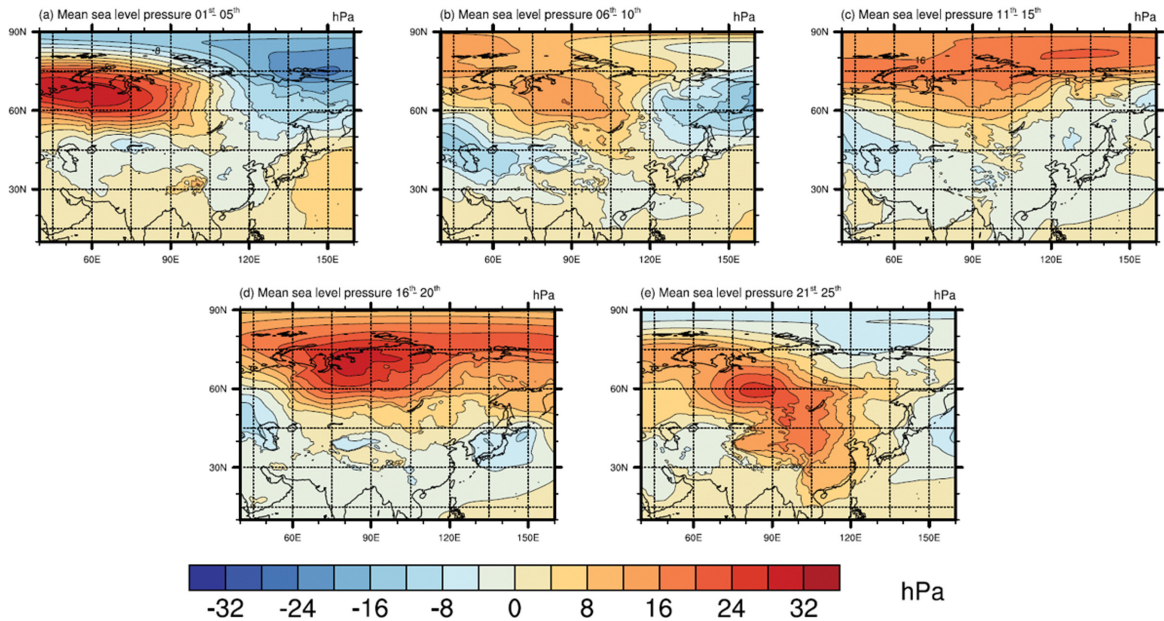


Fig. 6. January 2016, daily mean MSLP 5-day composite map, shading indicates MSLP anomaly. (a) Jan 1st-5th, (b) Jan 6th-10th, (c) Jan 11th-15th, (d) Jan 16th-20th, (e) Jan 21st-25th.

진하지 못하고 역행하는 형태를 보였다(Fig. 5d). 21일 이후 유라시아 대륙 상공의 블로킹은 해제되고 고기압이 고위도에서 중위도 지역으로 남하하여 시베리아 고기압의 발원지에 해당하는 바이칼호 서쪽에 위치하였다(Fig. 5e). Figure 6은 5일 단위로 평균한 2016년 1월 유라시아 대륙 MSLP 합성 자료로 500 hPa 기압계와 유사한 형태를 가진다. 1월 1일에서 5일의 합성 자료에서는 우랄산맥 주변으로 고기압이 위치하며, 북극권과 동시베리아 지역으로는 저기압성이 발달하였다(Fig. 6a), 6일에서 10일의 합성 자료에서는 우랄산맥 부근에 위치하던 고기압은 약화되었으나, 북극권을 포함하여 넓은 지역으로 고기압성 아노말리가 확장하였다(Fig. 6b). 11일에서 20일 사이에는 시베리아와 랩테프해에 걸쳐서 고위도의 넓은 지역으로 고기압이 위치하였다(Figs. 6c, d). 이 기간 동안 대기 상층으로 동시베리아 블로킹이 발달하여 기압계가 정체하였으며, 지상의 고기압성 아노말리는 60°N 이상의 고위도 지역에 주로 위치하였다. 상층의 블로킹이 해제된 이후 정체되었던 고위도 지역의 차갑고 무거운 공기의 이동이 시작된다. 서시베리아 평원에 위치하던 고기압 중심은 남동진 하여 바이칼호 서쪽으로 이동하였으며, 차가운 공기의 유입으로 지상의 시베리아고기압은 강화되었다. 이후 시베리아고기압이 동아시아 전역으로 확장하여 한반도 남단과 중국의 화남지역까지 강한 고기압성이 나타나고, 이례적으로 극심한 한파가 발생하

였다(Fig. 6e). 2015년 말 폭풍의 북극권 유입 이후 유라시아 대륙의 기압계는 고위도 지역의 블로킹과 고기압의 정체로 인해 동서 흐름이 약해졌다. 이는 극소용돌이의 사행을 발달시켜 고위도 지역의 차가운 공기의 남하를 유도하였다. 차가운 공기의 남하는 시베리아고기압을 강화시켜 한반도를 포함한 동아시아 지역 한파 발생의 주요 원인으로 분석된다.

3.1.3 한기 이류

고위도 기압계 변화로 인해 중위도 지역으로 유입되는 차가운 공기의 이동은 한파의 원인이 된다. 이를 분석하기 위해 한기 이류의 주 경로가 되는 대기 하층인 850 hPa의 남북방향 바람 성분(v)과 남북방향 온도 경도($\frac{\partial T}{\partial y}$)를 평년값($\bar{\quad}$)과 아노말리 값($'\quad$)으로 분해하여 바람 아노말리에 의한 남북방향 온도 이류($-v' \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial y}$)를 계산하였다. Figure 7은 2016년 1월 유라시아 지역의 850 hPa의 온도 이류를 나타낸다. Figure 7에서 음의 이류가 발생하는 지역은 평년보다 강했던 북풍 계열의 바람에 의해 고위도에서 중위도 지역으로 한기가 이동한 것을 의미한다. 2016년 1월 유라시아 대륙의 기압계는 고위도 지역으로 고기압이 위치하였고, 1월 초 우랄 블로킹과 1월 중순 동시베리아 블로킹이 탐

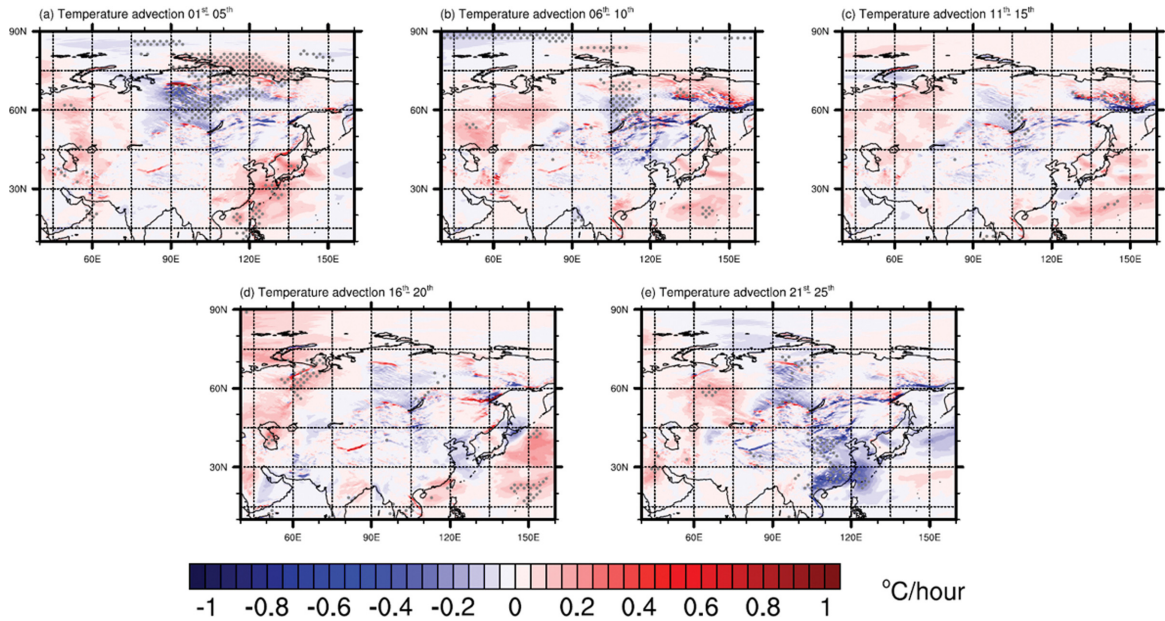


Fig. 7. 850 hPa temperature advection composited at 5-day intervals in January 2016. Blue shading means cold advection, red means warm advection, and gray dots are statistically significant at the 2-sigma. The temperature advection values are calculated and represent the temperature advection caused by the meridional wind. (a) Jan 1st-5th, (b) Jan 6th-10th, (c) Jan 11th-15th, (d) Jan 16th-20th, (e) Jan 21st-25th.

지되었다. 1월 한기 이류는 고위도 기압계 변화에 의존하여 발생하였다. 우랄 블로킹이 발생하였던 1월 1일에서 5일 사이에는 북시베리아와 바이칼호 서쪽으로 한기가 유입되었고, 6일에서 10일 사이에 동아시아 지역으로 전파되었다(Figs. 7a, b). 동시베리아 블로킹이 발생하였던 11일에서 20일 사이에는 바이칼호 서쪽으로 지속적인 한기 유입이 분석되었다. 이는 유라시아 대륙 고위도의 기압계가 정체하는 동안 북풍 계열 바람에 의해 바이칼호 서쪽 부근으로 한기가 축적되는 것으로 분석된다(Figs. 7c, d). 이후 시베리아 고기압이 확장하면서 한반도를 포함한 동아시아 전역으로 강한 한기 이류가 발생하였다. 이는 고위도의 차가운 공기가 중위도 지역으로 이동하는 것으로 1월 초 한기 이류보다 강하며, 깊은 이류를 보였다(Fig. 7e). Figure 8은 온도 이류에 따른 한기 유입을 분석하기 위하여 1월 21일부터 25일 사이의 제주도 부근을 영역 평균한 일평균기온 아노말리의 연직 분포(Vertikal profile of daily mean temperature anomalies)를 작성한 것이다. 시베리아 고기압의 확장 이후 강한 한기 유입은 제주도 부근에서 23일 대기 하층의 기온을 하루 사이 -10°C 넘게 감소시켰으며, 24일까지 이례적인 저온현상을 발생시켰다(Fig. 8). 식(1)은 준지균 지위

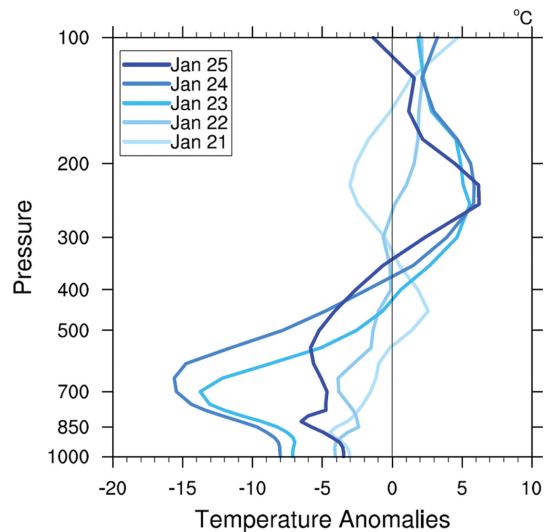


Fig. 8. The vertical profile of daily mean temperature anomalies (1000 hPa to 100 hPa) is around Jeju from 21st to 25th January 2016.

고도 예측 방정식이며 우변의 두 번째 항은 차분 온도 이류 항으로 온도 이류에 따른 상/하층 대기의 수축과 팽창 과정을 포함하여 기압계 변화를 보여준다.

$$\left[\nabla^2 + \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{f_0^2}{\sigma} \frac{\partial}{\partial p} \right) \right] \chi = -f_0 \vec{V}_g \cdot \nabla \left(\frac{1}{f_0} \nabla^2 \Phi + f \right) - \frac{\partial}{\partial p} \left[-\frac{f_0^2}{\sigma} \vec{V}_g \cdot \nabla \left(-\frac{\partial \Phi}{\partial p} \right) \right] \quad (1)$$

방정식에서 χ 는 지오폠펜셜 경향, p 는 기압, \vec{V}_g 는 지균풍, Φ 는 지오폠펜셜, $f = 2\Omega \sin\Phi$ (코리올리매개변수), $f_0 = 2\Omega \sin\Phi_0$, Φ_0 는 위도 45° , σ 는 안정도 매개변수 ($\approx 2.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ Pa}^{-2} \text{ s}^{-2}$)이다. 본 방정식에서 한기 이류에 따른 상층과 지상의 기압계 변화를 추정할 수 있으며, 대기 하층의 한기가 이류 되는 지역을 따라 지상의 기압계는 고기압성이 발달하고 상층에는 저기압성이 발달한다. 본 연구의 사례에서도 850 hPa의 강한 한기 이류에 따라 지상의 고기압이 발달하는 것과 상층의 저기압이 발달하는 것을 보여주었다(Figs. 5e, 6e, and 7e).

3.2 폭설 분석

3.2.1 해수면온도 분석

2016년 1월 23일과 24일은 850 hPa 기온이 낮았던 만큼 해기차 또한 크게 나타났다. 제주도 부근 해상의 해기차는 1991년 이후 첫 번째와 네 번째로 큰 사례에 해당된다(Table 2). 해당 기간 제주 관측소의 일최심신적설은 23일 12 cm, 24일 4 cm가 쌓여 최대 적

설은 12 cm가 관측되었고 호남 서해안으로는 20 cm가 넘는 적설이 발생하였다. 해기차가 두 번째로 컸던 2001년 1월 14일은 하루 뒤인 15일 제주 관측소 기준 11.6 cm의 적설이 기록되었으며, 세 번째로 컸던 2018년 1월 24일 또한 하루 뒤인 25일 제주 관측소 기준 5.2 cm의 적설이 기록되어 극지역의 차가운 공기의 이류와 높은 해기차는 제주도 지역의 대설 발생에 영향을 미치는 것을 보였다. Figure 9는 ERA5 재분석 자료의 SST를 활용하여 생성된 2016년 1월 서해와 제주도 부근을 각각 영역 평균한 일별 해수면온도 아노말리이다. 2016년 1월 서해의 해수면온도 변화 경향은 1월 18일 이전에는 양의 아노말리가 지속되었으며, 1월 18일 이후 음의 아노말리로 변화되어 1월 초에서 중순으로 가면서 하강하는 패턴을 보였다(Fig. 9a). 제주도 부근의 해수면온도 또한 극심한 한파가 발생하였던 2016년 1월 23일~25일을 제외하고는 지속적인 양의 아노말리를 유지하지만 점차 하강하는 패턴을 보였다(Fig. 9b). 23일~25일 사이에는 강한 한기 이류로 인해 해양에서 대기 중으로 많은 열전달이 발생하여 해수면온도가 낮아진 것으로 분석된다. 제주도 부근의 해수면 온도가 서해안의 다른 지역보다 높았던 원인은 Jeong et al. (2016)에서 언급된 엘니뇨로 인한 쿠로시오 고기압의 강화 및 그에 따른

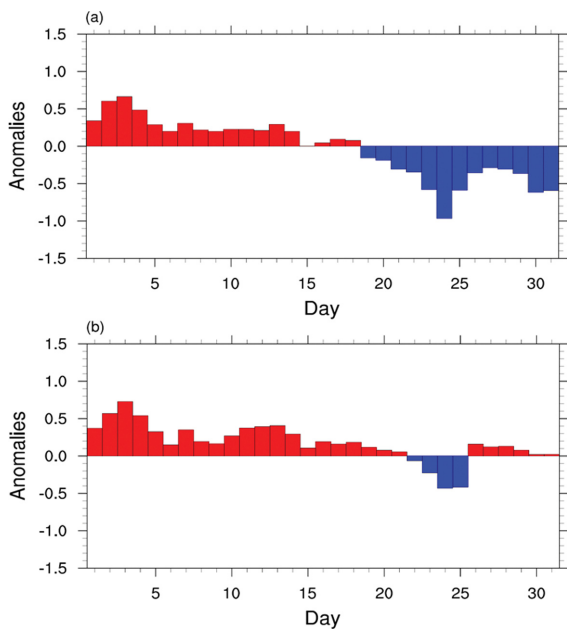


Fig. 9. January 2016 daily time series of sea surface temperature anomalies using the ERA5 SST data at (a) the West Sea of Korea and (b) the sea around Jeju Island.

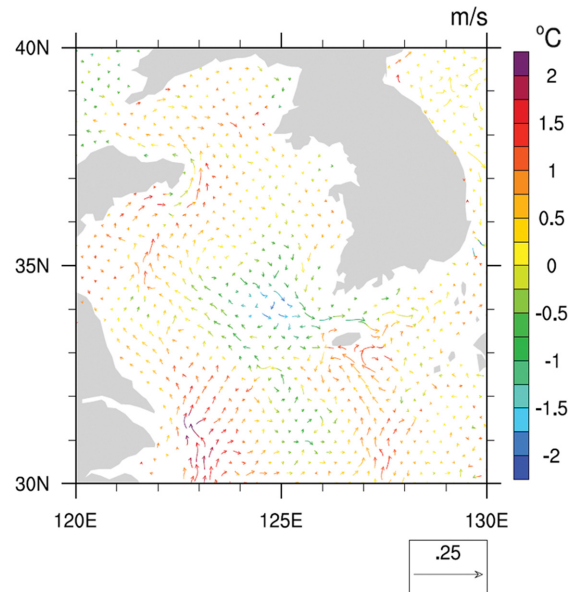


Fig. 10. Average ocean currents and sea surface temperature using HYCOM data around the Korean peninsula in January 2016, the vector is currents anomaly, and the color is sea surface temperature anomaly. The January climatology of SST and currents is based on 1995~2020.

쿠로시오 지역 고온현상의 영향으로 분석된다. Figure 10은 HYCOM 해양 재분석 자료 계산된 한반도 주변의 2016년 1월 평균 해류와 해수면온도 아노말리이다. 쿠로시오 해류에서 이어지는 대마 난류는 평년보다 따뜻하고 빠른 것으로 분석된다. 해당 해류를 따라 평년보다 따뜻한 바닷물이 제주도 남쪽에서 유입되어 제주도 북서해안과 대한 해협으로 흐르고 있다. 쿠로시오 해류로부터 유입되는 난류의 해수면온도를 확인하기 위해 대한민국 최남단인 이어도의 1월 평균 해수면온도 관측 자료를 분석한 결과 2016년 1월 해수면온도는 평균 14°C로 2010년대 들어서 1월 평균 해수면온도 중 가장 높은 것으로 관측되었다.

3.2.2 모델 실험 결과 분석

시베리아고기압 확장에 의한 한기 이류와 쿠로시오 해류의 영향으로 따뜻한 해수면온도가 폭설 발생에 영향을 준다는 가설을 기준으로 중규모 모델 실험을 설계하였다. 모델 실험은 동일하게 설정된 WRF 모델에 해양 입력자료만 변화를 둔 두 개의 실험(CTL, EXP)으로 진행하였다. 모델 실험에 사용된 입력자료는 ERA5 재분석 자료이며, CTL 실험의 입력자료는 2016년 1월 20~26일의 대기장과 2016년 1월 20~26일의 해수면온도를 사용하였고, EXP 실험의 입력자료는 2016년 1월 20~26일의 대기장과 1991~2020년 평균으로 생성된 1월 20~26일의 평년 해수면온도 자료

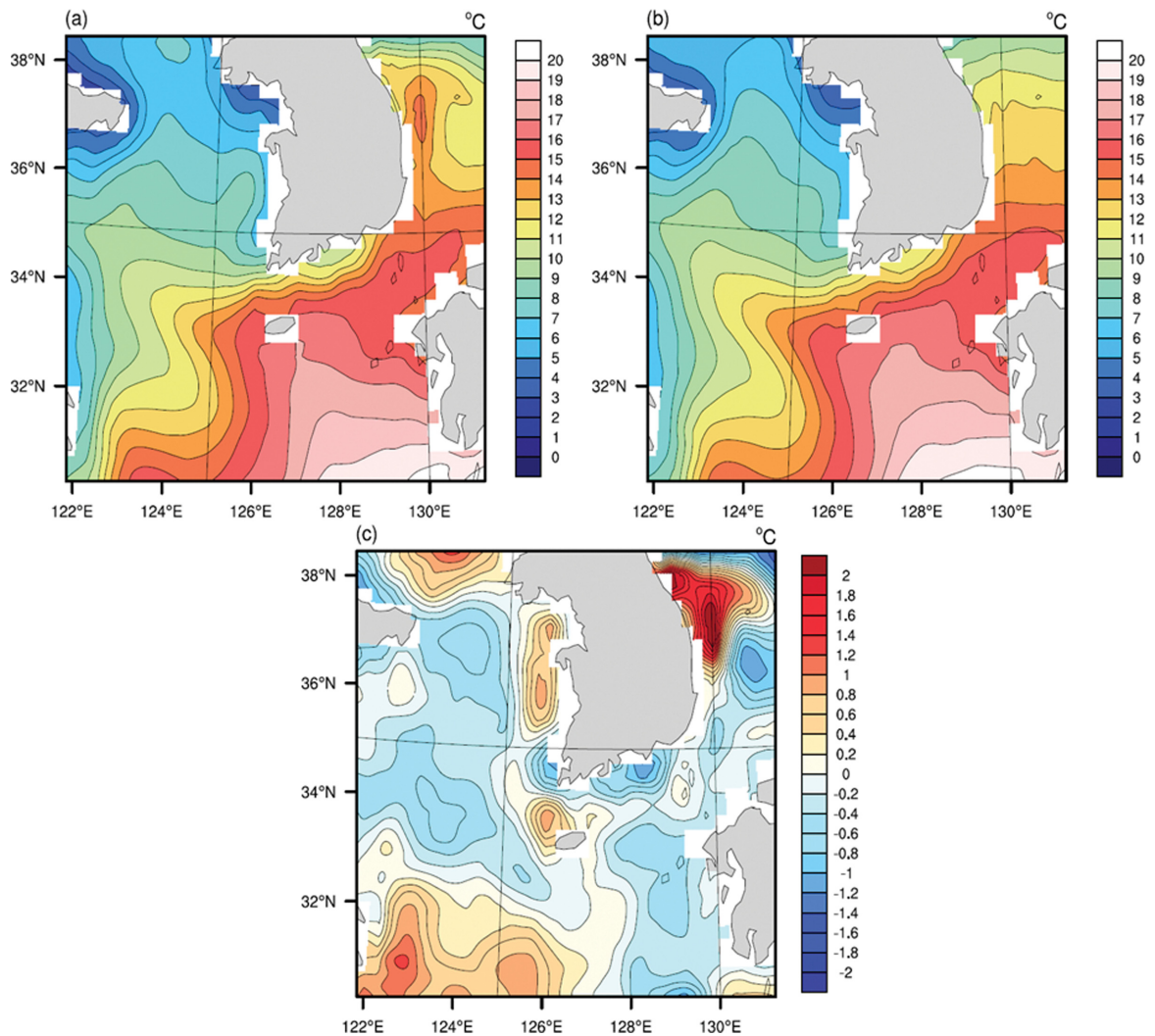


Fig. 11. Sea surface temperature initial input data of WRF model experiment. (a) CTL input data using SST of January 20th, 2016, (b) EXP input data using climate value of January 20th, and (c) shows the difference between CTL and EXP.

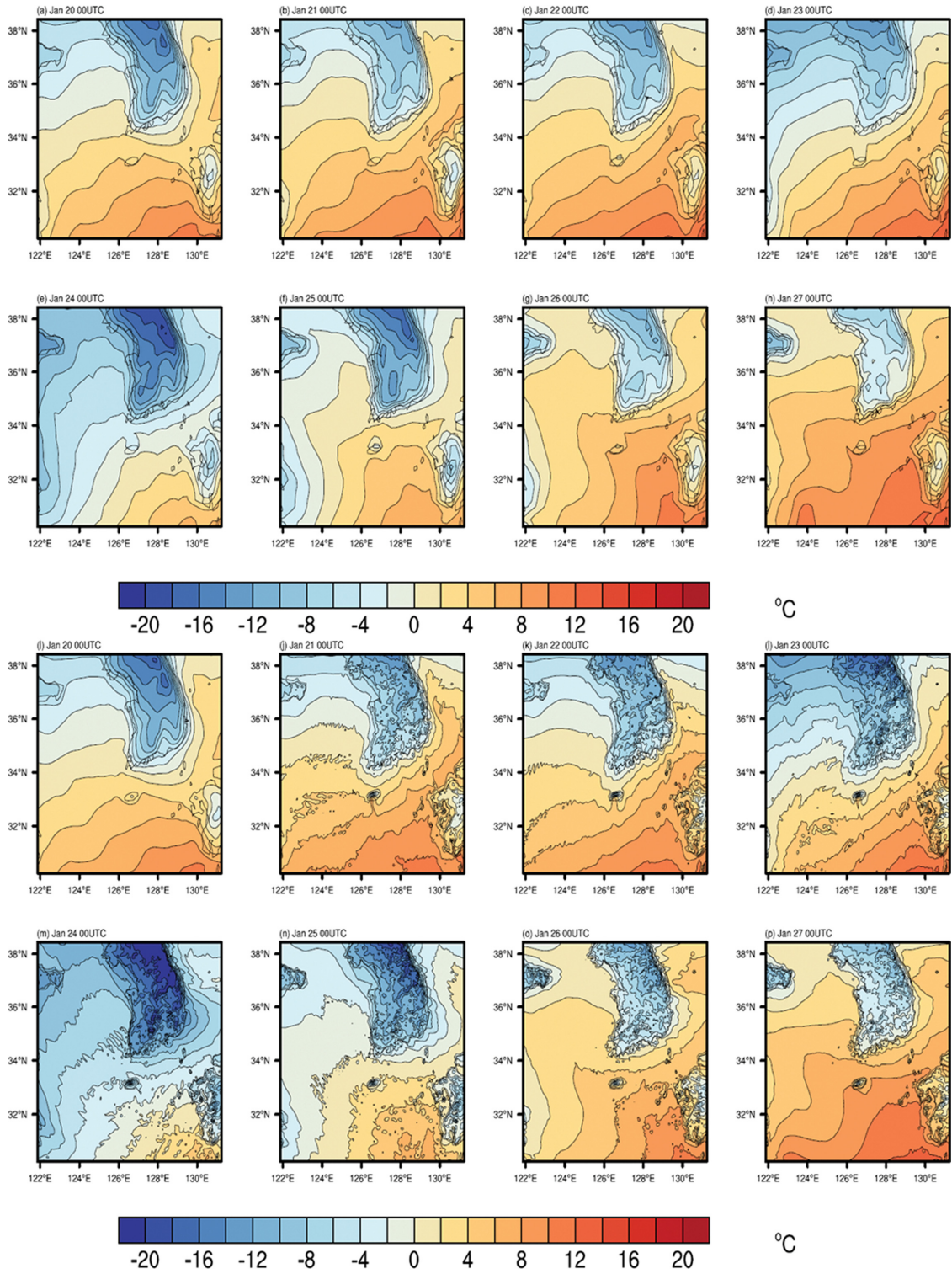


Fig. 12. January 20th to 27th, 2016, daily time series of 2 m temperature each 00 UTC. (a)-(h) are ERA5 data, and (i)-(p) are EXP results.

를 사용하였다. 적분 기간은 2016년 1월 20일 00 UTC 부터 26일 18 UTC까지 진행하였다. Figure 11은 모델 초기장의 해수면온도 입력자료이다. CTL 실험과 EXP 실험의 모델 초기장의 해수면온도(Figs. 11a, b)를 비교하면 쿠로시오 해류가 지나는 영역으로 평년보다 해수면온도가 높은 것이 확인되며, 서해안 및 동해안 지역 일부와 제주도 북서 해상으로 해수면온도의 차이가 크게 나타난다(Fig. 11c). Figure 12는 ERA5 재분석 자료와 CTL 실험의 2 m 기온을 비교한 자료이다. 모델결과와 재분석 자료의 2 m 기온 변화 경향은

유사한 패턴을 보였다. 한기이류가 가장 강했던 24일 부분적으로 1~2°C의 차이가 발생하였으나, 24일에 가장 한기가 강하게 유입되는 것과 이후 대설 발생 메커니즘을 동일하게 보여주었기에 민감도 실험결과를 본 연구의 분석에 활용하였다. 강한 한기 이류와 해수면 온도에 따른 대기의 변화를 보기 위해 한기가 가장 강하게 유입되었던 24일 일평균 잠열속을 분석하였다. 한반도 연안에서 잠열속은 CTL 실험이 EXP 실험보다 강하게 발생하였다. 특히, 2016년 1월 고수온을 유지하였던 제주도 북 서해상은 CTL 실험이

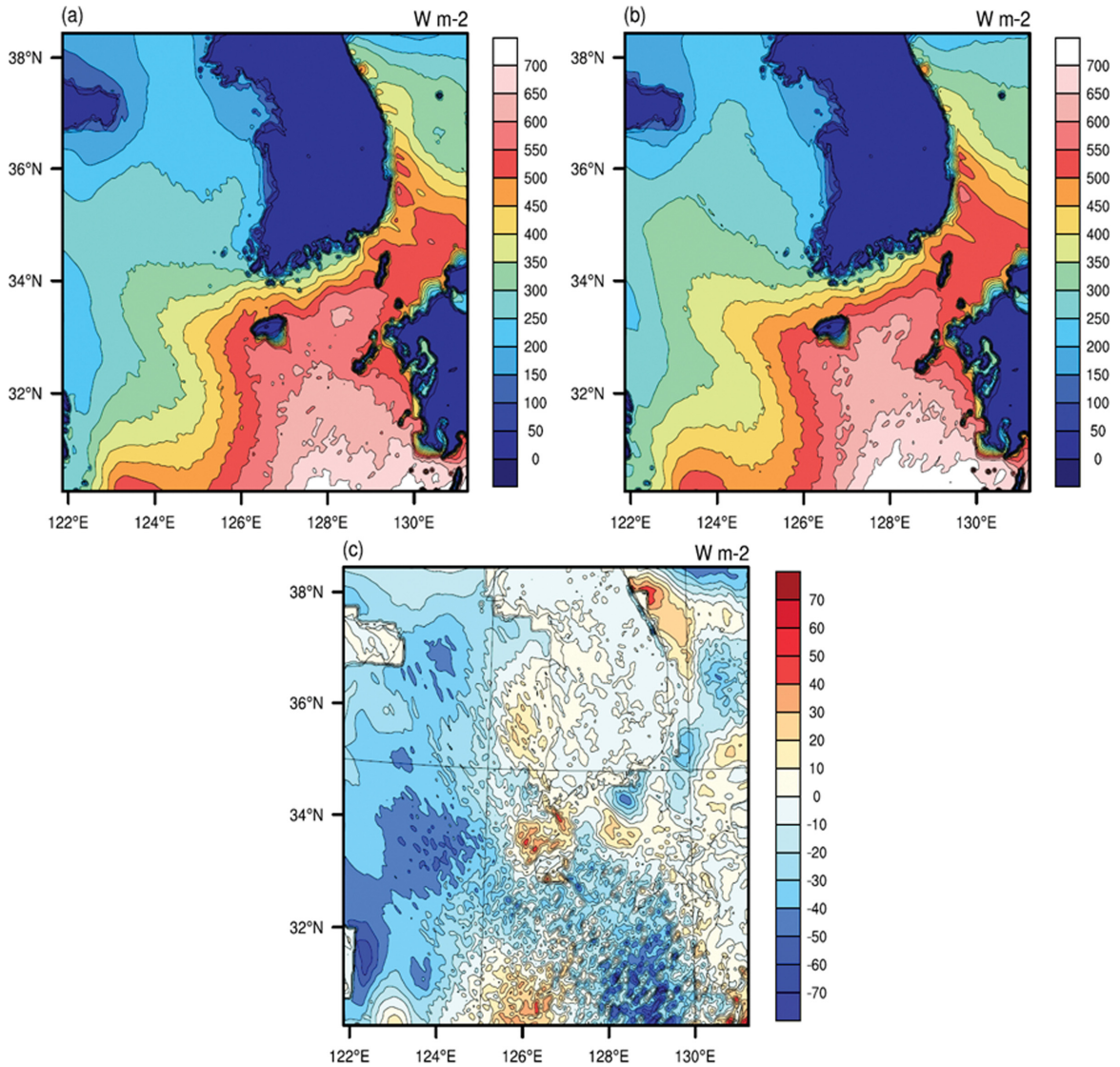


Fig. 13. The latent heat flux from the WRF model output data as of January 24th, 2016. (a) CTL, (b) EXP, (c) difference between CTL and EXP.

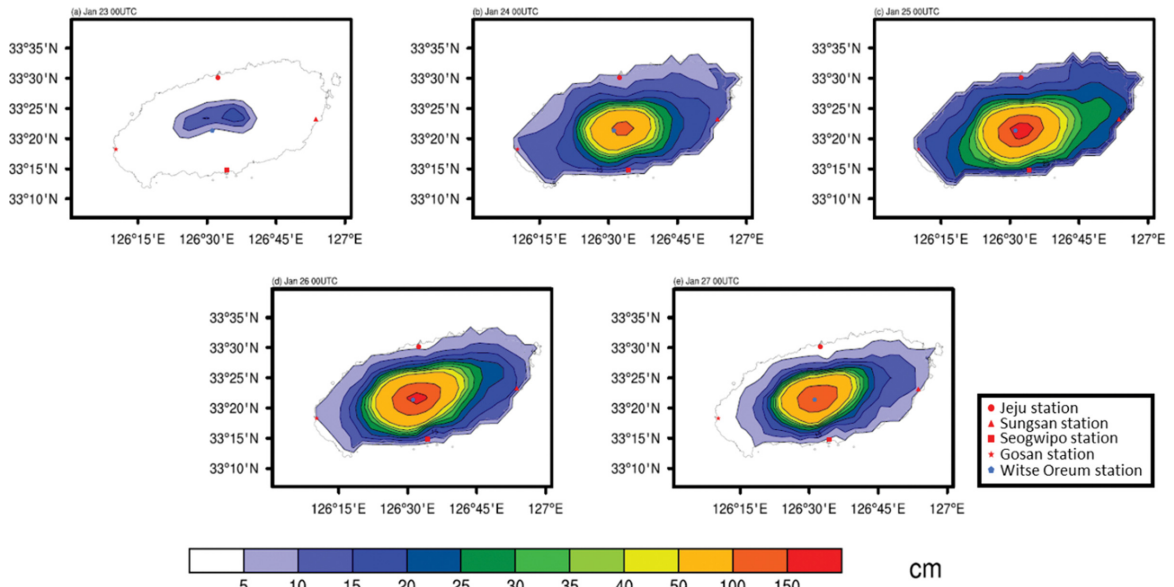


Fig. 14. Snow depth at Jeju in WRF model CTL from January 23rd to 27th, 2016.

EXP 실험보다 10% 정도 많이 발생하였다(Fig. 13). 이는 평년보다 따뜻했던 2016년 1월의 제주도 북서 해상에서 많은 양의 에너지가 방출되는 것을 의미한다. 단시간 방출된 많은 양의 에너지는 대기 하층의 불안정을 야기해 대류활동을 활발하게 하여 강설량 증가의 원인이 된다. 그에 따른 강설량 변화를 보기 위하여 모델의 적설량 자료를 분석하였다. Figure 14는 CTL 실험으로 계산된 제주도의 일별 적설량이다. 모델 결과 제주도 지역의 적설은 연안지역으로 24일과 25일까지 증가하였으며, 이후 감소하는 추세를 보였다. 산악의 경우 23일 이전에 약한 적설이 기록되었으며, 25일까지 적설이 증가하였고, 이후 연안지역보다 느리게 감소하였다. 연안지역에는 해당기간 5~20 cm 사이의 적설이 모의되었고, 산악지역은 지역에 따라 많게는 150 cm가 넘는 적설이 모의되었다. 이를 25일 기준 제주도에서 관측된 적설량과 비교해 보았다. 제주도의 적설량은 제주 관측소 11.5 cm, 성산 관측소 15 cm, 고산관측소 6 cm, 서귀포 관측소 13 cm와 한라산 윗세오름의 관측 값 164 cm(연합뉴스, 2016)로 모델의 적설 분포와 유사한 분포를 보였다. Figure 15는 CTL 실험과 EXP 실험에서 모의된 제주도의 일평균 적설량 변화 경향을 비교한 그래프이다. CTL 실험과 EXP 실험에서 강한 한기 이류가 발생하였던 24일 전후로 적설이 급격히 증가하였다. 제주도 북서 해상의 해수면온도가 상대적으로 더 높아 잠열속이 더 강하게 모의되었던 CTL 실험에서 EXP 실험보다 약 5~10% 많은 적설을 모의하였다(Fig. 15). 2016

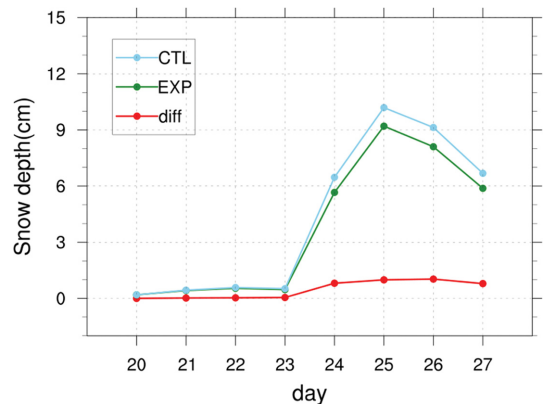


Fig. 15. Graph of snow depth at Jeju in WRF model CTL, EXP, and the difference between CTL and EXP from January 20th-27th, 2016.

년 1월은 극지역에서 시작된 기압계 변화로부터 고위도 지역의 블로킹을 동반한 기압계의 정체 발생하였고, 그 영향으로 극소용돌이의 사행과 남북방향의 흐름이 발달하였다. 그 결과 극지역의 차가운 공기가 중위도 지역으로 이류 되어 이례적으로 강한 한파를 발생시켰다. 차가운 공기의 유입은 호수 효과로 인해 서해안 및 제주도에 폭설을 발생시켰으며, 평년보다 높았던 제주도 북서쪽 해상의 해수면온도는 제주도로 유입되는 차가운 공기에 열을 공급하여 강설량 증가에 영향을 주는 것으로 분석된다.

4. 결 론

본 연구는 2016년 1월 제주도 지역에 발생했던 폭설을 동반한 한파의 발생 과정을 재고찰 하였다. 먼저 2015년 말 강력한 폭풍이 북극권으로 유입되면서 북극 고온현상과 상층 고기압성이 강화되는 것을 분석하였으며, 이후 유라시아 대륙으로 강한 블로킹을 동반한 고기압이 정체하는 것을 확인하였다. 고위도 지역에서 정체되었던 고기압의 이동은 극지역의 차가운 공기를 중위도 지역으로 이동시켰다. 차가운 공기의 남하로 인한 유라시아 대륙의 강한 한기 이류는 시베리아고기압을 강화시켰다. 강화된 시베리아고기압의 확장은 동아시아 지역으로 극심한 한파를 발생시켰다. 또한 본 연구에서는 한기의 유입에 더해 2016년 1월 해수면온도가 강설량에 미치는 영향을 분석하였다. 2016년 1월 한반도 주변 해수의 특징은 1월 상순에서 하순으로 갈수록 서해안의 평균 해수면온도가 감소하는 추세를 보이거나, 쿠로시오 해류에서 이어지는 제주도 북서해상은 평년보다 높은 해수면온도를 유지하였다. 제주 북서지역의 높았던 해수면온도가 적설량 증가에 미치는 영향을 분석하기 위해 해수면온도를 변수로 하여 모델 실험을 진행하였다. 실험 결과 제주도 부근의 해수면온도가 평년보다 높았던 CTL 실험에서 EXP 실험 보다 잠열속이 10%가량 높게 모의되었으며, 적설량 또한 10% 증가함을 보였다. 본 연구의 사례는 2016년 1월 폭설을 동반한 제주도 한파 사례이나, 더 넓은 범위에서는 동아시아 지역에 발생한 한파 사례이다. 한파의 발생 과정은 북극권의 기상 변화로부터 시작하여 유라시아 대륙의 기압계 변화에 따른 동아시아 지역의 한파로 이어졌다. 이러한 극한기상현상은 일반적인 기상현상이나 기상환경을 대변하지는 못하지만 한번 발생하면 인적과 물적으로 큰 피해를 동반한다. 따라서 기후변화로 인한 이상기상현상이 증가하는 가운데 극한기상현상에 대해 선행적인 예보 및 대비를 할 수 있도록 지속적인 연구와 지원이 요구된다.

감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 감사를 드립니다. 이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2020년)에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

- Baldwin, M., and T. Dunkerton, 2001: Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. *Science*, **294**, 581-584.
- Cheong, S.-H., K.-Y. Byun, and T.-Y. Lee, 2006: Classification of snowfalls over the Korean Peninsula based on developing mechanism. *Atmosphere*, **16**, 33-48 (in Korean with English abstract).
- Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a meso-scale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3077-3107.
- Gerber, E. P., and Coauthors, 2012: Assessing and understanding the impact of stratospheric dynamics and variability on the Earth system. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 845-859, doi:10.1175/BAMS-D-11-00145.1.
- Hartley, D. E., J. T. Villarin, R. X. Black, and C. A. Davis, 1998: A new perspective on the dynamical link between the stratosphere and troposphere. *Nature*, **391**, 471-474.
- Hjelmfelt, M. R., 1990: Numerical study of the influence of environmental conditions on lake-effect snowstorms over Lake Michigan. *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 138-150.
- Holroyd III, E. W., 1971: Lake-effect cloud bands as seen from weather satellites. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 1165-1170.
- Hong, S.-Y., and J.-O. J. Lim, 2006: The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **42**, 129-151.
- _____, Y. Noah, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2318-2341.
- Jeon, J.-H., 2016: It seems that the transportation of passengers staying at Jeju Airport will be finished tomorrow... The highest snow of Halla Mountain is 164 cm. January 26, 2016. *YonhapNews* [Available online at <https://www.yna.co.kr/view/AKR20160126019151056>].
- Jeong, J.-H., T.-W. Park, J.-H. Choi, S.-W. Son, K. Song, J.-S. Kug, B.-M. Kim, H. K. Kim, and S.-Y. Yim, 2016: Assessment of climate variability over East Asia-Korea for 2015/16 winter. *Atmosphere*, **26**, 337-345, doi:10.14191/Atmos.2016.26.2.337 (in Korean with English abstract).
- Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **43**, 170-181.
- Kim, B.-M., S.-W. Son, S.-K. Min, J.-H. Jeong, S.-J. Kim, X. Zhang, T. Shim, and J.-H. Yoon, 2014: Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss. *Nat. Commun.*, **5**, 1-8, doi: 10.1038/ncomms5646.
- _____, J.-Y. Hong, S.-Y. Jun, X. Zhang, H. Kwon, S.-J. Kim, J.-H. Kim, S.-W. Kim, and H.-K. Kim, 2017:

- Major cause of unprecedented Arctic warming in January 2016: Critical role of an Atlantic windstorm. *Sci. Rep.*, **7**, 1-9, doi:10.1038/srep40051.
- Kim, S.-H., and B.-M. Kim, 2019: In search of winter blocking in the western North Pacific Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 9271-9280, doi:10.1029/2019GL082753
- Kristovich, D. A., and N. F. Laird, 1998: Observations of widespread lake-effect cloudiness: Influences of lake surface temperature and upwind conditions. *Wea. Forecasting*, **13**, 811-821.
- Lee, J.-B., and D.-K., Lee 2011: Impact of cumulus parameterization schemes with different horizontal grid sizes on prediction of heavy rainfall. *Atmosphere*, **21**, 391-404, doi:10.14191/Atmos.2011.21.4.391 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.-G., and K.-H. Min, 2018: Analysis of the west coast heavy snowfall development mechanism from 23 to 25 January 2016. *Atmosphere*, **28**, 53-67, doi:10.14191/Atmos.2018.28.1.053 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.-J., and G.-Y. Jeon, 2014: Architectural and exterior material features according to the climatic difference in Jeju Houses. *Journal of The Korean Society of Living Environmental System*, **21**, 42-50, doi:10.21086/ksles.2014.02.21.1.42.
- Masato, G., B. J. Hoskins, and T. Woollings, 2013: Winter and summer Northern Hemisphere blocking in CMIP5 models. *J. Climate*, **26**, 7044-7059, doi:10.1175/JCLI-D-12-00466.1.
- Mitchell, D. M., L. J. Gray, J. Anstey, M. P. Baldwin, and A. J. Charlton-Perez, 2013: The influence of stratospheric vortex displacements and splits on surface climate. *J. Climate*, **26**, 2668-2682, doi:10.1175/JCLI-D-12-00030.1.
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **102**, 16663-16682.
- Overland, J. E., and M. Wang, 2016: Recent extreme Arctic temperatures are due to a split polar vortex. *J. Climate*, **29**, 5609-5616, doi:10.1175/JCLI-D-16-0320.1.
- Park, T.-W., C.-H. Ho, and Y. Deng, 2014: A synoptic and dynamical characterization of wave-train and blocking cold surge over East Asia. *Climate Dynamics*, **43**, 753-770, doi:10.1007/s00382-013-1817-6.
- _____, _____, J.-H. Jeong, J.-W. Heo, and Y. Deng, 2015: A new dynamical index for classification of cold surge types over East Asia. *Climate Dynamics*, **45**, 2469-2484, doi:10.1007/s00382-015-2483-7.
- Peace, R. L., and R.B. Sykes, 1966: Mesoscale study of a lake effect snow storm. *Mon. Wea. Rev.*, **94**, 495-507.
- Skamarock, W. C., and Coauthors, 2019: A Description of the Advanced Research WRF Version 4. *NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR*, 145 pp.
- Sung, H.-J., and B.-M. Kim, 2020: Regional characteristics of cold surges over the South Korea. *Atmosphere*, **30**, 249-256, doi:10.14191/Atmos.2020.30.3.249 (in Korean with English abstract).
- Takaya, K., and H. Nakamura, 2005: Geographical dependence of upper-level blocking formation associated with intraseasonal amplification of the Siberian high. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 4441-4449.
- Thompson, D. W. J., J. C. Furtado, and T. G. Shepherd, 2006: On the tropospheric response to anomalous stratospheric wave drag and radiative heating. *J. Atmos. Sci.*, **63**, 2616-2629.
- Woo, S.-H., B.-M. Kim, and J.-S. Kug, 2015: Temperature variation over East Asia during the lifecycle of weak stratospheric polar vortex. *J. Climate*, **28**, 5857-5872.
- Yeo, J.-H., and K.-J. Ha, 2017: A case study on causes and characteristics of the local snowstorm in Jeju Island during 23 January 2016. *Atmosphere*, **27**, 177-188, doi:10.14191/Atmos.2017.27.2.177 (in Korean with English abstract).
- Zhang, Y., K.-R. Sperber, and J.-S. Boyle, 1997: Climatology and interannual variation of the East Asian winter monsoon: Results from the 1979-95 NCEP/NCAR reanalysis. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 2605-2619.