Atmosphere. Korean Meteorological Society
Vol. 28, No. 4 (2018) pp. 383-392
https://doi.org/10.14191/Atmos.2018.28.4.383
pISSN 1598-3560 eISSN 2288-3266

연 구 논 문
(Article)

# 한반도 한파의 지역적 강화 메커니즘

이혜영[1] · 김주완[1]* · 박인규[2] · 강현규[1] · 류호선[1]
[1]공주대학교 대기과학과, [2]서울대학교 지구환경과학부

(접수일: 2018년 9월 14일, 수정일: 2018년 11월 4일, 게재확정일: 2018년 11월5일)

# Local Enhancement Mechanism of Cold Surges over the Korean Peninsula

**Hye-Young Lee[1], Joowan Kim[1]*, In-Gyu Park[2], Hyungyu Kang[1], and Hosun Ryu[1]**
*[1]Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Gongju, Korea*
*[2]School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea*

(Manuscript received 14 September 2018; revised 4 November 2018; accepted 5 November 2018)

**Abstract** This study investigates synoptic characteristics of cold surges over South Korea during winter season (December-February). A total of 63 cold events are selected by quantile regression analysis using daily mean temperature observations from 11 KMA stations for 38 years (1979/80-2016/17). Large-scale pressure pattern during the cold surges is well characterized by high over Siberia and low over Aleutian regions, which elucidates cold advection over the Korean peninsula. However, the large-scale pattern cannot successfully explain the observed sudden decrease of temperature during the cold surges. Composite analyses reveal that a synoptic-scale cyclone developing over the northern Japan is a key feature that significantly contribute to the enhancement of cold advection by increasing pressure gradient over the Korean peninsula. Enhanced sensible and latent heat fluxes are observed over the southern ocean of Korea and Japan during the cold surges due to temperature and humidity differences between the near surface and the lower atmosphere over the ocean. The evaporated water vapor transported toward the center of the surface cyclone and condenses in the lower-to-middle troposphere. The released energy likely promotes the development of the surface cyclone by inducing positive PV near the surface of the heating region.

**Key words:** Cold surge, cold advection, surface cyclone, latent heat flux

## 1. 서 론

동아시아 겨울 몬순의 대표적 특징은 서쪽 대륙에 위치한 차가운 시베리아 고기압과 동쪽 알류샨 열도에 중심을 두고 있는 온난한 저기압이 형성하는 서고동저 형태의 기압배치로 설명할 수 있다. 이러한 동서 방향의 기압배치는 수 주 또는 수십일 정도의 시간 규모를 갖는 계절 내 변동성을 나타내며, 시베리아 고기압의 동쪽 가장자리를 따라 형성되는 북서풍의 강도 변화는 한반도 지역의 겨울철 기온에 큰 영향을 미친다(Wang and Chen, 2010). 한반도 겨울의 기온은 시베리아 고기압과 알류샨 저기압의 강도와 강한 상관성을 가지며, 일반적으로 이러한 기압배치가 강해질 때 한반도 지역의 북서풍이 강화되므로 한반도에 더 추운 겨울이 오는 것으로 알려져 있다(Ryoo et al., 2002). 또한 Ryoo and Kwon(2002)은 한반도 겨울철의 평균기온과 한파의 발생 빈도 사이

*Corresponding Author: Joowan Kim, Department of Atmospheric Science, Kongju National University, 56 Gongjudaehak-ro, Gongju 32588, Korea.
Phone: +82-41-850-8528, Fax: +82-41-856-8527
E-mail: joowan@kongju.ac.kr

에 강한 상관성이 있음을 보여 이러한 계절적 배경은 한반도 한파의 발생에도 큰 영향을 미치는 것을 보였다.

동아시아 겨울철 몬순 변동성과 한파의 발생은 기후적 관점에서 많은 연구가 이루어졌으며 이러한 연구들은 시베리아 고기압, 알류샨 저기압의 강도 또는 북극진동의 위상과 한반도 한파의 빈도가 통계적으로 밀접하게 관련되어 있음을 보였다(Gong et al., 2001; Jeong and Ho, 2005; Jeong et al., 2006; Lim et al., 2012). 특히 Jeong and Ho (2005)는 대기가 음의 북극진동 상태일 때 한반도를 포함한 동아시아 지역에 한파가 더 빈번하게 나타날 수 있음을 보여, 한반도 한파 발생 시 대규모 배경장의 중요성을 시사하였으며, Lim et al. (2012)은 1980년대 중반 이후 한반도의 기후 체계의 변화가 있었으며 한반도 겨울철 기온 변동에 주요하게 작용하는 북반구 대기 순환이 시베리아 고기압과 알류샨 저기압에서 북극진동으로 바뀌었음을 제시하였다.

대규모 배경장은 한파의 발생빈도와 높은 상관성을 가지지만, 한파 시기에 수일 규모에서 일시적으로 강화되는 북풍과 하루에 섭씨 10도 이상 감소하는 기온변화를 설명하기는 어렵기 때문에 한파의 발달 과정은 종관적인 관점에서도 연구되었다(Ryoo and Kwon, 2002; Yoo et al., 2015). Ryoo and Kwon (2002)은 한파의 발생 과정 중 하나로 한반도 서쪽에서의 기압상승과 동쪽에서의 기압 강하가 지역적으로 서고동저형의 기압배치를 강화하고, 그 결과 강한 한랭이류가 발달함으로써 한반도에 한파를 유도함을 제시하였고, Yoo et al. (2015)은 한국-일본 해상에서 형성되는 저기압성 순환이 한파 발생 1일 전에 하층의 기압경도력에 영향을 주어 북풍과 찬 공기의 유입을 강화함을 제시하였다. 한파의 발생에 대한 종관규모연구는 진행되고 있지만, 한파 시기에 한국-일본 동쪽 해상에 발달하는 저기압과 이와 관련된 한파의 발생 기작을 분석한 연구는 부족하다. 따라서 이 연구에서는 Yoo et al. (2015)의 연구 결과를 확장하여 한파 발생 시 한국-일본 동쪽 해상에서 형성되는 지상저기압의 발달과 관련된 한파의 종관적인 메커니즘을 자세히 분석하고자 한다. 한반도 한파를 전후로 한국-일본 동쪽해상에서는 지상저기압이 뚜렷하게 관찰되었으며 이 저기압은 해양과의 상호작용을 통해서 빠르게 성장하며 한반도 지역에 강한 한랭이류를 유도하였다.

제 2 장에서는 자료 및 분석 방법, 제 3, 4 장에서는 한반도 한파의 시공간 구조와 한파 시기의 종관배경, 제 5 장에서는 해양과 관련된 저기압의 발달 메커니즘을 서술하였으며 6 장에는 요약 및 결론을 제시하였다.

## 2. 자료 및 분석 방법

### 2.1 자료

연구에 사용된 자료의 기간은 1979년 12월 1일부터 2017년 1월 31일까지이며, 이 기간 동안의 관측이 지속적으로 유지된 기상청 산하 11개 지점(강릉, 서울, 울릉도, 추풍령, 대구, 전주, 울산, 광주, 부산, 목포, 여수)의 일평균 지상기온자료를 지점 평균하여 한반도 기온의 대푯값으로 사용하였다. 겨울철은 12, 1, 2월로 하여 당해 년도의 12월과 그 다음해의 1, 2월을 그 해의 겨울철로 정의하였다. 또한 한반도를 포함한 동아시아의 종관장을 분석하기 위해 유럽중기예보센터(European Center of Medium range Weather Forecast; ECMWF)에서 제공하는 재분석자료(ERA-Interim; Dee et al., 2011)를 사용하였다. 사용된 자료의 위경도는 1.5°, 시간은 6시간 간격이며 500, 850, 1000 hPa의 지위고도, 기온, 비습, 바람장 자료와 해수면 기압, 2 m 기온 자료를 각각 일 평균하여 사용하였다. 추가로 지상 저기압 발달에 도움을 준 물리과정을 이해하기 위해 ERA-Interim 자료의 예측장으로 제공되는 물리과정에 의한 가열률을 사용하였다. 물리과정에 의한 가열률은 모델 고도인 하이브리드 좌표계로 제공되므로 6시간 자료를 등압좌표계로 내삽한 후 일 평균하여 사용하였다. 한파 발생시 해양에서 방출되는 잠열 및 현열을 살펴보기 위해 미국 우즈홀 해양 연구소(Woods Hole Oceanographic Institution; WHOI)가 제공하는 위경도 1.0°, 1985년부터 2016년까지 1일 간격의 OAFlux (Objectively Analyzed air-sea Fluxes; Yu et al., 2008) 자료를 이용하여 분석하였다. 한반도 한파의 시공간 구조와 종관배경장을 분석하기 위하여 0°~80°N, 70°E~180°의 동아시아 영역을 대상으로 분석하였고, 해양과의 상호작용을 분석하기 위한 현열, 잠열속 분석은 한반도와 일본의 남쪽 해안을 중심으로 하는 10°~50°N, 100°E~180°의 영역을 대상으로 분석하였다.

### 2.2 한파 사례의 선정

한파일은 선행 연구인 Yoo et al. (2015)의 정의를 따라 분위수 회귀분석(Koenker and Hallock, 2001)을 수행하여 선정하였다. 분위수 회귀분석은 관측값이 회귀값보다 클 때는 $r$의 가중치를, 관측값이 회귀값보다 작을 때는 $1-r$의 가중치를 주어 오차의 절대값의 합이 최소가 되게 하는 추세선을 구한다는 점에서 오차의 제곱합이 최소가 되게 하는 최소 제곱법과 다르다. 오차의 절대값의 합이 최소가 되게 하기 때문에 최소 제곱법보다 이상값의 영향을 덜 받을 수 있다는 장점이 있다. 또한 정규분포를 가정해야하는 최소 제곱법과는 다르게 분포에 대한 가정을 하지 않기 때문에 정규분포를 따르지 않는 한파와 같

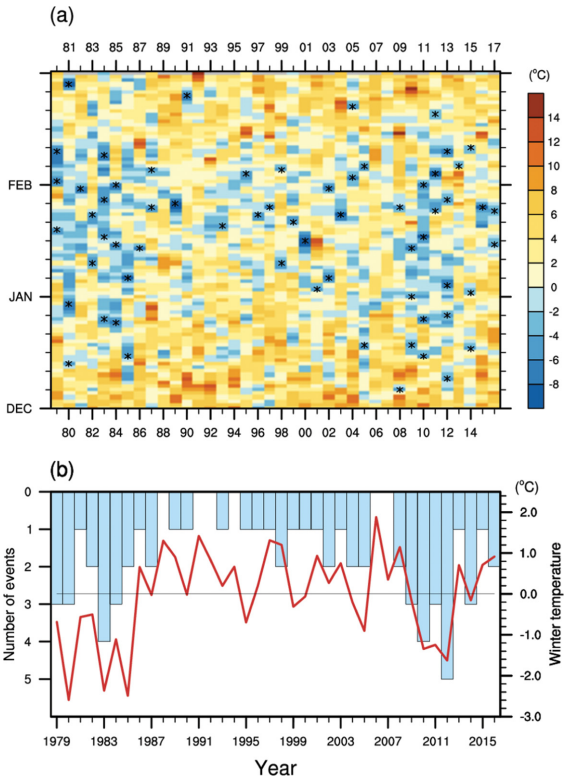


**Fig. 1.** (a) Daily mean temperature averaged over 11 KMA station in winter season for period of 1979/80-2016/17. The star (*) denote sampled cold surges. The number of cold day is 63. (b) The number of cold surges (blue bar), Mean temperature anomalies (red line) during the analysis period only winter.

은 극한 현상을 분석하기에 더 적합하다(Kim et al., 2014; Yoo et al., 2015). 분위수 회귀분석의 수식은 다음과 같다.

$$\text{minimize}\{\Sigma_{\{i|y_i<y_r(x_i)\}}(1-r)|y_i-y_r(x_i)| + \Sigma_{\{i|y_i>y_r(x_i)\}}r|y_i-y_r(x_i)|\}$$

위의 식에서 $n$은 자료의 개수를, $r$은 특정 분위수 값을, $y_i$는 실제 관측값을, $y_i(x_i)$는 회귀값을 나타낸다. 본 연구에서는 $r=0.01$로 하여 하위 1% 백분위에 해당하는 선형 추세선을 구하여 일평균기온이 추세선보다 아래에 있는 날들을 한파일로 선정하였고, 각 사례의 독립성을 위해 한파일 전후 7일 이내에 다른 한파가 발생하면 그 중 기온이 낮은 경우를 한파로 선정하였다. 그 결과 각각 독립적인 63회의 한파가 선정되었으며 사례일은 선행연구인 Yoo et al. (2015)과 유사하게 나타났다. 분위수 회귀분석에 대한 자세한 방법론은 Koenker and Hallock (2001)와 Franzke (2013)에서 찾을 수 있다.

## 3. 한파의 시공간 분포

Figure 1a는 38년간의 한반도 겨울철 일평균기온과 분위수 회귀분석을 수행하여 얻어진 한파일을 나타낸 그림이며, Fig. 1b는 겨울철 연평균기온의 편차와 그 해의 겨울에 발생한 한파 일수를 나타낸 그림이다. 겨울철 연평균기온의 편차는 연평균기온값과 분석기간 전체의 겨울철 평균기온값의 차로 계산하였다. 한반도 겨울 기온은 연도별로 큰 차이를 나타낸다. 특히 1980년대 말부터 2000년대 중반까지의 한반도 겨울은 기후평년값보다 온난하며 대부분의 일평균기온이 영상의 값을 기록하였다. 상대적으로 1980년대의 초반과 2000년대 말 이후는 기후평년값보다 낮은 기온을 보였다. 선정된 한파 발생 일수도 추운 겨울이 유지된 1980년 초반과 2000년대 말 이후에 집중되었다. 특히 2012년에는 한파 사례가 5회로 분석기간동안 가장 많은 한파가 발생하였다. 한파의 발생 횟수와 연평균기온은 Ryoo and Kwon (2002)에서 보고된 내용과 같이 대체로 강한 음의 상관을 보이며, 분석기간 동안의 각 연도별 겨울철 평균기온과 한파 발생 횟수 사이의 상관계수는 –0.64로 강한 음의 상관계수를 가진다. 한파의 지속기간을 고려할 경우 이러한 상관관계는 더 뚜렷하게 나타난다(그림 생략).

한반도 한파의 공간적인 구조를 이해하기 위하여 한반도 사례 선정에 사용된 관측소 일평균기온과 재분석자료 2 m 기온의 상관성을 분석하였다(Fig. 2). 지점별 상관계수 계산에는 63개의 한파 사례에 대한 각 지점의 2 m 기온자료가 사용되었다. 시간 지연이 없을 때(Fig. 2c) 관측소 기온와 2 m 기온의 상관계수는 한반도상에서 높은 값을 나타내어 관측소자료와 재분석자료가 한파 시기의 기온을 일관성 있게 나타내고 있음을 알 수 있다. 상관계수는 약 0.4 정도의 값에서부터 99% 이상의 신뢰도를 보이며, 유의한 값의 공간 분포는 한반도를 중심으로 약 2000 km 반경에서 나타나 한반도 한파 시기의 지상 기온 변화가 종관규모의 현상과 관련이 있음을 암시한다. 한반도 지상관측소 기온의 상관성은 한파 발생 2일 전부터(Fig. 2a) 중국 화북 지역을 중심으로 뚜렷하게 나타나며 이는 한반도에 한파 발생 전에 이 지역에서도 유사한 기온 하강 현상이 있음을 나타낸다. 또한 이러한 상관성의 분포는 시간에 따라 하루에 약 1000 km 정도씩 동남진하는 특성을 보이는데, 이는 동아시아 지역 종관기압계 진행속도와 유사하며, 한파와 관련된 기온의 변동성이 종관시스템의 이동과 발달에 밀접하게 관련되어 있음을 시사한다.

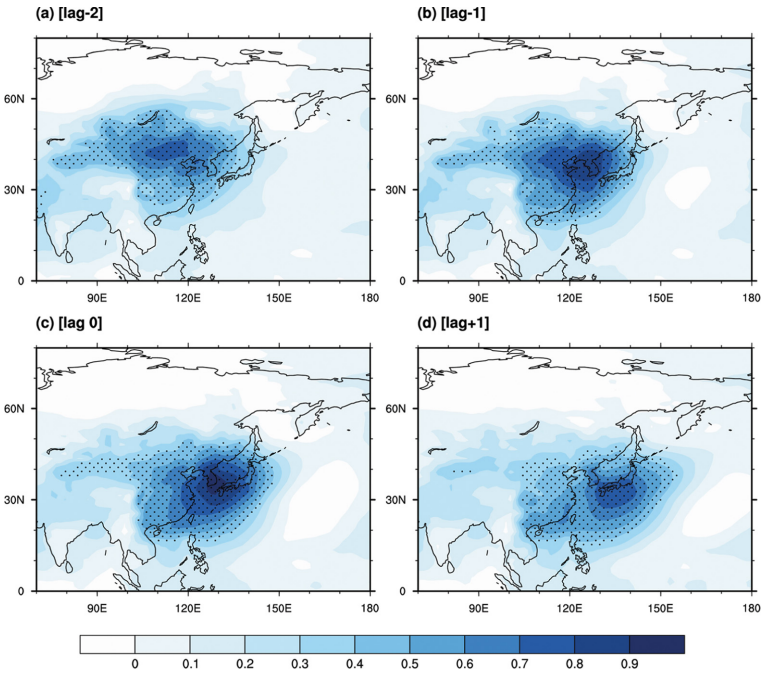


**Fig. 2.** Lag composite of one-point correlation between observed mean temperature from 11 KMA stations and 2-meter temperature from ERA interim for sampled cold surges. Number n lag days of ERA-interim data with respect to the station observation. Significant values at 99% confidence level are indicated by black dots.

## 4. 합성된 종관장의 구조

한파 시기에 공통적으로 나타나는 종관현상을 이해하기 위하여 63개 한파 사례의 합성 종관장을 분석하였다. 합성장은 한파일을 기준으로 단순평균하여 계산하였으며, 시간에 따른 변동성을 분석하기 위하여 한파일 2일 전(lag–2)부터 1일 이후(lag+1)까지 하루 간격으로 분석하였다. Figure 3은 합성된 1000 hPa의 기온편차(음영)를 500 hPa의 지위고도(흰색 등치선)와 해수면기압(검은색 등치선)과 함께 나타낸 그림이다. 1000 hPa의 기온편차는 합성장의 기온값과 겨울철 평균기온값의 차로 계산하였다. 한파일에 가까워질수록 찬 공기가 한반도로 남하하고 있는 것을 1000 hPa의 기온으로 확인할 수 있다. 한파 2일 전(Fig. 3a)의 해수면기압은 Wang and Chen (2010)에 제시된 바와 같이 대표적인 동아시아 겨울 몬순(EAWM; East Asian Winter Monsoon)과 유사하며 한반도와 한반도 북부의 만주지역에 전반적으로 북풍을 유도하는 구조이다. 한파 시기에 시베리아 고기압이 한반도로 확장하여 찬 공기가 남하하고 한파가 발생하기 쉬운 조건이 형성되지만 이러한 대규모의 현상만으로는 이 시기에 한반도에 집중되는 강한 한랭이류를 설명하기 부족하다. 한반도에 집중되는 강한 한랭이류의 원인은 일본 북해도 근처에서 나타나는 지상 저기압의 발달 과정에서 찾을 수 있다(Figs. 3b, c). 해수면기압의 공간분포를 보면 일본 북해도의 동쪽 해상에서 한파 발생 하루 전부터(Fig. 3b) 저기압 발달이 뚜렷하게 관찰되며, 이 지상 저기압의 강화와 함께 한반도 지역의 기압경도가 강해지는 것을 알 수 있다. 같은 시기에 상층(500 hPa)에서도 한반도 부근에서 뚜렷한 종관규모의 기압골이 관찰되며, 서쪽으로 기울어진 기압계의 연직 구조는 경압불안정에 의한 해상 저기압 발달이 한반도 한파를 발생시키는 중요한 기작임을 시사한다. 시간이 지날수록 지상 저기압은 동쪽으로 이동하면서 시베리아 고기압과의 기압경도력이 약해지고 북풍 계열의 바람 또한 약해진다.

한파 시기 한반도 지역의 기온변화를 정량적으로 이해하기 위하여 Fig. 3과 같은 시간에 대한 850 hPa의 수평온도이류를 계산하였다(Fig. 4). 유의한 강도의 한랭이류는 한파 2일 전부터 중국과 한반도 북부 지역에서 관찰되며, 한반도 지역의 한랭이류는 한파 1일 전에 가장 강하게 나타난다. 이 시기에 강한 북서풍 계열의 하층 바람과 한랭이류가 한반도를 중심으로 집중되는 것을 볼 수 있다. 이러한 특성은 Fig. 3에 제시된 동서방향으로의 기압경도력의 강화와 일

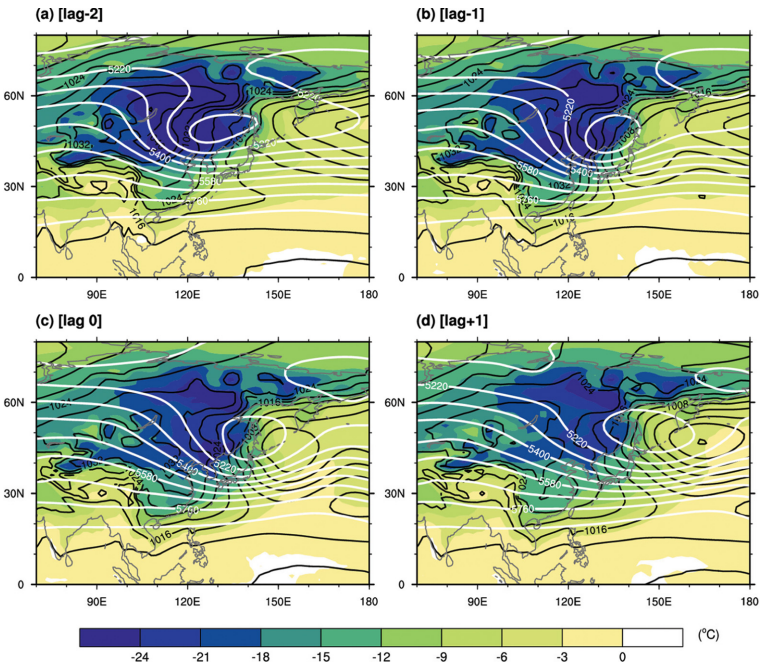


**Fig. 3.** Composites of geopotential height at 500 hPa (white contour), mean sea level pressure (black contour) and air temperature anomalies (shading) at 100 hPa for the 63 cold surge cases. Contour intervals are 90 m and 4 hPa for 500 hPa geopotential and sea-level pressure respectively. Number on lag indicate days of the analysis data with respect to cold surge days.

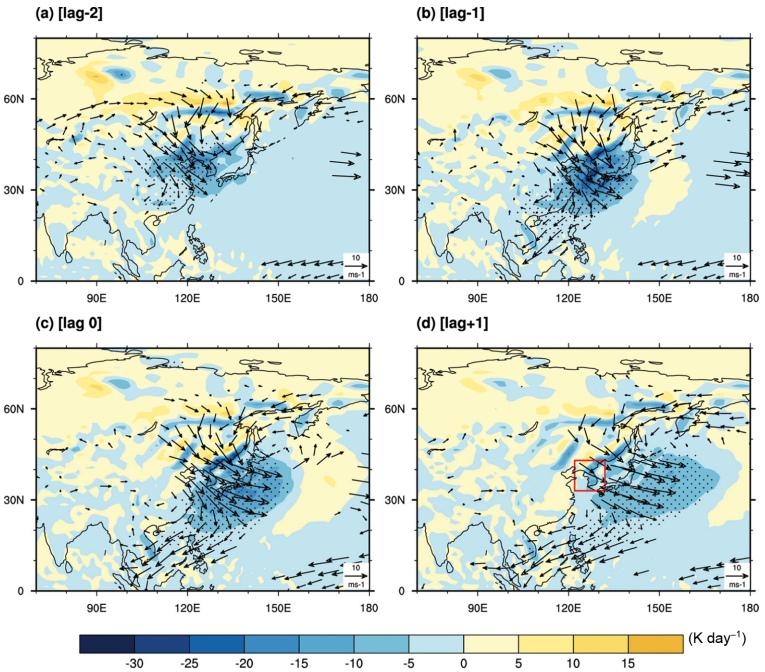


**Fig. 4.** The same with Fig. 3 but for temperature advection at 850 hPa (shaded) and 850 hPa horizontal winds (vector). Dots indicate significant temperature advection at 99% confidence level. Only significant winds at 99% confidence level are presented. The red square is for calculating the averaged temperature advection for Fig. 5.

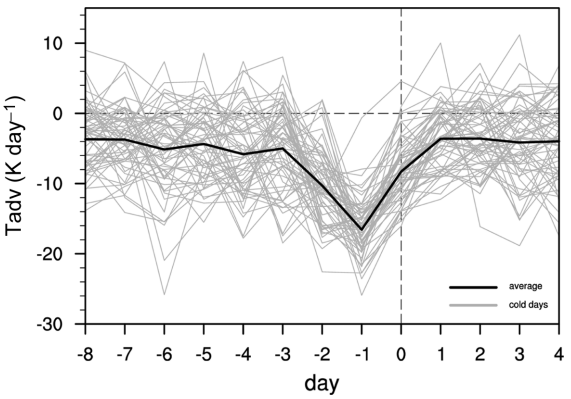


**Fig. 5.** Lag composite of temperature advection averaged over the Korean peninsula in Fig. 4. Curves in light gray present the values of individual events.

관된 결과이며, 이는 일본 북해도 지역의 지상 저기압이 발달에 의한 것으로 설명할 수 있다. 한랭이류는 시간이 지남에 따라 남동진하여 일본을 거쳐 일본의 동해안으로 빠져나가는 것을 볼 수 있다(Fig. 4c, d). 본 연구에서 한파 사례는 기온이 급격히 떨어지는 날을 한파로 하는 일반적인 정의가 아닌 하위 1%의 분위수 회귀분석을 수행하여 선정하였기 때문에 한반도상의 한랭이류는 한파 발생 1일 전에 집중되어 나타나며(Fig. 5), 한파의 주요 원인인 수평방향의 온도이류는 이 시기에 약 −15 K day$^{-1}$에 달한다. 종관장과 온도이류는 선정된 63개의 사례 모두 유사한 특성을 보이며, 저기압의 발달에 의한 국지적인 한랭이류 강화는 한반도 한파의 전형적인 발생 메커니즘으로 판단된다.

일본 북해도 동쪽 해상의 지상 저기압 발달을 자세히 살펴보기 위해서 해수면기압의 일변화 경향을 분석하였다. Figure 6의 검은색 등치선은 각각 한파 1일 전과 한파 당일의 해수면기압을 나타낸다. 각 시기의 기압경향은 하루 전 기압과의 차이로 계산하여 음영으로 나타내었다. 한파 발생 1일 전에 한반도의 서쪽으로는 기압이 상승하고 동쪽으로는 기압이 감소하는 경향을 보이고 이는 같은 시기의 해수면기압분포에 중첩되어 한반도 지역의 기압경도력이 증가함을 보인다. 한파 일의 기압경향은 일본 동쪽 해상의 지상 저기압이 빠르게 발달하는 형태를 보여준다. 이러한 기압경향 특성은 한파의 발생이 단순히 기압계의 이류에 의한 것이 아니라 기압계의 발달 및 강화 과정과 깊은 관계가 있음을 나타낸다. 한국-일본 동쪽 해상의 지상저기압이 빠르게 발달하는 원인은 해양과 대기의 상호작용의 가능성이 있을 것으로 판단되며 다음 장에 추가로 서술하였다.

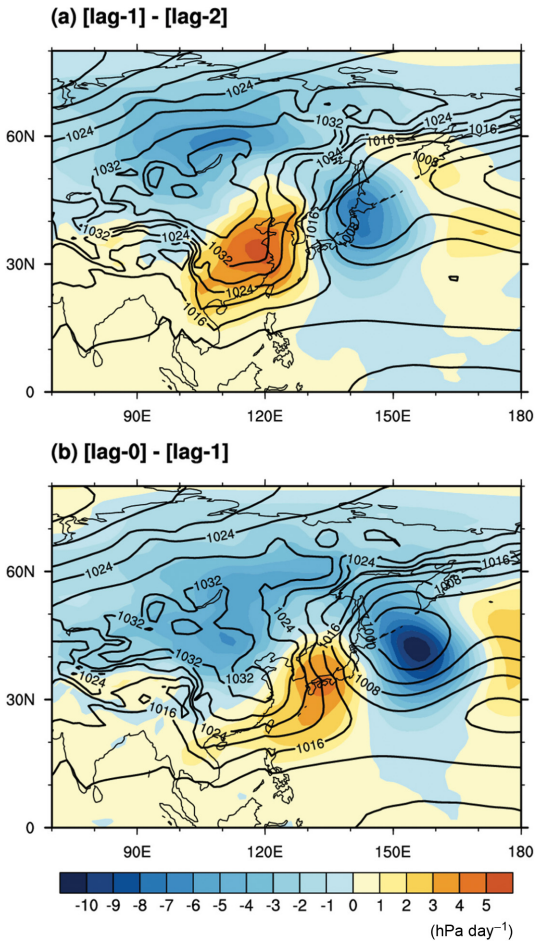


**Fig. 6.** Composite of pressure tendency at surface (shaded) and mean sea level pressure (contour) for the cold surge cases. Contour interval is 4 hPa.

## 5. 해상 저기압 발달의 원인

일반적으로 하층의 수평온도경도가 큰 대륙의 동안에서는 경압불안정에 의해 지상저기압이 성장하기 좋은 조건을 갖는다(Hoskins and Valdes, 1990). 하지만 이 밖에도 한파 시기의 사례를 자세히 살펴보면 지상저기압이 대륙 동안에 인접한 해상을 지날 때 일반적인 경우보다 더 빠른 성장을 보이는데, 이는 해양과의 상호작용이 영향을 준 것으로 판단할 수 있다. Figure 7은 한파 시기 해양에서 대기로 방출되는 잠열속과 현열속을 나타낸 그림이다. 한파 2일 전 잠열속과 현열속은 분석 기간 동안의 겨울철 평균과 비슷한 값과 분포를 보인다. 그러나 한파일에 가까워질수록 잠열속과 현열속은 한반도 주변의 해양에서 급격한 증가를 보이며, 공간적인 분포는 종관기압계의 특

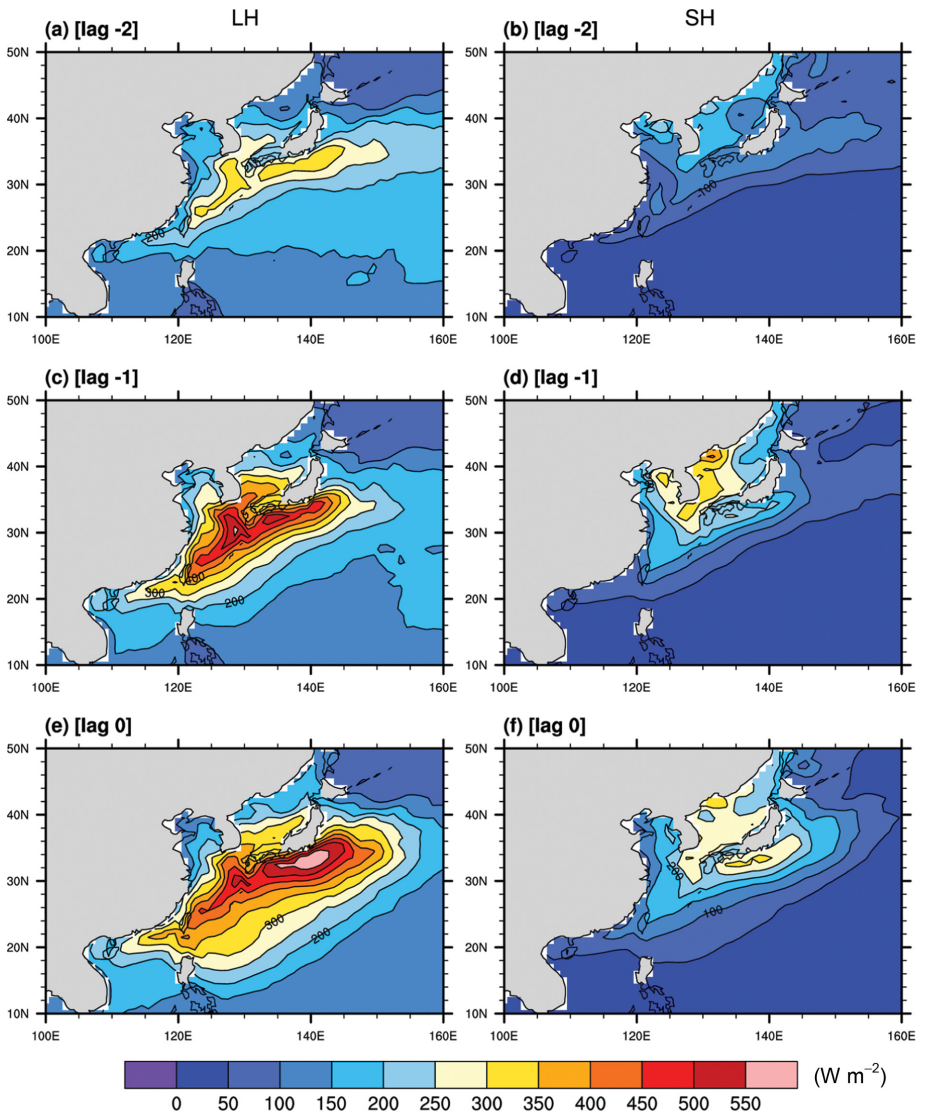


**Fig. 7.** Composites of surface latent (left column) and sensible (right column) fluxs from the ocean. Upward flux from the ocean to the atmosphere is presented as positive.

성과 유사하게 남동진하는 특성을 갖는다. 특히 이 값들은 대기 하층의 온도이류(Fig. 4)와 매우 유사한 시공간 구조를 보여 한파 시기 하층대기의 한랭이류가 해양에서 방출되는 현열속과 잠열속 증가의 원인임을 추정할 수 있다. 북동쪽 대륙에서 이류되어 온 차고 건조한 공기가 따뜻한 쿠로시오 해류와 만나 큰 온도차가 발생하고, 그 결과 해양에서 많은 양의 증발이 발생할 수 있다. 한파 시기 잠열속의 증가는 현열속보다 크게 나타났다. Figure 7a에서 잠열속이 250 W m$^{-2}$을 넘는 영역을 평균한 값은 287.5 W m$^{-2}$이며 겨울철 평균값인 261.8 W m$^{-2}$과 비슷하다. Figure 7e의 같은 영역에 대해서는 449 W m$^{-2}$로 Fig. 7a의 영역의 156%에 해당하는 많은 잠열이 방출하였다.

현열과 잠열의 방출은 대기-해양의 온도 차이, 비습, 하층 풍속에 큰 영향을 받기 때문에, 한파 시기에 잠열이 방출되는 위치는 북풍이 유도되는 저기압의 서쪽에 위치하게 된다(Figs. 6, 7). 따라서 해양에서 방출된 잠열이 저기압의 발달에 직접적으로 영향을 미치기 위해서는 하층 저기압을 향한 수증기의 이류와 수렴이 필요하다. Figure 8은 한파 1일 전 대기 하층의 수평 수증기속과 그 수렴을 보인 그림이다. 이 시기에 하층 수증기는 많은 양의 잠열이 방출된 한반도

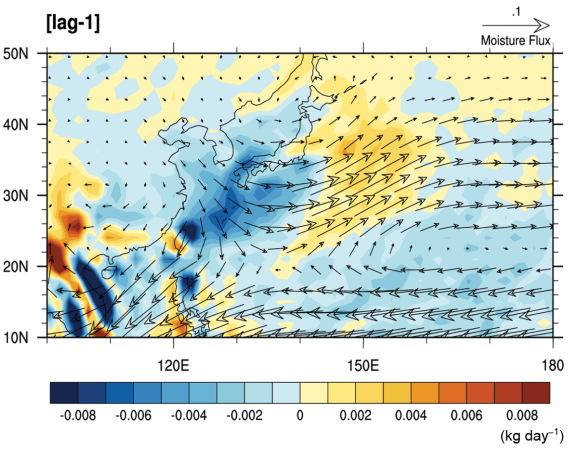


**Fig. 8.** Composite of daily mean moisture flux (vector) and moisture convergence (shaded) at 850 hPa one day before the cold surges.

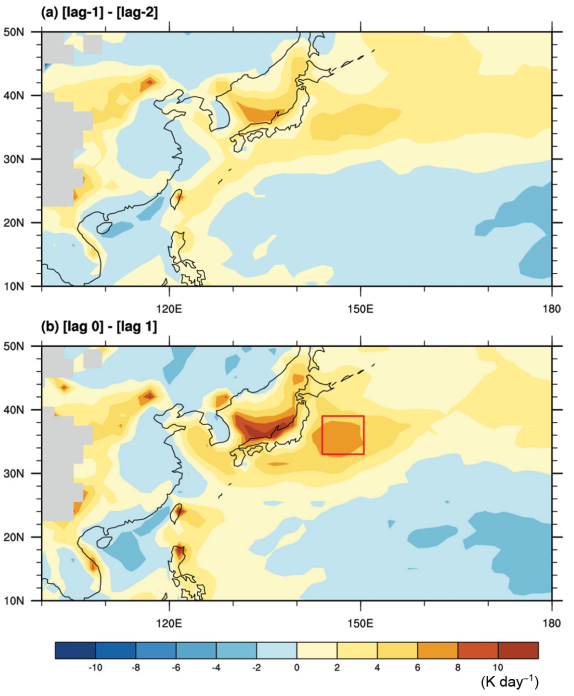


**Fig. 9.** Composite of temperature tendency by physics heatings (K day$^{-1}$) at 850 hPa. The red square is for calculating the averaged temperature tendency by the physical heating of Fig. 10.

와 일본의 남쪽 해안에서 발산하여 지상 저기압이 발달하는 일본 북해도 지역의 동쪽 해상에서 수렴하는 것을 볼 수 있으며, 이러한 구조는 물리과정에 의한

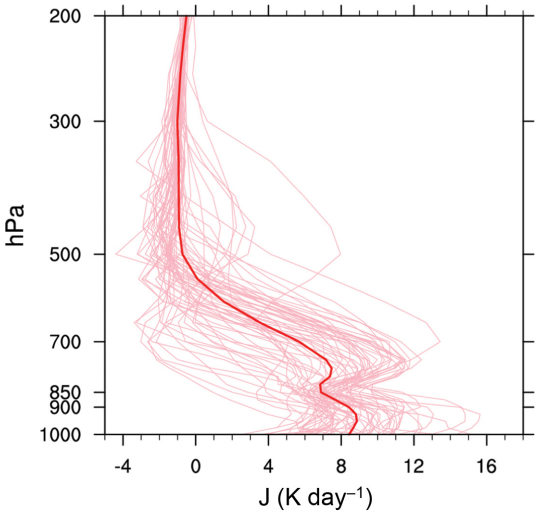


**Fig. 10.** Composite of averaged physics heating tendency in the red square in Fig. 9 as a function of height. Light-colored curves denote individual cases.

하층 대기의 가열율(Fig. 9)과 잘 일치하여 저기압이 발달하는 지역에서 수증기 수렴에 의한 잠열의 방출이 있음을 판단할 수 있다. 물리과정에 의한 대기의 가열율에는 잠열, 현열, 복사 등의 여러 물리 과정이 포함되어 있지만 한파 시기 이 지역의 가열율은 수증기 응결에 의한 잠열 방출이 지배적이다. 복사과정에 의한 대기의 가열율은 일반적으로 1 K day$^{-1}$ 이하의 값을 갖는다.

저기압이 발달하는 지역에서 물리과정에 의한 가열율의 연직구조를(Fig. 10) 살펴보면 700 hPa 이하의 하부 대류권에서 많은 가열이 있음을 알 수 있고 이는 하층 수증기 수렴과 일치하는 결과이다. 한반도 남부 해양에서부터 방출된 많은 양의 수증기가 일본 동쪽에서 지상 저기압이 발달하는 지역으로 수송되고 응결하여 지상 저기압 발달의 중요한 에너지원으로 활용됨을 알 수 있다. 하층 대기의 물리적인 가열은 열역학적 상승을 유도하며, 가열이 있는 층의 상부에는 양의 잠재와도 경향, 하부에는 음의 잠재와도 경향을 유도하여(e.g., Stoelinga 1996; Schemm and Wernli, 2014; Methven, 2015) 지상 저기압의 발달을 돕는다.

## 6. 결 론

한반도를 포함한 동아시아의 겨울철 몬순은 시베리아 고기압과 알류샨 저기압이 형성하는 서고동저 형태의 기압배치로 설명할 수 있으며, 최근에는 북극진동이 한반도 겨울철 기온 변동에 주요하게 작용하고 있다는 연구가 있다(Lim et al., 2012). 이러한 기압배

치와 북극진동과 같은 대규모 배경장은 한파의 발생과 높은 상관성을 가지지만 한파 시기에 한반도에 발생하는 급격한 기온 변화를 설명하기 어렵다. 본 연구는 지역적으로 빠르게 발생하는 한반도 한파의 특성을 이해하기 위해, 한파 발생시의 한반도 지역의 종관장을 분석하였다. 1979/80년 겨울철부터 2016/17년 겨울철까지 38년간 관측된 지상의 일평균기온을 이용하여 분위수 회귀분석을 수행하였고 하위 1%에 해당하는 날을 활용하여 한파일을 선정하였다. 그 결과로 총 63개의 겨울철(12, 1, 2월) 한파 사례를 선정하였다. 분석기간내의 겨울철 평균기온은 1980년 중반 이후로 대체로 온난하다가 2010년부터 다시 감소하는 특성을 보였으며, 한파 발생 횟수 또한 유사한 특성을 보여 온난한 겨울보다 한랭한 겨울에 발생 횟수가 더 많이 관찰되었다.

관측소 자료와 재분석 지상기온간의 상관계수는 한파가 종관 규모의 시공간 구조를 나타내며 종관 기압계 이동과 관련이 있음을 보였다. 선정된 63개 사례의 종관 합성장은 대륙의 동쪽 해안에서 발달하는 저기압 시스템의 구조를 뚜렷하게 나타내었다. 한파가 발생하기 2일 전부터 500 hPa의 기압골이 한반도 북부에 위치하였으며, 한파 발생 1일 전부터 상층기압골의 전면부에 위치한 일본 북해도 해상에서 지상 저기압의 강화 경향이 잘 나타났다. 지상 저기압의 발달로 한반도 상의 지상기압경도는 크게 증가하였으며 북풍 계열의 강한 한랭이류를 유도하였다. 이러한 과정이 선정된 대부분의 사례에서 관찰되었으며 한반도 한파의 중요한 발생 메커니즘으로 보인다.

한국-일본 동쪽 해상에서 나타나는 지상 저기압의 빠른 발달을 이해하기 위해 해양과의 상호작용을 분석하였다. 한파 시기에 발생한 한랭이류가 한반도-일본열도 남부의 따뜻한 해류와 만나면서 한파 1일 전부터 해양에서 많은 양의 잠열이 방출되었고 방출된 잠열은 하층대기를 통해서 지상 저기압 중심부로 수송되어 저기압 발달의 에너지원으로 활용된 것으로 판단된다. 또한 한파 당일 한반도 및 일본의 남해에서 한파 발생 2일 전보다 56% 많은 양의 잠열이 방출되어 한파가 겨울철 대기-해양 간의 에너지 교환에 큰 영향을 미침을 보였다. 이러한 일련의 과정은 한반도 지역의 저기압 발달과 해양의 잠열 방출사이에 양의 되먹임 작용이 있음을 의미하고, 이와 관련된 한국-일본 동쪽 해상에서의 지상 저기압 발달이 한반도 한파의 지역적 강화 메커니즘으로 작용함을 시사한다.

대규모 순환의 관점에서 음의 북극진동 시기에 한파가 많이 발생할 수 있는 원인은 약해진 제트기류로 인해 차가운 시베리아 대륙의 공기가 더 빈번하게 한반도 지역으로 이동할 수 있기 때문인데, 이러한 대규모 배경장 특성이 한반도에 존재하는 종관규모의 지역적 강화 메커니즘과 연결되어 빈번한 한파로 이어지는 것으로 생각되며, 이는 상호 보완적 결과이다. 그러나 이러한 대규모의 배경장의 변동성이 대륙의 동안에서 발달하는 저기압의 빈도와 강도에 어떠한 영향을 미치는지에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다. 또한 해양과의 상호작용이 한반도 한파의 강도에 미치는 영향에 대한 정량적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 감사를 드립니다. 이 연구는 기상청 기상지진 See-At기술개발연구사업(KMI2018-01211)의 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

Dee, D. P., and Coauthors, 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc*., **137**, 553-597, doi:10.1002/qj.828.

Franzke, C., 2013: A novel method to test for significant trends in extreme values in serially dependent time series. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 1391-1395, doi:10.1002/grl.50301.

Gong, D.-Y., S.-W. Wang, and J.-H. Zhu, 2001: East Asian winter monsoon and Arctic Oscillation. *Geophys. Res. Lett*., **28**, 2073-2076.

Hoskins, B. J., and P. J. Valdes, 1990: On the existence of storm-tracks. *J. Atmos. Sci*., **47**, 1854-1864.

Jeong, J.-H., and C.-H. Ho, 2005: Changes in occurrence of cold surges over east Asia in association with Arctic Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L14704.

_____, B.-M. Kim, C.-H. Ho, D. Chen, and G.-H. Lim, 2006: Stratospheric origin of cold surge occurrence in East Asia. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L14710.

Kim, S.-W., K. Song, S.-Y. Kim, S.-W. Son, and C. Franzke, 2014: Linear and nonlinear trends of extreme temperatures in Korea. *Atmosphere*, **24**, 379-390 (in Korean with English abstract).

Koenker, R., and K. F. Hallock, 2001: Quantile regression. *J. Econ. Perspect.*, **15**, 143-156.

Lim, S.-M., S.-W. Yeh, and G.-R. Kim, 2012: Analysis on the Relationship between the Korean Temperature and the Atmospheric Circulation over the Northern Hemisphere during winter. *Atmosphere*, **22**, 187-197 (in Korean with English abstract).

Methven, J., 2015: Potential vorticity in warm conveyor belt outflow. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **141**, 1065-1071, doi:10.1002/qj.2393.

Ryoo S.-B., and W.-T. Kwon, 2002: Climatological characteristics of cold winter and cold days over South Korea. *Atmosphere*, **12**, 288-291 (in Korean).

_____, J.-G. Jhun, W.-T. Kwon, and S.-K. Min, 2002: Climatological aspects of warm and cold winters in South Korea. *Korean J. Atmos. Sci.*, **5**, 29-37.

Schemm, S., and H. Wernli, 2014: The linkage between the warm and the cold conveyor belts in an idealized extratropical cyclone. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 1443-1459, doi:10.1175/JAS-D-13-0177.1.

Stoelinga, M. T., 1996: A potential vorticity-based study of the role of diabatic heating and friction in a numerically simulated baroclinic cyclone. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 849-874.

Wang, L., and W. Chen, 2010: How well do existing indices measure the strength of the East Asian Winter Monsoon? *Adv. Atmos. Sci*., **27**, 855-870, doi:10.1007/s00376-009-9094-3.

Yoo, Y.-E., S.-W. Son, H.-S. Kim, and J.-H. Jeong, 2015: Synoptic Characteristics of Cold Days over South Korea and Their Relationship with Large-Scale Climate Variability. *Atmosphere*, **25**, 435-447, doi:10.14191/Atmos.2015.25.3.435 (in Korean with English abstract).

Yu, L., X. Jin, and R. A. Weller, 2008: Multidecade Global Flux Datasets from the Objectively Analyzed Air-sea Fluxes (OAFlux) Project: Latent and sensible heat fluxes, ocean evaporation, and related surface meteorological variables, Woods Hole Oceanographic Institution. OAFlux Project Technical Report OA-2008-1, 64 pp.