

## 한반도에서의 지역에 따른 상이한 한파 발생 특징

성현준 · 김백민\*

부경대학교 환경대기과학과

(접수일: 2020년 5월 28일, 수정일: 2020년 7월 17일, 게재확정일: 2020년 8월 7일)

### Regional Characteristics of Cold Surges over the South Korea

Hyun-Joon Sung and Baek-Min Kim\*

Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan, Korea

(Manuscript received 28 May 2020; revised 17 July 2020; accepted 7 August 2020)

**Abstract** We investigate regional differences in the characteristics of cold surges that occurred over the South Korea during winter season (December-February, 1981/1982~2017/2018). A significant regional contrast of cold surge characteristics exists and we found that this is closely related to the spatially inhomogeneous distribution of winter-mean climatological surface temperature in association with the complex topography of the Korean peninsula. For the regions of the temperature below  $-1^{\circ}\text{C}$  (Region1; R1), the frequency of cold surges is inversely proportional to the surface temperature almost linearly. In case of the regions above  $-1^{\circ}\text{C}$  (Region2; R2), cold surge frequency does not exhibit any clear dependency on the surface temperature. Duration and number of occurrences of cold surge between the two regions showed clear difference. Dynamical evolution of cold surges before the onset showed a sharp contrast between R1 and R2. In R1, cold surface air temperature (SAT) was already predominant over East-Asia before the onset and the cold temperature was sustained after the occurrence. On the contrary, warm SAT was predominant over East-Asia before the onset in R2. The SAT suddenly drops just after the cold surge occurrence. We present different origin of wave activity and propagation characteristics between the two types: Wave-activity flux (WAF) was relatively weaker and wave disturbances moved eastward in R1 along with the WAF mainly directing eastward. In case of R2, WAF was stronger and directing southeastward in the upstream of South Korea movement erasing predominant warmer air eventually causing sudden temperature drops over southern provinces over South Korea.

**Key words:** Cold surge, wave activity flux, winter climatological surface temperature

## 1. 서론

지구 온난화의 가속화와 더불어 극한기상에 대한 관심이 커지고 있다. 겨울철 극한기상 현상으로 자주 발달하는 동아시아 지역의 한파는 시베리아 고기압이

강화되고 동아시아 지역으로 확장하면서 동아시아 지역에 급격한 온도 하강을 일으키는 현상으로 잘 알려져 있으며(Zhang et al., 1997), 동아시아 겨울 몬순을 특징짓는 대표적인 기상현상이다. 동아시아 한파의 역학적 메커니즘에 대한 연구가 많이 진행되어왔는데, Takaya and Nakamura (2005a)는 wave-train 특징을 갖는 한파는 시베리아 고기압의 계절 내 변동성이 중요한 역할을 하며, Takaya and Nakamura (2005b)는 시베리아 고기압을 증폭시키는 형태에 따라 wave-train과 blocking형태로 한파가 나타남을 보였다. Park et

\*Corresponding Author: Baek-Min Kim, Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Korea.  
Phone: +82-051-629-6641, Fax: +82-051-629-6638  
E-mail: baekmin@pknu.ac.kr

al. (2014)에서는 클러스터링 기법을 통해 동아시아 한파가 wave-train과 blocking 한파로 구별됨을 밝혔고, wave-train 한파는 상층 파동이 시베리아 고기압의 강화와 시베리아 지역 한랭 아노말리의 상호작용으로 시베리아 고기압이 남동진하는 형태로 나타나며, blocking 한파는 아북극 지역의 저지 고기압이 정체하거나 천천히 진행하여 시베리아 고기압이 강화되고 남쪽으로 확장하며 상대적으로 장기간 지속되는 특징이 있음을 보였다. 계절내 변동성뿐만 아니라 장기 기후변화(Woo et al., 2012), 북극 진동(Jeong and Ho, 2005; Park et al., 2011a), 성층권 변동성(Kim et al., 2009), 북극 해빙(Kim et al., 2014; Yang et al., 2020) 등 한파에 영향을 끼칠 수 있는 다양한 인자에 관한 연구가 진행되었다.

대부분 선행 연구에서는 한반도를 포함한 동아시아 지역의 급격한 기온 감소율과 시베리아 고기압 강화를 고려하여 한파를 정의한다(Zhang et al., 1997; Jeong and Ho, 2005; Park et al., 2011a, 2015). 반면, 한국 기상청에서는 발생 전일 기준으로 급격한 기온 감소와 한랭일의 지속 정도에 대한 국가적 대비 차원에서 한파 주의보를 발령하고 있다. 이는 기존 선행 연구들에서의 한파 탐지 방법과는 차이가 있으며, 분위수 또는 특정 기온 이하를 나타내는 흑한일과 한파를 구분 짓는 선행연구들과는 다르게 두 정의를 동시에 이용하는 것으로 볼 수 있다(Park et al., 2011b; Yoo et al., 2015).

한반도는 중관 규모에 비해 작은 국토 면적에도 불구하고 유라시아 대륙과 북서 태평양의 경계에 위치하고 있어 위도 및 경도에 따른 기후학적 기온의 수평 분포가 급변하는 지역에 위치하고 있다. 또한, 태백산맥, 소백산맥 등 높은 고도의 산맥이 국토를 가로지르고 있어 이에 따른 겨울철 기후학적 기온 편차가 지역별로 매우 큰 편이다(Park et al., 2009; Jeon and Cho, 2015). 한반도의 지리적 특이성에 따른 지역별로 상이한 기후학적 기온 분포 특성과 관련하여, 한파도 지역별 차이가 존재할 수 있음을 쉽게 생각해 볼 수 있는데, 지금까지 지역별로 감지되는 한파의 발생 메커니즘에 차이점이 있는지에 대한 선행 연구는 거의 없었다. 따라서 본 연구에서는 지역별로 감지되는 한파의 유의미한 차이점이 존재하는지를 먼저 분석한 후 지역별 발생 한파들의 상이한 중관적 특징들을 비교/분석하고자 하였다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1 자료

본 연구에서는 우리나라의 59개 관측소의 1981/1982~2017/2018년 겨울철(DJF) 일평균기온 자료와 시간 자

료를 이용하였고, 아침최저기온은 시간 자료에서 3시~9시 사이의 최저기온으로 적용하였다. 한파 발생 시 나타나는 중관장 분석에는 JMA (Japan Meteorological Agency) 에서 제공하는 6시간 간격, 위경도 1.25°의 공간해상도를 가지는 Japanese 55-year Reanalysis (JRA-55) 자료를 일평균하여 사용하였다. 해면기압, 300 hPa 지위고도, 300 hPa 바람장 자료와 2 m 지표기온 자료를 사용하였고, 아노말리는 평년값(1981~2010)과의 차이로 정의하였다.

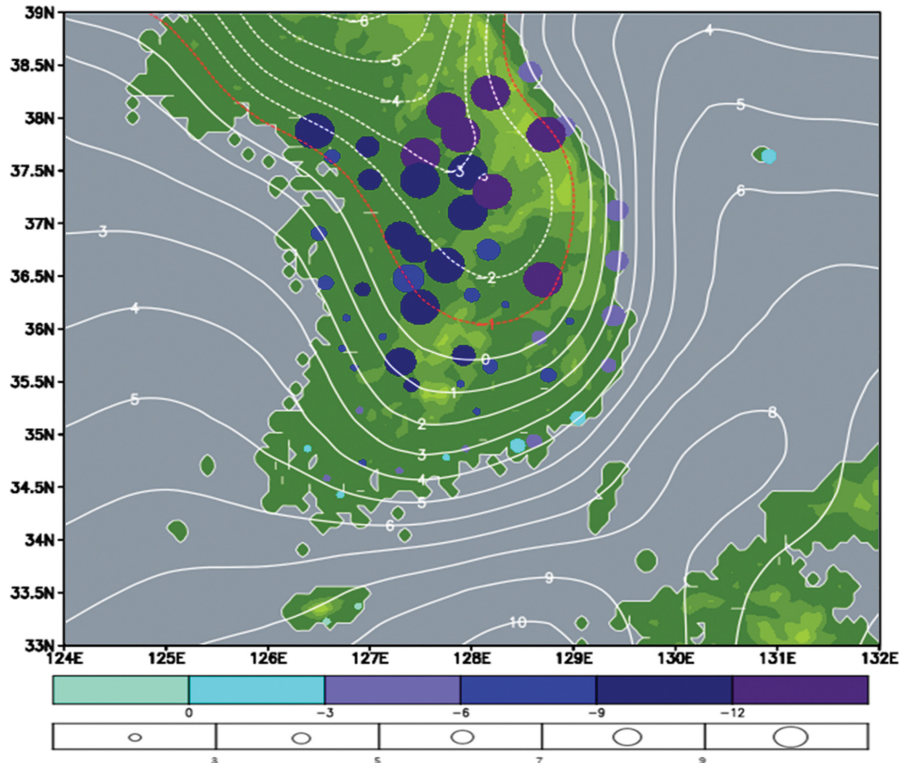
### 2.2 한파 탐지 방법

본 연구에서는 기상청의 한파 주의보가 발령된 날을 한파 발생일로 정의하였다. 한파 주의보는 아침최저기온이 전날보다 10°C 이상 하강하여 3°C 이하이고 평년 값보다 3°C가 낮을 때 혹은 아침최저기온이 -12°C 이하로 2일 이상 지속될 것으로 예상될 때 발령된다. 이때, 아침최저기온이 -12°C 이하로 2일 이상 지속될 때는 지속한 날의 첫째 날을 한파 발생일로 보았고, 본 연구에서 사용한 한파 종료 시점은 한파가 발생하여 기온이 하강한 이후 다시 상승하여 아침최저기온이 평년값을 회복하는 날로 정의하였다.

59개의 지점에서의 한파 발생 빈도와 한파 시 기온의 분포와 겨울철 일평균기온 평년값을 고려하여 -1°C를 기준으로 크게 두 지역으로 나누었고, 연평균 한파가 3일 이상 지속하는 40개의 지점에 대하여, 일평균기온의 평년값이 -1°C 이하인 지역(R1)과 -1°C 이상인 지역(R2)의 지점들을 지역 평균한 아침최저기온을 이용하여 R1, R2에서의 한파 발생일을 탐지하였다. R1에서 한파일수(발생횟수)는 436일(70회), R2에서 101일(13회) 나타났으며, 한파 시 평균 아침최저기온은 각각 -11.32°C, -6.78°C로 나타났다. 한파 발생일 기준 2일 이내 두 지역에 겹쳐서 나타나는 한파는 동시에 나타난 한파로 보았으며 9회 발생하였고, -1°C 이상인 지역에서만 나타나는 한파는 4회로 거의 나타나지 않았다. 동시에 나타난 9회에 대해서는 R2에서 감지된 한파로 보았고, R1은 61회, R2는 13회의 한파에 대하여 한파 발생일을 기준으로 해면기압, 2 m 지표기온, 300 hPa의 유선함수, 파동속을 발생 3일 전부터 발생 1일 후까지 하루 간격으로 지연 합성하였다.

### 2.3 수평 파동속(Horizontal wave activity flux) 분석

본 연구에서는 한파 발달과 소멸 기간 동안의 시간에 따른 수평 파동의 움직임 변화를 살펴보기 위하여, 8일을 기준으로 high pass filter 된 데이터를 이용하여 파동속(W)을 분석하였다(Takaya and Nakamura, 2001).



**Fig. 1.** Mean cold surge days (size of the Circle) and daily mean lowest temperature in the cold surge event (shading) at each Korean station for 37 winters (1981~2017, DJF). Climatological mean surface air temperature is also presented (contour and  $-1^{\circ}\text{C}$  line indicated by red color). Terrain altitude is brightened by 300 m intervals.

$$W = \frac{p \cos \phi}{2|U|} \left( \begin{array}{l} \frac{U}{a^2 \cos^2 \phi} \left[ \left( \frac{\partial \Psi'}{\partial \lambda} \right)^2 - \Psi' \frac{\partial^2 \Psi'}{\partial \lambda^2} \right] \\ + \frac{V}{a^2 \cos \phi} \left[ \frac{\partial \Psi' \partial \Psi'}{\partial \lambda \partial \phi} - \Psi' \frac{\partial^2 \Psi'}{\partial \lambda \partial \phi} \right] \\ \frac{U}{a^2 \cos \phi} \left[ \frac{\partial \Psi' \partial \Psi'}{\partial \lambda \partial \phi} - \Psi' \frac{\partial^2 \Psi'}{\partial \lambda \partial \phi} \right] \\ + \frac{V}{a^2} \left[ \left( \frac{\partial \Psi'}{\partial \phi} \right)^2 - \Psi' \frac{\partial^2 \Psi'}{\partial \phi^2} \right] \end{array} \right) + C_U M \quad (1)$$

Takaya and Nakamura (2001)에서 나타나는 파동속의 수평 성분은 식(1)로 표현되며  $p$ 는 기압, ( $U, V$ )는 동서, 남북 바람벡터,  $a(=6.37 \times 10^6 \text{ m})$ 는 지구의 반지름,  $\phi, \lambda$ 는 위도, 경도,  $\Omega(=7.29 \times 10^{-5} \text{ rads}^{-1})$ 는 지구 자전각속도,  $\Psi'$ 는 유선함수의 섭동,  $C_U$ 는 동서 방향의 위상속도를 나타낸다.

$$\psi' = \frac{g}{f} \Phi' \quad (2)$$

유선함수 아노말리는( $\psi'$ )는 R1, R2에서 한파 발생 3

일 전부터 1일 후까지 시간 지연 합성한 300 hPa에서의 지위고도 아노말리를 이용하여 식(2)에 나타나는 중력가속도  $g(=9.81 \text{ m}^2\text{s}^{-1})$ , 코리올리 계수  $f(=2\Omega \sin(\phi))$ 와 지오폠펌셜의 관계를 통해 변환하였다.

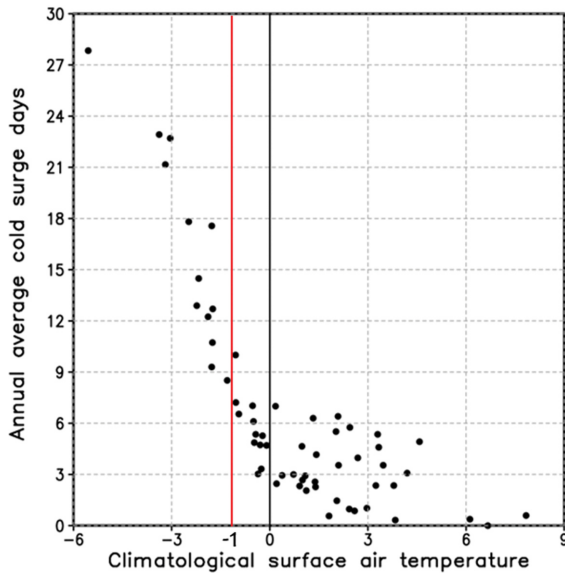
$$M = \frac{p}{2} \left( \frac{q^2}{(2|\nabla_H Q|)} + \frac{e}{|U| - C_p} \right) \cos \phi \quad (3)$$

식(3)에서  $M$ 은 파동의 위운동량(pseudo-momentum)으로 엔스트로피와 파의 움직임(wave action)의 합으로 나타나며,  $e$ 와  $q$ '는 각각 파의 에너지와 준지균 잠재와도의 섭동을 나타낸다. 본 연구에서  $p$ 는 300 hPa, ( $U, V$ )는 300 hPa에서 수평 바람의 겨울철 평년값을 이용하였고, Takaya and Nakamura (2001)의 방법을 이용하여  $C_U$ 와  $M$ 을 계산하였고,  $C_U$ 는 R1에서  $10 \text{ m s}^{-1}$ 를, R2에서  $12 \text{ m s}^{-1}$ 를 적용하였다.

### 3. 결과 및 분석

#### 3.1 한반도 한파 발생 빈도 및 기온 분포

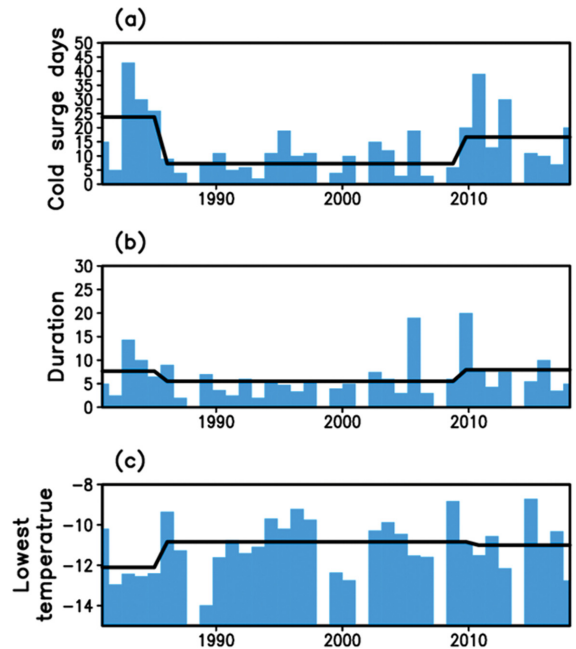
Figure 1은 한반도 정규관측소 59개 지점에서 나타



**Fig. 2.** A scatter diagram for climatological surface air temperature versus annual averaged cold surge days. Values from each station in Fig. 1 are used for this plot.

난 평균 한파일수(원의 크기가 클수록 평균적으로 많은 한파 발생)와 한파 발생 시점에서 종료 시점까지의 평균 아침최저기온을 보여준다. 기상청의 한파 주의보 발령 조건으로 나타나는 한파의 경우 같은 위도대의 관측 지점 중 내륙지역, 서해안, 동해안 순으로 많이 나타난다(Kim and Ho, 2012). 본 연구에서 또한 그림에서 살펴본 바와 같이 한파 발생 빈도는 동일한 순서로 나타났으며 이러한 차이가 나타나는 이유 중 하나는 지형적 효과로 태백산맥과 소백산맥을 기준으로 한반도 내 지역별로 한파일과 평균 아침최저기온의 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 한반도의 지형적 효과는 등온선으로 나타나는 일평균기온의 기후값으로도 확인할 수 있으며, 일최저기온의 기후값 또한 유사한 지형적 효과를 확인할 수 있다(not shown). 서해안에 위치한 지역은 한파 발생 시 중부지역에서는 아침최저기온이  $-12^{\circ}\text{C}$ 에서  $-9^{\circ}\text{C}$  사이, 저위도로 내려올수록 한파 발생 시 평균기온이 높아지면서  $-9^{\circ}\text{C}$ 에서  $-3^{\circ}\text{C}$  사이의 기온분포가 나타난다. 한편 태백산맥을 지나는 동쪽에서는 한파 발생 시 평균적으로  $-6^{\circ}\text{C}$ 부터  $-3^{\circ}\text{C}$ 의 기온이 나타나며, 남부 지역에서는  $-3^{\circ}\text{C}$ 에서  $0^{\circ}\text{C}$ , 제주 지역은 한파가 발생하더라도 평균적으로 영상의 기온이 나타났다. 한파 발생 빈도를 살펴보면 태백산맥과 소백산맥의 서쪽 내륙으로 들어올수록 한파 발생 빈도가 증가하며 각 산맥의 동쪽에 위치한 지역에서는 다시 한파 발생 빈도가 감소하였다.

지점별 겨울철 일평균기온의 평년값과 연간 한파일



**Fig. 3.** Regional time-series of (a) cold surges days, (b) duration and (c) lowest temperature during cold surges in R1. Changing point analysis is conducted and displayed (black line). Regime values are shown in Table 1).

수와의 관계를 나타낸 Fig. 2를 보면 특징적으로 겨울철 일평균기온의 평년 기온이  $-1^{\circ}\text{C}$  이하인 지역에서 기온이 감소할수록 한파일수가 거의 선형적으로 증가하며( $R^2 = 0.83$ ), 주로 중부와 내륙지방이 위치하는 반면,  $-1^{\circ}\text{C}$  이상인 R2 지역에서는 기온이 증가할 경우 한파일수가 줄어들 것이라는 예상과는 다르게 평년 기온과 무관한 한파일수가 나타났다( $R^2 = 0.29$ ), 상대적으로 저위도에 위치하거나 해안의 영향을 많이 받는 동해안과 남부지역이 위치했다.

한파가 연평균 3일 이상 나타나는 40개 지점에서의 연간 한파일수, 한파 지속기간, 한파 기간 아침최저기온을 살펴보면(Figs. 3, 4), 한파일수에 대하여 변화 시점탐지(changing point analysis) 결과에 따라 크게 세 기간(81~86, 87~08, 09~17)으로 나누어진다. R1에서는 한파횟수가 80년대 초반과 2000년대 말에 증가하는 Lee et al. (2018)의 결과와 한파일수, 지속기간은 비슷한 경향을 보였고(Figs. 3a, b), 지구온난화에 따른 지표의 평균기온 상승으로 아침최저기온 또한 지속적으로 상승할 것으로 예상하였으나, 지속적인 증가는 나타나지 않았다(Fig. 3c). R2의 경우에는(Fig. 4) 한파 발생기간 동안 아침최저기온은 R1과 비슷한 추세를 보였다(Figs. 4a, c). 한파 발생횟수는 R1에 비해 전반적으로 적지만 일부 연도에서 한파가 발생하는

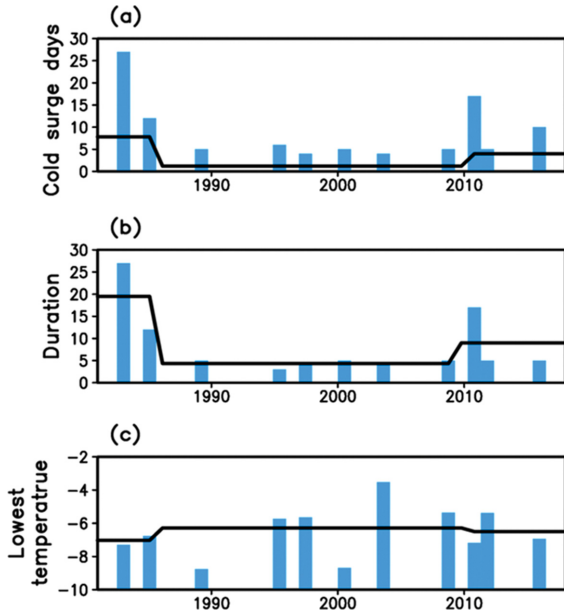


Fig. 4. Same as Fig. 3 but for R2 (Regime values are shown in Table 2).

Table 1. Average cold surge days, duration, number of occurrences, lowest temperature in R1 regime (Regime1: 1981~1986, Regime2: 1987~2008, Regime3: 2009~2017).

	Regime1	Regime2	Regime3
Cold surge days	23.8	7.79	16.25
Duration	7.66	5.51	7.95
Number of occurrences	2.67	1.68	2.44
Lowest temperature	-12.10	-10.84	-11.07

Table 2. Average cold surge days, duration, number of occurrences, lowest temperature in R2 regime (each regime years is same as R1).

	Regime1	Regime2	Regime3
Cold surge days	7.80	1.20	4.0
Duration	19.5	4.33	9.0
Number of occurrences	0.33	0.36	0.44
Lowest temperature	-7.03	-6.28	-6.50

경우 평년값을 회복하지 못하여 장기간 지속된 한파가 나타났다(Fig. 4b).

Fig. 3과 Fig. 4에 나타난 지역적 특성을 살펴보았을 때, R1과 R2의 연간 한파 발생일수, 아침최저기온의 장기 변화 경향은 비슷하였지만, 기간별 평균 한파횟수, 한파일수, 최저기온 관계에 차이가 있다(Tables 1, 2). R1에서는 한파 횟수가 아침최저기온에 민감하

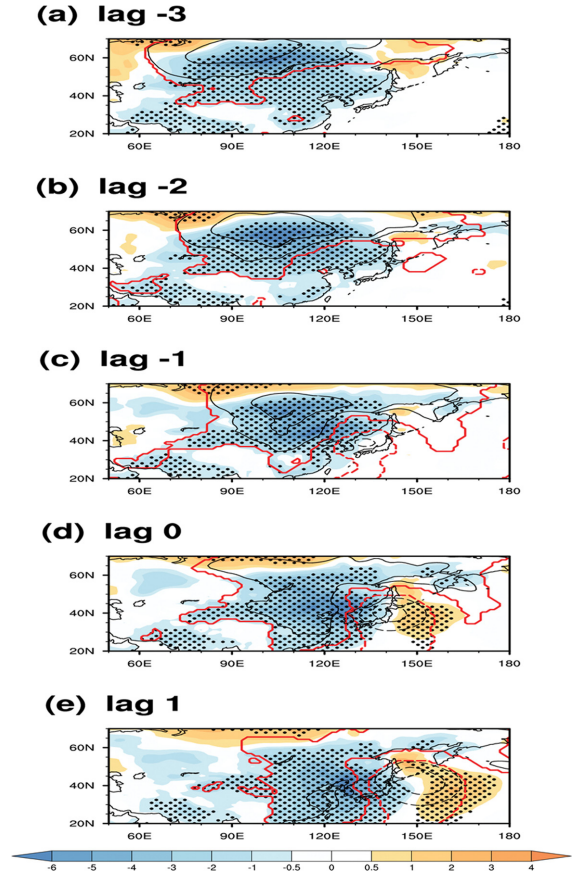


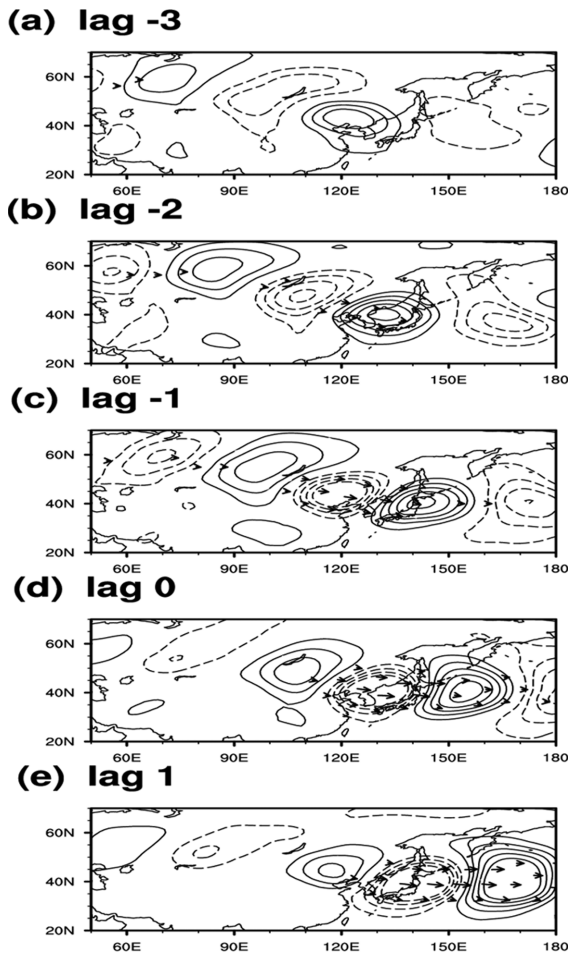
Fig. 5. Composite anomalies of surface air temperature (SAT) (shading, unit: °C) and sea level pressure (SLP) (contour, solid line and dash line show positive and negative, zero line is omitted; intervals: 4 hPa) during day -3 to day +1 relative to all cold surge occurrences at R1 in Asia (lat: 20°N~70°N, lon: 50°E~180°E). Significant values at the 95% confidence level of SAT and SLP are represented by black dots and red lines.

게 반응하여 기온의 증감에 따라 발생횟수가 변하였지만, R2에서의 한파횟수는 아침최저기온의 증감과는 무관하게 나타났다. 평균적인 지속기간은 R1에서는 큰 변화가 없지만, R2에서는 일부 연도에서 장기간 지속되는 한파가 나타나면서 지속기간이 길게 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로, 지역별로 감지되는 한파의 발생 메커니즘에 차이가 있을 것으로 보고 두 지역에 대한 종관장 구조 분석을 진행하였다.

### 3.2 종관장 구조

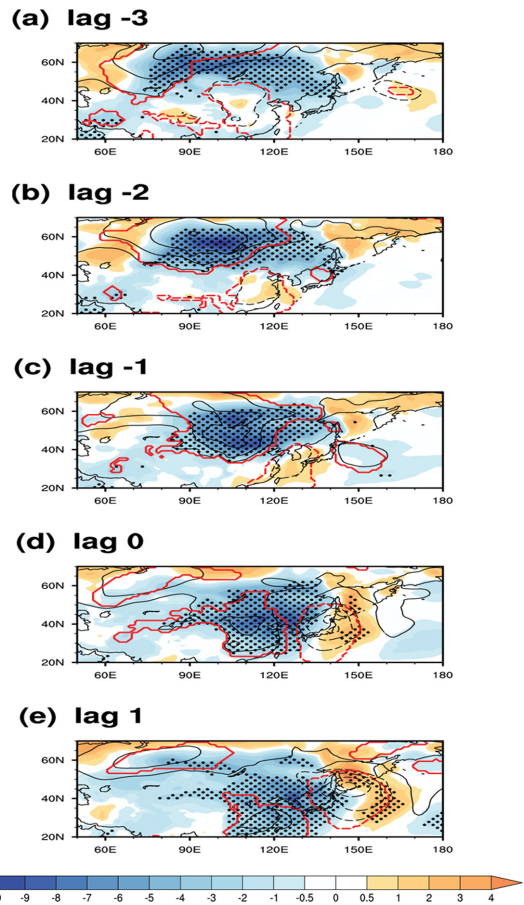
R1에서 발생한 한파의 시작일을 기준으로 해면기압과 지표 기온 아노말리(Fig. 5), 300 hPa에서의 유선함





**Fig. 6.** Composite anomalies of stream function (contour, solid line and dash line show positive and negative, zero line is omitted; unit:  $10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) at 300 hPa and wave activity flux (vector, unit:  $\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$ ) at 300 hPa. Period and area are same to Fig. 5.

수와 파동속을 시간 지연 합성하여 한파 발생 3일 전부터 1일 후까지 보면(Fig. 6), 한파 발생 전부터 전반적으로 동아시아 지역이 평년보다 한랭하며, 시베리아 지역에 넓게 고기압이 자리하고 그 상층에서는 저기압성 회전이 나타난다(Figs. 5a, 6a). 한파 발생 2일 전에는 시베리아 지역에서 고기압이 더욱 강화되고 한랭해지고(Fig. 5b), 상층 파동은 약하게 남동진하기 시작한다(Fig. 6b). 한파 발생 1일 전에는 시베리아 고기압이 중국 화북지역까지 남하하고 동해상 저기압이 나타나고 상층에서는 파동의 진행이 더 강해진다(Fig. 5c, 6c). 한파 당일 중국 화남지역까지 고기압이 남하하고 북서 태평양이 평년보다 기온이 높으며 저기압이 발달한다(Fig. 5d). 이와 함께 상층 파



**Fig. 7.** Same as Fig. 5 but for the cold surge detected at R2.

동이 강하게 동진한다(Fig. 6d). 한파 발생 1일 후에는 한반도에 한기가 여전히 자리하고 있지만, 고기압의 약화와 북서 태평양에 위치한 저기압의 영향으로 한기가 빠져나가며(Fig. 5e), 상층에서 또한 파동은 동진하면서 빠져나가는 모습이 나타난다(Fig. 6e).

R2에서 발생한 한파의 시작일을 기준으로 해면기압과 지표 기온 아노말리(Fig. 7), 300 hPa에서의 유선합수와 파동속을 시간 지연 합성하여 한파 발생 3일 전부터 1일 후까지를 보면(Fig. 8), 한파 발생 3일 전, 우랄산맥 부근에서부터 발달된 고기압이 나타나고, 고비사막 부근에 저기압이 발달하며 시베리아 지역에 한랭 아노말리가 강한 것이 뚜렷이 보인다(Fig. 7a). 상층 파동의 진행이 R1에 비해 상대적으로 빠르게 동진하는 경향이 나타난다(Fig. 8a). 한파 발생 2일 전에는 고비, 황하 지역에 저기압이 남아있으며, 고기압이 남동진하고(Fig. 7b), 더 강해진 순환과 함께 상층 파동은 빠르게 진행한다(Fig. 8b). 한파 발생 1일 전, 중국 화북지역까지 한기가 남하하기 시작하는 한편 한

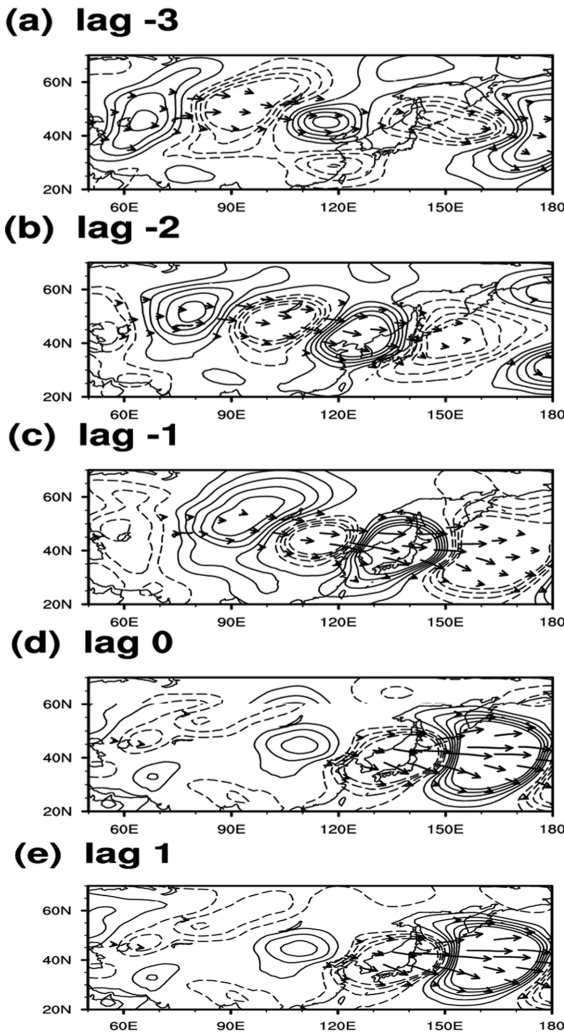


Fig. 8. Same as Fig. 6 but for the cold surge detected at R2.

반도에서는 지상 저기압이 위치한다(Fig. 7c). 이와 함께 3일 전 우랄산맥 부근에 위치했던 순환이 시베리아의 상층까지 진행하였고, 파동의 남동진이 강하게 나타난다(Fig. 8c). 한파 당일에는 평년보다 온난한 북서 태평양에서 저기압이 발달하며 남하한 고기압과의 경도 차이로 한반도에 한기가 빠르게 유입되어 기온이 급감하며(Fig. 7d), 동시에 상층의 파동은 강하게 남동진한다(Fig. 8d). 한파 발생 1일 후에는 고기압은 화남지역까지 하강하고 저기압은 북서 태평양에 위치하면서, 한반도 지역은 전날보다 한랭해지며(Fig. 7e), 상층 파동은 방향을 유지한 채 빠져나간다(Fig. 8e).

이와 같이 두 지역 모두 우랄산맥 부근에서부터 상층 파동이 동진하는 모습을 보이며 시베리아 고기압이 발달하여 동아시아로 확장하는 wave-train 형 한파

의 모습을 보이지만, 한파 발생 전 동아시아 지역의 상층 순환의 강도, 파동 진행 방향의 차이와 시베리아 고기압의 강도에서 차이가 나타난다. R1에서 발생한 한파는 상층 wave-train 형태로 파동과 시베리아 고기압 발달이 다소 약하더라도 평년보다 동아시아 지역이 한랭한 상태에서 한반도로 한기가 유입되어 발생하는 특성을 보이며, R2에서는 한파 발생 전부터 뚜렷하게 상층 순환과 파동의 진행이 강하게 나타나고, 이로 인해, 시베리아 고기압이 더욱 강화되었을 때 상층 파동이 한반도 남부까지 깊게 남동진하며 한반도의 기온이 급감하는 한파가 나타난다.

#### 4. 결 론

본 연구는 기상청 한파 주의보 정의에 따른 한파 발생의 지역적 특성을 조사하고 지역별 한파의 종관장을 분석하였다. 최근 37년의 겨울 동안 59개 지점에 대하여 지역별 한파 발생 시 연평균 발생횟수와 평균기온을 조사하여 지점별 한파 발생 빈도와 기온 분포가 지역적 특성에 따라 차이를 확인하였다. 연평균 3일 이상 한파가 나타나는 40개 지점에 대하여 지역별 기온 특성인 겨울철 일평균기온의 평년값과 한파 발생일수 변화를 기준으로 지역을 R1과 R2로 나누었다. R1 지역은 한반도에서 중부, 내륙지역과 같이 겨울철에 한랭한 기온이 지속적으로 유지되는 지점이 해당되었다. 반면, R2 지역은 한반도 남부지역과 해안지역 등 한랭한 기온이 지속적으로 나타나기 어려운 지역이 해당되었다. R1에 해당하는 지역에서 감지된 한파는 평년 기온과 한파일수가 거의 선형적인 관계로 나타났으며 R2 지역은 평년 기온과 무관하게 나타났다. 이후 두 지점의 한파 발생일을 기준으로 종관장에 대하여 시간지연 합성분석을 진행하였다. R1에서 감지된 한파는 한파 발생 전 시베리아 북쪽 지역 넓게 고기압이 위치하며, R2에서 감지된 한파에 비해 고기압이 약하게 발달하였다. 상층 파동이 동진하지만 파동이 약하게 나타나면서 시베리아 지역의 고기압이 강하게 발달하지 못했고 이미 평년보다 한랭한 한반도에 한기를 더 유입하여 한파로 나타났다. 반면, R2에서 감지된 한파는 한파 발생 전, 우랄 지역부터 시베리아 서쪽까지 고기압이 강하게 발달했으며, 한파 발생 이전부터 상층 순환이 빠르고 파동 진행이 강했다. 한파 당일이 다가올수록 시베리아 고기압의 발달과 한랭 아노말리의 강화가 뚜렷하게 보였으며, 상층 파동은 강하게 남동진하여, 한반도로 한기가 급격히 유입되는 한파가 나타났다.

한파를 한파 주의보로 정의함으로써 한반도 지역에 따라 특징적으로 나타나는 한파 발생 전 지표 기온, 해면기압의 분포와 상층 파동속의 강도, 진행 방향을

비교할 수 있었으며 이를 활용하여 한반도 내에 한파 발생 전 예상 피해 지역을 설정할 수 있고 저체온증, 동상과 같은 한랭 질환 예방에 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 이러한 한반도 내 지역별 특성은 한파를 어떻게 정의하는지에 따라 다르게 나타날 수 있으며, 정의에 따른 한파 발생 민감도에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

## 감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 감사를 드립니다. 이 연구는 부경대학교 자율창의학술연구비(2018년) 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCE

- Jeon, M. J., and Y. Cho, 2015: An analysis of a winter-time temperature change and an extreme cold waves frequency in Korea. *J. Climate Change Res.*, **6**, 87-94, doi:10.15531/KSCCR.2015.6.2.87 (in Korean with English abstract).
- 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.
- Kim, B.-M., J.-H. Jeong, and S.-J. Kim, 2009: Investigation of stratospheric precursor for the East Asian cold surge using the potential vorticity inversion technique. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **45**, 513-522.
- \_\_\_\_\_, 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. *Nature Commun.*, **5**, 4646, doi:10.1038/ncomms5646.
- Kim, J.-W., and C.-H. Ho, 2012: Differences in the occurrence of Korean cold surge by definition method and region. *Proc., The Autumn Meeting of KMS*, Korean Meteor. Soc., 276-277 (in Korean).
- Lee, H.-Y., J. Kim, I.-G. Park, H. Kang, and H. Ryu, 2018: Local enhancement mechanism of cold surges over the Korean peninsula. *Atmosphere*, **28**, 383-392. doi:10.14191/ATMOS.2018.28.4.383 (in Korean with English abstract).
- Park, C.-Y., Y.-E. Choi, J.-Y. Moon, and W.-T. Yun, 2009: Classification of climate zones in South Korea considering both air temperature and rainfall. *J. Korean Geograph. Soc.*, **44**, 1-16 (in Korean with English abstract).
- Park, T.-W., C.-H. Ho, and S. Yang, 2011a: Relationship between the arctic oscillation and cold surges over East Asia. *J. Climate*, **24**, 68-83, doi:10.1175/2010jcli3529.1.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, S.-J. Jeong, Y.-S. Choi, S. K. Park, and C.-K. Song, 2011b: Different characteristics of cold day and cold surge frequency over East Asia in a global warming situation. *J. Geophys. Res.*, **116**, D12118, doi:10.1029/2010JD015369.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and Y. Deng, 2014: A synoptic and dynamical characterization of wave-train and blocking cold surge over East Asia. *Clim. Dyn.*, **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. *Clim. Dyn.*, **45**, 2469-2484, doi:10.1007/s00382-015-2483-7.
- Takaya, K., and H. Nakamura, 2001: A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 608-627.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2005a: Mechanisms of intraseasonal amplification of the cold Siberian high. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 4423-4440.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2005b: Geographical dependence of upper-level blocking formation associated with intraseasonal amplification of the Siberian high. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 4441-4449.
- Woo, S.-H., B.-M. Kim, J.-H. Jeong, S.-J. Kim, and G.-H. Lim, 2012: Decadal changes in surface air temperature variability and cold surge characteristics over northeast Asia and their relation with the Arctic Oscillation for the past three decades (1979-2011). *J. Geophys. Res.*, **117**, D18117, doi:10.1029/2011JD016929.
- Yang, X., G. Zeng, G. Zhang, and Z. Li, 2020: Interdecadal variation of winter cold surge path in East Asia and its relationship with Arctic sea ice. *J. Climate*, **33**, 4907-4925. doi:10.1175/JCLI-D-19-0751.1.
- 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.Je.25.3.435 (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.