

한반도 한파의 특성 변화 및 대규모 기후 변동성과의 연관성

Changes in cold surge characteristics over the Korean Peninsular and their
relation to large-scale climate variation

신선희

한반도 한파의 특성 변화 및 대규모 기후 변동성과의 연관성

Changes in cold surge characteristics over the Korean Peninsular and their
relation to large-scale climate variation

신선희

발간사

‘기후변화’로 인한 이상기후는 전세계적으로 예전의 기상이변 규모를 크게 뛰어 넘었으며, 날이 갈수록 이상기후 현상은 그 빈도와 강도가 높아지고 있다. 지구 온난화가 진행됨에 따라 전 지구 평균기온이 지속적으로 상승하고 있음에도 불구하고, 한반도를 비롯한 동아시아와 북미, 유럽 등의 중·고위도 지역에서는 한파와 폭설과 같은 이례적인 겨울철 이상 기후 현상들이 기록되고 있으며, 겨울철 악기상과 기후 재앙의 발생 횟수는 오히려 증가하고 있는 추세이다. 이에 따라 APCC 계절 예측 시스템에서 겨울철 예측성 향상을 위한 방안을 모색하게 되었다.

본 연구는 우리나라에서 발생한 한파를 대상으로 장기변동성 분석과 함께 한파를 유형별로 구별하여 각 유형의 종관 특성과 대규모 기후 변동과의 연계성을 분석하였다. 기존 연구가 대부분 동북아시아를 대상으로 수행한 광역 한파 연구인 점에 비추어 본 연구는 한반도에서 발생한 한파를 집중적으로 분석한 연구로 그 필요성과 활용성이 매우 크다고 하겠다. 세 가지 유형으로 구분된 한파와 연관된 대규모 대기현상의 전조를 토대로 관측자료 기반의 한파 예측 가능성이 제시되었으며, 향후 역학모형으로 모사한 계절내 예측 자료를 대상으로 본 연구 결과를 활용하면 겨울철 한파의 예측 가능성과 계절내 예측 자료의 활용 가능성을 검증할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구보고서가 발간되기까지는 많은 분들의 도움이 있었다. 우선 연구보고서를 총괄하고 최종 집필한 신선희 박사의 노고에 감사드리며 보고서의 수준을

제고하도록 좋은 논평을 해주신 익명의 검토자들께도 감사의 뜻을 전한다. 또한 연구보고서가 순조롭게 진행될 수 있도록 다방면으로 도와준 연구본부장 유진호 박사와 다른 진행위원들에게도 감사의 마음을 전한다. 본 연구보고서가 밑거름이 되어 향후 관련 연구들이 지속되고 부족한 부분들을 계속 채워나가길 바란다.

2017년 1월
APEC 기후센터
원장 정 홍 상

ABSTRACT

This study examines the overall changes in the characteristics of winter cold surges over Korea for the period 1979–2014 using ERA–Interim reanalysis data and the relationship between these cold surges with large-scale climate variability. The cold surge is defined based on the synoptic criteria such as the strengthening of the Siberian high and the subsequent abrupt surface temperature drop within 2 days. Using the dynamical indices of cold surges developed by Park et al. (2015), cold surges over Korea were classified into three types according to their dynamical origins: wave type, blocking type, and local type. The wave type cold surge is associated with a southeastward expansion of the Siberian High and a northerly wind, which is caused by growing baroclinic waves. The blocking type cold surge is associated with a southward expansion of the Siberian High originated in the Arctic and a northeasterly wind, which is caused by subarctic blocking and deepening of the East Asian coastal trough. The local type is associated with fast traveling upper-level waves.

For 36 winters (1979–2014), the detected 278 cold surges were classified into the 3 major types, resulting in 144 (51.8%), 109 (39.2%) and 24 (9%) cases under wave, blocking, and local type cold surges, respectively. Compared with wave or local type cold surges, blocking type cold surges exhibit a longer duration and stronger intensity. Examination of the long-term change in cold surge occurrences shows different interdecadal and intraseasonal variations among the 3 types. The number of total cold surge days decreased slightly corresponding to the warming trend over Korea due to climate change, while blocking type cold surge days increased

despite the warming trend, especially in December. Moreover, the blocking type tends to occur more frequently with a longer duration and stronger intensity, which leads to exceptional extreme cold winter. The number of blocking type cold surge days is strongly correlated with the monthly mean air temperature, with a correlation coefficient of -0.79 .

The wave type cold surge displays no association with the phase of large-scale climate indices, while the blocking type cold surge has a dependency with respect to the Arctic Oscillation (AO), Western Pacific (WP) pattern, El Niño/Southern Oscillation (ENSO), Pacific North America (PNA) pattern and Pacific Decadal Oscillation (PDO). It is further found that the occurrence of these cold surges is more likely when the AO, WP, ENSO is in its negative phase and/or the PNA and PDO is in its positive phase, which are enhanced the East Asian monsoon circulation.

Cold surges of different dynamic origins may have different interdecadal variation, so it is important to investigate long-term variation of total occurrences as well as for the different types. Therefore decadal changes in cold surge characteristics over Korea are analyzed. Power spectrum analysis of temperature reveals that the low-frequency variabilities with a period longer than 10 days are significantly enhanced, while the high-frequency variabilities with a period shorter than 10 days are weakened in the 2000s. This corresponds to the result that cold surges were stronger and lasted longer during the 2000s compared to those that occurred in the 1990s. The more frequent strong and long-lasting cold surge occurrences in the 2000s are strongly associated with the more frequent strong negative phase of AO and WP, which shows an in-phase relationship with East Asia Winter Monsoon circulation.

목 차

1. 서론-----	1
2. 자료 및 분석 방법-----	5
2.1 자료-----	5
2.2 한파의 정의-----	5
2.2 한파 형태의 분류-----	7
3. 한반도 한파의 시·공간적 특성-----	10
3.1 한파의 종관적 특징-----	10
3.2 한파 발생의 계절내 특성-----	14
3.3 한파 발생에 영향을 미치는 기후인자 분석-----	20
3.4 한파 발생의 장주기 변동성-----	27
4. 결론 및 토의-----	39
Ⅰ REFERENCE-----	42

1. 서론

인류 활동에 의한 인위적인 요인으로 지구 온난화가 진행됨에 따라 전 지구 평균 기온은 지속적으로 상승하고 있으며, 한반도를 비롯한 동아시아 겨울철 기온 또한 꾸준히 증가하고 있다. 이로 인한 기후의 변화는 대기 순환의 변화를 야기 시키며 이상 기후 현상 또한 빈번해 지고 있는 실정이다. 한반도를 비롯한 동아시아와 북미, 유럽 등의 중·고위도 지역에서 한파와 폭설과 같은 이례적인 겨울철 이상 기후 현상들이 관측되고 있으며, 이러한 겨울철 악기상과 기후 재앙의 발생 횟수는 증가하고 있는 추세이다. 2008년 남중국에서는 이례적인 폭설이 관측되었고 (Wen et al 2009; Zhou et al 2009; Wu et al 2011), 2010년 중국 북부와 한반도에서는 70년 만의 최대 폭설과 이상저온이 기록되었다. 2014년 미국 중서부와 동부 지역, 그리고 캐나다에서는 20년 만에 기록적인 한파가 발생하여 약 50억 달러에 이르는 경제적 손실을 초래하였다. 겨울철 이상 기후 발생에 따른 사회·경제적 피해가 급증함에 따라 겨울철 이상 기후 현상에 대한 감시 및 분석 체계의 구축이 요구되고 있다.

겨울철 대표적인 이상기후 현상으로는 한파(cold surge)와 혹한(cold day)을 들 수 있다. 두 현상은 겨울철 낮은 기온과 연관된다는 점에서 비슷해 보이지만 이들을 정의하는 방식에서 차이가 난다. 동아시아 한파는 시베리아 고기압의 강화와 이로부터 야기되는 차갑고 건조한 대륙 기단의 이류로 1~2일 내에 지표 온도가 급격히 감소하는 현상으로 정의하며 (Zhang and Wang; 1997; Chen et al, 2004; Jeong et al, 2005), 한국 기상청은 24시간 이내에 10도 이상의 기온 하강이 예상될 때 한파주의보를 발표한다. 반면 혹한일은 분위수 또는 특정 값 이하로 기온이 떨어질 때로 정의된다. 세계이상기후 (World Meteorological Organization, WMO)는 일 최고기온이 10분위보다 낮은 날을 혹한 현상의 일종인 한랭일로 정의하고 있다. Part et al (2011) 등은 지구 온난화가 진행되면서 평균 기온 증가와 함께 혹한일의 빈도는 뚜렷하게 감소 추세를 보이지만 한파는 지구 온난화에도 불구하고 여전히 빈번히 발생하고 있음을 밝힌바 있다.

한파에 대한 연구는 주로 종관규모 역학을 중심으로 진행되어 왔다 (Joung and Byun, 1987; Lim, 1995; Park et al., 2014; Ryoo et al., 2005, Park et al., 2014, 2015). Joung and Byun (1987)과 Lim(1995)은 한반도에 한파가 발생했을 당

시 운동에너지와 바람장을 통해 한파 발생과 제트의 연관성을 분석하였으며, Ryoo et al (2005)에서는 한반도 한파 발생시 상하층 종관장을 분석해 60°E로부터 발달한 경압 파동이 한반도 폭한을 유발시킨다고 밝혔다. Park et al (2014, 2015)는 동아시아 한파를 분류하기 위해 클러스터링 기법을 이용해 상층 대기 패턴이 크게 두가지 유형, 파동형(wave-train type)과 저지고기압형 (blocking type)으로 구별됨을 밝혔고, 더 나아가 역학적 대기 순환을 고려하여 (Pelly and Hoskins, 2003) 한파를 분류하는 역학적 한파 지수를 개발하였다. 또한 웨이브 타입 한파 보다 블라킹 타입 한파의 강도가 더 크며, 블라킹 타입의 한파는 극진동 지수가 음의 phase일 때 발생 빈도가 높음을 제시하였다.

동아시아 한파를 겨울철 대기의 대규모 변동성의 하나로 간주하고 대규모 대기 변동성과의 통계적 연관성을 분석하는 연구 또한 진행되었다. 동아시아 한파 발생에 영향을 주는 기후 인자로 극진동 (Arctic Oscillation), 매든-줄리안 진동 (Madden-Julian Oscillation, MJO), 남방진동 (Southern Oscillation), 성층권 변동성 등이 분석되었다 (Chen et al., 2004, Gong and Ho, 2004; Jeong and Ho, 2005; Jeong et al., 2005, 2006; Kim et al., 2009; Park et al., 2010, 2011b). Chen et al (2004) 은 동아시아 한파 발생 빈도와 ENSO와 상관성을 밝혔고 라니냐 해에 한파 발생이 증가함을 제시하였다. Jeong et al (2005) 은 겨울철 표층 기온과 동아시아 지역에서의 한파가 MJO와 관련이 있고, MJO 대류의 중심이 인도양에 위치할 때 동아시아 한파의 강도가 강화됨을 제시하였다. 또한 Kim et al (2009)은 최근 카라-바렌츠해 지역의 급격한 해빙 감소와 관련되어 대류권에서 성층권으로의 파동 전파가 변화함에 따라 1~2월에 성층권 극소용돌이의 강도가 약해져 음의 북극진동을 유도하고 이는 중위도 지역에 찬 공기를 이류시킨다고 제시하였다. Jeong et al (2006) 은 시베리아 지역의 하부 성층권에서 대기 단열변화가 대류권에 영향을 주어 약 일주일 후에 동아시아 지역 한파 발생을 유도할 수 있음을 제시하였다. 또한 Gong and Ho (2004)와 Jeong and Ho (2005)는 음의 AO phase와 관련된 북극 진동 및 극소용돌이의 약화, 제트기류의 사행이 동아시아 제트류를 강화하고 시베리아 고기압을 강화함으로써 한파 발생을 위한 최적의 조건을 제공한다고 하였다.

최근 급격한 기후변화로 인해 한파 발생과 관련된 다양한 인자들이 변화함에 따라 동아시아 지역의 한파 발생 또한 뚜렷한 장기 변동을 나타내고 있다. 동아시아 지역

의 겨울 기온 변동성 및 한파 발생의 장기 변동성을 연구한 연구들에 따르면, 1970년대부터 2000년 초반까지 동아시아 지역의 겨울철 기온은 뚜렷이 증가하였고, 시베리아 고기압과 동아시아 몬순의 강도는 감소하는 경향을 보인다고 밝혔다 (Gong and Ho, 2002; Chen et al., 2004; Wang et al., 2009). 1950년 이후로 동아시아 지역에서 최소 6일 이상 추운 날이 지속되는 혹한일 발생 빈도수는 지속적으로 감소하였지만 (Zhai and Pan, 2003; Zhou and Ren, 2011; Jlang et al., 2012), Chen et al (2004)와 Ou et al (2015)는 동아시아 지역에서 한파의 발생 빈도 추세는 1980년대에서 1990년대에는 감소하지 않았고 이후 2000년대는 한파 발생 빈도가 오히려 증가하고 있다고 보고하였다. Heo and Lee (2006)는 최근 겨울철 이상저온 빈도의 감소경향이 뚜렷하게 나타나며 겨울철 이상기온 출현에 동아시아 겨울 몬순 및 시베리아 고기압 그리고 극진동이 영향을 미친다고 보고하였다.

한파 연구의 대부분은 동아시아 지역을 대상으로 이루어져 왔다. 동아시아에서의 한파 발생은 열대로부터의 기후강제력과 북극 및 고위도 인자의 영향을 함께 받으므로 한파가 감지되는 영역에 따라 한파 특성이 민감하게 달라질 수 있다. 동아시아 영역은 중국 동남부의 많은 부분을 포함하므로 한반도의 겨울철 기후 특성을 파악하기 위해서는 한반도에서 발생하는 한파의 특성이 먼저 분석되어야 할 것이다. 그림 1은 한반도 (120°E - 130°E , 35°N - 45°N)에서 영역 평균된 겨울철 온도와 북극 진동 (AO)의 power spectrum을 보여주는 것이다. 2000년을 전후로 지구 온난화의 효과가 극대화되고 최근 이례적인 한파가 기록된다는 점에서 우리나라 영역에서 발생하는 한파 연구의 필요성을 부각하기 위해 2000년을 기준으로 기간 나누어 (1979-2000, 2001-2014), 각 기간에 대한 기온과 AO의 변동 주기를 분석하였다. 2000년 이전에는 수일 이내의 기온 변동성이 강한데 반해, 2000년 이후에는 10일 이상의 장주기 기온 변동성이 커짐을 볼 수 있다. 기온의 주기 변화와 함께 AO 주기의 변화 또한 2000년 이후 10일 이상의 주기 변동이 강화됨을 알 수 있다. 이는 장주기 한파의 발생이 빈번해 짐을 암시하는 결과라 할 수 있으며, 2000년 이후 AO가 우리나라 겨울철 기온에 미치는 영향이 커졌음을 제시하는 결과라 할 것이다.

4 | 한반도 한파의 특성 변화 및 대규모 기후 변동성과의 연관성

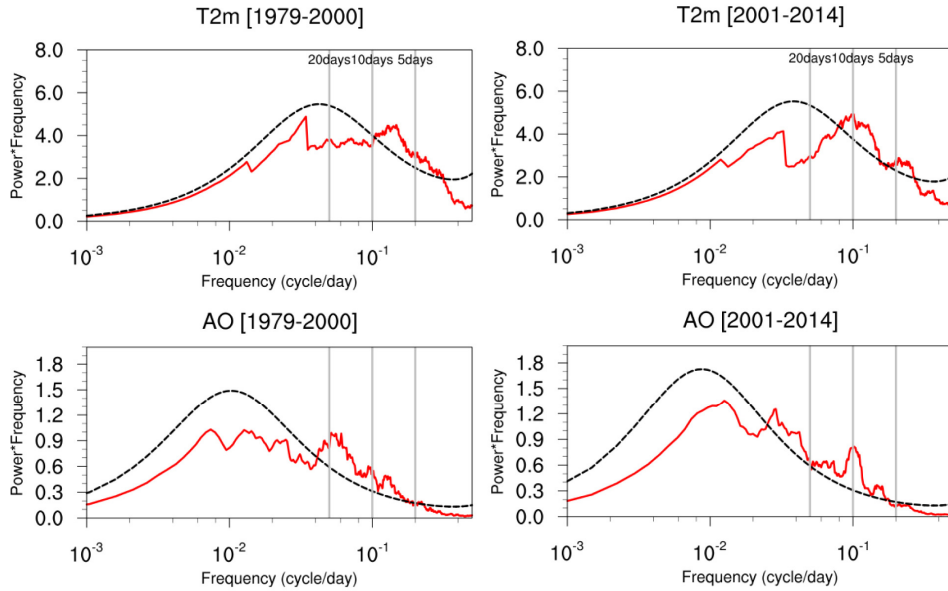


Figure 1 Power spectra of daily mean winter SAT averaged over Korea and AO in 1979-2000, and 2001-2014. The black curve in each figure represents the 95% confidence level. Three gray vertical lines indicate (from left to right) 20, 10, and 5 days.

본 연구에서는 Park et al (2008, 2011)의 방법론에 따라 한파의 형태를 구분하고 그 특성을 살펴보았지만, 한반도에 발생하는 한파의 특성을 분석하였다는 것과 한파 발생의 시간 변동 특성을 살펴보았다는 점에서 앞서 연구와는 차별된다. 한반도 한파의 시간 변동성을 유형별로 나누어 다양한 시간 규모 (계절 내 특성, 경년 변동성, 장기 변동성)에서 그 특성을 제시 하고자 하였다. 또한 다양한 기후 지수들이 한반도 한파 발생에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 이와 더불어 한파 발생의 변동성이 겨울철 기온에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

2. 자료 및 분석 방법

2.1 자료

한반도에서 발생한 한파를 정의하고 겨울철 기온에 미치는 영향을 살펴보기 위해 European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Re-Analysis Interim (ERA-interim) 자료 (Dee et al., 2011)의 일평균 기온과 해면기압을 사용하였다. 또한 한파의 형태를 분석하고 한파 특성의 변화 추이를 살펴보기 위해 대기 상·하층 지위고도를 사용하였다. 한반도 한파 발생에 영향을 미치는 대규모 기후 인자를 살펴보기 위해, 미국 기후진단센터 (Climate Diagnostic Center, CDC)와 미국 기후예측센터(Climae Prediction Center, CPC)의 홈페이지에서 제공되는 기후 지수 자료 및 동아시아 겨울 몬순 지수 (East Asia Winter Monsoon Index, EAWMI)를 사용하였다. 자세한 정보는 Table 1에 나타내었다. 기간은 1979/80 ~ 2014/15의 36년간 겨울철(11월 ~ 3월)이 분석되었다.

Table 1 Climate indices used in this study.

	Climate Index (reference)	Source
AO	Arctic Oscillation (Thompson and Wallace, 2000)	NCEP/CPC
E A W MI	East Asia Winter Monsoon Index (Wang and Chen, 2014)	
EU	Eurasian Pattern	NCEP/CPC
MEI	Multivariate ENSO Index (Wolter and Timlin, 1998)	NCEP/CDC
NAO	North Atlantic Oscillation (Barnston and Livezey, 1987)	NCEP/CPC
ONI	Oceanic Nino Index	NCEP/CPC
PDO	Pacific Decadal Oscillation Index (Zhang et al., 1997)	NCEP/CDC
PNA	Pacific/North American Pattern (Barnston and Livezey, 1987)	NCEP/CPC
WP	Western Pacific Index (Barnston and Livezey, 1987)	NCEP/CPC

2.2 한파의 정의

본 연구에서 한파는 시베리아 고기압의 강화와 급격한 기온의 하강을 나타내는 종관적 근거를 바탕으로 정의된다. Zhang et al. (1997)와 Jeong and Ho (2005)의 한파 탐지 방법론에 따라, 다음과 같은 두 조건이 만족될 때 한반도에서의 한파가 정의되었다. 첫째, 시베리아 남동쪽 (90°E-115°E, 35°N-55°N)의 지표 고기압이 강화되

어야 한다. 지표 고기압의 중심은 Fig 2에 표시된 시베리아 영역 (파란 박스) 내에 위치하여야 하고, 그 중심의 해면기압이 1030hPa 보다 커야 한다. 지표 고기압의 중심 격자점은 Zhang and Wang (1997)에 따라 1000hPa 지위고도의 값이 주변 8개 격자점 값보다 큰 지점으로 결정된다. 두 번째로 한파를 탐지할 지역인 한반도 (120°E-130°E, 35°N-45°N, 빨간 박스) 에서의 급격한 기온 하강이 감지되어야 한다. 지표 기온의 감소는 24 ~ 48 시간 내에 감지되어야 하는데, 그 값이 36년간 겨울철 일평균 기온 아노말리의 표준 편차 보다 1.5배 커야 한다. 기본적으로 추운날이어야 하므로 일평균 온도가 겨울철 평균 온도 이하이어야 한다. 한파의 종료 시점은 일평균 기온이 겨울철 일평균 기온 아노말리의 표준 편차보다 -0.5배 이상이 되는 시점으로 정의한다. 또한, 이전 한파가 종료되기 이전에 새로운 한파를 탐지하게 되면, 두 한파를 연속적인 하나의 한파로 고려한다.

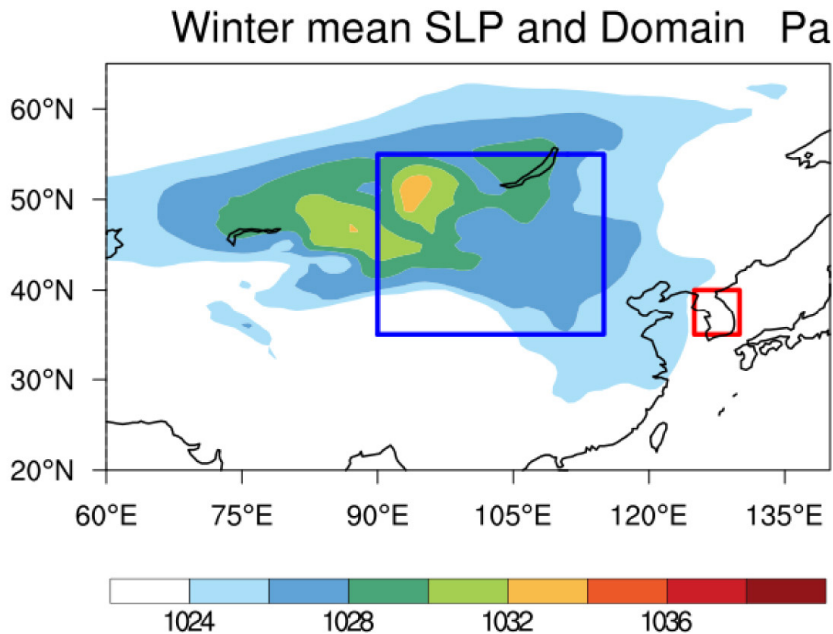


Figure 2 Spatial distribution of mean sea level pressure (SLP) during winter season (November to March, NDJFM hereafter) from 1979 to 2014. The blue and red squares indicate the region of Korea (120°E-130°E, 35°N-45°N) and Siberian High (blue solid line, 90°E-115°E, 35°N-55°N).

이러한 종관적 기준에 근거하여 36년간 278개의 한파가 한반도에서 발생한 것으로 나타났고, 평균적으로 매달 1.54회의 한파가 발생하는 것으로 나타났다. 이전 연구들에서 동아시아에서 한파가 매달 1.85회 (Zhang et al., 1997), 1.4회 (Jeong and Ho 2005), 1.56회 (Woo et al., 2012) 발생하는 것과 유사한 결과라 할 수 있다.

2.2 한파 형태의 분류

Park et al (2008, 2011)은 클러스터링 기법을 사용하여 상층 대기 순환장의 형태에 따라 동아시아 한파를 크게 두가지 타입, 상층 웨이브 타입과 블라킹 타입으로 구분한 바있다. 블라킹 타입의 한파는 음의 AO 일때 자주 발생하는 경향이 있으나 웨이브 타입의 한파는 AO Phase와 무관하게 발생한다 하였다. Park et al (2015)은 한파 발생시에 2PVU (potential vorticity unit) 면의 온위 패턴에 두드러진 특징이 나타남을 근거로, 아북극 지역 (R1, 110E-140E, 65N-90N), 북동 중국 (R2, 110-140E, 35-60N), 북서태평양 (R3, 143E-173E, 30N-55N) 지역 평균 값의 차이를 이용하여 두 한파의 유형을 구분하는 역학적 한파 인덱스를 개발하였다. 이 연구에서는 Park et al (2015) 이 개발한 한파 인덱스를 사용하였으며, 계산의 편의성을 위해 온위 대신 300hPa 지위고도 아노말리를 사용하여 다음과 같이 한파 지수 (WI, BI) 를 계산하였다 (온위면에서의 한파 특징이 지위고도 면에서도 뚜렷이 나타남을 확인하였다).

$$WI \text{ (Wave train Index)} = R3 - R2$$

$$BI \text{ (Blocking Index)} = R1 - R2$$

그 결과 총 278건의 한파가 그림 3과 같이 분류되었다.

- (1) wave type ($WI > 0$ and $WI > BI$) : WI 가 양수이며 BI 보다 큰 값을 가질 때 웨이브 타입의 한파로 분류된다. 유라시아 대륙고 우리나라 북부, 북서태평양에 ridge-trough-ridge 의 뚜렷한 웨이브 패턴의 구조를 나타낸다. 한파 발생 건수 중 약 52%의 한파 (144건)가 이에 해당되며, 총 한파 일수는 438일로 웨이브 타입 한파의 평균 지속 기간은 약 3일 이다.

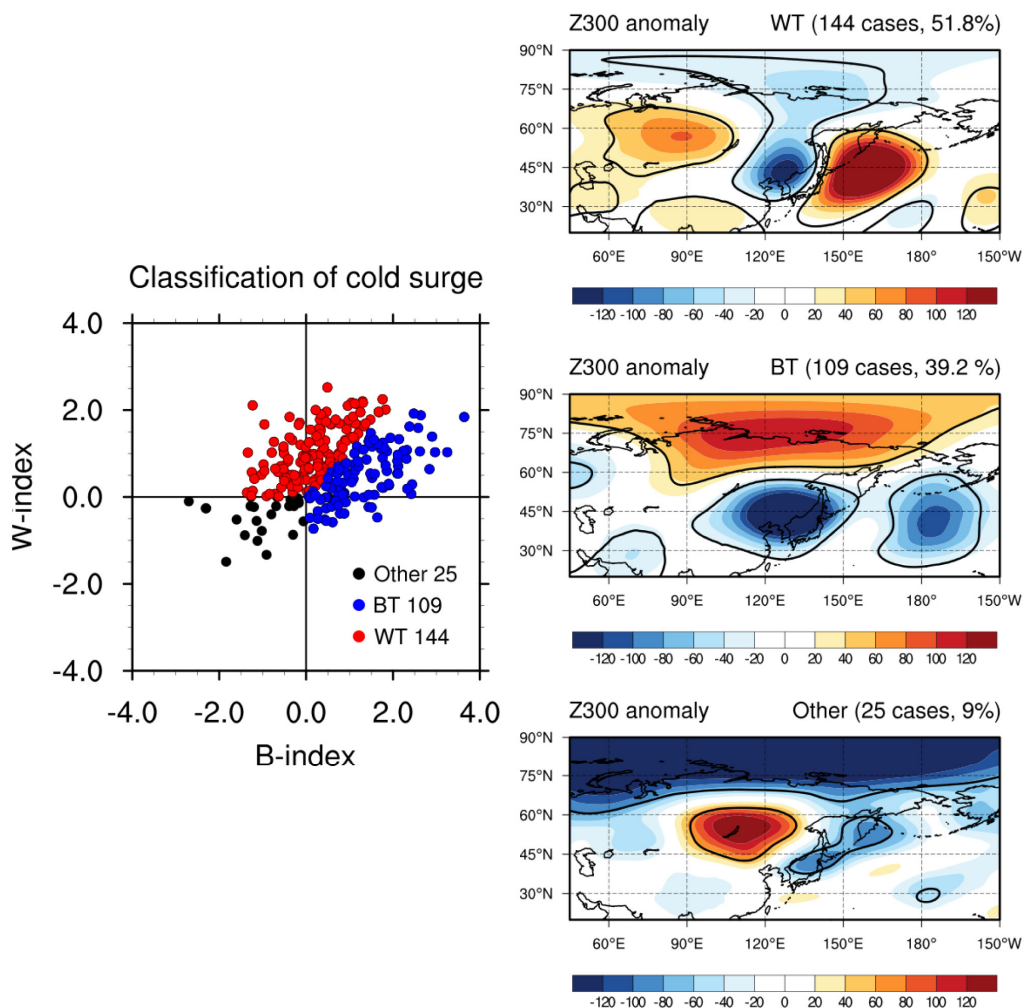


Figure 3 (Left) Scatter plots of BI and WI for the wave type (red dots), blocking type (blue dots), and unclassified (black dots) cold surges classified by the dynamical indices developed by Park et al.(2015). (Right) Composite maps of geopotential height anomaly at 300hPa (Z300) for wave, blocking, mixed types and unclassified cold surges. The significant values at 95% confidence level are indicated by thick black contours.

- (2) blocking type ($BI > 0$ and $WI < BI$) : BI 가 양수이며 WI 보다 큰 값을 가질 때 블라킹 타입의 한파로 분류된다. 이는 아북극 지역과 우리나라 상층에 뚜렷한 양과 음의 아노말리를 보이는 쌍극 구조의 특징을 보인다. 한파 발생 건수 중 약 39%의 한파 (109건)가 이에 해당되며, 총 한파 일수는 440일로 블라킹 타입 한파의 평균 지속 기간은 약 4일이다. 블라킹 타입의 한파가 웨이브

타입의 한파 보다 더 오래 지속됨을 알 수 있다.

- (3) unclassified type ($BI < 0$ and $WI < 0$) : WI 와 BI 가 음수인 한파들은 대륙권 상층에서의 웨이브 형태의 순환이나 아북극 지역의 블라킹과 같은 대규모 대기 순환을 동반하지 않은 한파이다. 아북극지역에 음의 지위고도 아노말리가 나타나며 바이칼호를 중심으로 강한 양의 지위고도 아노말리가 존재한다. 또한 우리나라 동안에서 캄차카 반도에 걸쳐 음의 지위고도 아노말리가 나타난다. 한파 발생 건수 중 약 9%의 한파 (25건)가 해당되며, 총 한파 일수는 59일로 일반적으로 추운 겨울철 날씨에 지역적으로 약하게 발생하고 소멸하는 한파로, 지속 기간은 약 2일이다.

3. 한반도 한파의 시·공간적 특성

3.1 한파의 종관적 특징

한파 발생 전후의 대규모 대기 순환 및 기온 변화를 살펴보기 위해, 한파 유형별로 합성도 분석을 실시하였다 (그림 4~그림 6). 그림 4는 웨이브 타입의 한파 발생 6일 전부터 6일 후까지 상층 대류권, 해면 기압, 지표 기온 아노말리의 변화 양상을 나타낸 것이다. 한파 발생 4일 전 유라시아 북서쪽 대류 상부에서부터 동아시아 쪽으로 ridge-trough-ridge와 같은 웨이브 형태의 대기 섭동이 나타나기 시작하며, 2일 전 우랄 산맥 지역, 바이칼호 그리고 우리나라 북동쪽에 중심을 잡은 기압 패턴이 뚜렷한 웨이브 형태를 보인다. 이러한 웨이브 패턴은 서서히 남동진하며 한파 발생 2일 후에 소멸하는 것을 볼 수 있다. 해면 기압장에서도 유라시아 대륙 내부에서 고기압과 저기압의 웨이브 형태가 발생하여 시간에 따라 점차적으로 남동진한다. 한파 발생 3일 전 북유럽에서 바이칼 호까지 이르는 거대한 고기압이 형성되고 그 고기압은 한파 발생 직전까지 팽창하였다가 한파 발생 후 급속도로 약화됨을 볼 수 있다. 시베리아와 동아시아에 위치한 고기압-저기압 couplet 구조는 북쪽의 한기를 동아시아로 유입시켜 한반도의 한파를 발생시키는 직접적인 역할을 한다. 시베리아 고기압이 성장해가던 바이칼호 주변에서 차가운 공기가 생성되고 점차적으로 남동진하다가 한파 당일 우리나라를 중심으로 차가운 공기가 위치한다. 이후 차가운 공기는 급격히 따뜻해지고 한반도 동쪽으로 빠져나가 기온이 회복됨을 볼 수 있다. 대기의 상층 지위고도와 하층의 기압 아노말리 패턴은 높이에 따라 서쪽으로 기온 전형적인 경압적 웨이브 구조의 특징을 보여준다.

그림 5는 블라킹 타입 한파 발생 전후의 상하층 대기 변화 양상을 나타낸 것이다. 상층 지위고도 아노말리를 살펴보면, 한파 발생 4일전 아북극 지역과 동아시아에 뚜렷한 양과 음의 아노말리가 나타난다. 이러한 쌍극 구조는 한파 발생 전까지 매우 강화되었다가 발생 2일 후 서서히 소멸하는 것을 볼 수 있다. 아북극지역에 위치한 양의 아노말리 (blocking)는 연직적으로 순압구조를 나타내며 한파 발생을 전후하여 지속적으로 정체되어 있는 반면, 동아시아에 위치한 음의 아노말리 (trough)는 연직적으로 경압구조를 나타내며 시간에 따라 바이칼호에서 한-일 쪽으로 서서히 남동진함을 볼 수 있다. 지표에서의 기압장을 살펴보면, 아북극 지역에 자리잡은 시베리아 고기

압이 한파 발생 전까지 서서히 강화하며 남쪽으로 확장하고, 한파 발생 당일 시베리아 고기압은 우리나라 동쪽 일본에 위치한 저기압과 함께 동서 방향으로 고기압-저기압 couplet 구조를 형성한다. 이러한 기압구조는 북쪽에서의 한기를 한반도로 유입시켜 한반도 기온을 급속히 냉각시키는 역할을 한다. 웨이브 타입의 한파와 비교하면, 블라킹 타입의 한파에서 시베리아 고기압은 그 크기와 강도가 더 크게 나타나며 한파 발생 이후에도 시베리아 고기압 강도가 급속하게 약화되지는 않는다. 한파 발생 이후에도 지표 고기압-저기압 couplet 구조가 어느정도 유지됨으로써 한반도 및 동아시아 지역 전체에 차가운 공기가 더욱 강하고 오래 지속됨을 볼 수 있다.

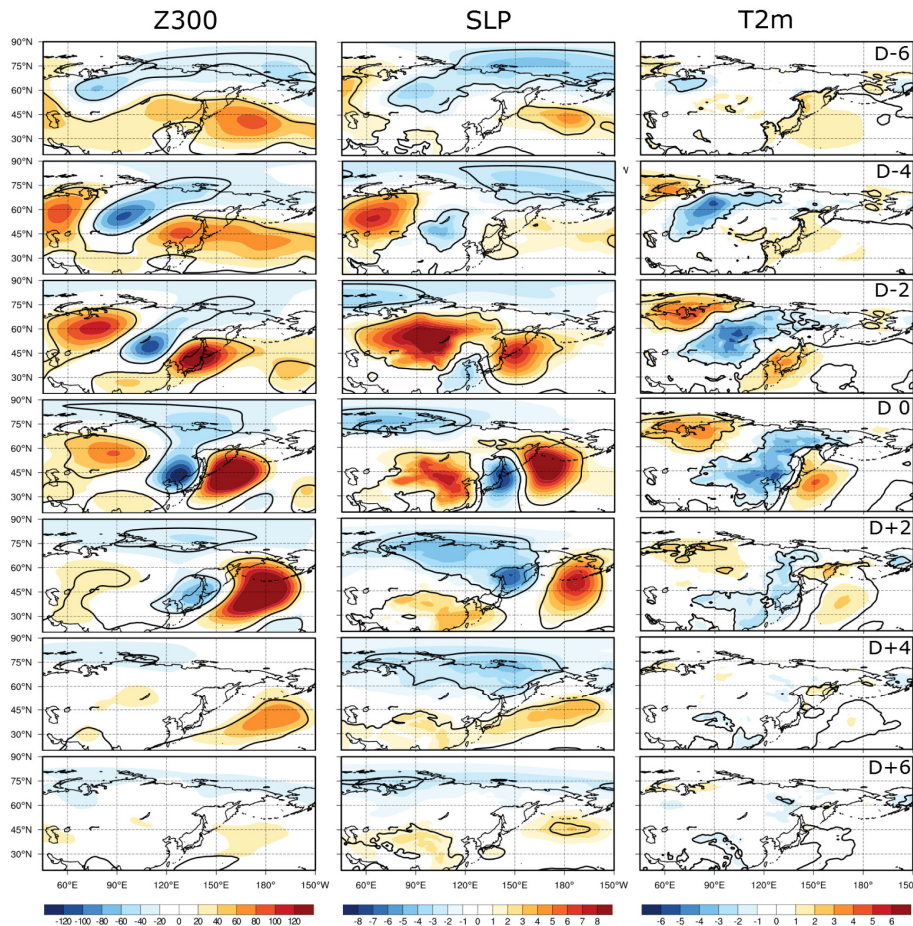


Figure 4 Composite maps of geopotential height anomaly at 300hPa (Z300), mean sea level pressure anomaly (MSLP) and 2-meter air temperature anomaly (T2m) for day -6 to day +6 relative to cold surge occurrences of wave type. The significant values at 95% confidence level are indicated by thick black contours.

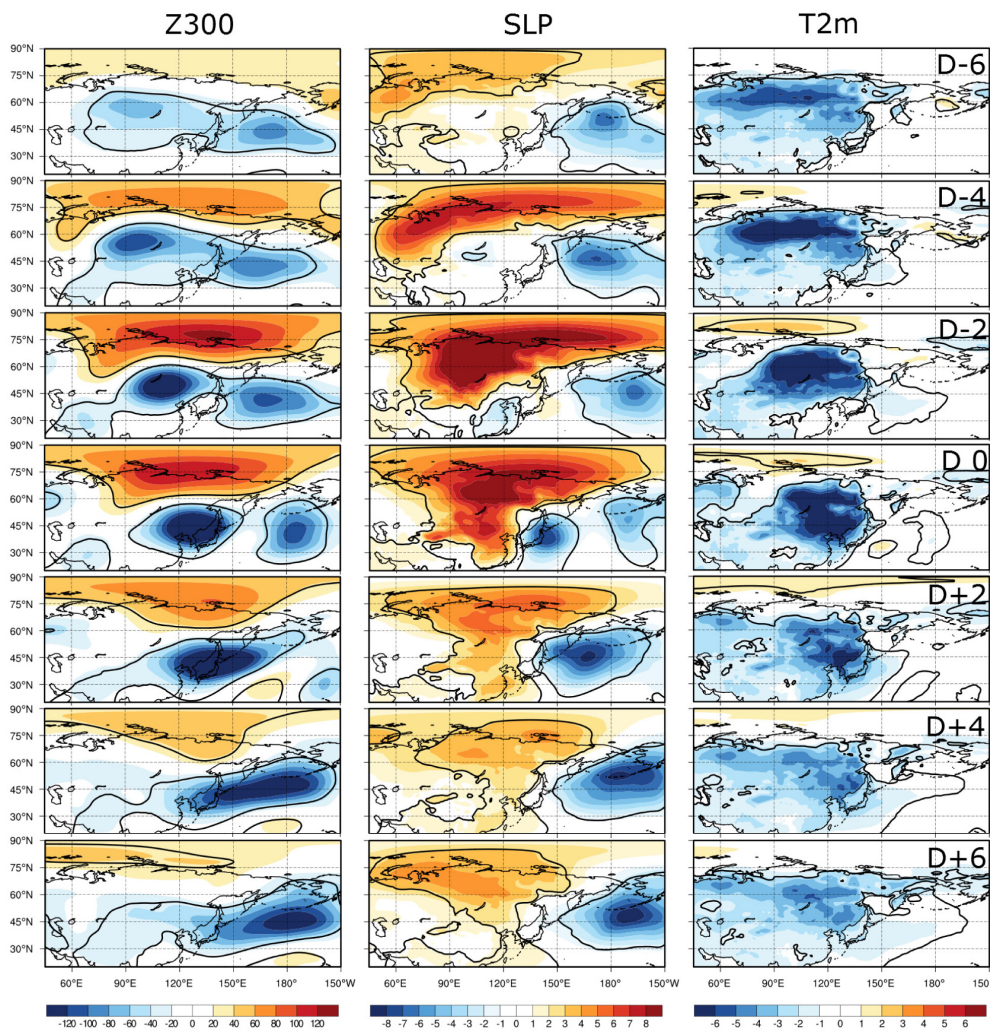


Figure 5 Same as Fig 4. but for the blocking type.

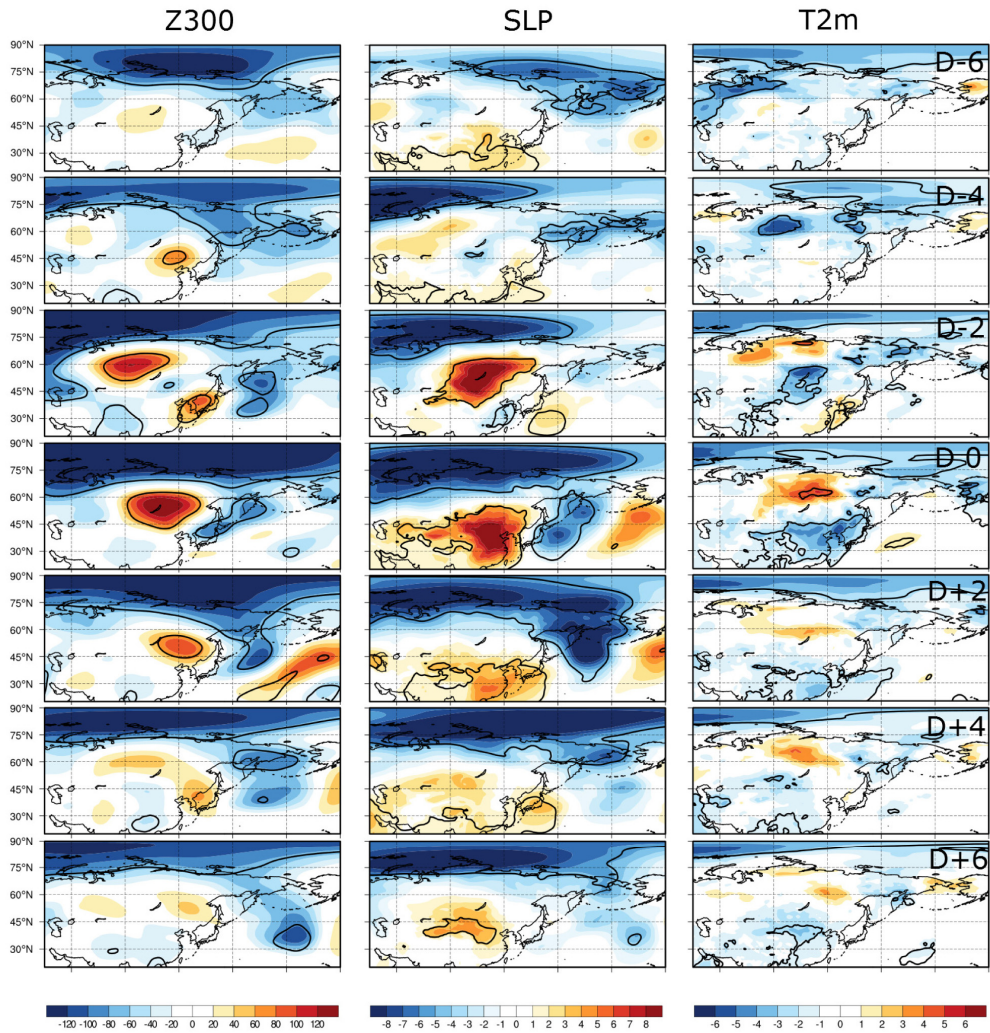


Figure 6 Same as Fig 4. but for unclassified cold surges.

그림 6은 웨이브 타입이나 블라킹 타입으로 분류되지 않은 한파의 합성도를 나타낸 것으로, 대륙권 상층에서 웨이브 형태의 대기 섭동이나 아북극 지역의 블라킹과 같은 대규모 대기 순환을 동반하지 않는다. 한파 발생 2일전 시베리아 고기압이 급강화되고, 한파 발생 당일 우리나라를 중심으로 동서 방향의 고기압-저기압 couplet 구조가 형성되지만 한파 발생 후 급속히 사라짐을 볼 수 있다. 한파 정의의 기본 조건으로 시베리아 고기압의 강화와 급속한 기온 감소가 정의되기 때문에 두가지 현상이 나타나는 것으로 보인다. 이는 서고동저의 전형적인 겨울형 기압배치로 일반적으로 추운 겨울철 날씨에 지역적으로 약하게 발생, 급속히 완화되는 한파로 사료된다.

우리나라 한파 발생시 공통점을 살펴보면, 시베리아 고기압이 강화되면서 동아시아 지역으로 서서히 남동진하며, 한파 발생일에 우리나라를 중심으로 고기압-저기압 couplet 구조가 형성되어 북쪽에서의 한기를 우리나라로 이류시켜 우리나라 기온이 급속도로 감소하는 것을 볼 수 있다. 다만 웨이브 타입의 한파의 경우 유라시아 대륙 안쪽에서 고기압이 형성되어 시베리아 고기압이 점차 남동진하는 반면, 블라킹 타입의 한파의 경우 고기압 중심이 아북극에 위치해 있고 점차적으로 남쪽으로 확장하여 시베리아 고기압이 강화된다는 차이가 있다. 웨이브 타입의 한파보다 블라킹 타입의 한파가 더 오랜 시간 지속되고 그 강도 또한 강하므로 겨울철 평균 기온에 더 밀접한 영향을 미친다.

3.2 한파 발생의 계절내 특성

분석 기간 (1979/80 ~ 2014/15년) 동안 감지된 한파 발생의 시간적 특성을 살펴보기 위해, 먼저 한파 발생 건수(CS number)와 한파 일수(CS days)의 월별 분포를 살펴해보았다. 그림 7은 한파 건수와 한파 일수의 월별 분포를 한파 타입별로 나타낸 것으로, 우리나라에서 발생하는 한파는 겨울철 특히 12월과 1월에 많이 발생하는 것을 알 수 있다. 총 한파 일수와 한파 건수는 12월에 피크를 나타내고 점차적으로 감소하는 특성을 보인다. 웨이브 타입의 한파는 11월과 12월에 집중적으로 나타나는 반면, 블라킹 타입의 한파는 12월과 1월에 많이 발생한다. 상대적으로 기온이 낮은 11월과 3월에 발생하는 한파는 웨이브 타입의 한파가 많으며 추운 겨울(12월, 1월, 2월)에는 블라킹 타입의 한파가 더 많이 발생함을 알 수 있다. 그리고 두 타입 외에 발생하는

국지적 한파는 가장 추운 1월에 그 발생 빈도가 높게 나타난다. 한파 횟수(회색 막대)와 일수(파란 실선)를 비교해보면, 웨이브 타입의 한파는 월별 발생일수가 발생 건수의 약 3배로 건당 3일의 지속기간을 가지며 이는 월별로 일정하게 나타난다. 반면, 블라킹 타입의 한파는 한파 일수의 분포가 발생 건수의 분포와 일치하지 않으며 이는 월별로 블라킹 타입 한파의 지속기간이 다를 것을 의미한다. 건당 평균 4일의 지속기간을 가지는데 특히 12월 한파는 총 28건이 143일에 해당, 평균 5일정도의 긴 한파가 발생함을 알 수 있다.

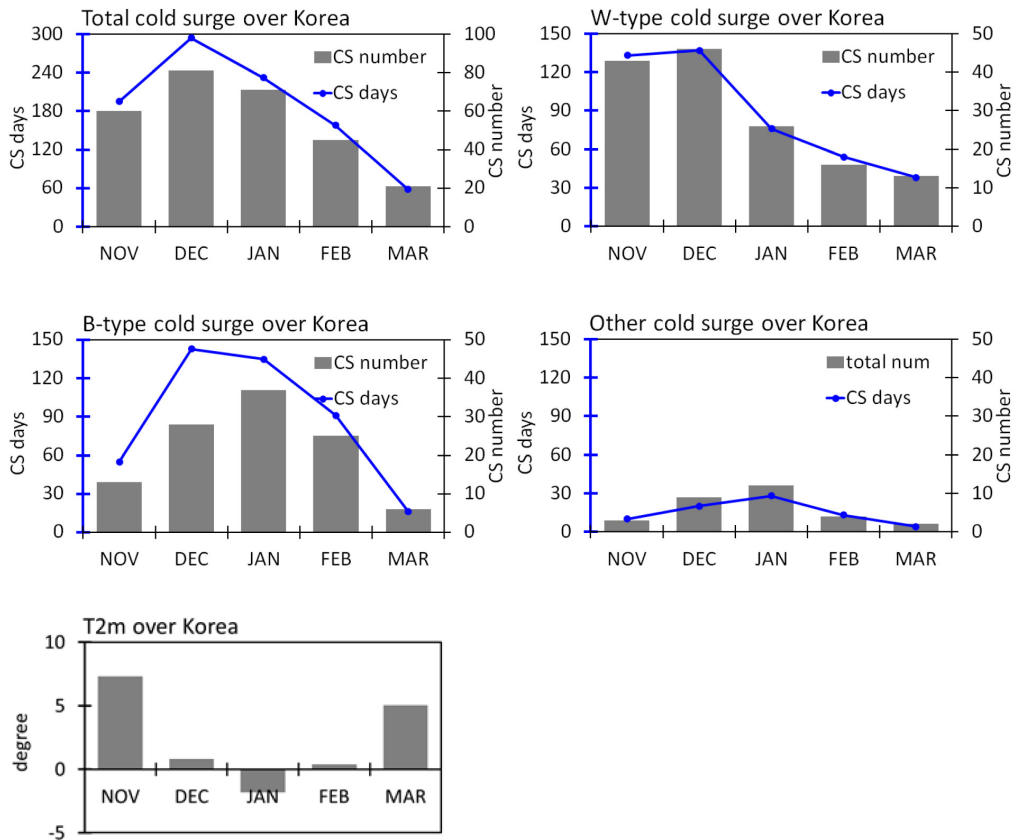


Figure 7 Monthly variation of cold surge number (grey bar) and cold surge days (blue line) for total, weve-train, blocking and unclassified type. The lower panel is 2m air temperature.

이러한 한파 유형별 특성을 좀더 정량적으로 알아보기 위해, 한파 지속 기간과 강도에 따른 한파 발생 일수를 비교해 보았다 (그림 8). 웨이브 타입 한파에 비해 블라킹 타입 한파가 상대적으로 긴 지속 기간을 가지며 그 강도 또한 강함을 알수 있다. 웨이브 타입 한파는 5일 이하의 한파일 경우가 많으며 블라킹 타입의 한파는 6일 이상의 한파에서 우세하다. 한파 강도는 한파가 지속되는 동안 기온 아노말리의 합으로 정의되었고 우리나라 월별 평균 기온에 미치는 영향으로 해석될 수 있다. 대부분의 웨이브 타입 한파는 -20°C 이하의 약한 강도를 나타내는 반면 블라킹 타입의 한파는 그 강도의 변화가 큼을 알수 있으며 -30°C 이상의 한파는 블라킹 타입일 확률이 높음을 알수 있다.

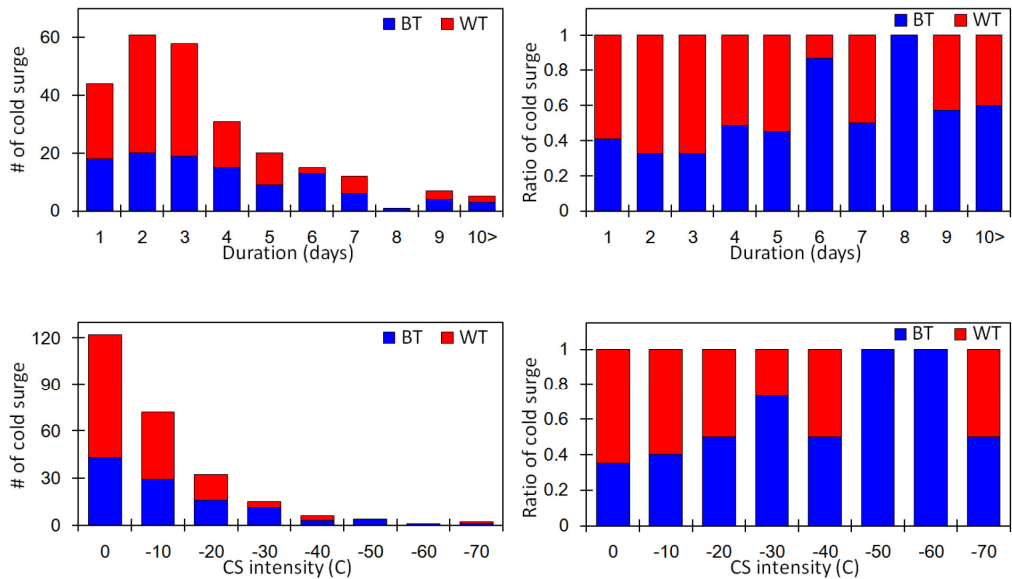


Figure 8 The number of cold surge occurrences of wave and blocking types in the left panels and their ratios in the right panels, categorized by duration and intensity.

한파 발생 빈도 또는 유형의 변화 특성을 살펴보기 위해 월별 (11월~3월) 한파 발생의 경년 변화를 살펴보았다 (그림 9). 그림에 나타내진 않았지만 겨울철 누적 한파 일수와 한파 건수는 모두 약하게 감소하는 경향을 나타냈다. 그러나 월별 한파 발생의 특징은 다소 상이한 결과를 보인다. 11월 한파 발생 건수와 일수는 시간에 따라 감소하는 경향을 보이며, 최근 웨이브 한파의 발생이 두드러지게 나타남을 볼 수 있다. 12월 한파 건수와 일수는 뚜렷한 증가 추세를 보이며, 특히 최근 10년동안 한파

발생이 급증하였고 블라킹 타입의 한파 발생의 빈도가 증가함을 볼 수 있다. 12월 한파 건수의 증가 추세보다 한파 일수의 증가 추세가 더 강하게 나타나는 것은 장주기의 블라킹 타입의 한파가 증가하였기 때문이다. 반면 1월 한파 발생은 뚜렷한 감소 경향을 보인다. 한파 건수보다 한파 일수의 감소 경향이 더 강하게 나타나는 것은 최근 1월에 발생하는 한파의 주기가 짧아지기 때문인 것으로 사료된다. 2월 한파 건수는 증가하는 경향을 보이지만 발생 일수는 약하지만 감소하는 경향을 나타내며, 이는 약한 한파의 발생이 빈번이 일어남을 의미한다. 3월의 한파 발생은 약하게 증가하는 경향을 보이지만 뚜렷한 특징은 보이지 않는다. 그림에서의 검은 실선은 5년 이동 평균한 값으로, 한파 발생이 약 십년을 주기로 장주기 변동성이 있음을 알 수 있다. 이는 다음장에서 구체적으로 논의될 것이다.

이러한 한파의 특성 변화가 겨울철 기온에 미치는 영향을 살펴보기 위해, 월 평균 기온의 경년 변화를 한파 일수와 함께 나타내었다 (그림 10). 설명의 편의를 위해 온도에 -1을 곱함으로써 역으로 표시하였다. 월평균 기온과 한파 일수는 음의 상관 관계를 가지며, 12월을 제외한 모든 달에서 한파 일수의 감소 추세와 함께 월평균 기온의 증가 추세가 나타난다. 지구 온난화 경향에도 불구하고 12월 평균 기온은 뚜렷한 감소 추세를 보이는데, 이는 블라킹 타입의 한파 발생의 증가가 겨울철 평균 기온에 미친 영향으로 사료된다. 특히 12월의 경우 한파 일수와 월 평균 기온의 상관이 -0.79로 높은 상관을 가지며, 월 평균 기온 변동성의 약 64%를 설명한다. 3월에 발생하는 한파는 총 한파 발생의 6%로 빈도수가 적을 뿐 아니라 회당 발생기간이 짧아 월 평균 기온에 미치는 영향이 미비함을 알 수 있다. 월 평균 온도의 경년 분포에서 이례적으로 추웠던 해의 특징을 살펴보면, 한파 일수가 유난히 많았던 날이거나 블라킹 타입의 한파가 이례적으로 많이 발생한 해임을 알 수 있다. 블라킹 타입의 한파 발생은 겨울철 극한 기후 발생에 밀접한 영향을 미치며 따라서 블라킹 타입 한파 발생의 예측은 겨울철 기온 예측에 중요한 보조 자료가 될 것으로 생각된다.

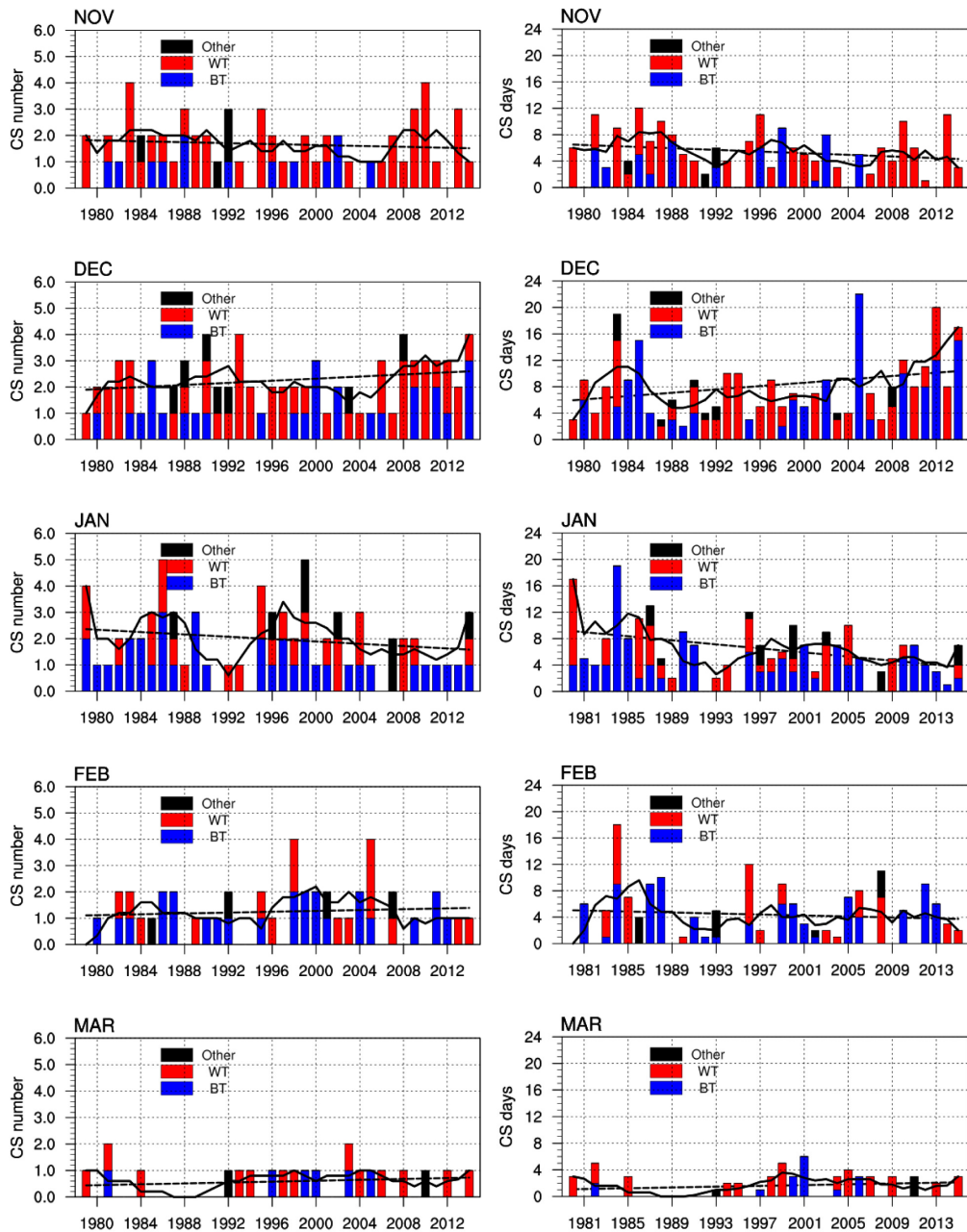


Figure 9 Interannual variation of (left panel) monthly cold surge number and (right panel) cold surge days for wave (red bar), blocking (blue bar) and unclassified (black bar) type over Korea. The thick solid and dashed lines indicate 5 year running average and regression lines of total cold surge.

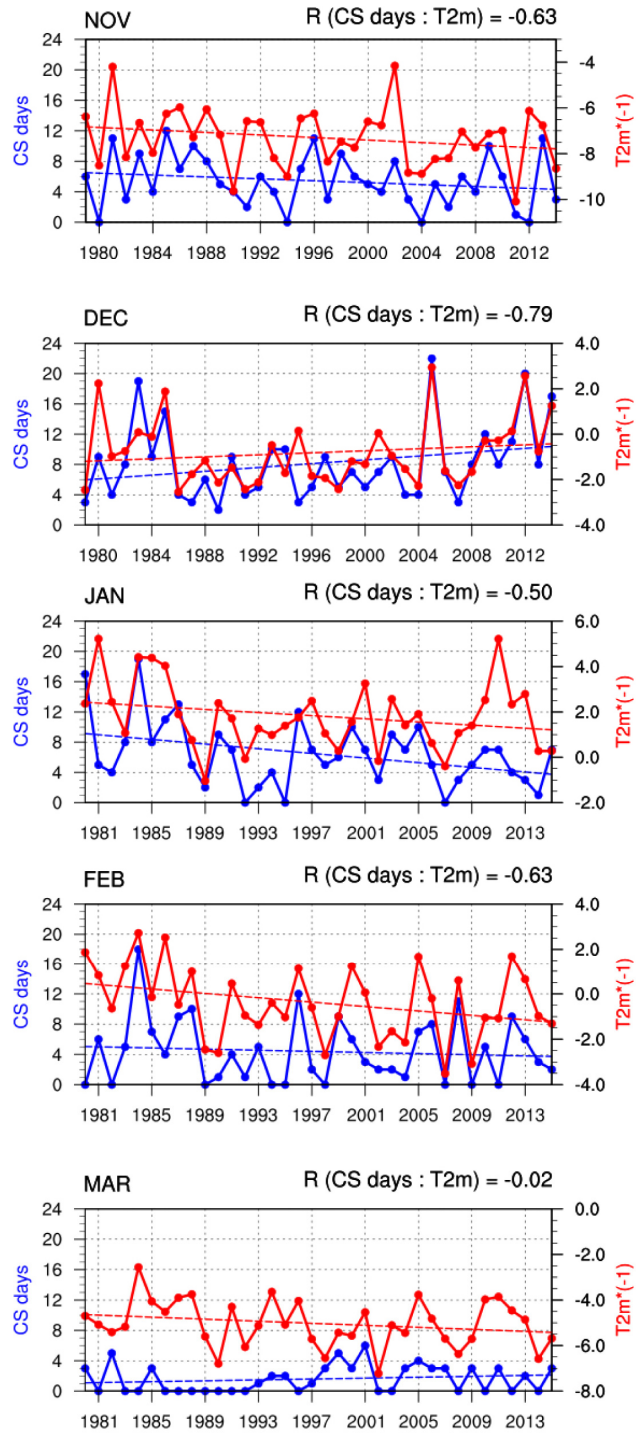


Figure 10 Interannual variation of cold surge days (blue line) and surface air temperature (red line) over Korea. The dashed lines indicate regression line.

3.3 한파 발생에 영향을 미치는 기후인자 분석

CPC에서 제공하는 기후 지수들과 동아시아 겨울 몬순 지수를 이용해서 한반도 한파 발생에 영향을 미치는 대규모 기후 변동성을 살펴보았다. 기후 지수들 중 한파 일수와의 상관성이 통계적으로 유의하게 나타나는 것을 선택하여 분석하였다. 그림 11과 12는 기후 인자 강도에 따른 한파 발생 일수의 분포를 웨이브 타입 한파와 블라킹 타입 한파별로 나타낸 것이다. 웨이브 타입 한파는 대규모 기후 인자의 phase에 상관없이 발생하는 것을 볼 수 있으나, 블라킹 타입의 한파는 대규모 기후 인자의 phase에 따라 발생 일수의 횃수가 달라짐을 알 수 있다. 블라킹 타입의 한파는 극진동 지수 (Artic Oscillation index, AO), 서태평양 지수 (Western Pacific index, WP), 유라시안 패턴 (Eurasian patternx, EU), Ocenic Nino 지수 (ONI)가 음일 때, 태평양 십년 주기 지수 (Pacific Decadal Oscillation index, PDO), 태평양/북미 패턴 (Pacific/North American pattern, PNA), 동아시아 겨울 몬순 지수 (East Asian Winter Monsoon index, EAWM)가 양일 때 더 많은 발생일수를 나타낸다. 특히, 블라킹 타입 한파의 경우 전체 발생 일수의 74.5%가 EAWM이 양일 때 발생하며 이는 우리나라 한파 발생을 지배하는 가장 주요한 계절 시스템이기 때문이다. 한파 발생 건수에 대해서도 분석을 하였으며 한파일수와 동일한 결과를 나타내었다.

기후인자의 phase에 따른 한파 발생 경향을 좀 더 정량적으로 살펴보기 위해 각 기후 지수가 ± 0.5 표준 편차를 넘는 해를 기준으로 각각 강한 양의 지수해와 강한 음의 지수해로 정의하였으며, 각 해에 발생한 한파의 누적일수를 전체 발생일수와의 비로 나타내었다 (그림 13). 또한 각 지수에 대한 한파 발생의 연관성이 통계적으로 유의한지 나타내기 위해 카이제곱 검정(chi-square test)을 실시하였으며 99% 유의 수준의 값을 검은색 점으로 표시하였다. 각 지수에 대해 블라킹 타입의 한파 발생 확률은 대규모 기후 인자의 Phase에 의존하며 AO, WP, ONI 가 강한 음의 해일 때, PDO, PNA, EAWM이 강한 양의 해일때 발생 확률이 높게 나타난다. 웨이브 타입 한파의 경우 오직 PNA의 phase에 의존성을 보이며, PNA가 강한 양의 해일 때 발생 확률이 높게 나타난다.

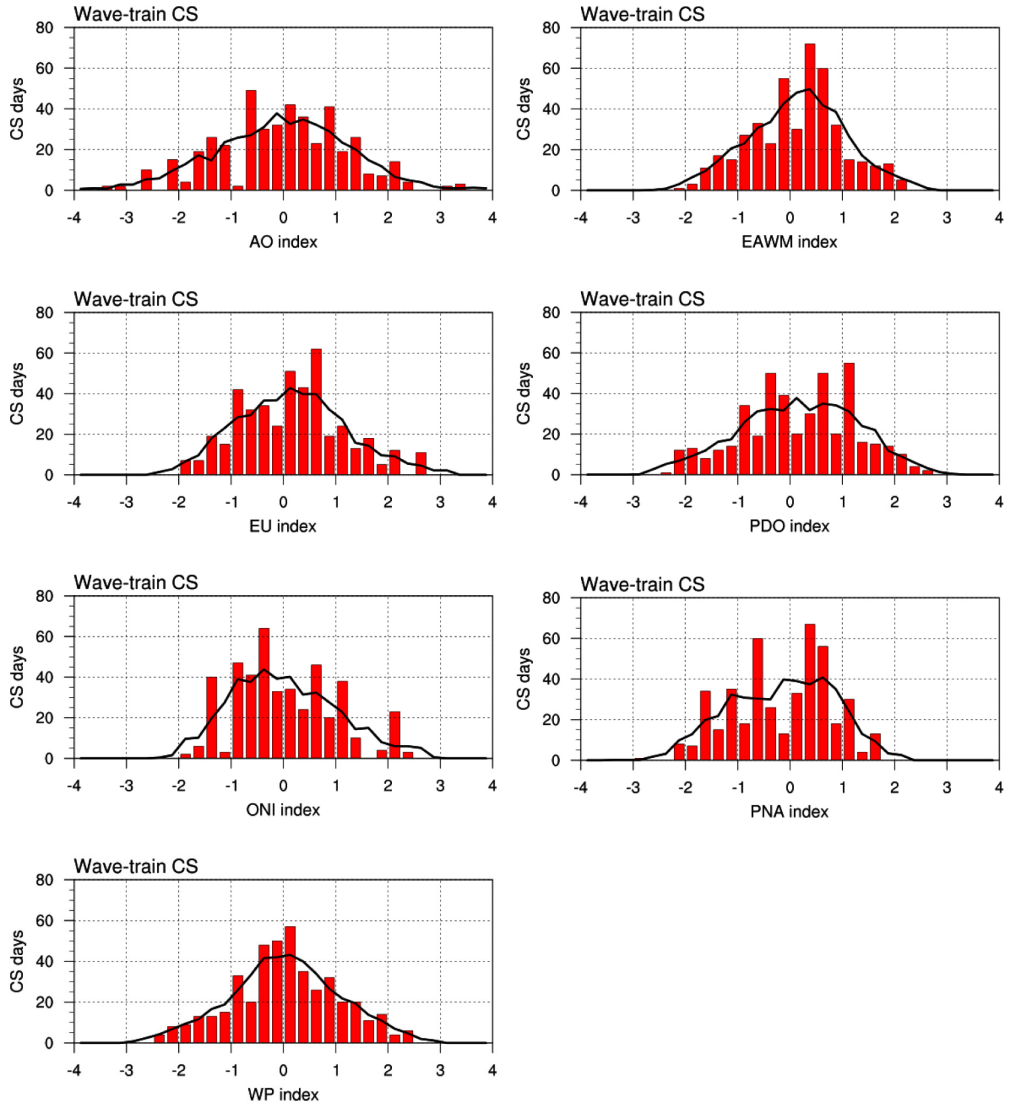


Figure 11 The number of cold surge days for wave and blocking types based on monthly (left panels) AO, EU, ONI, WP and (right panels) EAWM, PDO, PNA index. The thick lines is a sliding means for 5-adjacentband.

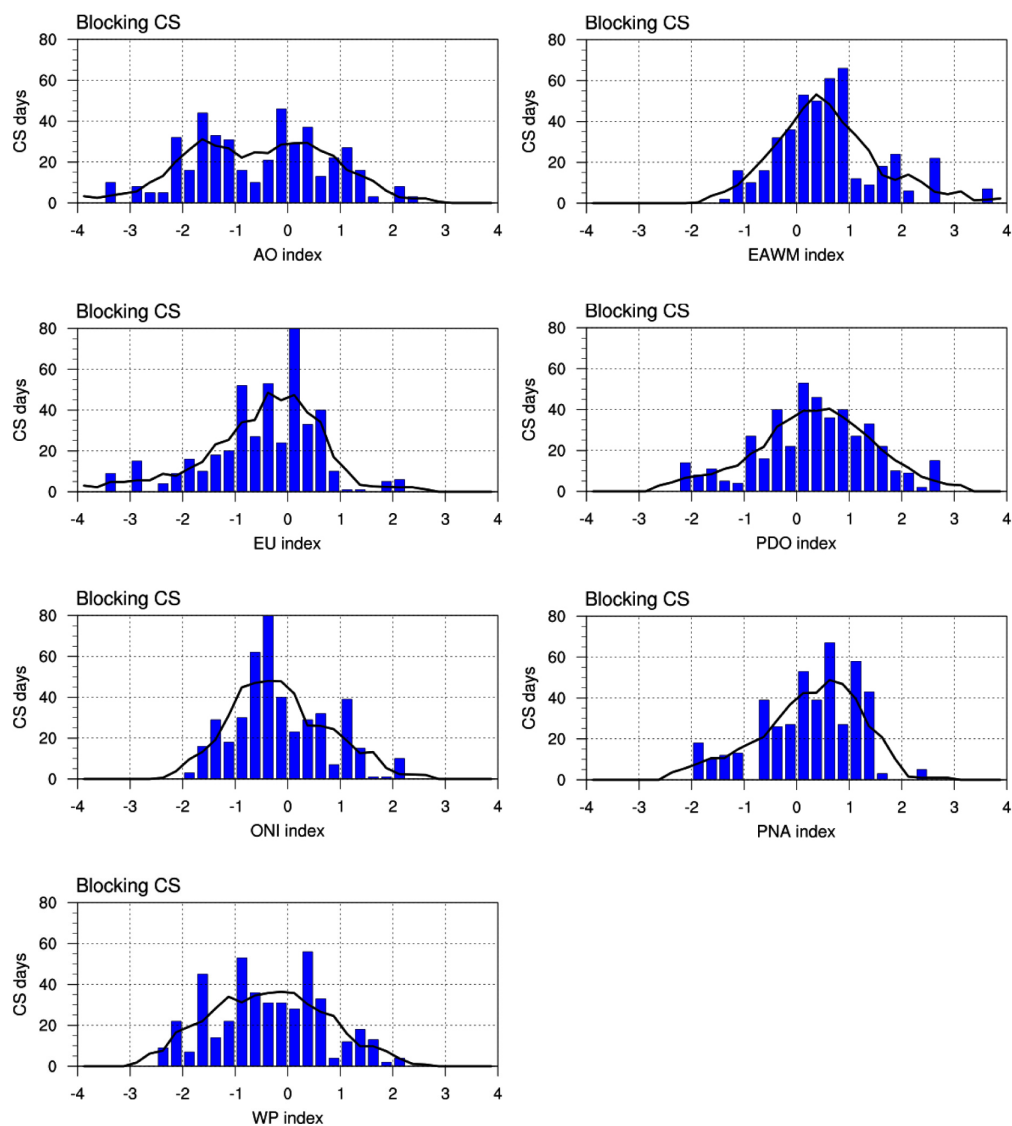


Figure 12 Same as Fig 11 but for the blocking types.

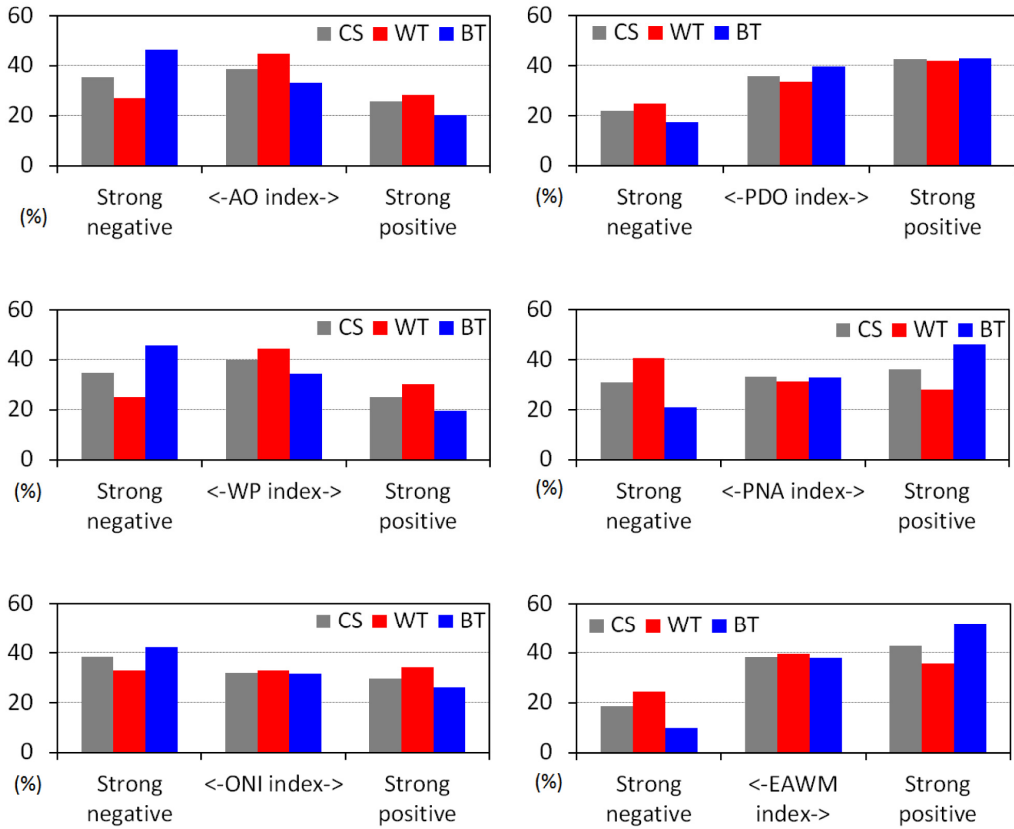


Figure 13 Cold surge days for total, wave, and blocking types for strong negative (less than -0.5 standard deviations) and strong positive (greater than $+0.5$ standard deviations) phases of the climate index.

이들 기후 변동성이 어떻게 한반도 한파와 연관이 되는지 알아보기 위해 각 기후 지수가 표준편차의 0.5 배가 넘는 달에 대해 지표 기온과 해면기압의 합성도를 나타내었다 (그림 14, 15). 음의 AO일 때 유라시아 대륙과 동북 아시아 지역에서 통계적으로 유의하게 음의 온도 아노말리가 나타나며 극에서 상대적으로 강한 고기압이 나타나고 알류산 저기압이 강화된다. 양의 EAWM일 때 북극해를 중심으로 고위도에서 통계적으로 유의하게 양의 온도 아노말리가 나타나고 시베리아 대륙과 동아시아 지역에서 강한 음의 온도 아노말리가 위치한다. 또한 한반도 주변에서 시베리아 고기압과 알류산 저기압의 발달로 서고동저의 기압배치가 강화된다. 음의 WP일 때 캄차카 반도 북쪽을 중심으로 러시아 동부에서 통계적으로 유의한 양의 온도 아노말리가 존재하고 우리나라와 일본에 음의 온도 아노말리가 나타난다. 이때 기압패턴을 보면 베

링해와 북태평양 중심에 고기압성 저기압성 아노말리가 나타나는데 이는 알류산 저기압의 남북 shift에 영향을 준다. 양의 PNA 일 때 북태평양에서 통계적으로 유의한 강한 음의 기압 아노말리를 나타내는데 이는 알류산 저기압의 강도에 영향을 주며, 유의하진 않지만 우리나라에 약한 음의 온도 아노말리가 존재한다. WP 와 PNA 는 알류산 저기압의 위치와 강도에 영향을 줌으로써 한반도 주위 서고동저의 기압배치에 영향을 준다. 음의 ONI 는 Na Nina phase를 설명하며 태평양-동아시아 원격상관 (Pacific-East Teleconnection, TEAT, Wang et al., 2000)에 의해 서태평양 SST 증가로 대류 활동이 강화되고 이는 지역적 해들리 순환을 강화시킴으로써 동아시아에 고기압성 순환을 야기시킨다. ONI 가 음일 때 유라시아 대륙과 인접한 서태평양과 인도양에서의 기압차가 강화됨을 볼수 있다. 이러한 ENSO 효과는 PDO와 같은 북태평양의 장주기 대기 해양 순환 패턴과 밀접한 상관을 가진다 (Wang et al 2008, He and Wang 2013, Kim et al 2014). ENSO 뿐만 아니라 북태평양 WP 패턴의 phase에 따라 AO의 효과는 증가될 수도 상쇄될 수도 있으며, 각각의 기후 지수들의 모드가 in-phase이냐 out-of-phase이냐에 따라 개별 지수들이 한반도 한파 발생에 미치는 영향들은 달라질 수 있다. 음의 AO, WP, ONI 지수와 양의 PDO, PNA 지수는 우리나라를 둘러싼 시베리아 고기압과 알류산 저기압의 강도나 위치를 변화시킴으로써 한파 발생의 환경을 변화시킨다. 어떤 기후 지수들의 combined effect가 가장 큰 시너지 효과를 나타내는지에 대해서는 후속 연구가 필요하다.

요약하면 주요 기후 지수에 대해 시베리아 지역과 동아시아 지역은 평년에 비해 차갑고 한반도 주변에서 서고동저의 기압패턴이 강화되는 특징을 보인다. 이는 북풍 계열의 바람을 강화시키며 한반도 한파를 발생하기에 적합한 조건을 제공한다.

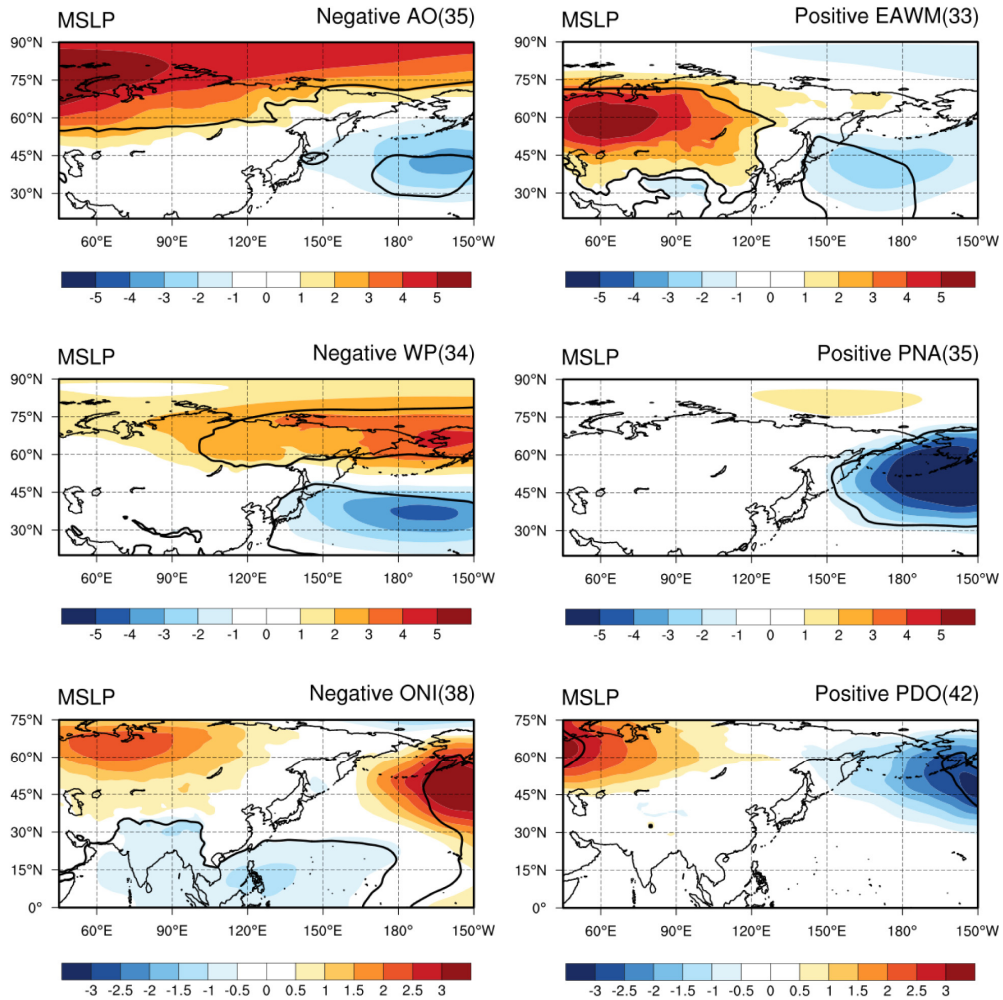


Figure 14 Composite mean sea level pressure with respect to the selected climate indices when they 0.5 standard deviation. The selected indices and sample size are indicated in each panel. Composite anomalies that are statistically significant at the 95% confidence level are indicated by solid black line.

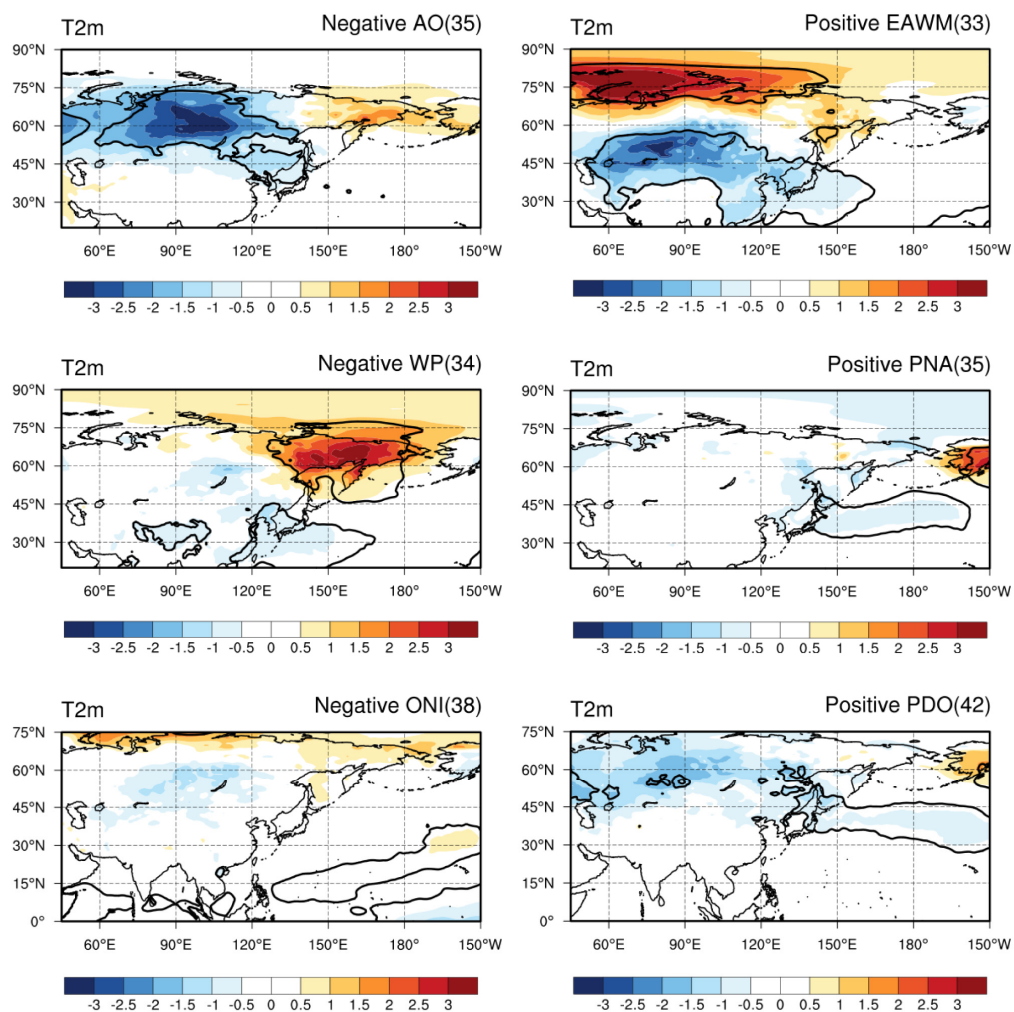


Figure 15 Same as Fig 14 except for surface air temperature.

그림 16은 한반도 블라킹 타입 한파가 발생하였을 때 그와 유의한 관계를 가지는 6개 기후 지수, AO, WP, ONI, EAWM, PNA, PDO의 강도를 월별로 나타낸 것이다. 기후 지수가 +0.5 표준편차보다 큰 경우는 ●로 표시하였고, -0.5 표준편차보다 작은 경우는 +로 표시하였다. 그리고 각 지수들이 한파 발생을 유발하는 phase인 경우만을 표시하였다. 전반적으로 블라킹 타입 한파 일수가 많았던 해에 주요 기후 지수들의 phase가 서로 시너지 효과를 일으키는 in-phase 상태에 있음을 알 수 있다. 계절별 분포를 살펴보면, 12월 한파의 경우 기후 지수들의 상관관계가 뚜렷이 나타난다. 2000년대 들어서 한파 일수가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 다른 시기에 비해 최근 주요 기후 지수들의 조건이 잘 맞아서 발생하는 것으로 생각된다. 그러나 왜 그들 지수들이 모두 강하게 발달했는지에 대해서는 향후 연구가 필요하다.

3.4 한파 발생의 장주기 변동성

한반도 한파의 장주기 변동성을 살펴보기 위해 분석 기간을 세개의 기간(1979-1990, 1991-2002, 2003-2014)으로 나누어 수십년 주기 변화를 나타내었다(이 세 기간을 이후부터는 1980년대, 1990년대, 2000년대로 명칭하기로 한다). 장주기 기후 변화의 시점을 명확히 정의하기 위해 통계적 분석을 실시하였으나 유의한 변화 시점을 찾기가 어려웠다. 따라서 특정 기간을 정의하는 대신, 최근 36년을 세 가지 기간으로 나누어 장주기 변동성을 살펴보았다. 그럼에도 불구하고 우리는 각 기간에 대한 변화 특성이 십수년 주기 변화 특성을 나타내기에 충분히 합리적임을 아래 분석 결과들에서 확인할 수 있었다(다시 말해 각 기간에서 분석된 한파 특성의 차이가 총 기간 평균된 한파 특성과 비교해 통계적으로 유의한 값을 나타내었다). 한파 발생의 십수년 주기 변화에 대한 기존 연구(Woo et al., 2012)에서도 이러한 문제점에 대해 논의한 바 있다.

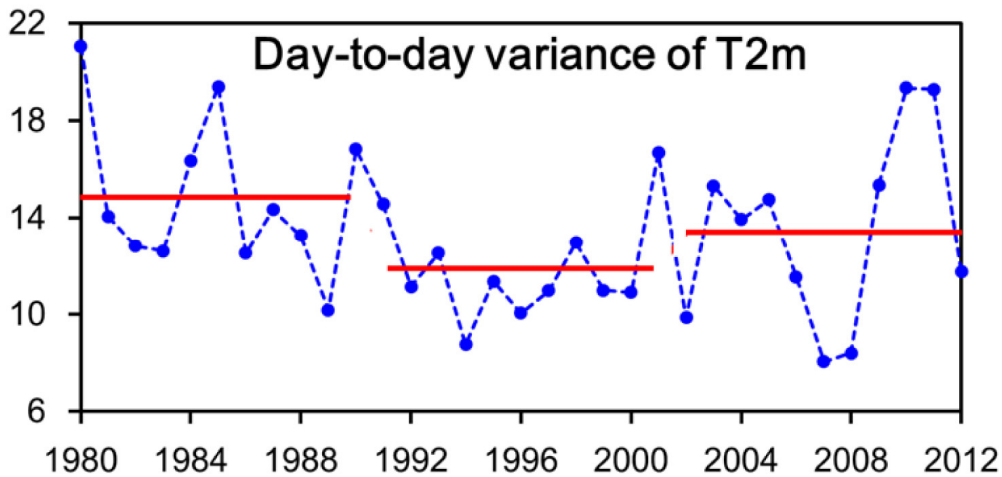


Figure 16 Winter day-to-day variance of surface air temperature at 2m averaged over Korea from 1979/80–2011/12. The solid lines indicate mean variance in the 1980s, 1990s, and 2000s.

그림 16은 해당 분석 기간 동안의 일평균 온도의 day-to-day variance를 나타낸 것이다. 온도의 day-to-day variance의 십수년 주기 변동의 특성 각 세 기간에서 뚜렷이 나타남을 볼 수 있다. 1980년대와 2000년대의 평균 variance는 1990년대의 평균 variance와 비교해 뚜렷하게 큰 값을 가지는데, 이는 1990년대에 비해 1980년대와 2000년대에 day-to-day 기온 변화가 크게 나타남을 의미한다. 이는 한파의 주기 특성을 암시하는 결과라 할 수 있다.

겨울철 기온의 파워 스펙트럼 분석을 각 기간에 대해 실시하였다(그림 17). 우리나라 겨울철 기온의 변동 주기는 1980년대에 5~6일의 주기가 크게 나타나는 반면 1990년대에는 7~8일, 그리고 2000년대에는 10일 이상의 장주기의 변동이 크게 나타남을 볼 수 있다. 특히 2000년 이후 10여일 이상의 장주기 변동성이 강하게 나타나는데 이는 2000년대 발생하는 한파의 빈도수가 증가할 뿐 아니라 더 강한 강도의 한파가 길게 지속되는 결과와 상응하는 결과이다. 십수년을 주기로 뚜렷한 장주기 변동성을 보이는 한파 발생 일수는 대체적으로 1980년대와 2000년대에 한파 일수가 많고 1990년대 한파 일수가 적게 나타나는 경향을 보인다. 특히 12월 한파의 경우 2000년대 한파 일수가 뚜렷이 증가하였으며 그림으로 제시하지 않았지만 월별 스펙트럼 분석의 결과에서도 유사한 결과를 확인할 수 있었다.

다른 역학적 기인에서 발생한 한파는 장주기 변동성 또한 다르게 나타날 것이다. 따라서 총 한파일수의 장기 변동성 뿐 아니라 한파 타입별로 장기 변동성을 살펴보았다. 그림 18은 총 한파 일수와 한파 타입별 한파 일수의 누적일수를 앞서 세 개의 기간으로 나누어 decadal 변화를 월별로 나타낸 것이다. 겨울철 (DJF) 총 한파 일수는 1990년대에 비해 상대적으로 1980년대와 2000년대에 많은 것을 볼 수 있으며 이는 블라킹 타입 한파 일수의 변동과 밀접하게 연관이 된다. 웨이브 타입 한파는 지속적으로 감소하는 경향을 보이는 반면 블라킹 타입 한파는 2000년대에 증가한 것을 볼 수 있다. 특히 12월 한파 일수는 다른 기간과 비교해 2000년대에 웨이브 타입 한파와 블라킹 타입 한파 모두 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 최근 12월 한파 증가 경향이 뚜렷이 나타나는 것과 상응하는 결과이다. 블라킹 타입 한파일수의 증가는 지구온난화 경향에도 불구하고 12월 평균 온도가 가장 낮게 나타나는 결과를 가져온다. 1월 한파의 경우 총 한파일수가 전체적으로 감소하는 추세를 보이는데, 1990년대보다 2000년대 블라킹 타입 한파 일수의 증가는 겨울철 평균 기온이 1990년대 보다 2000년대에 더 낮게 나타나는 결과를 야기시킨다. 2월 한파의 경우 웨이브 타입 한파 일수는 크게 변동이 없으나 블라킹 타입 한파의 경우 1980년대와 2000년대에 많이 나타났다. 블라킹 한파 증가에도 불구하고 1990년대와 2000년대 평균 온도가 크게 차이 나지 않는 것은 지구 온난화 효과가 다른 월에 비해 많이 반영되기 때문인 것으로 사료된다.

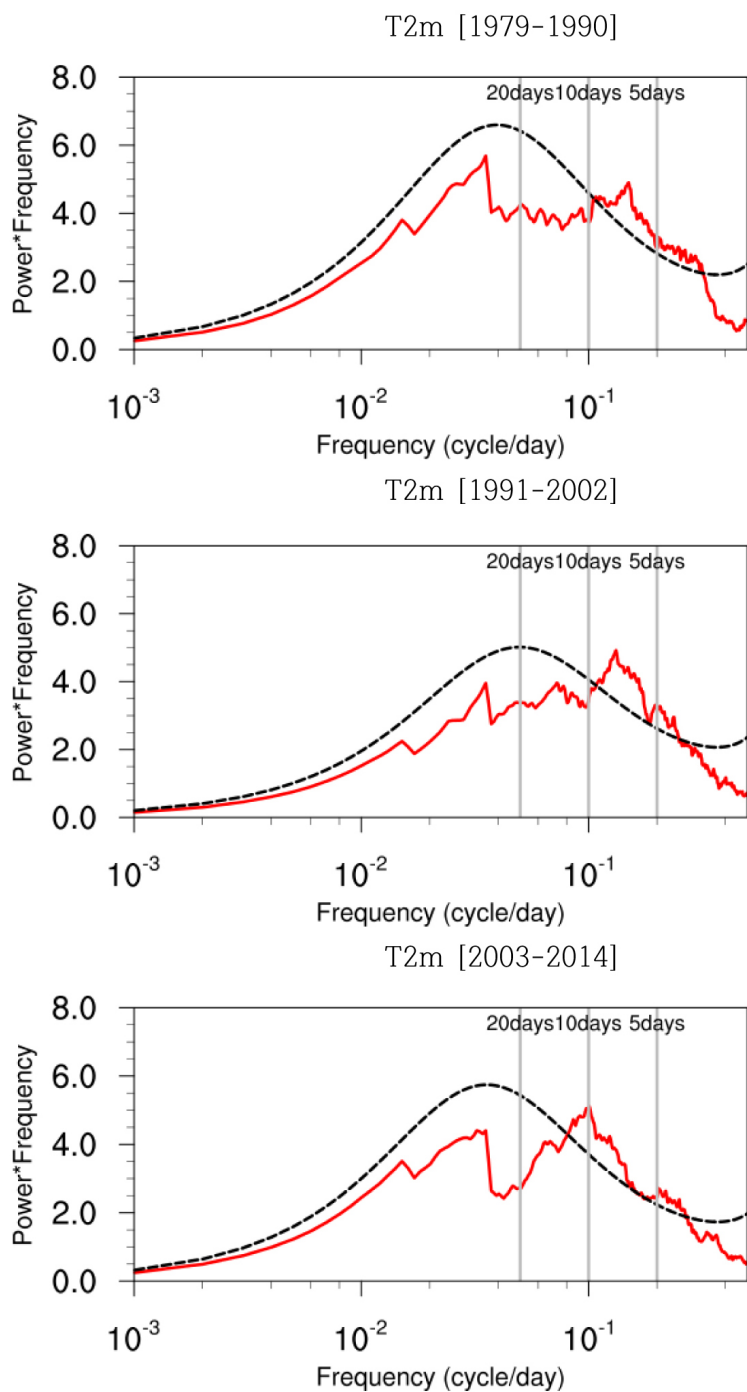


Figure 17 Power spectra of daily mean winter SAT averaged over Korea in 1979-1990, 1991-2002, 2003-2014. The black curve in each figure represents the 95% confidence level. Three gray vertical lines indicate (from left to right) 20, 10, and 5 days.

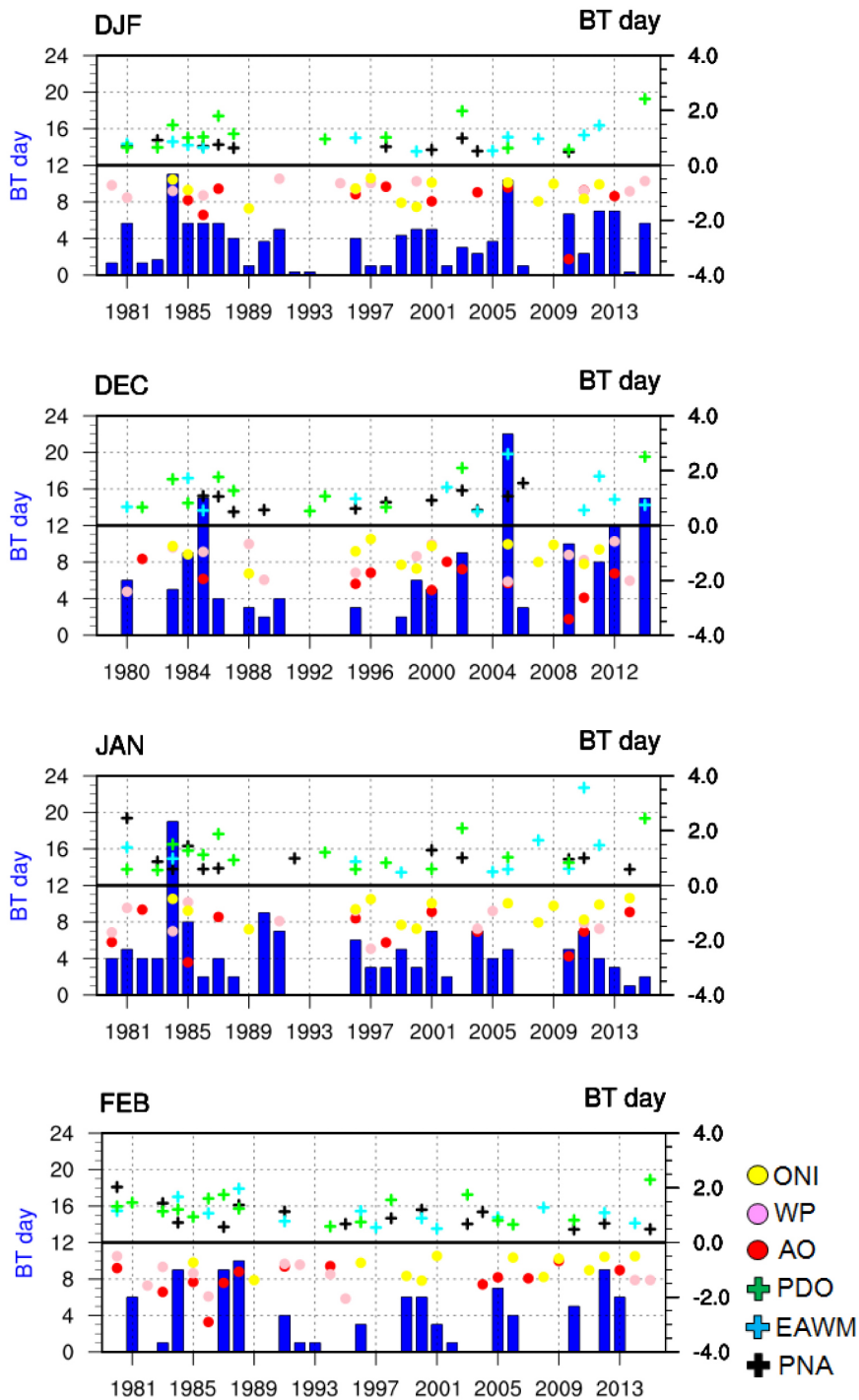


Figure 18 Interannual variability of monthly cold surge days over Korea and monthly indices of AO(red dot), WP(pink dot), ONI(yellow dot), PNA(black cross), EAWM(ski blue cross) and PDO(green dot).

한파 일수의 장주기 변동성에 영향을 미치는 기후인자들의 관계를 살펴보기 위해 11년 주기의 running correlation을 나타내었다 (그림 19). 12월 한파 발생 일수는 10년을 주기로 대기 변동성과의 관계가 뚜렷이 변화하는 것을 볼 수 있는데, 1980년대와 2000년대에서는 비슷한 상관관계를 나타내는 반면 1990년대에 기후지수들과의 관계는 매우 상이하게 나타난다. 한파일수와 겨울 몬순 지수와의 상관은 1980년대와 2000년대에 높게 나타나지만 1990년대에는 유의미한 결과를 나타내지 않는다. 이는 1990년대에 기후지수들과의 관계가 유의하게 나타나는 블라킹 타입 한파가 감소하여 생긴 결과로 사료된다. 상대적으로 한파일수가 많은 1980년대와 2000년대를 비교해 보았을 때, 상대적으로 2000년대에 WP와 AO와의 상관이 높게 나타는 것을 볼 수 있다. 이는 2000년 블라킹 타입 한파 발생의 호조건이 나타났음을 의미한다. 1월의 경우에는 한파일수에 영향을 미치는 유의미한 기후지수들을 찾기 어려웠으며, 2월 한파의 경우 한파일수는 동아시아 겨울 몬순 지수와 지속적인 유의한 상관을 보임을 알 수 있다. 이는 2월 한파일수의 장주기 변동이 다른 달에 비해 상대적으로 매우 약하게 나타나기 때문이다.

한반도 한파의 장주기 변동과 관련된 대기 환경의 변화를 살펴보기 위해 세 기간 (1979-1990, 1991-2002, 2003-2014)에 대해 평균된 기온과 해면기압의 아노말리장을 월별로 나타내었다 (그림 20 ~ 그림 22). 우리나라 겨울철 기후를 지배하는 대표적인 기압패턴은 시베리아 고기압과 알류산 저기압의 강화로 발생하는 서고동저형의 기압 배치를 들 수 있으며 이는 해양-대륙의 비열차로 인해 발생하는 겨울 몬순 시스템으로 여겨진다. 그림 20은 12월의 기온과 기압배치의 변화를 1980년대, 1990년대, 2000년대 평균된 아노말리장으로 나타내었다. 지구온난화에도 불구하고 1980년대에 비해 1990년대에 유라시아 대륙 북서부와 베링해를 중심으로 대부분의 고위도 지역의 기온이 더 낮게 나타난다. 반면 2000년대에는 극지역의 기온이 뚜렷하게 증가한 반면 유라시아 대륙의 중남부는 오히려 차가워진 것을 볼 수 있다. 이와 더불어 기압 배치의 변화를 살펴보면 1980년대에 아북극지역으로부터 저기압성 아노말리가 나타나는 반면 2000년대에는 유라시아 대륙 고위도 지역에 고기압성 아노말리가 나타나고 대륙과 인접한 해양에서 저기압성 아노말리가 나타난다. 이는 동아시아 몬순 강도에 영향을 주며 2000년대 한파 발생의 일수가 증가하는 최적의 환경을 나타내는 결과라 할 수 있다. 그림 20은 1월의 기온과 기압배치의 장주기 변화를 나타낸

것이다. 1월의 기온 변화를 살펴보면 (그림 21), 1990년대에 유라시아 중북부 지역에 양의 온도 아노말리가 존재하는 반면 북극지역은 음의 온도 아노말리가 나타난다. 반면 2000년대에 북극은 눈에 띄게 따뜻해지고 우랄산맥부근 유라시아 내륙이 다소 차가워짐을 볼 수 있다. 기압장의 변화를 살펴보면 1990년대에 뚜렷한 저기압성 아노말리가 바렌츠해를 중심으로 형성이되는 반면 2000년대는 바렌츠 해에 강한 고기압성 아노말리가 나타난다. 이는 바렌츠해에서의 눈덮임의 강도와 관련되는 현상으로 생각된다. 1월의 대규모 환경 패턴의 장주기 변동은 한파 일수의 장주기 변동과 직접적인 상관을 찾기 힘든데, 이는 평균 기후장에 미치는 영향이 큰 블라킹 타입 한파가 지속적으로 감소하기 때문인 것으로 짐작된다. 마지막으로 2월의 대기환경장의 특성 변화를 살펴보면 (그림 22), 유럽중부와 동아시아에서의 음의 온도 아노말리가 1980년대와 2000년대에 나타나는 반면 1990년대에 유럽과 아시아 북부에서 뚜렷한 양의 온도 아노말리가 나타난다. 기압장의 변화를 살펴보면 1980년대에 유라시아 대륙 북부에서 전반적인 고기압성 아노말 리가 나타나고 북태평양 북서부에서 저기압성 아노말 리가 나타난다. 반면 1990년대에는 바렌츠해와 베링해를 중심으로 고위도 지역에서 저기압성 아노말리가 존재하고 2000년대에는 바렌츠해를 중심으로 고기압성 아노말 리가 나타나고 북태평양에서도 고기압성 아노말리가 나타난다. 1980년대와 비교해서 2000년대의 대기 환경장은 북태평양에서의 기압 아노말리가 상이하게 나타나는데 이는 알류산 저기압의 강도와 위치에 영향을 미치는 WP와 PNA 패턴의 phase와 연관된 패턴이라 짐작할 수 있다.

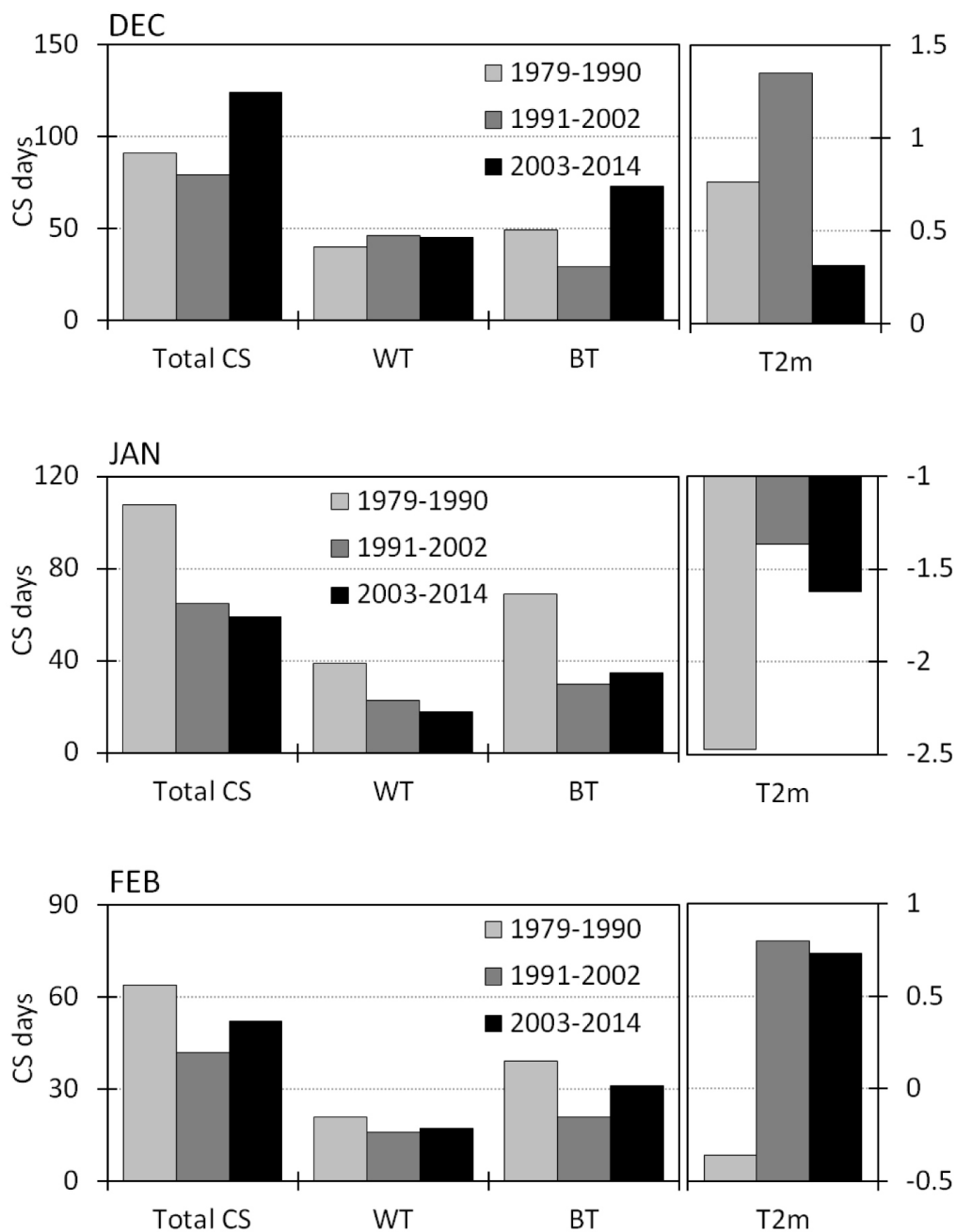


Figure 19 The number of cold surge days classified by cold surge types and monthly mean air temperature at 2m averaged over the Korea.

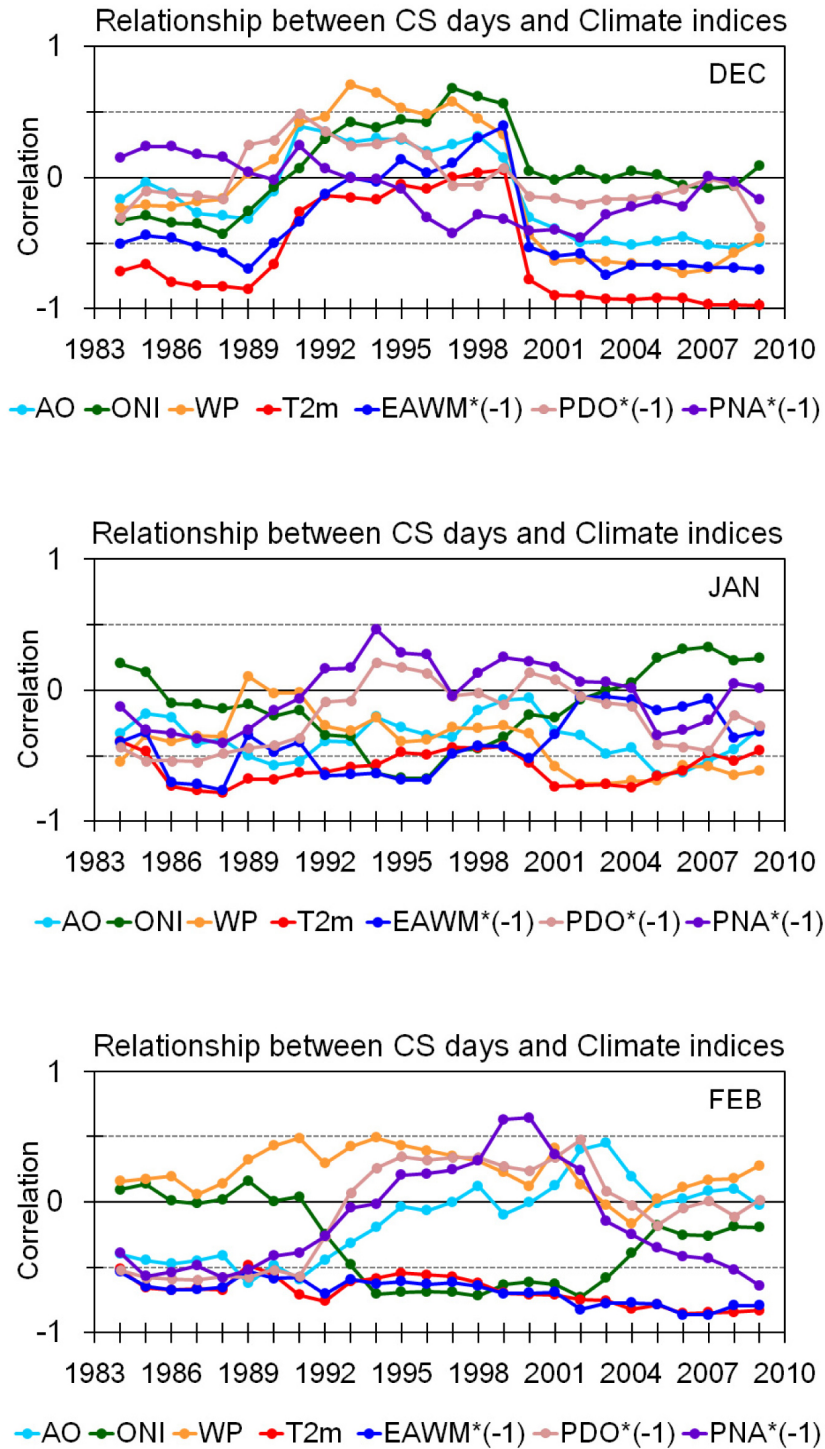


Figure 20 11yr moving window correlation between CS days and climate indices.

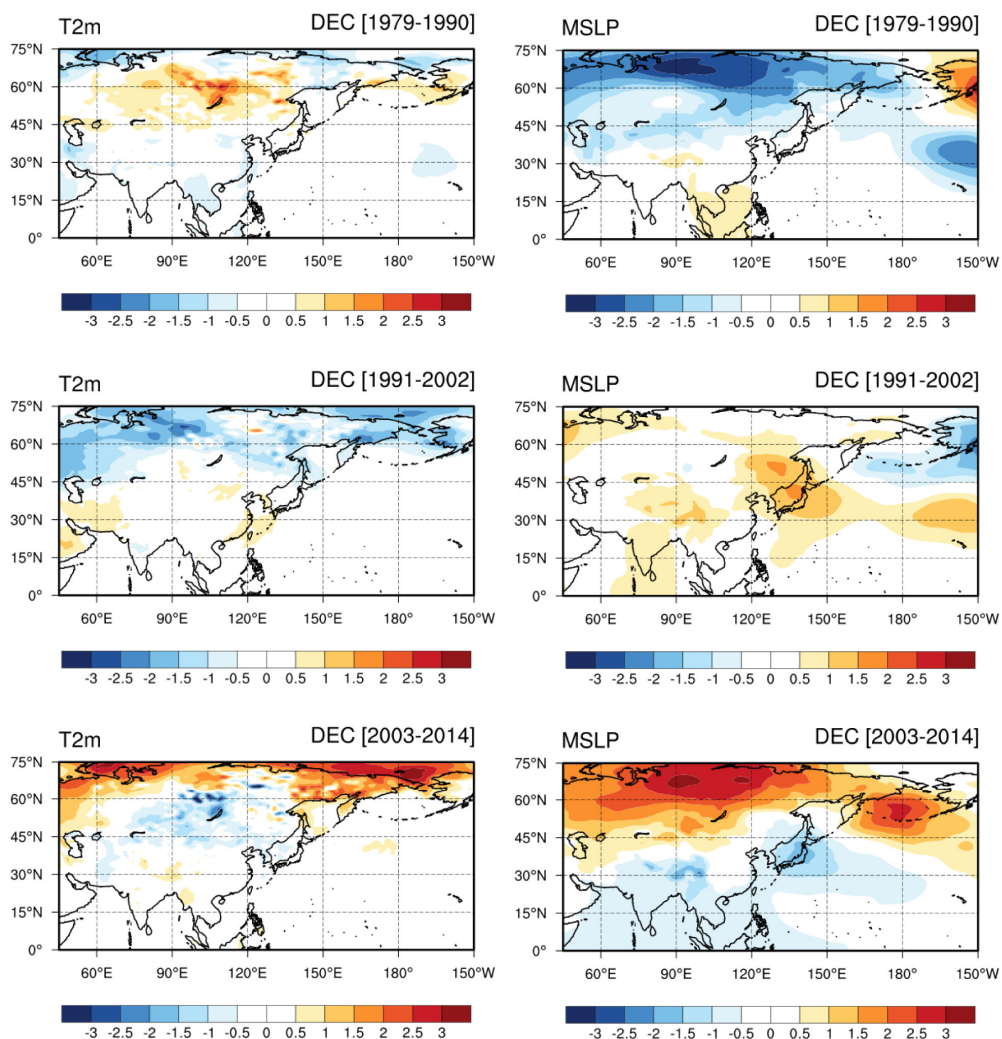


Figure 21 Composite mean sea level pressure with respect to the cold surge days occurred in December during three decades. Composite anomalies that are statistically significant at the 95% confidence level are indicated by solid black line.

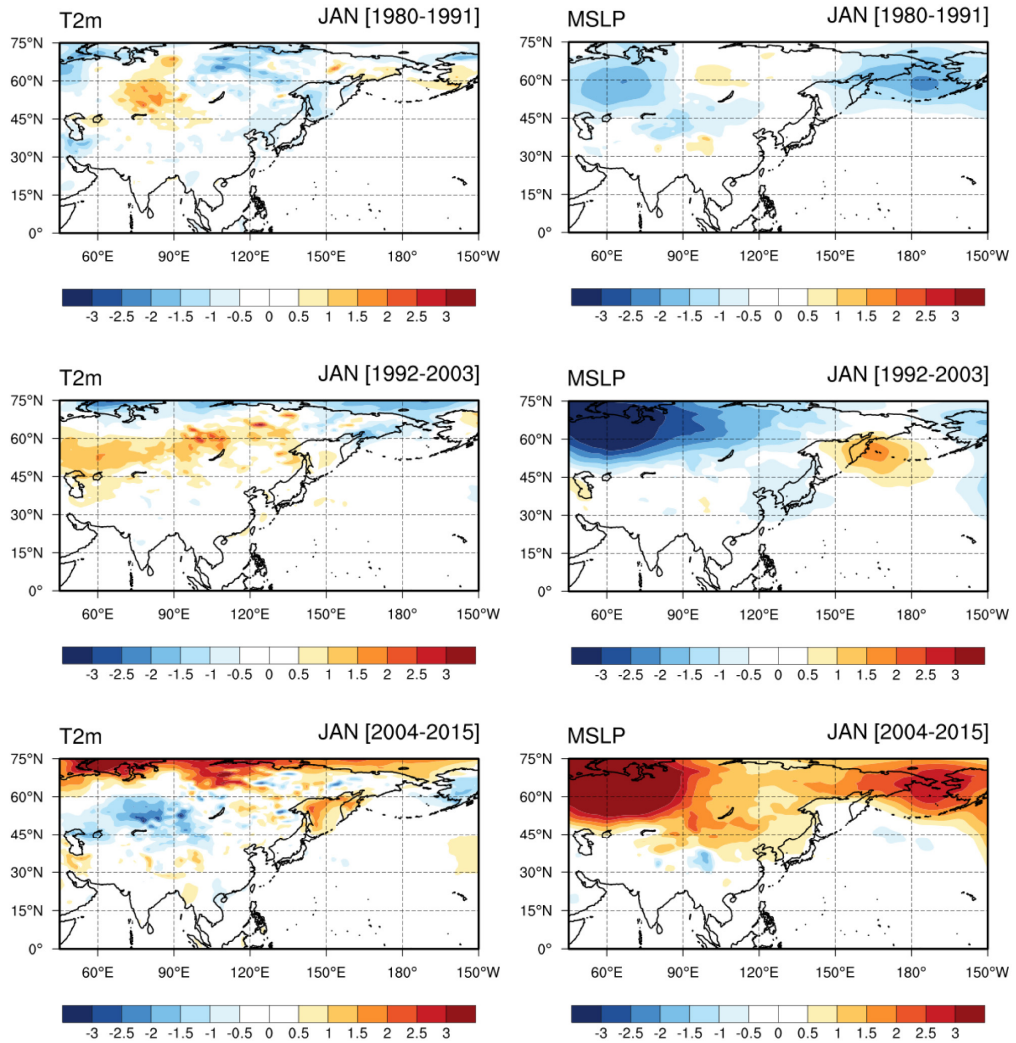


Figure 22 Same as Fig 21 but for January.

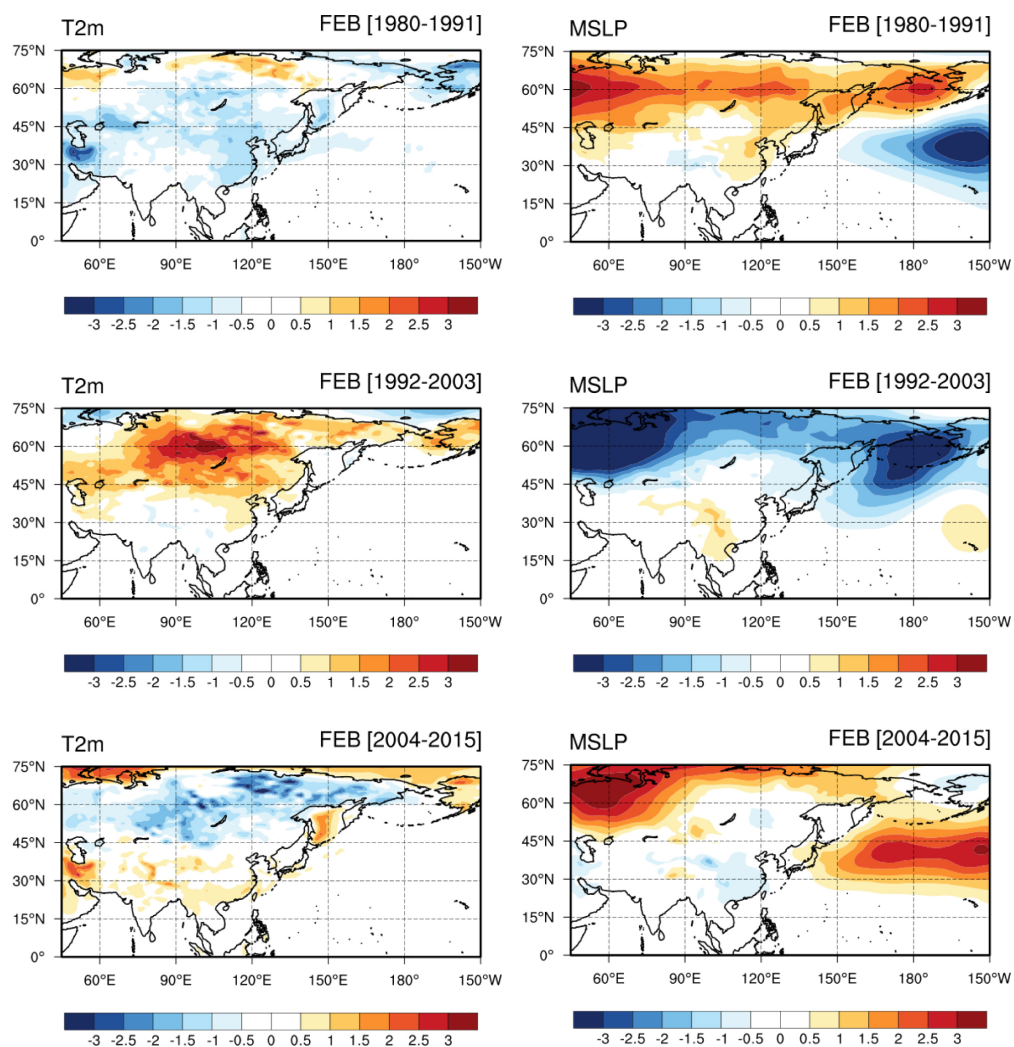


Figure 23 Same as Fig 21 but for February.

4. 결론 및 토의

시베리아 고기압의 강화와 한반도 기온의 급격한 감소와 같은 종관적 근거를 토대로 한반도 한파가 정의되었다. 대부분의 한파 연구들이 동아시아를 비롯하여 연구되었으며 이는 중국 남부에서 발생하는 한파 특성을 더욱 반영한 결과라 할수 있다. 한반도는 해륙 경계에 위치해 있어 유라시아 내륙에서 발생한 기후 변동성에 영향을 받을 뿐아니라 북서태평양으로부터의 기후 변동성 또한 많은 영향을 미치므로 한반도에서 감지되는 한파의 특성을 정확히 파악하기 위해서는 기온이 감지되는 영역이 한반도로 축소되어야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 한반도 한파를 정의하기 위해 기온의 변화가 감지되는 영역을 한반도로 국한하여 한파를 정의하였으며 36년간(1979/80년 ~ 2014/15년) 겨울철(11월 ~ 3월)에 발생한 총 한파는 278개로 월평균 1.54회의 한파가 발생하는 것으로 나타났다.

기후 변화에 따른 한파 특성의 변화를 살펴보기 위해 한파 형태가 분류되었다. Park et al (2015)에 의해 개발된 역학적 한파 인덱스를 사용하여 한반도 한파 유형을 분류하였으며, 본 연구에서는 상층 지위고도 아노말리를 사용하여 역학적 한파 인덱스를 계산하였다. 우리나라에서 발생하는 한파는 총 3가지, 웨이브 타입, 블라킹 타입, 지역적 타입 한파로 분류하였으며 한파 타입별 공간적, 시간적 특성을 살펴보았다. 우리나라 한파의 약 52%는 웨이브 타입 한파로 분류되며 약 3일정도의 지속기간을 가진다. 블라킹 타입의 한파는 약 39%로 평균 4일 이상의 지속기간을 가지며 월별로 지속기간이 상이하게 나타남을 확인하였다. 웨이브 타입의 한파는 11월과 12월에 발생 일수가 많으며 블라킹 타입의 한파는 12월과 1월에 상대적으로 많이 발생한다. 특히 12월에 발생하는 블라킹 타입의 한파는 상대적으로 지속기간이 길며 그 강도 또한 강하여 월평균 기온에 미치는 영향이 크게 나타난다. 12월 한파 발생일수의 변화는 12월 평균 기온 변동성의 약 64%를 설명하며 한파 일수의 변화는 월평균 기온의 변동과 밀접한 상관을 가진다.

한파 발생의 종관적 특징을 살펴보면, 시베리아 고기압이 강화되면서 유라시아 내륙에서 동아시아 지역으로 서서히 남동진하며, 한파 발생일에 우리나라를 중심으로 고기압-저기압 대비 구조가 형성되어 북쪽 한기를 우리나라로 이류시켜 급격한 기온 감소를 가져온다. 다만 웨이브 타입의 한파는 유라시아 대륙 안쪽에서 고기압이 형성

되어 시베리아 고기압이 점차 남동진하는 반면, 블라킹 타입의 한파는 고기압 중심이 아북극에 위치하고 점차적으로 남쪽으로 확장하여 시베리아 고기압이 강화된다는 차이가 있다. 웨이브 타입의 한파보다 블라킹 타입의 한파가 더 오랜 시간 지속되고 그 강도 또한 강하므로 겨울철 평균 기온에 더 밀접한 영향을 미친다. 지역적 한파의 경우 발생 일수의 비율이 적을 뿐 아니라 한파 발생 직전 급히 발달한 시베리아 고기압이 웨이브 타입으로 남동진 하면서 급속히 사라지는 형태를 보이는데 이는 서고동저의 전형적인 겨울형 기압배치로 일반적으로 추운 겨울철 날씨에 지역적으로 약하게 발생, 급속히 완화되는 한파로 사료된다.

지구 온난화로 인해 지구가 점차 더워지고 있음에도 불구하고 12월 한파 일수는 뚜렷한 증가 추세를 보이며, 특히 블라킹 타입의 장주기 한파의 발생이 증가하는 특징을 보인다. 12월 평균 기온이 뚜렷한 감소 추세를 나타내는 것은 강력한 블라킹 타입의 한파의 발생이 증가하기 때문이며, 최근 이례적인 극한 기후들이 발생했던 원인으로 분석된다. 반면 1월과 2월에 한파 일수는 점차적으로 감소하는 추세를 보이며 월 평균 기온의 증가 추세에 상응하는 결과라 할 수 있다.

CPC에서 제공하는 기후 인자들을 사용하여 한파 발생에 영향을 미치는 대규모 기후 변동성이 분석되었다. 웨이브 타입의 한파는 대규모 기후인자와의 유의미한 상관관계를 보이지 않지만 블라킹 타입의 한파는 기후 인자와 유의한 상관관계를 나타냈다. AO, WP, ONI 가 강한 음의 해일 때, EAWM, PNA, PDO가 강한 양의 해일 때 블라킹 타입 한파의 발생 확률이 증가함을 확인하였다. 특히 블라킹 타입 한파의 발생은 총 발생일의 75%가 EAWM이 양의 해일 때 발생하였으며 이는 우리나라 한파가 동아시아 겨울 몬순의 하부 시스템으로 알려진 것과 일치하는 결과라 할 수 있다. 한반도 겨울철 기후 패턴을 살펴보면 서고 동저형의 기압 배치가 우세하고 한반도 대기 상층에 트라프와 상층 제트류가 강화되는 특징을 보인다. AO는 시베리아 고기압과 알류산 저기압의 강도에 직접적인 영향을 주며 ENSO는 태평양-동아시아 원격상관을 통해 동아시아에 고기압성 순환을 강화시킴으로써 시베리아 고기압의 강화에 영향을 준다. 이러한 ENSO 효과는 PDO와 같은 북태평양의 장주기 대기 해양 순환 패턴의 phase에 따라 한반도 한파 발생에 미치는 영향이 달라진다. WP 와 PNA 는 알류산 저기압의 위치와 강도에 영향을 줌으로써 한반도 주위 서고동저의 기압배치에 영향을 준다. 또한 북태평양 WP 패턴의 phase에 따라 AO의 효과는 증가될 수도 상

쇄될 수도 있으며, 각각의 기후 지수들의 모드가 in-phase이나 out-of-phase이나에 따라 개별 지수들이 한반도 한파 발생에 미치는 영향들은 달라질 수 있다. 우리나라 한파 발생에 유의한 관계를 가지는 대규모 기후 변동성은 시베리아 고기압과 알류산 저기압의 강도나 위치를 변화시킴으로써 한파 발생의 환경을 변화시킨다 할 수 있다. 어떤 기후 지수들의 combined effect가 가장 큰 시너지 효과를 나타내는지에 대해서는 후속 연구가 필요하다. 우리나라 한파 발생에 영향을 미치는 주요 기후 인자들은 시베리아 지역과 동아시아 지역을 평년에 비해 차갑고 한반도 주변에서 서고동저의 기압패턴을 강화시켜 북풍 계열의 바람을 강화시키며 이는 한반도 한파 발생에 적합한 환경을 조성하는 역할을 한다.

마지막으로 한파 발생의 장주기 변동성을 살펴보았다. 1980년대에 비해 1990년 한파 발생은 확연히 감소하며 2000년대 한파 발생이 다시 증가하는 경향을 보인다. 특히 2000년대에 들어 12월 한파 발생이 급증하고 있으며 더 강한 강도의 긴 주기를 가지는 블라킹 타입의 한파가 급증함으로써 이례적인 극한 기후 현상을 발생시킴을 볼 수 있었다. 지구온난화로 인해 2000년대에는 극지역의 기온이 뚜렷하게 증가하고 유라시아 대륙의 중남부는 오히려 차가워진 것을 볼 수 있다. 이와 더불어 기압 배치의 변화를 살펴보면 1980년대에 아북극지역으로부터 저기압성 아노말리가 나타나는 반면 2000년대에는 유라시아 대륙 고위도 지역에 고기압성 아노말리가 나타나고 대륙과 인접한 해양에서 저기압성 아노말리가 나타난다. 이는 동아시아 몬순 강도에 영향을 주며 2000년대 한파 발생의 일수가 증가하는 최적의 환경을 나타내는 결과라 할 수 있다.

REFERENCE

- Barnston, A. G., and R. E. Livezey, 1987: Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Wea. Rev.*, 115(6), 1083–1126.
- Chen, T.-C., W.-R. Huang, and J.-h. Yoon, 2004: Interannual variation of the East Asian cold surge activity. *J. Climate*, 17, 401–413.
- Dee et al., 2011: The Era-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Rea. Meteor. Soc.*, 137: 553–597.
- Gong, D. H., and C. H. Ho, 2002: The Siberian high and climate change overmiddle to high latitude Asia. *Theor. Appl. Climatol.*, 72, 109
- Gong, D.-Y., and C. H. Ho, 2004: Intra-seasonal variability of winterime temperature over East Asia. *Theor. Appl. Climatol.*, 24, 131–144.
- Heo, I. H., and S. H. Lee, 2006: Changes of unusual temperature events and their controlling factors in Korea. *J. Korean Geogr. Soc.*, 41, 94–105.
- Jeong, J.-H., and H. R. Byun, 1987: A case study of global circulation of the atmosphere during a cold surge in East Asia. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 23, 23–33.
- _____, 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 oigin of cold surge occurrence in East Asia. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L14710.
- Jiang, Z. T. Ma, and Z. Wu, 2012: China cold wave duration in a warming winter: change of the leading mode. *Theor. Appl. Climatol.* 110, 65–75.
- Kim, B.-M., J.-H. Jeong, and S.-J. Kim, 2009: Investigation of stratospheric precursor for the cold surge event using potential vorticity inversion technique. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 45, 513– 522.
- Kim, S.-W., K.-H. 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).
- Lim, G.-H., 1995: Spatial and temporal evolution of the tropospheric upper and lower level winds during the cold surge periods in East Asia. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 31, 373–392.
- Norton, W. A., 1994: Breaking Rossby waves in a model stratosphere diagnosed by a vortex-following coordinate system and a technique for advecting material contours.

- Journal of the atmospheric sciences, 51(4), 654–673.
- Ou, T., D. Chen, J.-H. Jeong, H. W. Linderholm, T. Zhou, 2015: Changes in winter cold surges over Southeast China: 1961 to 2012, *Asia. Pac. J. Atmos. Sci.*, 51(1), 29–37.
- Park, T.-W., C.-H. Ho, and S. Yang, 2011: Relationship between the Arctic Oscillation and cold surges over East Asia. *J. Climate*, 24, 68–83.
- _____, C.-H. Ho, and Y. Deng, 2014: A synoptic and dynamical characterization of wave-train and blocking cold surge over East Asia. *Clim. Dynam.*, 43, 753–770.
- _____, C.-H. Ho, S. Yang, and J.-H. Jeong, 2010: Influences of arctic oscillation and Madden-Julian Oscillation on cold surges and heavy snowfalls over Korea: A case study for the winter of 2009–2010. *J. Geophys. Res.*, 115, D23122.
- _____, C.-H. Ho, J.-H. Jeong, J.-W. Heo, and Y. Deng, 2015: A New Dynamical Index for Classification of Cold Surge Types over East Asia. *Clim. Dynam.*, doi: 10.1007/s00382-015-2483-7.
- Pelly, J. L., and B. J. Hoskins, 2003: A new perspective on blocking, *J. Atmos. Sci.*, 60(5), 743–755.
- Thompson, D. W., and J. W. Wallace, 2000: Annular modes in the extratropical circulation. Part I: month-to-month variability. *J. Climate*, 13, 1000–1016.
- Ryoo, S.-B., W.-T. Kwon, and J.-G. Jhun, 2005: Surface and upper-level features associated with wintertime cold surge outbreaks in South Korea. *Adv. Atmos. Sci.*, 22, 509–524.
- Wang, L., and W. Chen, 2014: An intensity index for the East Asian winter monsoon. *J. Climate*, 27, 2361–2374.
- _____, R. H. Huang, L. Gu, W. Chen, and L. H. Kang, 2009: Interdecadal variations of the East Asian winter monsoon and their association with quasi-stationary planetary wave activity. *J. Climate*, 22, 4860–4872.
- _____, W. Chen, W. Zhou and R. Huang, 2009: Interannual variations of East Asian trough axis at 500hPa and its association with the East Asian winter monsoon pathway, *J. Clim.*, 22(3), 600–614.
- Wang, B., R. Wu and X. Fu, 2000: Pacific–East Asia teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate? *J. Clim.*, 13, 1517–1536.
- _____, J. Yang, T. Zhou, B. Wang, 2008: Interdecadal changes in the major modes of Asian–Australian monsoon variability: strengthening relationship with ENSO since the late 1970s. *J. Clim.*, 21, 1771–1789.

- Wen, M., S. Yang, A. Kumar, P. Zhang, 2009: An analysis of the large scale climate anomalies associated the snowstorms affecting China in January 2008, *Mon. Wea. Rev.*, 137, 1111–1131.
- Wolter, K., and M. S. Timlin, 1998: Measuring the strength of ENSO – how does 1997/98 rank? *Weather*, 53, 315–324.
- 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.
- Wu, Z., J. Li, Z. Jian, J. He, 2011: Predictable climate dynamics of abnormal East Asian winter monsoon: once-in-a-century snowstorms in 2007/2008 winter. *Clim. Dyn.*, 37, 1661–1669.
- Zhang, Y., M. Wallace, and D. S. Battisti, 1997: ENSO-like interdecadal variability: 1900–93. *J. Climate*, 10, 1004–1020.
- Zhai, P. M. and X. H. Pan, 2003: Trends in temperature extremes during 1951–1999 in China. *Geophys. Res. Lett.* 30
- Zhang, Y. and W. C. Wang, 1997: Model-simulated northern winter cyclone and anticyclone activity under a greenhouse warming scenario. *J. Climate*, 10, 1616–1634.
- Zhou, T. J., B. Wu, and B. Wang, 2009: How well do atmospheric general circulation models capture the leading modes of the interannual variability of the Asian–Australiann monsoon? *J. Climate*, 22, 1159–1173.
- Zhou, Y. W and G. Y. Ren, 2011: Change in extreme temperature event frequency over mainland China, 1961–2008, *Clim. Res.*, 50, 125–139.

연구보고서 2016-16

한반도 한파의 특성 변화 및 대규모 기후
변동성과의 연관성

Changes in cold surge characteristics over the Korean Peninsular and their
relation to large-scale climate variation

신선희



APEC 기후센터

48058 부산광역시 해운대구 센텀7로12

Tel: 051-745-3900 Fax: 051-745-3949

www.apcc21.org



9 791156 981671

ISBN 979-11-5698-167-1