THE KOREAN JOURNAL OF QUATERNARY RESEARCH Vol. 33, No. 1-2, p.37-48 (December 2021)
https://doi.org/10.22658/koq.2021.33.1.037

북극진동과 해수면온도가 한반도 한파에 미치는 영향

안상현, 정다흰*, 여성민, 노엘, 김주완
공주대학교 대기과학과

Effect of Arctic Oscillation and Sea Surface Temperature on Cold Surges over the Korean Peninsula

Sang-Hyun An, Da-Huin Chong*, Sung-Min Yeo, El Noh, Joowan Kim
Department of Atmospheric Sciences, Kongju National University, Gongju, Korea

요 약 : 한파는 겨울철 동아시아 지역의 대표적인 위험 기상 현상으로, 시베리아 고기압에 지배적인 영향을 받으며, 북극 지역의 기압장이 일정 주기로 강약을 되풀이하는 북극진동의 위상과도 밀접한 관련이 있다. 또한, 한반도-일본 동쪽 해상에서 발달하는 저기압은 해수면 온도에 민감하고 한파 발생 시 한반도로 유입되는 한랭 이류의 강화에 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 겨울철 동아시아 한파의 대규모 배경장에 영향을 미치는 북극진동과 저기압과 관련된 급격한 기온 변화에 기여하는 동아시아 해안 지역의 해수면 온도를 분석하였다. 분석을 위해 49년(1969/70-2017/18) 동안 한반도 5개의 관측소에서 측정된 일 평균기온 중 하위 3%에 해당하는 날을 한파 사례로 선택하였다. 북극진동이 음의 위상일 때, 동아시아 지역에 위치한 기압골이 강해지며 극 지역의 한랭한 공기 유입이 강화되어 한파가 빈번하게 발생함을 확인하였다. 또한, 동아시아 주변의 해수면 온도가 평균보다 높은 경우 대기와 해양의 온도 및 습도 차이로 인해 현열 및 잠열 방출이 강화되며, 종관 저기압이 더 강하게 발달하여 기온이 빠르게 하강하는 극심한 한파가 발생할 가능성을 보였다.
주요어 : 한파, 북극진동, 해수면온도

Abstract : The cold surge is an important extreme weather in East Asia during winter, and is largely affected by behavior of the Siberian high Arctic Oscillation, which represents undulation of large-scale pressure pattern in the Arctic region. Recent studies also revealed that the synoptic low pressure system developing in the eastern boundary of the Asian continent is sensitive to sea surface temperature (SST) and plays an important role in strengthening the cold advection over the Korean Peninsula during cold surges. In this study, we analyzed the Arctic Oscillation affecting the large-scale background of cold surge in East Asia, and the sea surface temperature in the coast of East Asia is examined focusing on its role on synoptic low-inducing cold advection. For the analysis, the days with the bottom 3% of the average daily temperature, measured at five surface stations in Korean Peninsula during 49 years (1969/70-2017/18), were used for the cold surge cases. During the negative phase of the Arctic Oscillation, a strong trough is observed over East Asia, and the inflow of cold air from the polar region is

strengthened, which lead to frequent cold surges. In addition, anomalously high SST in the eastern coast of Asia increases sensible and latent heat release from the ocean, therefore, it enlarges the likelihood of synoptic low-inducing extreme cold surges.
Key words : Cold Surge, Arctic Oscillation, Sea Surface Temperature

1. 서론

한파는 동아시아 지역에서 자주 발생하는 대표적인 겨울철 위험 기상 현상 중 하나로, 동아시아 겨울 몬순과 깊은 관계가 있다(Wang and Chen, 2010). 시베리아 고기압과 알류샨 저기압은 동아시아 겨울 몬순을 대표하는 기압 현상이며, 특히 시베리아 고기압은 동아시아 한파의 주요 원인으로 이에 대한 대해서 많은 연구가 이루어져 왔다(Ding and Krishnamurti, 1987; Zhang et al., 1997; Wu and Wang, 2002; Takaya and Nakamura, 2005). 시베리아 고기압의 동아시아 확장은 극 지역의 한랭한 공기를 한반도를 포함한 동아시아 지역에 유입시킬 수 있는 유리한 환경을 조성하며(Zhang et al., 1997; Takaya and Nakamura, 2005), 시베리아 고기압의 강도에 따라 동아시아 한파의 빈도나 세기가 변할 수 있음이 밝혀졌다(Ding, 1987; Zhang et al., 1997; Wang and Chen, 2010).

유럽, 북미를 포함한 아한대 지역의 한파는 대표적인 북극 변동성인 북극진동과 높은 상관성이 있으며(Wallace, 2000), 동아시아의 겨울철 기후변동성 또한 북극진동과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다(Gong et al., 2001; Jeong and Ho, 2005; Shin et al., 2006; Park et al., 2010; Jun et al., 2021). 북극진동은 북극 지역과 중위도 북태평양 및 북대서양 지역의 해면기압이 반대 위상을 가지고 변동하는 현상으로(Thompson and Wallace, 1998), 북극진동지수(Arctic Oscillation Index, AOI)로 그 위상을 나타낼 수 있다. Jeong and Ho (2005)는 북극진동이 음의 위상일 때 동아시아 한파가 일어나기 유리한 배경이 형성되고 통계적으로 한파가 더 빈번하게 일어남을 제시하였으며, Park et al. (2010)은 북극진동과 매든-줄리안 진동 등의 대규모 순환장이 동아시아 한파와 밀접한 관련이 있음을 보였다.

시베리아 고기압이나 북극진동과 같은 대규모 배경장은 동아시아 및 한반도의 겨울철 기온 및 한파 발생 빈도와 높은 상관성을 보이지만, 한파 발생 시 수일 내에 발생하는 급격한 기온 감소를 설명하기는 부족하기 때문에, 관련 메커니즘을 설명하기 위해서 상대적으로 더 작은 종관규모의 연구가 진행되었다(Xu and Zhou 1999; Yoo et al., 2015; Lee et al., 2018). Yoo et al.(2015)은 한반도에 한파가 발생할 때 한반도 동쪽에서 종관 규모의 저기압성 순환이 발달함을 보였고, Lee et al.(2018)은 한반도-일본 해상에서 형성되는 저기압성 순환이 한파 발생 1일 전 하층 기압경도력에 영향을 주어 시베리아 고기압과 함께 한랭한 공기의 유입을 강화함을 제시하였다. Shin et al.(2006)은 동아시아 한파 발생이 북극진동 이외에도 쿠로시오 해류가 나타나는 지역의 열원과 관련이 있음을 제시하였고, Xu and Zhou(1999)는 쿠로시오 해류에서 방출되는 잠열이 동아시아 대륙의 동안에서 저기압이 급격하게 발달하는 데 중요한 역할을 할 수 있음을 수치적으로 보였다. 이러한 메커니즘에 근거하여 Lee et al.(2018)은 쿠로시오 지역 열원이 대륙 동안의 저기압 발달을 통해 한반도 및 동아시아 지역의 한파를 강화할 수 있음을 주장하였다.

본 연구에서는 여러 선행 연구 결과를 확장하여 겨울철 동아시아 지역 한파 발생에 유리한 배경을 형성하는 북극진동에 대하여 자세히 확

인하고자 한다. 또한 동아시아 한파와 해수면온도의 연관성에 대한 연구가 부족하기 때문에 아시아 대륙의 동쪽 경계인 한반도-일본과 쿠로시오 해류가 나타나는 지역의 온도 변화로 인한 잠열과 현열 방출량의 변화와 저기압 사이의 관계를 정리하고, 한반도에 극심한 한파가 일어나는 메커니즘을 분석하였다. 제2장에서는 자료와 분석방법을 서술하였으며, 연구 결과는 두 부분으로 나누어 제3장에 북극진동이 한반도 한파 발생에 미치는 영향과, 제4장에 해수면온도가 한반도 한파 강도에 미치는 영향을 분석하였다. 제5장에서는 요약 및 결론을 제시하였다.

2. 자료 및 분석 방법

2.1. 자료

본 연구에서 사용한 지상 관측 자료는 기상청에서 제공하는 한반도 5개 관측 지점(대전, 서울, 수원, 청주, 춘천)의 1969/70년부터 2017/18년까지 49년간의 겨울철(12월, 이듬해 1월, 2월) 일평균 기온이다. 지난 49년간 지속적으로 일평균 기온을 관측한 지상 관측소 중 해상의 영향을 최소화하고자 내륙의 5개의 관측 지점을 분석에 활용하였고 윤년의 2월 29일은 편의를 위해 분석에서 제외하였다. 해당 겨울철 일평균 관측자료에는 지구온난화에 의한 장기 기후변동성도 포함되어 있으므로 본 연구에서는 북극진동만의 영향을 고려하기 위해 관측 지점별 자료들을 각각의 원시자료로부터 일 기후값의 선형 추세를 제거한 후 사용하였다.

북반구 대기 순환장 분석에는 일본 기상청에서 제공하는 Japanese 55-year Reanalysis (JRA-55, Kobayashi et al., 2015) 자료를 사용하였으며, 기상청 관측 자료와 동일하게 1969/70년부터 2017/18년까지 49년간의 겨울철 자료를 분석하였다. 분석에 사용한 변수는 500, 850 hPa의 지위고도 및 온도 그리고 표준 해수면기압이다. 대규모 현상 분석의 편의를 위해 재분석자료는 시간에 대해 일 평균하였으며, 수평해상도를 모두 2.5˚×2.5˚로 재격자화하여 사용하였다. 한반도 근처의 해수면 온도를 분석하기 위해 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA)에서 제공하는 위경도 해상도 0.25˚×0.25˚의 OISST(Optimally Interpolated Sea Surface Temperature; Reynolds et al., 2002) 일 자료를 사용하였으며, 같은 지역에서의 해양 열 속을 분석하기 위해 미국 우즈홀 해양 연구소(Woods Hole Oceanographic Institution; WHOI)가 제공하는 1˚×1˚ 간격의 OA-Flux(Objectively Analyzed air-sea Fluxes; Yu et al., 2007) 일 자료를 사용하였다.

북극진동지수는 위도 20˚N 이상 영역의 평균 해면기압편차에 대한 경험적 직교함수(Empirical Orthogonal Function)의 첫 번째 주성분(Principal Component) 시계열로 정의된다(Thompson and Wallace, 1998). 본 연구에는 미국 해양대기청 기후예측센터(Climate Prediction Center; CPC)에서 제공하는 일 단위 북극진동지수를 사용하였다.

2.2. 한파 사례 선정

본 연구에서는 전체 분석기간 동안 겨울철 일평균 기온 자료의 하위 3%에 해당하는 날을 한파로 정의하고, 한파 사례의 중복성을 피하기 위해서 한파가 연속해서 나타나는 경우는 하나의 한파로 정의하였다. 겨울철 하위 3%에 해당하는 일평균 온도는 약 -9.56˚C였으며, 이를 기준으로 총 63회의 독립적인 한파사례를 선정하였다. 또한, 북극진동의 위상에 따른 한파 특성을 분류하기 위하여 북극진동지수가 +0.5 이상이면 양의 위상으로, -0.5 이하이면 음의 위상 그리고 그 사이는 중립으로 분류하였다. Figure 1은 북극진동의 위상에 따른 온도 분포와 한파 일수를 나타낸 것으로 Jeong and Ho

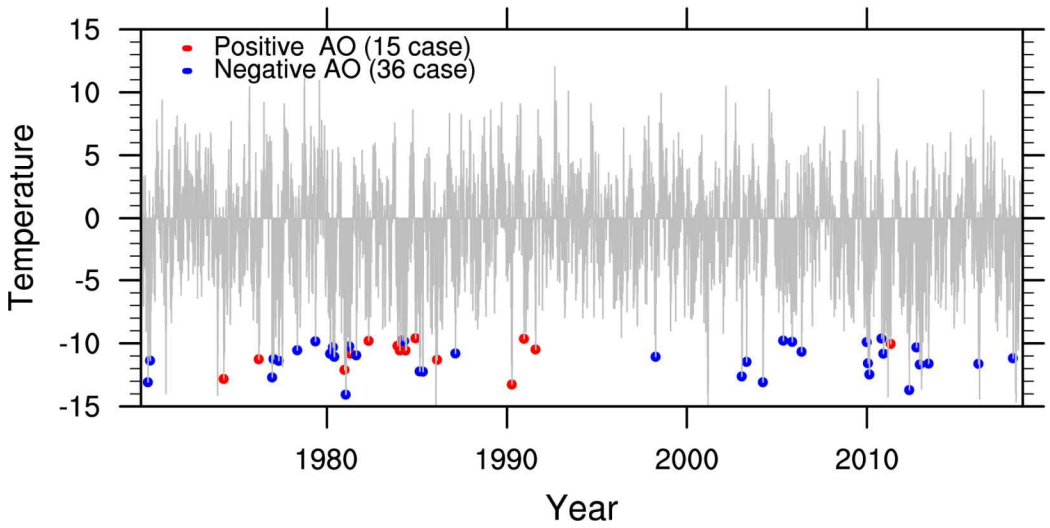

Figure 1. Daily-mean temperature distribution during boreal winter (Dec-Feb) The red and blue dots indicate the selected cold surge cases during positive and negative AO, respectively.

(2005)에서 보고된 내용과 같이 북극진동이 음의 위상일 때 한파가 더 빈번하게 발생함을 보여준다. 전체 한파 사례 중 북극진동이 양의 위상일 때는 15회, 음의 위상일 때는 36회의 한파가 각각 발생하였고, 중립상태일 때의 12회의 한파 사례가 발생하였다. 또한 본 연구에서는 한파의 강도에 따른 대기 및 해양의 변화를 분석하였다. 그러나 일 단위의 잠열 및 현열 자료는 1985년부터 활용이 가능하여 33년(1985/86-2017/18) 동안 한반도 5개의 관측소에서 측정된 일 평균기온 중 하위 3%에 해당하는 날을 한파 사례로 재선정하였다. 이 경우 하위 3%에 해당하는 일평균 온도는 약 -8.76℃이며 자료의 연속성을 제거하여 총 42개의 독립적인 한파 사례를 선정하였다. 추가로 해당 한파 사례의 발생 이전 5일 기간 동안 전날 대비 6℃ 이상의 급격한 온도 감소가 나타난 사례는 극심한 한파(Extreme Cold Surge)로 분류하였다. 극심한 한파는 총 15개이며 선정된 한파 사례의 약 35.7%이다.

3. 북극진동과 한파의 연관성

북극진동은 Figure 2a와 같이 북극과 중위도 북태평양 및 북대서양 지역의 해면기압이 일정 주기로 반대 위상을 가지는 현상이다(Thompson and Wallace, 1998). 북대서양에서 상대적으로 강한 양의 상관성을 보이며, 이러한 변동성은 아조레스 고기압과 아이슬란드 저기압 사이의 강한 변동 패턴인 북대서양 진동(North Atlantic Oscillation; NAO)의 상당 부분을 나타낸다(Hurrell et al., 2001; Wanner et al., 2001). 북태평양 지역의 평균 해면기압의 쌍극 패턴 또한 유의미한 값이 나타나며(Figure 2a), 이는 북태평양의 서쪽에 위치한 동아시아 지역의 겨울철 순환장이 북극진동의 변동성이 크게 영향을 받을 수 있음을 시사한다.

Figure 2b는 850 hPa 온도와 북극진동지수의 상관관계로, 북극진동과 아한대 지역 대기하층 온도가 밀접한 양의 상관성이 있음을 보여

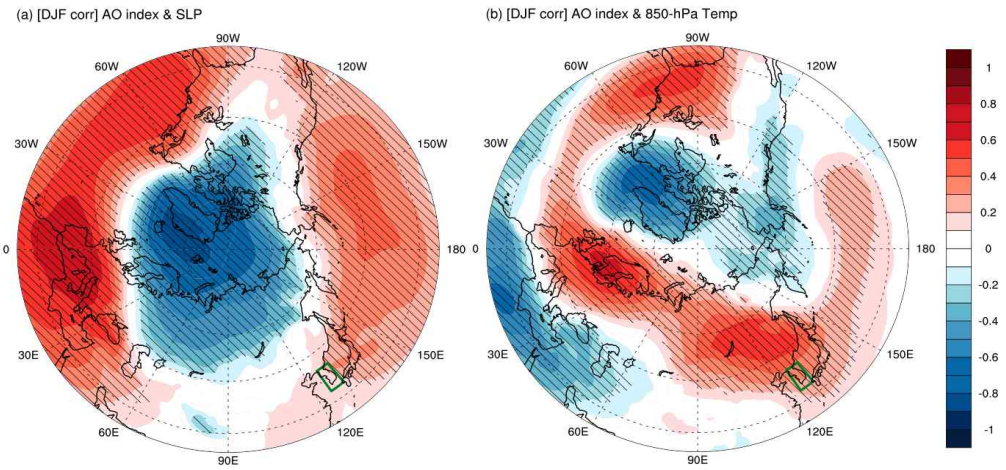

Figure 2. Correlation coefficients between AO index and (a) mean sea level pressure (SLP), (b) 850-hPa temperature. The black oblique pattern highlights the statistically significant anomalies at the p <0.05 level, determined using a two-tailed Students' t-test.

준다. 선행논문들의 결과와 마찬가지로 북미 동부, 북유럽, 유라시아 지역에 유의미한 양의 상관관계가 나타난다(Wang and Ikeda, 2000; Jun et al., 2021). 특히, 만주 및 시베리아를 포함하는 넓은 지역에서 뚜렷한 양의 상관성을 보이는데, 이러한 특성은 한반도 및 일본지역에까지 확장되는 것을 볼 수 있다(Figure 2). 이는 북극진동이 동아시아 겨울철 온도에 유의미한 영향을 미치고 있으며, 음의 북극진동 시기에 동아시아 지역에 추운 겨울이 발생할 수 있는 확률이 높음을 나타낸다(Gong and Ho, 2004; Park et al., 2010).

Figure 3은 북극진동의 위상에 따른 동아시아의 한파 배경장의 변화를 보여준다. 한파시기에 동시베리아 부근에서 평년 대비 낮은 온도가 관측되며, 전반적으로 시베리아 고기압과 일본 동쪽에 저기압이 나타나는 서고동저형의 기압배치가 확인된다(Ryoo and Kwon, 2002). 또한 북극진동이 음의 위상일 때 이러한 특성이 더 강하게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 한반도 인근의 온도가 더 낮은 것으로 확인되었다. 이러한 특성은 기존의 연구결과와 잘 일치한다(Gong et al., 2001; Jeong and Ho, 2005; Park et al., 2010). 추가로, 일본 동쪽의 저기압이 더 강하게 발달하여 한반도 지역의 기압경도가 더 강하게 형성되는 것을 확인할 수 있는데, 이러한 저기압의 발달은 지균균형을 통해 한반도 지역에 더 강한 북풍과 한파를 유발할 수 있다. 해당 저기압의 발달은 상층 500 hPa의 지위고도의 기압골과도 뚜렷하게 연결되며 북극진동이 양의 위상일 때보다 음의 위상일 때, 더 명확한 구조를 나타낸다(Figure 3c, d). 음의 위상일 때 상층 500 hPa의 편서풍도 더 강하게 나타나고 이는 동아시아 지역의 경압성 강화와 관련된 한파 발생에 유리한 배경장을 제공한다(Boyle, 1986; Lee et al., 2018). 그러나 북극진동 위상과 300 hPa의 제트는 유의미한 상관성을 보이지는 않는다.

Figure 3e, f는 평균해면기압과 850-hPa 고도의 10 m s-1 이상의 풍속을 나타낸다. 북극진동이 양의 위상일 때는 한반도 부근으로 시베리아 고기압이 확장된 모습을 볼 수 있다. 음의

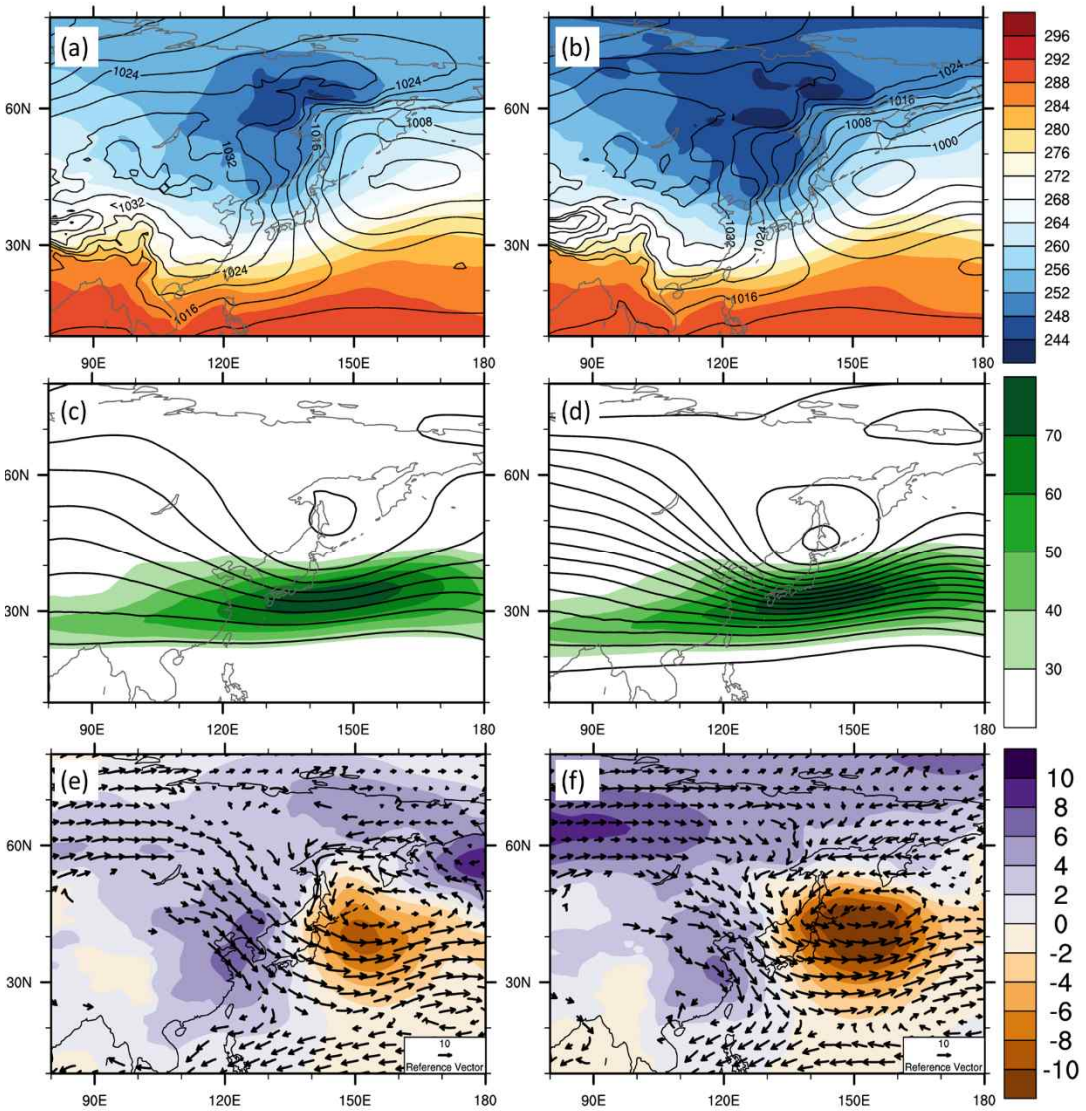

Figure 3. Composite maps of (a, b) mean sea level pressure (contour; hPa) and 850-hPa temperature (shading; K), (c, d) 500-hPa geopotential height (contour; m) and 300-hPa zonal wind (shading; m s-1), (e, f) 850-hPa wind (vector; m s-1) and mean sea level pressure anomalies (shading; hPa).

위상일 때는 시베리아 고기압에 비해 일본 동부에 위치한 저기압이 한반도 지역의 한랭이류에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

겨울철 일평균 온도를 북극진동 위상별 확률밀도함수로 정리하였다(Figure 4). 전체 겨울철의 중앙값을 기준으로 음의 위상일 때가 양의 위상일 때보다 음의 방향으로 약 2°C 치우쳐 있음을 볼 수 있다. 이는 북극진동이 음의 위상

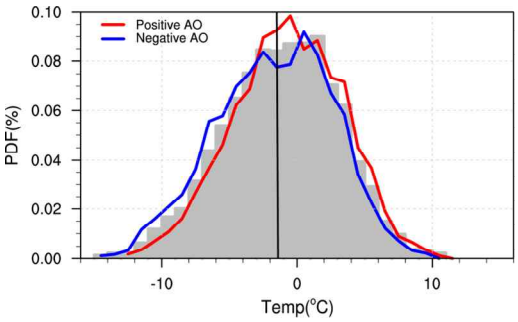

Figure 4. Probability density function of daily-mean temperature during boreal winter (Dec-Feb). Red and blue curves are positive and negative AO samples, respectively, and gray shading is the total. Black line indicate median of the total.

을 보일 때 겨울철의 평균 온도가 낮아질 뿐 아니라 극한 저온 현상도 더 자주 나타남을 의미한다. 일평균 온도 -10℃ 이하의 저온일은 양의 위상에서 1.3% 음의 위상에서 3.4%로 음의 북극진동에서 2.6배가량 더 자주 발생한다. 북극진동이 음의 위상일 때 더 강하게 나타나는 500 hPa의 기압골과 지상 저기압의 발달에 의한 서고동저의 기압배치 강화는 이러한 한파 발생의 중요한 기작이 되는 것으로 보인다.

4. 해수면온도의 영향

본 연구에서는 동아시아의 해양 경계에서 저기압의 발달과 함께 발생하는 한파(e.g., Lee et al., 2018)의 원인을 파악하기 위해 동아시아 지역의 해수면온도 편차와 잠열 및 현열 속을 분석하였다. 추가로 한파 시의 저기압의 발달은 해수면 기압과 500 hPa의 지위고도를 활용하여 분석하였다. Figure 5는 한반도 겨울철 한파 발생 시 해수면 온도의 변화를 나타낸다. 한파 발생 시에는 일반적으로 한반도 및 일본 근처 해양에서 평년에 비해 0.2-0.5℃ 정도 낮

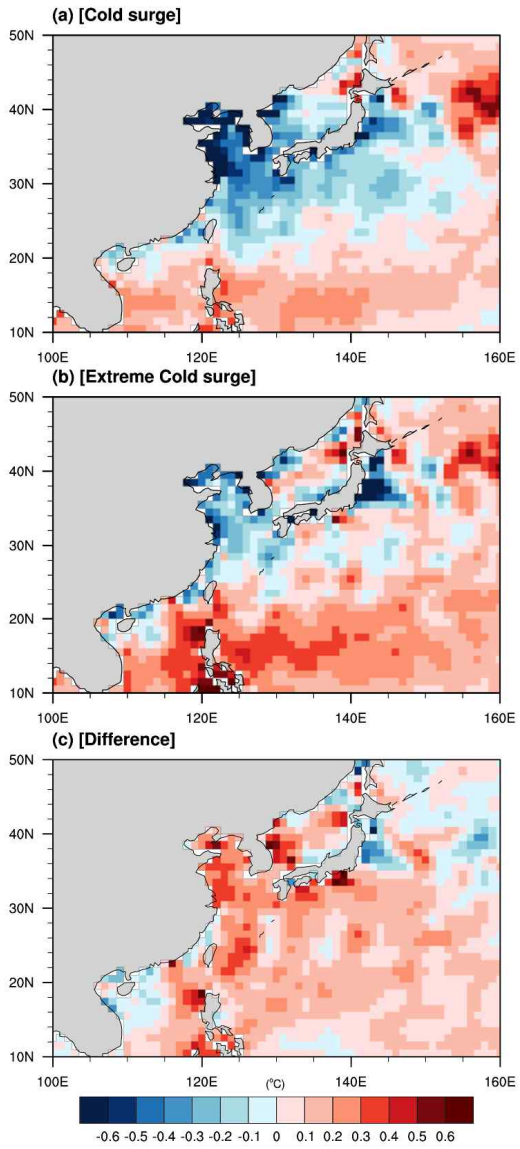

Figure 5. Composite maps of sea surface temperature anomalies for (a) the total cold surges, (b) extreme cold surges, and (c) their difference.

은 해수면 온도가 관측된다(Figure 5a). 한파 시기에 대륙에서 유입된 차가운 공기의 인해 해

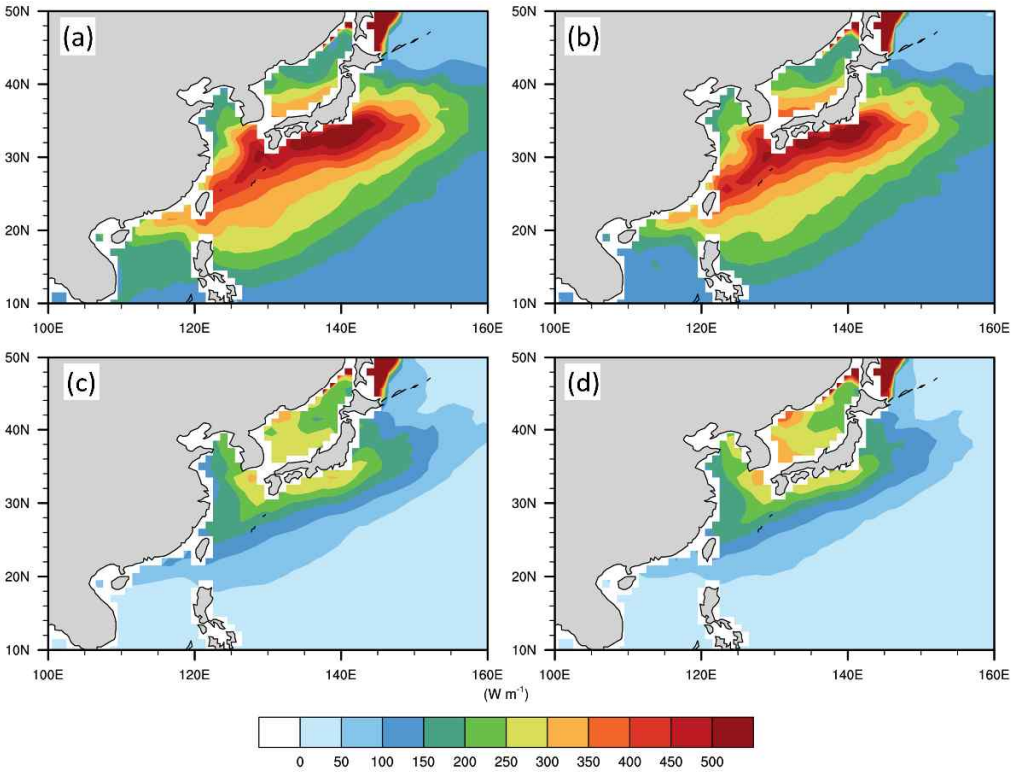

Figure 6. Composites of surface (a, b) latent and (c, d) sensible heat fluxes (W m^{-2}) for the total cold surges (left panels) and extreme cold surges (right panels). Upward flux from the ocean to the atmosphere is presented as positive.

양의 현열 및 잠열 방출이 크게 증가하고, 한반도 근처 해수면온도가 다소 감소하는 경향이 있다(Lee et al., 2018; Wang and Chen, 2010). 흥미로운 점은 극심한 한파시기에는 이러한 경향성이 다소 작게 나타나며 필리핀 해로부터 쿠로시오 해류가 지나가는 경로는 평년에 비해 더 높은 해수면 온도 값을 보인다(Figure 5b). 극심한 한파와 전체 한파의 해수면온도의 차이(Figure 5c)는 이러한 특성을 더 잘 나타내는데, 극심한 한파가 발생할 때는 전체 한파 시보다 동아시아 전반에 걸쳐 해수면 온도가 더 높은 것을 알 수 있다. Lee et al.(2018)과 Yoo et al.(2015)는 한파 시기 수일 내에 발생하는 급격한 기온 감소의 원인을 한국-일본 동쪽 해상에서 형성되는 지상저기압의 발달로 설명하였으며, 이러한 해수면온도의 증가는 저기압의 발달을 도와 급격히 발달하는 극심한 한파의 발생을 도울 수 있다.

극심한 한파와 높은 해수면 온도가 어떤 연관성을 가지는지 확인하기 위하여 한파 시기 잠열 및 현열 방출량을 확인하였다(Figure 6). 겨울철 아시아 대륙의 동안에는 따뜻한 쿠로시오 해류로 인해 다른 지역들에 비해 비교적 높은 잠열 및 현열 방출이 나타난다(Yu and Weller, 2007). 한파 발생 시에는 평년에 비해 많은 양의 잠열과 현열이 방출되며 이는 한파를 유발하는 하층 대기의 한랭이류가 해양에서 방출되는 잠열속의 강화에 기여하기 때문이다

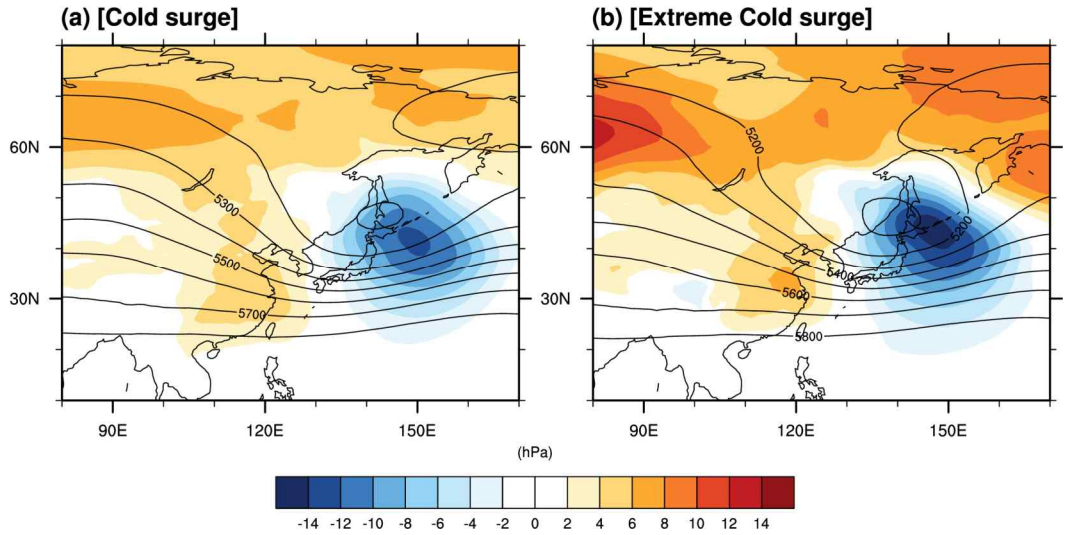

Figure 7. Composite maps of 500-hPa geopotential height (line; m) and mean sea level pressure anomalies (shading; hPa) for the total cold surges (left panel) and extreme cold surges (right panel).

(Lee et al. 2018). 특히 해수면 온도가 증가하는 극심한 한파의 경우에는 해양과 하층 대기의 온도 및 습도 차가 크기 때문에 전체 한파 사례와 비교하였을 때 한반도 주변에서 약 50 Wm^{-2}수준의 현열과, 20-30 Wm^{-2} 정도의 잠열 방출 증가가 관측되었다. 한파 시기 현열과 잠열속의 증가는 해당 지역의 저기압 발달의 중요한 에너지원으로 활용될 수 있다. 이러한 증가와 함께 아열대 북서태평양에서는 잠열 방출의 감소가 관측되었는데 관련 원인에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

전체 한파 사례에 비해 극심한 한파 시 한반도를 기준으로 서고동저형의 기압분포가 더욱 뚜렷하며, 한반도-일본 동쪽에 위치한 저기압 발달이 더 강하게 나타난다(Figure 7). 시베리아 고기압의 강화 및 지상 저기압의 발달로 인해 한반도 지역의 지상기압경도가 크게 증가하며, 이로 인한 북풍 계열의 강한 한랭이류는 한반도의 극심한 한파의 발생을 잘 설명한다. 대기를 가열시키는 물리 과정은 대표적으로 잠열, 현열, 복사과정 등이 있지만 겨울철 해상에서 일어나는 현상은 응결에 의한 잠열 방출이 지배적이다(Davis, 1963). 극심한 한파 발생 시 동해안에서 방출되는 잠열 방출량의 증가는 해당 지역의 하층 대기를 가열시키고, 하층 대기의 가열 현상은 열역학적으로 상승 운동을 더 강화한다. 이로 인해 유도되는 대기 상하층의 종관규모 순환장은 다시 지상 저기압의 발달을 돕는다(Lee et al., 2018).

4. 요약 및 결론

겨울철 대표적인 위험 기상인 한파의 발생에 기여하는 인자들을 이해하기 위하여 49년(1969/70-2017/18) 동안 한파와 관련된 대기 순환 및 대기-해양 상호작용 특성을 분석하였다. 한파에 대한 북극진동의 영향과 그 기작을 이해하기 위해 북극진동 위상 별로 한파를 분류하였으며 북극진동의 위상에 따른 한파의 발생 특성 변화를 조사하였다. 전체 한파 사례 중 북

극진동이 음의 위상인 경우는 57.1%, 양의 위상인 경우는 23.8%로 북극진동이 음의 위상일 때 한파가 2.4배가량 더 자주 발생하였다. 한파 발생 시기에는 평균적으로 한반도 북부에 500 hPa의 기압골 강화와 한반도 동부에 지상 저기압의 발달이 관측되어 한파의 발달에 경압불안정에 의한 저기압이 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 이러한 특성은 북극진동이 음의 위상일 때 더 뚜렷하며, 음의 북극진동 시 더 강하게 발달한 지상 저기압은 겨울철 서고동저 기압배치의 강화를 통해 북풍 계열의 한랭이류 유도한다. 이에 따라 음의 위상일 때 동아시아 지역에 더 잦은 한파가 발생하였다.

해수면온도와의 연관성을 연구하기 위하여 온도의 감소가 크게 나타나는 사례를 극한 한파 사례로 분류하고 해수면온도 및 대기-해양 열속을 분석하였다. 일 단위 대기-해양 열속 자료가 제공되는 33년(1985/86-2017/2018)의 기간에 발생한 42개의 사례 중 한파 발생 이전 5일 동안 전날 대비 6℃ 이상 일평균 온도가 감소한 한파 사례를 극심한 한파로 정의하였다. 극심한 한파는 총 15개 사례로 한파 사례 중 약 35.7%이다. 극심한 한파 시 해수면온도가 동아시아 주변의 넓은 해역에서 약 0.5℃ 더 높았으며, 대륙에서 불어나오는 차가운 공기가 따뜻한 해양과 만나면서 한반도 주변 및 일본 동쪽 해역에서 평년에 비해 많은 양의 현열 및 잠열이 방출되었다. 이러한 현열과 잠열 방출의 증가는 하층대기에 에너지를 공급하여 관측된 저기압 발달 및 열역학적 상승 운동 강화에 기여한 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2021년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(아북극-서태평양 기인 한반도 주변 고수온 현상 규명 및 예측시스템 구축)(20190344).

참고문헌

Boyle, J.S., 1986. Comparison of the synoptic conditions in midlatitudes accompanying cold surges over eastern Asia for the months of December 1974 and 1978. Part I: Monthly mean fields and individual events. Monthly Weather Review, 114(5), 903-918.

Davis, P.A., 1963. An analysis of the atmospheric heat budget. Journal of Atmospheric Sciences, 20(1), 5-22.

Ding, Y.H., Krishnamurti, T.N., 1987. Heat budget of the Siberian High and the winter monsoon, Monthly Weather Review, 115, 2428-2449.

Ding, Y.H., 1987. Monsoons Over China. Springer, New York 419p.

Gong, D.Y., Wang, S.W., Zhu, J.H., 2001. East Asian Winter Monsoon and Arctic Oscillation. Geophysical Research Letter, 28(10), 2073-2076.

Gong, D.-Y., Ho, C.H., 2004. Intra-seasonal variability of wintertime temperature over east Asia. International Journal of Climatology, 24, 131-144.

Hurrell, J.W., Kushnir, Y., Visbeck, M., 2001. The north Atlantic oscillation. Science, 291(5504), 603-605.

Jeong, J.H., Ho, C.H., 2005. Changes in occurrence of cold surges over east Asia in association with Arctic Oscillation. Geophysical Research Letter, 32(14), L14704.

Jun, Y.J., Song, K., Son, S.W., 2021.

Decadal Changes in the Relationship between Arctic Oscillation and Surface Air Temperature over Korea. Atmosphere, 31(1), 61-71.

Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebita, A., Moriya, M., Onoda, H., Takahashi, K., 2015. The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II , 93(1), 5-48.

Lee, H.Y., Kim, J., Park, I.G., Kang, H., Ryu, H., 2018. Local enhancement mechanism of cold surges over the Korean Peninsula. Atmosphere, 28(4), 383-392.

Park, T.W., Ho, C.H., Yang, S., Jeong, J.H., 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. Journal of Geophysical Research, 115, D23122.

Reynolds, R.W., Rayner, N.A., Smith, T.M., Stokes, D.C., Wnag, W., 2002. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. Journal of Climate, 15(13), 1609-1625.

Ryoo, S.B., Jhun, J.G., Kwon, W.T., Min, S.K., 2002. Climatological aspects of warm and cold winters in South Korea. Korean Journal of the Atmospheric Science, 5(S), 29-37.

Shin, S.C., Kim, M.K., 2006. Cold Surges over Korean Peninsula Associated with Arctic Oscillation and the Role of Heat Source. Dissertation, National University of Kongju.

Takaya, K., Nakamura, H., 2005. Mechanism of intraseasonal amplification of the cold Siberian High. Journal of the Atmospheric Sciences, 62(12), 4423-4440.

Thompson, D.W.J., Wallace, J.M., 1998. The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. Geophysical Research Letter, 25(9), 1297-1300.

Wallace, J.M., 2000. North Atlantic Oscillation/annular mode: Two paradigms-one phenomenon. Quaterly Journal of the Royal Meteorological Society, 126(564), 791-806.

Wang, J., Ikeda, M., 2000. Arctic Oscillation and Arctic sea ice oscillation. Geophysical Research Letter, 27(9), 1287-1290.

Wang, L., Chen, W., 2010. How well do existing indices measure the strength of the East Asian Winter Monsoon? Advances in Atmospheric Sciences, 27, 855-870.

Wanner, H., Brönnimann, S., Casty, C., Gyalistras, D., Luterbacher, J., Schmutz, C., Xoplaki, E., 2001. North Atlantic Oscillation-concepts and studies. Surveys in geophysics, 22(4), 321-381.

Wu, B., Wang, J., 2002. Winter Arctic Oscillation, Siberian high and East Asian winter monsoon. Geophysical Research Letter, 29(19), 3-1-3-4.

Xu, Y., Zhou, M. Numerical simulations

on the explosive cyclogenesis over the kuroshio current. Advances in Atmospheric Sciences, 16, 64-76.

Yoo, Y.E., Son, S.W., Kim, H.S., Jeong, J.H., 2015. Synoptic Characteristics of Cold Days over South Korea and Their Relationship with Large-Scale Climate Variability. Atmosphere. Korean Meteorological Society, 25, 435-447.

Yu, L., Weller, R.A., 2007. Objectively analyzed air-sea heat fluxes for the global ice-free oceans (1981-2005). Bulletin of the American Meteorological Society, 88(4), 527-540.

Zhang. Y., Sperber, K.R., Boyle, J.S., 1997. Climatology and interannual variation of the East Asian winter monsoon: Results from the 1979-95 NCEP/NCAR reanalysis. Monthly Weather Review, 125(10), 2605-2619.

2021년 10월 4일 접수
2021년 12월 30일 수정
2021년 12월 30일 승인