

북극 온난화 증폭이 겨울철 동아시아 한파 발생에 미치는 영향 고찰

김성중^{1,*}, 김정훈^{1,2}, 전상윤¹, 김맹기², 이솔지¹

¹한국해양과학기술원 부설 극지연구소

²공주대학교

Review on the impact of Arctic Amplification on winter cold surges over east Asia

Seong-Joong Kim¹, Jeong-Hun Kim², Sang-Yoon Jun¹, Maeng-Ki Kim², Solji Lee¹

¹*Korea Polar Research Institute*

²*Kongju National University*

요 약 : 산업화 이후 대기 이산화탄소를 포함한 온실가스 증가에 따라 전지구 기온이 빠르게 올라가고 있는데, 특히 북극의 온난화가 저위도에 비해 2-3배 빠르다. 그리고 온난화와 함께 북극 해빙의 농도와 면적도 지속적으로 감소추세에 있다. 이는 온난화에 대한 북극의 눈과 얼음에 의한 알베도 피드백, 표면기온 차이에 의해 더 많은 에너지를 잃는 플랑크 피드백, 저위도와 고위도의 안정도 차이에 의한 기온감률 피드백, 북극해 온난화에 의한 구름과 수증기 증가 피드백, 그리고 북극으로의 현열속 증가 등에 의한다. 이와 같이 급격한 북극 온난화에 반해 중위도에는 냉각화가 나타나고, 지역에 따라 한파가 더 자주 나타나고 오래 지속되는 경향을 보이는데, 이는 북극 온난화 증폭과 연관 있다는 연구결과들이 많이 보고되고 있다. 북극 온난화는 2가지 경로를 통해 중위도 냉각화로 연결되는데, 하나는 종관규모로 주로 블로킹과 로스비 파동의 발달에 의한 시베리아 고기압을 강화시켜 대륙권에서 일어나는 현상이며, 두 번째는 북극 온난화에 의한 상층으로의 행성파 전달을 활성화하여 플라보텍스를 약화시켜 성층권을 경유해 수개월 동안 나타나는 경로이다. 중위도 한파와 북극 온난화 증폭 간에는 수주에서 수개월의 시차가 존재하기 때문에, 북극 온난화부터 중위도 한파에 이르는 일련의 연쇄 과정을 이해할 수 있으면 겨울철 중위도 기상 예측의 정확성을 높일 수 있다. 이 연구에서는 기존에 보고된 많은 결과들을 종합하고 온도와 해빙 변화 경향 분석을 통해 현재 진행되는 북극 온난화와 중위도 냉각화 경향 그리고 이 둘 간의 관계를 고찰해 보고자 한다.

주요어 : 북극 온난화 증폭, 중위도 한파, 전지구 온난화, 북극 해빙, 기온

Abstract : In response to the increase in atmospheric carbon dioxide and greenhouse gases, the global mean temperature is rising rapidly. In particular, the warming of the Arctic is two to three times faster than the rest. Associated with the rapid Arctic warming, the sea ice shows decreasing trends in all seasons. The faster Arctic warming is due to ice-albedo feedback by the presence of snow and ice in polar regions, which

have higher reflectivity than the ocean, the bare land, or vegetation, higher long-wave heat loss to space than lower latitudes by lower surface temperature in the Arctic than lower latitudes, different stability of atmosphere between the Arctic and lower latitudes, where low stability leads to larger heat losses to atmosphere from surface by larger latent heat fluxes than the Arctic, where high stability, especially in winter, prohibits losing heat to atmosphere, increase in clouds and water vapor in the Arctic atmosphere that subsequently act as green house gases, and finally due to the increase in sensible heat fluxes from low latitudes to the Arctic via lower troposphere. In contrast to the rapid Arctic warming, in midlatitudes, especially in eastern Asia and eastern North America, cold air outbreaks occur more frequently and last longer in recent decades. Two pathways have been suggested to link the Arctic warming to cold air outbreaks over midlatitudes. The first is through troposphere in synoptic-scales by enhancing the Siberian high via a development of Rossby wave trains initiated from the Arctic, especially the Barents-Kara Seas. The second is via stratosphere by activating planetary waves to stratosphere and beyond, that leads to warming in the Arctic stratosphere and increase in geopotential height that subsequently weakens the polar vortex and results in cold air outbreaks in midlatitudes for several months. There exists lags between the Arctic warming and cold events in midlatitudes. Thus, understanding chain reactions from the Arctic warming to midlatitude cooling could help improve a predictability of seasonal winter weather in midlatitudes. This study reviews the results on the Arctic warming and its connection to midlatitudes and examines the trends in surface temperature and the Arctic sea ice.

Key words : Arctic amplification, midlatitude cold air outbreaks, global warming, Arctic sea ice, surface temperature

1. 서론

정부간 기후변화협약체 제4차 보고서에 의하면 산업화 이후 1850-1900년 보다 2011-2020년의 전지구 평균기온이 1.09°C 상승하였고, 1950년대 이후 증가율은 더 커지고 있다 (IPCC, 2021). 북극의 온난화는 다른 지역에 비해 더 빨리 진행 되는데, 예로 1990년부터 2014년까지 전지구 평균 육지 기온은 약 1.5°C 상승한데 반해 북극(북위 60도 이상)은 약 3°C 이상 증가하였다 (Blunden and Arndt, 2019; IPCC, 2019). 이와 같이 북극의 온난화가 다른 지역보다 더 크게 나타나는 현상을 '북극 온난

화 증폭' (Arctic Amplification) 이라 한다. 북극 온난화 증폭은 다른 계절보다 북반구 가을과 겨울에 더 크게 나타나는 것으로 알려져 있다 (Serreze et al., 2011). 북극 온난화 증폭과 더불어 2006년부터 2015년 사이 그린란드 빙하는 연간 약 278±11 기가톤 감소했으며 이는 연간 전지구 해수면이 0.77±0.03밀리미터 상승한 것과 일치하는 양이다 (IPCC, 2019). 북극 해빙도 급격한 감소 경향을 보이고 있는데, 1979년부터 2018년 사이 9월의 해빙은 10년에 12.8±2.3% 씩 감소하였고, 이정도 감소율은 지난 1000년 동안 유래가 없는 일이다 (IPCC, 2019).

이와 같은 북극의 급격한 온난화에도 불구하고

고 2000년대 이후 북반구 겨울철에는 한파가 1990년대 보다 더 빈번히 발생하고 한번 발생하면 오래 지속되며 때로는 눈폭풍을 동반하여 많은 피해를 입히고 있다 (Woo et al., 2012; Wu et al., 2017). 예로, 2016년 1월 중하순에 한반도를 포함한 동아시아, 북미, 유럽을 중심으로 한 북반구 전체가 한파의 영향을 받았는데, 특히 제주 공항이 마비될 정도로 눈폭풍이 몰아쳐 많은 관광객의 발이 묶이기도 하였다. 2009년 12월, 2010년 2월, 그리고 지난해 겨울에도 이와 유사한 한파가 북반구 전체에 발생하여 사회 경제적으로 많은 영향을 미친 바 있는데, 특히 한국의 수도권이 눈폭풍을 동반한 한파로 인해 일주일 이상 마비되었다. 북미 지역도 지난 수년 동안 거의 매년 겨울 반복되는 눈폭풍을 동반한 겨울철 한파의 발생에 의해 많은 사회 경제적 피해를 입고 있다. 지난해 겨울에도 미국의 중부에는 영하 30도 이하의 낮은 기온을 기록하여 생명을 위협하기도 하였다. 이와 같은 겨울철 한파와 눈폭풍은 사회적인 문제 뿐 아니라 세계 경제에 영향을 주기도 한다.

그렇다면 전지구 온난화에도 불구하고 북반구 겨울철 한파가 강해지고 또 더 빈번히 발생하는 원인은 무엇일까? 역설적이게도, 2000년대 이후 북반구 겨울에 더욱 자주 발생하는 한파는 북극의 급격한 온난화에 기인한다는 연구 결과들이 많이 보고되고 있다 (e.g., Vihma et al., 2014; Walsh, 2014; Cohen et al., 2014; Overland et al., 2016; Cohen et al., 2020). 북극 해빙이 감소하면 북극 대기의 기압이 올라가 중위도와외의 기압차이가 줄어들어 제트기류의 세기가 약화되고 제트기류의 중심이 중위도로 사행하여 차가운 고위도 공기가 중위도까지 남하하기 때문으로 여겨지는 것이다. 하지만 일부 그룹에서는 북극의 온난화와 중위도 겨울철 한파 발생과의 연관성은 외부 강제력 변화 즉, 온실가스 증가에 의한 반응(시그널) 보다는 기후계 내의 자연 변동성(노이즈)에 의한 것으로 주

장하기도 하는데, 이는 최근 북반구 겨울철 한파와 북극 온난화 증폭간의 통계적 유의성이 낮기 때문에 판단된다 (Wallace et al., 2014; Barnes and Screen, 2015; Sun et al., 2016; Blackport and Screen, 2020). 북극 온난화에 반응하여 관측 자료 혹은 재분석 자료에서 시그널이 약하게 나타나는 이유는 짧은 관측 기간과 접근방법의 차이에 기인하며, 많은 수치모델에서는 반응이 반대로 나타나기도 하는데, 이는 수치모델의 한계 (물리적 모수화, 그리드 크기보다 작은 규모의 현상 재현 어려움 등), 기작에 대한 서로 다른 해석 등에 기인한다. 최근 중위도 한파에 미치는 북극의 영향에 대해 다양한 해석이 나오고 있지만, 적어도 동아시아에서는 북반구 다른 지역에 비해 시그널이 더 크게 나타나고 있다 (Kim et al., 2014; Mori et al., 2014, 2019). 북극의 온난화부터 동아시아 한파 발생까지는 수일에서 수개월의 시차가 있기 때문에, 전체적인 기작을 파악할 수 있으면 동아시아 한파의 (종관규모부터 계절까지) 증장기적 예측의 정확성을 높일 수 있다.

보고된 연구 결과들에 의하면 북극의 변화가 중위도에 미치는 영향을 이해하기 위해서는 첫째, 제트기류의 변동, 블로킹, 북극진동의 위상 변화, 로스비 파동을 통한 원격상관, 성층권-대류권 상호작용, 행성 파동의 상층 전파 등과 같은 대기 순환의 근본적인 이해가 필요하고, 둘째, 눈과 해빙의 감소, 해양과 육상의 열용량 변화, 바람과 해류의 변화에 따른 일련의 양의 되먹임 작용 등 북극 온난화 증폭의 원인에 대한 이해가 필요하다. 당분간은 북극의 온난화가 지속될 것으로 예측되기 때문에 (IPCC, 2013), 북극의 온난화가 중위도에 어떤 과정을 통해 영향을 미치는지 파악할 필요가 있다. 비록 아직 관측기간이 짧고 현상들의 물리적인 복잡성 때문에 과학자들 사이에서 상반된 결과들이 나오고 있지만, 북극의 지속적인 변화는 중위도의 중규모 예측에 중요한 역할을 할 것이기 때문에

북극 온난화 증폭이 겨울철 동아시아 한파 발생에 미치는 영향 고찰

세계기상기구 (WMO)의 극지예측 프로젝트 (Polar Prediction Project), 세계 기후연구 프로그램 (WCRP)의 기후와 빙권 (Climate and Cryosphere, CliC), 국제 북극과학 위원회 (IASC)의 대기 워킹그룹과 같은 국제 프로그램에서 북극과 중위도의 연계성 주제를 최우선으로 풀어야 할 주제로 선정할 바 있다.

본 고찰에서는 북극과 유라시아 등 중위도의 연계성 관련하여 그동안 보고된 결과들을 정리해 보고 현재 우리가 어디까지 와 있는지 파악하고 앞으로 풀어야 할 주제들에 대해 기술해 보고자 한다.

2. 자료 및 분석 방법

본 연구에서 사용된 지표 온도 자료는 유럽 중기예보센터 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)에서 제공하는 ERA-interim 재분석 자료를 사용하였으며, 해빙 농도 자료는 영국 해들리센터 (Met office Hadley Centre)에서 제공하는 재분석 자료인 HadISST를 사용하였다. 두 재분석 자료의 수평 격자 해상도는 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 이며, 자료의 분석 기간은 1979년부터 2018년까지 총 40년이다. 본 연구에서 겨울철 (DJF)의 경우 1979년 12월과 1980년 1월과 2월의 평균값을 1979년 겨울철로, 2018년 12월과 2019년 1월과 2월을 2018년 겨울철로 명명하여 분석하였다. 또한, 최근 북극 해빙 농도는 급격하게 변화하고 있는데, 해빙 농도 변화 추이를 비교 분석하기 위하여 전기기간 (1979~1998년)과 후기기간 (1999~2018년)으로 구분하여 두 기간에서 해빙 농도의 변화 추세를 심도 있게 분석하였다.

북반구 눈덮임과 북극 진동 (Arctic Oscillation, AO)과의 관련성에 대한 분석을 위하여 Rutgers 대학교에서 제공하는 주별 북반구 눈덮임 자료를 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 의 격자로 재격자화 하

여 사용하였으며, 시베리아-몽골 ($70.5^{\circ}\text{E} \sim 110.5^{\circ}\text{E}$, $29.5^{\circ}\text{N} \sim 59.5^{\circ}\text{N}$) 지역을 영역 평균하여 분석에 사용하였다. AO 지수는 Climate Prediction Center (CPC)에서 제공하는 월별 북극 진동 지수를 분석에 사용하였다. 눈덮임 자료와 AO 지수의 분석 기간은 1979년부터 2018년까지 총 40년이다. 해빙이 감소한 기간동안 기온의 변화를 조사하기 위하여 해빙 농도의 변화 경향을 제거한 후 표준 편차를 구하여 1표준편차 이하인 연도에 대한 합성장 기온 편차를 분석하였다.

3. 북극 온난화 증폭과 중위도 냉각화

Figure 1은 1979년부터 2018년까지 북반구의 계절별 표면 기온의 평균(실선)과 변화 경향(색)을 보여준다. 기온변화 경향이 유의수준 5%에서 통계적으로 유의한 변화를 가지는 곳은 빗금으로 표시하였다. 북극의 평균 기온은 봄과 가을에 -10°C 이하이며, 여름에는 지역에 따라 0°C 이상까지 올라가지만 겨울에는 그린란드 부근과 동시베리아에서 -30°C 이하까지 내려가기도 한다. 그린란드는 고도가 높기 때문에 기온감률 효과가 작용하여 기온이 낮는데 반해, 동시베리아는 열용량이 낮은 육지의 냉각에 의한 기온 하강으로 여겨진다. 겨울에는 북극해 대부분이 해빙으로 덮여있기 때문에 따뜻한 해수가 유입되는 바렌츠해에서 강한 전선이 형성되는 것을 알 수 있다 (Figure 1d).

기온변화 경향을 보면 북극 온난화가 다른 지역에 비해 더 크게 나타난다. 이전의 많은 연구에서 보고된 바와 같이 여름을 제외하고 북극의 기온 상승율이 저위도에 비해 더 크게 나타남을 알 수 있다. 특히 봄철의 경우 바렌츠해부터 동시베리아해까지 온난화 경향이 10년에 2°C 이상 더 크게 나타나며, 이는 동부 시베리아까지 확장되는 것으로 나타난다.

앞에서 기술한 바와 같이 이러한 북극지역의

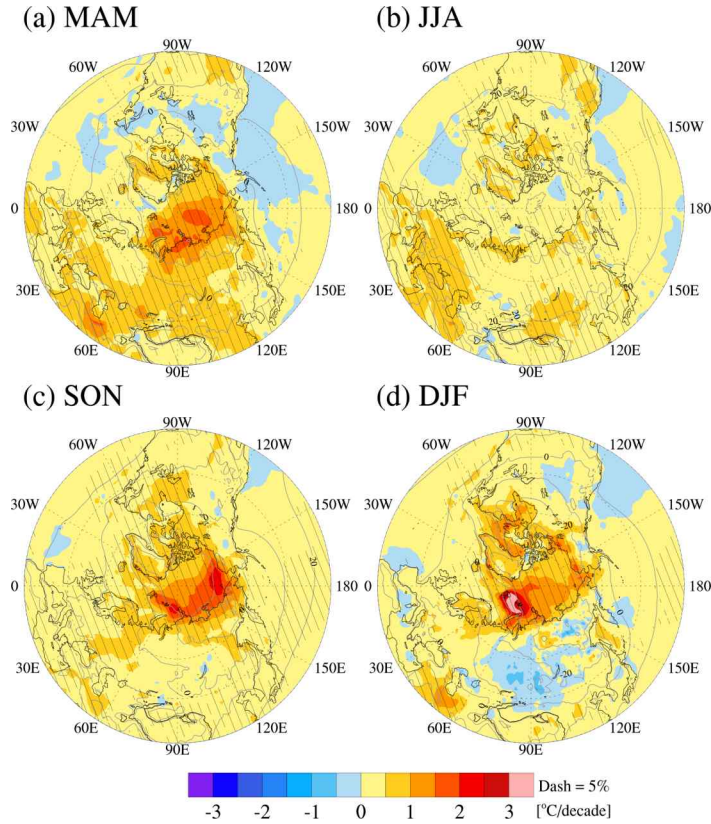


Figure 1. Climatological-mean (contour) and trends (shading) of surface air temperature from 1979 to 2018 over the Arctic for (a) March-April-May (MAM), (b) June-July-August (JJA), (c) September-October-November (SON), and (d) December-January-February (DJF). Hatched areas indicate 5% significant level for trend. Unit of surface air temperature trend is °C/decade.

온난화는 다른 지역에 비해 2-3배 더 크게 나타나는데, 이와 같은 현상을 ‘북극 온난화 증폭 (Arctic Amplification)’이라고 한다 (Serreze et al., 2009; Screen and Simmonds, 2010). 북극 온난화 증폭은 장기간 (1000년 이상)의 기후 변화 관점에서 봤을 때 나타나는 극지역 온난화 증폭 (Polar Amplification) (e.g., Manabe et al., 1991)의 하나라고 볼 수 있다. 다만, 최근의 온난화는 북극에 집중적으로 나타나며, 남극에서는 서남극에서만 온난화가 크게

나타는데 반해 동남극은 온도의 차이가 거의 없다 (Jun et al., 2020). 즉, 남극도 장기적으로는 전지역에서 온난화 증폭이 나타날 것으로 여겨지지만 아직은 모든 지역에 온난화가 나타나지는 않고 있다.

그렇다면 북극의 온난화가 저위도에 비해 더 크게 나타나는 이유는 무엇일까? 북극 온난화 증폭은 여러 복합적인 원인에 의한 것으로 보고되고 있다. 원인으로 가장 많이 거론되는 것이 얼음-알베도 되먹임이다. 북극은 태양에너지의

북극 온난화 증폭이 겨울철 동아시아 한파 발생에 미치는 영향 고찰

반사율이 높은 해빙/육빙(보통 0.7 이상)과 눈(0.8이상)으로 덮여 있다. 대기의 온실가스 농도 증가에 따라 일부 지역의 눈과 얼음이 녹으면 알베도가 낮은 해양(0.1) 혹은 토양/식생(0.3-0.4)으로 바뀌기 때문에 더 많은 양의 태양에너지가 흡수되어 온난화가 증폭된다(Serreze and Francis, 2006; Screen and Simmonds, 2010). 연구의 초기에는 얼음-알베도 되먹임이 북극 온난화 증폭의 가장 중요한 원인으로 여겨졌지만, 이후 연구에서는 온난화에 따라 대기를 통한 극지역으로의 열수송량이 증가하였기 때문에 북극 온난화 증폭을 설명하기도 하며(Graversen et al., 2008), 최근의 연구에서는 북극의 낮은 기온에 의한 상향 장파복사량의 상대적인 감소가 북극 온난화 증폭에 중요한 역할을 한다는 주장(일명 플랑크 피드백)도 있고(Pithan and Mauritsen, 2014), 저위도의 대기 안정도가 고위도보다 낮기 때문에 온난화에 따라 더 많은 수증기가 표면에서 대류권으로 증발하면서 고위도보다 열손실 더 많이 일어나는 기온감률 되먹임도 북극 온난화 증폭에 중요한 역할을 하는 것으로 보고되었다(Stuecker et al., 2018). 극지역은 저층의 기온이 낮기 때문에 저위도만큼의 많은 증발은 일어나지 않는다. 이 외에도 지구온난화에 따라 극지역의 대기 수증기량 증가에 따른 온실효과(Graversen and Wang, 2009), 북극 온난화에 의한 구름의 증가에 따른 피드백(Vavrus, 2004; Jun et al., 2016)도 북극 온난화 증폭의 원인으로 제시된다. 하지만 앞에 설명한 요소들은 계절에 따라 크게 차이가 날 수 있다. 예로, 겨울철은 단파복사에너지의 양이 제한적이기 때문에 얼음-알베도 피드백이 작용하기가 쉽지 않아, 겨울은 주로 대기수증기량 증가 혹은 구름의 양 변화에 따른 장파복사량의 영향이 지배적이며, 알베도 피드백은 봄철부터 가을까지 지배적인 영향을 미치는 것으로 파악된다(Choi et al., 2014).

북극 온난화 증폭은 여름을 제외한 계절에 일어나며, 특히 가을과 겨울에 더 크게 나타난다(Figure 1, Kim et al., 2014). 이와 같은 이유는 여름에는 입사된 태양에너지가 해빙을 녹이는데 이용되고 남은 에너지는 해양의 혼합층을 데우는데 이용되기 때문이다(Serreze and Barry, 2011). 해양의 혼합층에 저장된 열은 가을과 겨울에 대기로 방출된다. 이와 같이 북극 온난화 증폭은 북극 해빙의 감소를 동반하고 해빙의 감소는 다시 온난화를 부추기며 서로의 변화를 촉진하는 피드백 관계이다(Screen and Simmonds, 2010). 기존의 연구에 의하면 9월의 해빙 면적은 1979년 이래로 10년에 약 11.5%-12.4% 정도의 속도로 줄어들고 있으며(Stroeve et al., 2012; IPCC, 2013), 2012년 9월초에는 해빙 평균 면적의 반으로 줄어든 바 있다. 최근 들어 가을과 겨울의 해빙이 평년보다 더 줄어들면서 많은 양의 열과 수분이 대기로 방출되고, 이는 겨울철 대기의 하층을 가열시키기 때문에 해빙 감소는 대기 순환 변화에 중요한 역할을 한다.

산업화 이후 대기 이산화탄소 증가에 의한 온실 효과로 지면의 기온이 올라가는 것은 아주 당연한 현상이다. 그런데, 1979년부터 2018년까지 기온변화의 경향을 자세히 들여다보면 모든 곳에서 시간에 따라 온난화가 진행되는 것은 아니다. 앞에서 언급한 것처럼, 특히 겨울철 유라시아를 중심으로 통계적으로 유의한 수준은 아니지만 약한 냉각화 경향이 나타나고 있다(Figure 1d). 약하긴 하지만 가을에도 유라시아에서 지역적으로 약한 냉각화 경향이 보이고, 봄철에는 북미에 약한 냉각화 경향이 나타난다(Figure 1a).

북극의 기온변화 경향을 전반기(1979-1998년)와 후반기(1999-2018년)로 나누어 보았다(Figure 2). 봄에는 두시기 모두 비슷한 기온변화 경향을 보이는데, 후반기에 온난화가 북극해 전체로 퍼지는 경향이 있고, 통계적 유의성

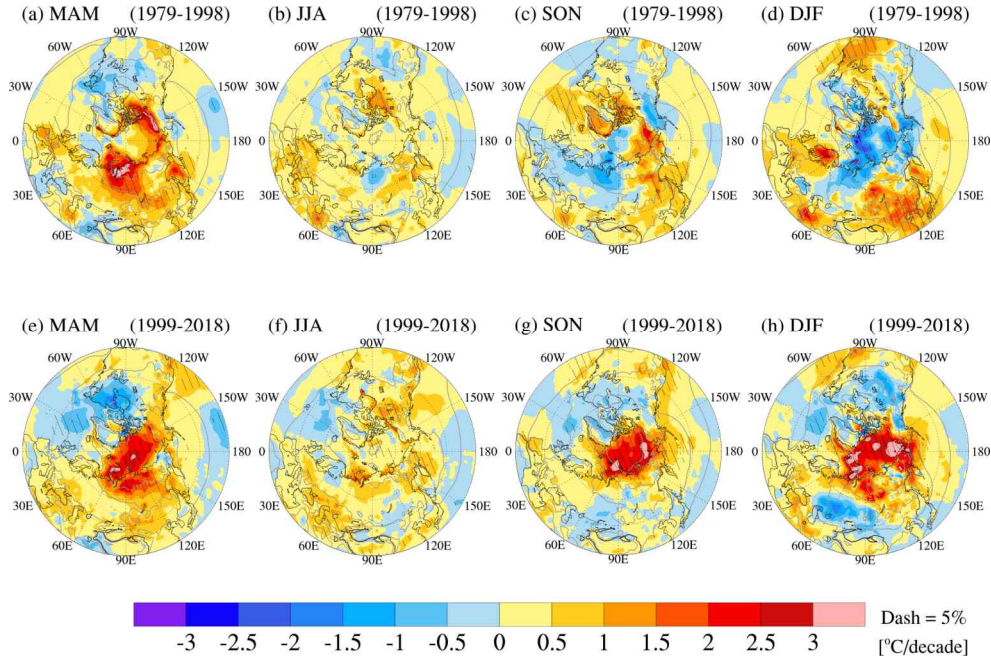


Figure 2. Climatological-mean (contour) and trends (shading) of surface air temperature from 1979 to 1998 for (a) March-April-May (MAM), (b) June-July-August (JJA), (c) September-October-November (SON), and (d) December-January-February (DJF) and from 1999-2018 for (e) March-April-May (MAM), (f) June-July-August (JJA), (g) September-October-November (SON), and (h) December-January-February (DJF). Hatched areas indicate 5% significant level for trend. Unit of surface air temperature trend is $^{\circ}\text{C}/\text{decade}$.

은 낮지만 캐나다 북동부에서는 약간의 냉각화 경향이 후반기에 두드러진다. 여름은 후반기에 바렌츠해, 시베리아 동부의 온난화가 두드러지지만 다른 계절에 비해서는 작은 편이다. 가을철의 경우 전반기는 시베리아, 동시베리아해, 척치해, 버포트해를 중심으로 온난화 경향이 더 큰데, 후반기에는 온난화의 정도가 북극해 전체로 확대되었다. 겨울의 온도변화 경향이 가장 흥미롭다. 다른 계절과 달리 겨울은 전반기와 후반기 북극의 온도변화 경향이 상반된다. 전반기 캐나다 북부, 그린란드 북부, 그리고 랍테프해를 중심으로 통계적으로 유의한 수준의 냉각

화 경향이 나타나는데 반해 유럽과 북미의 동부에서는 온난화 경향이 나타난다. 이는 정확히 온도변화 패턴이 일치하지는 않지만 북극 진동이 양의 상태일 때의 기온 변화와 대체로 일치한다. 반대로 후반기는 온난화 경향이 북극해, 특히 바렌츠해, 척치해, 버포트해에 집중되고 중아시아와 북미에서는 약한 냉각화 경향이 나타난다. 이런 온도 변화 경향이 앞에서 기술한 온난한 북극-차가운 대륙 (Warm Arctic Cold Continent) (Overland et al., 2015) 혹은 온난한 북극-차가운 유라시아 (Warm Arctic Cold Eurasia) 이다 (Mori et al., 2019).

중위도 냉각화는 1999년 이후에 더 뚜렷하다 (Figure 2). 특히 봄철의 북동 캐나다에 냉각화 경향이 후반기 동안 뚜렷하다. 가을에는 1999년부터-2008년까지는 그린란드와 노르웨이의 냉각화 경향이 보이는데 반해, 2009년 이후는 중앙아시아와 캐나다의 냉각화가 뚜렷하다 (not shown). 겨울에도 기간에 따라 냉각화가 나타나는 지역이 다른데, 1999년부터 2009년까지는 알래스카와 캐나다 까지 북미의 북쪽과 중앙아시아부터 동아시아까지 냉각화 경향이 나타난다. 하지만 2009년 이후는 유라시아는 냉각화가 보이지 않고 북미의 동부에만 냉각화가 뚜렷하다 (not shown). 종합하면, 후반기 겨울에는 지구온난화에도 불구하고 중위도의 온도가 내려가는 경향을 보이는데, 북극의 온난화와는 반대로 중위도에서 기온이 내려가는 이유는 무엇일까? 이에 대한 원인은 아직도 명확하지 않으며, 이것이 자연변동에 의한 것인지 인위적인 온난화의 반응인지에 대해서조차도 과학자들 사이에서 뜨거운 논쟁이 계속되고 있다 (Cohen et al., 2020; Blackport and Screen, 2020). 중위도 냉각화의 원인으로 대표적으로 거론되는 것이 가을철 시베리아의 강설량 증가와 북극해, 특히 카라-바렌츠해 해빙 감소이다 (Cohen et al., 2014).

북극의 온난화 증폭은 눈의 양도 감소시키는 것으로 나타나는데, 특히 봄철의 눈의 감소가 빠르게 진행 중 이다. 1967년부터 2012년까지 3-4월에 눈은 10년에 약 1.6%감소하였으며, 6월은 11.7% 감소하였다 (IPCC, 2013). 봄과 여름 북반구 눈의 양이 감소하는데 반해 가을과 겨울의 눈의 양은 크게 차이가 나지 않으며, 특히 시베리아의 강설량은 2000년대 이후 증가하는 추세를 보이며 이는 최근 들어 시베리아 고기압이 겨울에 강화되는 경향과 일치하고 있다 (Jeong et al., 2011). 일부 연구에 의하면 가을철 시베리아 강설량의 증가는 북극 해빙의 감소와 연관 있다는 결과도 보고되고 있다 (Liu et

al., 2012; Ghatak et al., 2012; Wegman et al., 2015).

강설량 증가와 더불어 북반구 겨울철 중위도의 냉각화 경향이 북극해 특히 카라-바렌츠해의 해빙 감소와 연관 있다는 많은 연구결과가 보고되고 있다 (Honda et al., 2009; Kim et al., 2014; Mori et al., 2019; Cohen et al., 2020). 하지만 일부 연구에서는 북극해에 자연적으로 발달하는 고기압성 대기순환이 바렌츠-카라해의 해빙을 녹이기 때문에, 최근 중위도의 냉각화 경향은 바렌츠-카라해 해빙 감소와는 관련 없다는 연구 결과도 있다 (Blackport et al., 2019; Guan et al., 2020). 대기 순환이 선행되어도 해빙 감소에 의한 열과 수분 방출이 고기압성 대기 순환 발달을 도와주기 때문에 어떤 형태로든 카라-바렌츠해의 해빙 감소는 북반구 플라보텍스의 세기 약화에 중요한 역할을 하는 것으로 여겨진다.

4. 북극의 해빙 변화 경향

앞에서 살펴본 바와 같이 북극 온난화 증폭은 가을과 겨울철 북극의 해빙 감소 및 강설량 증가를 가져오기도 한다. 그리고 북극의 해빙 감소는 대기순환을 변화시켜 중위도에 냉각화를 가져오는 요인으로 작용 한다. 가을철부터 대기의 냉각에 의해 해빙이 얼기 시작하는데, 북극해 중 특히 카라-바렌츠해는 저위도의 따뜻한 해류가 유입되는 곳이기 때문에 고기압성 대기순환에 의해서 (Blackport et al., 2019; Guan et al., 2020) 혹은 걸프해류의 북상에 의해 (King et al., 2016; Schlichtholz, 2016) 해수의 결빙이 지연 되면 많은 양의 열과 수증기가 대기로 방출되기 때문에 (Honda et al., 2009; Screen and Simmonds, 2010; Kim et al., 2014), 바렌츠-카라해 인근의 고기압성 순환을 더욱 강화 시킬 수 있다 (Overland et al., 2010). 북극해의 해빙 감소는 북극 온난화 증폭

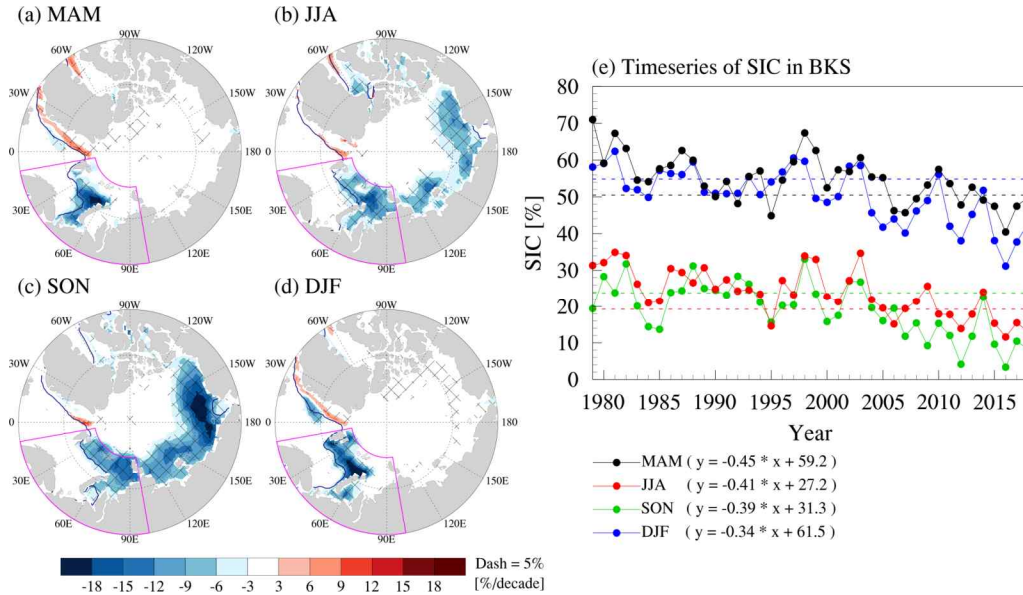


Figure 3. Trends of the Arctic sea ice concentration for (a) MAM, (b) JJA, (c) SON, and (d) DJF and (e) time series of sea ice concentration of the Barents-Kara Seas indicated by pink line. Hatched areas indicate 5% significant level for trend. Unit of sea ice concentration trend is %/decade.

의 척도로서 중요한 의미가 있고, 특히 카라-바렌츠해의 해빙 감소는 유라시아 냉각화와 연관되어 있기 때문에 북극 해빙의 변화 경향을 살펴보고자 한다.

Figure 3은 1979년부터 2018년 까지 북극 해빙 농도의 선형 추세를 보여주고, 하단의 시계열은 바렌츠-카라해의 평균 해빙 농도의 시간에 따른 변화를 나타낸다. 해빙 농도의 선형 추세가 통계적 유의수준 5% 이내로 유의한 변화를 보이는 곳은 빛금으로 나타났다. 그리고 해빙 농도 최소값은 15%로 정의하여 남색 실선으로 표시하였다. 계절은 편의상 기온의 계절과 같이 구분하였지만, 해양의 높은 비열로 인해 해양 수온의 변화에는 시간이 걸리기 때문에 북극 해빙의 농도가 최소(최대)가 되는 시기는 9월 초(3월 초)이다.

봄에는 바렌츠-카라해의 해빙 농도 감소가 가장 뚜렷하고, 시계열 변화에 의하면 이 지역

의 해빙 감소는 1998년 이후 더욱 뚜렷하게 나타나고 있다. 그린란드 동부의 프람스트레이트와 배핀만에서는 해빙의 농도가 약간 증가 추세인데, 이는 북극해에서 얼음이 녹기 시작하면서 많은 얼음이 빠져나가기 때문으로 풀이된다. 여름에는 다년빙이 있는 캐나다 북동부의 북극제도 (Arctic Archipelago) 부근과 북극점 부근에서는 해빙 농도 변화가 거의 없지만, 단년빙이 있는 바렌츠, 카라, 랍테프, 동시베리아, 척치, 베포트해에서는 해빙 농도의 감소가 뚜렷하다. 대서양의 따뜻한 해류는 걸프해협을 지나 미국 동부해안을 따라 북상하다 케이프 해트레스에서 북동쪽으로 갈라져 유럽으로 흐르는데, 영국과 노르웨이해를 지나 바렌츠해로 유입 후 반시계방향의 순환을 하며 카라, 랍테프, 동시베리아해까지 영향을 미친다. 하지만 베포트해에서는 고기압성 대기 순환의 영향으로 시계방향의 베포트 자이어 순환이 존재하기 때문에,

북극 온난화 증폭이 겨울철 동아시아 한파 발생에 미치는 영향 고찰

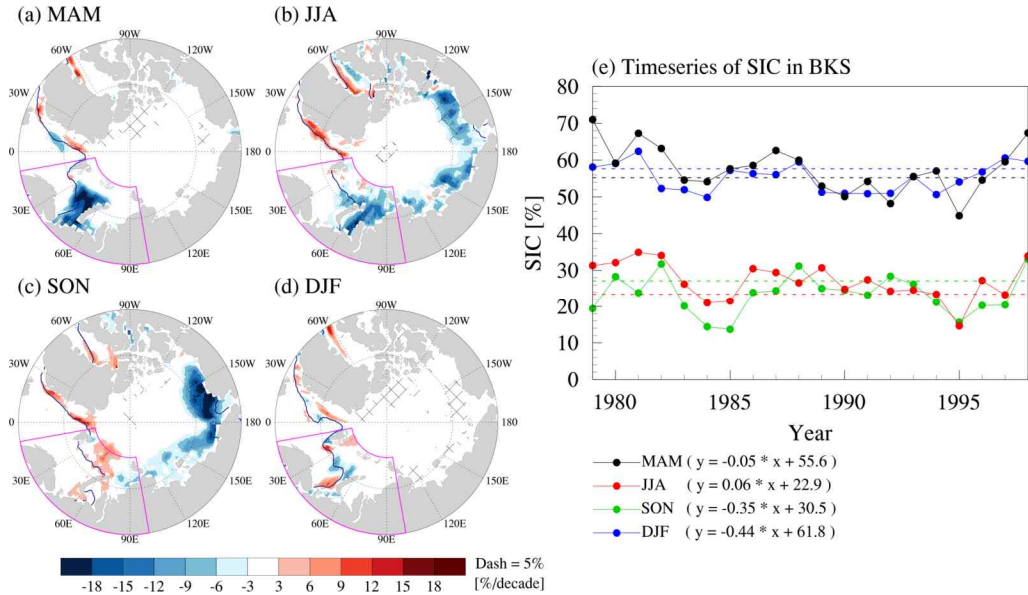


Figure 4. Trends of the Arctic sea ice concentration for (a) MAM, (b) JJA, (c) SON, and (d) DJF and (e) time series for MAM, JJA, SON, and DJF from 1979-1998. Hatched areas indicate 5% significant level for trend. Unit of sea ice concentration trend is %/decade.

북대서양 기원의 따뜻한 해류는 버포트 자이어에 막혀 동시베리아해 동안으로 진출하지 못한다. 이에 따라 캐나다 북부와 그린란드 북쪽의 수온이 북극해에서 가장 낮아지며, 이 지역에는 단년빙이 형성된다. 여름철 해빙 감소는 Figure 1의 기온 변화와 일치하지 않는데, 이는 앞에서 설명한 바와 같이 입사에너지가 해빙을 녹이는 데 이용되기 때문이다.

가을에도 해빙 농도 변화 경향은 여름과 유사한데, 앞에 열거한 단년빙으로 구성된 모든 해역에서의 해빙 농도의 감소 경향이 나타난다. 가을철 해빙 농도의 감소율은 여름보다 더 크고 특히 동시베리아와 척치해의 감소 경향이 현저하다. 가을철 바렌츠-카라해의 해빙 농도 감소는 1900년대 후반부터 본격적으로 시작되었고 최근 들어 해빙 농도가 현저히 줄어들었다. 북극 해빙 면적은 1988년까지는 여름에 약 8백만 제곱미터로 감소했다가 겨울에는 약 천육백만

제곱미터까지 증가하는 계절적 변화를 보였다. 하지만 지구온난화에 의해 모든 계절 해빙 면적이 꾸준히 감소하는데, 특히 2012년의 북극해 전역에 걸친 해빙 감소는 기록적인 사례로, 인공위성 관측 사상 최소값(북극해 전체 350만 제곱미터까지 감소)으로 떨어졌고 아직도 이 기록은 갱신되지 않고 있다. 북극의 여름철 해빙은 이후 약간 회복하여 현재는 600만 제곱미터 정도 근처에서 반복되는데, 그럼에도 여름철 해빙 감소는 상당히 빠른 수준이라 할 수 있다. 9월 말부터는 다시 결빙이 시작되기 때문에 겨울에는 북극해 대부분 지역이 해빙으로 덮이게 되고 북대서양의 따뜻한 해류가 유입되는 바렌츠-카라해에서만 해빙 감소 경향이 뚜렷하다. 이 지역의 해빙 농도의 시계열 변화를 보아도 2000년대 이후는 감소 경향이 매우 뚜렷하며, 이는 이후 살펴보겠지만 북반구 중위도 냉각화와 연관이 있다.

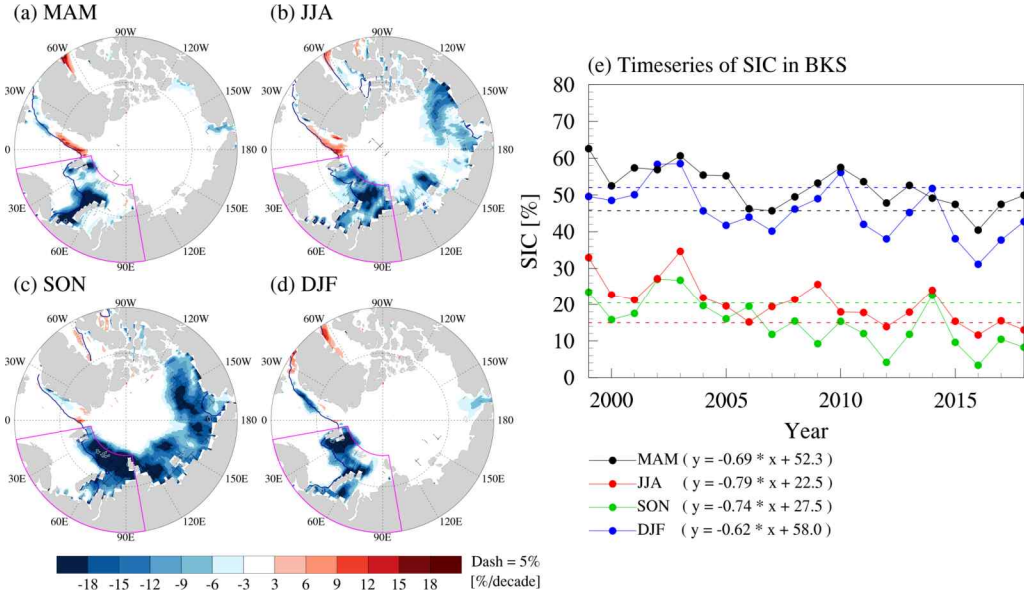


Figure 5. Trends of the Arctic sea ice concentration for (a) MAM, (b) JJA, (c) SON, and (d) DJF and (e) time series for MAM, JJA, SON, and DJF from 1999-2018. Hatched areas indicate 5% significant level for trend. Unit of sea ice concentration trend is %/decade.

기온변화 경향을 보면, 북극 온난화 증폭과 중위도 냉각화가 시기별로 다르게 나타나기 때문에, 해빙 농도 변화도 전기 (Figure 4)와 후기 (Figure 5)로 나누어 살펴보았다. 전기 동안 봄에는 바렌츠-카라해의 해빙 농도 감소가 가장 뚜렷하다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 따뜻한 해류가 유입되면서 해빙이 가장 늦게 어는 지역의 변동성이 커지고 농도도 낮아지는 것으로 여겨진다. 물론 해빙 농도가 줄었다고 면적이 동시에 줄어드는 것은 아니다. 바렌츠-카라해의 해빙 농도는 1980년대까지는 55% 이상이었다가 1990년대에는 거의 모든 해에 50% 이하로 떨어짐을 알 수 있다. 전기 동안 여름의 해빙 농도는 단년빙이 있는 해역들, 특히 카라, 동시베리아, 척치, 그리고 버포트해의 해빙 농도 감소가 크다. 가을에는 버포트해의 해빙 농도 감소가 가장 현저하고, 동시베리아해도 많은 감소를 보인다. 하지만 바렌츠-카라해 북부는

해빙 농도가 약간 증가하는 추세를 보이는데, 통계적으로 유의하지는 않다. 전반기 동안 겨울에는 해빙 농도의 감소가 거의 나타나지 않고 있고, 바렌츠-카라해의 해빙 농도도 큰 변동이 없다.

반면 후반기는 북극해 전체의 모든 계절 해빙 농도 감소가 본격화되고 있음을 알 수 있다. 1999년 이후 현재까지 봄철 전반기와 같이 바렌츠-카라해에서의 농도 감소가 현저하고, 대부분 해에 50%를 밑돌고 있다. 여름에는 바렌츠해 북부와 카라해에서 해빙 농도 감소가 전반기보다 더 크고, 버포트해에서의 감소도 뚜렷하다. 하지만 동시베리아해에서는 전반기보다 해빙 농도 감소가 둔화되고 있다. 바렌츠-카라해는 여름에 전반기는 평균 약 27%를 보였는데, 후반기는 평균 20% 정도로 떨어졌고, 최근 들어 농도감소가 더 크게 나타난다. 후반기 가을의 북극 해빙 농도 감소가 가장 현저하다. 특

북극 온난화 증폭이 겨울철 동아시아 한파 발생에 미치는 영향 고찰

히, 전반기에는 해빙 농도 감소가 거의 없었던 바렌츠해 북부, 카라해, 랍테프해의 농도 감소가 뚜렷하고 척치해와 베포트해도 이전시기 보다 해빙 농도가 현저히 줄고 있다. 바렌츠-카라해의 평균 해빙 농도는 23 %에서 15 %로 줄었고, 2007년 이후는 15% 이하로 감소하였다. 겨울에는 전반기에는 해빙 농도에 큰 변화가 없었는데 반해, 후반기는 바렌츠해 북부, 카라해, 그리고 프람스트레이트에서 해빙이 감소하는 추세를 보인다. 바렌츠-카라해의 평균 해빙 농도는 전반기에 비해 약 10%정도 줄었고, 시간이 감에 따라 계속 감소하고 있다.

5. 북극 온난화와 중위도 냉각화의 연계성

앞에서 언급한 바와 같이 중위도 북극 온난화에도 불구하고 중위도에 냉각화가 나타나는 주요 요인은 시베리아 강설량 증가와 북극 바렌츠-카라해 해빙 농도 감소이다. 10월에 시베리아에 평년보다 많은 눈이 오면 복사냉각과 알베도 효과로 인해 기존에 성장하고 있는 시베리아 고기압을 강화 시킨다 (Cohen and Entekhabi, 1999; Cohen et al., 2014). 수치 모델을 이용하여 시베리아에 눈을 처방하였을 때 표면온도가 기준 실험보다 5 °C 까지 내려가고 시베리아 고기압도 5 hPa이상 증가하는

것을 확인했는데, 이는 적설량 증가에 따른 알베도의 증가 그리고 단파 복사 에너지의 감소 때문이다 (Cohen et al., 1991; Gong et al., 2003).

시베리아의 강설량 증가는 시베리아 고기압의 강화를 통한 종관 규모의 반응도 일으키지만, 눈 증가 가장자리의 전선 발달에 의한 열강제력이 행성파를 활성화 시키고, 이는 나아가 성층권 온난화 혹은 돌연승온을 일으켜 플라보텍스를 약화 시키는 것으로 알려져 있다 (Fletcher et al., 2009; Peings et al., 2012). 성층권 돌연승온에 의한 북반구 고위도의 지위고도 증가는 수개월 지속되며 겨울부터는 성층권 시그널이 하강하며 표층에 음의 북극 진동상태를 만드는데 호조건을 제공한다. Table 1은 시베리아-몽골리아 지역의 9월부터 이듬해 2월 까지 강설량과 북극 진동지수의 상관관계를 보여준다. 상관관계가 통계적 유의수준 1% 이내로 유의한 경우 붉은 색으로 표시하였다. 11월 시베리아-몽골리아의 강설량은 이듬해 1월과 2월까지 유의한 영향을 주는 것으로 나타난다. 즉, 시베리아-몽골리아의 가을철 강설량 증가는 겨울의 플라보텍스 약화에 영향을 주는 것이다. 이전의 연구들에서도 이와 유사한 결과들이 보고된 바 있다 (Cohen and Entekhabi, 1999; Lü et al., 2008; Allen and Zender, 2011). 플라보

Table 1. Correlation between the Arctic Oscillation index and snow over Siberia-Mongolia. Red, blue, and green letters indicate 1%, 5%, 10% significant level.

		AO index					
		Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb
Snow cover	Sep	-0.29	-0.03	-0.18	-0.09	-0.32	-0.05
	Oct	0.06	-0.26	-0.20	-0.17	-0.14	-0.15
	Nov	0.21	-0.14	-0.01	-0.26	-0.43	-0.41
	Dec	0.16	-0.11	0.12	-0.16	-0.03	-0.33
	Jan	0.31	-0.03	-0.07	-0.03	0.06	0.15
	Feb	0.19	-0.19	0.04	0.08	0.00	0.00

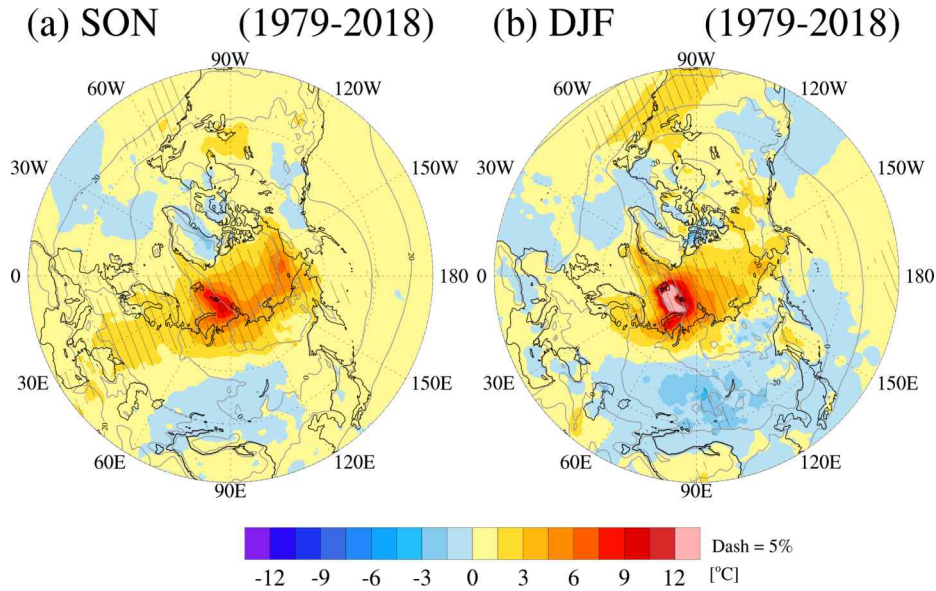


Figure 6. Composite difference of surface air temperature between ± 1 standard deviation of sea ice concentration over the Barents-Kara Seas.

텍스의 약화 혹은 북극 진동 지수의 약화는 제트가 사행된 상태이기 때문에 평소보다 더 남하하여 중위도 냉각화를 유발한다 (Francis and Vavrus, 2012; Cohen et al., 2014).

시베리아의 강설량 증가와 함께, 바렌츠-카라해 해빙이 평년보다 적으면 중위도에 냉각화가 나타난다. Figure 6은 가을과 겨울 바렌츠-카라해의 해빙이 평년보다 많을 때 와 줄었을 때 표면기온의 합성장의 편차를 나타낸다. 즉, 바렌츠-카라해 해빙이 평년보다 1 표준편차만큼 줄었을 때에서 1 표준편차만큼 증가했을 때의 표면 기온을 뺀 값이다. 가을에는 1 표준편차 이상 해빙이 증가한 해가 7년, 1 표준편차 이하로 감소한 해가 6년이며, 겨울에는 두 경우 모두 8년이다. 합성장 편차에서 표면기온 차이 값이 통계적 유의수준 5% 이내로 유의한 지역은 빗금으로 표시하였다.

이전의 많은 연구에서 보여준 바와 같이, 바렌츠-카라해의 해빙 농도가 평년보다 적으면 북극해에는 온난화가 나타난다. 특히 해빙의 감

소 경향 뚜렷했던 바렌츠-카라해와 척치해까지 가을과 겨울 온도 증가가 뚜렷하다. 이는 해빙 농도의 감소에 따라 많은 양의 열이 해양에서 대기로 방출되기 때문으로 여겨진다. 북극의 온난화와 달리 중위도, 특히 중앙아시아에서는 냉각화가 나타난다. 중위도 냉각화는 가을보다는 겨울에 더 크게 나타나지만, 통계적으로 유의한 지역은 바이칼호수 남쪽에 국한된다. 흥미롭게도, 특정 시기 (2000년부터 2010년까지) 동안의 북극 해빙과 유라시아 냉각은 통계적으로 유의한 관계를 보여주기도 한다 (Honda et al., 2009; Inoue et al., 2012; Tang et al., 2013; Kug et al., 2015; Kim et al., 2014; Cohen et al., 2014; Mori et al., 2014). 하지만 최근 들어 북극 온난화와 중위도와의 관계가 약화되었다고 주장하거나 자연변동에 의한 것으로 주장하는 연구결과가 보고되고 있다 (McCusker et al., 2016; Blackport and Screen, 2020). Figure 3의 경우에서도 2009년 이후 바렌츠-카라해빙이 계속 줄어도 유라

북극 온난화 증폭이 겨울철 동아시아 한파 발생에 미치는 영향 고찰

시아의 냉각화가 나타나지 않는 것으로 봐서, 시기적으로 북극 해빙과 중위도 연계성이 다르게 나타나는 것으로 판단된다. 그러므로 북극 온난화와 중위도 기상의 관계가 시기적으로 다르게 나타나는 원인에 대해 좀 더 심도있게 연구해 볼 필요가 있다.

바렌츠-카라해의 해빙의 농도가 적으면 왜 중위도에 냉각화가 나타날까? 대기는 7월부터 서서히 냉각되지만 해양은 높은 비열로 인해 가열되는데 많은 시간이 소요되어 8월 말 9월 초에야 해빙이 최소가 된다. 이후부터 해양의 수온이 다시 내려가면서 해빙이 열기 시작하지만, 온난화와 함께 해빙의 여름인 9월 초 해빙 감소가 다른 계절보다 더 크기 때문에 9월과 10월은 북극해의 많은 곳이 열려있고, 열린 바다에서 많은 양의 수분이 시베리아를 포함한 주변 육지에 눈으로 공급되는 것으로 알려져 있다 (Liu et al., 2012; Ghatak et al., 2012; Wegman et al., 2015). 앞에서 살펴본 바와 같이 시베리아에서 증가한 눈은 유라시아 및 중위도 냉각에 중요한 역할을 한다. 11월말 즈음 되면 바렌츠-카라해를 제외한 대부분 북극해 지역은 해빙으로 덮이게 되는데, 이는 바렌츠-카라해가 따뜻한 해류가 북극해로 유입되는 곳이기 때문이다. 때로는 걸프해류와 이의 확장인 북대서양 해류가 평소 보다 북쪽으로 치우치면 바렌츠-카라해의 결빙이 지연되어 해빙 농도를 낮추기도 한다 (Sato et al., 2014; Nakanowatari et al., 2014; King et al., 2016; Schlichtholz, 2016). 다른 연구에 의하면 강한 고위도 사이클론이 북대서양에서 북극해로 유입되면서 열과 수분을 공급하는데, 이에 의해 해빙이 감소하기도 한다 (Kim et al., 2017). 최근에는 해류의 영향보다는 바렌츠-카라해에 발달하는 고기압성 순환이 해빙을 녹이는 원인으로 작용한다는 결과도 있다 (Blackport et al., 2019; Guan et al., 2020). 이런 여러 가지 원인에 의해 11월말과 12월 초

바렌츠-카라해의 결빙이 지연되면 대기는 단파 복사 감소 및 장파손실로 인한 복사냉각에 의해 이미 상당히 온도가 낮아져 있기 때문에 해양과 대기의 큰 온도 차이로 인한 난류 열속 강화로 인해 많은 양의 열이 대기로 빠져나가 고기압성 순환을 만들고 (Honda et al., 2009; Overland et al., 2010; Kim et al., 2014), 때로는 인근 우랄산맥 근처에 블로킹을 만들기도 한다 (Luo et al., 2017; Yao et al., 2017). 바렌츠-카라해에 발달하기 시작한 고기압 편차는 대기를 교란하여 로스비 파동을 발달시키고 이는 유라시아에 마루와 골을 만드는데, 마루는 기존의 시베리아 고기압을 강화시키는 역할을 한다 (Takaya and Nakamura, 2005; Park et al., 2008, 2011; Kim et al., 2014). 이후 시베리아 고기압 중심이 남동진 하면서 북서태평양에 자리하고있는 동아시아 저기압(골)을 강화 (deepening)시키며 시베리아 고기압과 동아시아 저기압 사이를 따라 동시베리아의 한기가 중국의 북동부, 한반도, 그리고 일본까지 내려와 한파를 유발하며, 때로는 남아시아까지 영향을 주기도 한다 (Overland et al., 2015; 2016).

11월과 12월 바렌츠-카라해 결빙 지연은 대기와의 온도 차이에 의해 난류 열속을 강화시키며 이는 다시 행성파의 상층대기로의 전파를 강화시키는데, 이러한 성층권으로의 행성파 활동의 강화는 보상간섭 (constructive interference) 때문이다 (Kim et al., 2014). 즉, 기후 평균적으로 북대서양에는 양의 지위고도 편차가 발달하고 북태평양에는 음의 지위고도 편차가 발달하는데, 바렌츠-카라해 해빙의 농도가 낮으면 기후 평균보다는 약간 동쪽에 양과 음의 지위고도 편차가 발달하여 평균장과 상호간섭에 의해 상층으로의 행성파 전파를 용이하게 만드는 것이다. 상층으로 행성파의 전파가 강화되면 기존의 서풍 제트에서 파가 소산되면서 에너지가 집적되어 제트를 약화시키는데, 평

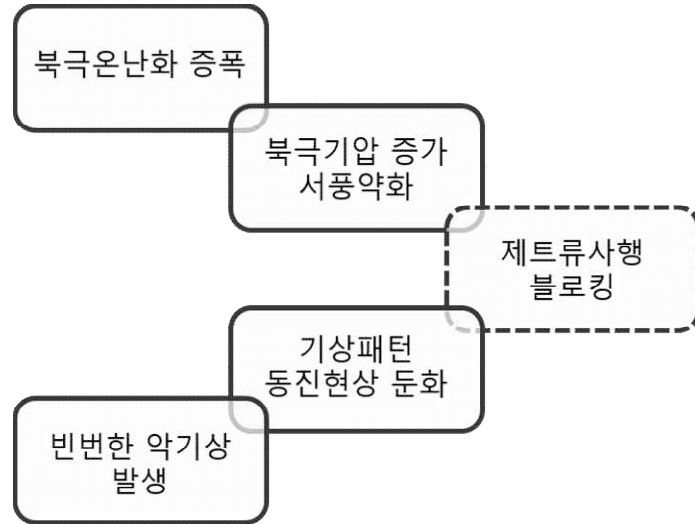


Figure 7. Schematic diagram of the chain from Arctic amplification to extreme weather over mid-latitudes.

균 제트기류가 약화되면 전향력 때문에 극쪽으로 잔차류가 발생한다. 극성층권에서는 하강 운동이 일어나고, 중간권에서는 상승운동이 일어나게 되는데 성층권에서는 단일 팽창에 의해 온도가 급격히 올라가는 '성층권 돌연승온'이 발생한다 (Limpasuvan et al., 2004). 북극 성층권의 온도증가는 북극의 지위고도를 높이는 역할을 하고 궁극적으로는 제트를 더욱 약화시키거나 혹은 동풍으로 바뀌기도 한다. 그리고 북극 성층권의 양의 지위고도 편차는 시간에 따라 대류권과 지면으로 하강 전파하며 음의 북극 진동을 만드는데 호조건을 제공한다 (Baldwin et al., 2001; Limpasuvan et al., 2004; Mitchell et al., 2013). 폴라보텍스의 약화는 제트의 남하를 의미하기 때문에 중위도의 냉각화를 가져온다 (Cohen et al., 2014). 그리고 북극 진동이 음의 상태일 때 중위도에 한파가 더 자주 발생하는 것이 보고되고 있고 (Park et al., 2011; Woo et al., 2012), 북극 진동이 음의 상태일 때 북극의 바렌츠-카라해에서 발원한 바람이 한 줄기는 유럽으로 향하고 다른

줄기는 시베리아를 경유하여 동아시아 쪽으로 향한다는 결과도 있다 (Gong et al., 2007).

6. 요약 및 토의

Figure 7은 북극 온난화 증폭에 따른 해빙 감소부터 중위도 악기상 발생까지의 일련의 과정을 도식적으로 보여준다. 요약하면, 여름철 온난한 북극해는 많은 지역이 열려있기 때문에 인근 육지로 많은 수분을 공급하고, 시베리아에서 증가한 눈은 알베도 효과에 의한 복사냉각을 통하여 시베리아 고기압을 강화시켜 중위도에 냉각을 가져오며, 동시에 상층으로의 행성파 전파를 강화시켜 북극 성층권 온난화 혹은 돌연승온을 일으키며, 결과적으로 폴라보텍스를 약화(사행)시켜 중위도에 냉각화를 가져온다. 또한 북극 해빙 감소도 시베리아 강설량 증가와 비슷한 역할을 수행한다. 지구온난화에 따른 북극 온난화 증폭은 북극해의 여름철에 해빙을 감소시키고 가을과 겨울철에 결빙 지연을 가져온다. 늦가을과 초겨울에 북극해 결빙이 거의 끝날 즈

북극 온난화 증폭이 겨울철 동아시아 한파 발생에 미치는 영향 고찰

음 마지막으로 결빙되는 바렌츠-카라해에서 결빙이 지연되면 대기와의 기온차이가 극대화 되면서 많은 열이 방출된다. 이는 열방출 지역의 기압을 높여 로스비 파동의 발달을 유도한다. 이로 인하여 대류권에 골과 마루를 만들어 시베리아 고기압 같은 종관규모의 고기압 (마루)과 동아시아의 저기압 (골)이 강화 되면서 중위도에 지역에 냉각화를 가져온다. 또한 대기로의 난류 열속 강화는 상층으로 행성파를 전파를 강화시켜 플라보텍스의 약화 혹은 제트의 사행을 일으키며 중위도에 냉각화를 유발한다. 보통 대류권을 통한 영향의 경우는 종관모양에서 지역적으로 다르게 나타나지만, 성층권 돌연승온에 의한 플라보텍스의 약화는 수개월에 걸쳐 북반구 전체에 걸쳐 일어나는 경향이 있다. 대표적인 사례가 2009/2010년 겨울 북반구 한파이지만, 이러한 북반구 전체의 한파는 흔하지 않고, 대부분의 경우 지역적으로 다르게 나타난다.

앞에서 기술한 바 와 같이, 북극의 해빙 감소가 음의 북극진동 혹은 중위도 냉각화와 연관되어 있다는 연구가 많이 보고되었다 (Honda et al., 2009; Petoukhov and Semenov, 2010; Cohen et al., 2014; Vihma et al., 2014; Walsh, 2014; Kim et al., 2014; Kug et al., 2015; Overland et al., 2015; Mori et al., 2014; Mori et al., 2019). 하지만 최근 다른 연구에서 북극 해빙 감소와 중위도 냉각화는 관련이 없고 중위도 냉각화는 자연변동의 일부로 보는 견해도 있다 (McCusker et al., 2016; Screen, 2017; Blackport et al., 2019; Blackport and Screen, 2020; Jin et al., 2020). 그리고 수치모델에 북극 해빙의 감소를 처방했을 때는 대기 반응과 중위도 기온 반응도 여러 가지로 나뉘고 있다 (Sun et al., 2016; Cohen et al., 2020). 북극 해빙 감소에 대한 대기의 반응이 다르게 나타나는 이유는 앞에서 기술한 일련의 과정들이 수치모델 내에서 제대

로 표현이 되지 않기 때문이다. 이에 대해 수치모델의 해빙의 열역학 및 물리적 모의 특성, 성층권 모의 특성, 해수면온도 처방 방식을 포함하는 해양의 물리적 모의 특성, 기후장의 모의 특성, 사용하는 물리모수화 방식 등이 이러한 해빙 감소에 대한 대기 반응의 수치모델간의 차이가 발생하는 주요 원인들로 제시된 바 있으며 (Screen et al., 2018), Jun et al. (2018)에서는 이러한 수치모델의 특성 이외에도 대기모델의 역학 코어 역시 모델간 다른 북극기온의 반응의 원인일 수 있음을 제안한 바 있다. 즉 북극 해빙감소와 중위도 냉각화 현상의 수치모델링 연구에서는 물리적 이해 뿐 아니라 수치모델의 연산 방식에도 아주 세심한 주의가 필요하다. 최근의 수치모델 분석결과 수치모델에서 북극의 기후변화에 대한 더 정확한 재현을 통해 북극과 중위도 원격상관의 예측성을 높일 수 있음을 확인하였다 (Jung et al., 2021).

중위도 냉각을 가져오는 요인으로 시베리아 강설량 증가와 바렌츠-카라해 결빙 지연인데, 이 둘의 상대적인 역할에 대해서는 잘 알려지지 않았다. 10월의 시베리아 강설량 증가는 이듬해 겨울철 중반과 후반에 영향을 주는데, 바렌츠-카라해의 11월 결빙 지연은 11월과 12월에 주로 영향을 주고 1월과 2월은 영향이 미미하다고 알려져 있다 (Furtado et al., 2016). 앞에서 살펴본 바 와 같이 바렌츠-카라해 결빙 지연은 중위도 순환에 중요한 외부 강제력이지만 강설량 증가는 시베리아 고기압 강화를 통해 유라시아 냉각에 기여함은 알려졌지만 북극 진동이 어떤 기작에 의해 음으로 만드는지는 아직 불분명 하다 (Kretschmer et al., 2016). 중위도 계절 예측의 정확도 향상을 위해서는 중위도 냉각에 기여하는 시베리아 강설량 증가와 북극 해빙의 상대적 역할을 좀 더 심도 있게 밝혀야 한다.

본 연구에서는 북극의 온난화에 따른 해빙 감소가 일정 부분 유라시아의 한파발생에 영향

을 줄 수 있음을 고찰한 데 의의가 있다. 또한 북극해빙과 동아시아 겨울철 기상패턴의 연관관계를 좀 더 명확히 이해하면 동아시아 겨울철 한파를 예측하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 동아시아의 정확한 한파 예측을 위해서는 북극해의 해빙의 상태에 대한 예측이 적어도 2-3개월 전에 이루어져야 하며 이는 해빙의 변화에 대한 정확한 이해가 필수적이다. 따라서 수치모델을 이용한 북극 및 중위도 예측을 위해서는 해빙의 변화에 영향을 주는 해양 및 해빙의 물리적 변화에 대한 관측이 병행되어야 하며, 동시에 수치모델 재현 능력 향상을 방안 모색이 필수적이다. 또한 북극의 온난화와 동아시아의 한파는 중국과 일본도 지대적인 영향 하에 있기 때문에 향후 중국 일본과도 공동 연구 협력을 통해 북극과 중위도 연계기작에 대한 이해를 높여 나갈 필요가 있다. 이번 연구에서 북극 해빙/강설량 변화가 북극 소용돌이를 약화시키는 원인이 됨을 기술하긴 했지만, 극 소용돌이가 약화 되었을 때 지역적으로 한파를 가져오는 종관규모 현상의 이해에는 아직도 많은 연구가 필요하다. 동아시아에 한파를 유발하는 극지의 역할 뿐 아니라 저위도 및 다른 인자들을 파악함으로써 궁극적으로 겨울철 한파 예측의 정확도를 향상시켜 극지연구의 필요성을 대외에 부각시키고 공익을 주는데 공헌할 수 있길 희망한다.

감사의 글

본 연구는 극지연구소 “북극 해양·해빙 변화에 기인한 북극과 한반도의 재해기상 현상 모델링 시스템(KPOPS-Earth)의 개발 및 활용” 사업 (PE21010)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

Allen, R. J., Zender, C. S., 2011, Forcing

of the Arctic Oscillation by Eurasian snow cover, *Journal of Climate*, 24, 6528-6539.

Baldwin, M. P., Dunkerton, T. J., 2001, Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes, *Science*, 294, 581-584.

Barnes, E. A., Screen, J. A., 2015, The impact of Arctic warming on the midlatitude jet-stream: Can it? Has it? Will it?, *WIREs Climate Change*, 6, 277-286.

Blackport, R., Screen, J., van der Wiel, K., Bintanja, R., 2019, Minimal influence of reduced Arctic sea ice on coincident cold winters in mid-latitudes, *Nature Climate Change*, 9, 697-704.

Blackport, R., Screen, J., 2020, Insignificant effect of Arctic amplification on the Amplitude of midlatitude atmospheric waves, *Science Advances*, 6, eaay2880.

Blunden, J., Arndt, D. S., 2019, State of the Climate in 2018, *Bulletin of American Meteorological Society*, 100 (9), Si-S306.

Choi, Y. S., Kim, B. M., , Hur S. K., Kim, S. J., Kim, J. H., 2014, Connecting early summer cloud-controlled sunlight and late summer sea ice in the Arctic, *Journal of Geophysical Research*, 119, 11087-11099.

Cohen, J., Rind, D., 1991, The effect of snow cover on the climate, *Journal of Climate*, 4, 689-706.

Cohen, J., Entekhabi, D., 1999, Eurasian

- snow cover variability and Northern Hemisphere climate variability, *Geophysical Research Letter*, 26, 345-348.
- Cohen, J., Screen, J. A., Furtado, J. C., Barlow, M., Whittleston, D., Coumou, D., Francis, J., Dethloff, K., Entekhabi, D., Overland, J., Jones, J., 2014, Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather, *Nature Geoscience*, 7, 627-637.
- Cohen, J., Zhang, X., Francis, J., Jung, T., Kwok, R., Overland, J., Ballinger, T. J., Bhatt, U. S., Chen, H. W., Coumou, D., Feldstein, S., Gu, H., Handorf, D., Henderson, G., Ionita, M., Kretschmer, M., Laliberte, F., Lee, S., Linderholm, H. W., Maslowski, W., Peings, Y., Pfeiffer, K., Rigor, I., Semmler, T., Stroeve, J., Taylor, P. C., Vavrus, S., Vihma, T., Wang, S., Wendisch, M., Wu, Y., Yoon, J - Show fewer authors, 2020, Divergent consensus on Arctic amplification influence on midlatitude severe weather, *Nature Climate Change*, 10, 20-29.
- Fletcher, C. G., Hardiman, S. C., Kushner, P. J., Cohen, J., 2009, The dynamical response to snow cover perturbations in a large ensemble of Atmospheric GCM Integrations, *Journal of Climate*, 22, 1208-1222.
- Francis, J. A., Vavrus, S. J., 2012, Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes, *Geophysical Research Letters*, 39 (L06801).
- Furtado, J. C., Cohen, J. L., Tziperman, E., 2016, The combined influences of autumnal snow and sea ice on Northern Hemisphere winters, *Geophysical Research Letters*, 43, 3478-3485.
- Ghatak, D., Deser, C., Frei, A., Gong, G., Phillips, A., Robinson, D. A., Stroeve, J., 2012, Simulated Siberian snow cover response to observed Arctic sea ice loss, 1979-2008, *Journal Geophysical Research*, 117 (D23108).
- Gong, D., Kim, S. J., Ho, C. H., 2007, Arctic Oscillation and ice severity in the Bohai Sea, East Asia, *International Journal of Climatology*, 27, 1287-1302.
- Gong, G., Entekhabi, D., Cohen, J., 2003, Modeled Northern Hemisphere winter climate response to realistic Siberian snow anomalies, *Journal of Climate*, 16, 3917-3931.
- Graversen, R. G., Mauritsen, T., Tjernström, M., Källén, E., Svensson, G., 2008, Vertical structure of recent Arctic warming, *Nature* 451, 53-56.
- Graversen, R. G., Wang, M., 2009, Polar amplification in a coupled climate model with locked albedo, *Climate Dynamics*, 33, 629-643.
- Guan, W., Jiang, X., Ren, X., Chen, G., Ding, Q., 2020, Role of Atmospheric Variability in Driving the "Warm-Arctic, Cold-Continent" Pattern Over the North America Sector and

- Sea Ice Variability Over the Chukchi-Bering Sea, *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL088599.
- Honda, M., Inoue, J., Yamane, S., 2009, Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters, *Geophysical Research Letters*, 36 (L08707).
- Inoue, J., Hori, M. E., Takaya, K., 2012, The Role of Barents Sea Ice in the Wintertime Cyclone Track and Emergence of a Warm-Arctic Cold-Siberian Anomaly, *Journal of Climate*, 25, 2561-2568.
- IPCC Climate Change, 2021, Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Pean, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekci, O., Yu, R. Zhou, B. (eds.)]. Cambridge University Press, UK and NY, USA.
- IPCC, 2019, Summary for Policymakers. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, [Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegría, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., Weyer, N.M.(eds.)], In press.
- Jeong, J. H., Ou, T., Linderholm, H. W., Kim, B. M., Kim, S. J., Kug, J. S., Chen, D., 2011, Recent recovery of the Siberian High intensity, *Journal of Geophysical Research*, 116 (D23102).
- Jin, C., Wang, B., Yang, Y. M., Liu, J., 2020, "Warm Arctic-cold Siberia" as an internal mode instigated by North Atlantic warming, *Geophysical Research Letters*, 47, e2019GL086248.
- Jun, S. Y., Ho, C. H., Jeong, J. H., Choi, Y. S., Kim, B. M., 2016, Recent changes in winter Arctic clouds and their relationships with sea ice and atmospheric conditions, *Tellus*, 68, 29130.
- Jun, S. Y., Choi, S. J., Kim, B. M., 2018, Dynamical core in Atmospheric model does matter in the simulation of Arctic climate, *Geophysical Research Letters*, 45, 2805-2814.
- Jun, S. Y., Kim, J. H., Choi, J., Kim, S. J., Kim, B. M., An, S. I., 2020, The internal origin of the west-east asymmetry of Antarctic climate change, *Science Advances*, 6, eaaz1490.
- Jung, E., J.-H. Jeong, S.-H. Woo, B.-M. Kim, J.-H. Yoon, G.-H. Lim, 2021, Impacts of the Arctic-midlatitude teleconnection on wintertime seasonal climate forecasts, 15, 094045.

- Kim, B. M., Son, S. W., Min, S. K., Jeong, J. H., Kim, S. J., Zhang, X., Shim, T. H., Yoon, J. H., 2014, Weakening of the stratosphere polar vortex by Arctic sea-ice loss, *Nature Communications*, 5 (4646).
- Kim, B. M., Hong, J. Y., Jun, S. Y., Zhang, X., 2017, Major cause of unprecedented Arctic warming in January 2016: Critical role of an Atlantic windstorm, *Scientific Reports*, 7 (40051).
- King, M. P., Garcia-Serrano, J., 2016, Potential ocean-atmosphere preconditioning of late autumn Barents-Kara sea ice concentration anomaly, *Tellus A*, 68(28580).
- Kretschmer, M., Coumou, D., Donges, J. F., Runge, J., 2016, Using causal effect networks to analyze different Arctic drivers of midlatitude winter circulation, *Journal of Climate*, 29, 4069-4081.
- Kug, J. S., Jeong, J. H., Jang, Y. S., Kim, B. M., Folland, C. K., Min, S. K., Son, S. W., 2015, Two distinct influences of Arctic warming on cold winters over North America and East Asia, *Nature Geoscience*, 8, 759-762.
- Limpasuvan, V., Thompson, D. J., Hartmann, D. L., 2004, The life cycle of the Northern Hemisphere sudden stratospheric warmings, *Journal of Climate*, 17 (13), 2584-2596.
- Liu, J., Curry, J. A., Wang, H., Song, M., Horton R. M., 2012, Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109, 4074-4079.
- Lü, J. M., Ju, J. H., Kim, S. J., Ren, J. Z., Zhu, Y. X., 2008, Arctic Oscillation and the autumn/winter snow depth over the Tibetan Plateau, *Journal of Geophysical Research*, 113, D14117.
- Luo, D., Yao, Y., Dai, A., Simmonds, I., Zhong, L., 2017, Increased quasi stationary and persistence of winter Ural blocking and Eurasian extreme cold events in response to Arctic warming. Part II: A theoretical explanation, *Journal of Climate*, 30, 3569-3587.
- Manabe, S., Stouffer, R. J., Spelman, M. J., Bryan, K., 1991, Transient responses of a coupled ocean-atmosphere model to gradual changes of atmospheric CO₂, Part I: Annual mean response, *Journal of Climate*, 4, 785-818.
- McCusker, K. E., Fyfe, J. C., Sigmond, M., 2016, Twenty-five winters of unexpected Eurasian cooling unlikely due to Arctic sea-ice loss, *Nature Geoscience*, 9, 838-842.
- Mitchell, D. M., Gray, L. J., Anstey, J., Baldwin M. P., Charlton-Perez, A. J., 2013, The influence of stratospheric vortex displacements and splits on surface climate, *Journal of Climate*, 26, 2668-2682.
- Mori, M., Watanabe, M., Shiogama, H., Inoue, J., Kimoto M., 2014, Robust

- Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades, *Nature Geoscience*, 7, 869-873.
- Mori, M., Kosaka, Y., Watanabe, M., Nakamura, H., Kimoto, M., 2019, A reconciled estimate of the influence of Arctic sea-ice loss on recent Eurasian cooling, *Nature Climate Change*, 9, 123-129.
- Nakanowatari, T., Sato, K., Inoue, J., 2014, Predictability of the Barents Sea ice in early winter: remote effects of oceanic and atmospheric thermal conditions from the North Atlantic, *Journal of Climate*, 27, 8884-8901.
- Overland, J. E., Wang, M., 2010, Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice, *Tellus A*, 62, 1-9.
- Overland, J. E., Francis, J. A., Hall, R., Hanna, E., Kim, S. J., Vihma, T., 2015, The melting Arctic and midlatitude weather patterns: Are they connected?, *Journal of Climate*, 28 (20), 7917-7932.
- Overland, J. E., Dethloff, K., Francis, J. A., Hall, R. J., Hanna, E., Kim, S. J., Screen, J. A., Shepherd, T. G., Vihma, T., 2016, Nonlinear response of midlatitude weather to the changing Arctic, *Nature Climate Change*, 6, 992-999.
- Park, T. W., Jeong, J. H., Ho, C. H., Kim, S. J., 2008, Characteristics of Atmospheric circulation associated with cold surge occurrences in East Asia: A case study during 2005/2006 winter, *Advances in Atmospheric Sciences*, 25, 791-804.
- Park, T. W., Ho, C. H., Yang, S., 2011, Relationship between the Arctic Oscillation and cold surges over East Asia, *Journal of Climate*, 24, 68-83.
- Peings, Y., Saint-Martin, D., Douville, H., 2012, A numerical sensitivity study of the influence of Siberian snow on the Northern Annular Mode, *Journal of Climate*, 25, 592-607.
- Petoukhov, V., Semenov, V. A., 2010, A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents, *Journal of Geophysical Research*, 115 (D21111).
- Pithan, F., Mauritsen, T., 2014, Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models, *Nature Geoscience*, 7, 181-184.
- Sato, K., Inoue, J., Watanabe, M., 2014, Influence of the Gulf Stream on the Barents Sea ice retreat and Eurasian coldness during early winter, *Environmental Research Letters*, 9 (084009).
- Schlichtholz, P., 2016, Empirical relationships between summertime oceanic heat anomalies in the Nordic seas and large-scale atmospheric circulation in the following winter, *Climate Dynamics*, 47, 1735-1753.

북극 온난화 증폭이 겨울철 동아시아 한파 발생에 미치는 영향 고찰

- Screen, J. A., Simmonds, I., 2010, The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification, *Nature*, 464, 1334-1337.
- Screen, J. A., 2017, The missing Northern European winter cooling response to Arctic sea ice loss, *Nature Communications*, 8, 14603.
- Screen, J. A., Deser, C., Smith, D. M., Zhang, X., Blackport, R., Kushner, P. J., Oudar, T., McCusker, K. E., Sun, L., 2018, Consistency and discrepancy in the atmospheric response to Arctic sea-ice loss across climate models, *Nature Geoscience*, 11, 155-163.
- Serreze, M. C., Francis, J. A., 2006, The Arctic amplification debate, *Climatic Change*, 76, 241-264.
- Serreze, M. C., Barret, A. P., Stroeve, J. C., Kindig, D. N., Holland, M. M., 2009, The emergence of surface-based Arctic amplification, *The Cryosphere*, 3, 11-19.
- Serreze, M. C., Barry, R. G., 2011, Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis, *Global and Planet Change*, 77, 85-96.
- Stroeve, J. C., Kattsov, V., Barrett, A., Serrese, M., Pavlova, T., Holland, M., Meier W. N., 2012, Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations, *Geophysical Research Letters*, 39, L16502.
- Stuecker, M. F., Bitz, C. M., Armour, K. C., Proistosescu, C., Kang, S. M., Xie, S. P., Kim, D., McGregor, S., Zhang, W., Zhao, S., Cai, W., Dong, Y., Jin, F. F., 2018, Polar amplification dominated by local forcing and feedbacks, *Nature Climate Change*, 8, 1076-1081.
- Sun, L., Perlwitz, J., Hoerling, M., 2016, What caused the recent “Warm Arctic, Cold Continents” trend pattern in winter temperature? *Geophysical Research Letters*, 43, 5345-5352.
- Takaya, K., Nakamura, H., 2005, Mechanisms of intraseasonal amplification of the cold Siberian high, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62, 4423-4440.
- Tang, Q., Zhang, X., Yang, X., Francis, J. A., 2013, Cold winter extremes in northern continents linked to Arctic sea ice loss, *Environmental Research Letters*, 8, 014036.
- Vavrus, S., 2004, The Impact of Cloud Feedbacks on Arctic Climate under Greenhouse Forcing, *Journal of Climate*, 17, 603-615.
- Vihma, T., 2014, Effects of Arctic sea ice decline on weather and climate: A review, *Surveys in Geophysics*, 35, 1175-1214.
- Wallace, J. M., Held, I. M., Thompson, D. W. J., Trenberth, K. E., Walsh, J. E., et al. 2014, Global warming and winter weather, *Science*, 343, 729-730.
- Walsh, J. E., 2014, Intensified warming of the Arctic: Causes and impacts on

- middle latitudes, *Global and Planetary Change*, 117, 52-63.
- Wegman, M., Orsolini, Y., Vázquez, M., Gimeno, L., Nieto, R., Bulygina, O., Jaiser, R., Handorf, D., Rinke, A., Dethloff, K., 2015, Arctic moisture source for Eurasian snow cover variations in autumn, *Environmental Research Letters*, 10 (5), 054015.
- Woo, S. H., Kim, B. M., Jeong, J. H., Kim, S. J., 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), *Journal of Geophysical Research*, 117 (D18117).
- Wu, B., Yang, K., Francis, J. A., 2017, A cold event in Asia during January-February 2012 and its possible association with Arctic sea-ice loss, *Journal of Climate*, 30, 7971-7990.
- Yao, Y., Luo, D., Dai, A., Simmonds, I., 2017, Increased quasi stationary and persistence of winter Ural blocking and Eurasian extreme cold events in response to Arctic warming. Part I: Insights from observational analyses, *Journal of Climate*, 30, 3549-3568.

2021년 9월 10일 접수
2021년 12월 20일 수정
2021년 12월 20일 승인