

여름철 북극 진동과 한반도 폭염의 관련성

김정훈^{1,2}, 노엘¹, 김맹기^{1,*}

¹공주대학교 대기과학과

²극지연구소 대기연구본부

The Relationship between the Arctic Oscillation and Heatwaves on the Korean Peninsula

Jeong-Hun Kim^{1,2}, El Noh¹, Maeng-Ki Kim^{1,*}

¹*Department of Atmospheric Sciences, Kongju National University*

²*Division of Atmospheric Sciences, Korea Polar Research Institute*

Abstract : In this study, we identified characteristics of heatwaves on the Korean Peninsula and related atmospheric circulation patterns using data on the daily maximum temperature (TMX) and reanalysis data for the past 42 years (1979–2020) and analyzed their connection to the Arctic oscillation (AO). The heatwave on the Korean Peninsula showed to be stronger and more frequent in the 2000s. The recent strong and frequent heatwaves on the Korean Peninsula are mainly affected by abnormal high-pressure over the Korean Peninsula on the middle/upper-level atmosphere and the strengthening of the North Pacific high pressure. Interestingly, composite difference of sea level pressure showed very similar results to the positive AO pattern. The correlation coefficients between the summertime AO and the TMX and HWD of the Korean Peninsula were 0.407 and 0.437, respectively, which showed a statistical significance in 1%, and showed a clear relationship with the abnormal high-pressure over the Korean Peninsula and the strengthening of the North Pacific high pressure. In addition, in the positive AO phase, the TMX and HWD of the Korean peninsula were approximately 30.1 °C and 14.6 days, which were about 1.2 °C and 8.8 days higher than in the negative AO phase, respectively. As a result of the 15-year moving average correlation analysis, the relationship between the heatwave and AO on the Korean Peninsula has increased significantly since 2003, and the linear relationship between them has become more apparent. Moreover, after the 2000s, when the relationship developed, AO had more strongly induced the atmospheric circulation pattern to be more favorable to the occurrence of heatwaves in the Korean Peninsula. This study implies that understanding the AO, which is the large-scale variability in the Northern Hemisphere, and the Arctic-mid latitude teleconnection, can improve the performance of global climate models and help predict the seasonality of the summer heatwave on the Korean Peninsula.

Key words : Arctic oscillation, Heatwaves, Arctic-Mid latitude interaction, Teleconnection

1. 서론

최근 한반도에서는 폭염이 매우 강하고 빈번하게 발생하고 있으며, 특히 2018년에는 한반도에서 유례없는 기록적인 폭염이 발생하였다. 2018년 한반도에서 발생한 폭염의 최고 기온은 41.0°C로 한 달 이상 폭염 현상이 유지되었으며, 총 48명이 사망하고 약 4,000여명의 온열환자가 발생하였다 (Imada et al., 2019; Park and Chae 2020). 이러한 폭염에 대한 사회-경제적인 피해가 막대함에 따라 많은 연구자들이 폭염의 발생 원인 파악과 예보를 하기 위해 노력하고 있다.

여름철 한반도의 폭염은 다양한 기후 요소에 영향을 받는 것으로 제시되고 있으며, 많은 연구들이 폭염 발생과 직접적으로 관련된 대기 순환에 초점을 맞추고 있다 (Lee and Lee, 2016; Yeh et al., 2018; Yeo et al., 2019; Wang et al., 2019; Kim et al., 2020; Kim et al., 2021; Noh et al., 2021). 일반적으로 한반도의 폭염은 열대 서태평양의 열대 강제력 및 동서방향으로 전파되는 대기 파동에 의한 영향에 대하여 주로 연구되어 왔다. Lee and Lee (2016)에서는 남중국해에서 발달하는 강한 대류 현상에 의한 남북 쌍극자 패턴이 한반도 지역으로 열과 수증기를 유입시켜 한반도의 폭염을 유도한다고 제시한 바 있다. Noh et al. (2021)에서도 이러한 남북 쌍극자 패턴에 의해 강해지는 하층 온도 이류가 한반도 폭염의 주요 원인을 밝혔다. 또한, Kim et al. (2019)에서는 인도 북서부 지역의 비단열 가열에 의해 CGT (Circum global teleconnection) 패턴이 강화되어 한반도의 폭염에 영향을 미칠 수 있음을 제시하였으며, Choi et al. (2020)에서는 한반도의 폭염이 과거에는 CGT 패턴에 주로 영향을 많이 받았으나, 1990년대 중반에 들어서

는 스칸디나비아 패턴의 영향이 더 커졌음을 강조하였다.

한편, 최근 연구들에서는 북대서양과 한반도 폭염의 관련성에 대해서도 제시되고 있다 (Lim and Seo, 2018; Yoon et al., 2020). Lim and Seo (2018)에서는 북대서양에서 따뜻해진 해수면 온도가 유라시아를 가로질러 전파되는 로스비 파동에 영향을 미쳐서 한반도의 초여름 기온이 변동할 수 있음을 제시하였다. 또한, Yoon et al. (2020)에서는 최근 많이 증가한 한반도의 폭염이 여름철 북대서양 진동과 관련이 있다고 보고하였다. 이러한 연구들은 한반도 폭염 현상이 지역적인 대기 순환의 영향 뿐 아니라 중위도 대규모 대기순환장의 변동과도 큰 관련이 있음을 시사한다.

최근 몇몇 연구에서는 중위도 대기순환장에 기여하는 대표적인 현상인 북극 진동 (Arctic Oscillation, AO)이 최근 한반도 폭염과 높은 상관성이 있음을 제시하였다 (Lee and Lee, 2016; Qian et al., 2018). AO는 북위 60 °N 이상의 SLP 또는 지위고도 1000 hPa의 주성분 분석 (Empirical Orthogonal Function, EOF)의 첫번째 모드로 정의되며, 주로 북극 지역을 중심으로 북대서양 및 북태평양의 기압계와 서로 진동하는 패턴으로 나타난다 (Thompson and Wallace, 1998). 여러 연구에서 AO가 북반구 중위도 기후에 상당한 영향을 미치고 있음을 제시하였고 (Thompson et al., 2000; Rigor et al., 2000; Gong and Ho, 2003), 특히 Thompson et al. (2000)에서는 AO가 따뜻한 계절 (5월-10월)동안 북반구 대기 순환의 변동성에 큰 부분을 차지하고 있음을 강조하였다. Lee and Lee (2016)에서는 한반도 폭염 빈도의 첫번째 EOF 모드가 AO와 관련되어 있으며, 1994년 이후 한반도 폭염과 AO간의 상관성이 커졌음을 제시하였다. 또한, Qiao

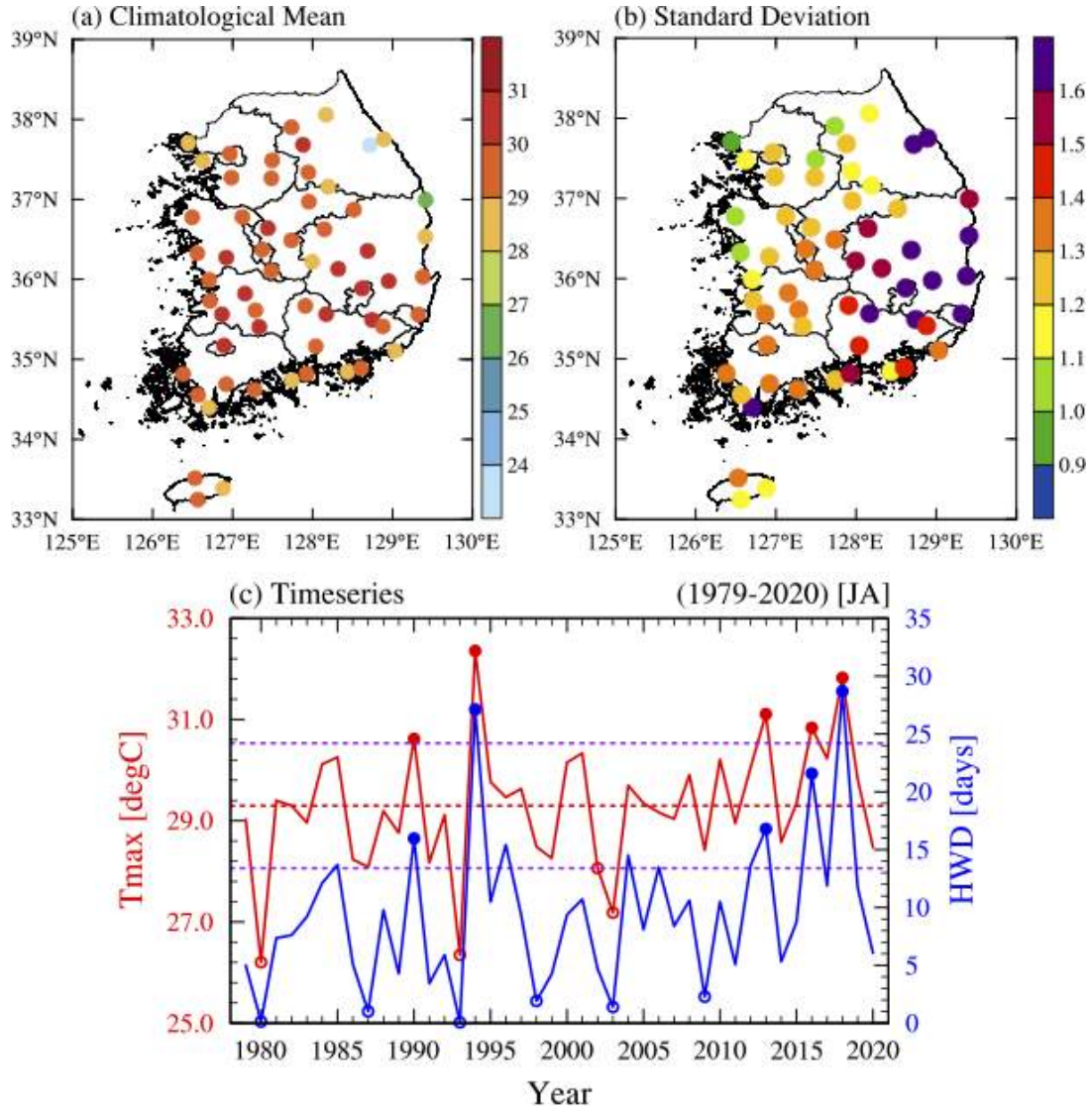


Figure 1. The spatial distribution of (a) climatological mean, (b) standard deviation of maximum temperature (TMX) on July-August over 42 years (1979-2020), and (c) the time series of TMX and heatwave days (HWD). The red and blue solid lines indicate TMX and HWD, respectively. The red and purple dashed lines indicate the mean and ± 1.0 standard deviation of TMX and HWD, respectively. The red (blue) closed and open circles indicate a heatwave year and non-heatwave year, which is defined as a ± 1.0 standard deviation of TMX (HWD), respectively.

et al. (2018)은 AO의 위상에 따른 북동아시아 지역의 순환장 변화가 지표 온도에 영향을 미칠 수 있음을 제시하였다.

그 동안 한반도 폭염 발생의 기작에 대한 연구는 많이 수행되어 왔음에도 불구하고, 아직까지 북극 진동과 한반도 폭염에 대한 관련성에 대한 연구는 부족하다. Lee and Lee (2016)에서는 1994년 이후로 적도 강제력에 비해 한반도의 폭염이 AO와 관련성이 더 커진다고 밝혔으나, 구체적으로 이들간의 관련성이 높아진 시기와 AO가 폭염에 미치는 영향에 대한 정량적인 분석은 수행되지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 지난 42년 (1979-2020)간 한반도 관측 자료를 이용하여 폭염의 특성 및 관련된 대기 순환을 파악하고, 여름철 AO와 한반도 폭염간의 관련성의 변화와 한반도 폭염에 미치는 영향에 대해서 정량적으로 분석하고자 한다.

2. 자료 및 분석 방법

2.1. 연구 자료

본 연구에서는 한국에서 폭염 현상이 가장 자주 발생하는 7-8월에 대한 지표 기온 관측 자료를 분석하였다. 일 최고 기온 (Maximum temperature, TMX) 자료는 기상청에서 제공하는 59개 관측 지점을 사용하였으며, 자료의 분석 기간은 1979년부터 2020년까지 총 42년이다. 또한, 한반도의 여름철 폭염과 관련된 북반구 대기 순환장 분석을 위해서 유럽 중기예보센터 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)에서 제공하는 ERA-5 재분석자료를 사용하였다. 분석에 사용한 변수는 500 hPa 지위 고도, 해면 기압, 그리고 지표 온도이며, 수평 해상도는 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 이다. 재분석 자료의 분석 기간은 지표 기온 관측 자료와 동일한 1979년부터 2020년까지 총 42년을 분석하였다.

여름철 한반도에서 발생하는 폭염과 북극 진동과의 연관성에 대한 분석을 위해 미국 해양대

기청 기후 예측 센터 (Climate Prediction Center, CPC)에서 제공하는 월별 북극 진동 지수를 분석에 사용하였다. 북극 진동 지수 역시 관측 및 재분석 자료의 기간과 동일하게 1979년부터 2020년까지 총 42년에 대해 분석하였으며, 7-8월에 대한 지수만을 사용하였다.

2.2. 연구 방법

기상청에서는 일 최고 기온이 33°C 를 초과하는 날이 2일 이상 지속될시에 폭염 현상으로 정의한다. 본 연구에서는 7-8월 동안 59개 관측 지점의 일 최고 기온 평균 값이 33°C 를 넘는 날들을 폭염일 (Heatwave day; HWD)로 정의하였다.

또한, 한반도 폭염 발생시 북반구 대기 순환장의 특성을 분석하기 위해 한반도 TMX 및 HWD의 $\pm 1.0\sigma$ 보다 높은 변동성을 가지는 연도를 각각 폭염해 (Heatwave years, HWY)와 비폭염해 (non-Heatwave years, NHWY)로 구분하여 합성장 편차 분석을 수행하였다.

또한, 이 연구에서는 한반도 폭염과 AO 간의 관련성을 파악하기 위해 일반적으로 상관관계 분석에 많이 사용되는 피어슨 상관관계 (pearson correlation) 분석을 수행하였으며, 관련성이 높아진 시기를 확인하기 위하여 15년 이동 평균 상관관계도 분석하였다.

3. 연구 결과

3.1. 한반도 폭염 특성 및 관련된 대기 순환

먼저 여름철 한반도 폭염 특성을 파악하기 위해서 한반도 59개 관측소의 TMX의 분포 특성과 경년 변동을 살펴보았다 (Figure 1). 여름철 한반도에서 TMX는 평균적으로 약 29.3°C 로 나타나며, 대부분의 관측소에서 유사한 온도 분포를 보인다 (Figure 1a). TMX의 표준 편차는 약 1.2°C 이고, 특히 한반도의 남부 및 남동부지역에 상대적으로 높은 표준 편차가 나타났다 (Figure 1b). 한반도의 TMX와 HWD 간의 상관 관계 계수는 약 0.89로 통계적으로 1% 이

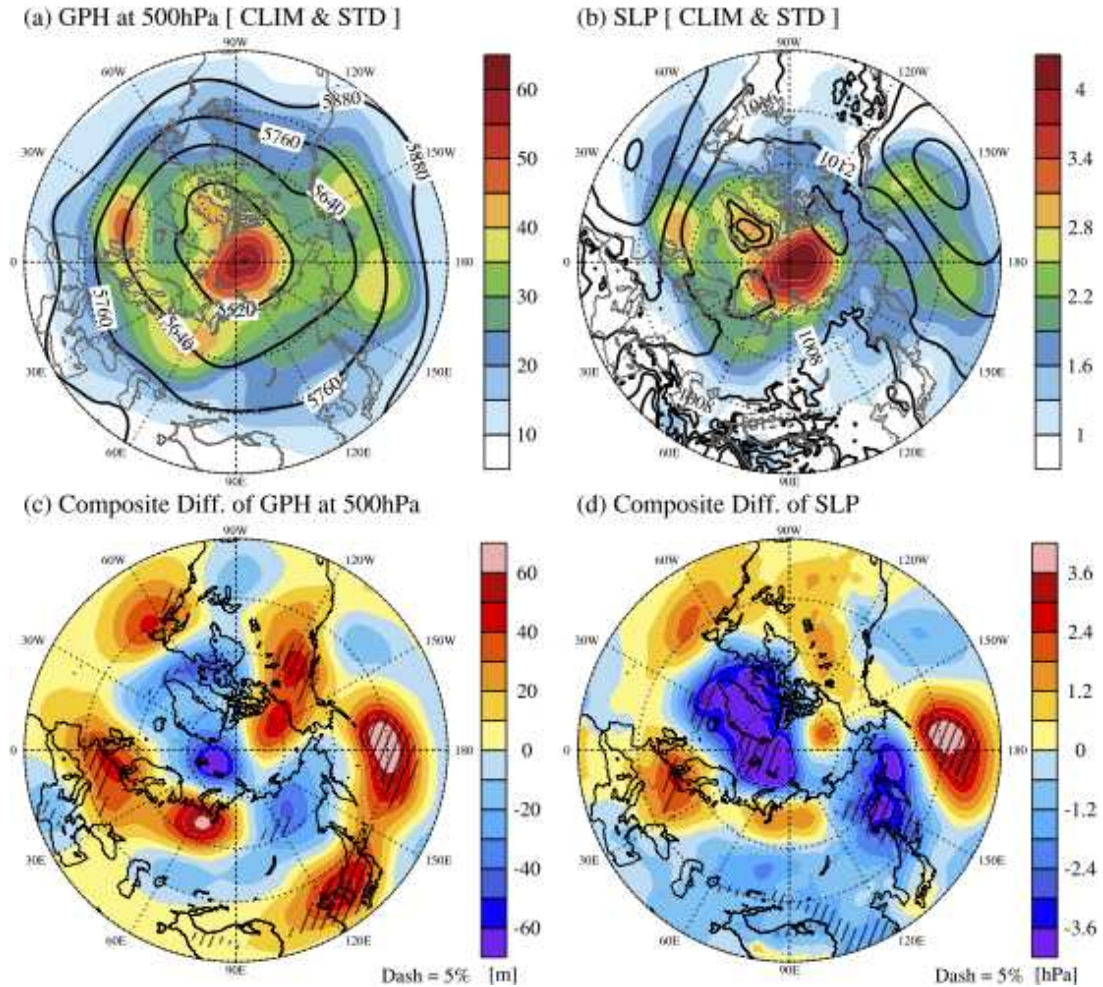


Figure 2. The spatial distribution of the climatological mean (black contour) and standard deviation (shading) of (a) geopotential height (GPH; contour interval of 120 m) and (b) mean sea level pressure (SLP; contour interval of 4 hPa). Composite difference between the HWY and NHWY by TMX in Korean Peninsula of the (c) GPH at 500 hPa and (d) SLP, respectively. The dashed areas indicate a 5% significance level for GPH and SLP, respectively.

내의 유의한 관련성이 나타났다. 전체 분석 기간에서 TMX와 HWD는 뚜렷한 선형 추세가 보이지 않지만, 2000년대에 접어들어서는 뚜렷한 선형 증가 추세가 나타난다 (Figure 1c). 또한, 한반도 TMX의 $\pm 1.0\sigma$ 기준으로 HWY와 NHWY를 구분한 결과, HWY는 총 5개 년도

(1990, 1994, 2013, 2016, 2018년), NHWY는 총 4개 년도 (1980, 1993, 2002, 2003년)으로 나타났다. 한편, HWD 기준의 HWY는 TMX의 HWY와 동일하였으나, NHWY는 총 6개 년도 (1980, 1987, 1993, 1998, 2003, 2009년)로 차이가 나타났다. 그러나, TMX와 HWD에서 모두

여름철 북극 진동과 한반도 폭염의 관련성

Table 1. Correlation coefficient between AO index and TMX and HWD of Korea.

Correlation coefficient		AO (June)	AO (July)	AO (August)	AO (JA mean)
TMX (JA)	1979-2020	0.238	0.291	0.386*	0.407**
HWD (JA)		0.386*	0.349*	0.381*	0.437**
TMX (JA)	2003-2020	0.420	0.472*	0.575*	0.585*
HWD (JA)		0.539*	0.542*	0.624**	0.653**

* : 5%, ** : 1% significant level

공통적으로 과거 기록적인 폭염이 발생했던 1994년을 제외하고는 상대적으로 최근 기간(2013, 2016, 2018년)에 폭염의 강도가 강하고, 빈번한 폭염이 발생한 것으로 나타났다.

대기 순환 패턴 분석에 앞서 북반구의 500 hPa 지위고도와 해면기압의 기후 평균과 표준 편차의 공간 분포를 확인하였다 (Figure 2a, b). 여름철 북반구는 평균적으로 북극 지역에 저기압이 위치하며, 그 주변 지역과 중위도에서는 상대적으로 고기압이 위치한다. 특히, 대기 하층에서는 여름철 한반도에 주된 영향을 미치는 북태평양 고기압이 강하게 발달하는 특성을 보인다. 500 hPa 지위고도와 해면기압의 표준 편차는 북극, 북동대서양, 그리고 북태평양에서 크게 나타났으며, 그 중에서도 특히 북극 지역에서 가장 큰 변동성이 나타났다. 이는 여름철 북극 지역의 기압 패턴이 변동성이 크고, 이를 둘러싼 중위도에서의 기압계 역시 영향을 받을 수 있다는 것을 의미한다.

다음으로 한반도에서 폭염이 발생한 시기의 대기 순환 패턴을 살펴보기 위해서 합성장 편차 분석을 하였다 (Figure 2c, 2d). 그 결과, 북극 해에서는 음의 편차가 나타나며, 그 주변 지역과 중위도 지역으로 양의 편차가 뚜렷하게 나타났다. 특히, 500 hPa 지위고도에서는 스칸디나

비아 반도 및 북유럽 지역, 한반도, 그리고 북태평양 지역으로 양의 편차가 뚜렷하게 발달한 것으로 나타났다 (Figure 2c). 해면기압에서도 대기 중층과 마찬가지로 북극에서 음의 편차가 강하게 발달하였으며, 스칸디나비아 반도와 북태평양 지역으로 양의 편차가 강하게 발달하는 순압 (barotropic) 구조가 나타났다. 즉, 대기 중층에서 한반도 지역으로 발달한 고기압성 편차는 하향 태양 복사를 증가시키고, 대기 하층에서 강화된 북태평양 고기압이 한반도 지역으로 많은 열에너지를 유입시켜 폭염이 발생하기 좋은 기상 조건을 유발할 수 있다. 흥미롭게도, 해면기압 편차는 전형적인 양의 AO 패턴과 매우 유사하게 나타났으며, 이는 여름철에 한반도에서 발생하는 폭염이 AO와 관련이 있을 가능성이 높음을 시사한다.

3.2. 북극 진동(AO)과 한반도 폭염의 상관성

앞서 간단히 언급한 바와 같이 여름철 한반도 폭염 발생시의 대기 순환 패턴은 양의 AO 패턴과 유사하게 나타났다. AO는 주로 북극 지역을 중심으로 북대서양 및 북태평양 지역의 기압 패턴이 서로 진동하는 형태로 나타난다 (Thompson and Wallace, 1998). 따라서, 본 연구에서는 한반도 폭염이 AO로 인한 북태평양

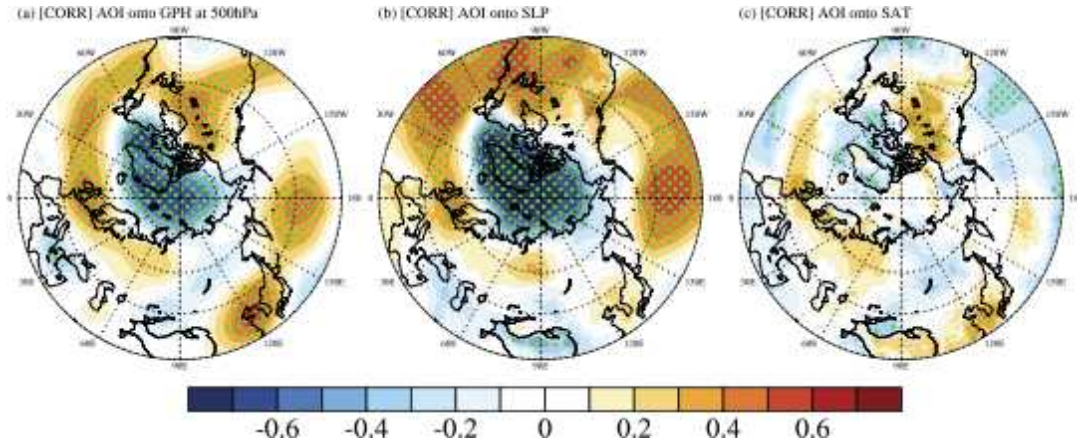


Figure 3. Correlation map between the Arctic oscillation (AO) index and (a) GPH 500 hPa, (b) SLP, and (c) SAT during the July-August (JA) over the last 42 years (1979-2020), respectively. The dots indicate a 5% significance level for GPH, SLP, and SAT, respectively.

지역의 기압 변동과 관련이 있다고 판단하여, 한반도 폭염과 AO 간의 관련성을 조사하였다. Table 1은 각 월별 AO 지수와 한반도 최고 기온 및 폭염 일과 상관관계 분석을 한 결과이다. 여름철 한반도의 TMX와 HWD는 7월과 8월의 AO 지수와 통계적으로 각각 유의한 상관관계가 나타났다. 선행하는 6월의 AO는 TMX와는 통계적으로 유의한 관련성이 나타나지 않았으나, HWD는 통계적으로 5% 이내로 유의한 관련성이 나타났다. 특히, 한반도의 TMX와 HWD는 여름철 (7-8월) 평균 AO 지수와 상관관계가

각각 0.407, 0.437로 가장 높게 나타났으며, 통계적 유의 수준 1% 이내로 유의한 결과를 보였다. 즉, 여름철 평균 AO는 한반도에서 발생하는 폭염과 통계적으로 유의한 관련성이 분명히 있음을 의미한다.

따라서, 본 연구에서는 여름철 평균 AO가 북반구 대기 순환 패턴과 어떠한 관련성이 있는지 확인하기 위해서 대기 순환장과 상관관계 분석을 하였다 (Figure 3). 그 결과, AO는 대기 중층과 하층에서 북극지역에서 강한 음의 상관관계가 뚜렷하게 나타났으며, 중위도 지역의 북대

Table 2. Linear regression equation and coefficient of determination (R^2) for each period of TMX and HWD in the Korean Peninsula.

Variables	Linear regression equation	R^2
TMX (1979-2020)	$y = 0.50x + 29.30$ **	0.16
TMX (2003-2020)	$y = 0.59x + 29.75$ **	0.34
HWD (1979-2020)	$y = 2.79x + 9.35$ **	0.19
HWD (2003-2020)	$y = 4.05x + 12.32$ **	0.42

* : 5%, ** : 1% significant level for regression coefficient

여름철 북극 진동과 한반도 폭염의 관련성

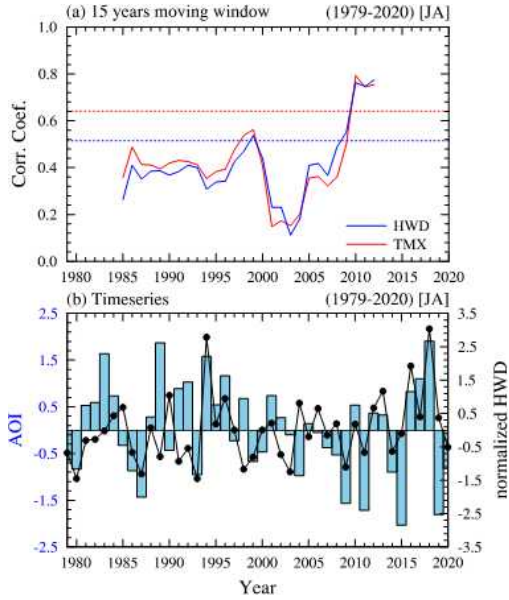


Figure 4. (a) 15 years moving correlation between AOI and Korea TMX (red solid line) and HWD (blue solid line), respectively. Red and blue dashed line indicate a 1% and 5% significance level. (b) Time-series of AOI (bar chart) and normalized HWD (black dotted solid line).

서양, 한반도, 그리고 북태평양 지역으로 양의 상관관계가 뚜렷하게 나타났다. 게다가 한반도 및 동아시아 지역의 지면 온도와도 통계적 유의 수준 5% 이내로 유의한 상관관계가 나타났다. 이러한 대기 순환 패턴은 앞서 분석된 한반도 폭염 기준의 합성장 편차 패턴 (Figure 2c, 2d)과 매우 유사하며, Lee and Lee (2016)의 결과와도 일치한다. 즉, 여름철 AO는 한반도의 폭염 발생에 유리한 대기 순환 패턴과 밀접한 관련성이 있음을 의미한다. 또한, AO 위상에 따른 한반도의 TMX와 HWD는 양의 AO와 한반도 폭염의 관련성을 명백히 보여준다. 양의 AO 시기는 TMX가 약 30.1 °C로 나타났으며,

음의 AO 시기에 비해 약 1.2 °C 높게 나타났다. HWD 역시 양의 AO 시기에 약 14.6일로 음의 AO 시기보다 약 8.8일 더 빈번한 것으로 나타났다. 한반도의 TMX와 HWD는 모두 양의 AO 시기에 음의 AO 시기보다 높게 나타났으며, 특히 HWD는 음의 AO 시기보다 약 2.5배 높게 나타났다.

앞선 분석들을 통하여 한반도 폭염은 AO와 통계적으로 유의한 관련성이 있음을 확인하였다. 한반도 폭염과 AO 간의 관련성이 높아진 시기와 선형 관계를 정량적으로 파악하기 위해서 15년 이동 평균 상관관계와 회귀 분석을 하였다 (Figure 4, Table 2). 15년 이동 평균 상관관계 분석 결과, 한반도의 TMX 및 HWD는 AO와 2003년부터 통계적 유의수준 5% 이내로 유의한 양의 상관관계가 나타났으며, 이후로도 더 뚜렷하고 높은 상관관계가 꾸준히 유지되는 것으로 나타났다 (Figure 4a). 또한, 한반도의 폭염과 AO는 관련성이 높아진 2003년 이후로 선형적인 관련성이 증가하였으며, 특히 HWD는 회귀 계수가 2.79에서 4.05로 약 1.5배 가까이 증가하는 것으로 나타났다 (Table 3). 게다가 2003년 이후 AO와 한반도 TMX 및 HWD의 상관관계를 분석한 결과, 전체 기간의 상관관계 계수에 비해 크게 상승하였으며, 특히 7-8월 모두 통계적으로 유의하게 나타났다 (Table 1). 다시 말해서 한반도의 폭염은 2003년 이후로 AO와 관련성이 높아졌으며, 특히, HWD가 AO에 민감하게 반응 한다는 것을 보여준다.

Figure 5는 한반도의 폭염과 AO간의 관련성이 높아진 시기 이후, AO와 대기 순환 패턴의 상관관계를 보여준다. 그 결과, 관련성이 높아진 2003년 이후의 상관관계 패턴은 Figure 3의 전체 기간의 상관관계 패턴과 매우 유사하게 나타났다. 하지만, 북극 지역의 음의 상관관계가 뚜렷하게 나타나는 영역은 감소하였으며, 중위도에서는 한반도, 북태평양, 그리고 시베리아 지역에서 양의 상관관계가 나타나는 영역은 넓

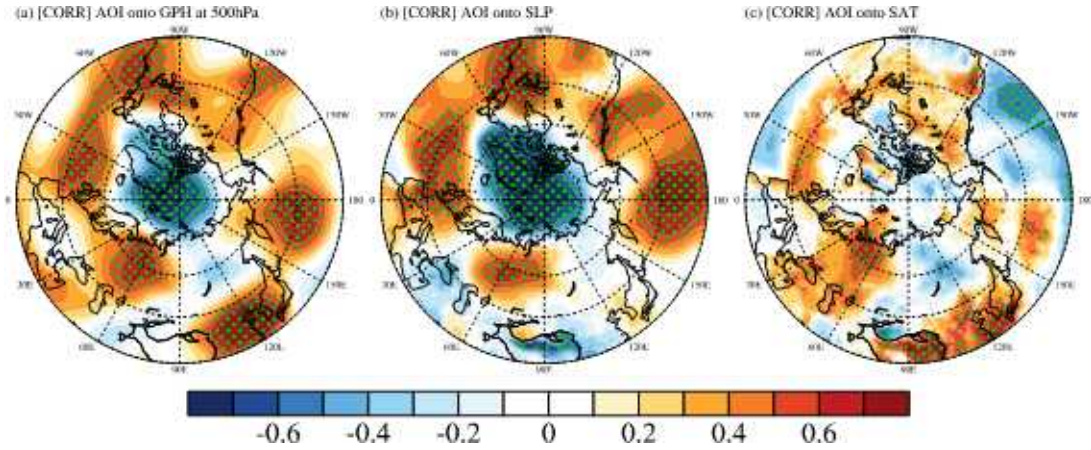


Figure 5. Correlation between the Arctic oscillation (AO) index and (a) GPH 500 hPa, (b) SLP, and (c) SAT during the July–August (JA) over the recent 18 years (2003–2020), respectively. The dots indicate a 5% significance level for GPH, SLP, and SAT, respectively.

어지고, 상관관계가 통계적으로 유의하게 높아지는 특징이 나타났다. 게다가, 관련성이 뚜렷하게 나타나는 지역들은 상관관계의 강도가 눈에 띄게 강해졌다. 이러한 결과들은 2000년대에 들어서 북극 지역과 한반도 지역의 원격상관이 유의미하게 높아졌으며, AO가 한반도에 폭염 발생에 유리한 대기 순환 패턴을 강하게 유도한다는 것을 의미한다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 지난 42년 (1979~2020년)간의 한반도의 59개 지점의 일 최고기온 관측 자료와 ECMWF의 ERA-5 재분석 자료를 이용하여, 한반도의 폭염 및 관련된 대기 순환 패턴을 파악하고, 북극 진동 (AO)과의 관련성에 대해서 조사하였다.

한반도의 일 최고기온 (TMX)과 폭염일수 (HWD)는 각각 평균적으로 약 29.3 °C와 9.3일로 나타났으며, TMX의 ±1.0 표준편차를 기준으로 폭염해 (HWY)와 비폭염해 (NHWY)를 구

분한 결과, HWY는 1990, 1994, 2013, 2016, 그리고 2018년으로 총 5개 해, NHWY는 1980, 1993, 2002, 2003년 (HWD 기준의 NHWY는 1980, 1987, 1993, 1998, 2003, 2009년)으로 총 4개 해로 나타났다. 한반도의 폭염은 2000년대에 들어서 폭염이 빈번하게 발생한 것으로 나타났다. 합성장 편차 분석 결과, 한반도에서 발생하는 폭염은 한반도 상층의 고기압성 편차와 북태평양 고기압의 강화에 주로 영향을 받는 것으로 나타났다. 흥미로운 점은 해면기압의 편차는 전형적인 양의 AO 패턴과 매우 유사하게 나타났으며, 이러한 결과는 선행 연구인 Lee and Lee (2016)에서 보고된 바와 유사한 결과를 나타냈다.

AO와 한반도의 TMX 및 HWD와 상관관계 분석을 한 결과, 여름철 평균 AO는 한반도의 TMX 및 HWD와 0.407, 0.437의 상관관계를 나타냈으며, 통계적 유의수준 1% 이내로 유의한 관련성이 나타났다. 게다가 여름철 AO 지수와 대기 순환 패턴과의 상관관계 분석 결과, 앞선 한반도 폭염과 관련된 대기 순환 패턴과 매우 유사하게 나타났다. 이는 한반도의 폭염 발

여름철 북극 진동과 한반도 폭염의 관련성

생에 유리한 대기 순환 패턴이 AO와 밀접한 관련이 있음을 시사한다. 특히, 양의 AO 시기에는 한반도의 TMX와 HWD가 30.1 °C, 14.6일로 음의 AO 시기보다 약 1.2 °C, 8.8일 높게 나타났다. 15년 이동평균 상관관계 분석을 통해 2003년 이후로 한반도의 폭염과 AO의 관련성이 높아지는 것을 확인하였다. 회귀 분석 결과, 관련성이 높아진 2003년 이후 AO와 한반도의 폭염의 선형적인 관련성은 증가하였으며, 특히 HWD는 회귀 계수가 2.79에서 4.05로 약 1.5배 가까이 크게 증가함으로써 AO에 영향을 많이 받는 것으로 분석되었다.

이 연구는 한반도에서 발생하는 극한 폭염 현상이 북반구의 대규모 변동성인 AO와 관련이 있으며, 2000년대 이후로 이들간의 관련성이 더욱 높아지고 있다는 것을 정량적으로 제시한다. 하지만 AO와 한반도 폭염 발생 간의 메커니즘에 대해서는 다루고 있지 않다. 따라서 추후 연구에서는 AO와 한반도 폭염간의 물리적/역학적 발생 메커니즘과 선행하는 계절에서부터 나타나는 관련성에 대한 심도있는 분석이 필요하다. 그럼에도 불구하고, 이 연구는 북반구의 대규모 순환 패턴인 AO와 북극권-중위도 상호작용에 대한 이해가 기후 모형의 모의 능력을 향상시키고, 여름철 한반도 폭염의 계절 예측 능력에 도움이 될 수 있음을 시사한다.

참고문헌

- Choi, N., Lee, M.-I., Cha, D.-H., Lim, Y.-K., Kim, K.-M., 2020, Decadal changes in the interannual variability of heat waves in East Asia caused by atmospheric teleconnection changes. *Journal of Climate*, 33(4), 1505-1522.
- Gong, D. Y., Ho, C. H., 2003, Arctic oscillation signals in the East Asian summer monsoon. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D2).
- Imada, Y., Watanabe, M., Kawase, H., Shiogama, H., Arai, M., 2019, The July 2018 High Temperature Event in Japan Could Not Have Happened without Human-Induced Global Warming. *SOLA*, 15A(A), 8-12.
- Kim, M.-K., Oh, J.-S., Park, C.-K., Min, S.-K., Boo, K.-O., Kim, J.-H., 2019, Possible impact of the diabatic heating over the Indian subcontinent on heat waves in South Korea. *Journal of Climatology*, 39(3), 1166-1180.
- Kim, H.-K., Moon, B.-K., Kim, M.-K., Kwon, M., 2020, Dynamic mechanisms of summer Korean heat waves simulated in a long-term unforced Community Climate System Model version 3. *Atmospheric Science Letters*, 21(7), e973.
- Kim, H.-K., Moon, B.-K., Kim, M.-K., Park, J.-Y., Hyun, Y.-K., 2021, Three distinct atmospheric circulation patterns associated with high temperature extremes in South Korea. *Scientific Reports*, 11(1), 1-14.
- Lee, W., Lee, M., 2016, Interannual variability of heat waves in South Korea and their connection with large-scale atmospheric circulation patterns. *International Journal of Climatology*, 36(15), 4815-4830.
- Lim, W.-I., Seo, K.-H., 2018, Investigation

- on characteristics of summertime extreme temperature events occurred in South Korea using self-organizing map. *Atmosphere*, 28(3), 305-315.
- Noh, E., Kim, J., Jun, S.-Y., Cha, D.-H., Park, M.-S., Kim, J.-H., Kim, H.-G., 2021, The Role of the Pacific-Japan Pattern in Extreme Heatwaves Over Korea and Japan. *Geophysical Research Letters*, 48(18), e2021GL093990.
- Park, J., Chae, Y., 2020, Analysis of heat-related illness and excess mortality by heat waves in South Korea in 2018. *Journal of the Korean Geographical Society*, 55(4), 391-408.
- Qian, Y. T. M., Hsu, P. C., Kapnick, S. B., 2020, Effects of anthropogenic forcing and natural variability on the 2018 heatwave in Northeast Asia.
- Qiao, S., Hu, P., Feng, T., Cheng, J., Han, Z., Gong, Z., Zhi, R., Feng, G., 2018, Enhancement of the relationship between the winter Arctic Oscillation and the following summer circulation anomalies over central East Asia since the early 1990s. *Climate Dynamics*, 50(9), 3485-3505.
- Rigor, I. G., Colony, R. L., Martin, S., 2000, Variations in surface air temperature observations in the Arctic, 1979-97. *Journal of Climate*, 13(5), 896-914.
- Thompson, D. W., Wallace, J. M., 1998, The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical research letters*, 25(9), 1297-1300.
- Thompson, D. W., Wallace, J. M., 2000, Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. *Journal of climate*, 13(5), 1000-1016.
- Wang, S. S. Y., Kim, H., Coumou, D., Yoon, J., Zhao, L., Gillies, R. R., 2019, Consecutive extreme flooding and heat wave in Japan: Are they becoming a norm? *Atmospheric Science Letters*, 20(10), 2-5.
- Yeh, S.-W., Won, Y.-J., Hong, J.-S., Lee, K.-J., Kwon, M., Seo, K.-H., Ham, Y.-G., 2018, The Record-Breaking Heat Wave in 2016 over South Korea and Its Physical Mechanism. *Monthly Weather Review*, 146(5), 1463-1474.
- Yeo, S. R., Yeh, S. W., Lee, W. S., 2019, Two Types of Heat Wave in Korea Associated With Atmospheric Circulation Pattern. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(14), 7498-7511.
- Yoon, D., Cha, D.-H., Lee, M.-I., Min, K.-H., Kim, J., Jun, S.-Y., Choi, Y., 2020, Recent changes in heatwave characteristics over Korea. *Climate Dynamics*, 55(7), 1685-1696.

2021년 10월 3일 접수
2021년 12월 15일 수정
2021년 12월 15일 승인