

## 한국에 영향을 미치는 약해진 열대저기압 활동과 태평양 10년 주기 진동과의 관계

장민희<sup>1</sup> · 박두선<sup>2,\*</sup> · 김다솔<sup>3</sup> · 박태원<sup>4</sup>

<sup>1</sup>서울대학교, 지구환경과학부, 08826, 서울시 관악구 관악로 1

<sup>2</sup>경북대학교, 지구과학교육과, 41566, 대구시 북구 대학로 80

<sup>3</sup>University of Florida, 32611, Florida Gainesville

<sup>4</sup>전남대학교, 지구과학교육과, 61186, 광주시 북구 용봉로 77

## A Possible Relation of Pacific Decadal Oscillation with Weakened Tropical Cyclone Activity over South Korea

Minhee Chang<sup>1</sup>, Doo-Sun R. Park<sup>2,\*</sup>, Dasol Kim<sup>3</sup>, and Tae-Won Park<sup>4</sup>

<sup>1</sup>School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

<sup>2</sup>Department of Earth Science Education, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

<sup>3</sup>Department of Geography, University of Florida, Gainesville 32611, Florida, USA

<sup>4</sup>Department of Earth Science Education, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

**Abstract:** Although tropical cyclones with wind speeds weaker than  $17 \text{ m s}^{-1}$  (weak tropical cyclones: WTCs) can cause significant damage, particularly over the Seoul metropolitan area, only a few studies have focused on WTC activity over South Korea. In this study, we found that WTC activity is likely associated with the Pacific Decadal Oscillation (PDO). During the negative phases of the PDO, landfall frequency of WTCs increased significantly compared to the positive phases at 95% confidence level. When related to the negative phases of the PDO, a positive relative vorticity anomaly is found in the northern sector of the western North Pacific while a negative relative vorticity anomaly and enhanced vertical wind shear prevail in the southern sector of the WNP. These factors are favorable for the northward shift of the genesis location of tropical cyclones on average, thereby reducing the total lifetime of WTCs. Moreover, a high-pressure anomaly over the Japanese islands would shift a tropical cyclone track westward in addition to the landfall location. Consequently, the effects of the topographical friction and the Yellow Sea Bottom Cold Water on a tropical cyclone may increase. These conditions could result in a weaker lifetime maximum intensity and landfall intensity, ultimately resulting in WTCs becoming more frequent over South Korea during the negative phases of the PDO.

**Keywords:** Tropical cyclone, Typhoon, Pacific Decadal Oscillation, South Korea

**요약:** 열대저기압이 한반도로 접근할 때 중심최대풍속이 34 knot보다 약해졌더라도(weak tropical cyclone; WTC) 수도권 지역으로 상륙하면 상당한 피해를 일으키지만 WTC만 독립적으로 조사한 학술연구는 거의 없다. 본 연구에 따르면 WTC 활동은 Pacific Decadal Oscillation (PDO)와 관련되어 있는 것으로 보인다. PDO가 음의 위상일 때는 양의 위상일 때보다 95% 신뢰구간에서 유의하게 더 많은 WTC가 한반도에 영향을 미치는 것으로 나타났다. PDO 양의 위상에 비해 음의 위상 시기에는 북서태평양 북부에서 양의 상대소용돌이 아노말리가 나타난 반면, 북서태평양 남부에서

\*Corresponding author: dsrpark@knu.ac.kr

Tel: +82-53-950-1918

는 강한 연직바람시어와 음의 상대소용돌이 아노말리가 나타났다. 이런 조건 하에서 열대저기압의 발생위치가 보다 북쪽으로, 즉 동아시아 대륙에 더욱 근접할 수 있었던 것으로 보이며 이에 따라 열대저기압의 전체 생애가 짧아졌을 것이다. 게다가 PDO 음의 위상 시기에 일본열도 상공에 자리한 고기압성 아노말리는 열대저기압의 진로를 좀 더 서쪽으로 밀어내어 육지에 의한 마찰과 황해 저층 냉수대의 영향도 증가하였을 것이다. 이에 따라 열대저기압의 생애최대강도와 상륙 시 강도가 약해져 PDO 음의 위상 때 WTC 활동이 한반도에서 증가한 것으로 분석된다.

주요어: 열대저압부, 태풍, 태평양 10년 주기 진동, 대한민국

## 서 론

열대저기압은 최대풍속에 따라 열대저압부( $V_{max} < 34$  knot), 열대폭풍( $34 \text{ knot} \leq V_{max} < 48$  knot), 강한 열대폭풍( $48 \text{ knot} \leq V_{max} < 64$  knot), 태풍( $64 \text{ knot} \leq V_{max}$ )으로 분류된다. 열대저압부는 눈(eye)이 구름에 가려져 하층 흐름의 중심을 정확하게 추정하기 어렵기 때문에(Torn and Snyder, 2012), 열대저기압에 관한 기후연구에서는 일반적으로 열대폭풍 이상의 강도를 갖는 열대저기압만을 대상으로 분석을 많이 하였다(e.g., Fudeyasu et al., 2006; Park et al., 2014; Lee et al., 2019). 하지만 열대저기압의 약 45%는 열대저압부를 거쳐 중위도 저기압화를 겪으며, 중위도 저기압화는 때때로 재강화를 동반하여 큰 사회경제적 피해를 일으킬 수 있어(Jones et al., 2003), 열대저압부 자료의 불확실성에도 불구하고 최근 열대저압부로 약화된 열대저기압에 관한 연구가 증가하는 추세이다(e.g., Hwang et al., 2010; Feng and Shu, 2018; Choi, 2021). 특히, 한반도 영향 열대저기압 분석에서 열대저압부 및 중위도 저기압화된 열대저기압까지 포함한 연구가 많이 수행되었다(e.g., Choi et al., 2010; Choi et al., 2011; Ho and Kim, 2011; Kim et al., 2012).

Park et al. (2016)에서는 한반도에 영향이 시작된 시점에 최대풍속 34 knot 미만으로 약해진 열대저기압(weak tropical cyclones: WTCs)과 그 이상의 강도를 갖는 열대저기압(strong tropical cyclones: STCs)에 의한 재산피해 규모를 각각 분석하였다. 전국적으로 보면 STCs에 비해 WTCs에 의한 피해 규모가 작게 나타났지만, 지역별로 살펴보면 특히 수도권에서 WTCs가 STCs보다 더 많은 피해를 일으키는 것으로 나타났다. 평균적으로 WTCs가 수도권 지역에 사상자 약 8명, 이재민 약 14,500명, 재산피해 약 100.8 억원을 발생시킨 반면, STCs는 사상자 약 1명, 이재민 약 300명, 재산피해 약 11억원을 발생시켰다. 이는 WTCs가 STCs와 같은 강풍을 동반하지는 못하더

라도 상당한 호우를 발생시킬 수 있기 때문인 것으로 분석되었다. 실제로 Feng and Shu (2018)는 중국에 상륙하는 열대저압부 강도의 열대저기압을 포함한 분석에서 눈벽과 열대저기압 내부 강수밴드의 강수량은 열대저기압의 풍속에 비례하는 반면 열대저기압 외부 강수량은 강도에 비례하지 않는다는 사실을 보여주었다. 또한, 열대저기압 외부 강수밴드는 열대저기압의 강도보다는 주변의 경압성 종관장에 의해 주로 조절된다고 주장하였다. 열대저압부보다 강한 열대저기압만을 포함한 분석에서도 유사한 결과가 제시되었는데, 한반도에 영향을 미치는 열대저기압의 강도(Do and Kim 2021)와 호우 범위(Kim et al. 2019)가 상층 제트 및 연직바람시어에 의해 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 한편, Park et al. (2016)은 WTCs에 동반되는 호우 효과 외에도 WTCs의 상륙위치가 STCs에 비해 서해안에 근접하다는 사실도 수도권에 STCs보다 큰 영향을 미친 원인으로 제시하였다. 이처럼 열대저압부의 영향이 강조됨에 따라 한국 기상청에서는 기존에 열대폭풍 이상의 강도에 대한 예보만 제공하던 것을 2015년부터는 열대저압부에 대해 24시간 선행예보를, 2020년부터는 5일 선행예보를 제공하고 있다.

지금까지 열대저압부에 대한 연구는 WTCs에 의한 호우 및 이와 관련된 피해 분포 등을 중심으로 이루어졌다. 하지만 WTC 활동을 조절하는 메커니즘에 관한 분석은 아직까지 구체적으로 연구된 바가 없다. 고로 본 연구에서는 한반도에 영향을 미치는 WTC 활동의 변동성과 이를 조절하는 메커니즘을 분석하였다.

## 자료 및 방법

본 연구에서는 열대저기압 분석에 미국 합동태풍경보센터(Joint Typhoon Warning Center)의 best-track 자료를 사용하였다. Best-track 자료는 6시간 간격의 열대저기압 중심 위치에 대한 위경도, 최대풍속, 중심기압 등의 정보를 제공한다.<sup>1)</sup> 한반도 영향 열대저

기압은 중위도 저기압화된 열대저기압, 열대저압부, 열대폭풍, 강한 열대폭풍, 태풍을 모두 포함하여 이들의 중심이 단 한 번이라도 한반도 해안선으로부터 300 km 이내에 진입하는 경우로 정의하였다. 이 정의에 따라 1979년부터 2020년까지 6-10월에 발생한 열대저기압 중 총 120개가 한반도에 영향을 미친 것으로 나타났다. 한편, 열대저기압의 발생 시점은 최대 풍속이 최초로 34 knot에 도달한 시점으로 정의하였다. 각 열대저기압의 전체 생애 중 도달했던 최대강도를 생애최대강도(lifetime maximum intensity: LMI)로 정의했고, 열대저기압의 발생 시점부터 생애최대강도에 도달하는 시점까지 걸리는 시간을 생애최대강도에 도달하는 시간(lifetime until LMI)으로 정의했다. WTC와 STC의 정의는 Park et al. (2016)의 방법을 똑같이 따라, 열대저기압이 한반도 영향권(해안선으로부터 300 km 이내)에 진입한 최초 시점의 최대 풍속이 34 knots 이상이면 STC, 미만이면 WTC로 정의하였다. 열대저기압의 진로밀도는 2도 간격의 격자를 설정하여 각 격자내에 열대저기압이 들어온 빈도를 전체분석 기간인 42년으로 나누어 계산했다.

Pacific Decadal Oscillation (PDO) 지수는 미국해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration) 산하 국립환경정보센터(National Centers for Environmental Information)에서 Extended reconstruction of Sea Surface Temperature Version 5 자료를 기반으로 Mantua and Hare (2002)에 따라 계산된 자료를 사용했다.<sup>2)</sup> 연도별 PDO 인덱스는 월별로 제공되는 값 중 6-10월의 값을 평균해 얻었다. 이후에 분석기간 전체의 평균 PDO 지수로부터 0.5 표준편차 보다 큰 지수를 갖는 해를 양의 PDO해로, 0.5 표준편차 보다 작은 지수를 갖는 해를 음의 PDO해로 정의하였다(Table 1). El-Niño Southern Oscillation (ENSO) 지수는 미국 해양대기청 산하 지구시스템연구소(Earth System Research Laboratory)에서 제공하는 Nino 3.4 지수

(Trenberth, 1997)를 사용했다.<sup>3)</sup> 연도별 ENSO 지수는 월별로 제공되는 값 중 6-10월의 값을 평균해 얻었다.

Pacific-Japan teleconnection pattern (PJ pattern)과 관련된 지수는 Wakabayashi and Kawamura (2004)의 방법에 따라 대만(125°E, 22.5°N)과 일본의 동부 지역(155°E, 35°N)에 해당하는 두 격자점 사이의 850 hPa 지위고도장 아노말리를 활용해 계산하였다.

$$PJ = [Z_{850 \text{ hPa}} (155^\circ\text{E}, 35^\circ\text{N}) - Z_{850 \text{ hPa}} (125^\circ\text{E}, 22.5^\circ\text{N})] / 2$$

위 식에서 Z는 지위고도장 아노말리를 나타내고 후술할 ERA5의 자료에 기반하여 계산하였다. 아노말리는 전체 분석기간 기후값으로부터의 편차이고, 월별로 계산한 6-10월 아노말리를 각 연도별로 평균하여 연도별 지수에 관한 시계열을 얻었다.

배경장 분석에는 유럽중기예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)에서 제공하는 5세대 재분석자료인 ERA5를 사용했다(Hersbach et al. 2020). ERA5의 모든 변수는 월별로 공간해상도 0.25°×0.25°로 제공되며, 본 연구에서 사용된 변수는 200 hPa과 850 hPa의 동서 및 남북 바람장(u, v), 850 hPa 상대와도, 500 hPa 지위고도장이다. 연직바람 시어의 경우 200 hPa과 850 hPa의 동서 및 남북 바람장을 이용하여 계산했다. 한편, 통계분석에는 피어슨 상관 계수와 스튜던트 t-검정을 적용하였다. 통계적 유의성은 95% 신뢰구간을 기준으로 평가하였다.

## 결 과

우선 WTC, STC의 발생위치, 생애최대강도 위치, 진로 등의 기본적인 특성을 분석하였다. 진로밀도에 따르면 WTC는 STC에 비해 열대 북서태평양 북서쪽에서 발생하여 동아시아 대륙에 근접한 진로를 가지는 것으로 나타났다(Fig. 1). 구체적으로 WTC의 발생 위치는 STC에 비해 경도 측면에서 통계적으로 유의

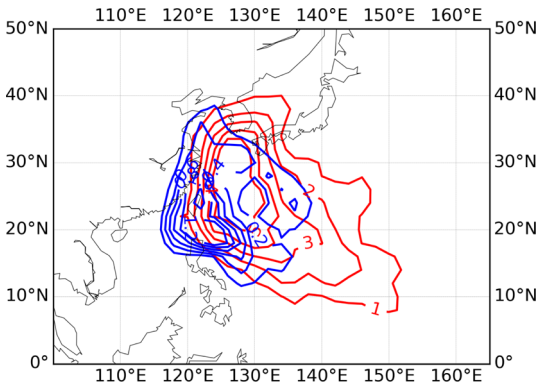
**Table 1.** List of years classified by positive and negative phases of PDO. The years have PDO index beyond ±0.5 standard deviation from the climatological mean

|                    | Years  |
|--------------------|--|
| PDO positive phase | 1979, 1981, 1983, 1986, 1987, 1992, 1993, 1995, 1996, 1997, 2014, 2015 |
| PDO negative phase | 1994, 1998, 1999, 2000, 2001, 2008, 2010, 2011, 2012, 2013, 2020,      |

1) 자료 출처 <https://www.metoc.navy.mil/jtwc/jtwc.html>

2) 자료 출처 <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/pdo/>

3) 자료 출처 <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni>

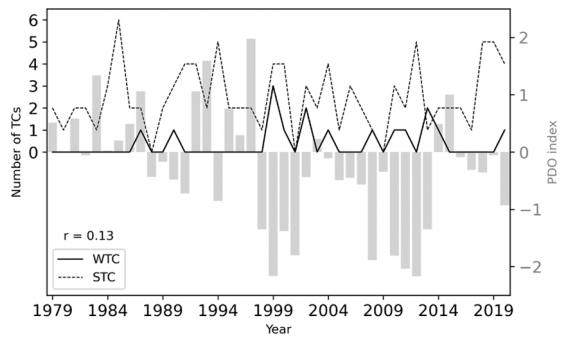


**Fig. 1.** Track density climatology of WTCs (blue) and STCs (red) affecting South Korea during 1979-2020.

하계 약 9.49도 정도 서쪽에서 발생하며, 생애최대강도도 도달위치도 약 3.72도 정도 서쪽에 위치한다. 한편, WTC는 해상에서 체류하는 시간도 STC에 비해 통계적으로 유의하게 짧아 생애최대강도도 WTC가 64.69 knot, STC가 96.78 knot로 약 32.09 knot 더 약한 것으로 나타났다. 실제로 WTC가 생애최대강도까지 발달할 수 있었던 시간은 약 2.45일로 STC의 3.80일에 비해 약 1.36일 더 짧았고, 이러한 차이는 통계적 유의성을 가진다. 이를 복합적으로 고려했을 때, WTC는 태생적으로 생애최대강도도 약하고 진로상에 육지의 영향을 받을 가능성이 높아, 상대적으로 약화된 상태로 한반도에 영향을 미쳤을 것으로 분석된다.

WTC와 STC를 조절하는 메커니즘을 찾기 위해 WTC 와 STC 개수의 연간변동성을 각각 분석하였다 (Fig. 2). STC와 WTC는 눈에 띄게 서로 다른 변동성을 보이는데, STC는 경년변동성이 뚜렷한 데에 반해 WTC는 장기변동성이 상대적으로 더 뚜렷한 편이다. 두 시계열의 상관관계도 0.13으로 통계적으로 유의하지 않다. 이는 WTC와 STC 활동이 서로 관련성이 매우 적다는 것을 의미하며, STC와 WTC를 조절하는 메커니즘이 서로 다를 수 있다는 것을 암시한다.

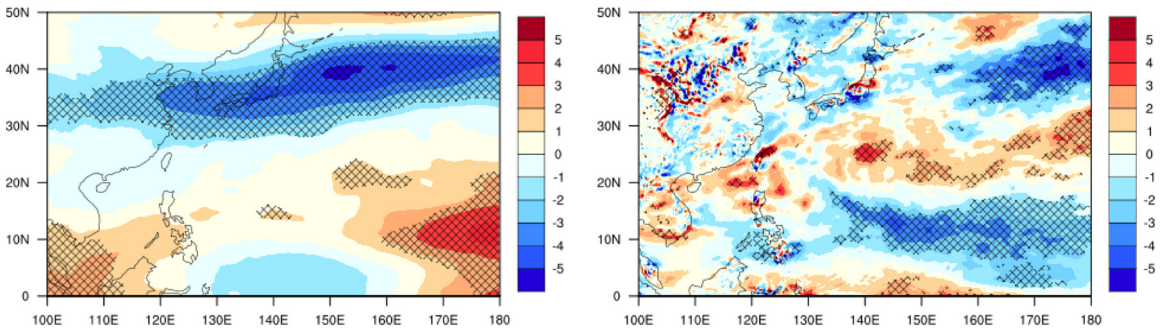
기존의 연구에 근거할 때, PJ pattern이 STC 활동의 경년변동성을 조절하는 주요 메커니즘일 것으로 여겨진다. WTC와 STC를 구분하지 않고 모두 포함하여 분석한 기존 연구에 따르면 PJ pattern이 양의 위상일 때, 한반도 영향 열대저기압 개수가 증가하는 것으로 나타났다(Choi et al., 2010; Kim et al., 2012). 실제로 본 연구에서 STC 시계열은 PJ pattern과 95% 신뢰구간에서 통계적으로 유의한 양의 상관성



**Fig. 2.** Annual time series of number of TCs (left axis) with weaker wind speeds than 34 knot (WTCs; solid line) and larger than or equal to 34 knot (STCs; dashed line) affecting South Korea during 1979-2020. Annual time series of Pacific Decadal Oscillation (PDO; gray bars) index (right axis) is also plotted. The Pearson correlation coefficient between WTC and STC time series are presented above the legend.

( $r=0.44$ )을 보였다. 이에 반해 PJ pattern과 WTC 시계열은 상대적으로 낮은 상관성을 보였다( $r=0.27$ ). 즉, 기존의 연구에서 나타난 PJ pattern과 한반도 영향 열대저기압 사이의 상관성은 상당부분 STC 활동에 기인한다고 할 수 있다. 한편, El-Niño Southern Oscillation (ENSO)도 경년변동성을 조절하는 주요 메커니즘으로 제시될 수 있다. 이와 관련해서는 기존에 ENSO와 한반도 영향 열대저기압 활동 사이에 통계적 연관성이 있다는 주장과 없다는 주장이 혼재하고 있는 상황이다(Choi et al., 2011; Ho and Kim, 2011). 이는 서로 다른 한반도 영향 열대저기압 정의에 의한 것일 수 있다. 실제로 Seo et al. (2019)에 따르면 라니냐 시기에 비해 엘니뇨 시기에 한반도와 일본열도 사이로 지나가는 열대저기압이 늘어나는 경향이 보인다. 그러나 본 연구의 정의에 따르면 STC와 WTC 시계열 모두 Niño3.4 지수와 상관계수가 각각 0.08, -0.15로 통계적으로 유의한 상관성이 없는 것으로 나타났다. 이는 ENSO와 한반도 영향 열대저기압 사이에 관련성이 없다는 Ho and Kim (2011)의 주장을 더 지지하는 결과이다.

마찬가지로 기존의 연구에 근거할 때, WTC 활동의 장기변동성을 조절하는 주요 메커니즘은 PDO로 여겨진다. WTC와 STC를 모두 포함한 기존 연구에 따르면 한반도 영향 열대저기압의 장기변동성은 PDO와 강한 음의 상관성이 있다(Choi et al., 2019; Choi and Kim, 2019). 본 연구에서는 WTC 시계열



**Fig. 3.** Difference of vertical wind shear between 200 and 850 hPa levels (left), and relative vorticity at 850 hPa level (right) between negative and positive PDO phases (negative minus positive). The hatched area indicates that the differences are statistically significant at the 95% confidence level.

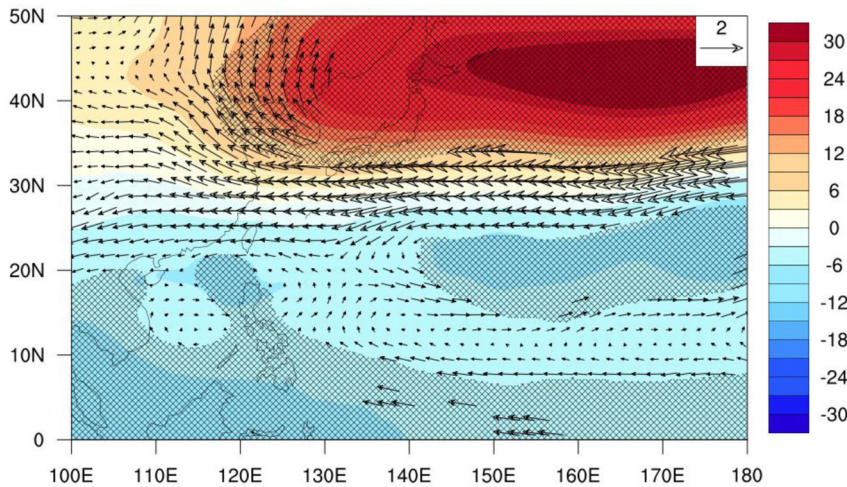
은 PDO와 95% 신뢰구간에서 통계적으로 유의한 음의 상관성( $r = -0.44$ )을 보인 반면, STC 시계열은 통계적으로 유의하지 않은 상관성을 보였다( $r = -0.11$ ). 다시 말해 기존 연구에서 나타난 한반도 영향 열대저기압 활동과 PDO와의 음의 상관성은 WTC 활동에 주로 기인한다고 할 수 있다.

앞서 서론에서 언급한 것처럼 본 연구는 STC보다는 WTC 활동을 중심으로 분석을 수행하였다. 고로, 이후의 모든 배경장 분석은 WTC의 주요 조절인자로 여겨지는 PDO의 위상을 기준으로 수행되었다. PDO에 의한 WTC 활동 변화를 좀 더 명확하게 확인하기 위해 PDO 위상에 따른 한반도 영향 개수의 차이를 분석하였다. PDO 양의 위상에 비해 음의 위상일 때, WTC는 한반도에 연평균 0.7개가 더 영향을 주며 이는 95% 신뢰구간에서 유의한 변화였다. 한편, STC는 수치적으로는 비슷하게 연평균 0.6개 증가하지만 통계적으로 유의하지 않은 변화였다.

WTC의 평균적인 발생위치가 열대 북서태평양 북서쪽 해역에 치우쳐 나타나는 것을 이해하기 위해서 WTC가 많이 오는 PDO 음의 위상과 WTC가 오지 않는 양의 위상에서의 연직바람시어, 850-hPa 상대와도 및 위상에 따른 차이를 비교했다(Fig. 3). 먼저, 연직바람시어의 경우에는 열대 북서태평양의 전체 해역 중 필리핀 해 동부 및 먼바다에서 PDO 양의 위상에 비해 음의 위상 시기에 연직바람시어가 강하게 나타났다. 즉, 이 지역에서는 PDO 음의 위상의 시기에 연직바람시어 측면에서 열대저기압이 발달하기에 상대적으로 약조건이 형성되어 있음을 의미한다. 반면, 열대 북서태평양 북부 지역에서는 연직바람시어는 약화되는 경향이 나타났다. 하지만 WTC가 평균

적으로 발생하는 위치( $128.16^{\circ}\text{E}$ ,  $20.11^{\circ}\text{N}$ )를 고려할 때 연직바람시어 측면에서 열대 북서태평양 북부 지역은 열대저기압 발달에 특별한 약조건이 존재하지 않는 것으로 보인다. 다음으로, 850-hPa 상대와도의 경우에는 PDO 양의 위상에 비해 음의 위상 시기에 열대 북서태평양 해역 남부 전반에서 음의 상대와도 아노말리가 뚜렷하게 나타났다. 열대 북서태평양 북부지역(특히 필리핀 북쪽 및 대만 남쪽 해역)과 아열대지역에서는 양의 상대와도 아노말리가 넓게 확인됐다. 이는 PDO 양의 위상에 비해 음의 위상일 때 하층 상대와도 측면에서 열대저기압 발달에 호조건이 상대적으로 북쪽으로 치우친다는 것을 의미한다. 정리하면 PDO 양의 위상에 비해 음의 위상 시기에 열대 북서태평양 남부에서는 강한 연직바람시어와 음의 상대소용돌이 아노말리가, 북부에서는 상대적으로 강한 양의 상대소용돌이 아노말리가 나타나 열대저기압의 주요 발생 위치가 북쪽으로 편향될 수 있었던 것으로 분석된다.

WTC는 발생 위치가 상대적으로 북서쪽으로 치우쳤을 뿐만 아니라 동아시아 대륙에 더 근접한 진로를 가지는 것으로 나타났다. WTC의 진로가 동아시아 대륙에 인접하는 원인을 알기 위해 같은 방법으로 500-hPa 지위고도장을 분석했다(Fig. 4). 그 결과 PDO 양의 위상에 비해 음의 위상 시기에 북서태평양 고기압이 상대적으로 북서쪽으로 확장하는 것으로 나타났다. 위상에 따른 500-hPa 지위고도장의 차이를 살펴보면 열대 북서태평양지역은 음의 아노말리가 지배적으로 나타났지만 한반도와 일본열도를 비롯한 중위도 지역에서는 양의 아노말리가 강하게 확인됐다. 또한, 수평바람장 아노말리를 살펴보면 PDO 음의 위



**Fig. 4.** Difference of geopotential height (unit: gpm) and wind vector (unit:  $\text{m s}^{-1}$ ) at 500 hPa level between negative and positive PDO phases (negative minus positive). The hatched area indicates that the differences are statistically significant at the 95% confidence level. Only wind vectors showing a significant difference at the 95% confidence level were displayed.

상 시기에 북서쪽으로 확장된 고기압 아노말리 가장 자리를 따라 북위 30도 부근에서 동풍 아노말리가, 한반도 서쪽에서 남동풍 아노말리가 유의하게 나타난다(Fig. 4). 이러한 배경장 아노말리가 열대저기압 진로를 서쪽으로 편향시켜 동아시아 대륙에 근접시키는데 기여했을 것으로 추정된다. 이러한 진로 편차는 PDO 음의 위상 시기에 동아시아 근처에서 양의 해수면온도 아노말리가 나타남에도 불구하고 WTC가 더욱 빈번한 것을 부분적으로 설명해 준다. 왜냐하면 서쪽으로 편향된 열대저기압은 대체로 황해를 통과하게 되는데 황해 저층에 자리잡은 냉수대가 열대저기압에 의한 혼합과 용승작용으로 해수면온도를 낮추어 열대저기압의 강도를 약화시킬 수 있기 때문이다(Moon et al. 2010).

## 결론 및 토의

본 연구에서는 한반도에 영향을 미치는 WTC의 특성을 STC와 비교하고, WTC 활동을 조절하는 주요 메커니즘으로 PDO를 제안하였다. WTC는 STC에 비해 발생위치와 진로가 모두 북서쪽으로 편향되어 있는 것으로 나타났다. 이에 따라 해양 위에서 발달할 시간 부족 및 육지의 영향으로 태생적으로 약해진 상태로 한반도에 영향을 줄 수밖에 없었던 것으로 분석되었다. WTC 활동은 PDO와 통계적으로 유의한 음의 상관성을 보였다. PDO 양의 위상에 비해 음의

위상일 때, 북위 20도를 기준으로 약한 연직바람시어와 양의 하층 상대와도가 이북에 나타나 열대저기압의 발생위치가 전반적으로 북진할 수 있었으며, 한반도와 일본열도 상공에 위치한 대류권 중층의 고기압성 아노말리는 WTC의 진로가 동아시아 대륙 쪽에 더 근접하도록 만들었을 것으로 분석되었다. 즉, PDO는 한반도에 영향을 미치는 WTC 활동을 조절하는 주요 메커니즘으로 여겨진다.

본 연구는 WTC 활동에 집중하여 진행되어 STC 활동에 대한 상세한 분석은 이루어지지 않았지만, 여기서 간단히 논의를 할 필요는 있다. WTC와 STC를 모두 포함한 기존연구에서 한반도 영향 열대저기압의 연간변동성은 PJ pattern, PDO와 상관성이 높은 것으로 나타났다(Choi et al., 2010; Kim et al., 2012; Choi et al., 2019; Choi and Kim, 2019). 하지만 본 연구에 따르면 STC는 PJ pattern과만 유의한 상관성을 보였으며, PDO와는 매우 낮은 상관성을 보였다. 즉, WTC와는 달리 STC 활동의 주요 조절 메커니즘은 PJ pattern임을 시사한다. 아직까지 PJ pattern과 관련해서는 STC만을 대상으로 한 연구가 없어, 관련 연구가 향후 필요할 것으로 보인다.

## 사 사

본 연구는 한국연구재단의 지원(NRF-2019R111A3A01058100)을 받아 수행되었습니다.

## References

- Choi, J.W., 2021, Spatiotemporal distribution of precipitation related to weakening of tropical cyclones in Korea. *Tellus Series a-Dynamic Meteorology and Oceanography*, 73, 1-16.
- Choi, K.S., Wu, C.C., and Cha, E.J., 2010, Change of tropical cyclone activity by Pacific-Japan teleconnection pattern in the western North Pacific. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 115, D19114.
- Choi, K.S., Wu, C.C., and Wang, Y., 2011, Effect of ENSO on Landfalling Tropical Cyclones Over the Korean Peninsula. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 47, 391-397.
- Choi, J.W., Cha, Y., and Lu, R., 2019, Possible Relationship between Korea Affecting Tropical Cyclone Activity and Pacific Decadal Oscillation in Summer. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 55, 557-573.
- Choi, J.-W., and Kim, H.-D., 2019, Negative relationship between Korea landfalling tropical cyclone activity and Pacific Decadal Oscillation. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 87, 101100.
- Do, G., Kim, H.-S., 2021, Effect of Mid-Latitude Jet Stream on the Intensity of Tropical Cyclones Affecting Korea: Observational Analysis and Implication from the Numerical Model Experiments of Typhoon Chaba (2016). *Atmosphere (Basel)*, 12, 1061.
- Feng, X.B., and Shu, S.J., 2018, How do weak tropical cyclones produce heavy rainfall when making landfall over China. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 123, 11830-11848.
- Fudeyasu, H., Iizuka, S., and Matsuura, T., 2006, Impact of ENSO on landfall characteristics of tropical cyclones over the western North Pacific during the summer monsoon season. *Geophysical Research Letters*, 33, L21815.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Thépaut, J., 2020, The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999-2049.
- Ho, C.H., and Kim, H.S., 2011, Reexamination of the Influence of ENSO on Landfalling Tropical Cyclones in Korea. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 47, 457-462.
- Hwang, H.S., Byun, H.R., Lee, S.M., Choi, K.S., and Lee, J.S., 2010, Distribution of precipitation on the Korean peninsula associated with the weakening of tropical cyclones. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 31, 322-334.
- Jones, S.C., Harr, P.A., Abraham, J., Bosart, L. F., Bowyer, P. J., Evans, J. L., Hanley, D. E., Hanstrum, B. N., Hart, R. E., Lalaurette, F., Sinclair, M. R., Smith, R. K., and Thorncroft, C., 2003, The extratropical transition of tropical cyclones: Forecast challenges, current understanding, and future directions. *Weather and Forecasting*, 18, 1052-1092.
- Kim, D., Ho, C.H., Park, D.S.R., Chan, J.C.L., and Jung, Y., 2019, The relationship between tropical cyclone rainfall area and environmental conditions over the subtropical oceans. *Journal of Climate*, 31, 4605-4616.
- Kim, J.S., Li, R.C.Y., and Zhou, W., 2012, Effects of the Pacific-Japan teleconnection pattern on tropical cyclone activity and extreme precipitation events over the Korean peninsula. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 117, D18109.
- Lee, M., Cha, D.H., Moon, J., Park, J., Jin, C.S., and Chan, J.C.L., 2019, Long-term trends in tropical cyclone tracks around Korea and Japan in late summer and early fall. *Atmospheric Science Letters*, 20, e939.
- Mantua Nathan J., Hare Steven R., 2002, The pacific decadal oscillation. *Journal of Oceanography*, 58, 35-44.
- Moon, I.-J., Shim, J. S., Lee, D. Y., Lee, J. H., Min, I.-K., and Lim, K. C., 2010, Typhoon researches using the Jeodo ocean research station: Part I. Importance and present status of typhoon observation, *Atmosphere*, 20, 247-260.
- Park, D.S.R., Ho, C.H., Kim, J.H., 2014, Growing threat of intense tropical cyclones to East Asia over the period 1977-2010. *Environmental Research Letters*, 9, 014008.
- Park, D.S.R., Ho, C.H., Kim, J., Kang, K., and Nam, C.C., 2016, Highlighting socioeconomic damages caused by weakened tropical cyclones in the Republic of Korea. *Natural Hazards*, 82, 1301-1315.
- Seo, E., Lee, M. I., Kim, D., Lim, Y. K., Schubert, S. D., and Kim, K. M., 2019, Inter-annual variation of tropical cyclones simulated by GEOS-5 AGCM with modified convection scheme. *International Journal of Climatology*, 39, 4041-4057.
- Torn, R.D., and Snyder, C., 2012, Uncertainty of tropical cyclone best-track information. *Weather and Forecasting*, 27, 715-729.
- Trenberth, K.E., 1997, The Definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 2771-2777.
- Wakabayashi, S., Kawamura, R., 2004, Notes and Correspondence; Extraction of Major Teleconnection Patterns Possibly Associated with the Anomalous Summer Climate in Japan. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 82, 1577-1588.

---

Manuscript received: January 18, 2022

Revised manuscript received: February 22, 2022

Manuscript accepted: February 22, 2022