

ORIGINAL ARTICLE

북서태평양 원격패턴에 의한 북서태평양 태풍활동에서의 변화

최재원* · 김정윤 · 이승욱
국립기상연구소 연구기획운영과

Change in Western Pacific Tropical Cyclone Activity by Western North Pacific Teleconnection Pattern

Jae-Won Choi*, Jeung-Yun Kim, Seung-Wook Lee

Planning and General Affairs Division, National Institute of Meteorological Research, Jeju 63568, Korea

Abstract

This study analyzes the characteristics of Western North Pacific (WNP) tropical cyclone (TC) activity and large-scale environments according to the Western Pacific (WP) teleconnection pattern in summer. In the positive WP phase, an anomalous cyclone and an anomalous anticyclone develop in the low and middle latitudes of the East Asia, respectively. As a result, southeasterlies are reinforced in the northeast area of the East Asia including Korea and Japan which facilitates the movement of TC to this area, whereas northwesterlies are reinforced in the southwest area of the East Asia including South China and Indochina Peninsula which blocks the movement of TC to this area. Due to the spatial distribution of this reinforced pressure system, TCs develop, move, and turn more to the northeast of WNP than those in the negative WP phase. Consequently, the characteristics of this TC activity in the positive WP phase are associated with the location of upper tropospheric jet further to the northeast. Meanwhile, TCs in the negative WP phase mainly move to the west from Philippines toward south China and Indochina Peninsula. Furthermore, due to the terrain effect caused by the high passage frequency of TCs in the mainland China, the intensity of TCs are weaker than those in the positive WP phase.

Key words : Western Pacific teleconnection pattern, Tropical cyclone, Large-scale environments, East Asia, Upper tropospheric jet

1. 서론

동아시아 지역은 아열대 서태평양에서 발생하는 태풍으로 인해 매년 많은 재산과 인명피해를 입고 있다. 따라서 동아시아의 각 지역에서 발생하는 이러한 이상적인 태풍의 활동에 대한 원인을 기후인자로부터 찾고자 하는 노력이 활발히 이루어져왔다. 북서태평양에서 태풍활동

과의 상관분석이 가장 많이 이루어진 기후인자는 준2년진동(Quasi-Biennial Oscillation, QBO)과 엘니뇨-남방진동(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)이다(Chan, 1985, 1995; Lander, 1994; Saunders et al., 2000; Wang and Chan, 2002; Camargo and Sobel, 2005; Ho et al., 2009). Lander(1994)는 아열대 서태평양에서의 태풍발생빈도와 엘니뇨-남방진동 사이에는 통계적으로

Received 31 July, 2015; Revised 15 September, 2015;

Accepted 26 October, 2015

*Corresponding author : Jae-Won Choi, Planning and General Affairs Division, National Institute of Meteorological Research, Jeju 63568, Korea
Phone: +82-64-780-6537
E-mail: choiks@kma.go.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

유의한 상관을 보이지 않는 반면, 태풍발생위치에서는 엘니뇨-남방진동의 변화에 따라 뚜렷한 차이가 있음을 제안하였다. 이후 Wang and Chan(2002)과 Camargo and Sobel(2005)은 엘니뇨-남방진동 온난 사례시 태풍들은 아열대 서태평양의 남동지역에서 주로 발생하며, 좀 더 긴 수명을 갖는 경향이 있음을 보였다.

한편 북반구 겨울철에 가장 뚜렷한 환상 모드(annular modes)중의 하나인 북극진동(Arctic Oscillation, AO)과 북서태평양에서의 태풍활동과의 관계에 대한 연구가 있다. Choi and Byun(2010)이 7-9월 동안 북극진동 지수에 따른 북서태평양에서 태풍활동의 변화를 분석하였다. 대서양에서의 태풍활동과 북극진동과의 관계에 대한 연구도 있다(Larson et al., 2005; Xie et al., 2005). 이 연구들에서는 북극진동이 대서양에서의 태풍발생빈도와 양의 상관관계에 있음을 공통적으로 제시하고 있다.

Ho et al.(2005)은 북서태평양에서 태풍활동의 변화에 대한 원인을 남반구에서의 대규모 대기순환과 연관시키고자 하였다. 그들은 남반구에서 양의 남극진동 지수(Positive Antarctic Oscillation (AAO) phase)동안 동아시아 중위도 지역에 발달한 고기압 아노말리로 인해 이 지역에서의 태풍이동빈도는 증가하나 남중국해 부근 지역에서는 감소함을 보였다. 또한, Wang and Fan(2007)은 6-9월동안 남극진동과 아열대 서태평양에서의 태풍발생빈도사이에는 음의 상관관계가 있음을 발견하였다. 그들은 이 연구에서 양의 남극진동 지수시 아열대 서태평양에서는 연직바람시어가 증가하고, 하층 고기압-상층 저기압의 연직 구조가 발달하며, 해수면 온도는 낮아져 태풍이 발생하는데 비우호적인 환경이 조성됨을 보였다.

Elsner and Kocher(2000)은 factor analysis model을 이용하여 세계 주요 태풍발생 해역으로부터 Global TC Activity(GTCA) 지수의 추출을 시도하였으며, 추출된 지수는 엘니뇨-남방진동의 변동보다는 북대서양진동(North Atlantic Oscillation, NAO)의 변동과 좀 더 깊은 관계가 있음을 제시하였다. 또한 Wang et al.(2007)은 6-9월동안 북태평양 진동(North Pacific Oscillation, NPO)과 아열대 서태평양 및 아열대 대서양에서의 태풍 발생빈도와의 관계를 조사하였다. 결과로서, 그들은 전자와 후자 해역에서의 태풍발생빈도가 각각 북태평양진동과 양의 상관 및 음의 상관을 나타내며, 두 해역 사이에

태풍발생빈도의 변동은 대규모 대기원격상관 패턴을 통해 이루어짐을 제안하였다. 가장 최근의 연구로서 Choi et al.(2010)은 태평양-일본 원격패턴(Pacific-Japan teleconnection pattern)에 따른 북서태평양 태풍활동의 변화를 분석하였다. 이들은 양의 태평양-일본 지수에는 동아시아 저·중위도에 각각 저기압 아노말리(cyclone anomaly)와 고기압 아노말리(anticyclone anomaly)가 발달함으로 인해 중위도에서 강화된 남풍 아노말리가 이 지역으로 태풍들을 쉽게 이동시키는 지향류의 역할을 함을 보인바 있다.

이 연구는 서태평양 원격패턴(Western Pacific teleconnection pattern)에 따른 북서태평양 태풍활동의 변화를 분석한다. 하지만 서태평양 원격패턴과 북서태평양 태풍활동과의 관계에 대한 연구는 수행되지 않았다. 이러한 배경에서, 이 연구는 서태평양 원격패턴에 따른 북서태평양 태풍활동 변화를 분석하고, 이 변화와 관계되는 중관규모 환경장의 특성을 조사해 보고자 한다.

2. 자료 및 분석방법

2.1. 자료

태풍자료는 지역특별기상센터-동경 태풍센터(Regional Specialized Meteorological Center (RSMC)-Tokyo Typhoon Center)에서 제공하는 태풍의 최적경로(best-track) 자료로부터 획득되었다. 이 자료는 1965-2009년(45년)동안 매 6시간 간격으로 관측된 태풍 이름, 위경도 위치, 중심기압, 중심 최대풍속의 정보로 구성된다. 열대성 저기압은 일반적으로 중심 최대풍속을 기준으로 네 등급으로 나뉘어진다: 열대 저압부(Tropical Depression, 중심최대풍속 < 17 m/s), 열대폭풍(Tropical Storm, 17 m/s ≤ 중심최대풍속 ≤ 24 m/s), 격렬한 열대폭풍(Severe Tropical Storm, 25 m/s ≤ 중심최대풍속 ≤ 32 m/s), 태풍(Typhoon, 중심최대풍속 ≥ 33 m/s). 이 연구에서 태풍은 이 네 등급을 모두 포함하는 것으로 정의된다.

한편 이 연구는 1965-2009년 동안의 미국 국립환경예측센터-국립대기연구센터(National Centers for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric

Research, NCEP-NCAR) 재분석 자료의 지위고도 (gpm), 기온 (°C), 동서 및 남북류 (ms⁻¹), 연직속도 (hPa s⁻¹)의 변수를 사용하였다(Kalnay et al., 1996; Kistler et al., 2001), 이 재분석 자료는 위경도 2.5°×2.5° 및 17개의 연직층과 같은 공간해상도로 이루어져 있다.

역시, NOAA 위성 시리즈로부터 산출된 방출장파복사자료가 사용되었다. 이 자료는 기후진단센터(Climatic Diagnosis Center, CDC)에서 제공하며, 1974년 6월부터 사용가능하다. 그러나 1978년 3월부터 12월의 기간 동안 결측기간이 존재하며, 방출장파복사자료에 대한 좀더 자세한 사항은 Liebmann and Smith(1996)의 논문을 참고하기 바란다.

또한 미국 국립해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 월평균 해수면 온도(Sea Surface Temperature, SST) (Reynolds et al., 2002)자료가 사용되었다. 이 자료는 위경도 2.0°×2.0° 수평 공간해상도로 구성되어 있고, 1854년부터 현재까지 이용 가능하다.

2.2. 분석방법

아열대 북서태평양에서 발생하는 태풍의 약 60%가 7-9월에 분포되어 있으며, 한국, 일본, 중국을 포함한 동아시아 대부분의 지역에서의 태풍에 의한 피해는 이 세 달에 집중된다(Chia and Ropelewski, 2002). 따라서 현재 연구에서 사용되는 여름은 이 세 달로 정의된다.

온난, 한랭, 노말 엘니뇨-남방진동 해를 정의하기 위하여, Niño-3.4 지역(5°S-5°N, 170°W-120°W)에서 7-9월 동안의 해수면 온도 아노말리(Sea Surface Temperature Anomalies, SSTA)를 사용하여 아래와 같이 분류하였다.

- warm : SSTA ≥ 0.5°C
- cold : SSTA ≤ -0.5°C
- normal : -0.5°C < SSTA < 0.5°C

여기서, SSTA를 얻기 위하여, Niño-3.4지역에서 7-9월 동안 45년 평균 해수면 온도자료가 사용되었다.

이 연구에서 태풍 이동빈도를 계산하기 위해서 각 태풍은 5°×5° 격자내에 위치시킨 후 계산되었으며, 태풍이 같은 격자내에 여러 번 이동하여도 한번 이동한 것으로

간주하였다(Ho et al., 2005). 태풍의 발생빈도 역시 이와 같은 방법으로 계산되었다. 태풍의 일생은 지역특별 기상센터-동경 태풍센터에서 제공하는 6시간 간격의 태풍최적경로자료에서 태풍의 발생부터 소멸까지의 기간으로 정의된다. 태풍 최저중심기압은 역시 같은 자료에서 태풍의 일생 동안에서 기록된 가장 낮은 중심기압으로 정의된다.

또한 이 연구에서 종관환경의 상태를 진단하기 위한 연직 바람 시어(vertical wind shear)는 다음의 식과 같이 계산된다.

$$VWS = \sqrt{(u_{200-850})^2 + (V_{200-850})^2}$$

여기서 u와 v는 동서 및 남북류를 각각 나타내며, 200과 850은 200 hPa과 850 hPa 층을 각각 나타낸다.

두 표본평균 사이의 유의성 비교는 독립표본 t-검정(independent two-sample t-test)을 사용하였다. 두 독립변수의 시계열이 t-분포를 따르고, 표본의 평균이 각각 \bar{x}_1 , \bar{x}_2 , 로 정의될 경우, t-검정의 식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_{x_1x_2} \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$$

여기서 s_1 , s_2 는 표준편차이고 n_1 , n_2 는 두 시계열에서 총 개수이다. 만약 위의 식으로부터 t의 절대값이 유의수준의 문턱값보다 크게 산출되면, 귀무가설(null hypothesis)은 $\alpha(\times 100)\%$ 의 신뢰수준에서 기각된다(Wilks, 1995).

서태평양 원격패턴 지수는 20°N이상의 지역에서 표준화된 500 hPa 지위고도자료에 대해 회전 주성분 분석(rotated principle component analysis)을 이용하여 산출된 결과 중 제1모드로 사용된다. 이 패턴의 강한 양의 지수 해에는 태평양 제트기류의 입구지역의 강도와 위치에서 뚜렷한 남북, 동서방향의 변화를 잘 반영한다. 이 연구에서 사용된 서태평양 원격패턴 지수는 NOAA/Climate Prediction Center (CPC)에서 제공하는 1965-2009년 동안의 월 서태평양 원격패턴 지수이다.

3. 서태평양 원격패턴에 따른 변화

Fig. 1은 최근 45년 동안 여름 평균 서태평양 원격패턴 지수의 시계열을 보여준다. 서태평양 원격패턴 지수는 뚜렷한 경년 및 십년간 변동을 나타내며, 최근 45년 동안 감소하는 추세를 보인다.

서태평양 원격패턴에 따른 북서태평양 태풍활동의 변동 특성을 알아보기 위하여 최근 45년 동안의 서태평양 원격패턴 지수 중 가장 높은 서태평양 원격패턴 지수(이후, 양의 서태평양 원격패턴 지수이라 함)와 가장 낮은 서태평양 원격패턴 지수(이후, 음의 서태평양 원격패턴 지수이라 함)를 각각 8년씩 선택하였다(Table 1). 여기

서 선택된 각각의 해들은 여름 동안의 엘니뇨 해(1965, 1972, 1982, 1986-87, 1991, 1994, 1997, 2002, 2004, 2006, 2009)와 라니냐 해(1970-71, 1973-75, 1985, 1988, 1998-99)를 제외한 뒤 선택되었다. 여기서 선택된 16년은 ±0.5이상의 지수를 나타내며, 엘니뇨 라니냐 해를 제외하면 전체분석 기간의 2/3를 차지한다. 비록 서태평양 원격패턴 지수와 여름 Niño-3.4 지수 사이에 -0.09의 낮은 상관을 보였지만, 서태평양 원격패턴에 따른 북서태평양 태풍활동의 변동 특성에서 엘니뇨-남방진동의 영향을 제거하기 위해서이다.

45년 여름 평균 태풍발생빈도는 14회로서 양의 서태평양 원격패턴 지수에는 1976, 1977, 1979년을 제외하

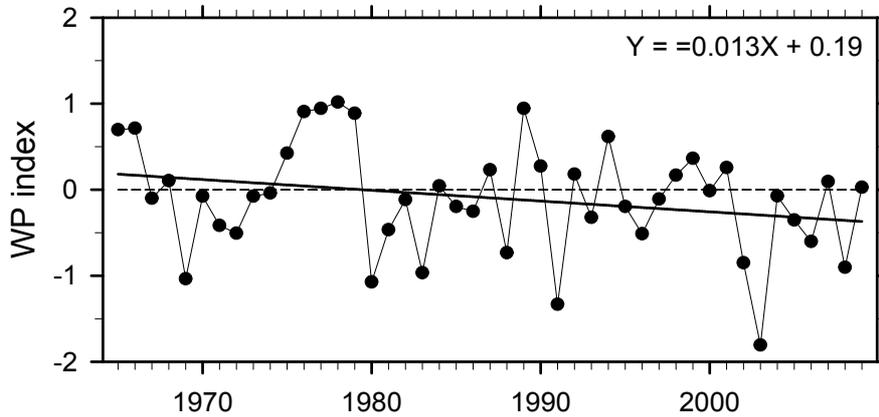


Fig. 1. Time series of the summer (July-September) Western Pacific (WP) teleconnection index for the period of 1965-2009. Thick solid line denotes the trend of the time series.

Table 1. TC genesis frequency for the positive WP phase and negative WP phase selected from neural ENSO years during summer (July, August, and September) for the period of 1965-2009

Positive WP phase		Negative WP phase	
Year	TC genesis frequency	Year	TC genesis frequency
1966	24	1969	10
1976	13	1980	12
1977	11	1981	16
1978	17	1983	10
1979	11	1996	17
1989	18	2003	10
1990	15	2005	15
2001	16	2008	11
Average	16	Average	13

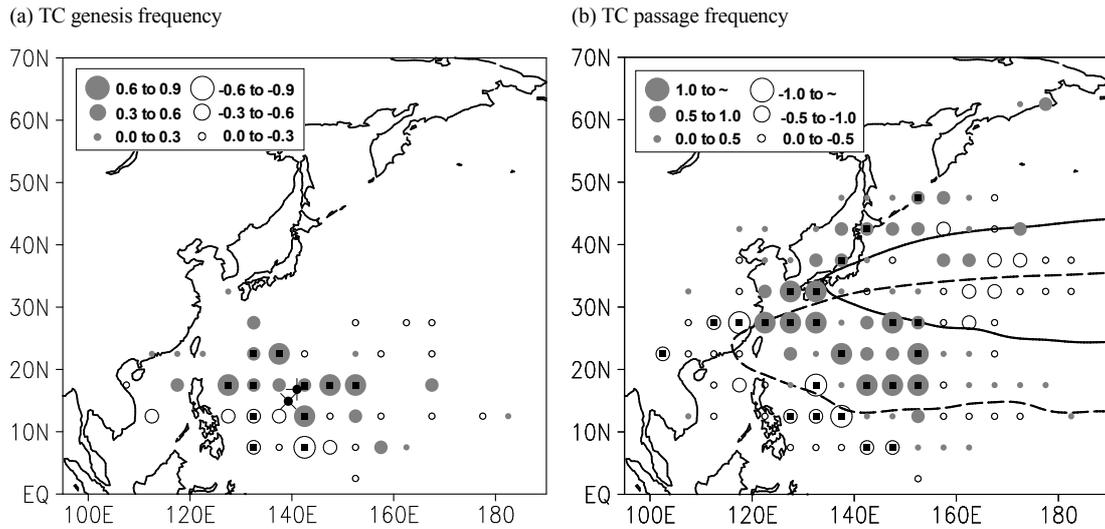


Fig. 2. Differences in (a) the tropical cyclone (TC) genesis frequency and (b) TC passage frequency between positive WP phase and negative WP phase during summer in each $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ latitude-longitude grid box. Squares inside circles indicate that the differences are significant at the 95% confidence level. In (b), solid and dashed lines denote 5860 gpm contours in positive and negative WP phases, respectively.

고 모두 45년 여름평균 태풍발생빈도를 넘었으나, 음의 서태평양 원격패턴 지수에는 1981, 1996, 2005년을 제외하고 모두 넘지 못했다. 또한 양의 서태평양 원격패턴 지수의 평균 태풍발생빈도는 음의 서태평양 원격패턴 지수의 그것보다 3회 정도 높다.

이후부터는 두 서태평양 원격패턴 지수 사이에 북서태평양 태풍활동의 차 및 이러한 차를 야기하는 종관환경을 분석하고자 한다.

3.1. 태풍발생빈도

Fig. 2a는 위·경도 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 의 격자간격마다 양의 서태평양 원격패턴 지수와 음의 서태평양 원격패턴 지수 사이에 태풍발생빈도의 차를 나타낸 것이다. 전체적으로 양의 서태평양 원격패턴 지수의 태풍들이 음의 서태평양 원격패턴 지수의 그것들 보다 아열대 서태평양에서 좀 더 북동쪽 영역에서 발생하는 경향이 강하다. 이는 각 서태평양 원격패턴 지수 평균 태풍발생위치를 비교해 봄으로써 확인된다. 여기서 두 서태평양 원격패턴 지수 사이에 태풍발생위치의 위·경도차는 95% 신뢰수준, 90% 신뢰수준에서 각각 유의하다.

한편, 양의 서태평양 원격패턴 지수 동안에는 125개

의 태풍이 발생한 반면, 음의 서태평양 원격패턴 지수에는 총 101개의 태풍들이 발생하여 두 서태평양 원격패턴 지수 사이에는 24개의 차가 난다. 이 차는 99% 신뢰수준에서 유의하다. 이 결과는 양의 서태평양 원격패턴 지수의 매년 여름 동안 3개의 태풍이 음의 서태평양 원격패턴 지수보다 더 많이 발생함을 의미한다.

3.2. 태풍이동빈도

이 연구는 역시 위·경도 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 격자간격마다 양의 서태평양 원격패턴 지수와 음의 서태평양 원격패턴 지수 사이에 태풍이동빈도의 차를 분석하였다(Fig. 2b). 전체적으로 앞서 태풍발생빈도의 결과와 비슷하게 양의 서태평양 원격패턴 지수의 태풍들이 음의 서태평양 원격패턴 지수의 그것들 보다 좀 더 북동쪽에서 이동하는 경향이 강하다. 좀 더 세부적으로 살펴보면, 양의 서태평양 원격패턴 지수의 태풍들은 필리핀 먼 동쪽해상으로부터 동중국해를 지나 한국 및 일본으로 이동하는 경향이 있는 반면, 음의 서태평양 원격패턴 지수의 태풍들은 필리핀 동쪽해상으로부터 남중국해를 거쳐 중국 남부지역 또는 인도차이나 반도에 상륙하는 경향이 강하다. 이로 인해 두 서태평양 원격패턴 지수 사이에 태풍이동빈도 차의 공간

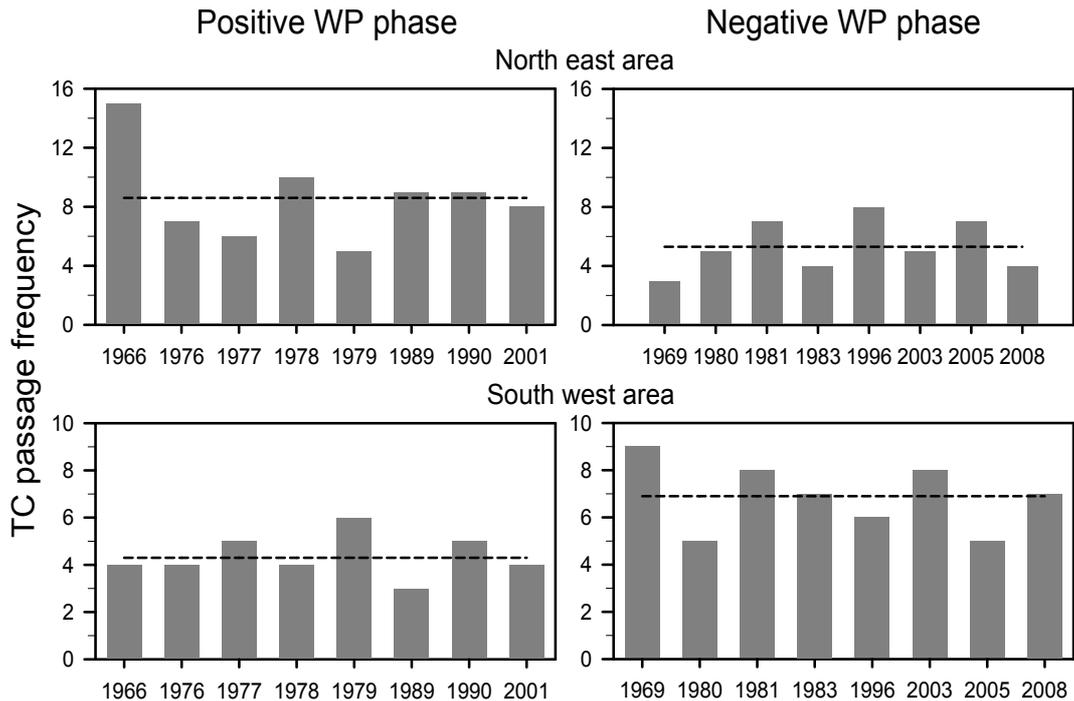


Fig. 3. Time series of TC passage frequency for summer in the north east area ($25^{\circ} - 45^{\circ}\text{N}$ and $120^{\circ} - 145^{\circ}\text{E}$) and the south west area ($10^{\circ} - 30^{\circ}\text{N}$ and $95^{\circ} - 120^{\circ}\text{E}$) of East Asia in positive and negative WP phases. Dashed lines indicate the mean TC passage frequency over each region for two WP phases.

분포에서 동아시아의 북동쪽 영역과 남서쪽 영역 사이에 쌍극자의 공간 패턴이 나타난다. 따라서 동아시아의 북동쪽 영역($25^{\circ} - 45^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ} - 145^{\circ}\text{E}$)과 남서쪽 영역($10^{\circ} - 30^{\circ}\text{N}$, $95^{\circ} - 120^{\circ}\text{E}$)에서 각 서태평양 원격패턴 지수에 대한 태풍이동빈도를 조사하였다(Fig. 3). 한국 및 일본을 포함하는 북동지역에서의 45년 여름평균 태풍이동빈도는 7.3개이다. 양의 서태평양 원격패턴 지수에는 이보다 1.3개가 많은 8.6개가 이 지역에 영향을 주는 반면, 음의 서태평양 원격패턴 지수에는 이보다 2개가 적은 5.3개의 태풍이 영향을 주었다. 따라서 두 서태평양 원격패턴 지수 사이에는 평균적으로 3.3개의 차가 난다. 특히, 양의 서태평양 원격패턴 지수에는 5개 미만의 태풍빈도를 가지는 해가 없다. 여기서 45년 여름 평균 태풍이동빈도와 각 서태평양 원격패턴 지수 평균 태풍이동빈도 사이의 차는 모두 90% 신뢰수준에서 유의하다. 또한 두 서태평양 원격패턴 지수 사이에 평균 차는 99% 신뢰수준

에서 유의하다. 한편, 인도차이나 반도와 중국 남부지역을 포함하는 남서지역에서의 45년 여름평균 태풍이동빈도는 5.8개이다. 양의 서태평양 원격패턴 지수에는 이보다 1.5개가 적은 4.3개가 이 지역에 영향을 주는 반면, 음의 서태평양 원격패턴 지수에는 이보다 1.1개가 많은 6.9개의 태풍이 영향을 주었다. 따라서 음의 서태평양 원격패턴 지수에는 양의 서태평양 원격패턴 지수보다 평균적으로 2.6개가 더 많이 영향을 주었다. 특히, 음의 서태평양 원격패턴 지수에는 5개 미만의 태풍빈도를 나타내는 해가 없다. 이 결과들은 북동영역과 반대의 양상을 나타낸다. 여기서 45년 여름 평균 태풍이동빈도와 양의 서태평양 원격패턴 지수 평균 태풍이동빈도 사이의 차는 99% 신뢰수준에서 유의한 반면, 음의 서태평양 원격패턴 지수와 차는 통계적으로 유의하지 않다. 두 서태평양 원격패턴 지수 사이에 평균 차는 99% 신뢰수준에서 유의하다.

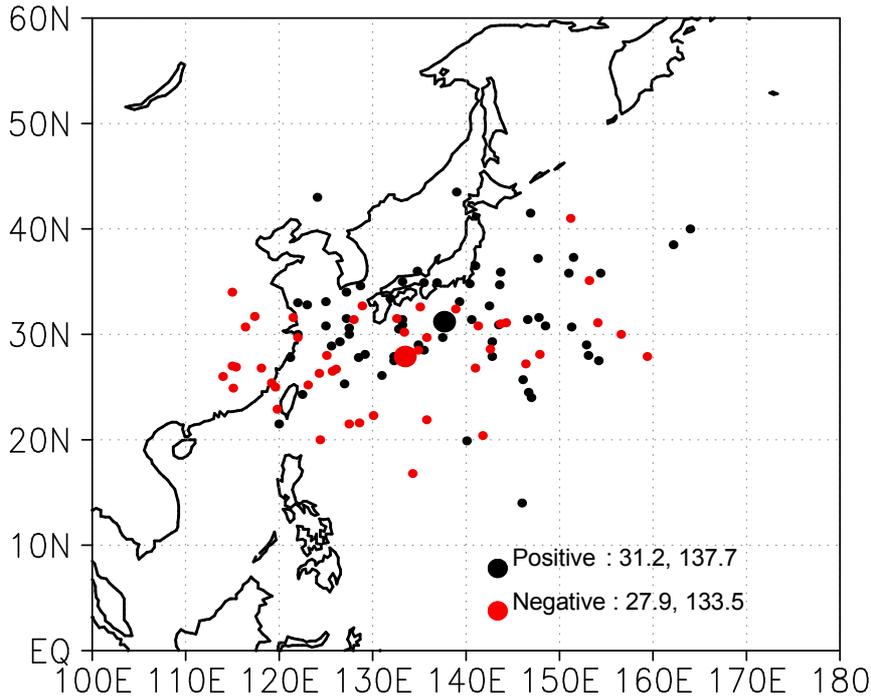


Fig. 4. TC recurvature location in positive WP phase (black dots) and negative WP phase (red dots) during summer. Big dots are the mean recurvature locations for the two phases. Black and red numbers denote mean recurvature locations for the two phases.

3.3. 태풍전향

이 연구는 두 서태평양 원격패턴 지수 동안 태풍활동 중의 하나인 태풍전향의 특징을 조사하였다(Fig. 4). 여기서 6시간 간격의 지역특별기상센터-동경태풍센터 태풍최적경로 자료에서의 태풍일생 동안 전향을 하지 않은 태풍들은 이 연구에서 제외되었다. 이로부터 양의 서태평양 원격패턴 지수에는 62개의 태풍들이, 음의 서태평양 원격패턴 지수에는 55개의 태풍들이 분석을 위해 선택되었다. 앞서 두 분석의 결과와 비슷하게 전체적으로 양의 서태평양 원격패턴 지수에 태풍들이 북서태평양에서 좀더 북동쪽 영역에서 전향이 이루어진 것을 볼 수 있다. 이러한 특징은 남북 차의 경우 30°N를 중심으로 남쪽지역은 음의 서태평양 원격패턴 지수에, 북쪽 지역은 양의 서태평양 원격패턴 지수에 태풍들이 더 많이 전향한 것으로부터 알 수 있다. 동서 차의 경우, 125°E의 서쪽지역에서는 음의 서태평양 원격패턴 지수에, 145°E의 동쪽지역에서는 양의 서태평양 원격패턴 지수에 태풍

들이 더 많이 전향한 것으로부터 확인된다. 따라서 두 서태평양 원격패턴 지수 사이에 태풍전향위치의 차는 위·경도 위치 모두 99% 신뢰수준에서 유의하다. 이는 결국 양의 서태평양 원격패턴 지수에 태풍들이 음의 서태평양 원격패턴 지수에 그것들 보다 좀더 북동쪽에서 발생하고, 이동하는 특징과 연관됨을 알 수 있다.

3.4. 태풍강도

태풍발생, 태풍진로 및 태풍전향의 특징들이 태풍강도에 영향을 주는지를 알아보기 위해 두 서태평양 원격패턴 지수에 대한 태풍강도를 분석하였다(Fig. 5). 여기서 태풍강도는 6시간 간격의 지역특별기상센터-동경태풍센터 태풍최적경로자료에서 계산된 태풍일생과 태풍일생 동안의 최저중심기압을 의미한다. 전체적으로 양의 서태평양 원격패턴 지수에 태풍들이 태풍일생이 더 길고 태풍최저중심기압이 더 낮다. 즉, 이것은 이 지수에 태풍강도가 음의 서태평양 원격패턴 지수에 그것보다 더 강했음을 의미한다. 두 서태평양 원격패턴 지수 사이

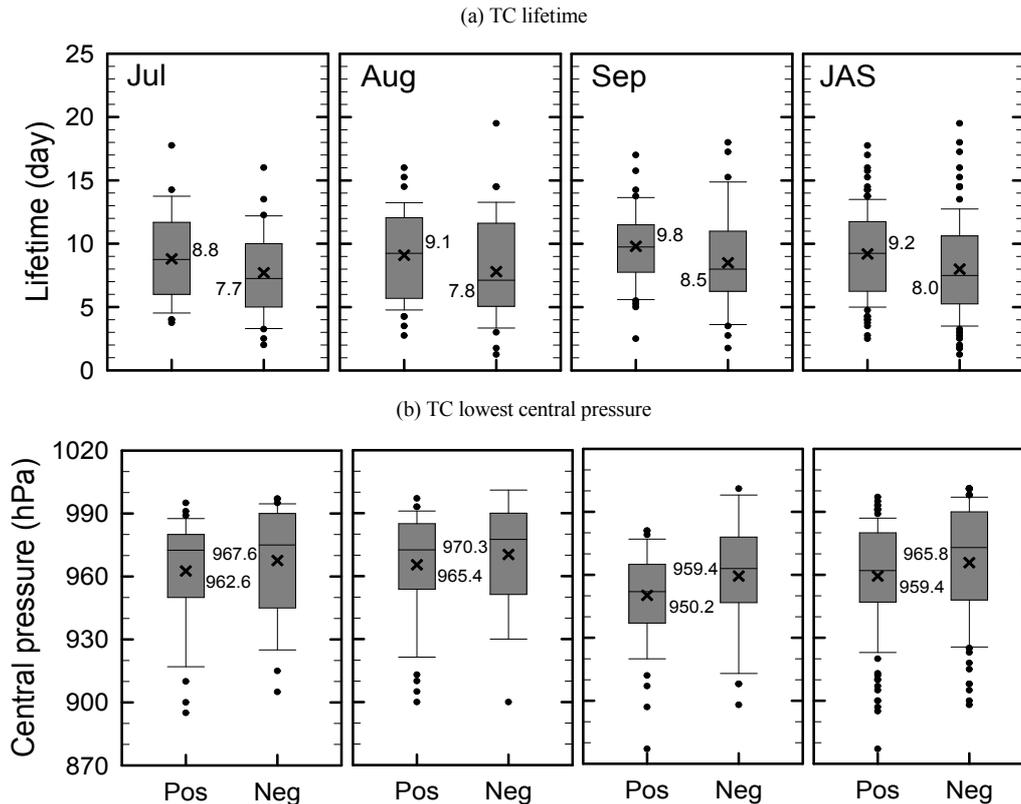


Fig. 5. (a) TC lifetime and (b) TC lowest central pressure in positive and negative WP phases during summer. The boxes show the 25th and 75th percentiles, the lines in the boxes mark the median and the circles the values below (above) the 25th (75th) percentiles of the distributions. Numbers in the right and left of boxes represent averages (cross marks) for positive WP and negative WP phases, respectively.

에 태풍강도의 차는 7월의 경우에만 90% 신뢰수준에서 유의할 뿐, 나머지 각 달 및 3달 모두에서는 95% 이상의 신뢰수준에서 유의하다. 양의 서태평양 원격패턴 지수에 태풍강도가 더 강한 이유는 앞서 분석된 바와 같이 두 서태평양 원격패턴 지수 사이에 태풍진로의 차로부터 살펴볼 수 있다. 음의 서태평양 원격패턴 지수에 태풍들은 필리핀 동쪽 해상으로부터 짧은 거리를 이동하여 중국남부지역 및 인도차이나 반도에 상륙한 후 지형효과로 인해 강도가 급속도로 약해지거나 바로 소멸되기 때문인 것으로 분석된다. 반면, 양의 서태평양 원격패턴 지수에 태풍들은 주로 바다를 이동하면서 태풍의 주 에너지 원인 수증기를 바다로부터 충분히 공급받을 수 있기 때문이다.

3.5. 종관환경

앞서 두 서태평양 원격패턴 지수 사이에 나타나는 뚜렷한 태풍활동 차의 원인을 알아보기 위해 종관환경의 상태를 분석한다. 먼저 두 서태평양 원격패턴 지수 사이에 500 hPa 유선의 차에서는 30°N를 중심으로 남저·북고의 기압계 아노말리 패턴이 보여진다(Fig. 6a). 이 기압계 아노말리의 공간패턴은 Wallace and Gutzler(1981)가 서태평양 원격패턴을 정의하기 위해 분석된 공간분포와 유사하다. 이러한 공간분포로 인해 동중국해, 한국, 일본을 포함하는 동아시아 중위도 지역에서는 남동풍 아노말리가 강화되어 있다. 이 흐름의 아노말리는 양의 서태평양 원격패턴 지수에 태풍들을 동아시아 중위도 지역으로 이동시키는 지향류의 역할을 할 수 있다. 따라서 앞서

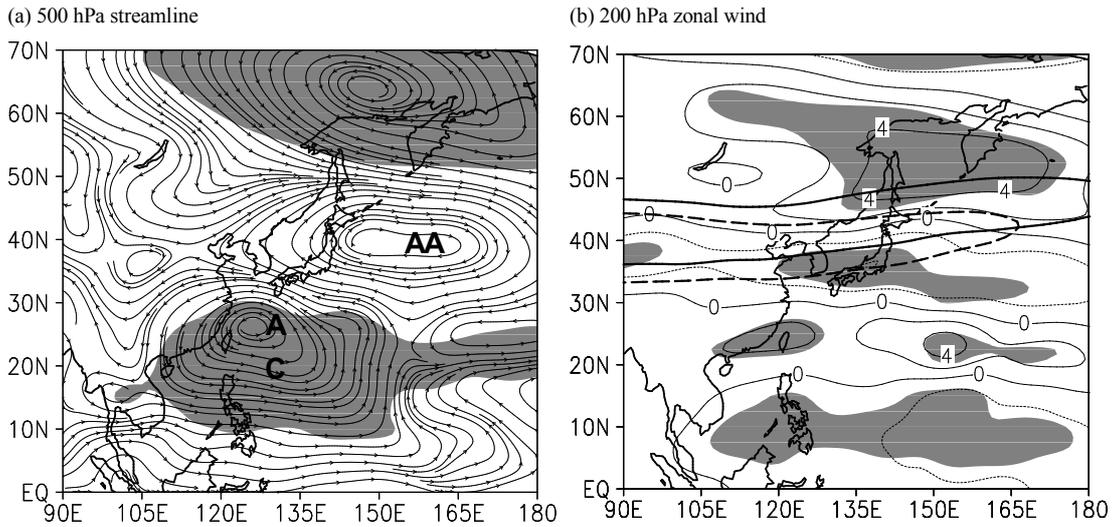


Fig. 6. Differences in (a) 500 hPa streamline and (b) 200 hPa zonal wind between positive WP phase and negative WP phase. Shaded areas are significant at the 95% confidence level. In (b), thick solid and thick dashed lines indicate that zonal wind is area greater than 25 ms⁻¹ in positive and negative WP phases, respectively. Abbreviations of ‘AC’ and ‘AA’ represent ‘anomalous cyclone’ and ‘anomalous anticyclone’.

살펴보았듯이 이 지수에 주된 태풍진로가 필리핀 먼 동쪽해상으로부터 동중국해를 경유하여 한국 및 일본으로 나타나게 된다. 반면에 남중국해, 인도차이나 반도, 중국 남부지역에서는 북풍 아노말리 또는 북서풍 아노말리가 강화되어 있다. 이는 역으로 음의 서태평양 원격패턴 지수에는 이들 지역에 남풍 아노말리 또는 남동풍 아노말리가 강화되어 있다는 것을 의미한다. 이로 인해 앞서 보았듯이 음의 서태평양 원격패턴 지수에 주 태풍진로가 필리핀 동쪽 해상으로부터 남중국해를 경유하여 인도차이나 반도 및 중국남부지역으로 나타나게 된다.

한편, 양의 서태평양 원격패턴 지수에 30°N의 북쪽에 강화되어 있는 고기압 아노말리는 이 지수에 북태평양 고기압이 음의 서태평양 원격패턴 지수에 그것보다 북쪽으로 발달했음을 의미한다. 따라서 두 서태평양 원격패턴 지수 사이에 북태평양 고기압의 발달 정도를 비교하기 위해 5860 gpm 등치선을 분석하였다(Fig. 2b). 이 연구에서 5,860 gpm 등치선은 북태평양 고기압의 서쪽 가장자리로 정의될 수 있다. 양의 서태평양 원격패턴 지수에의 북태평양 고기압(실선)이 좀더 북동쪽에 위치한 반면, 음의 서태평양 원격패턴 지수에의 그것(파선)은 오히려 남서쪽으로 확장하였음을 볼 수 있다. 이러한 각 서

태평양 원격패턴 지수에 북태평양 고기압의 공간분포 특성은 해당 서태평양 원격패턴 지수의 주 태풍진로와 대체로 일치한다.

일반적으로 대류권 상층 제트는 대류권 하층에서 수렴 및 상승기류를 강화하여 강우형성을 용이하게 하며, 북태평양 고기압의 북쪽에서의 발달 정도를 판단하는 근거로서 사용되어진다(Liang and Wang, 1998; Lau and Nath, 2000). 또한 이들 연구에서는 앞서 서태평양 원격패턴에 따른 동아시아 지역에서의 강우량과 온도의 변동이 동아시아 제트기류의 남북이동과 연관되어짐을 토론했었다. 본 연구에서도 두 서태평양 원격패턴 지수에 대한 대류권 상층(200 hPa 층) 제트의 상태를 분석하였다(Fig. 6b). 여기서 제트는 25 m/s 이상의 동서류의 풍속을 가지는 영역으로 정의된다. 전체적으로 양의 서태평양 원격패턴 지수의 제트기류(두꺼운 실선)이 음의 서태평양 원격패턴 지수의 그것(두꺼운 파선)보다 좀더 북동쪽에 위치해 있다. 이러한 특징은 두 서태평양 원격패턴 지수 사이에 200 hPa 동서류의 차에서 확인할 수 있다. 30°-45°N에는 음의 값이 존재하고 이 위도대의 북동쪽에 양의 값의 중심이 위치해 있다. 이는 양(음)의 서태평양 원격패턴 지수의 제트가 좀더 북동(남서)쪽에 위치함

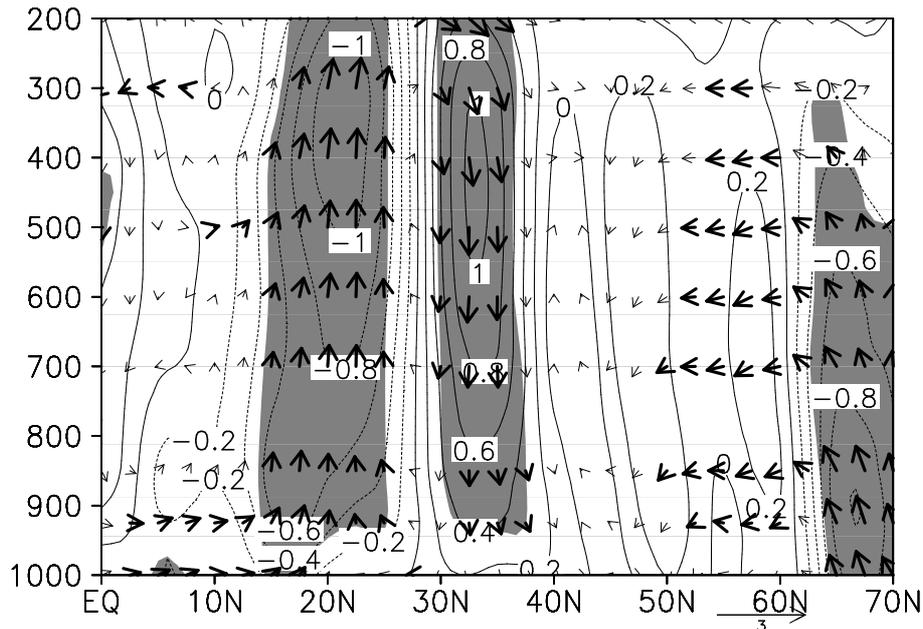


Fig. 7. Composite difference in latitude-pressure cross-section of vertical velocity (contour) and meridional circulation (vector) averaged along 110° - 180° E between the positive WP phase and the negative WP phase during summer. The values of vertical velocity are multiplied by -100 . Shaded areas and thick arrows are significant at the 95% and 90% confidence levels, respectively. Contour interval is 0.2^2 hPa s^{-1} .

을 의미한다. 일반적으로 제트기류는 북태평양 고기압의 북쪽가장자리와 일치한다(Lau et al., 2000, Choi et al., 2010). 이로 인해 양의 서태평양 원격패턴 지수의 북태평양 고기압이 양의 서태평양 원격패턴 지수의 그것보다 좀 더 북동쪽에 위치하게 된다. 특히, 태풍전향은 대류권 상층제트와 직접적으로 연관되어지기 때문에 제트기류가 좀 더 북동쪽에 위치한 양의 서태평양 원격패턴 지수에 태풍들이 좀 더 북동쪽의 영역에서 전향하였음을 알 수 있다. 또한 태풍들은 대류권 상층제트의 영향을 받게 되면 연직바람시어가 증가하여 급격하게 약화되므로 대류권 상층제트가 좀 더 북쪽에 위치한 양의 서태평양 원격패턴 지수에 태풍들의 일생이 더 길수 있었음을 알 수 있다. 결국 두 서태평양 원격패턴 지수 사이에 태풍활동의 차는 제트기류의 남북 및 동서이동에서의 차와 연관됨을 알 수 있다.

한편, 앞서 양의 서태평양 원격패턴 지수에 태풍들이 음의 서태평양 원격패턴 지수에 보다 좀 더 많이 발생하는 경향이 있음이 분석되었다. 이는 두 서태평양 원격패

턴 지수 사이에 500 hPa 유선의 분석에서 살펴본 것처럼 양의 서태평양 원격패턴 지수에 아열대 서태평양에서 저기압 아노말리가 강화되었기 때문이다. 이의 원인을 좀 더 자세히 알아보기 위해 두 서태평양 원격패턴 지수 사이에 태풍의 주 발생경도대인 110° - 180° E에서 평균된 남북대기순환의 차를 분석하였다(Fig. 7). 분석영역의 저위도(10° - 30° N, 즉, 아열대 서태평양)에서는 상승기류 아노말리, 중위도(30° - 40° N)에서는 하강기류 아노말리가 강화되어 있다. 이는 500 hPa 유선에서 살펴보았듯이 양의 서태평양 원격패턴 지수에 북태평양 고기압이 좀 더 북쪽으로 발달했음을 의미하며, 이로 인해 이 서태평양 원격패턴 지수에 태풍들이 좀 더 많이 발생하기 위한 우호적인 대기환경이 형성되어 있음을 알 수 있다. 양의 서태평양 원격패턴 지수에 아열대 서태평양에서 강화된 저기압 아노말리는 이 지역에서 대류활동이 강화되어 있음을 의미한다. 이는 두 서태평양 원격패턴 지수 사이에 방출장과복사 차에서도 찾아볼 수 있다(Fig. 8a). 10° - 30° N의 아열대 서태평양에서는 음의 방출장과복사가 뚜렷

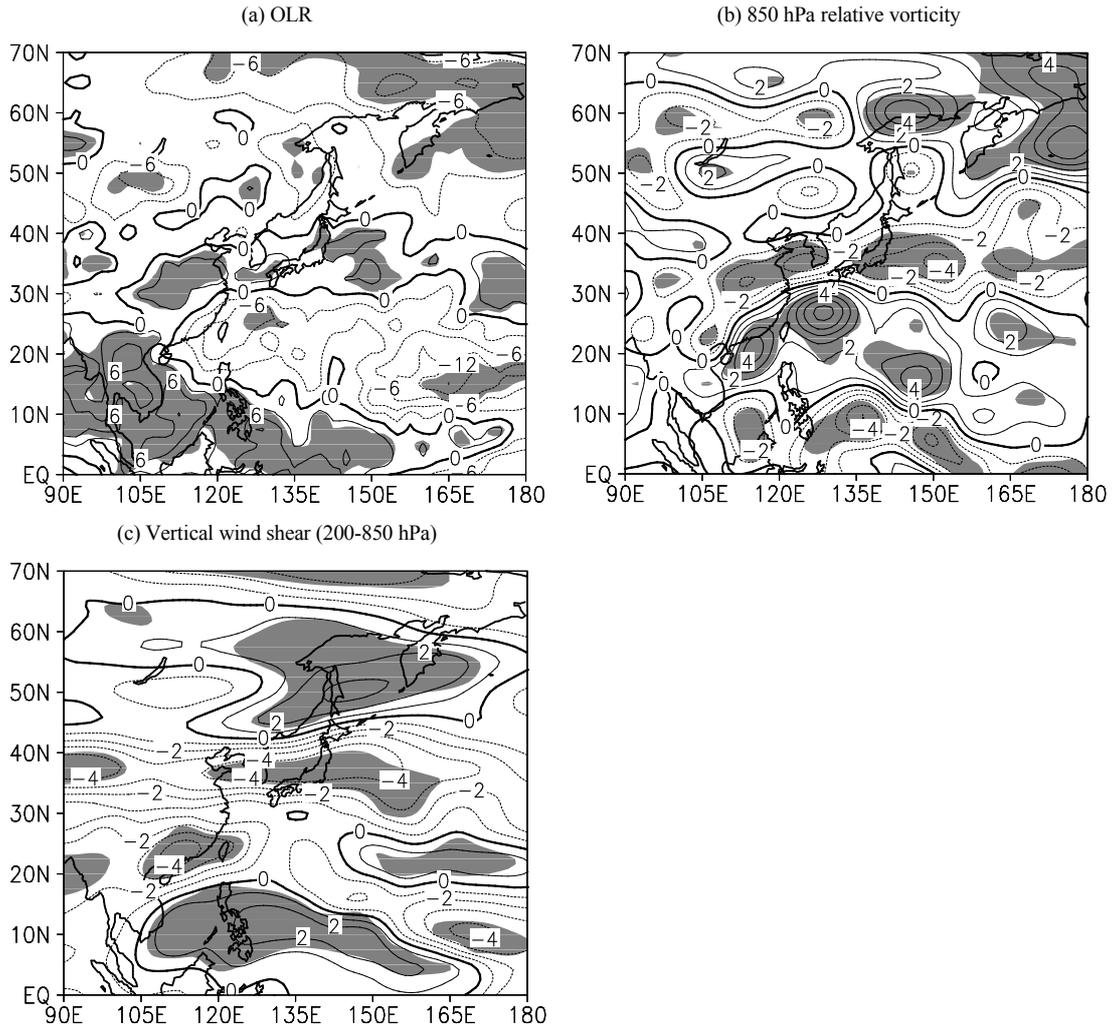


Fig. 8. Same as Fig. 6, but for (a) OLR, (b) 850 hPa relative vorticity, and (c) vertical wind shear between 200 hPa and 850 hPa levels. Shaded areas are significant at the 95% confidence level. Contour intervals are 3 $W m^{-2}$ for OLR, 1 $10^{-6} s^{-1}$, and 1 $m s^{-1}$.

하며, 30°-40°N에는 양의 장파복사가 위치해 있다. 여기서 방출장파복사 값이 작을수록 대류활동이 강화됨을 의미한다. 이는 앞서 두서태평양 원격패턴 지수 사이에 남북대기순환에서의 차의 결과와 유사하다. 이렇게 방출장파복사 분석에서 보여진 공간분포는 두서태평양 원격패턴 지수 사이에 850 hPa 상대와도 차의 공간분포와도 비슷하다(Fig. 8b). 두서태평양 원격패턴 지수 사이에 200-850 hPa 연직바람시어 차에서 15°N 남쪽 해역에서는

양의 연직바람시어가 위치해 있는 반면, 15°-40°N에는 음의 연직바람시어가 강화되어 있다. 여기서 연직바람시어 값이 적을수록 태풍의 발생 및 발달에 우호적인 대기환경이 된다. 아열대 서태평양에서의 음의 연직바람시어는 양의 서태평양 원격패턴 지수에 태풍들의 높은 발생 빈도에 대해 우호적인 대기환경의 조건이 되며, 중위도 지역에서의 음의 연직바람시어는 태풍강도의 강화에 우호적인 대기환경의 조건이 될 수 있다.

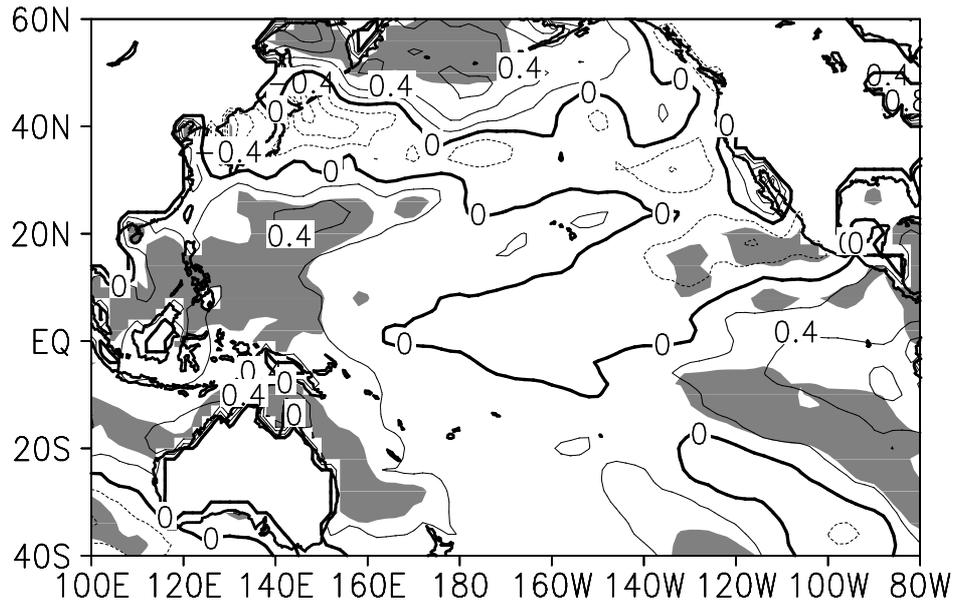


Fig. 9. Same as Fig. 6, but for sea surface temperature (SST) during summer. Shaded areas are significant at the 95% confidence level. Contour interval is 0.2°C.

태풍활동에 있어 해수면 온도의 역할도 무시할 수 없다. 따라서 이 연구는 두 서태평양 원격패턴 지수 사이에 해수면 온도의 차를 분석하였다(Fig. 9). 엘니뇨-남방진동의 영향을 제거하였음에도 불구하고 전체적으로 엘니뇨와 유사한 공간패턴을 나타낸다. 하지만 북서태평양 영역을 중심으로 살펴보면 30°N 이하의 아열대 서태평양에서는 온난 해수면 온도 아노말리를 나타낸다. 따라서 음의 서태평양 원격패턴 지수보다 양의 서태평양 원격패턴 지수에 높은 태풍발생빈도와 좀 더 강한 태풍강도를 위한 우호적인 해수면 온도 환경이 형성되어 있음을 알 수 있다. 더욱이 온난 해수면 온도 아노말리의 중심은 아열대 서태평양의 북동쪽 영역에 위치해 있다. 이는 양의 서태평양 원격패턴 지수에의 태풍들이 음의 서태평양 원격패턴 지수보다 좀 더 북동쪽의 영역에서 주로 발생하는 경향과 연관되어 있음을 알 수 있다.

4. 결론

이 연구는 7-9월동안 서태평양 원격패턴에 따른 북서태평양 태풍활동의 변화와 이의 원인이 되는 중관환경을 분석하였다. 먼저 서태평양 원격패턴 지수 증가가 큰 값

을 가지는 8개년(양의 서태평양 원격패턴 지수)와 가장 작은 값을 가지는 8개년(음의 서태평양 원격패턴 지수)를 선정하여 이들 사이의 평균 차를 분석하였다.

태풍발생에서는 양의 서태평양 원격패턴 지수에의 태풍들이 좀 더 북동쪽에서 발생하는 경향을 보였다. 태풍진로의 경우, 양의 서태평양 원격패턴 지수에의 많은 태풍들은 필리핀 북동쪽 해상으로부터 동중국해를 경유하여 한국 및 일본으로 향하는 경향이 있는 반면, 음의 서태평양 원격패턴 지수에의 태풍들은 필리핀으로부터 중국 남부지역 및 인도차이나 반도를 향해 서진하는 경향이 강했다. 이러한 차이는 태풍진행에 영향을 주어 양의 서태평양 원격패턴 지수에의 태풍들이 좀 더 북동쪽에서 전향하는 경향을 보였다. 특히, 이 서태평양 원격패턴 지수에의 태풍들은 중국내륙에서 이동함으로 인해 발생하는 지형효과에 의해 양의 서태평양 원격패턴 지수에의 태풍들보다 강도가 더 약했다. 양의 서태평양 원격패턴 지수에 강화된 이러한 태풍활동은 두 서태평양 원격패턴 지수 사이에 북태평양 고기압의 위치 차와 연관되었다. 즉, 양의 서태평양 원격패턴 지수에의 북태평양 고기압이 좀 더 북동쪽에 위치한 반면, 음의 서태평양 원격패턴

지수의 그것은 오히려 남서쪽으로 확장하였다.

두 서태평양 원격패턴 지수 사이에 이러한 태풍활동의 차를 야기하는 중관환경의 특징을 알아보기 위해 500 hPa 유선이 분석되었다. 양의 서태평양 원격패턴 지수에는 아열대 서태평양에 저기압아노말리가, 중위도 지역에서는 고기압아노말리가 강화되었다. 동아시아에서 강화된 이 두 순환들로 인해 동중국해, 한국 및 일본에는 남동풍아노말리가 강화되었으며, 이 아노말리 흐름은 태풍들이 이들 지역으로 쉽게 이동할 수 있는 지향류의 역할을 하였다. 반면, 동아시아의 남서 지역에는 북서풍아노말리가 강화되어 양의 서태평양 원격패턴 지수에 태풍들이 이들 지역으로 이동하는 것을 막는 역할을 하였다. 특히, 아열대 서태평양에 강화된 저기압아노말리는 강한 대류활동과 연관되었으며, 이로 인해 양의 서태평양 원격패턴 지수에 태풍들이 좀 더 많이 발생하였다. 더욱이 양의 서태평양 원격패턴 지수에는 북서태평양 대부분의 해역에서 온난 해수면 온도 아노말리를 나타내어 이 서태평양 원격패턴 지수의 태풍들이 좀 더 많이 발생하고 강화될 수 있는 우호적인 환경이 제공되었다.

이 연구에서는 서태평양 원격 패턴에 따른 태풍활동의 특징을 분석하는데 초점을 두었다. 차후 연구에서는 두 변수 사이의 상관관계를 통해 태풍활동의 계절예측의 가능성을 연구할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국립기상과학원 주요사업 “예보기술지원활용연구”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCE

- Camargo, S. J., Sobel, A. H., 2005, Western North Pacific tropical cyclone intensity and ENSO, *Journal of Climate*, 18, 2996-3006.
- Chan, J. C. L., 1985, Tropical cyclone activity in the northwest Pacific in relation to El Niño/Southern Oscillation phenomenon, *Monthly Weather Review*, 113, 599-606.
- Chan, J. C. L., 1995, Tropical cyclone activity in the western North Pacific in relation to the stratospheric Quasi-Biennial Oscillation, *Monthly Weather Review*, 123, 2567-2571.
- Chia, H. H., Ropelewski, C. F., 2002, The interannual variability in the genesis location of tropical cyclones in the Northwest Pacific, *Journal of Climate*, 15, 2934-2944.
- Choi, K. S., Wu, C. C., Cha, E. J., 2010, Change of tropical cyclone activity by Pacific-Japan teleconnection pattern in the western North Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 115, D19114, doi:10.1029/2010JD013866.
- Choi, K. S., Byun, H. R., 2010, Possible relationship between western North Pacific tropical cyclone activity and Arctic Oscillation, *Theoretical and Applied Climatology*, 100, 261-274.
- Elsner, J. B., Kocher, B., 2000, Global tropical cyclone activity: a link to the North Atlantic Oscillation. *Geophysical Research Letters*, 27, 129-132.
- Ho, C. H., Kim, H. S., Jeong, J. H., Son, S. W., 2009, Influence of stratospheric Quasi-Biennial Oscillation on tropical cyclone tracks in western North Pacific, *Geophysical Research Letters*, 36(L06702), doi:10.1029/2009GL037163.
- Ho, C. H., Kim, J. H., Kim, H. S., Sui, C. H., Gong, D. Y., 2005, Possible influence of the Antarctic Oscillation on tropical cyclone activity in the western North Pacific, *Journal of Geophysical Research*, 110(D19104), doi:10.1029/2005JD005766.
- Kalnay, E., Coauthors, 1996, The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 437-472.
- Kistler, R., Coauthors, 2001, The NCEP/NCAR 50-year reanalysis, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82, 247-267.
- Lander, M. A., 1994, An exploratory analysis of the relationship between tropical storm formation in the western North Pacific and ENSO, *Monthly Weather Review*, 122, 636-651.
- Larson, J., Zhou, Y., Higgins, R. W., 2005, Characteristics of landfalling tropical cyclones in the United States and Mexico: Climatology and interannual variability, *Journal of Climate*, 18, 1247-1262.
- Lau, N. C., Nath, M. J., 2000, Impact of ENSO on the variability of the Asian-Australian monsoons as simulated in GCM experiments, *Journal of Climate*, 13, 4287 - 4309.
- Liang, X. Z., Wang, W. C., 1998, Association between China monsoon rainfall and tropospheric jets,

- Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 124, 2597-2623.
- Liebmann, B., Smith, C. A., 1996, Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 1275-1277.
- Reynolds, R. W., Rayner, N. A., Smith, T. M., Stokes, D. C., Wang, W., 2002, An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *Journal of Climate* 15, 1609-1625.
- Saunders, M. A., Chandler, R. E., Merchant, C. J., Roberts, F. P., 2000, Atlantic hurricanes and NW Pacific typhoons: ENSO spatial impacts on occurrence and landfall, *Geophysical Research Letters*, 27, 1147-1150.
- Wallace, J. M., Gutzler, D. S., 1981, Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere, *Monthly Weather Review*, 109, 784-812.
- Wang, B., Chan, J. C. L., 2002, How strong ENSO events affect tropical storm activity over the western North Pacific. *Journal of Climate*, 15(13), 1643-1658.
- Wang, H. J., Fan, K., 2007, Relationship between the Antarctic Oscillation in the western North Pacific typhoon frequency. *Chinese Science Bulletin*, 52, 561-565.
- Wang, H. J., Sun, J. Q., Ke, F., 2007, Relationships between the North Pacific Oscillation and the typhoon/hurricane frequencies, *Science in China Series D: Earth Sciences*, 50, 1409-1416.
- Wilks, D. S., 1995, *Statistical methods in the atmospheric sciences*, Academic Press, 467 pp
- Xie, L., Yan, T., Pietrafesa, L. J., 2005, Climatology and interannual variability of North Atlantic hurricane tracks, *Journal of Climate*, 18, 5370-5381.