

ORIGINAL ARTICLE

여름철 일본에 영향을 주는 태풍빈도의 감소추세

최재원* · 박기준 · 이경미 · 김정윤 · 김백조

국립기상연구소 정책연구과

Deceasing Trend of Summertime TC Frequency in Japan

Choi Jae-Won*, Ki-Jun Park, Kyungmi Lee, Jeoung-Yun Kim, Baek-Jo Kim

Policy Research Department, National Institute of Meteorological Research, Jeju 697-845, Korea

Abstract

This study analyzed the climate regime shift using statistical change-point analysis on the time-series tropical cyclone (TC) frequency that affected Japan in July to September. The result showed that there was a significant change in 1995 and since then, it showed a trend of rapidly decreasing frequency. To determine the reason for this, differences between 1995 to 2012 (9512) period and 1978 to 1994 (7894) period were analyzed.

First, regarding TC genesis, TCs during the 9512 period showed a characteristic of genesis from the southeast quadrant of the tropical and subtropical western North Pacific and TCs during the 7894 period showed their genesis from the northwest quadrant. Regarding a TC track, TCs in the 7894 period had a strong trend of moving from the far east sea of the Philippines via the East China Sea to the mid-latitude region in East Asia while TCs in the 9512 period showed a trend of moving from the Philippines toward the southern part of China westward. Thus, TC intensity in the 7894 period, which can absorb sufficient energy from the sea as they moved a long distance over the sea, was stronger than that of 9512.

Large-scale environments were analyzed to determine the cause of such difference in TC activity occurred between two periods. During the 9512 period, anomalous cold and dry anticyclones were developed strongly in the East Asia continent. As a result, Korea and Japan were affected by the anomalous northerlies thereby preventing TCs in this period from moving toward the mid-latitude region in East Asia. Instead, anomalous easterlies (anomalous trade wind) were developed in the tropical western Pacific so that a high passage frequency from the Philippine to the south China region along the anomalous steering flows was revealed. The characteristics of the anomalous cold and dry anticyclone developed in the East Asia continent were also confirmed by the analysis of air temperature, relative humidity and sensible heat net flux showing that most regions in East Asia had negative values.

Key words : Climate regime shift, Change-point analysis, Tropical cyclone

1. 서론

태풍빈도의 경년변동에 대해 축적된 연구에 비하여 십년간 변동에 대한 연구는 많지 않다. Gray(1994)는 매

년 태풍발생빈도가 하부성층권에서의 동서류의 서풍위상동안 강화되는 경향이 있음을 제시하였다(Sheaffer, 1993; Knaff, 1993). Zhang et al. (1994)은 비록 물리적 메커니즘을 밝히지는 못했지만, 태풍발생빈도는 6,

Received 23 January, 2015; Revised 2 February, 2015;

Accepted 25 February, 2015

*Corresponding author: Choi Jae-Won, Policy Research Department, National Institute of Meteorological Research, Jeju 697-845, 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.

15, 21 및 31년의 주기성이 있음을 발견하였다. 그들은 역시 1931, 1959, 1977년에 태풍발생빈도에서 큰 변화가 있었음을 보였다. Chan and Shi(1996)는 2차 다항 회귀방정식을 이용하여 전체적으로는 1990년대 초 이후 태풍발생빈도가 증가하고 있음을 확인하였다. 하지만 그들은 이러한 증가추세가 2000년대 이후 다시 감소추세로 역전되고 있음을 강조하였다. Yumoto and Matsuura(2001)는 최근 49년(1951-1999)의 기간을 태풍발생빈도를 기준으로 두 개의 높은 빈도 기간(1961-1972, 1986-1994)과 두 개의 낮은 빈도 기간(1951-1960, 1973-1985)으로 나뉠 수 있음을 보였다. 게다가 Matsuura et al.(2003)은 고해상도 전구모델을 이용하여 최근 50년을 장기 모의한 결과 이러한 태풍발생빈도의 십년간 변동을 지구온난화와와의 관계로서 설명하였다. 또한 Chan(2005)은 열대 및 아열대 서태평양에서 태풍발생빈도의 십년간 변동은 엘니뇨-남방진동(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)이나 준2년진동(Quasi-Biennial Oscillation, QBO) 등과 같은 열대진동 현상으로부터 그 메커니즘의 설명이 어느 정도 가능하나, 북태평양 고기압의 위치, 강도 및 확장 정도의 다변성 때문에 태풍이동 및 태풍강도의 십년간 변동은 좀 더 깊은 연구가 이루어져야 함을 제안하였다. Chia and Ropelewski(2002)는 역시 엘니뇨-남방진동이 태풍의 계절예측을 위한 중요한 예측인자이지만, 유일한 변수가 아님을 제안하였다.

태풍발생 및 태풍활동에 대해 한국의 여러 연구자들에 의해서도 이루어졌다. 대표적인 연구들로서 Kim et al.(2005)는 열대 및 아열대 서태평양에서의 태풍발생빈도에 대한 경험적 직교함수 분석을 통해 동아시아 지역에서 태풍의 주 이동패턴은 쌍극자 구조가 강함을 보인다. Kwon et al.(2007)과 Cha et al.(2009)은 노말라이즈드 태풍활동(Normalized Typhoon Activity, NTA)을 이용하여 1951년부터 2008년까지 58년간 열대 및 아열대 서태평양의 태풍의 활동정도를 분석하였다. 태풍활동도 역시 태풍발생빈도와 같이 경년변동 뿐만 아니라 강한 십년간 변동을 잘 반영함을 보인다. Choi et al.(2010a)는 한국 상륙 태풍의 경년변동 분석을 통해 Yumoto and Matsuura(2001)와 같이 두 개의 높은 빈도 기간(1951-1965, 1986-2004)과 하나의 낮은 빈도 기간(1966-1985)이 존재함을 보였다. 한편 열대 및 아열대 서태평양에서의 태풍발생 및 태풍이동의 특성은 북극진

동(Arctic Oscillation, AO), 남극진동(Antarctic Oscillation, AAO), 북태평양 진동(North Pacific Oscillation, NPO) 등과 같이 다양한 기후인자와 깊은 연관성이 있음이 분석되기도 하였다 (Ho et al. 2005; Choi et al. 2010b).

하지만 일본에 영향을 주는 태풍빈도의 변화에 대한 연구는 드물다. 따라서 본 연구는 일본에서 태풍이동빈도의 십년간 변동 분석에 초점을 둔다. 북서태평양에서 전향한 태풍들의 대부분은 일본을 통과하는 특징이 있다. 또한 열대 및 아열대 서태평양에서 태풍의 십년간 변동과 관련되는 위 대부분의 연구들은 태풍발생빈도에 초점을 두고 있지만, 본 연구는 여름(7-9월)에 일본을 통과하는 태풍의 십년간 변동을 조사하고 그 원인이 되는 중관 환경의 특징을 살펴보고자 한다.

2장에서는 자료 및 분석방법이 소개되고, 3장에서는 일본에 영향을 주는 태풍빈도의 월 변동성이 조사된다. 4장에서는 일본을 통과하는 태풍발생빈도에 대한 십년간 변동을 분석한다. 5장에서는 일본을 통과하는 태풍발생 빈도뿐만 아니라 다양한 태풍활동의 변동성과 함께 이 변동성의 원인이 되는 대기순환의 특징을 살펴본다. 이 연구는 6장에서 요약된다.

2. 자료 및 분석방법

2.1. 자료

태풍 자료는 지역특별기상센터-동경태풍센터에서 제공하는 태풍의 최적경로 자료로부터 얻어졌다. 이 자료는 1978-2012년(35년)동안 매 6시간 간격으로 관측된 태풍 이름, 위경도 위치, 중심기압, 중심최대풍속의 정보로 구성된다. 태풍은 일반적으로 중심최대풍속을 기준으로 네 등급으로 나뉘어진다: 열대저압부(Tropical Depression, TD, 중심최대풍속 < 17ms⁻¹), 열대폭풍(Tropical Storm, TS, 17 m s⁻¹ ≤ 중심최대풍속 ≤ 24 m s⁻¹), 강한 열대폭풍(Severe Tropical Storm, STS, 25 m s⁻¹ ≤ 중심최대풍속 ≤ 32 m s⁻¹), 태풍(Typhoon, TY, 중심최대풍속 ≥ 33 m s⁻¹). 위의 네 등급에 더하여 이 연구에서는 태풍으로부터 변형된 온대성 저기압도 분석에 포함시켰다. 이는 이러한 온대성 저기압도 동아시아 중위도 지역에서 많은 재산과 인명피해를 입히기 때문이다.

한편 이 연구는 1978-2012년 동안의 미국 국립환경

예측센터-국립대기연구센터(National Centers for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research, NCEP-NCAR)에서 제공하는 재분석 자료의 지위고도(gpm), 기온(℃), 상대습도(%), 동서 및 남북류(m s⁻¹)의 변수를 사용하였다(Kalnay et al., 1996; Kistler et al., 2001), 이 NCEP-NCAR 재분석 자료는 위경도 2.5°×2.5° 및 17개의 연직층(상대습도는 16 연직층)과 같은 공간해상도로 이루어져 있다. 또한 현열(Wm²)가 사용되었는데, 이 자료는 단층으로 된 가우시안 격자의 공간구조를 가지고 있다.

2.2. 분석방법

이 연구에서 일본 영향 태풍은 30°-40°N, 130°-145°E의 영역을 경유하는 태풍으로서 정의된다(Fig. 1).

태풍 이동빈도를 계산하기 위해서 각 태풍은 5°×5° 격자내에 위치시킨 후 계산되었으며, 태풍이 같은 격자내에 여러 번 이동하여도 한번 이동한 것으로 간주하였다. 태풍의 발생빈도 역시 이와 같은 방법으로 계산되었다.

두 평균 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).

3. 월 변동

Figure 2.는 최근 35년(1978-2012년) 동안 평균된 일본에 영향을 준 매월의 태풍빈도를 나타낸다. 일본은 1년 동안 평균적으로 약 8개의 태풍의 영향을 받는다. 1-3월 동안에는 태풍의 영향이 없다가 4-12월 동안에 대부분의 태풍들이 영향을 준다. 하지만 1년 전체 중 약 70%에 가까운 빈도가 7-9월에 집중되어 있다. 따라서 이 연구는 7-9월 동안 일본에 영향을 준 태풍들에 초점을 두고 연구

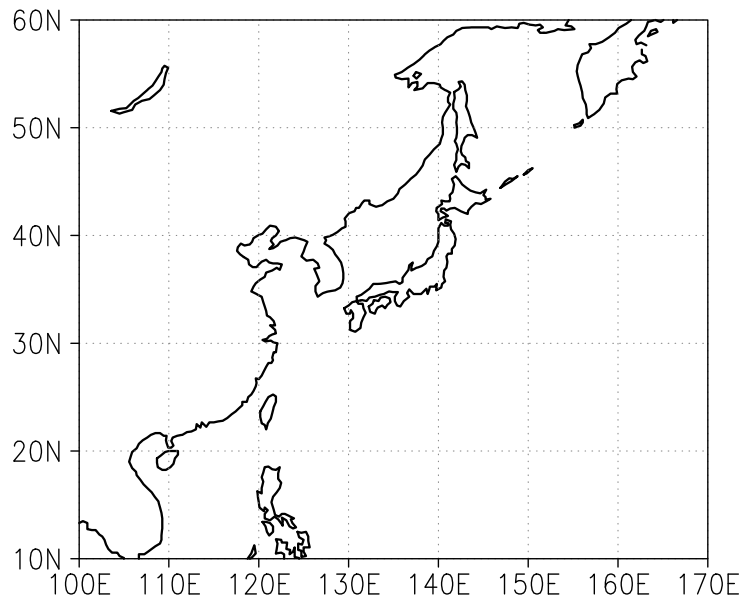


Fig. 1. Area (30°-40°N, 130°-145°E) of Japan defined in this study. TCs that passed through this area are defined as those that affected Japan.

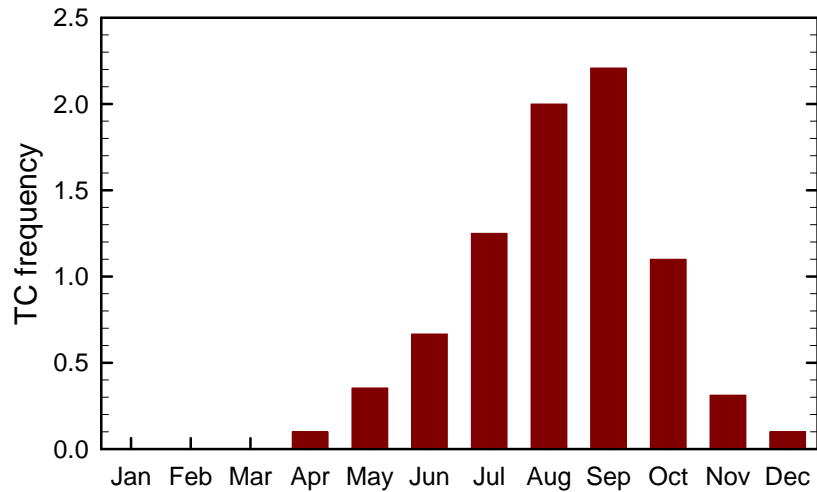


Fig. 2. Monthly rate of the frequency of TC that affected Japan to total frequency.

를 진행한다. 10월 역시 높은 영향빈도를 나타내지만 북반구 중위도에서 10월은 완전한 가을철에 속하기 때문에 이 연구에서 제외하였다.

4. 일본에 영향을 준 태풍빈도에 대한 통계적 시점 변화 분석

이 연구에서는 최근 35년(1978-2012년) 동안 7-9월에 일본에 영향을 준 태풍빈도의 시계열을 분석하였다(Fig. 3a). 최근 35년 동안 꾸준히 감소하는 추세를 나타내고 있다. 이러한 추세변화에서 기후레짐이동이 존재하는지 알아보기 위하여 35년 동안의 시계열에서 통계적 시점변화 분석이 수행되었다. 통계적 시점변화 분석에 대한 자세한 사항은 Elsner et al. (2000), Chu (2002), and Ho et al. (2004)의 연구를 참고하기 바란다. 통계적 시점변화 분석을 수행하게 되면 매년마다 t-value가 산출되는데 이 t-value의 절대값이 큰 해에 기후레짐이동이 존재한다는 것을 의미하게 된다. 본 연구에서는 1995년에 기후레짐이동이 존재하였다. 따라서 이 연구는 총 35년의 분석 기간을 1978-1994년(7894)과 1995-2012년(9512)로 나누어 분석하였다. 7894기간 동안 태풍의 평균 영향 빈도는 6.2개인 반면 9512의 기간에는 평균적으로 4.6개가 영향을 줌으로서 두 기간 사이에는 약 1.5개의 차가 난다. 이러한 차는 95% 신뢰수준에서 유효하

다. 또한 35년 평균 7-9월 동안에 일본에 영향을 주는 태풍빈도는 5.5개로서 7894기간 동안의 평균 태풍빈도와 0.7개, 9512기간 동안의 평균 태풍빈도와는 0.9개의 차를 나타내며, 이 모든 차의 값은 90% 신뢰수준에서 유효하다.

35년 동안의 7-9월에 일본에 영향을 준 태풍이동의 시계열에서 1995년의 기후레짐이동의 존재는 5년 이동 평균에 대한 시계열에서도 나타난다(Fig. 3b). 전체적으로 영향 빈도는 꾸준히 감소하는 추세를 나타낸다. 한편 1978-1995년 동안에는 35년 평균 태풍빈도보다 높은 빈도를 나타내는 반면, 1996년 이후에는 낮은 빈도를 나타냄으로써 1995년을 기점으로 기후레짐이동이 존재함을 다시 한번 더 알 수 있다.

이후의 분석에서는 9512기간과 7894 기간 사이에 태풍활동에서 어떠한 차이가 있고, 이 차이를 유발하는 중규모 대기순환의 특징을 알아보기 위해 9512의 기간과 7894기간 사이에 차가 분석된다.

5. 9512기간과 7894기간의 차

5.1. 태풍활동

본 연구는 두 기간 사이에 태풍활동 중 먼저 태풍이동 빈도에 대한 차를 분석하였다(Fig. 4a). 전체적으로, 9512기간에는 열대 및 아열대 서태평양의 남동사분면에

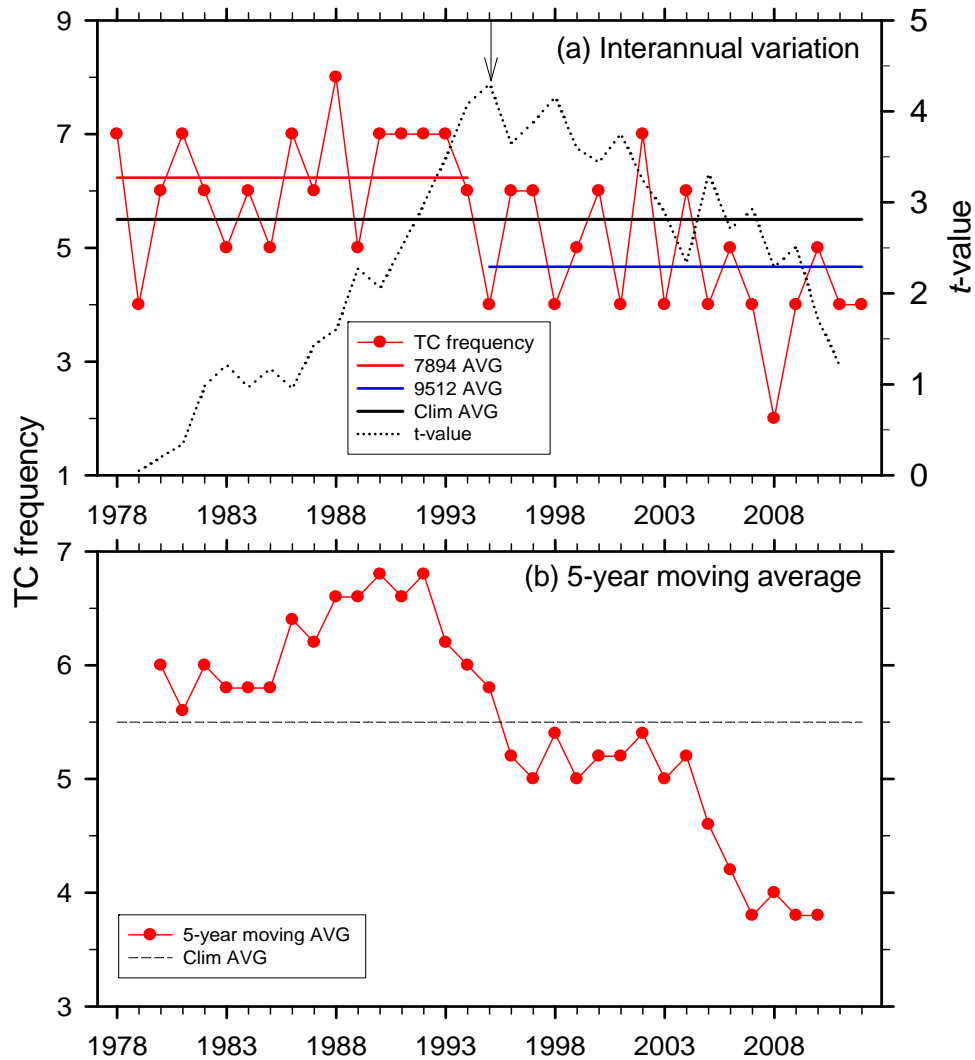


Fig. 3. (a) Interannual variation of the frequency of TC that affected Japan (solid red line with a dot) and the result of climate regime shift (dotted line) and (b) 5-year moving average variation of the frequency of TC that affected Japan.

서, 7894기간에는 북서사분면에서 태풍들이 주로 발생하는 경향을 나타낸다. 이를 좀 더 구체적으로 알아보기 위해 각 기간의 평균 태풍발생위치를 분석하였다. 7894기간에는 16.8°N, 135.1°E, 9512기간에는 14.9°N, 144.5°E에서 발생하여 9512(7894)의 기간에 TCs이 열대 및 아열대 서태평양의 남동사분면 (북서사분면)에서 발생하는 경향이 강함을 알 수 있다. 여기서 두 기간 사이

에 평균 발생 위도 및 경도차는 95% 신뢰수준에서 유효하다.

다음으로는 두 기간 사이에 태풍이동빈도를 분석하였다(Fig. 4b). 전체적으로, 7894기간에 태풍들은 필리핀 먼 동쪽해상으로부터 동중국해를 지나 한국 및 일본 등의 동아시아 중위도 지역에 영향을 주는 반면, 9512기간에 태풍들은 필리핀으로부터 남중국해를 지나 중국 남부

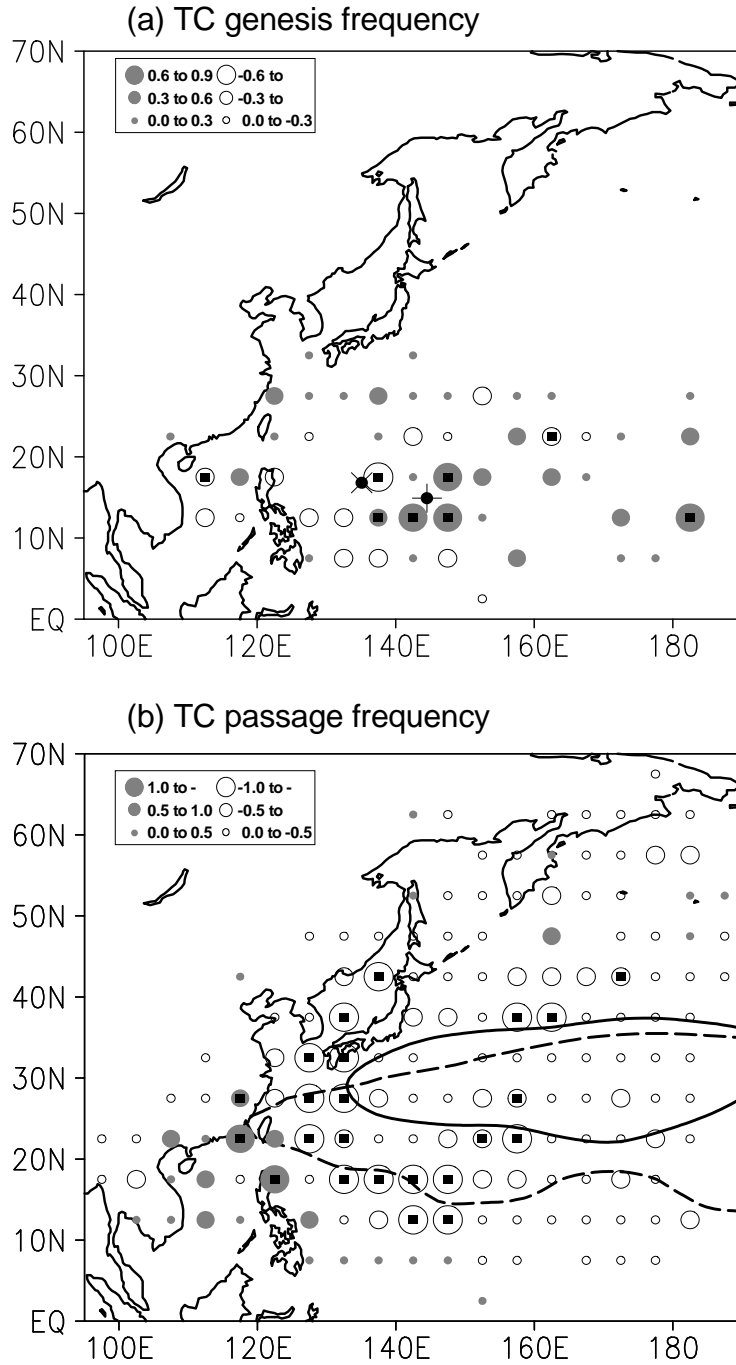


Fig. 4. The differences in (a) TC genesis frequency and (b) TC passage frequency between 9512 and 7894. In (a), closed circles with cross and multiplication marks genesis locations of TCs during 9512 and 7894, respectively. Small squares inside the circles indicate that the differences are significant at the 95 % confidence level.

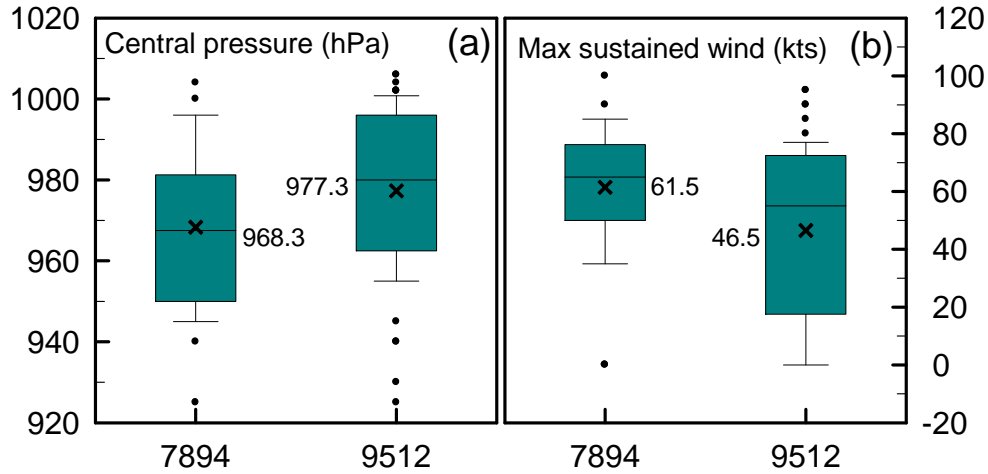


Fig. 5. (a) Central pressure and (b) MSWS of TC-JAs during 7894 and 9512. The boxes show the 25th and 75th percentiles, the lines in the boxes mark the median and the circles indicate the values below (above) the 25th (75th) percentiles of the distributions. The numbers to the left and right inside the figure represent averages (cross marks) for 7894 and 9512, respectively.

지역을 향해 서쪽으로 이동하는 경향이 강하다. 이러한 두 기간 사이에 태풍이동빈도의 차로 인해 남동 아시아와 북동아시아 사이에 태풍이동빈도에서 쌍극자 패턴이 나타남을 볼 수 있다.

위에서 분석되었듯이, 두 기간 사이에 태풍발생빈도 및 태풍이동빈도의 차가 태풍강도에 영향을 주는지 알아 보기 위하여 두 기간에 대해 태풍 중심기압과 태풍 중심 최대풍속을 분석하였다(Fig. 5). 여기서 태풍 중심기압과 태풍 중심최대풍속은 태풍들이 일본지역(30°-40°N, 130°-145°E)에 가장 근접했을 때의 값을 나타낸다. 먼저 태풍 중심기압에서는 7894기간 동안의 태풍 중심기압이 9512기간 동안의 태풍 중심기압보다 약 10 hPa 낮다(Fig. 5a). 이는 7894기간 동안의 태풍강도가 더 강했다는 것을 의미한다. 두 기간 사이에 태풍 중심기압의 차는 95% 신뢰수준에서 유효하다. 한편 태풍 중심최대풍속에서는 7894 기간 동안의 태풍 중심최대풍속이 9512 기간 동안의 태풍 중심최대풍속보다 약 15kts 정도 높다. 이는 역시 7894기간 동안의 태풍강도가 더 강했다는 것을 의미한다. 두 기간 사이에 태풍 중심최대풍속의 차는 95% 신뢰수준에서 유효하다. 즉 9512기간 동안의 태풍들보다 7894기간 동안의 태풍들이 더 강했음을 알 수 있다. 이렇게 7894기간 동안의 태풍들이 9512 기간 동안의 태

풍들보다 강했던 이유를 살펴보면 7894기간 동안의 태풍들은 필리핀 먼 동쪽해상으로부터 동중국해를 지나 동아시아 중위도 지역을 향해 먼 거리를 이동하는 동안 바다로부터 충분한 에너지를 얻을 수 있었던 반면, 9512기간 동안에는 필리핀으로부터 중국 남부지역을 향해 짧은 거리를 이동함으로써 태풍들이 강해질 수 있는 시간이 상대적으로 짧았으며, 중국 남부지역에 상륙한 후 태풍들은 급격히 약해지거나 소멸하였기 때문이었다.

5.2. 종관규모 대기순환

두 기간 사이에 이러한 태풍활동의 차를 야기하는 이유를 알아보기 위하여 종관규모 대기순환에 대한 차를 분석하였다. 먼저 두 기간 사이에 500 hPa 유선에 대한 차에서는 동아시아 대륙에 고기압순환 아노말리가 강화되어 있다(Fig. 6a). 이 순환 아노말리로부터 일본 및 한국 지역은 북풍 아노말리의 영향을 받고 있다. 따라서 9512의 기간에 열대 및 아열대 서태평양에서 발생한 태풍들이 동아시아 지역으로 이동한다고 하더라도 북풍 아노말리에 의해 일본 및 한국지역으로 이동하는 것이 저지됨으로써 이 기간에 태풍들의 일본 영향 빈도가 낮아질 수 밖에 없는 대기환경임을 알 수 있다. 대신 열대 서태평양에서 동풍 아노말리 (무역풍 아노말리)가 중국

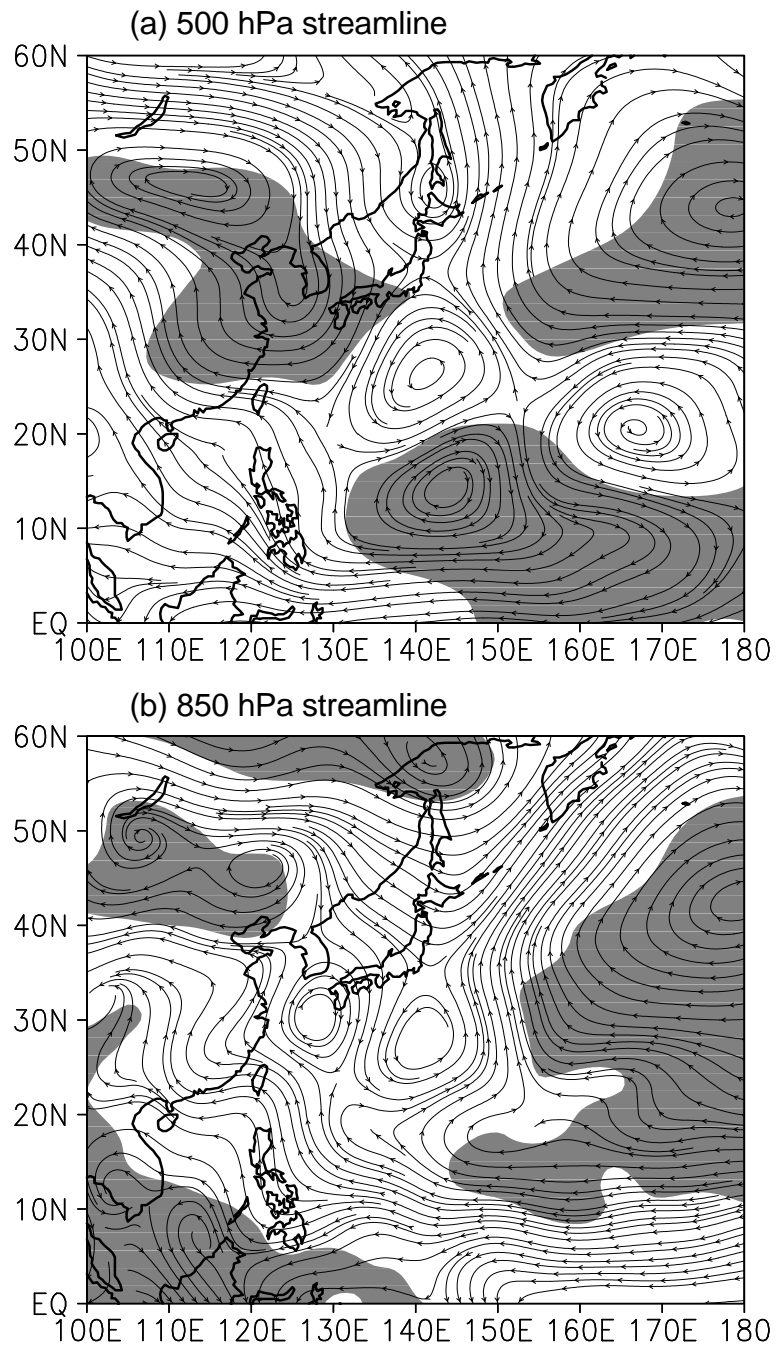


Fig. 6. Differences in (a) 500 hPa streamline and (b) 850 hPa streamline between 9512 and 7894. The shaded areas are significant at the 95% confidence level.

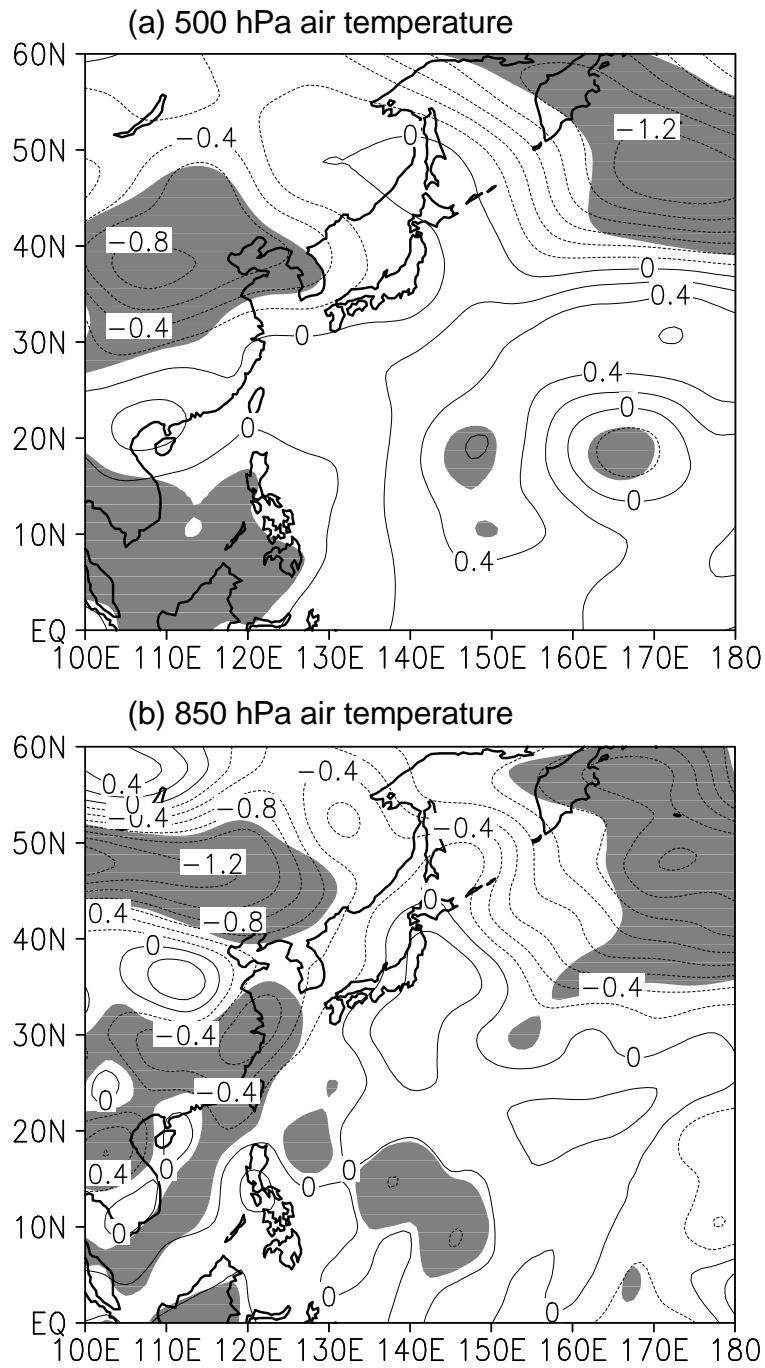


Fig. 7. Same as in Fig. 6, but for air temperature. Contour interval is 0.2°C . Shaded areas are significant at the 95% confidence level.

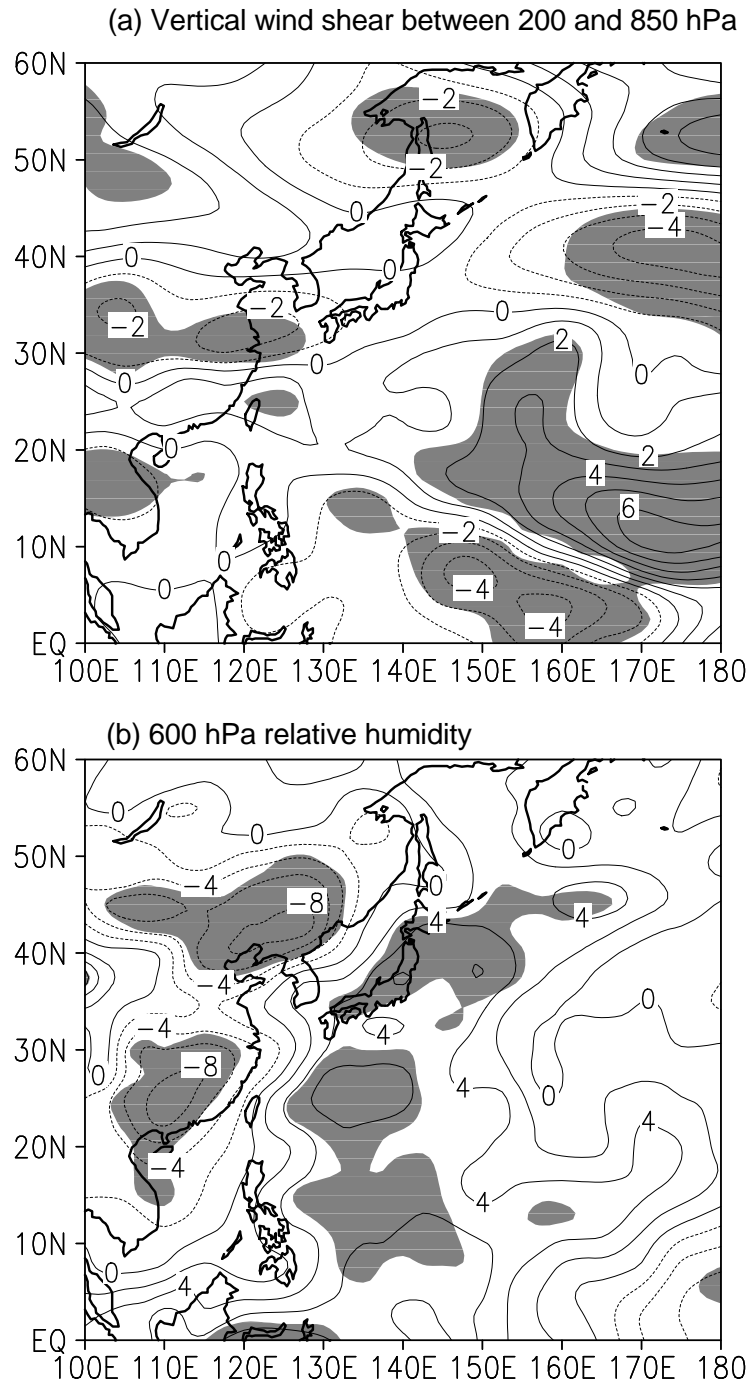


Fig. 8. Same as in Fig. 6, but for (a) vertical wind shear between 200 and 850 hPa and (b) 600 hPa relative humidity. Contour intervals are 1ms-1 for (a) and 2% for (b). Shaded areas are significant at the 95% confidence level.

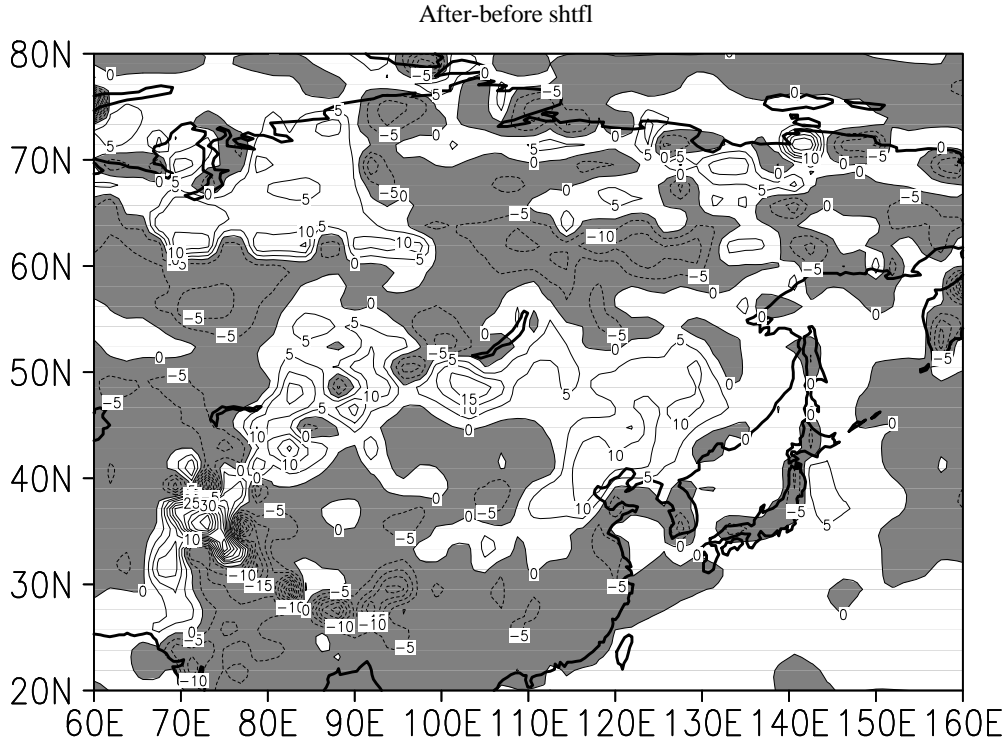


Fig. 9. Same as in Fig. 6, but for sensible heat net flux (SHTFL). Contour interval is 5 Wm^{-2} . Shaded areas denote negative values.

남부지역으로 향하고 있어 이 지향류 아노말리에 의해 9512기간에 태풍들은 이 지역으로 쉽게 이동할 수 있다.

한편, 동아시아 대륙에 강화되어 있는 고기압 순환 아노말리는 9512 기간의 북태평양 고기압이 동아시아 중위도 지역까지 발달하지 못했음을 의미한다. 따라서 이를 알아보기 위해 두 기간에 대한 북태평양 고기압의 발달 정도를 살펴보았다(Fig. 4b). 여기서 북태평양 고기압은 5875gpm보다 큰 값을 갖는 영역으로 정의된다. 그림에서 볼 수 있듯이, 9512 기간 동안의 북태평양 고기압은 동아시아 중위도 지역까지 발달하지 못한 대신 중국 남부지역까지 서쪽으로 길게 뻗어 있다(대시선). 반면, 7894기간 동안의 북태평양 고기압은 서쪽으로 길게 확장하지는 못했지만 동아시아 중위도 지역까지 발달해 있다(실선). 본래 태풍은 북태평양 고기압의 서쪽 연변을 따라 이동하는 특징을 가지고 있다. 따라서 각 기간의 북태평양 고기압의 서쪽으로의 발달 정도와 태풍의 주 이

동경로가 거의 일치함을 알 수 있다.

두 기간 사이에 850 hPa 유선에 대한 차의 분석결과와 500 hPa 유선의 분석결과와 유사하다(Fig. 6b). 동아시아 대륙에 위치해 있는 고기압 순환 아노말리로부터의 북풍 아노말리가 한국 및 일본 지역으로 영향을 주고 있어 열대 및 아열대 서태평양에서 발생한 태풍들이 동아시아 중위도 지역으로 북상하기 어려운 환경임을 나타낸다. 반면 열대 서태평양에서 동풍 아노말리(무역풍 아노말리)가 중국 남부지역을 향하고 있어 이 지향류 아노말리에 의해 9512 기간 동안의 태풍들은 이 지역으로 쉽게 이동할 수 있음을 알 수 있다. 또한 북태평양 고기압 아노말리가 동아시아 중위도 지역으로 확장하지 못하고 10°-20°N에 위치해 있음을 볼 수 있다.

한편 500 hPa 기온에 대해 두 기간 사이에 차를 분석하였다(Fig. 7a). 고기압 순환 아노말리가 강화되어 있던 동아시아 대륙에는 음의 아노말리가 뚜렷하다. 이는 앞

서 살펴보았듯이, 이 고기압 순환 아노말리로부터 불어 나오는 찬 북풍 아노말리 때문이다. 850 hPa 기온에 대한 두 기간 사이의 차의 분석결과 역시 500 hPa 기온에 대한 두 기간 사이의 차의 분석결과와 유사하다(Fig. 7b). 동아시아 대부분의 지역에서 음의 아노말리를 나타낸다. 따라서 9512기간 동안에는 동아시아 대륙에 강화되어 있는 찬 공기의 아노말리에 의해 북태평양 고기압이 동아시아 중위도 지역으로 발달하지 못하고, 대신 중국 남부지역을 향해 서쪽으로 발달하면서 태풍들이 중국 남부지역을 향해 서쪽으로 이동하는 경향을 나타내게 된다. 또한 태풍들이 동아시아 중위도 지역으로 북상하더라도 그 지역에 형성되어 있는 찬 공기의 아노말리에 의해 약해지거나 소멸됨으로써 9512 기간 동안의 태풍강도가 더 약해지게 된다.

이번에는 200-850 hPa 연직바람시어에 대해 두 기간 사이에 차를 분석하였다(Fig. 8a). 여기서 연직바람시어의 값이 낮을수록 태풍의 발생 및 강화에 우호적인 환경을 나타낸다. 먼저 열대 서태평양의 남동사분면에는 음의 값이, 북서사분면에는 양의 값이 형성되어 있다. 따라서 앞서 살펴보았듯이 9512(7894)기간 동안의 태풍들이 열대 서태평양의 남동사분면(북서사분면)에서 더 형성되기 쉬운 대기환경이 발달되어 있음을 알 수 있다. 한편 10°-30°N의 지역에서는 양의 값이 형성되어 있는데, 9512기간 동안에 열대 및 아열대 서태평양에서 발생한 태풍들이 이와 같은 높은 연직바람시어 지역을 통과함으로써 인해서 태풍활동이 급격하게 약화될 수 있는 환경이 형성되어 있음을 볼 수 있다.

600 hPa 상대습도에 대해 두 기간 사이에 차이가 분석되었다(Fig. 8b). 찬 고기압 아노말리가 위치해 있던 동아시아 대륙에 음의 아노말리가 강하게 형성되어 있다. 따라서 9512기간 동안 열대 및 아열대 서태평양에서 발생한 태풍들이 이러한 차고 건조한 고기압 아노말리로 인해 동아시아 중위도 지역으로 이동하는 것이 저지되었으며, 태풍강도를 더욱 약화시켰음을 알 수 있다.

실제로 9512 기간 동안 일본으로 향하는 태풍의 빈도를 줄이고 강도를 약하게 했던 차고 건조한 고기압 아노말리가 존재하였는지를 알아보기 위해 7-9월 동안 현열에 대해 두 기간 사이에 차가 분석되었다(Fig. 9). 그림에서 볼 수 있듯이, 동아시아 대륙 대부분의 지역에서는 음의 값을 나타내고 있다. 이는 9512기간 동안에 차고 건

조한 고기압 아노말리가 더욱 발달하였을 가능성이 높음을 의미한다. 따라서 이 고기압 아노말리에 의해 일본에 영향을 주는 태풍의 빈도가 낮아질 수 있었으며, 태풍강도 또한 약해질 수 있었음을 알 수 있다.

6. 요약 및 결론

이 연구는 7-9월 동안 일본에 영향을 주는 태풍 빈도의 시계열에서 기후레짐이동이 존재하는지 알아보기 위해 통계적 시점변화 분석이 수행되었다. 그 결과 7-9월 동안 일본에 영향을 주는 태풍빈도에서 1995년에 큰 변화가 존재하였으며, 1995년 이후 그 빈도가 급격히 감소되었다. 이후 1995-2012년(9512)와 1978-1994년(7894) 기간 사이에 차가 분석되었다.

먼저 태풍발생에서, 9512기간 동안에 태풍들은 열대 및 아열대 서태평양의 남동사분면에서, 7894기간 동안에는 북서사분면에서 발생하는 특징을 나타내었다. 태풍진로에서 7894기간 동안에 태풍들은 필리핀 동쪽 먼 해상으로부터 동중국해를 지나 일본 및 한국과 같이 동아시아 중위도 지역으로 향하는 경향이 강한 반면, 9512기간 동안에는 필리핀으로부터 중국 남부지역을 향해 서쪽으로 이동하는 경향이 강했다. 따라서 바다위에서 먼 거리를 이동하면서 에너지를 충분히 얻을 수 있는 7894기간 동안의 태풍강도가 9512 기간 동안보다 더 강했다.

두 기간 사이에 발생하는 이러한 태풍강도 차의 원인을 알아보기 위해 종관규모 대기순환에 대해 분석하였다. 9512기간 동안에는 동아시아 대륙에 차고 건조한 고기압 아노말리가 강하게 발달하였고 이로 인해 한국 및 일본지역은 북풍 아노말리의 영향을 받아 이 기간 동안 태풍들이 동아시아 중위도 지역으로 이동하지 못하였다. 대신 열대 서태평양에서 동풍 아노말리(무역풍 아노말리)가 발달하여 이 지향류 아노말리를 따라서 필리핀으로부터 남중국 지역으로 태풍들의 높은 이동 빈도를 나타내었다. 동아시아 대륙에 발달한 차고 건조한 고기압 아노말리의 특징은 기온, 상대습도 및 현열의 분석에서 동아시아 대륙의 대부분의 지역에서 음의 값을 나타냄으로써 확인되었다. 이러한 동아시아 대륙에 발달한 차고 건조한 고기압 아노말리로 인해 9512기간 동안의 태풍들은 급격하게 약화되거나 소멸되어 7894기간 동안의 태풍들보다 더 약한 강도를 나타내었다. 9512 기간 동안

의 더 약한 태풍강도는 200-850 hPa 연직바람시어에 대한 두 기간 사이에 차의 분석에서도 확인되었다. 열대 및 아열대 서태평양의 대부분의 지역에서 양의 값을 나타냄으로써 태풍들이 동아시아 중위도로 이동하는 동안 이러한 대기환경으로 인해 쉽게 약화될 수 있었다.

이 연구는 최근 35년 동안 일본에 영향을 준 태풍빈도에서 십년간 변동을 분석하였다. 차후연구에서는 이러한 변화를 이용하여 태풍의 일본 영향 빈도를 예측할 수 있는 통계적 계절 예측 모델을 구축할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 국립기상연구소 주요사업 “예보기술지원활용연구”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCE

- E. J., Cha, H. S., Hwang, K. J., Yang, S. H., Won, S. W., Ko, D. H., Kim, H. J., Kwon, 2009, Characteristics of tropical cyclones over the western North Pacific in 2008. *Atmosphere*, Vol.19, 183-198.
- J. C. L., Chan, 2005, Interannual and interdecadal variations of tropical cyclone activity over the western North Pacific. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. 89, 143-152.
- J. C. L., Chan, J. E., Shi, 1996, Long-term trends and interannual variability in tropical cyclone activity over the western North Pacific. *Geophysical Research Letters*, Vol.23, 2765-2767.
- H. H., Chia, C. F., Ropelewski, 2002, The interannual variability in the genesis location of tropical cyclones in the Northwest Pacific. *Journal of Climate*, Vol.15, 2934-2944.
- K. S., Choi, B. J., Kim, D. W., Kim, H. R. Byun, 2010a, Interdecadal variations of tropical cyclone making landfall over the Korean Peninsula. *International Journal of Climatology*, Vol.30, 1472-1483.
- K. S., Choi, H. R., Byun, 2010b, Possible relationship between western North Pacific tropical cyclone activity and Arctic Oscillation. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol.100, DOI: 10.1007/s00704-009-0187-9, 261-274
- P. S., Chu, 2002, Large-scale circulation features associated with decadal variations of tropical cyclone activity over the central North Pacific. *Journal of Climate*, Vol.15, 2678 - 2689.
- J. B., Elsner, T. Jagger, X. F. Niu, 2000, Changes in the rates of North Atlantic major hurricane activity during the 20th century. *Geophysical Research Letters*, Vol. 27, 1743 - 1746.
- W. M. Gray, C. W., Landsea, W. M., Paul, K. J., Berry, 1994, Predicting Atlantic basin seasonal tropical cyclone activity by 1 June. *Weather and Forecasting*, Vol.9, 103-115.
- C. H., Ho, J. H., Kim, H. S., Kim, C. H., Sui, D. Y., Gong, 2005, Possible influence of the Antarctic Oscillation on tropical cyclone activity in the western North Pacific. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110, doi:10.1029/2005JD005766.
- C. H., Ho, J. J., Baik, J. H., Kim, D. Y., Gong, 2004, Interdecadal changes in summertime typhoon tracks. *Journal of Climate*, Vol.17, 1767-1776.
- E., Kalnay, Coauthors, 1996, The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of American Meteorological Society*, Vol.77, 437-471.
- J. H., Kim, C. H., Ho, C. H., Sui, S. K., Park, 2005, Dipole structure of interannual variations in summer-time tropical cyclone activity. *Journal of Climate*, Vol.18, 5344-5356.
- R., Kistler, Coauthors, 2001, The NCEP/NCAR 50-year reanalysis. *Bulletin of American Meteorological Society*, Vol.82, 247-267.
- J. A., Knaff, 1993, Evidence of a stratospheric QBO modulation of tropical convection. MS Thesis, Atmospheric Science Paper No. 520, Colo. State Univ., Ft. Collins, CO, 80523, 111 pp.
- H. J., Kwon, W. J., Lee, S. H., Won, E. J., Cha, 2007, Statistical ensemble prediction of the tropical cyclone activity over the western North Pacific. *Geophysical Research Letters*, Vol.34, 102-105.
- T., Matsuura, M., Yumoto, S., Iizuka, 2003, A mechanism of interdecadal variability of tropical cyclone activity over the western North Pacific. *Climate Dynamics*, Vol.21, 105-117.
- J. D., Sheaffer, 1993, Decadal scale trends in Pacific-Western North America teleconnections and implications for seasonal predictability of anomalous precipitation. Preprints, Fourth Conference on Global Change

- Studies, Anaheim, CA, January 17-22.
- D. S., Wilks, 1995, Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, *Academic Press*, 467 pp.
- M., Yumoto, T., Matsuura, 2001, Interdecadal variability of tropical cyclone activity in the western North Pacific. *Journal of Meteorological Society of Japan*, Vol.79, 23-35.
- G., Zhang, X., Zhang, F., Wei, 1994, A study on the variations of annual frequency of tropical cyclone in northwest Pacific during the last hundred years. *Journal of Tropical Meteorology*, Vol.11, 315-323.