경험적 직교함수를 이용한 북서태평양 열대저기압의 이동빈도 특성에 관한 연구

최기선¹ · 강기룡^{2,*} · 김도우¹ · 황호성¹ · 이상룡³

¹부경대학교 환경대기과학과, 608-737, 부산광역시 남구 대연동 599-1

²기상청 국가태풍센터, 699-942, 제주도 서귀포시 남원읍 한남리 76-2

³부산대학교 지구환경시스템학부, 609-735, 부산광역시 금정구 장전동 산 30

A Study on the Characteristics of Tropical Cyclone Passage Frequency over the Western North Pacific using Empirical Orthogonal Function

Ki-Seon Choi¹, KiRyong Kang^{2,*}, Do-Woo Kim¹,
Ho-Seong Hwang¹, and Sang-Ryong Lee³

¹Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

²National Typhoon Center/Korea Meteorological Administration, Jeju 699-942, Korea

³Department of Earth Environment System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

Abstract: A pattern of tropical cyclone (TC) movement in the western North Pacific area was studied using the empirical orthogonal function (EOF) and the best track data from 1951 to 2007. The independent variable used in this study was defined as the frequency of tropical cyclone passage in 5 by 5 degree grid. The 1st, 2nd and 3rd modes were the east-west, north-south and diagonal variation patterns. Based on the time series of each component, the signs of first and second mode changed in 1997 and 1991, respectively, which seems to be related to the fact that the passage frequency was higher in the South China Sea for 20 years before 1990s, and recent 20 years in the East Asian area. When the eigen vectors were negative values in the first and second modes and TC moves into the western North Pacific, TC was formed mainly at the east side relatively compared to the case of the positive eigen vectors. The first mode seems to relate to the pressure pattern at the south of Lake Baikal, the second mode the variation pattern around 30°N, and the third mode the pressure pattern around Japan. The first mode was also closely related to the ENSO and negatively related to the Niño-3.4 index in the correlation analysis with SST anomalies.

Keywords: EOF, tropical cyclone, SST anomaly, ENSO, Niño-3.4 index

요 약: 북서태평양에서 발생하는 열대 저기압의 이동경로에 대한 변화패턴을 1951-2007년의 열대 저기압 경로 자료에 경험적 직교함수(Empirical Orthogonal Function, EOF)법을 적용하여 분석하였다. 북서태평양을 5°×5°의 격자간격으로 나누어 연별 열대 저기압의 이동빈도를 각 격자에서의 변수로 정의하였다. 첫번째 모드는 동서성분(동경125도 기준)을, 두번째 모드는 남북성분(필리핀 동쪽해상에서 남지나해를 가로지르는 축 중심)을, 그리고 세번째 모드는 대각성분(타이완 동쪽 해상을 중심으로 동북방향과 동남방향을 축으로 하는)으로 나누어짐을 알 수 있었다. 첫번째와 두번째 모드의 주성분 시계열에서 각각 1997년과 1991년 부근을 기점으로 해서 주성분들의 부호가 교차되는 데, 이는 1990년대 이전 약 20년 동안에 남중국해 부근지역에서의 열대 저기압 이동 빈도가 동아시아 중위도 지역에서는 최근 20년 동안에 더 높았던 것과 관련성이 있는 것으로 보였다. 열대 저기압 발생의 경우, 첫번째와 두번째 모드에서 고유벡터 값이 음이고 진로가 북서태평양으로 주로 이동했던 열대 저기압은 고유벡터가 양의 값을 보였던 열대 저기압보다 더 동쪽에서 발생했던 것으로 나타났다. 이동특성에 있어 첫번째 모드는 바이칼호 남쪽에서 형성되는 기압 패턴에, 두번째 모드는 30°N 부근을 중심으로 남과 북 사이에 형성된 진동패턴에, 세번째 모드는 일본 부근에 위치한 기압패턴에 의해 열대 저기압

*Corresponding author: krkang@kma.go.kr

Tel: 82-64-801-0224

Fax: 82-64-805-0366

의 이동경향이 많은 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 또한, 해수면 온도 아노말리 값과 상관분석결과 첫번째 모드는 Niño-3.4 지수와 높은 음의 상관관계를 보여 ENSO의 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

주요어: 경험적 직교함수, 열대 저기압, 해수면 온도 아노말리, ENSO, Niño-3.4 지수

서 론

북서태평양에서의 열대 저기압은 날짜변경선의 서쪽해역 중 북위 8-15도의 해역에서 주로 발생한다. 이들 중에 약 1/3은 서진 또는 북서진해서 동남아시아 또는 남중국의 해안에 상륙한다. 그리고 나머지는 천천히 북진하여 전향하며 중위도의 서풍대에 진입하면서 빠른 속도로 북동진한다(Harr and Elsberry, 1995a). 그러나 이러한 패턴은 해마다 달라지는 데 어떤 해에는 열대 저기압이 저위도에서 정체하는 경향이 있는 반면 다른 해에는 서진 또는 북진하는 경향도 있다. 이러한 열대 저기압의 이동경로는 북태평양 고기압의 연변동 및 10년주기 변동에 상당한 영향을 받는다. 이는 열대 저기압의 이동패턴이 종관규모의 변동형태에 따라 뚜렷한 특성을 나타낼 수 있음을 의미한다.

열대 저기압의 이동패턴을 구체화하기 위한 연구가 많은 연구자에 의해 수행되어 왔으며, 이들은 주로 군집분석과 경험적 직교함수의 분석법을 이용하였다. Harr and Elsberry(1991)는 군집분석을 통해 “straight track”, “recurve-south track”, “recurve-north track”과 같이 세가지의 이동경로로 구분하였고, 분류된 이동경로 유형을 종관규모 대기순환장의 변동과 연관시켰다. Hodanish and Gray(1993)는 열대 저기압의 전향 정도를 기준으로 하여 “sharply recurving cyclone”, “gradually recurving cyclone”, “left-turning cyclone”, “non-recurving cyclone”과 같이 구분하였다. 그러나 두 연구 모두 전향방향을 기준으로 분류를 시도하였지만 분류기준에 있어 통계적·과학적 방법의 사용이 요구되었다. 이러한 한계점을 극복하기 위해 Lander(1996)는 “straight moving pattern”, “recurving pattern”, “non-oriented pattern”, “staying pattern in the South China Sea”과 같이 열대 저기압의 이동패턴을 분류기준으로 사용하였다. 특히, “staying pattern in the South China Sea”는 앞선 두 연구에서의 분류기준에 포함되어 있지 않은 것이었다.

Elsner and Liu(2003) 역시 위와 비슷한 방법으로 분류하여 “straight-moving typhoons”, “recurving

typhoons”, “north-oriented typhoons”로 구분하였는데 이들은 다음과 같은 두 변수를 사용하여 k-means 군집분석을 추가하였다: 1) 열대 저기압이 최대 강도일 때의 위도 및 경도, 2) 열대 저기압이 소멸될 때의 위도 및 경도. Camargo et al.(2007)은 열대 저기압의 이동경로 모양에 대해 polynomial fitting method를 응용한 regression mixture model을 개발하여 열대 저기압의 이동경로를 7가지 군집으로 분류하였다. 이 연구들은 분류시 통계적 방법이 적용되었지만 여전히 분류기준에 있어 완전한 객관성을 나타내는 데는 한계를 보였다.

Kim et al.(2005)은 열대 저기압의 이동경로에 대한 경험적 직교함수 분석법을 이용해 두 가지 열대 변동모드와 한 가지의 중위도 변동모드를 제시하였다. 후자의 변동모드를 동아시아 쌍극자 패턴(East Asian dipole pattern)으로 정의하였으며, 이는 동아시아 중위도 지역에서 여름철의 열대 저기압의 활동 중 가장 뚜렷한 변동패턴임을 보였다. Sik and Chan(2008)은 중국의 남동해안으로부터 일본 부근 지역에서 형성되는 북동-남서 쌍극자 모드 및 일본을 중심으로 하는 동-서 모드가 열대 저기압 활동의 주된 변동 특성임을 주장하였다. 특히, 그들은 이 모드들과 관련된 종관규모 흐름 패턴들이 북서태평양에서 나타나는 500 hPa 지오폠텐셜고도 아노말리의 남-북 쌍극 형태, 즉 Pacific Decadal Oscillation(PDO)과 유사한 공간구조로 특징지어짐을 제시하였다.

위에 서술된 대부분의 연구들이 특정한 계절(예를 들어, 여름)에 발생한 열대 저기압에 대해서 그 이동패턴을 분석하고 이들의 형태를 종관적 특성과 연관시키려는 노력을 보였다. 이는 열대 저기압의 발생과 이동이 여름철에 가장 활발하기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 열대해역에서 저기압의 생성은 계절에 국한되지 않고 지속적으로 일어나고 있다. 또한 한국의 경우 지난 57년동안 6월에 발생한 열대 저기압으로부터 13회의 영향을 받았으며, 10월에도 5회의 적지 않은 영향을 받은 바 있다. 따라서 열대 저기압의 이동형태를 분석하고 종관적 특성과 연관시키기 위해서는 특정시기에 치우치지 않고 하나의 연속적인 활동

으로 간주하고 분석할 필요가 있다. 본 연구에서는 열대 저기압의 발생과 이동에 있어 시간적인 제한없이 모든 계절에 발생한 열대 저기압을 대상으로 경험적 직교함수 분석법을 통해 이동 형태를 분류하고, 종관장의 분포특성과 어떤 관계를 보이는지에 대해 연구하고자 한다.

자료 및 분석방법

열대 저기압의 생성과 이동에 대한 자료는 일본 동경 지역특별기상센터(Regional Specialized Meteorological Centers-Tokyo, RSMC-Tokyo)에서 제공하는 1951년부터 2007년(57년)까지의 태풍의 최적경로자료를 이용하였다. 이 자료는 6시간 간격으로 열대 저기압의 이름, 위치(위·경도), 강도(중심 기압·최대 풍속) 등으로 구성되어 있다. 중심최대 풍속(Maximum sustained wind speed, MSWS)에 따라 Tropical Depression(TD; $MSWS < 34$ kts), Tropical Storm(TS; $34 \text{ kts} \leq MSWS \leq 47$ kts), Severe Tropical Storm(STS; $48 \text{ kts} \leq MSWS \leq 63$ kts), Typhoon(TY; $MSWS \geq 64$ kts)으로 구성된다. 하지만 본 연구에서의 열대 저기압은 이 네 등급과 함께 열대 저기압으로부터 온대저기압으로 된 Extratropical Cyclones도 포함하였다. 또한, National Centers for Environmental Prediction · National Center for Atmospheric Research(NCEP-NCAR)(Kalnay et al., 1996; Kistler et al., 2001)에서 제공하는 1951-2007년(57년) 동안의 동서·남북류 및 지위고도 등의 월 자료가 사용되었다. 이 자료는 위·경도 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 및 연직 17층의 공간 해상도로 이루어져 있다. 또한 NOAA Extended Reconstructed Sea Surface Temperature(Reynolds et al., 2002)의 해수면 온도 자료는 위·경도 $1^\circ \times 1^\circ$ 및 월 간격으로 구성되어 있다.

열대 저기압의 이동빈도를 독립변수로 만들기 위하여 북서태평양을 $5^\circ \times 5^\circ$ 크기의 격자로 나누었고, 각 격자에서 구해진 이동빈도를 경험적 직교함수(Empirical Orthogonal Function, EOF) 분석법을 이용하여 주성분 분석을 실시하였다. 각 격자에서 이동 횟수를 계산할 때 같은 열대 저기압이 같은 격자를 두 번 이상 통과한 경우는 한번 지나간 것으로 간주하였으며, 열대 저기압의 발생위치 자체는 빈도에 포함시키지 않았다.

연구해역에서 대부분의 열대 저기압 발생이(약

80% 이상) 6-11월 사이에 분포되어 있으므로 구해진 아노말리는 해당 사례의 6-11월 평균으로부터 같은 달 동안의 57년 기후 평균의 차로 계산되었다. 그리고 매 년의 엘니뇨, 라니냐 발생은 Nino-3.4 지역에서 계산된 6-11월의 해수면 온도 아노말리를 이용하여 다음과 같이 정의되었다:

- 엘니뇨: 해수면 온도 아노말리 $\geq 0.5^\circ\text{C}$
- 라니냐: 해수면 온도 아노말리 $\leq -0.5^\circ\text{C}$
- 노말: $-0.5^\circ\text{C} < \text{해수면 온도 아노말리} < 0.5^\circ\text{C}$

여기서, Nino-3.4의 영역은 $5^\circ\text{S}-5^\circ\text{N}$, $170^\circ\text{W}-120^\circ\text{W}$ 의 해역으로 정의된다.

결 과

열대 저기압의 이동빈도

Figure 1은 57년 동안 북서태평양에서 $5^\circ \times 5^\circ$ 의 격자간격으로 된 열대 저기압의 이동빈도에 대해 EOF 분석을 한 결과이다. 첫번째 모드는 전체 분산의 21.6%를 설명하고 있다. 고유벡터의 공간적인 분포에서 열대 저기압은 동아시아 근해 및 북서태평양에서 이동하는 패턴이 뚜렷하다. 주성분 시계열에서는 시간이 흐름에 따라 증가하는 추세를 나타낸다. 따라서 공간변동 성분과 시간변동 성분을 함께 고려할 때, 57년 동안 북서태평양에서 열대 저기압의 이동빈도는 증가하고 있음을 알 수 있다(Kim et al., 2005). 두번째 모드는 전체분산의 15.0%를 차지하는 것으로 나타났다. 열대 저기압이 북서태평양에서 이동하는 한 패턴과 필리핀 동쪽해상으로부터 남중국해 부근지역으로 이동하는 패턴으로 나뉘어진다. 특히, 후자의 패턴이 더 뚜렷하다. 이 주성분 시계열에서는 1990년대 초반까지는 양의 값이 우세하나, 1990년대 중반 이후부터는 음의 값이 뚜렷하다. 따라서 이 결과를 공간변동 성분과 비교해볼 때, 필리핀 동쪽해상으로부터 남중국해 부근지역으로 이동하는 패턴은 1990년대 초반 이후로 감소하였음을 알 수 있다.

세번째 모드는 전체 변동성의 약 7.2%를 차지한다. 비록 변동성은 작지만 고유벡터의 공간분포에서 뚜렷한 변동형태 특성을 보여준다. 즉, 세번째 모드는 고유벡터 공간분포에서 필리핀 동쪽 해상으로부터 동중국해를 지나 한국 및 일본을 경유하는 패턴이 추가된 형태이다. 따라서 두번째 모드는 화남 및 인도차이나 반도지역의 국가에 중요한 반면, 세번째 모드는 중국을 제외한 한국 및 일본과 같이 동아시아 중위

Fig. 1. Three leading eigenvectors (left) and the associated principal component (PC) time series of TC passage frequency (TPF) during the period 1951-2007. Eigenvectors are multiplied by 100. In the time series, solid lines represent 5-year running average from the year 1951. Dashed line boxes in the left panel are defined to analyze the TPF variations in this region in Fig. 2.

도 지역에서의 열대 저기압의 변동에 중요하다고 볼 수 있다. 세번째 모드의 주성분 시계열에서는 십년 주기의 변동을 뚜렷히 볼 수 있다. 1950-60년대 초반과 2000년대는 양의 값, 1960년대 후반-1970년대 후반 그리고 1990년대는 음의 값, 1980년대는 변화가 거의 없다. 이러한 변동은 5년 이동평균에서 더욱 뚜렷하게 확인된다. 이러한 변동으로부터 중국을 제외한 동아시아 중위도 지역에서는 최근 열대 저기압

의 이동빈도가 증가하고 있음을 알 수 있다.

각 모드의 중요지역에서 열대 저기압의 변동을 좀 더 자세히 살펴보았다. 첫번째 모드에서는 북서태평양 지역(20.0°-30.0°N, 130.0°-160.0°E: NWP 지역으로 정의), 두번째 모드에서는 남중국해 및 화남 지역(10.0°-22.5°N, 110.0°-120.0°E: SCS-SC 지역으로 정의), 세번째 모드에서는 한국 및 일본지역(32.5°-42.5°N, 125.0°-142.5°E: KOR-JAP로 정의)에서 영역

Fig. 2. Correlation coefficients between TPF time series averaged for each area that indicated in Fig.1 (solid lines with filled circle) and PC time series (dotted lines with open circle) in each EOF mode. WNP, SCS, and KOR-JAP areas are 20.0°-30.0°N, 130.0°-160.0°E, 10.0°-22.5°N, 110.0°-120.0°E, and 22.5°-42.5°N, 125.0°-142.5°E, respectively.

평균 된 매 년 열대 저기압의 이동빈도를 각 모드의 주성분 시계열과 비교하였다(Fig. 2). 첫번째 모드의 WNP지역과 두번째 두번째 모드의 SCS-SC지역은 공간 분포특성이 뚜렷하게 나타나는 지역이었기 때문에 두 변수 사이의 상관성이 약 ± 0.8 정도로 높게 나타났지만, 세번째 모드에서의 KOR-JPA지역은 변동성이 약하여 다소 낮은 상관을 보였다. 하지만 이들 세 지역에서의 전체적인 열대 저기압의 이동빈도 변화는 앞서 살펴본 주성분 시계열의 변화를 잘 따르고 있음을 알 수 있다.

열대 저기압 이동빈도의 최근 변화

최근 열대 저기압의 진로 특성이 과거와 비교하여 어떤 변화가 있었는지를 이해하는 것은 열대 저기압 진로에 대한 분석뿐만 아니라 예측에 있어서도 매우 중요하다. 최근 열대 저기압의 진로 특성을 알아보기 위해 각 EOF 모드 주성분의 시계열을 3년 이동평균 하였다(Fig. 3a). 첫번째 모드에서는 1997년을 전후로

약 10년씩 큰 변동이 있었다(Fig. 3a의 왼쪽 그림 속에 있는 화살표 참조). 즉, 1986-1996년(11년) 동안에는 음의 값이, 1997-2007년(11년) 동안에는 양의 값이 탁월하였다. 이를 Fig. 1a의 공간변동성과 비교를 해보면 전자의 기간에 북서태평양에서 열대 저기압의 이동빈도가 더 높았음을 알 수 있다. 이를 전자와 후자 기간 사이에 열대 저기압의 이동빈도 차를 통해 분석해 보았다(Fig. 3b). 북서태평양에서 뿐만 아니라 20°N 이하의 열대 서태평양에서 전자의 기간에 열대 저기압의 이동빈도가 더 많았음을 볼 수 있다. 특히, 남중국해 부근지역에서 이러한 경향은 더욱 뚜렷하다. 반면, 중국, 한국 및 일본과 같은 동아시아의 중위도 지역에서는 최근에 열대 저기압의 이동빈도가 더 높다. 이러한 열대 저기압 이동 변동의 원인이 되는 종관적 특성을 500 hPa 지위고도와 바람에 대해 전자와 후자기간 사이의 차를 통해 조사하였다(Fig. 3c). 바이칼호 남쪽으로부터 일본 남동해상까지 북서에서 남동 방향으로 반시계방향 순환의 아노말리가

Fig. 3. (a) PC time series (bar) and their three-year moving averages (solid line with a filled circle) for 1st mode (left) and 2nd mode (right), and the differences of (b) TPF and (c) 500-hPa winds between 1986-1996 and 1997-2007 for 1st mode (left) and between 1971-1990 and 1991-2007 for 2nd mode (right). In (c), shaded area denotes region greater than the 95% confidence level.

형성되어 있어 이 지역을 따라 전자의 기간에 북서풍의 아노말리가 더 탁월하다. 전자의 기간에 강화된 이런 흐름은 열대 저기압이 동아시아 중위도 지역으로 북상하는 것을 막는 역할을 하게 된다. 한편 남중국 지역에는 시계방향 순환의 아노말리가 형성되어 남중국해 부근 지역에 동풍류의 아노말리를 더욱 탁월하게 만든다. 이러한 흐름은 전자의 기간 동안 이 지역에서 열대 저기압의 이동빈도가 더 높은 원인이

된다. 또한 20°N, 160°-180°E 시계방향 순환의 아노말리가 형성되어 있어 열대 저기압은 이 흐름에 따라 이 기간에 북서태평양에서 더 높은 이동빈도를 나타내게 된 것이다.

두번째 모드의 주성분 시계열에서는 1960년대까지 음과 양이 함께 변동하였지만, 1970년대부터는 뚜렷한 십년간 변동이 있음을 확인할 수 있다(Fig. 3a). 1971-1990년 사이에는 양의 값이, 1991-2007년 사이

Fig. 4. Monthly variation of TC genesis frequency (TGF) in each EOF mode and a TGF difference between plus and minus years selected from PC time series in Fig. 1.

에 음의 값이 뚜렷하다(Fig. 3a의 오른쪽 그림 속에 있는 화살표 참조). 따라서 Fig. 1에서 두번째 모드의 공간분포와 비교해 볼 때, 전자의 시기에는 남중국해 부근지역에서 열대 저기압의 빈도가 높은 반면, 후자의 시기에는 낮아짐을 알 수 있다. 이를 좀 더 자세히 확인하기 위해 전자와 후자기간 사이에 열대 저기압의 빈도차를 살펴보았다(Fig. 3b). 그 결과는 두번째 모드의 공간분포와 비슷한 패턴을 나타낸다. 즉, 필리핀 동쪽 해상에서부터 남중국해, 화남 및 인도차이나 반도 지역에서 최근보다는 전자의 시기에 더 많은 열대 저기압이 영향을 주었음을 확인할 수 있다. 대신 후자의 시기에는 동중국해, 한국 및 일본 등의 동아시아 중위도 지역에서 높은 빈도를 보인다. 이는 Fig. 3c에서 볼 수 있듯이, 22.5°-32.5°N에서 전자의 시기에 더욱 강화된 500 hPa 고기압성 순환의 아노말리가 필리핀 북동해상에서부터 남중국해 및 화남, 인도차이나 반도지역에 까지 동풍류의 아노말리를 강화하였기 때문이다. 결국, 최근에 한국을 포함한 동아시아 중위도 지역에서는 열대 저기압의 이동

빈도가 증가하는 반면, 남중국해 부근 지역에서는 감소하고 있음을 알 수 있다. 따라서 동아시아 중위도 지역의 국가들에서는 잦은 열대 저기압의 영향에 대비를 해야 할 것으로 판단된다.

한편 세번째 모드는 최근 30년 동안 2000년대 후반을 제외하고 대부분 음의 값을 나타내어 이 분석에서 제외되었다(그림 생략).

열대 저기압의 발생

각 모드별 주성분의 시계열로부터 양과 음의 해사이의 차를 살펴보기 위해 절대값이 가장 큰 양과 음의 15년(총 30년)을 각각 선택하였다. 선택된 30년은 전체 분석기간(57년)의 약 53%를 차지한다. 먼저, 양과 음의 해들 사이에 월별 열대 저기압의 발생빈도를 각 모드별로 살펴보았다(Fig. 4). 이 분석은 본 연구가 모든 계절의 열대 저기압을 대상으로 한 하나의 이유가 된다. 첫번째 모드에서는 양의 해(348)보다 음의 해(464개)에 열대 저기압이 약 120개 더 많이 발생하였다. 이는 양의 15년 매 해마다 8개의

열대 저기압이 더 적게 발생한 것에 해당한다. 게다가 일년 평균 열대 저기압의 발생빈도가 약 26개(57년 기후학적 평균)임을 고려해볼 때, 양의 해에 마다 기후학적 연 발생빈도의 3분에 1에 해당하는 열대 저기압이 발생하지 않은 것이 된다. 월별로는 5, 6, 7, 8월 달에 음의 해가 양의 해보다 20개 더 많이 발생하였으며, 나머지 달에는 10개 이하의 차를 나타낸다. 하지만 두번째 모드에서에서는 양과 음의 해 사이에 큰 차이가 없다. 전체적으로 양의 해가 음의 해보다 약 20개 더 많이 발생하였으며, 모든 달에서 10개 이하의 차를 나타낸다. 세번째 모드에서도 첫번째 모드와 같이 음의 해가 양의 해보다 더 많이 발생하였지만 그 차는 약 60개로 첫번째 모드보다 작다. 이는 양의 15년 매 해마다 약 4개의 열대 저기압이 적게 발생한 것에 해당한다. 월별 차에서는 7월과 10월에 20개 이상의 차가 나타난다.

각 모드별로 양과 음의 해 사이에 발생위치의 차에서는 각 모드에서 공간분포의 특색이 반영된 것임을 확인할 수 있다(Fig. 5). 첫번째 모드에서는 135°E의 동쪽지역에서 음의 해에 더 많은 열대 저기압이 발생하였으며, 두번째 모드에서는 20°N 남쪽에서 150°E의 서쪽 영역에 양의 해 동안 열대 저기압이 더 많이 발생하였다. 이 결과는 필리핀 근처에서 발생한 열대 저기압은 서진 또는 서북진 하여 화남 및 인도차이나 반도로 향하는 경향이 있으며, 서태평양의 동쪽 지역에서 발생한 열대 저기압은 30°N 부근 지역에서 전향하여 동아시아의 중위도 향하는 경향이 강함을 지적한 Ho et al.(2004)과 일치한다. 세번째 모드에서는 15°N 이남에서 135°-155°E 사이에 양의 해 동안 더 많이 발생한 것을 알 수 있다.

양과 음의 해 사이에 열대 저기압의 수명 차이는 첫번째 모드에서 가장 크게 나타난다(Fig. 6). 공간분포에서 음의 해에는 열대 저기압이 적도 동태평양에서부터 북서태평양까지 북상하는 패턴이 강하게 나타났으며 그 수명은 약 9.2일 정도였으며, 양의 해(5.4일) 보다 약 4일 더 지속되었다. 두번째 모드에서는 양의 해에(6.2일) 열대 저기압들이 필리핀 동쪽 해상에서부터 남중국해 부근지역까지만을 이동하는 경향이 뚜렷하여 북태평양까지 북상하는 음의 해에 (8.6일) 열대 저기압들보다 약 2.5일 빨리 소멸하였다. 이 결과로부터 적도 동태평양에서 발생한 열대 저기압은 적도 서태평양에서 발생한 열대 저기압들보다 더 오래 지속됨을 알 수 있다(Wang and Chan, 2002). 세

Fig. 5. Differences in the TGF between plus and minus years selected from PC time series in Fig. 1.

번째 모드는 동아시아 중위도 지역으로 북상하는 양의 해에 열대 저기압들이 음의 해에 열대저기압들보다 약 1.5일 더 오래 지속되었다. 이는 음의 해에도 북태평양까지 북상하는 열대 저기압들이 존재하기 때문에 다른 모드와 비교하여 양의 해의 열대 저기압의 수명과 큰 차이를 보이지 않은 것으로 판단된다.

종관적 환경변화

위에서 분석된 바와 같이 이 장에서는 각 모드별 열대 저기압 이동특징의 원인이 되는 종관 환경을 분석하였다. 일반적으로 열대 저기압은 500 hPa에서 북서태평양 고기압의 서쪽연변의 흐름을 따라 이동하

Fig. 6. TC lifetimes for plus and minus years selected from PC time series in Fig. 1. 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. '+' mark denotes average.

는 경향이 있기 때문에 각 모드별 양과 음의 해에 대한 500 hPa 지위고도의 아노말리를 분석하였다 (Fig. 7). 먼저 첫번째 모드의 양의 해에는 바이칼호 남쪽에 중심을 둔 고기압성 순환의 아노말리로부터의 기압능이 필리핀 동쪽해상까지 확장하여 필리핀 동쪽 해상으로부터 남중국해 부근지역에는 편동풍류의 아노말리가 발달해 있다. 음의 해에는 양의 해와 반대의 기압패턴이 형성되어 있어 필리핀 동쪽 해상으로부터 일본열도 쪽으로 남풍류의 아노말리가 강화되어 있다. 이 아노말리성의 흐름에 의해 첫번째 모드의 음의 해에는 열대 저기압이 동아시아 해안에 상륙하지 못하게 된다. 두번째 모드에서는 30°N 부근을 중심으로 남과 북이 진동하는 패턴을 나타낸다. 양의 해에는 동아시아 중위도 지역에 저기압성 순환의 아노말리가, 아열대 지역에는 고기압성 순환의 아노말리가 위치한다. 양의 해에 아열대 지역에서의 이런 흐름에 의해 열대 저기압은 남중국해 부근지역으로 향하는 경향이 뚜렷하게 된다. 음의 해에는 양의 해와 반대의 기압패턴이 형성되어 있어 열대 저기압은 동아시아 해안에 상륙하지 못하고 북서태평양의 해역에서 이동하는 경향을 보이게 된다. 세번째 모드의 양의 해에는 일본열도의 동쪽해상에 중심을 둔 강한 고기압성 순환의 아노말리에 의해 필리핀 동쪽해상으로부터 한국으로 남풍류의 아노말리가 발달해 있다. 이 흐름은 양의 해에 열대 저기압들을 한국 및 일본으로 쉽게 이동시키는 역할을 하게 된다. 반대로 음의 해에는 동아시아 중위도 지역으로부터 필리핀 동쪽해상까지 북풍류의 아노말리가 발달해 있어 열대 저기압이 동아시아 중위도 지역으로 이동하기 어려운

환경임을 알 수 있다.

높은 해수면 온도 환경은 열대 저기압의 생성 및 발달에 중요한 요소이다. 따라서 각 모드별로 양과 음의 해에 해수면 온도의 상태를 확인하기 위해 해수면 온도 아노말리를 분석하였다(Fig. 8). 먼저 첫번째 모드의 양의 해에는 적도 동태평양에 음의 해수면 온도 아노말리가 뚜렷한 라니냐의 패턴이, 음의 해에는 같은 지역에 양의 해수면 온도 아노말리가 뚜렷한 엘니뇨의 패턴이 형성되어 있다. 두번째 모드에서는 양의 해에 태평양 대부분의 지역이 음의 해수면 온도 아노말리를, 음의 해에는 양의 해수면 온도 아노말리가 뚜렷하다. 세번째 모드의 양의 해에는 베링해 부근을 제외하고 중요한 해수면 온도 아노말리가 존재하지 않는 반면, 음의 해에는 북태평양의 북서지역에는 음의 해수면 온도 아노말리, 남동지역에는 양의 해수면 온도 아노말리와 같은 북서-남동방향의 대칭구조가 형성되어 있다. 따라서 엘니뇨, 라니냐 패턴은 첫번째 모드에서 가장 뚜렷함을 알 수 있다. 이는 각 모드별로 엘니뇨, 라니냐 해에 포함되는 음과 양의 년수 및 열대 저기압의 수로부터 확인할 수 있다(Fig. 9). 첫번째 모드에서는 정상 해에 속하는 양과 음의 해는 같은 반면, 엘니뇨 해는 음의 해에, 라니냐 해는 양의 해에 더 많이 속해있다. 열대 저기압의 수에서도 엘니뇨 해에는 음의 해에, 라니냐 해에는 양의 해에 월등히 많음을 알 수 있다. 두번째 모드 역시 첫번째 모드와 비슷한 양상을 보이지만 양과 음의 해 사이에 엘니뇨 및 라니냐에 속하는 년 수 및 열대 저기압 수의 차가 첫번째 모드만큼 크지는 않다. 반면, 세번째 모드에서는 엘니뇨,

Fig. 7. 500-hPa geopotential height and wind anomalies for plus (left) and minus PC (right) selected from PC time series in Fig. 1. Contour interval is 2 gpm. Shaded areas denote regions greater than 95% confidence level.

라니냐, 정상해에 속하는 양과 음의 해는 같으며, 이에 속하는 열대 저기압의 수도 양과 음의 해 사이에 거의 차이가 없다. 따라서 엘니뇨, 라니냐 변동이 뚜렷이 나타나는 첫번째 모드에서의 주성분 시계열과 Niño-3.4 지수와의 상관관계를 분석하였다(Fig. 10). 두 변수 사이에는 95%의 신뢰수준에서 -0.49의 높은 음의 상관관계가 존재한다. 이것은 첫번째 모드에서의 열대 저기압은 엘니뇨, 라니냐의 영향을 강하게 받음을 의미한다. 따라서 앞서 살펴보았듯이, 엘니뇨 패턴을 나타내는 첫번째 모드의 음의 해에 열대 저기압이 적도 서태평양의 동쪽에서 더 많이 발생하였음을 알

수 있다. 또한 앞서 음의 해에 열대 저기압의 수명이 더 길었음을 분석한 바 있는데, 이는 엘니뇨 해에 발생한 열대 저기압은 라니냐 및 정상해에 비해 열대 저기압의 강도 및 수명이 더 강하고 길다는 Wang and Chan(2002)의 결과와 일치한다.

결론 및 토의

본 연구는 지난 57년 동안(1951-2007) 5°×5°의 격자간격마다 구해진 매 년 모든 계절의 열대 저기압의 이동빈도를 이용하여 경험적 직교함수(Empirical

Fig. 8. Same as Fig. 7, but for sea surface temperature (SST). Contour interval is 0.2°C . Shaded areas denote regions greater than 95% confidence level.

Orthogonal Function, EOF)분석을 하였다. 첫번째 모드에서의 열대 저기압은 북서태평양의 해역을 이동하는 패턴이 강하게 나타났다. 두번째 모드에서의 열대 저기압은 필리핀 동쪽 해상에서부터 남중국해 부근지역으로 서진 또는 서북진 하는 패턴이 뚜렷하였다. 세번째 모드에서는 세 경로의 특징이 나타났는데, 두번째 모드에서의 두 경로와 함께 필리핀 동쪽해상에서 동중국해를 지나 한국·일본으로 향하는 패턴이 추가되어 나타났다. 이러한 공간변동성의 특징을 주성분 시계열과 함께 분석해 본 결과, 첫번째, 두번째 모드에서는 각각의 주 이동지역에서의 열대 저기압 이동빈도가 뚜렷하게 감소하는 추세를 나타내었다. 특히, 1990년대를 중심으로 이동 패턴의 변화가 발견되었다. 즉, 남중국해 및 화남 지역에서의 열대 저기압 빈도는 1991년 이전 약 20년 동안이 이후 20년보다 월등히 높았다. 대신 동아시아 중위도 지역에서는 1997년 이전의 10년보다 이후의 10년이 더 높은 빈

도를 나타내었다. 이는 500 hPa에서 최근 20년 동안이 이전의 기간보다 아열대 서태평양에는 고기압성 순환이 더 강화되고 동아시아 중위도 지역에서는 저기압성 순환이 더 강화 되었기 때문이었다.

각 모드별 주성분 시계열로부터 주성분의 절대값이 가장 높은 양과 음의 해를 각각 15년씩 선택하여 비교분석을 하였다. 열대 저기압 발생의 경우, 첫번째와 두번째 모드에서 북서태평양 해역을 주로 이동하는 열대 저기압들은 그렇지 않은 열대 저기압들보다 더 동쪽에서 발생하였으며, 필리핀 동쪽해상에서 동중국해를 지나 한국·일본으로 향하는 세번째 모드의 열대 저기압들은 필리핀 동쪽 해상 부근에서 높은 발생빈도를 나타내었다. 따라서 북서태평양 해역을 주로 이동하는 열대 저기압은 필리핀 동쪽 해상에서 발생하여 남중국해 부근으로 이동하는 열대 저기압보다 수명이 더 길었다.

각 모드별 양과 음의 해에 열대 저기압의 이동특

Fig. 9. TGF in each EOF mode according to ENSO event. Figures above bars represent the number of year that included in each ENSO event.

성을 야기하는 종관적 특성을 알아보기 위해 500 hPa 지위고도 및 바람 아노말리를 분석하였다. 첫번째 모드에서 열대 저기압이 북서태평양 해역을 주로 이동하는 원인은 바이칼호 남쪽에 위치해 있는 저기압성 아노말리로부터 필리핀 동쪽 해상까지 확장한 기압능에 의한 것으로 분석되었다. 두번째 모드 역시 30°N 부근을 중심으로 강화되어 있는 남저·북고의 기압패턴에 의해 열대 저기압이 북서태평양 해역을 주로 이동하게 되었다. 세번째 모드에서는 일본열도 부근에 형성된 강한 고기압성 아노말리에 의해 필리

핀 동쪽해상으로부터 한국·일본 지역으로 남풍 아노말리가 강화됨으로서 동아시아 중위도 지역에 높은 열대 저기압의 이동빈도를 형성되는 원인이 되었다.

세 모드에 대한 해수면 온도 아노말리의 분석결과 첫번째 모드의 열대 저기압은 엘니뇨, 라니냐의 영향을 받고 있었다. 이는 첫번째 모드의 주성분 변동이 Niño-3.4 지수와의 변동과 높은 음의 상관관계가 형성되어 있는 것으로부터 확인되었다.

이 연구는 북서태평양에서 열대 저기압 이동빈도의 특성을 경험적 직교함수 분석을 통해 확인하였다. 서론에서 언급하였던 것처럼, 본 연구와 유사한 대부분의 이전 연구에서는 여름철에 발생한 열대 저기압을 대상으로 분석하여 나타난 첫번째 주성분 모드의 특징만을 주로 다루고 있다(Chan, 1994; Kim et al., 2005). 하지만 본 연구는 모든 계절에 발생한 열대 저기압을 대상으로 하고 있으며, 각 주성분 모드에 포함되는 열대 저기압에 대해 그것의 발생으로부터 이동 및 수명 등의 특성을 체계적으로 분석한 뒤 이러한 특성의 원인이 되는 종관환경을 제시하였다는 점에서 이전연구와 차이를 둘 수 있다. 또한 Liu and Chan(2008)을 제외한 대부분의 유사 연구들에서는 열대 저기압 이동경로에 대한 연 변동성을 다루고 있지만(Chan, 1994; Kim et al., 2005; Xie and Yan, 2007), 본 연구는 십년간 변동성 뿐만 아니라 월 변동성도 다루었다는 특징이 있다. 각 주성분 모드별로 이동빈도의 십년간 변동경향을 분석함으로써 열대 저기압의 예측에 있어서 이동 특성뿐만 아니라 강도 특성 역시 중요함을 지적하였다. 따라서 차후연구에서는 같은 분석방법을 이용하여 북서태평양에서 열대 저기압 강도의 시·공간적 특성을 조사해 볼 것이다.

Fig. 10. Correlation coefficient between the 1st PC time series and NINO-3.4 index.

사 사

본 연구는 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 수행되었습니다. 세밀한 심사와 상세한 조언을 해주신 익명의 심사위원님께 심심한 감사를 드립니다.

참고문헌

- Camargo, S.J. and Robertson, A.W., 2007, Cluster analysis of typhoon tracks. Part I: General Properties. *Journal of Climate*, 20, 3635-3653.
- Chan, J.C.L., 1994, Prediction of annual tropical cyclone activity over the western North Pacific and the South China Sea. *International Journal of Climatology*, 15, 1011-1019.
- Elsner, J.B. and Liu, K.B., 2003, Examining the ENSO-typhoon hypothesis. *Climate Research*, 25, 43-54.
- Harr, P.A. and Elsberry, R.L., 1991, Tropical Cyclone Track Characteristics as a Function of Large-Scale Circulation Anomalies. *Monthly Weather Review*, 119, 1448-1468.
- Harr, P.A. and Elsberry, R.L., 1995a, Large-scale circulation variability over the tropical western North Pacific. Part I: Spatial patterns and tropical cyclone characteristics. *Monthly Weather Review*, 123, 1225-1246.
- Ho, C.H., Baik, J.J., Kim, J.H., and Gong, D.Y., 2004, Interdecadal changes in summertime typhoon tracks. *Journal of Climate*, 17, 1767-1776.
- Hodanish, S. and Gray, W.M., 1993, An observational analysis of tropical cyclone recurvature. *Monthly Weather Review*, 121, 2665-2689.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, R., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Jenne, R., and Joseph, D., 1996, The NCEP/NCAR 40-Year reanalysis project. *Bulletin of American Meteorological Society*, 77, 437-471.
- Kistler, R., Kalnay, E., Collins, W., Saha, S., White, G., Woollen, J., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Kanamitsu, M., Kousky, V., Dool, H., Jenne, R., and Fiorino, M., 2001, The NCEP/NCAR 50-year reanalysis. *Bulletin of American Meteorological Society*, 82, 247-267.
- Kim, J.H., Ho, C.H., Sui, C.H., and Park, S.K., 2005, Dipole Structure of Interannual Variations in Summer-time Tropical Cyclone Activity over East Asia. *Journal of Climate*, 18, 5344-5356.
- Lander, M.A., 1996, Specific tropical cyclone track types and unusual tropical cyclone motions associated with reverse-oriented monsoon trough in the western North Pacific. *Weather and Forecasting*, 11, 170-186.
- Liu, K.S. and Chan, J.C.L., 2008, Interdecadal variability of western North Pacific tracks. *Journal of Climate*, 21, 4464-4476.
- Reynolds, R.W., Rayner, N.A., Smith, T.M., Stokes, D.C., and Wang, W., 2002, An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *Journal of Climate*, 15, 1609-1625.
- Sik, K. and Chan, J.C.L., 2008, Interdecadal Variability of Western North Pacific Tropical Cyclone Tracks. *Journal of Climate*, 21, 4464-4476.
- Wang, B. and Chan, J.C.L., 2002, How strong ENSO events affect tropical storm activity over the western North Pacific. *Journal of Climate*, 15, 1643-1658.
- Xie, L. and Yan, T., 2007, West North Pacific typhoon track patterns and their potential connection to Tibetan Plateau snow cover. *Natural Hazards*, 42, 317-333.

2009년 6월 29일 접수
2009년 9월 1일 수정원고 접수
2009년 9월 18일 채택