한국방재학회논문집
제9권 6호 2009년 12월
pp. 31 ~ 39

북서태평양에서 열대 저기압 발생빈도의 십년간 변동 특성

Interdecadal Variation of Tropical Cyclone Genesis Frequency over the Western North Pacific

최기선* · 김백조** · 이성로*** · 박종길****
Choi, Ki Seon · Kim, Baek Jo · Lee, Seong Lo · Park, Jong Kil

Abstract

This study has found that there is a reverse phase with interdecadal variation in temporal variations of tropical cyclone (TC) genesis frequency (TCGF) between Northwest sector and Southeast sector, based on climatological mean tropical cyclone genesis location over the western North Pacific. The TCGF in the Northwest sector has been increased since the mid 1980s (1986-2005), while TCGF in the Southeast sector was higher until the early 1970s (1951-1970). The analysis of a difference between 1986-2005 and 1951-1970 showed results as follows: i) Through the analysis of vertical wind shear (VWS) and sea surface temperature (SST), less VWS and higher SST in the former (latter) period was located in the Northwest (Southeast) sector. ii) In the analysis of TC passage frequency (TCPF), TCs occurred in the Northwest sector frequently passed from east sea of the Philippines, through East China Sea, to Korea and Japan in the latter period, while TCs in the former period frequently has a lot of influences on South China Sea (SCS). In the case of TCs occurred in the Southeast sector, TCs in the west (east), based on 150°E had a high passage frequency in the latter (former) period. In particular, TCs during the latter period frequently moved toward from the east sea of the Philippines to SCS and southern China. iii) This difference of TCPF between the two periods was characterized by 500 hPa anomalous pressure pattern. Particularly, anomalous cyclonic circulation strengthened over the East Asian continent caused anomalous southerlies along the East Asian coast line from the east sea of the Philippines to be predominate. These anomalous winds served as steering flows that TC can easily move toward same regions.

Key words : Interdecadal variation, Genesis frequency, Tropical cyclone

요 지

본 연구에서는 북서태평양상의 기후학적 평균 열대 저기압 발생 자료를 이용하여 이 해역의 북서구역과 남동구역에서의 열대 저기압 발생빈도의 시간변화에서 십년간 변동성을 보이고 반대 위상으로 존재함을 밝혔다. 열대 저기압 발생빈도는 북서구역에서 1980년대 중반 이후부터 최근까지(1986-2005) 증가하는 반면에, 남동구역에서 1951년부터 1970년대 초반(1951-1970)까지 높게 나타났다. 1986-2005년과 1951-1970년 사이의 차이점을 분석한 결과는 다음과 같다. i) 연직바람시어와 해수면 온도의 경우, 1986-2005년 동안에는 북서구역에서, 1951-1970년의 기간에는 남동구역에서 음의 연직시어와 양의 해수면 온도 아노말리를 나타내고 있었다. ii) 열대 저기압 이동빈도를 분석해 본 결과, 북서구역에서 발생한 열대 저기압들 중에서 1986~2005년 동안에는 주로 남중국해에 영향을 주는 빈도가 높았던 반면, 1951-1970년 동안에는 필리핀 동쪽 해상으로부터 동중국해를 지나 한국 및 일본을 통과하는 빈도가 높았다. 남동구역에서 발생한 열대 저기압들의 경우에 대략 150°E를 기준으로 이동빈도의 공간분포가 동서로 나눠질 수 있다. 1951-1970년 동안의 열대 저기압들은 150°E의 서쪽에서, 1986-2005년 동안의 열대 저기압들은 150°E의 동쪽에서 주로 이동하는 특성을 보였다. 특히, 1951-1970년 동안에 발생한 열대 저기압들은 필리핀의 동쪽 해상으로부터 남중국해 및 남중국 방향으로 이동하는 빈도가 높았다. iii) 두 기간 사이에 열대 저기압 이동빈도의 이러한 차이는 500 hPa 아노말리 기압패턴에 그 원인이 있다. 특히 1951-1970년 동안에는 동아시아 대륙에 저기압성 순환의 아노말리가 형성되어 필리핀 동쪽해상으로부터 동아시아 해안을 따라 남풍 아노말리가 강화되었다. 이 남풍 아노말리는 열대 저기압이 필리핀 동쪽해상으로부터 동아시아 해안을 따라 이동하기 쉽게 하는 지향류의 역할을 하였다.

핵심용어 : 십년간 변동, 발생빈도, 열대 저기압

*정회원 · 기상청 국립기상연구소(E-mail:choiks@kma.go.kr)
**정회원 · 기상청 국립기상연구소 정책연구과 과장
***국립목포대학교 내풍기술연구단 단장
****정회원 · 인제대학교 환경공학부/대학원 대기환경정보공학과 교수

1. 서 론

매년 전 세계에서 발생하는 열대 저기압 중 1/3 이상이 북서태평양에 위치한다. 열대 저기압 활동 메커니즘에 대한 좀 더 나은 이해는 열대 저기압에 의해 발생하는 재해의 예방에 도움이 될 수 있으며, 이를 위해 많은 연구가 이루어져왔다. 이러한 연구들의 대부분은 열대 저기압 발생의 경년 변동성에 초점을 두고 있다.

먼저 열대 저기압 발생빈도에 대한 연구들로서 Atkinson(1977)은 1972년 여름동안 북서태평양의 동쪽지역에서 발생한 열대 저기압의 빈도가 평균보다 많았음을 보였다. Chan(1985)은 스펙트럴 분석을 통해 El Niño-Southern Oscillation(ENSO)가 열대 저기압의 발생빈도와 밀접한 관계에 있음을 제시하였다. 반면 Ramage and Hori(1981)는 앞서 제시한 두 변수 사이에는 뚜렷한 상관관계가 존재하지 않았음을 주장하였다. 한편 열대 저기압의 발생위치와 ENSO 사이의 관계에 대한 연구들도 있다. Chan(1985), Dong(1988) 그리고 Lander(1994)는 엘니뇨 해 동안에는 160°E의 서쪽지역에서 발생하는 열대 저기압의 빈도는 감소하는 반면, 160°E의 서쪽 중 20°N의 남쪽에서 발생하는 열대 저기압의 빈도는 증가함을 보였다. 또한 이 연구들은 라니냐 해 동안에는 반대의 패턴이 형성됨을 언급하였다. Lander(1994)는 열대 저기압발생의 우호적인 지역은 주로 몬순기압골이 위치하고 있으며, McBride(1995)는 열대 저기압의 주 발생지역은 해수면 온도가 26.5°C이상인 동시에 몬순기압골이 위치하는 지역들과 대체로 일치함을 보였다. 그러나 Chen et al.(1998)은 몬순기압골의 남북 또는 동서로의 이동이 해수면 온도 분포보다 열대 저기압의 발생위치에 더욱 중요한 변수임을 주장하였다. 더욱이 Chan(2000)은 열대 저기압의 발생 및 빈도가 엘니뇨, 라니냐 해들뿐만 아니라 이 해들 전후 해들에도 큰 변동성이 있음을 발견하였다. 그는 또한 이러한 특징에 대한 사례분석을 통해 열대 저기압 발생의 위치 및 빈도와 종관패턴을 연관시키고자 노력하였다. 위의 연구들에서 살펴본 것처럼 북서태평양 열대 저기압의 연구는 주로 경년 변동성에 초점이 맞추어져 있음을 알 수 있다.

열대 저기압의 경년 변동성에 대해 축적된 연구에 비하여 십년간 변동성에 대한 연구는 많지 않다. Gray et al.(1992)는 매년 열대 저기압의 발생빈도는 하부성층권에서의 동서류의 서풍 위상동안 강화되는 경향이 있음을 제시하였다. Zhang et al.(1994)은 비록 물리적 메커니즘을 밝히지는 못했지만, 열대 저기압 발생빈도는 6, 15, 21, 31년의 주기성이 있음을 발견하였다. 그들은 역시 1931, 1959, 1977년에 열대 저기압 발생빈도에서 큰 변화가 있었음을 보였다. Chan and Shi(1996)는 2차 다항 회귀방정식을 이용하여 전체적으로는 1990년대 초 이후 열대 저기압의 발생빈도가 증가하고 있음을 확인하였다. 하지만 이러한 증가추세는 2000년대 이후 다시 감소추세로 역전되고 있다. Yumoto and Matsuura(2001)는 최근 49년(1951-1999)의 기간을 열대 저기압 발생빈도를 기준으로 두개의 다빈도 기간(1961-1972, 1986-1994)과 두개의 저빈도 기간(1951-1960, 1973-1985)으로 나눠질 수 있음을 보였다. 게다가 Matsuura et al.(2003)은 고해상도 전구모형을 이용하여 최근 50년을 장기 모의한 결과 이러한 열대 저기압 발생빈도의 십년간 변동성을 지구온난화와 관계하여 설명하였다. 또한 Chan(2005)은 북서태평양 열대 저기압 발생빈도의 십년간 변동성은 ENSO나 Quasi-Biennial Oscillation (QBO) 등과 같은 열대진동 현상으로부터 그 메커니즘의 설명이 어느 정도 가능하나, 북태평양 고기압의 위치, 강도 및 확장 정도의 다변성 때문에 열대 저기압의 이동 및 강도의 십년간 변동은 좀 더 깊은 연구가 이루어져야 함을 제안하였다. Chia and Ropelewski(2002)는 역시 ENSO는 열대 저기압의 계절예측을 위한 중요한 변수이지만, 유일한 변수가 아님을 제안하였다.

열대 저기압의 발생 및 활동에 대해 국내 여러 연구자들에 의해서도 이루어졌다. 대표적인 연구들로서 Kim et al.(2005)는 북서태평양에서 발생한 열대 저기압의 이동빈도에 대한 경험적 직교함수 분석을 통해 동아시아 지역에서 열대 저기압의 주 이동형태는 쌍극자 구조가 강함을 보인바 있다. Kwon et al.(2007)과 차은정 등(2009)은 Normalized Typhoon Activity(NTA)를 이용하여 1951년부터 2008년까지 58년간 북서태평양의 열대 저기압의 활동도를 분석하였다. 열대 저기압의 활동도 역시 열대 저기압의 발생빈도와 같이 경년 변동성뿐만 아니라 강한 십년간 변동성을 잘 반영함을 보인바 있다. Choi et al.(2009)는 한국 상륙 열대 저기압의 경년 변동성 분석을 통해 Yumoto and Matsuura(2001)와 같이 두개의 다빈도 기간(1951-1965, 1986-2004)과 하나의 저빈도 기간(1966-1985)이 존재함을 보였다. 한편 북서태평양에서의 열대 저기압 발생 및 이동특성은 남극진동, 북극진동, 북태평양 진동 등과 같이 다양한 기후인자들과 깊은 연관성이 있음이 분석되기도 하였다(Ho et al. 2005 ; Choi et al. 2009).

따라서 본 연구는 열대 저기압 발생빈도의 십년간 변동성에 초점을 둔다. 북서태평양에서 열대 저기압의 십년간 변동성과 관련되는 위 대부분의 연구들은 북서태평양 전체영역에 초점을 두고 있지만, 본 연구는 북서태평양을 세분화하여 그 변동성을 살펴보고자 한다.

2. 자료 및 분석 방법

2.1 자료

본 연구에서 사용된 열대 저기압자료는 Regional Specialized Meteorological Center (RSMC)-Tokyo에서 제공하는 열대 저기압의 최적경로이다. 이 자료는 6시간 간격의 열대 저기압 중심기압(hPa), 중심최대풍속(kt) 및 중심위치(위도 · 경도) 등을 포함하며, tropical depression(TD)-tropical storm(TS)-severe TS-Typhoon(TY)-extratropical cyclone(EC)의 모든 강도 단계를 포함한다. 또한 열대 저기압의 발생과 연관된 대기순환의 특성을 보기 위해 National Center for Environmental Prediction-the National Center for Atmospheric Research (NCEP-NCAR, Kalnay et al., 1996 ; Kistler et al., 2001) 재분석 자료 중 바람 (m s^{-1}), 지위고도 (gpm)의 변수가 사

용되었다. 이 자료는 위·경도 2.5°, 연직으로 17개의 층으로 구성되어져 있다. 또한 이 연구는 TC의 발생에 영향을 주는 해양의 특성을 살펴보기 위해 NOAA Extended Reconstructed (ER) Sea Surface Temperature(°C) Ver. 3b(이후 SST라 함) 자료를 사용하였다(Reynolds et al., 2002). 이 자료는 월 평균되어 있으며, 공간해상도는 위·경도 2°로 이루어져 있다. 위의 재분석 자료는 모두 NOAA의 Climate Diagnostics Center(CDC)의 웹사이트 (http://www.cdc.noaa.gov/Datasets)를 이용하여 구하였다.

2.2 분석방법

북서태평양에서 매년 발생하는 열대 저기압의 약 60%가 여름 (7, 8, 9월)에 집중되어 있다(Chia and Ropelewski, 2002). 그러므로 이 연구는 이 세 달을 여름으로 정의하였다. 열대 저기압의 발생 및 이동빈도는 매 5°×5° 격자간격마다 열대 저기압이 발생 하거나 이동하였을 경우를 계산하였다. 단, 동일한 열대 저기압이 한 격자를 두 번 이상 이동한 경우에는 한번으로 간주하였다.

열대 저기압의 활동과 관련되는 환경 특성을 알아보기 위해 아래의 식(1)과 같이 연직바람시어가 계산되었다.

$$VWS = \sqrt{(uwnd_{200} - uwnd_{850})^2 + (vwnd_{200} - vwnd_{850})^2} \qquad (1)$$

여기서 uwnd와 vwnd는 동서 및 남북류를 의미하며, 200, 850은 각각 200 hPa과 850 hPa 층을 나타낸다.

이 연구에서 엘니뇨 및 라니냐 해들은 Niño-3.4 지역 (5°N-5°S, 120°-170°W)에서의 3개월 평균 해수면 온도 아노말리가 ±0.5°C보다 크거나 작은 상태가 적어도 5 시즌 이상 지속될 경우로 각각 정의되었다.

3. 열대 저기압 발생의 기후학적 특징

그림 1은 북서태평양에서 5°×5° 격자간격마다 1951-2007년 (57년) 기후평균 열대 저기압 발생빈도를 나타낸 것이다. 열대 저기압의 주 발생지역은 필리핀 동쪽해상(10°-20°N, 115°-150°E)임을 볼 수 있다. 이 지역에서는 57년 기후평균 1개에 가까운 열대 저기압이 매년 여름에 발생한다. 57년 여름 기후평균 열대 저기압의 발생 위·경도는 16°N, 142°E로 분석되었다. 이 위·경도를 기준으로 열대 저기압의 발생지역을 네 구역으로 나누었다: 북서구역(16°-30°N, 110°-142°E), 남서구역(5°-16°N, 110°-142°E), 남동구역(5°-16°N, 142°-180°E), 북동구역(16°-30°N, 142°-180°E). 여기서, 전체 영역(5°-30°N, 110°-180°E)은 57년 총 여름 열대 저기압 발생빈도의 약

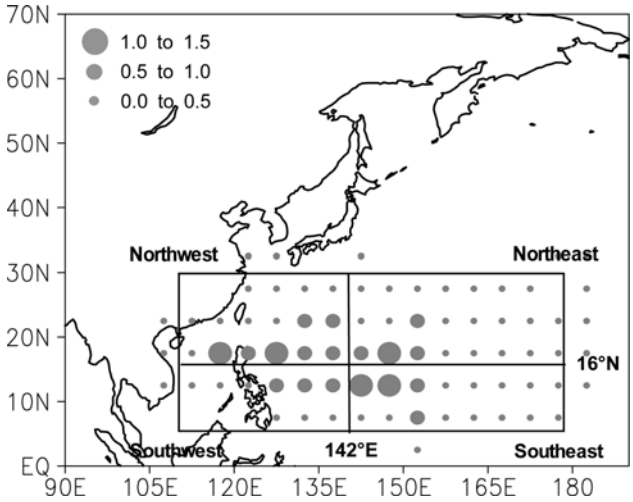

그림 1. 위·경도 5°×5° 격자마다 계산된 1951-2007년 평균 여름 (7, 8, 9월)태풍 발생빈도의 공간분포

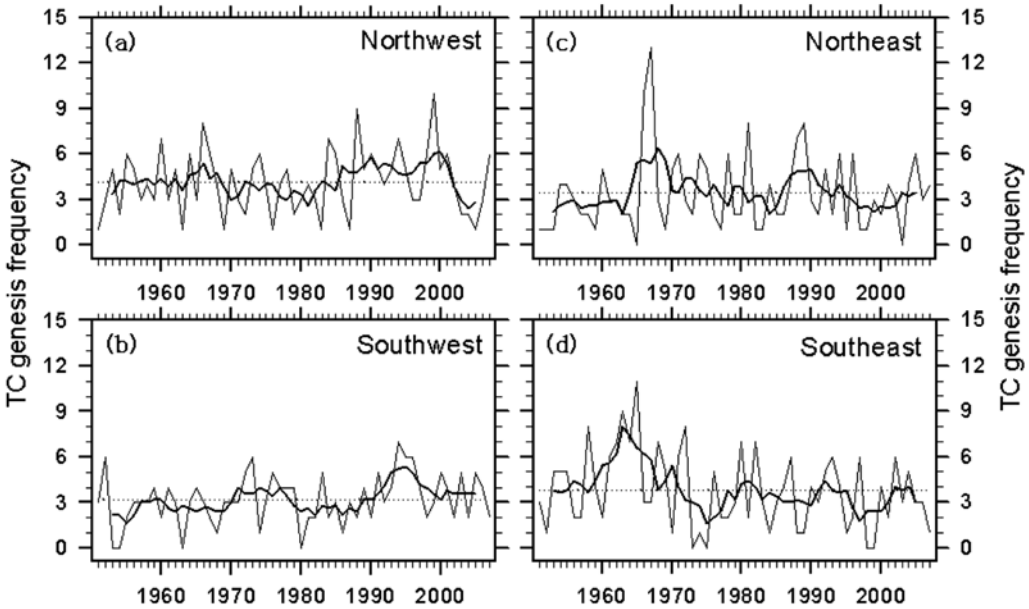

그림 2. 그림 1에서 나누어진 각 구역마다에서 태풍 발생빈도의 경년 변동(가는 실선) 및 5년 이동평균(굵은 실선). 북서, 남서, 북동, 남동 구역은 각각 16°-30°N, 110°-142°E, 5°-16°N, 110°-142°E, 16°-30°N, 142°-180°E, 그리고 5°-16°N, 142°-180°E임. 점선은 각 구역에서 구해진 기후학적 평균 태풍 발생빈도를 의미

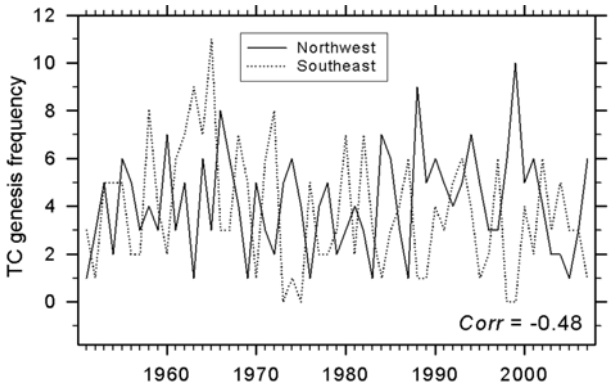

그림 3. 북서(실선) 및 남동(점선) 구역에서 구해진 태풍 발생빈도의 경년 변동

98%를 차지하는 지역이다.

네 구역마다 열대 저기압 발생빈도의 경년 변동성을 살펴보았다(그림 2). 전체적으로 서쪽 구역(북서 및 남서 구역)에서는 열대 저기압 발생빈도가 최근까지 약한 증가추세를 보이는 반면, 동쪽 구역(북동 및 남동 구역)에서는 감소하는 추세를 나타낸다. 또한 네 구역 모두에서 십년간 변동성이 있음을 볼 수 있다. 특히, 이 변동성은 북서 및 남동 구역에서 더욱 뚜렷하다. 5년 이동평균에서 살펴보면, 북서 구역의 경우 1980년대 중반(1985년)까지는 열대 저기압 발생빈도가 이 구역에서의 평균(4.2개)과 같거나 낮다가 그 이후부터 2000년대 초까지는 평균보다 높은 발생빈도를 나타낸다. 반대로 남동구역에서는 1970년 초(1971년)까지는 이 구역에서의 평균(3.8개)보다 높다가 그 이후부터는 평균과 같거나 낮은 상태가 지속된다. 두 구역만을 놓고 보면, 1970년대 초반까지는 남동구역에서 높은 발생빈도가 나타나고, 1980년대 중반부터는 북서 구역에서 높은 발생빈도가 나타난다. 즉, 1970년대 초-1980년대 초의 기간을 제외하고 두 구역 사이에는 발생빈도의 십년간 변동성에서 반대의 위상이 존재함을 알 수 있다. 또한 이 두 지역 사이에는 이 변동성뿐만 아니라 경년 변동에서도 강한 음의 관계가 존재함을 그림 3을 통해서 확인할 수 있다. 그 관계는 95% 신뢰수준에서 -0.48의 강한 음의 상관을 나타내었다. 위의 발생빈도에 대한 십년간 또는 경년 변동성의 결과로부터 북서 (남동) 구역에서 발생빈도가 높으면, 남동 (북서) 구역에서 낮은 발생빈도가 관측됨을 알 수 있다. 한편, 남서 및 북동 구역에서는 각 구역의 평균 발생빈도보다 높고 낮음의 변동이 반복적으로 이루어짐을 볼 수 있다. 따라서 다음 장에서는 북서 구역에서 발생빈도가 높은 시기(1986-2005년: 20년)와 남동구역에서 발생빈도가 높은 시기(1951-1970년: 20년)사이에 열대 저기압의 활동과 대기 순환 사이의 비교분석이 이루어진다.

4. 십년간 변동

4.1 열대 저기압 발생빈도

두 시기 동안 7, 8, 9월 및 세 달에 대해 두 구역 사이의 열대 저기압 발생빈도 차를 살펴보았다(그림 4). 1951-1970년 동안에는 북서구역(총 81개)에서 남동구역(총 96개)에서보다

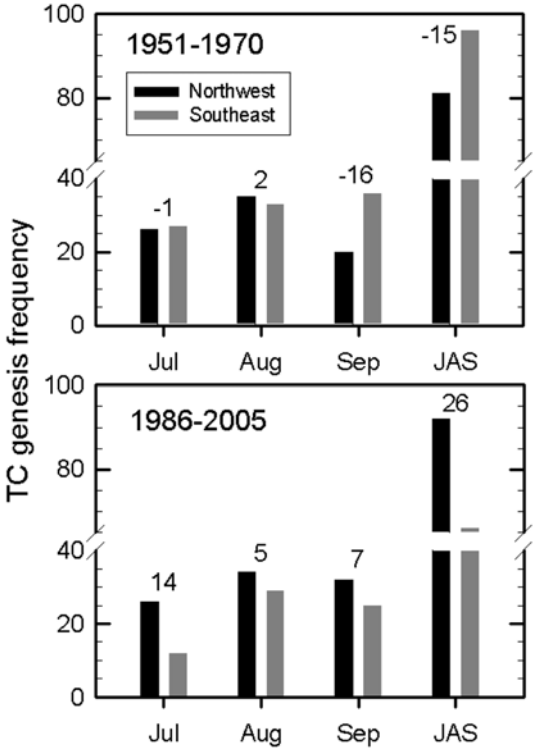

그림 4. 두 시기에 대한 북서와 남동구역에서의 태풍 발생빈도의 월 변동. 그래프 위의 숫자들은 두 시기에 대해 북서와 남동구역사이에 태풍 발생빈도의 차를 의미

15개가 적게 발생하였다. 각 달의 경우, 7월(북서 구역: 26개, 남동구역: 27개), 8월(북서구역: 35개, 남동구역: 33개)에는 두 지역 사이에 거의 비슷한 발생빈도를 보이는 반면, 9월(북서구역: 20개, 남동구역: 36개)에는 가장 큰 차이를 나타낸다.

1986-2005년 동안에는 북서 구역(총 92개)이 남동구역(총 66개)보다 26개가 더 많이 발생했다. 이 차이는 1951-1970년 동안 두 구역 사이에 나타나는 발생빈도 차이의 약 1.5배에 가깝다. 각 달의 경우 1951-1970년 동안과는 다르게, 7월에 두 지역 사이에 가장 큰 발생빈도 차를 나타낸다(북서구역: 26개, 남동구역: 12개). 8월(북서구역: 34개, 남동구역: 29개), 9월(북서구역: 32개, 남동구역: 25개)에도 크지는 않지만 북서구역에서 더 높은 발생빈도를 나타낸다. 전자의 기간에 비해 후자의 기간동안 북서 구역에서 태풍의 발생빈도가 더 높은 것은 필리핀 동쪽 해상에 몬순기압골이 최근에 더욱 발달했다는 Choi et al.(2009)의 결과와 연관되어질 것으로 판단된다.

4.2 열대 저기압 이동 빈도

두 구역 각각에서 발생한 열대 저기압들에 대해 1986-2005년과 1951-1970년 사이의 열대 저기압의 이동빈도 차를 5°×5° 격자간격마다 분석하였다(그림 5). 이 그림에서 채워진(채워지지 않은) 원은 1986-2005(1951-1970)년 동안의 이동빈도가 1951-1970(1986-2005)년 동안의 이동빈도보다 더 높다는 것을 의미한다.

북서 구역에서 발생한 열대 저기압들의 경우, 1986-2005년

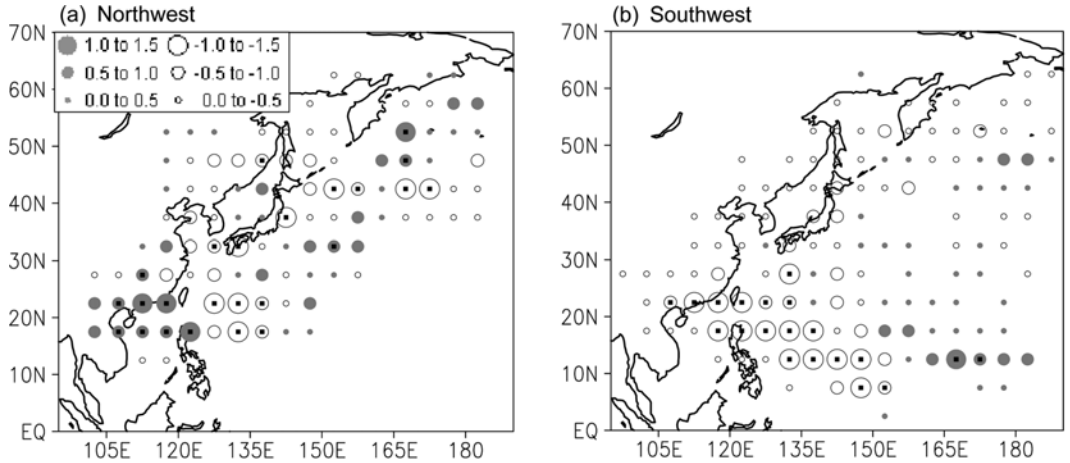

그림 5. 위·경도 5°×5° 격자마다 북서와 남동구역에서 발생한 태풍의 이동빈도에 대한 1986-2005년과 1951-1970년 사이의 차. 원안의 작은 사각형은 95% 신뢰수준에서 유의한 지역을 의미

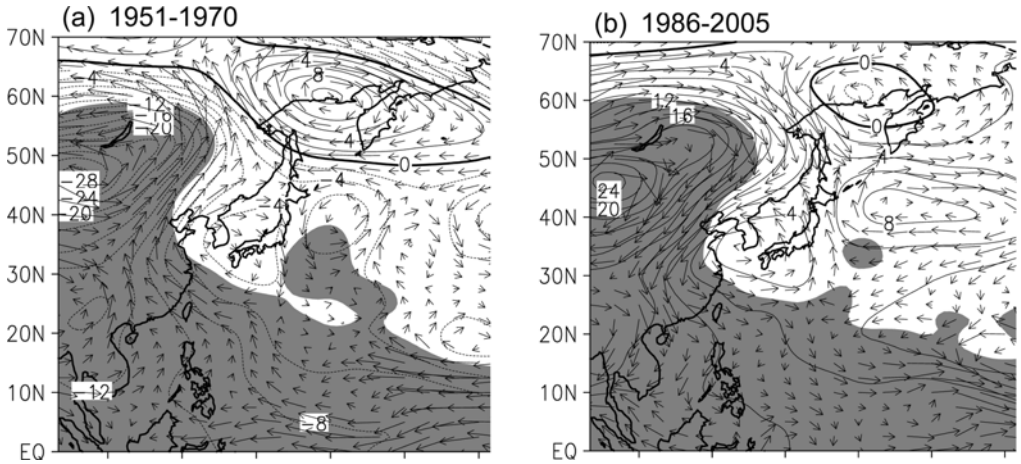

그림 6. (a) 1951-1970과 (b) 1986-2005년 동안 평균된 500 hPa 지위고도 및 바람 아노말리. 회색 영역은 95% 유의수준에서 통계적으로 유의한 지역을 의미. 등치선 간격은 2 gpm

동안에는 주로 남중국해 및 남중국에 영향을 주는 빈도가 높다. 1951-1970년 동안에는 필리핀 동쪽해상으로부터 동중국해를 지나 한국 및 일본으로 이동하는 빈도가 더 높다. 이와 같은 열대 저기압 이동빈도의 공간적 특성은 Kim et al.(2005)의 분석결과에서 보인 쌍극자 패턴과 유사하다. 남동구역에서 발생한 열대 저기압들의 경우에는 대략 150°E를 기준으로 이동빈도의 공간분포가 동서로 나눠질 수 있다. 1951-1970년 동안의 열대 저기압들은 150°E의 서쪽에서, 1986-2005년 동안의 열대 저기압들은 150°E의 동쪽에서 주로 이동하는 특성을 보인다. 하지만 150°E의 동쪽에서의 두 시기 사이에 이동빈도의 차는 150°E의 서쪽에서의 그것보다 크지 않다. 특히, 필리핀 동쪽해상으로부터 남중국으로 이어지는 지역은 1951-1970년 동안의 열대 저기압들의 이동빈도가 월등하게 더 높다. 위의 결과로부터 남중국해 및 남중국 지역에서의 열대 저기압들의 영향빈도는 과거에는 남동 구역에서 발생하는 열대 저기압들이 높았으나, 최근에는 북서 구역에서 발생하는 열대 저기압들이 주가 됨을 알 수 있다. 또한 한국 및 일본지역은 두 구역 모두에서 발생한 열대 저기압들의 영향빈도가 1986-2005년 동안보다 1951-1970년 동안에 더 높음을 알 수 있다.

4.3 종관적 특성

두 시기 사이에 두 지역 각각에서 발생한 열대 저기압들의 이동빈도 차로부터 분석된 특징은 500 hPa 지위고도 및 바람의 아노말리로부터 그 원인을 찾아볼 수 있다(그림 6). 여기서 두 시기에 대해 각 변수의 아노말리를 구하기 위한 기후값은 열대 저기압의 자료가 사용된 총 기간인 1951-2007년 여름 평균값으로 정의된다.

먼저 1951-1970년의 경우, 분석영역의 북쪽 일부지역을 제외하고 대부분의 지역에서 음의 지위고도 아노말리를 나타낸다. 이 음의 아노말리의 중심은 바이칼 호의 남서쪽에 위치해 있다. 또한 북서태평양의 아열대 및 열대 지역에서는 동풍 아노말리가 강화되어 있다. 이 동풍 아노말리는 필리핀 부근지역에서 서풍 아노말리와 합해져 동아시아 해안을 따라 북상한다. 반대로 1986-2005년 동안에는 동아시아 대륙에 고기압성 순환 아노말리가 강화되어 동아시아 해안을 따라 필리핀 동쪽해상까지 북풍 아노말리가 형성되어 있다. 또한 이 북풍 아노말리는 북서태평양의 열대 및 아열대 지역에서 서풍 아노말리로 바뀜을 볼 수 있다. 결국, 1986-2005년(1951-1970년) 동안에 동아시아 해안(필리핀 동쪽해상)으로부터 필리핀 동쪽해상(동아시아 해안)으로 이어지는 북풍(남풍) 아노

말리에 의해 그림 5에서 보았듯이 이 지역에서 이동빈도가 낮(높)아지는 원인이 된다. 하지만 1986-2005년 동안 남중국해 및 남중국에서의 높은 발생빈도의 특성은 이 분석으로부터 그 원인을 찾아볼 수 없으며, 남중국해 여름몬순과의 연관성 등과 같이 좀 더 구체적인 분석이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

북서태평양에서 열대 저기압의 발생에 영향을 주는 대기 및 해양의 특성을 살펴보기 위해, 1986-2005년으로부터 1951-1970년의 차를 연직바람시어와 해수면 온도에 대해 조사하였다(그림 7). 먼저, 연직바람시어에서는 분석영역의 북서쪽으로부터 남동쪽 방향으로 음, 양, 음, 양의 연직시어의 순으로 공간분포가 형성되어있다(그림 7a). 특히, 30°N 이하의 아열대 및 열대 서태평양에서 북서 구역에서는 음의 연직시어가, 남동 구역에서는 양의 연직시어가 뚜렷하다. 여기서 음의 연직시어는 열대 저기압의 발생에 우호적인 환경임을 의미한다. 따라서 북서(남동) 구역에서의 음(양)의 연직시어로부터 1986-2005(1951-1970)년 동안이 1951-1970(1986-2005)년보다 열대 저기압이 발생하기에 좋은 대기환경이 형성되어 있음을 알 수 있다.

해수면 온도에서는 동아시아 해안지역과 10°N 이하의 열대 서태평양에서 양의 해수면 온도가 뚜렷하다(그림 7b). 반면에 아열대 및 중위도 서태평양 지역에서는 음의 해수면 온도를 나타낸다. 특히, 연직시어 만큼 정확하게 일치하지는 않지만, 북서 구역에서는 양의 해수면 온도를 나타내고, 남동 구역에서는 음의 해수면 온도가 포함된다. 따라서 해수면 온도분석으로부터 역시 북서(남동) 구역은 1986-2005(1951-1970)년 동안이 1951-1970(1986-2005)년 동안보다 열대 저기압이 발생하기에 좋은 해양환경이 갖추어져 있음을 알 수 있다. 이와 같이 음의 연직시어는 하층 몬순 기압골의 발달을 의미하고 양의 해수면 온도는 하층 몬순기압골을 더욱 강화시킨다.

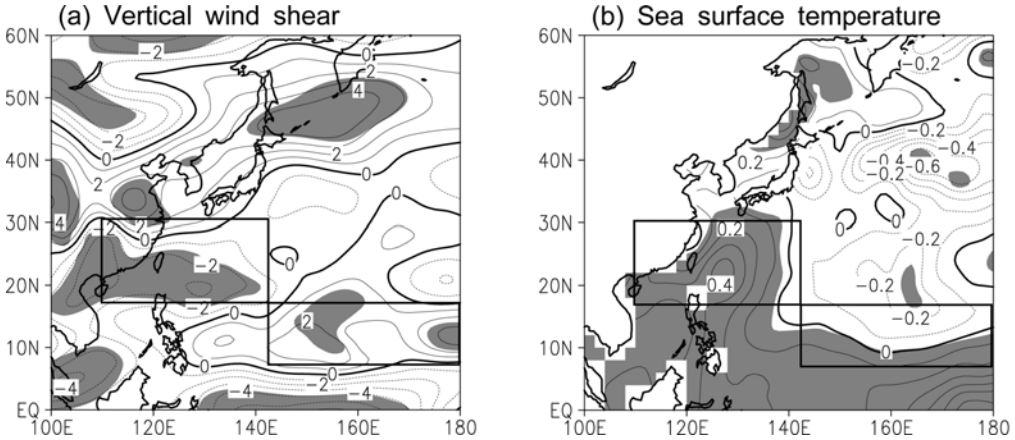

그림 7 (a) 연직 바람시어 및 (b) 해수면 온도에 대한 1986-2005년과 1951-1970년 사이의 차. 각 그림 내의 두 박스는 북서 및 남동 구역을 의미. 등치선 간격은 연직 바람시어의 경우 1 m s^{-1}, 해수면 온도의 경우 0.1℃. 회색 영역은 95% 유의수준에서 통계적으로 유의한 지역을 의미

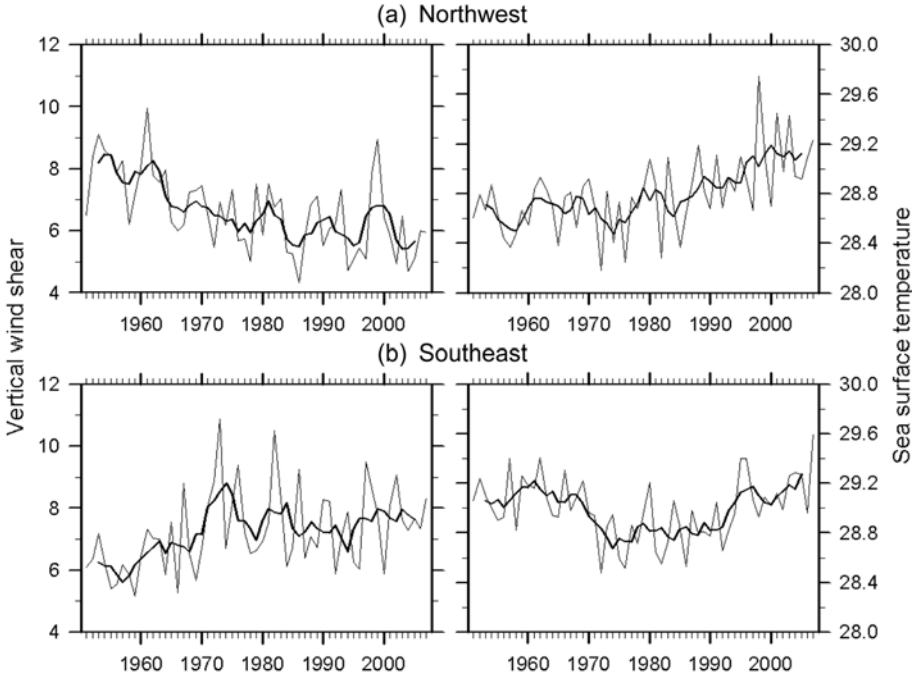

그림 8. (a) 북서 · (b) 남동구역에서 평균된 연직 바람시어(왼쪽)와 해수면 온도(오른쪽)의 경년 변동(가는 실선) 및 5년 이동평균(굵은 실선)

따라서 이 해양 및 대기의 상태는 4.1절에서와 같이 1986-2005년 동안이 이전기간보다 열대 저기압이 북서 구역에서 더욱 많이 발생하는 원인이 될 수 있다.

따라서 위와 같은 두 변수에 대한 공간변동성의 특징으로부터 최근 57년 동안 북서 및 남동 구역에서 공간평균 된 연직시어와 해수면 온도의 시계열을 분석하였다(그림 8). 먼저 연직시어의 경우 북서 구역에서는 최근까지 감소하는 추세를 나타내는 반면, 남동 구역에서는 1970년대 초반까지 증가하다가 이후로 일정해지는 패턴을 나타낸다. 두 구역에서의 이러한 추세는 5년 이동평균의 결과에서 더욱 뚜렷하게 볼 수 있다. 특히, 북서 구역에서는 1980년대 중반까지 연직시어가 지속적으로 감소하다가 그 이후로는 대체로 완만해지며, 남동 구역에서는 1970년대 초반까지 연직시어가 급격하게 증가하다가 그 이후에는 일정한 패턴을 나타낸다. 두 지역에서 연직시어의 이러한 십년간 변동은 각 지역에서의 열대 저기압 발생빈도의 십년간 변동과 대체로 일치한다. 두 지역에서의 해수면 온도변동에서도 연직시어와 비슷한 특징을 나타낸다. 북서 구역에서는 최근까지 지속적으로 증가하는 추세를 나타내는 반면, 남동 구역에서는 1950년대-1960년대 후반 및 1990년대 이후에는 높은 해수면 온도를, 1970년대-1990년대 초반까지는 낮은 해수면 온도를 나타낸다. 특히, 5년 이동평균된 결과에서 살펴보면, 북서 구역에서는 1986년부터 이 지역에서의 57년 기후평균 해수면 온도(28.8°C)보다 높아지기 시작하며, 남동 구역에서는 1970년부터 이 지역에서의 57년 기후평균 해수면 온도(29.0°C)보다 낮아지기 시작한다. 1990년대 중반부터는 다시 평균 해수면 온도보다 높아진다. 따라서 두 지역에서의 해수면 온도 변동에서 언급된 두 해들은 앞서 두 지역에서 열대 저기압 발생빈도가 급변하기 시작하는 해들과 정확하게 일치한다.

실제로, 열대 저기압의 발생위치는 엘니뇨, 라니냐의 영향을 많이 받는다. 따라서 1951-1970년 및 1986-2005년 여름 동안에 발생한 엘니뇨, 라니냐 해의 수를 조사하였다. 1951-1970년 동안에 엘니뇨, 라니냐 해들은 각각 4년(1951, 1957, 1963, 1965)과 5년(1954, 1955, 1956, 1964, 1970)이었으며, 1986-2005년 동안에는 각각 7년(1986, 1987, 1991, 1994, 1997, 2002, 2004)과 3년(1988, 1998, 1999)이었다. 따라서 전자의 시기에는 엘니뇨 또는 라니냐의 영향 중 특별히 지배적인 영향이 없는 반면, 후자의 시기에는 엘니뇨의 영향이 지배적임을 알 수 있다. 라니냐 해(1971, 1973, 1974, 1975, 1985)는 오히려 이 두 시기 사이에 있는 1971-1985년에 더 뚜렷하였다(엘니뇨: 1972, 1982). Wang and Chan(2002)은 엘니뇨(라니냐) 해에 열대 저기압들은 주로 북서태평양의 남동(북서)쪽 영역에서 발생하는 특성이 있음을 보인바 있다. 하지만 전자의 시기보다 엘니뇨의 영향이 더 큰 후자의 시기에 본 연구에서는 북서태평양의 남동 구역 보다 오히려 북서 구역에서 좀 더 높은 열대 저기압 발생빈도를 나타내었다(그림 2). 라니냐의 영향으로 인해 북서 구역에서 발생빈도가 가장 높은 빈도를 보여야 하는 1971-1985년에는 두 구역에서 모두 각 구역의 평균 발생빈도보다 낮은 상태를 보인다. 두 구역에서의 발생빈도와 엘니뇨, 라니냐와의 십년간 변동에서는 다소 차이를 보이는 반면, 두 변수 사이에 경년 변동에서는 높은 상관관계를 나타내었다(그림 생략). 57년 동안 북서 및 남동 구역에서의 발생빈도와 Niño-3.4 지수 사이에는 95% 신뢰수준에서 각각 -0.45, 0.51로 나타났다. 이는 Wang and Chan(2002)의 설명과 일치하는 결과이다. 반면 남서 및 북동 구역에서는 각각 0.05, -0.24(90% 신뢰수준)의 상관이 형성됨으로써 앞의 두 구역보다는 낮은 상관을 나타내었다. 따라서 본 연구에서 분석된 발생빈도의 변동특성은 해수면 온도의 경년 변동 외에 다른 십년간 변동을 갖는 메커니즘에 의해서도 조절되는 것으로 판단될 수 있다. Chan(2005)과 Chia and Ropelewski(2002)는 여름 대기순환에서의 변동은 몬순기압골 위치에서 변동과 북서태평양 고기압의 위치 및 강도에서의 변동에 따르며, 이러한 변동 특성들은 열대 저기압의 발생위치 및 발생빈도, 이동빈도 및 강도의 십년간 변동에 영향을 줄 수 있음을 제시한 바 있다.

5. 요약 및 결론

이 연구는 57년 동안 북서태평양에서의 여름 열대 저기압 발생빈도의 십년간 변동성을 조사하였다. 북서태평양 영역에서 57년 기후학적 평균 위·경도를 중심으로 나눠진 네 구역 중 북서 및 남동 구역에서 십년간 변동성이 더욱 뚜렷하였다. 북서 구역에서는 1980년대 중반 이후로 이 구역에서의 57년 기후학적 평균 발생빈도보다 높은 상태를 나타내었으며, 남동 구역에서는 1970년대 초반까지 이 구역에서의 57년 기후학적 평균 발생빈도보다 높았다가 그 이후로는 낮은 상태가 지속되었다. 따라서 발생빈도의 십년간 변동에서는 두 구역 사이에 반대의 패턴이 형성되어 있었다. 이런 반대의 패턴은 십년간 변동성뿐만 아니라 경년 변동성에서도 나타났다. 그러므로 이 연구는 1986-2005년과 1951-1970년 사이에 열대 저기압의 발생 및 이동특성과 이들의 원인이 되는 대기순환의 특성을 비교분석 하였다.

두 구역 사이에 월별 열대 저기압 발생빈도 차의 분석에서 1951-1970년 동안에는 9월에 가장 큰 차이가 형성되었던 반면, 1986-2005년에는 7월에 가장 큰 차이가 나타났다. 특히, 세 달 전체에 대한 두 구역 사이의 차에서는 후자시기가 전자시기에 비해 약 1.5배 정도 많이 발생하였다. 이는 후자시기 동안 북서구역에서 좀 더 약화된 연직 바람시어와 좀 더 강화된 해수면 온도가 한 원인이 되었다.

두 구역 각각에서 발생한 열대 저기압들에 대해 두 시기 사이의 열대 저기압 이동빈도 차의 분석에서, 북서 구역의 경우, 1951-1970년 동안 열대 저기압들은 필리핀 동쪽해상으로부터 동중국해를 지나 한국 및 일본으로 이동하는 빈도가 높았다. 반면에 1986-2005년 동안의 열대 저기압들은 남중국해와 남중국에 영향을 주는 빈도가 높았다. 남동 구역에서는 두 시기 사이에 대략 150°E를 기준으로 동쪽에는 발생빈도가 동서로 나눠지는 패턴을 나타내었다: 서쪽 - 1951-1970년 동안의 열대 저기압들, 동쪽 - 1986-2005년 동안의 열대 저기압들. 특히, 1951-1970년 동안에 열대 저기압들은 필리핀 동

쪽해상으로부터 남중해 및 남중국 방향으로 이동하는 빈도가 뚜렷하게 높았다.

두 구역에서 두 시기 사이에 위와 같은 열대 저기압 이동 빈도의 공간패턴이 나타나게 된 원인은 두 시기 각각에 대한 500 hPa 지위고도 및 바람의 아노말리 분석에서 찾아 볼 수 있었다. 이 분석에서 나타나는 가장 뚜렷한 특징은 동아시아 대륙에 형성되는 이상적인 기압 패턴이었다. 1951-1970년 동안에는 동아시아 대륙에 저기압성 순환의 아노말리가 형성되어 필리핀 동쪽해상으로부터 동아시아 해안을 따라 남풍 아노말리가 강화되었다. 이 남풍 아노말리는 열대 저기압이 필리핀 동쪽해상으로부터 동아시아 해안을 따라 이동하기 쉽게 하는 지향유의 역할을 하였다. 반면에 1986-2005년 동안에는 동아시아 대륙에 고기압성 순환의 아노말리가 형성되어 필리핀 동쪽해상으로부터 동아시아 해안을 따라 북풍 아노말리가 강화되었으며, 이 흐름의 아노말리는 열대 저기압이 이 지역으로 이동하는 것을 막는 역할을 하였다.

두 시기 사이에 열대 저기압 발생빈도에 영향을 주는 대기 및 해양의 특성을 연직바람시어와 해수면 온도를 통해 조사하였다. 두 변수에 대한 1986-2005년으로부터 1951-1970년 사이의 차에서도 북서 및 남동 구역에서는 각각 음의 연직시어와 양의 해수면 온도, 양의 연직시어와 음의 해수면 온도를 나타내어 북서-남동방향으로 대칭구조를 나타내었다. 또한 두 변수에 대해 이들 영역에서 평균된 시계열 역시 각 영역에서의 열대 저기압 발생빈도의 특성과 유사하였다.

이 연구는 열대 저기압 발생빈도의 십년간 변동 특성과 이에 대한 종관적 분석에만 초점을 두고 있다. 하지만 Kim et al.(2005)과 Choi et al.(2009)의 연구에서 사용되어진 경험적 직교함수 또는 변화시점(Change-point) 분석 등과 같은 다양한 통계적 분석방법을 이용하여 열대 저기압 발생빈도의 십년간 변동특성을 좀 더 자세히 분석해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국립기상연구소 주요사업 “기상기술전략개발연구”와 목포대학교 내풍기술연구단을 통하여 지원된 국토해양부 지역특화연구개발사업에 의하여 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다. 세심한 심사를 해주신 익명의 세 심사위원님들께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

차은정, 황호성, 양경조, 원성희, 고성원, 김동호, 권혁조 (2009) 2008년 태풍 특징. **대기지**, 한국기상학회, 제19호, 183-198.

Atkinson, G.D. (1977) Forecasters guide to tropical meteorology. *U.S. Air Force Tech. Rep. 240*, Air Weather Service [Military Airlift Command (MAC)], 360pp.

Chan, J.C.L. (1985) Tropical cyclone activity in the northwest Pacific in relation to the El Nio/Southern Oscillation phenomenon. *Monthly Weather Review*, Vol. 113, pp. 599-606.

Chan, J.C.L. (2000) Tropical cyclone activity over the western North Pacific associated with El Nio and La Nia events. *Journal of Climate*, Vol. 13, pp. 2960-2927.

Chan, J.C.L. (2005) Interannual and interdecadal variations of tropical cyclone activity over the western North Pacific. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. 89, pp. 143-152.

Chan, J.C. L., and Shi, J.E. (1996) Long-term trends and interannual variability in tropical cyclone activity over the western North Pacific. *Geophysical Research Letters*, Vol. 23, pp. 2765-2767.

Chen, T.C., Weng, S.P., Yamazaki, N., and Kiehne, S. (1998) Interannual variation in the tropical cyclone formation over the western North Pacific. *Monthly Weather Review*, Vol. 126, pp. 1080-1090.

Chia, H.H., and Ropelewski, C.F. (2002) The interannual variability in the genesis location of tropical cyclones in the Northwest Pacific. *Journal of Climate*, Vol. 15, pp. 2934-2944.

Choi, K.S., Kim, B.J., Kim, D.W., and Byun, H.R. (2009) Interdecadal variation of tropical cyclone making landfall over the Korean Peninsula. *International Journal of Climatology*, DOI: 10.1002/joc.1986. (Published online)

Choi, K.S., and Byun, H.R. (2008) Possible relationship between western North Pacific tropical cyclone activity and Arctic Oscillation. *Theoretical and Applied Climatology*, DOI: 10.1007/s00704-009-0187-9. (Published online)

Dong, K. (1988) El Nio and tropical cyclone frequency in the Australian region and the northwest Pacific. *Australian Meteorological Magazine*, Vol. 36, pp. 219-255.

Gray, W.M., Sheaffer, J.D., and Knaff, J.A. (1992) Influence of stratospheric QBO on ENSO variability. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Vol. 70, pp. 975-994.

Ho, C.H., Kim, J.H., Kim, H.S., Sui C.H., and Gong, D.Y. (2005) Possible influence of the Antarctic Oscillation on tropical cyclone activity in the western North Pacific. *Journal of Geophysical Reasearch*, Vol. 110, D19104, doi:10.1029/2005JD005766.

Kalnay, E., and Coauthors (1996) The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 77, pp. 437-471.

Kim, J.H., Ho, C.H., Sui, C.H., and Park, S.K. (2005) Dipole structure of interannual variations in summertime tropical cyclone activity. *Journal of Climate*, Vol. 18, pp. 5344-5356.

Kistler, R., and Coauthors (2001) The NCEP/NCAR 50-year reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 82, pp. 247-267.

Kwon, H.J., Lee, W.J., Won, S.H., Cha, E.J. (2007) Statistical ensemble prediction of the tropical cyclone activity over the western North Pacific. *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, L24805, doi:10.1029/2007GL032308.

Lander, M.A. (1994) An exploratory analysis of the relationship between tropical storm formation in the western North Pacific and ENSO. *Monthly Weather Review*, Vol. 122, pp. 636-651.

Matsuura, T., Yumoto, M., and Iizuka, S. (2003) A mechanism of interdecadal variability of tropical cyclone activity over the western North Pacific. *Climate Dynamics*, Vol. 21, pp. 105-117.

McBride, J.L. (1995) Tropical cyclone formation. Global Perspective on Tropical Cyclones, *WMO Tech Doc. 693*, World Meteorological Organization, pp. 63-105.

Ramage, C.S., and Hori, A.M. (1981) Meteorological aspects of El Nio. *Monthly Weather Review*, Vol. 109, pp. 1827-1835.

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*, Vol. 15, pp. 1609-1625.

Wang, B., and Chan, J.C.L. (2002) How strong ENSO events affect tropical storm activity over the western North Pacific. *Journal of Climate*, Vol. 15, pp. 1643-1658.

Yumoto, M., and Matsuura, T. (2001) Interdecadal variability of tropical cyclone activity in the western North Pacific. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 79, pp. 23-35.

Zhang, G., Zhang, X., and Wei, F. (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, pp. 315-323.

◎ 논문접수일 : 09년 08월 24일
◎ 심사의뢰일 : 09년 08월 28일
◎ 심사완료일 : 09년 10월 22일