

태풍 강도와 발생지역의 상관성 연구: ENSO 발달과 소멸의 영향

장새롬 · 하경자*

부산대학교 지구환경시스템학부, 609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30

On the Relationship between Typhoon Intensity and Formation Region: Effect of Developing and Decaying ENSO

Sae-Rom Jang and Kyung-Ja Ha*

Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

Abstract: This study investigates the influence of the developing and decaying El Niño-Southern Oscillation (ENSO) on the relation between typhoon intensity and its formation. From the long-term data of 57 years (1950-2006), we first defined the developing El Niño years and the neutral years. During the developing El Niño years, the typhoon intensity has a strong relationship with formation region of the tropical cyclone, which results in an increase of the accumulated cyclone energy and intensity of energy of typhoon. During the developing El Niño year based on Niño 3.4 SST, the locations for the formation of the category 4+5 typhoon move to the eastward region. The genesis potential function and the low-level cyclonic vorticity have an important role on the formation of strong tropical cyclones, which eventually develop as a typhoon class. In this study, the dynamic potential (DP) function (Gray, 1977) and EOF 1 and EOF 2 time series (RMM 1 and RMM 2) of real-time multivariate MJO (Wheeler and Hendon, 2004) are used to measure the genesis potential and the low-level cyclonic vorticity, respectively. To investigate the influence of the developing and decaying ENSO, we defined the Type I case of the decaying El Niño that turnovers to La Niña, and the Type II case of the recovering years to the neutral condition. During the decaying El Niño years as Type I, the locations of the strong DP, RMM 1 and RMM 2 move to the westward more prominently to induce retard of the strong typhoon developing.

Keywords: typhoon, intensity, formation, ENSO

요약: 본 연구에서는 El Niño-Southern Oscillation(ENSO) 발달과 소멸의 영향에 따른 태풍 강도와 태풍 발생지역의 상관성을 살펴보았다. 1950년부터 2006년까지의 장기간 자료를 이용하였으며, 먼저 엘니뇨 발달해와 정상해를 정의하였다. 엘니뇨 발달해 동안에 태풍 강도와 태풍 발생지역이 높은 상관성을 나타내고 이는 누적 저기압 에너지와 태풍 에너지 강도가 증가한 결과이다. Niño 3.4 지역의 해수면 온도를 기준으로 한 경우 엘니뇨 발달해에는, category 4+5에 해당하는 태풍의 발생지역이 동쪽으로 치우쳐 나타난다. 태풍 발생 잠재 함수와 하층의 저기압성 회전성은 태풍급에 해당하는 강도로 발달할 수 있는 강한 열대성 저기압의 발생에 중요한 요소가 된다. 본 논문에서는 역학적 잠재력[DP, Gray(1977)]과 MJO의 EOF 첫 번째 모드와 두 번째 모드의 시계열에 해당하는 RMM 1, RMM 2(Wheeler and Hendon, 2004)를 이용하여 태풍 발생의 잠재함수와 대기 하층의 저기압성 회전성을 측정하였다. ENSO가 발달하는 해와 소멸하는 해의 영향을 찾아보기 위하여 엘니뇨가 소멸이 급격히 일어나 라니냐로 전환되는 Type I과 정상해로 회복하는 Type II를 정의하였다. Type I의 엘니뇨 소멸기간 동안에는 DP값과 RMM 1, RMM 2의 발달이 현저하게 서쪽으로 치우쳐 나타나며 강한 태풍의 발달을 지체시킴을 알 수 있었다.

주요어: 태풍, 강도, 발생지역, ENSO

*Corresponding author: kjha@pusan.ac.kr

Tel: 82-51-510-2177

Fax: 82-51-515-1689

서 론

엘니뇨(El Niño)는 열대 태평양에서 일어나는 대규모의 해수면 온도 변동으로, 이로 인한 대기-해양 순환의 변화는 여러 지역의 열대성 저기압 활동에 영향을 미치고 있음이 알려져 있다. Gray(1984)는 엘니뇨가 북대서양 지역의 허리케인 발생에 영향을 미침을 보였고, Hastings(1990)는 남서태평양에서 발생하는 열대성 저기압의 빈도수가 안티엘니뇨(anti-El Niño) 해에 호주의 동쪽 지역에서 증가함을 밝힌바 있으며, Anthes(1982)는 북서태평양에서 발달하는 태풍의 발생과 진로가 엘니뇨의 영향을 받고 있음을 보고한 바 있다. 특히, 1997/98년에 발생한 엘니뇨 현상은 그 강도가 매우 강했으며, 1998년 5월 이례적으로 강하게 발달한 무역풍의 영향으로 급격히 증식된 특징을 가지고 있다(Takayabu et al., 1999). 이와 같은 1997/98 엘니뇨 현상을 통해서 ENSO와 인도양의 기후시스템과의 상관성, 다양한 ENSO 이론 등과 같은 물리적 과정에 대한 많은 연구가 이루어졌다(Saji et al., 1999; Webster et al., 1999; Yu and Rienecker, 2000; Wang and McPhanden, 2001). 또한, 1997/98년의 엘니뇨 현상이 발생한 이후로 미국 북서부의 태평양 연안에서 강한 열대폭풍 발생의 증가와 같은 기후변화의 특징들이 나타나고 있다(Lander and Guard, 2001; Allan and Komar, 2002).

북서태평양에서 발달하는 태풍과 ENSO와의 상관성에 대한 연구는 많은 선행 연구들을 통해서 이루어져 왔다. 특히, 태풍 발생횟수와 ENSO는 비선형적인 상관관계를 가지지만, ENSO에 의해 영향을 받고 있음이 규명되어졌다(Chan, 2000; Chen et al., 1998; Wang and Chan, 2002). 또한, 강한 엘니뇨 발달해에 발생한 태풍은 그 발생지점이 남동쪽으로 치우쳐진 경향이 뚜렷하게 나타나며, 엘니뇨 해에 중앙 태평양 지역에 열대성 저기압 발생수가 증가함이 밝혀진 바 있다(Wang and Chan, 2002; Clark and Chu, 2002). 이와 같이 초기에는 대부분의 선행연구가 태풍의 발생지역과 발생횟수를 중심으로 연구되어 왔다. 그러나, 최근에는 ENSO가 태풍 강도에 미치는 영향에 대한 연구 또한 많이 진행되고 있다. 그 예로 Accumulated Cyclone Energy(ACE)와 ENSO index의 높은 상관도를 통해서 태풍의 강도와 ENSO의 상관성이 제시된 바 있다(Camargo and Sobel, 2005). 이와 같이 ENSO의 영향에 따른 태풍 발생지역의 변

화와 태풍 강도의 변화에 대한 연구는 많은 선행 연구를 통해서 이루어졌다. 하지만, ENSO가 발달하고 소멸함에 따라 나타나는 태풍 강도와 태풍 발생지역의 상관성의 변화에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다. 이에, 본 연구에서는 태풍 강도와 발생지역의 상관성을 살펴보고, 엘니뇨의 발달과정에 따른 분류를 통해 ENSO 발달과 소멸이 태풍 강도와 발생지역의 상관성에 미치는 영향을 이해해보고자 한다.

자료 및 분석방법

본 연구에서 사용한 태풍 자료는 미국 공군의 Joint Typhoon Warning Center(JTWC)에서 제공하는 자료로서, 1950년부터 2006년까지 57년 동안 북서태평양에서 발생한 모든 태풍의 6시간 간격 위치와 최대 풍속 자료를 제공한다. 태풍은 Saffir-Simpson scale을 기준으로 최대풍속 값이 64 knots 미만인 경우(이하 TD-TS)와 64 이상 114 knots 미만인 경우(이하 category 1+2+3), 최대풍속이 114 knots 이상인 경우(이하 category 4+5)로 구분하여 분석하였다.

해수면 온도자료는 두 가지의 자료를 이용하였다. 첫 번째 자료는 British Atmospheric Data Centre(BADC)에서 제공하는 HadISST로 1870년부터 현재까지의 장기간의 자료라는 장점이 있다. 본 연구에서는 사용된 자료의 기간은 1950년 1월부터 2006년 12월까지 월별 자료이며, 수평격자 간격은 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 이다. 두 번째 자료는 National Centers for Environmental Prediction(NCEP)에서 제공하는 Optimum Interpolation Sea Surface Temperature analysis version 2(OIv2 SST)로, 이 자료는 최적내삽법(Reynolds and Smith, 1994)을 사용하여 재구성한 자료이며, 1981년 12월부터 현재까지 자료가 제공되고 있다. 주간별 자료가 제공된다는 장점이 있으며 수평격자 간격은 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 로 HadISST와 동일하다. Outgoing Longwave Radiation(OLR) 자료는 National Oceanographic and Atmospheric Administration(NOAA)의 일자료를 이용하였으며, 이의 기상장 분석은 NCEP에서 제공하는 재분석 자료를 이용하였다.

ENSO 사이클의 영향을 분석하기 위해서 1950년부터 2006년까지의 기간 중 정상해(Neutral year)와 엘니뇨 발달해(developing El Niño year)를 구분하여 그 차이를 분석하였다. 엘니뇨 발달해를 구분하기 위해서 엘니뇨 현상의 발생 유무가 기준이 되는데, 본

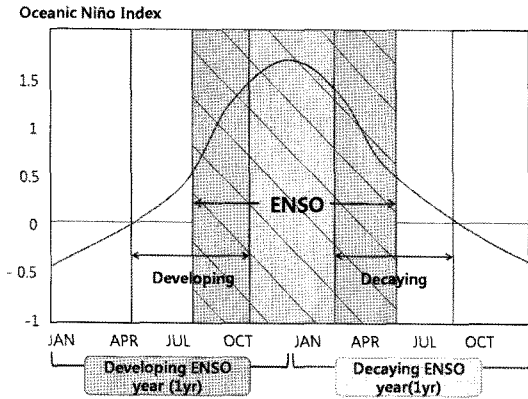


Fig. 1. Schematic diagram of Oceanic Niño Index for the developing and decaying El Niño.

연구에서는 NCEP에서 제공하는 Oceanic Niño index (ONI)가 $+0.5^{\circ}\text{C}$ 의 값이 5개월 이상 지속 될 때를 엘니뇨 현상의 발생으로 규정하였으며, 반대로 -0.5°C 의 값이 5개월 이상 지속 될 때를 라니냐 현상의 발생으로 규정하였다. ONI는 Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 2(ERSST.v2)자료 (Smith and Reynolds, 2004)로 Niño 3.4 지역(5°N - 5°S , 120°W - 170°W)에서 해수면 온도 아노말리 값의 3개월 이동 평균값으로 정의되며, 기후값은 1971년부터 2000년까지의 30년 자료를 기준으로 한다. ENSO 사이클을 고려하기 위해, 많은 선행연구들에 의해 ENSO가 발달한 경우 DJF 기간에 걸쳐 최대 진폭을 보임이 이미 구명되었고(Rasmusson and Garpenfer, 1982), 이에 본 연구에서는 이러한 ENSO 사이클을 고려하기 위해 DJF 기간을 중심으로 이전의 해를 발달해라 하고, 이후의 해를 소멸해로 나타내었다(Fig. 1). 그리고 분석기간은 태풍발생이 많은 7월부터 10월까지의(JASO) 기간을 선정하였다. 또한, 엘니뇨 소멸기에 해수면 온도의 변화에 따라 Type I과 Type II로 구분하였다. Type I은 엘니뇨 소멸기에 Niño 지역의 해수면 온도가 급격히 변화하여 라니냐 현상이 발달하는 경우이며, Type II는 엘니뇨 소멸기에 Niño

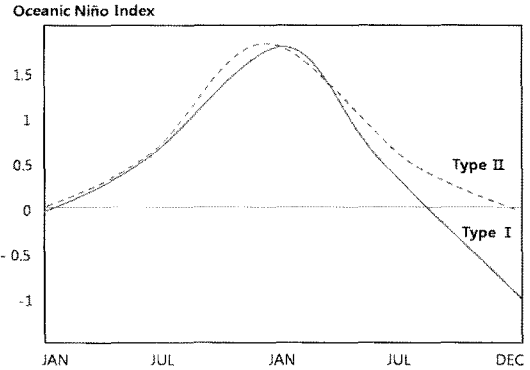


Fig. 2. Schematic diagram of Oceanic Niño Index for Type and Type II.

지역의 해수면 온도의 변화가 급격하지 않고 정상해로 돌아가는 경우로 구분하였다(Fig. 2). 이러한 기준을 통해서 선정된 사례는 Table 1에 나타내었다.

태풍 강도와 태풍 발생지역의 특성에서 ENSO의 영향

태풍 강도에 따른 태풍 발생지역의 특징

1950년부터 2006년까지의 기간 동안 발생한 전체 태풍 자료를 이용하여 TD-TS, category 1+2+3, category 4+5에 해당하는 태풍 강도에 따른 태풍의 발생지역을 Fig. 3에 나타내었다. 태풍 발생 횟수는 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 의 격자 간격으로 발생한 태풍의 횟수를 누적하여 나타내었다. 분석 기간인 57년 동안 발생한 모든 태풍의 발생지역을 살펴보면 대부분의 태풍이 발생하는 지역은 110°E - 180°E , 5°N - 30°N 에 해당하는 지역임을 알 수 있다(Fig. 3a). 하지만, 강도별로 구분하였을 때, 강도가 강한 태풍일수록 발생지역이 남동쪽으로 치우치는 경향을 보이고 있다(Fig. 3b, 3c, 3d). 이러한 경향은 평균 발생지점을 통해서 뚜렷하게 나타남을 확인할 수 있는데, 태풍 전체는 평균 발생지점이 141.95°E , 13.55°N 인데 반해, 태풍 강도별로 TD-TS 일 때 137.19°E , 14.71°N , category 1+2+3일 때

Table 1. The classification of the Neutral, developing El-Niño, type I, and type II years

	Neutral	developing El-Niño	Type I	Type II
Case Years	1952, 1953, 1958, 1959, 1960, 1962, 1966, 1978, 1979, 1980, 1981, 1985, 1989, 1990, 1992, 1993, 1996, 2001, 2003, 2005 (20 years)	1951, 1957, 1963, 1965, 1968, 1969, 1972, 1976, 1977, 1982, 1987, 1991, 1994, 1997, 2002, 2004, 2006 (17 years)	1963/1964, 1969/1970, 1972/1973, 1982/1983, 1987/1988, 1994/1995, 1997/1998 (7 cases)	1951/1952, 1957/1958, 1965/1966, 1977/1978, 1991/1992, 2002/2003, 2004/2005 (7 cases)

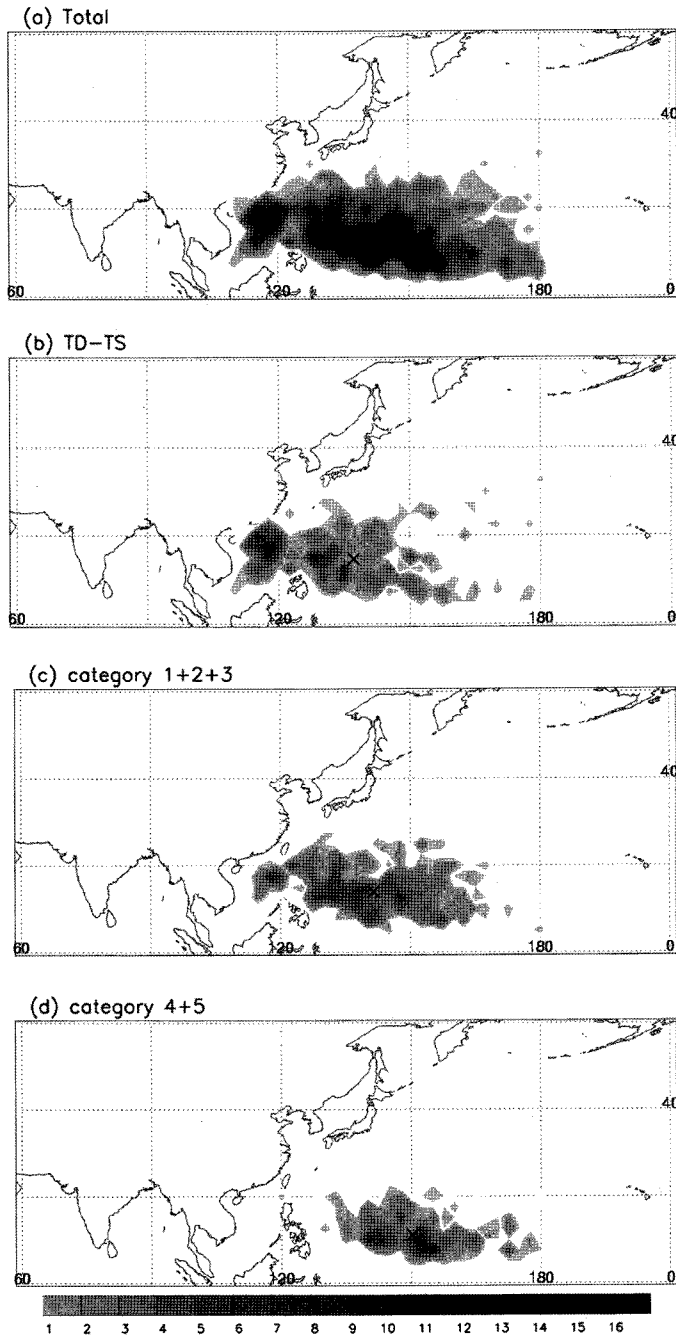


Fig. 3. The total number of Typhoon occurrence for (a) total, (b) TD-TS, (c) category 1+2+3, and (d) category 4+5 during the period from 1950 to 2006. The 'X' denotes the mean locations of formation of tropical depression.

141.45°E, 13.95°N, category 4+5일 때 150.38°E, 11.05°N로 나타난다. 이와 같이 발생지역은 위도보다는 경도에서 차이를 보이기 때문에 본 연구에서는 강도에 따라서 발생지역의 경도차이를 중점적으로 분

석하였다. TD-TS와 전체 평균 발생지점을 비교하였을 때 4.76°의 경도차이를 보이며, category 4+5와 전체 평균 발생지점은 8.43°의 차이를 보이고 있다. 이는 자유도가 각각 2228, 1994으로 정규분포를 가정

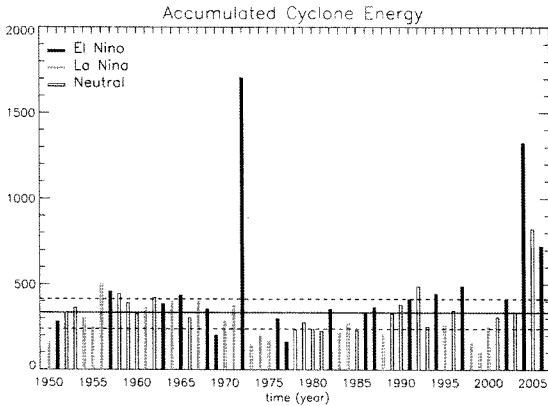


Fig. 4. ACE per year in the period from 1950 to 2006. The horizontal lines show the 25th and 75th percentiles (dashed) and median (solid).

하였을 때, 95% 신뢰수준을 만족하고 있다. 이와 같은 결과를 통해서 태풍 강도와 태풍 발생지역이 상관성을 가지고 있음을 짐작할 수 있으며, 다음장에서 태풍 강도와 태풍 발생지역이 상관성을 가지는 원인을 분석하고자 한다.

태풍 발생과 ENSO

태풍 발생의 경년변화와 ENSO의 상관성을 살펴보기 위해서 태풍의 강도를 나타내는 지수인 Accumulated Cyclone Energy(ACE)의 경년변화를 엘니뇨해와 라니냐해, 정상해로 구분하여 함께 나타내었다(Fig. 4). ACE는 아래와 같이 계산되며 태풍의 지속시간, 강도, 발생 수에 의해서 결정된다(Bell et al., 2000).

$$ACE = \sum(V_{max}^2/10^4) (10^4 \text{ kt}^2) \quad (1)$$

여기서 V_{max} 는 6시간 간격의 최대 풍속이며, TD 상태에 해당하는 34 knots 이하의 풍속은 제외한다. 가로 실선과 점선을 통해서 중간값과 상위 25%, 하위 25%의 값을 나타내었는데, 중간값 이상에 해당하는 해의 약 50%가 엘니뇨 해이며, 상위 25%에 해당하는 14해 중 8해가 엘니뇨 해이며, 5해가 정상해, 한 해만이 라니냐 해로 나타났으며, 이를 통해서 엘니뇨 해에 ACE가 정상해와 라니냐 해에 비해서 큰 값을 보임을 알 수 있었다.

위에서 살펴본 바와 같이 태풍의 강도와 ENSO가 상관성을 가지고 있음을 짐작할 수 있으며, 이에 태풍 발생과 ENSO의 상관관계를 살펴보기 위해서 7월부터 10월까지의 ACE와 월별 ENSO 지수들과의 시

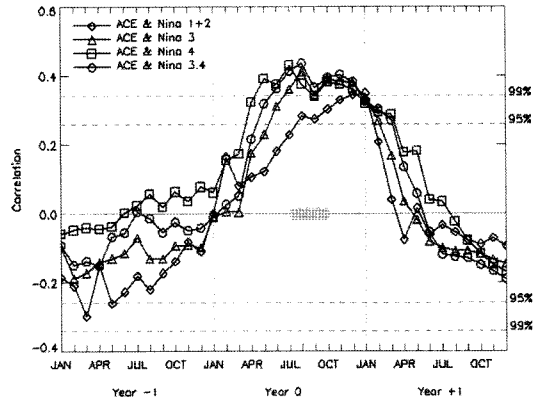


Fig. 5. Lag-lead correlation coefficients between the time series of ACE (JASO) and monthly Niño indices. The reference ACE displays the thick gray bar, year -1 (year +1) denotes the year before (after) the reference Niño indices. The horizontal dashed lines indicate the 95%, 99% confidence levels, respectively.

간지연 상관계수가 계산되었다(Fig. 5). 기준이 되는 ACE의 값과 동시상관에 해당하는 기간을 회색 바를 통해서 표시하였으며, ENSO 지수들에 시간지연을 두고 상관계수를 나타내었다. 한 해 앞선 봄철 ENSO 지수와 ACE 값이 음의 상관을 보이고 있지만 매우 약하며, 겨울철을 중심으로 양의 상관계수를 나타내기 시작하여 동시상관에 해당하는 그 해 여름부터 상관계수가 최대값을 보인다. Niño 1+2 index는 뒤따르는 해 겨울철에 약 3개월 정도 시간 지연을 가지고 높은 양의 상관성을 보이며, Niño 3, Niño 4, Niño 3.4 index는 모두 그 해 여름부터 뒤따르는 겨울까지 99% 유의수준 안에서 높은 양의 상관을 보였다. 이를 통해서 여름과 가을에 발생하는 태풍 강도와 그 뒤따르는 겨울에 최고 진폭을 보이는 ENSO의 발달이 높은 상관성을 가지고 있음을 짐작할 수 있다.

태풍 강도, 태풍 발생지역, 그리고 ENSO

앞선 분석을 통해서 태풍 강도와 발생지역의 상관성과 태풍 발생과 ENSO의 상관성을 살펴보았다. 여기서 ENSO와 태풍 강도와 상관성을 보이는 결과는 선행연구와 유사한 결과를 보이고 있다(Camargo and Sobel, 2005). 하지만 본 연구에서는 태풍 강도와 발생지역의 상관성에 대해 ENSO의 발달과 소멸이 미치는 영향을 살펴보는 것을 목적으로 하고 있다. 이에 본 절에서는 앞선 분석을 바탕으로 태풍 강도와

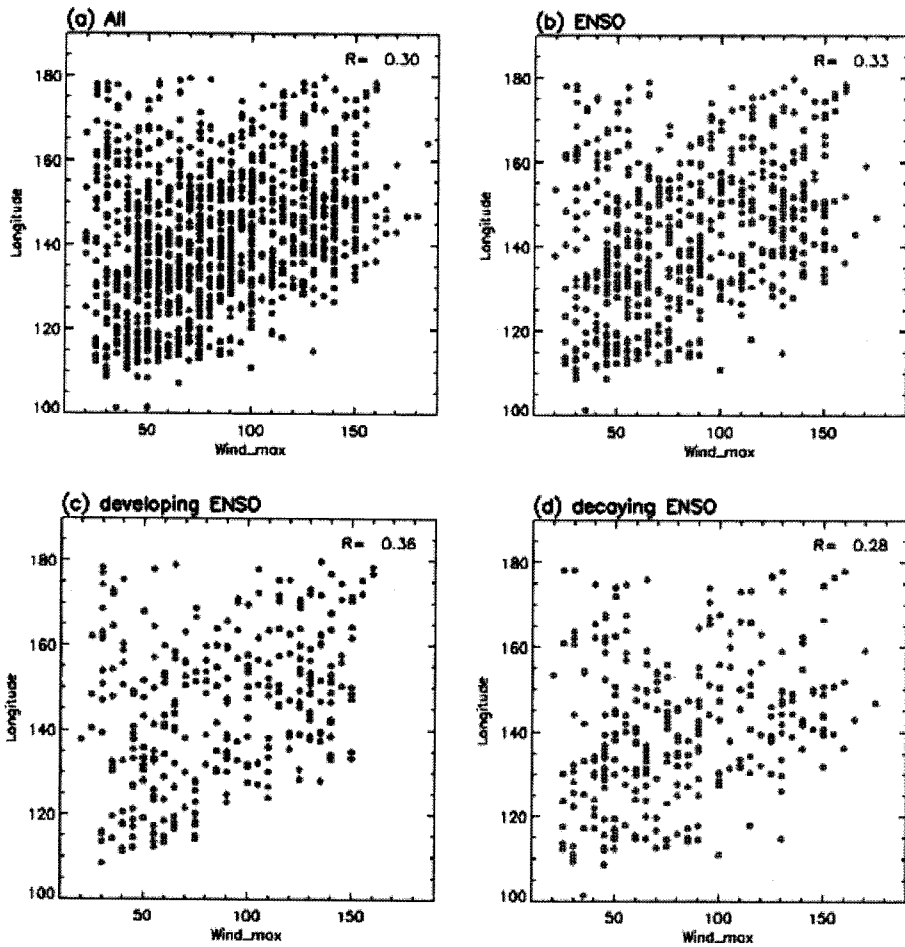


Fig. 6. The scattered diagram of the longitude on typhoon formation and maximum wind during the life cycle for (a) the period 1950-2006, (b) developing and decaying El Niño years, (c) developing El Niño years, (d) decaying El Niño years.

태풍 발생지역의 변화에 대한 ENSO의 영향을 분석하고자 한다. 먼저, 1950년부터 2006년까지의 전체 기간과 엘니뇨 발달해와 소멸해를 포함한 기간, 엘니뇨 발달해로 기간을 구분하고 정의한 기간 동안 발생한 태풍 발생지점의 경도와 태풍의 지속기간 동안 최대 풍속의 상관관계를 산포도로 나타내었다(Fig. 6). 엘니뇨 발달해와 소멸해를 포함한 기간에 발생한 태풍은 전체 기간을 나타낸 경우와 비교하였을 때 강한 태풍 일수록 발생지역이 동쪽으로 치우쳐 날짜 변경선에 가까워지고 반대로 약한 태풍 일수록 발생지역이 서쪽으로 치우치는 특징을 보임으로써 최대풍속과 발생지역의 선형관계가 나타난다(Fig. 6a, 6b). 이에 비해 엘니뇨 발달해 일 때 최대 풍속이 강할수록 발생지역과 최대 풍속의 선형 관계가 더 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수 있고, 상관계수 또한 엘니

뇨 발달해일 때 0.36으로 가장 높은 값을 나타낸다(Fig. 6c). 이와 같이, 태풍 발생지점에 따라 태풍 강도가 높게 나타나는 원인을 분석하기 위해서 태풍 지속시간에 따른 태풍의 발달의 원인을 분석하고자 한다. 태풍 발달에 영향을 미치는 인자로 해수면 온도와 연직 바람 쉬어가 알려져 있으며(Holland, 1997; Wu and Lau, 1992), 이를 바탕으로 본 연구에서는 태풍 발달에 영향을 미치는 태풍 에너지(Energy of Typhoon, EOT)를 새롭게 정의하였다. EOT는 Gray(1977)의 태풍 발생 지수인 Seasonal Genesis Parameter(SGP)의 계산과정을 바탕으로 한다. 하지만 SGP는 태풍 발생에 영향을 미치는 6가지 환경인자를 이용하고 있는 반면, EOT는 SGP 계산과정 중 태풍 발달에 영향을 주는 인자인 해수면 온도와 연직 바람 쉬어항만을 이용하여 간단하게 계산되어 지며,

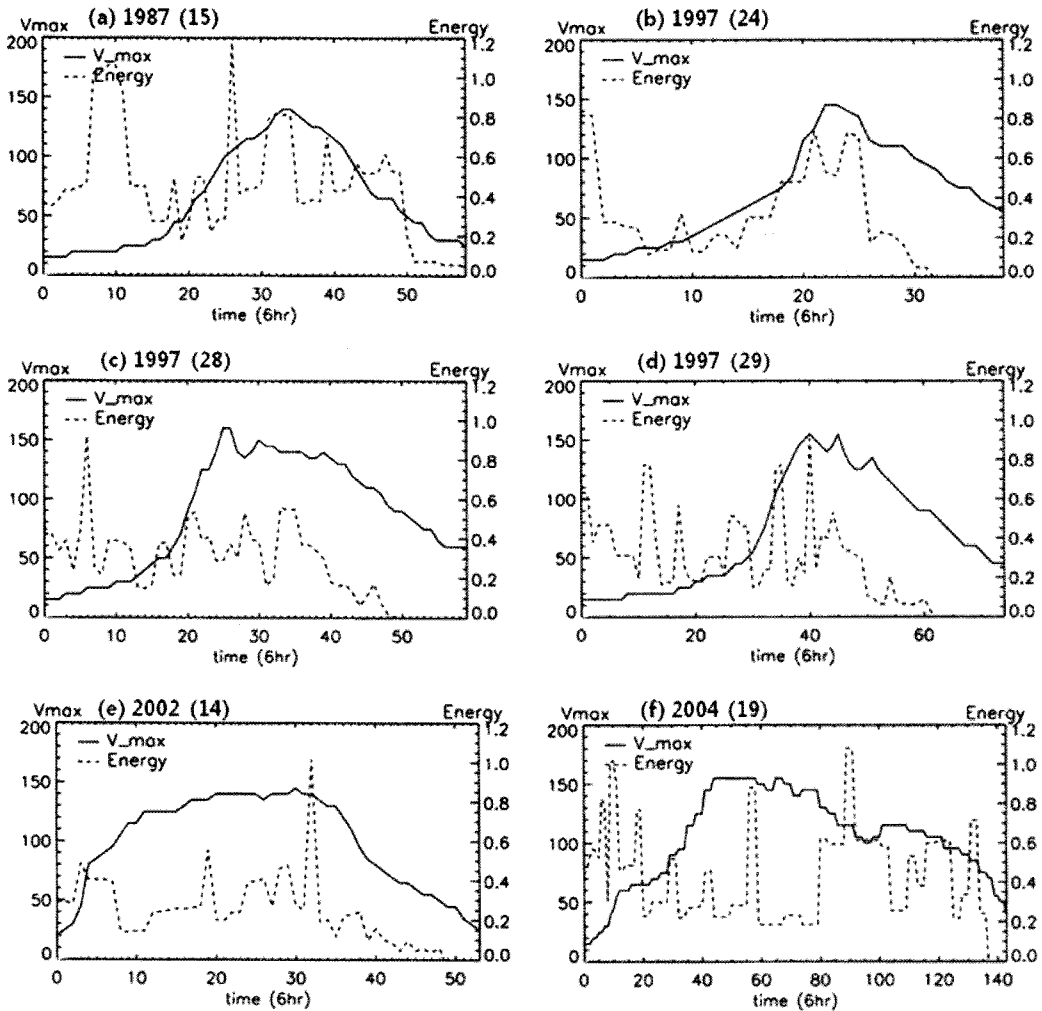


Fig. 7. The time series of the maximum wind and the EOT for strong wind cases in Fig. 6c during the developing El Niño years.

계산과정은 아래의 식과 같다.

$$EOT = (SST - 26) \times (1/(VWS + 3)) \quad (2)$$

여기서, SST는 태풍의 최저기압을 나타내는 지점의 해수면 온도이며, VWS는 850 hPa와 200 hPa 사이의 연직 바람 쉼어를 나타낸다. 본 연구에서는, 태풍 발생지역과 태풍의 최대풍속에 대한 EOT의 영향을 조사해 보았다. 엘니노 발생해일 때 태풍 발생지점과 태풍의 최대 풍속이 선형 관계가 뚜렷한 태풍 중 강한 태풍의 사례와 약한 태풍의 사례를 선정하여 태풍의 지속시간에 따른 최대 풍속과 EOT의 시계열을 나타내었다(Fig. 7, Fig. 8). 강한 태풍 사례는 최대풍속 140 knots 이상, 발생지점이 170°E 보다 동

쪽에서 발생한 경우이며, 약한 태풍 사례는 최대풍속 50 knots 이하, 발생지점이 120°E 보다 서쪽에서 발달한 경우로 구분하여 각각 6개의 사례를 선정하였다. 강한 태풍 사례(1987년 15호, 1997년 24호, 1997년 28호, 1997년 29호, 2002년 14호, 2004년 19호 태풍)의 경우를 살펴보면 대부분의 경우 태풍 발달 초기에 EOT 값이 크게 나타나는 것을 볼 수 있는데 이러한 특징은 Fig. 7a에 해당하는 1987년 15호 태풍의 시계열에서 특히 강하게 나타나고 있으며, EOT 값이 감소함에 따라 최대 풍속 또한 감소하고 있음을 알 수 있다(Fig. 7). 이에 반해 약한 태풍 사례(1986년 18호, 1994년 9호, 1997년 20호, 2002년 13호, 2004년 24호, 2006년 15호 태풍)는 모든 경우에서

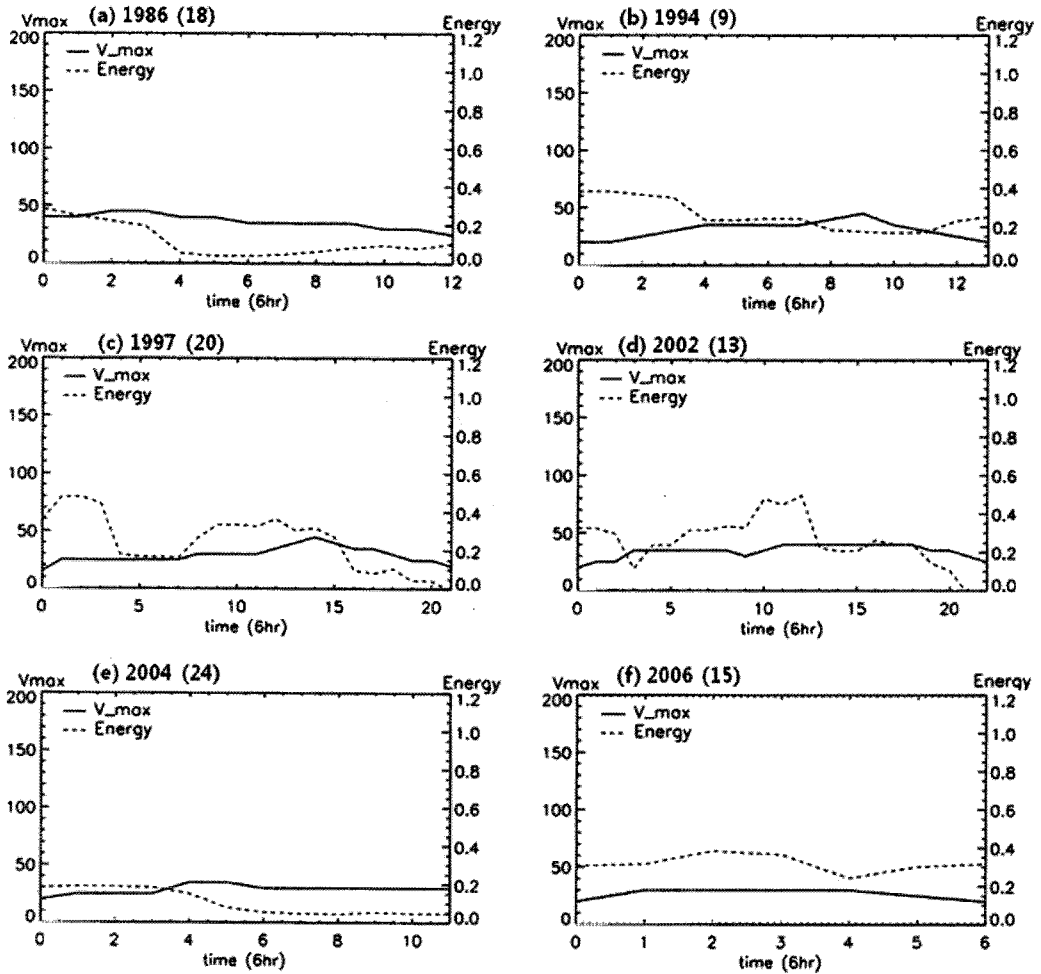


Fig. 8. Same as Fig. 7 except for weak wind cases.

EOT와 최대풍속이 적은 값으로 지속시간 동안 계속 유지되는 모습을 보이고 있다(Fig. 8). 이를 통해서 EOT값이 태풍 발달을 나타내는 지수로 이용될 수 있으며, Fig. 6에서 제시한 바와 같이 태풍 발생지점과 태풍 강도가 해수면 온도와 연직 바람 쉬어와 같은 환경인자의 영향으로 상관성이 높게 나타남을 확인해 볼 수 있다.

지금까지 엘니뇨 발달해에 나타나는 태풍강도와 태풍 발생지역의 상관성을 살펴보았으며, 이에 대해 좀 더 구체적으로 알아보기 위해 엘니뇨 발달해와 정상해에 발생한 태풍의 평균적 발생횟수와 발생지역의 통계적 특징을 정리해 보았다(Table 2). 엘니뇨 발달해에는 정상해보다 태풍의 발생수는 적지만 category 4+5에 해당하는 강한 태풍의 발생 횟수는 오히려 더 많은 수를 보여주고 있으며, 엘리뇨 발달해 일 때 평

균 발생지점이 동쪽으로 치우쳐져 있으며 위도가 낮게 나타나는데, 이는 태풍의 강도에 따라 구분했을 때 TD-TS의 경우 140.16°E, 14.17°N, category 1+2+3의 경우 144.62°E, 12.43°N, category 4+5의 경우 152.97°E, 10.76°N로 강한 태풍일수록 동쪽, 적도 쪽으로 치우쳐서 발생하며 이를 통해 앞서 분석한 바

Table 2. The mean statistics of Typhoon for the Neutral years and the developing El-Niño years

	Neutral	developing El-Niño
Total (No. yr ⁻¹)	29.05	27.41
TD-TS (No. yr ⁻¹)	10.70	9.59
category 1+2+3 (No. yr ⁻¹)	11.80	9.35
category 4+5 (No. yr ⁻¹)	6.55	8.47
longitude (°E)	142.77	145.64
latitude (°N)	13.00	12.52

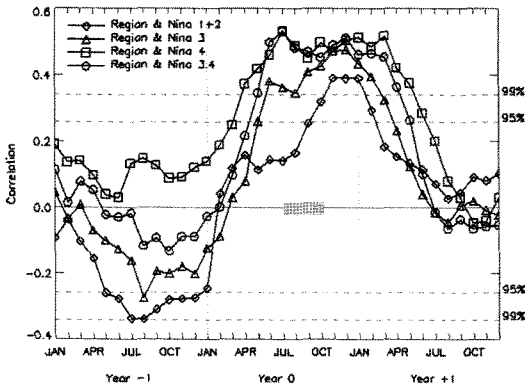


Fig. 9. Lag-lead correlation coefficients between time series of mean typhoon formation (JASO) with monthly Niño indices. The reference mean typhoon formation displays the thick gray bar, Year -1 (year +1) denotes the year before (after) the reference Niño indices. The horizontal dashed lines indicate the 95%, 99% confidence levels, respectively.

와 같이 태풍 발생지역과 태풍의 강도의 상관성을 짐작할 수 있다.

앞선 분석에서는 우리는 태풍 강도를 나타내는 지수인 ACE와 ENSO 지수와의 시간지연 상관계수를 알아보고, 태풍 강도와 ENSO가 동시상관을 가지는 그 해 여름부터 뒤따르는 겨울까지 높은 상관을 보이고 있음을 확인한 바 있으며(Fig. 5), 본 절에서는 동일한 방법으로 태풍 강도와 상관성을 가지는 태풍 발생지역과 ENSO 지수와의 시간지연 상관계수를 알아 보고자 한다. 7월부터 10월까지의 기간 동안 발생한 태풍의 평균 발생지점과 월별 ENSO 지수들과의 시간지연 상관계수가 계산되었으며, 동시상관에 해당하는 기간은 회색 바를 통해서 표시하였다(Fig. 9). 상관계수의 변화 패턴은 Fig. 5와 유사한 변화를 보이고 있는데, 한해 앞선 여름철 Niño 1+2 index와 태풍 발생지점이 95% 유의수준 안에서 음의 상관을 보이고 있고 겨울철을 중심으로 양의 상관이 나타나기 시작하여 그 뒤따르는 겨울에 99% 유의수준 안에서 양의 상관을 보이고 있다. 이에 비해 Niño 3, Niño 4, Niño 3.4 index 모두 그 해 여름부터 뒤따르는 다음해 봄까지 태풍 발생지점과 높은 상관을 보이고 있으며 99%의 유의수준 안에서 높은 양의 상관을 보이고 있다(Fig. 9). 이를 통해서 여름과 가을에 발생하는 태풍 발생지역 또한 뒤따르는 겨울에 최고 진폭을 보이는 ENSO의 발달이 높은 상관성을 가지고 있음을 짐작할 수 있다.

태풍 발생에 미치는 ENSO의 영향

역학적 잠재력

해수면 온도와 그와 연관된 대기의 대류현상은 잠열을 통한 해양에서 대기로의 열과 수분의 전달과정으로 많은 선행연구를 통해 상관성이 연구된 바 있다(Bjerknes, 1966; Lindzen and Nigam, 1987). 이처럼, 높은 해수면 온도는 태풍과 같은 열대성 저기압 형성에 중요한 요인으로 평가 받고 있다(Emanuel, 1987; Evans, 1993). 하지만 해수면 온도와 대기의 대류현상의 상관성을 살펴보면 항상 양의 상관성만을 가지지는 않는다. 예를 들어, Michaels et al.(2006)은 대서양에서 열대 저기압 발생에 있어서 해수면 온도가 영향을 미치지만, 해수면 온도가 28.25°C 이상이 되면 해수면 온도의 증가와 허리케인의 강도와의 상관성을 찾을 수 없음을 밝힌 바 있다. 이와 같이 열대성 저기압의 강도는 해수면 온도만이 아닌 바람장과 같은 역학적 인자의 역할이 중요하고, 이에 본 절에서는 태풍 발생에 미치는 역학적 인자의 영향을 조사해 보고자 한다.

Gray(1977)는 태풍 발생과 상관성을 가지는 환경인자를 정리하였으며, 이를 통해서 만든 지수가 seasonal genesis parameter(SGP)이다. SGP는 dynamic potential(DP) 항과 thermal potential(TP) 항으로 구분할 수 있으며, 각 항은 3가지씩의 환경인자를 통해서 계산할 수 있다. DP는 지구와도(Coriolis parameter), 하층 상대와도(Vorticity parameter), 연직 바람 쉬어(Vertical shear parameter), TP는 해양에너지 지수(Ocean energy parameter), 습윤안정에너지 지수(Moist stability parameter), 중층 대류권에서의 상대 습도(Humidity parameter)가 이에 해당한다. 여기서, TP는 SGP에서 필요한 요소이지만, 태풍 발생의 상태를 나타내기엔 불충분한 부분이 있으며, DP의 차이가 SGP의 큰 차이를 만들어 낸다(McBride, 1981). 따라서 본 연구에서는 DP만을 이용하여 태풍 강도와 태풍 발생지역에 대한 엘니뇨 발달해와 정상해의 차이를 비교하였다. DP의 계산에 사용된 수식은 다음과 같다(Gray, 1977).

$$DP = (f(\zeta + 5))[(1/VWS + 3)] \quad (3)$$

f 는 지구와도이며(units of s^{-1}), ζ 는 1000 hPa에서의 상대와도($10^{-6} s^{-1}$), VWS는 850 hPa과 200 hPa 사이의 연직 바람 쉬어($m s^{-1}$)를 나타내며, 이를 통해서

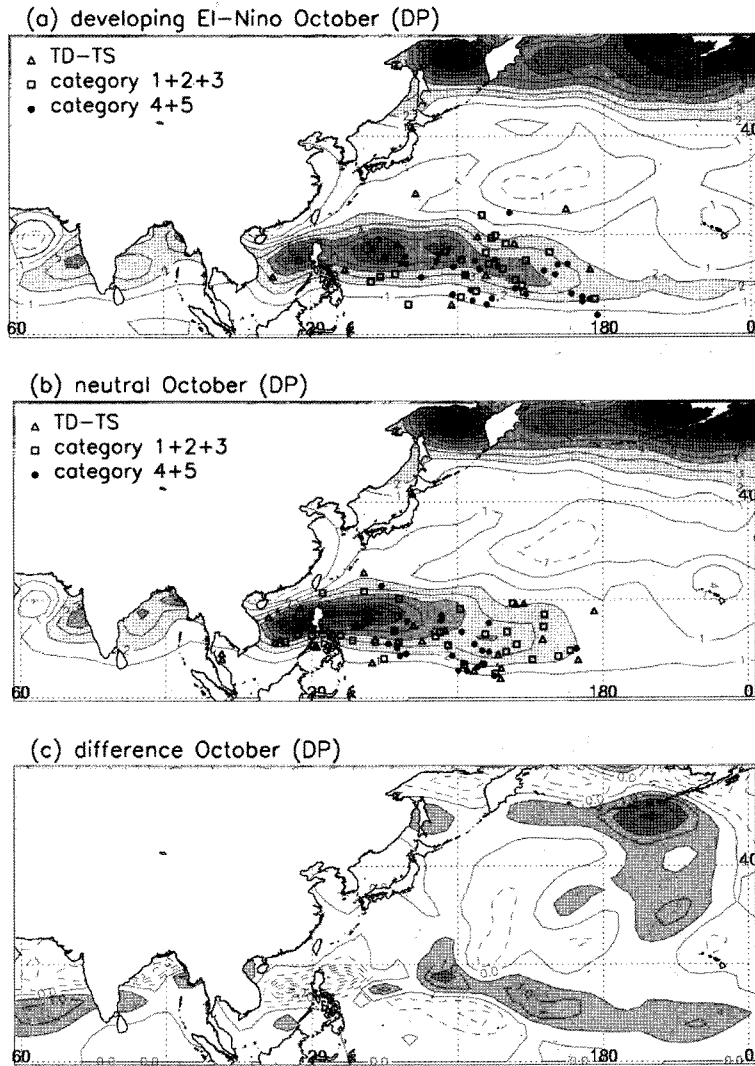


Fig. 10. Dynamic potential for (a) the developing El-Niño years, (b) the Neutral years, and (c) difference (a-b) in October. Dots denote cyclogenesis for TD-TS (triangle), category 1+2+3 (square), and category 4+5 (circle).

DP 값은 지구와도가 위도에 따라 일정한 값을 가지기 때문에 대기 하층의 와도에 비례하고 연직 바람 쉬어에 반비례 해서 변화함을 의미한다. 본 연구에서는 역학적 인자가 엘니노 발달해와 정상해의 태풍 발생에 미치는 영향을 비교하기 위해서 태풍 발생이 가장 많은 7월부터 10월까지의 기간 동안 DP의 공간장과 태풍 발생지점을 분석하였으며, 엘니노 발달해와 정상해 사이에 차이가 가장 뚜렷한 10월만을 나타내었다(Fig. 10). 대부분의 태풍이 DP가 양의 값을 가지는 지역에서 발생하는 것을 알 수 있으며, 7

월과 10월에 엘니노 발달해의 DP가 정상해에 비해 동쪽으로 넓게 발달하고 있고 태풍 발생지역 또한 DP의 분포를 따라서 날짜변경선 주위에 태풍 발생이 나타나는데, 특히 category 4+5에 해당하는 강한 태풍의 발생이 두드러지는 것을 알 수 있다(Fig. 10). 차이를 나타낸 그림을 통해서 엘니노 발달해에 정상해보다 주로 태풍이 발생지역에 DP가 크게 나타나며 이는 연직 바람 쉬어가 약하고 하층의 상대 와도 값이 크게 나타나면서 태풍 발생에 유리한 대기의 역학적 구조를 갖게 됨을 알 수 있다(Fig. 10).

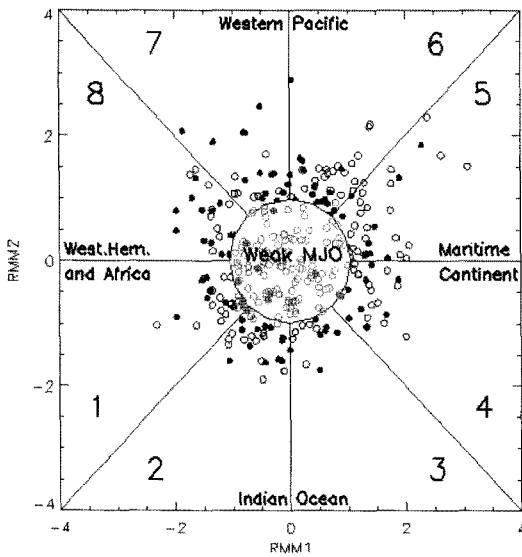


Fig. 11. (RMM 1, RMM 2) phase space points for all available days in JASO season for the developing El Niño years (black dots) and neutral years (open circles) (similar to Fig. 13 of Wheeler and Hendon (2004)). Eight defined regions of the phase space are labeled, as is the region considered to signify weak MJO activity. Also labeled are the approximate locations of the enhanced convective signal of the MJO for that location of the phase space.

MJO의 특성

Madden-Julian Oscillation(MJO; Madden and Julian, 1972)은 엘니뇨의 원인이 아니지만 엘니뇨의 발달과 소멸과 같은 ENSO 사이클에 대한 영향은 이미 알려진 바 있다(Kessler and Kleeman, 2000; Zhang and Gottschalck, 2002; Seo and Xue, 2005). 앞선 DP를 통한 분석에서는 ENSO에 의해서 대기의 역학적 구조의 변환만을 이용해서 태풍의 발생지역이 영향을 받고 있음을 분석하였다. 하지만, 태풍의 발생지역이 적도부근이므로 ENSO 발달과 소멸과 상관성을 가지는 적도 MJO 또한 태풍의 발생에 영향을 미칠 수 있으며, Liebmann et al.(1994)은 태풍 발생에 대한 MJO의 영향을 연구한 바 있다. 예를 들어, MJO의 강한 대류가 발생한 지역과 그 바로 뒤쪽에 서풍 아노말리가 존재하면 적도를 중심으로 남쪽과 북쪽에 각각 저기압성 회전이 발달한다. 동시에 상층에는 고기압성 회전이 발달하게 되고, 이로 인해 연직 바람 쉬어는 감소하고 상층에 발산이 강해지면서 태풍의 발달과 강화에 유리한 환경이 형성된다(Rui and Wang, 1990). 본 연구에서는 MJO의 특징을 분석을 위해서 Real-time

Multivariate MJO(RMM) 지수를 이용하였다. RMM 지수는 연주기 성분과 경년변동 성분을 제거한 후 적도를 따라(15°S-15°N) 위도 평균된 850 hPa에서의 동서 바람 성분과 200 hPa에서의 동서 바람 성분, 위성 관측된 OLR자료의 통합자료의 경험 직교 함수의 결과를 바탕으로 계산되어 진다(Wheeler and Hendon, 2004). 이렇게 계산된 첫 번째 모드와 두 번째 모드의 PC 1, PC 2값이 RMM 1과 RMM 2 값으로 결정되며, 경도에 따른 MJO의 이동은 RMM 지수를 이용하여 8개의 위상으로 구분할 수 있다.

먼저, MJO와 ENSO의 상관성을 분석하기 위해서 RMM 지수의 분산($RMM 1^2 + RMM 2^2$)을 이용하여 MJO의 경년변동을 살펴보았으나, MJO와 ENSO의 연관성은 나타나지 않았다(그림 보이지 않음). 이는 200 hPa의 동서바람 성분을 이용하여 MJO의 경년변동을 분석하였고, MJO와 ENSO 사이에 유의한 상관성은 찾지 못했던 Slingo et al.(1999)의 결과와도 일치한다. 하지만, Hendon et al.(1999)과 Kessler(2001)에 의해서 태평양에서 엘니뇨 해에 MJO의 특징이 20° 정도 동쪽으로 이동해서 나타남이 밝혀진 바 있다. 이에 본 연구에서는 이와 같은 특징이 태풍에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 태풍 발생일의 RMM 지수를 분석하였다. Fig. 11에서 엘니뇨 발달해와 정상해에 7월부터 10월까지의 발생한 태풍의 발생일에 RMM 지수를 나타내었으며, 약한 MJO로 정의된 부분은 나타내지 않았다. 채워진 검은 원으로 나타낸 것이 엘니뇨 발달해에 태풍 발생일의 RMM 지수이고 빈 원으로 나타낸 것이 정상해의 사례이며, 엘니뇨 발달해의 경우 MJO의 위상이 서태평양(phase 6, 7, 8)에서 강하게 나타나는 경우가 많은 반면, 정상해의 경우 해양대륙(Maritime Continent; phase 4, 5, 6)에서 강하게 나타남을 알 수 있다. 이를 통해서 태풍 발생 기간 동안 엘니뇨 발달해 일 때 MJO가 동쪽으로 치우쳐 더 강한 MJO가 발달하고 있음을 알 수 있고 또한, 적도 근처의 대규모 순환의 영향으로 엘니뇨 발달해일 때 태풍 발생지역이 동쪽으로 이동함을 알 수 있다.

ENSO 발달과 소멸에 따른 태풍 발생지역 특성

ENSO 발달해 특성

앞서 엘니뇨의 발달 이후 소멸기에 라니냐 현상으

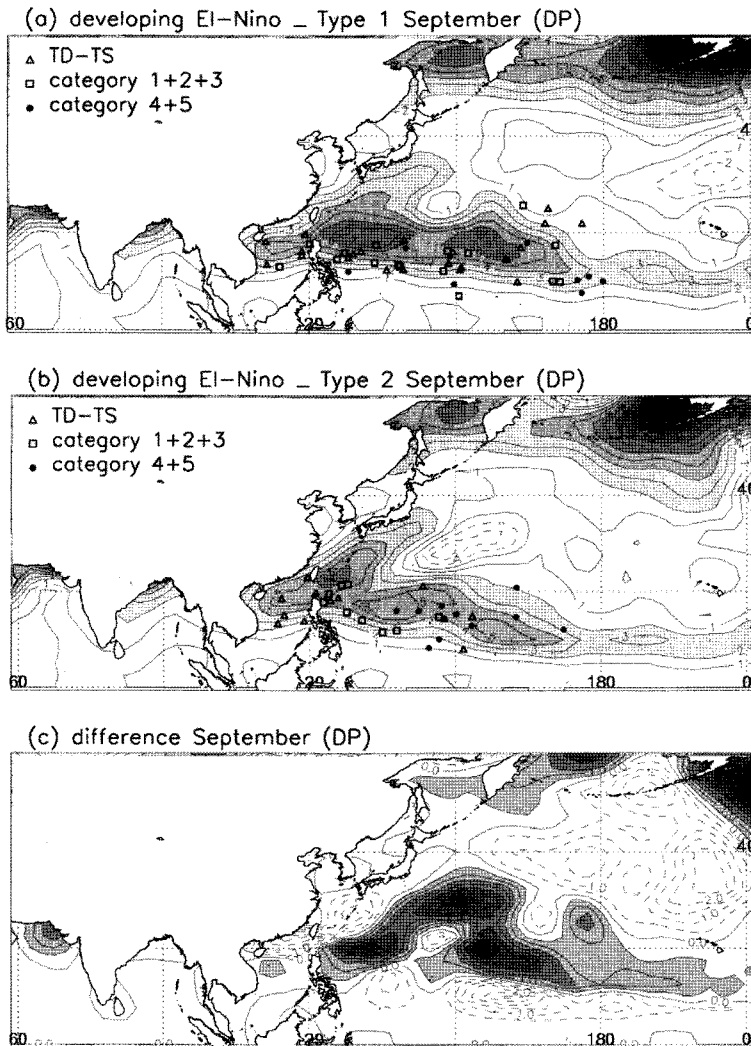


Fig. 12. Dynamic potential for (a) the Type I, (b) the Type II, and (c) difference (a-b) the developing El Niño years in September. Dots denote cyclogenesis for TD-TS (triangle), category 1+2+3 (square), and category 4+5 (circle).

로 전환되는 경우와 정상해로 회복되는 경우를 구분하여 Type I과 Type II로 사례해를 구분하였다. 본 장에서는 Type I과 Type II로 구분된 ENSO 사이클에 따른 태풍 발생지역의 특성을 역학적 잠재력과 MJO의 특징을 통해서 분석하고자 한다. 먼저, Type I과 Type II에 해당하는 엘니뇨 발달해의 특징을 살펴보았다. 태풍 강도와 태풍 발생지역의 상관성을 사례해에 따라 구분하여 살펴보면, Type I의 경우 발생지역이 동쪽으로 치우쳐 발생하는 경우가 많아 최대 풍속과의 상관계수가 0.32로 0.34인 Type II에 비해서 작은 값을 보인다. 7월부터 10월까지의 DP값과 태풍 발생지점을 살펴보면, 7, 9, 10월은 큰 차이가

없지만 9월에는 Type I과 Type II가 차이를 보이는데, Type I의 경우에 DP값이 더 크게 나타나고 태풍의 발생지점 또한 더 동쪽으로 치우쳐져 날짜 변경선 부근에 강한 태풍의 발생이 두드러짐을 알 수 있다(Fig. 12a, 12b). 크게 나타나는 지점이 위도상으로 약간 북쪽으로 치우쳐져 있어 Type I과 Type II의 차이를 보면 20°N 부근에서 양의 값이 강하게 나타나고 10°N 부근에서는 오히려 음의 값이 강하게 나타나는 특징을 보인다(Fig. 12c). 또한, MJO의 특징을 살펴보면, 두 경우 모두 phase 7, 8이 강하게 나타나는 것을 알 수 있다(그림 보이지 않음). 지금까지 살펴본 바와 같이 엘니뇨 발달해는 Type I과 Type II의

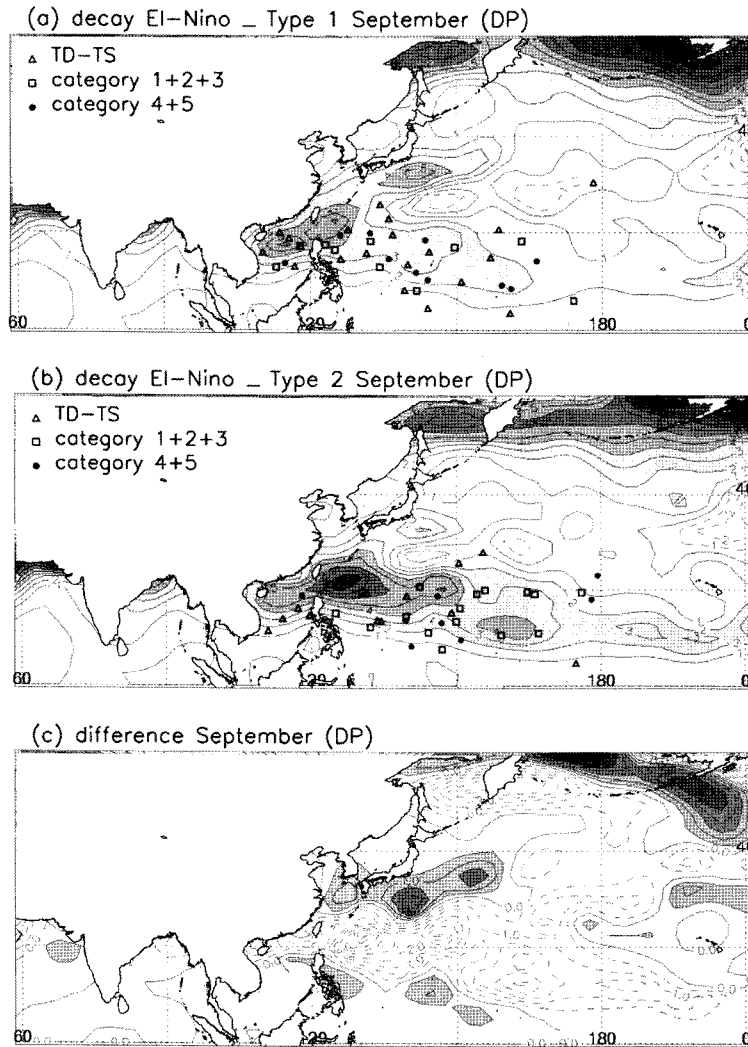


Fig. 13. Same as Fig. 12 except for the decaying El Niño years.

경우 9월을 제외하면 다른 기간에는 큰 차이를 보이고 있지 않지만, 전반적으로 Type I의 경우 태풍 발생지역이 동쪽으로 치우치면서 강도와 상관성은 감소하는 특징을 나타낸다.

ENSO 소멸해 특성

본 절에서는 ENSO 발달해 특성의 분석과 동일한 방법으로 Type I과 Type II에 해당하는 엘니뇨 소멸해의 특성을 분석하였다. 소멸해의 경우 태풍 강도와 태풍 발생지역과의 상관계수가 Type I과 Type II 사이에 0.23과 0.33으로 차이를 보이는데, Type I의 경우 태풍 발생지역의 차이를 보여도 대부분의 태풍의 강도가 약하기 때문에 상관성이 낮게 나타나고 있다.

엘니뇨 소멸해 또한 7월부터 10월까지의 DP값과 태풍 발생지점을 살펴보면, 엘니뇨 발달해와 동일하게 9월에는 Type I과 Type II가 두드러진 차이를 보이는데, Type II의 경우 동쪽으로 넓은 지역에서 DP값이 크게 나타나고 태풍의 발생지점 또한 날짜 변경선 부근까지 확장되어 있는 반면, Type I의 경우에는 DP값이 적게 나타나고 태풍 발생지점 또한 서쪽으로 치우쳐져 있고 강도가 약한 태풍의 발생이 많음을 알 수 있다(Fig. 13a, 13b). 이와 같은 특징으로 인해서 Type I과 Type II의 차이를 보면 120°E 부터 날짜 변경선을 넘는 지역까지 음의 값이 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다(Fig. 13c). 이러한 차이는 평균 태풍 발생 횟수와 발생지점을 통해서도 확인할

수 있는데, 두 경우 연평균 총 태풍 발생 횟수는 28.86회와 28.71회로 거의 차이가 없지만, Type I의 경우 category 4+5에 해당하는 태풍의 발생이 연평균 5.71회인 반면 Type II의 경우에는 7.57회로 강한 태풍의 발생횟수가 차이를 보이고, 평균 발생지점이 Type I의 경우 137.21°E, 14.53°N이고 Type II의 경우 141.74°E, 13.84°N로 큰 차이를 보인다. 이러한 특징은 RMM 지수에서도 나타나는데, Type I의 경우 MJO의 위상이 해양대륙(phase 4, 5, 6)에서 강하게 나타나는 특징을 보였다. 이를 통해서 엘니뇨 소멸해의 경우 엘니뇨 발달해 보다 약하지만 Type I과 Type II를 구분했을 때 해수면 온도와 이에 따르는 대기의 역학적 잠재력, 순환 등이 급변하는 Type I의 경우 정상해로 돌아가는 Type II의 경우에 비해 태풍 발생지점이 서쪽으로 치우치게 되고 대부분 태풍의 강도 또한 약하게 나타나며 이로 인해 태풍 강도와 발생지역의 상관성이 감소하고 있음을 알 수 있다.

결과 및 토의

ENSO가 발달하고 소멸하는 사이클의 영향에 따른 태풍 강도와 태풍 발생지역의 상관성을 살펴보았다. 1950년부터 2006년까지 57년의 기간 중 ENSO 발달한 경우 최대 진폭을 보이는 DJF 기간을 중심으로 이전의 해를 발달해라 하고 이후의 해를 소멸해로 구분하고, 정상해와 엘니뇨 발달해를 구분하여 그 차이를 살펴보았으며, 소멸기에 El Niño 지역의 해수면 온도가 급격히 변화하여 라니냐 현상이 발달하는 경우를 Type I, 해수면 온도의 완만한 변화를 통해 정상해로 회복하는 경우를 Type II로 구분하여 ENSO 사이클의 영향을 분석하였다. 이 때 태풍의 강도는 최대풍속에 따라 TD-TS, category 1+2+3, category 4+5로 구분하였으며, 전체 기간 동안 발생한 태풍을 토대로 강도별로 평균 발생지점을 살펴보면 강도가 클수록 발생지점이 남동쪽으로 치우치는 특징을 보이며 이를 통해서 태풍 강도와 태풍 발생지역의 상관성을 짐작할 수 있다. 이와 같은 상관성은 엘니뇨 발달해에 특히 강하게 나타났으며, 강한 태풍 사례와 약한 태풍 사례를 선정하여 태풍 발달 지수인 EOT 값과 최대풍속의 시계열을 살펴본 결과 태풍 발생지역과 강도가 상관성을 가지는 원인으로 해수면 온도와 연직 바람 쉬어와 같은 환경인자의 영향을 확인할 수 있었다. 또한, 태풍 강도와 ENSO 지수가 동시

상관에 해당하는 그 해 여름부터 뒤따르는 겨울까지 높은 상관성을 보이고 있으며, 태풍 발생지역과 ENSO 지수도 그 해 여름부터 뒤따르는 다음해 봄까지 높은 상관성을 보임으로써 ENSO가 발달하는 기간부터 최대 진폭을 나타내는 시기까지 높은 상관성을 가지고 있음을 확인하였다. 이러한 ENSO의 영향이 나타나는 원인을 분석하기 위해서 본 연구에서는 역학적 잠재력을 나타내는 DP 지수와 MJO의 특징을 나타내는 RMM 지수를 이용하였다. 엘니뇨 발달해 일 때 DP 값이 태풍의 주요 발생지역을 따라 정상해에 비해 크게 나타나고 있음을 통해서 태풍 발생에 유리한 대기의 역학적 구조를 가지고 있음을 알 수 있고, RMM 지수를 통한 MJO의 이동을 살펴보면 엘니뇨 발달해일 때 MJO가 동쪽으로 치우쳐져 발달하고 이에 따라 저기압성 회전이 발달하는 지역이 동쪽으로 치우치면서 발생지역 또한 영향을 받게 될 것으로 짐작된다. 이와 같은 분석을 바탕으로 Type I과 Type II의 엘니뇨 발달해와 소멸해에 나타나는 태풍 강도와 태풍 발생지역의 특징을 각각 비교 분석하였다. Type II의 사례해 경우 Type I에 비해서 태풍 강도와 태풍 발생지역의 상관성이 높게 나타나는데, 특히 엘니뇨 소멸해의 경우 차이가 더 크게 나타난다. 이는, Type의 경우 대기의 역학적 구조와 순환의 급격한 변화로 DP 값과 MJO의 발달이 서쪽으로 치우쳐지면서 태풍 발생지역 또한 서쪽으로 치우쳐져 상관관계가 매우 낮게 나타난다. 본 연구 결과를 통하여 ENSO 사이클의 영향에 따른 대기의 역학적 잠재력과 MJO와 같은 대규모 순환의 변화로 인하여 태풍 강도와 태풍 발생지역의 상관성에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 환경부의 ‘차세대핵심기술개발사업(Eco-technopia 21 project)’의 지원과 교육인적자원부의 ‘BK21 2단계 사업의 지원으로 연구되었습니다.

참고문헌

- Allan, J.C. and Komar, P.D., 2002, Extreme Storms on the Pacific Northwest Coast during the 1997-98 El Niño and 1998-99 La Niña. *Journal of Coastal Research*, 18 (1), 175-193.
- Anthes, R.A., 1982, Tropical cyclones: Their evolution,

- structure and effects. American Meteorological Society, Boston, USA, 208 p.
- Bell, G.D., Halpert, M.S., Kousky, V.E., Gelman, M.E., Ropelewski, C.F., Douglas, A.V., and Schnell, R.S., 2000, Climate assessment for 1999. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81, S1-S50.
- Bjerknes, J., 1966, A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. *Tellus*, 18, 820-829.
- Camargo, S.J. and Sobel, A.H., 2005, Western North Pacific tropical cyclone intensity and ENSO. *Journal of Climate*, 18, 2996-3006.
- Chan, J.C.L., 2000, Tropical cyclone activity over the western North Pacific associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*, 13, 2960-2972.
- Chen, T.C., Weng, S.P., Yamazaki, N., and Kiehne, S., 1998, Interannual variation in the tropical cyclone activity over the western North Pacific. *Monthly Weather Review*, 126, 1080-1090.
- Clark, J.D. and Chu, P., 2002, Interannual variation of tropical cyclone activity over the central North Pacific. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 80, 403-418.
- Emanuel, K.A., 1987, The dependence of hurricane intensity on climate. *Nature*, 326, 483-485.
- Evans, J.L., 1993, Sensitivity of tropical cyclone intensity to sea surface temperature. *Journal of Climate*, 6, 1133-1140.
- Gray, W.M., 1977, Tropical cyclone genesis in the Western North Pacific. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 55, 465-482.
- Gray, W.M., 1984, Atlantic seasonal hurricane frequency. Part 1: El Niño and 30 mb quasi-biennial oscillation influences. *Monthly Weather Review*, 112, 1649-1668.
- Hastings, R.A., 1990, Southern Oscillation influences on tropical cyclone activity in the Australian / south-west Pacific region. *International Journal of Climatology*, 10, 291-298.
- Hendon, H.H., Zhang, C., and Glick, J.D., 1999, Interannual variation of the Madden-Julian oscillation during austral summer. *Journal of Climate*, 12, 2538-2550.
- Holland, G.J., 1997, The maximum potential intensity of tropical cyclone. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 54, 2519-2541.
- Kessler, T. and Kleeman, R., 2000, Rectification of the Madden-Julian Oscillation into the ENSO cycle. *Journal of Climate*, 13, 3560-3575.
- Kessler, W.S., 2001, EOF representation of the Madden-Julian oscillation and its connection with ENSO. *Journal of Climate*, 14, 3055-3061.
- Lander, M.A. and Guard, C.P., 2001, Western North Pacific, North Indian Ocean, and Southern Hemisphere tropical cyclones of 1997. *Monthly Weather Review*, 129, 3015-3036.
- Liebmann, B., Hendon, H.H., and Glick, J.D., 1994, The relationship between tropical cyclones of the western North Pacific and Indian Oceans and the Madden-Julian oscillation. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 72, 401-411.
- Lindzen, R.S. and Nigam, S., 1987, On the Role of Sea Surface Temperature Gradients in Forcing Low-Level Winds and Convergence in the Tropics. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 44, 2418-2436.
- Madden, R.A. and Julian, P.R., 1972, Description of global-scale circulation cells in the Tropics with a 40-50 day period. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 29, 1109-1123.
- McBride, J.L., 1981, Observational analysis of tropical cyclone formation. Part I: Basic description of data sets. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 38, 1117-1131.
- Michaels, P.J., Knappenberger, P.C., and Davis, R.E., 2006, Sea-surface temperatures and tropical cyclones in the Atlantic basin. *Geophysical Research Letters*, 33, L09708, doi:10.1029/2006GL025757.
- Rasmusson, E.M. and Carpenter, T.H., 1982, Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with Southern Oscillation/El Niño. *Monthly Weather Review*, 110, 354-384.
- Reynolds, R.W. and Smith, T.M., 1994, Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation. *Journal of Climate*, 7, 929-948.
- Rui, H. and Wang, B., 1990, Development characteristics and dynamic structure of tropical intraseasonal convection anomalies. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 47, 357-379.
- Saji, N.H., Goswami, B.N., Vinayachandran, P.N., and Yamagata, T., 1999, A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 401, 360-363.
- Seo, K.H. and Xue, Y., 2005, MJO-related oceanic Kelvin waves and the ENSO cycle: A study with the NCEP Global Ocean Data Assimilation System. *Geophysical Research Letters*, 32, L07712, doi:10.1029/2005GL022511.
- Slingo, J.M., Rowell, D.P., Sperber, K.R., and Northly, F., 1999, On the predictability of the interannual behaviour of the Madden-Julian oscillation and its relationship with El Niño. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 125, 583-609.
- Smith, T.M. and Reynolds, R.W., 2004, Improved Extended Reconstruction of SST (1854-1997). *Journal of climate*, 17, 2466-2477.
- Takayabu, Y.N., Iguchi, T., Kachi, M., Shibata, A., and Kanzawa, H., 1999, Abrupt termination of the 1997-98 El Niño in response to a Madden-Julian oscillation. *Nature*, 402, 279-282.
- 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.
- Wang, W. and McPhanden, M.J., 2001, Surface layer temperature balance in the equatorial Pacific during the 1997-98 El Niño and 1998-99 La Niña. *Journal of Climate*, 14, 3393-3407.
- Webster, P.J., Moore, A., Loschnigg, J., and Leben, R., 1999, Coupled ocean-atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997-1998. *Nature*, 401, 356-360.
- Wheeler, M.C. and Hendon, H.H., 2004, An all-season Real-Time Multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Monthly Weather Review*, 132, 1917-1932.
- Wu, G. and Lau, N.C., 1992, A GCM simulation of the relationship between tropical-storm formation and ENSO. *Monthly Weather Review*, 120, 958-977.
- Yu, L. and Rienecker, M., 2000, Indian Ocean warming of 1997-98. *Journal of Geophysical Research*, 105, 16923-16939.
- Zhang, C. and Gottschalck, J., 2002, SST anomalies of ENSO and the Madden-Julian Oscillation in the equatorial Pacific. *Journal of Climate*, 15, 2429-2445.

2007년 12월 8일 접수
2008년 1월 18일 수정원고 접수
2008년 1월 29일 채택