

열대 해수면 온도 분포와 북서태평양 태풍의 계절적 활동 시작일 변동 사이의 관련성

김 동 희 · 김 형 석[†]

한국해양대학교 해양과학기술전문대학원 해양과학기술융합학과

Relationship between the Tropical Sea Surface Temperature Distribution and Initiation Timing of the Typhoon Season in the Northwestern Pacific

Kim, Donghee and Kim, Hyeong-Seog[†]

Ocean Science and Technology School, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

ABSTRACT

This study examined the relationship between the initiation timing typhoon season in the Northwestern Pacific and the tropical sea surface temperature (SST) using a numerical simulation. The initiation timing of the typhoon season is closely associated with SSTs over the Indian Ocean (IO) and the eastern Pacific (EP) in the preceding winter and early-spring. The experiment based on the Weather and Research Forecast (WRF) model showed that the start date of the typhoon season is delayed for about one month when the SSTs over the IO and the EP increase in the preceding winter. The forced tropical SST pattern induces anticyclonic anomalies in the Northwestern Pacific, which is an unfavorable condition for typhoon development, and hence it could delay the initiation of the typhoon season.

Key words: Northwestern Pacific, Typhoon, Sea Surface Temperature, El Niño - Southern Oscillation

1. 서 론

태풍은 강한 바람과 강수를 동반하는 기상현상으로 연안지역에 상륙하였을 경우, 막대한 인명 및 경제적 피해를 야기한다. Park *et al.*(2015)에 따르면 태풍으로 인해 매년 세계적으로 약 13,600명의 사상자와 약 220억 달러의 피해가 발생하고 있다. 최근 2016년 18호 태풍 차바(Chaba)는 우리나라에 상륙하여 제주, 부산, 울산지역에 막대한 피해를 야기하기도 하였다. 태풍 활동이 기후변화에 따라 어떻게 변하고 있는지에 대해 살펴보는 것은 향후 태풍으로 인한 피해를 대비하기 위해 매우 중요하다.

근래 지구 온난화로 인한 이상기후 현상이 빈번히 발생하면서 지구온난화로 인한 태풍 활동의 변화 추세에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다(Walsh *et al.* 2016). 하지만 태풍

의 발생 수, 강도, 경로 등의 변화에 대한 연구는 활발히 진행된 반면, 태풍 주요 활동기간과 그 변화에 대한 연구는 미흡하였다. 기후학적으로 태풍은 1년 내내 발생할 수 있지만, 약 90%에 해당하는 태풍이 5월부터 11월 사이에 발생하기 때문에 그 기간을 태풍의 주요 활동기간으로 볼 수 있다. 특히, 태풍 주요 활동기간 시작일의 연간 변동성은 매우 큰 것으로 여겨진다. 예를 들어 2016년의 경우, 첫 번째 태풍이 7월에 발생하여 1973년, 1998년과 함께 무태풍 기간이 가장 길었던 해였다. 반면, 2015년과 같이 겨울철인 1~2월부터 태풍이 발생하는 해도 있다. 겨울철에 발생하는 태풍의 경우 우리나라에는 영향을 미치지 않지만, 해수면 온도가 높은 저위도 지역에 머물면서 매우 강하게 발달할 수 있으며, 동남아시아 지역에 큰 피해를 야기하고 있다 (Wiles *et al.* 1990). 그러므로 매년 태풍의 주요 활동기간과 그 시작일을 예측할 수 있다면 북서태

[†] Corresponding author: hyeongseog@kmou.ac.kr

Received December 19, 2016 / Revised December 27, 2016 / Accepted January 16, 2017

평양 연안 국가들이 태풍으로 인한 피해를 예방하는 데에 큰 도움이 될 수 있을 것이다.

허리케인의 경우에는 주요 발달 영역인 북대서양에서의 해수면 온도 증가로 인해 허리케인 주요 활동기간의 시작이 앞당겨지고, 종료는 늦어져 결론적으로 총 주요 활동기간이 길어지고 있다는 선행 연구 결과가 있었다(Kossin 2008). 그러나 아직 북서태평양 태풍에 대한 태풍 주요 활동기간의 변화와 관련된 연구는 매우 미흡한 실정이다. 최근 Kim *et al.*(2017)에서는 북서태평양 태풍의 활동시기의 시작시기가 열대 태평양 해수면 온도 분포와 밀접한 관련성을 가지고 있음을 제시되었다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 과거 자료에서 나타나는 태풍 주된 활동기간의 시작시기의 변화와 관련된 해수면온도 분포를 바탕으로 모델 실험을 진행하여 태풍의 활동의 시작시기가 어떻게 조절되고 있는지를 살펴보았다.

2. 자 료

태풍 자료는 도쿄 지역특별기상센터의 태풍센터(Regional Specialized Meteorological Centre-Tokyo Typhoon Center)에서 생산한 Best-Track 자료를 이용하였다. 이 자료는 1951년 이후 북서태평양 지역에서 발생한 열대 저기압의 위도, 경도, 중심기압, 풍속 등의 정보를 6시간 간격으로 제공한다. 본 연구에서 태풍이란 북서태평양에서 발생한 열대저기압 중 중심 최대풍속이 17 m/s 이상인 경우, 즉 열대 폭풍(tropical storm) 이상으로 발달한 경우로 정의하였다.

해수면 온도 자료는 다양한 자료가 존재하는데, 높은 공간 해상도의 해수면 온도자료는 대부분 인공위성 관측이 시작된 1980년대 이후의 자료만 존재한다. 따라서 태풍과 관련된 해수면 온도 분포 분석에서는 상대적으로 낮은 해상도를 가지고 있지만, 태풍 자료기간을 모두 포함할 수 있는 Extended Reconstructed Sea Surface Temperature(ERSST) V3b(Smith *et al.*, 2008) 자료를 이용하였다. ERSST는 1854년부터 현재까지의 월평균 해수면온도 자료가 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 간격으로 구성되어 있다. 반면, WRF 모델 실험에는 상대적으로 해상도가 높고 높은 품질을 가지고 있는 Optimum Interpolation Sea Surface Temperature(OISST) V2(Reynolds *et al.*, 2002) 자료를 사용하였다. OISST는 1981년부터 현재까지의 일주일 간격의 해수면 온도 자료가 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 간격으로 구성되어 있다. 모델실험 초기 자료로는 NCEP FNL(Final) Operational Global Analysis 자료를 사용하였다. FNL 자료는 1999년 7월 30일부터 6시간 간격으로 제공되며, 역시 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 간격으로 구성되어 있다.

3. 관측된 태풍 주요 활동기간의 변동성

3.1 태풍 주요 활동기간의 정의 및 분석

북서태평양의 태풍의 평균적인 월별 발생 빈도를 살펴보면, 2월에 가장 적게 발생하고, 5, 6월에 급격히 증가하여 8월에 최대값을 가지며, 이후 다음해 1월까지 태풍의 발생이 감소하는 형태를 가지고 있다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 태풍 주요 활동기간 분석을 위해, 월 평균 태풍 발생 개수가 최솟값을 가지는 2월 1일을 각 해의 시작으로 간주하였다. 태풍 주요 활동기간의 시작일과 종료일은 각각 2월 1일부터 다음해 1월 31일 사이에 발생한 태풍의 분위수 분석을 통해 정의하였다. 분위수를 기반으로 분석하는 경우, 연간 총 태풍 발생 빈도와는 상관없이 연중 태풍이 발생하는 시간적 분포에 따라서만 시작일과 종료일이 결정된다. 또한, 극단적으로 일찍 또는 늦게 발생하는 일부 태풍의 영향을 제거할 수 있으므로 태풍의 주요 활동기간을 결정하는 적절한 방법으로 알려져 있다(Kossin 2008).

1951~2014의 기간 동안 각 해의 태풍의 발생 일에 대하여 분위수 분석을 진행하였을 때, 태풍 발생일의 5번째 분위수의 평균은 5월 18일, 10번째 분위수의 평균은 6월 14일, 90번째 분위수의 평균은 11월 15일, 95번째 분위수의 평균은 11월 28일로 나타났다. 5번째 분위수와 95번째 분위수의 평균 태풍 발생일 사이의 기간이 일반적으로 태풍 주요 활동기간으로 알려진 5월에서 11월을 적절히 포함하고 있다고 판단하여, 각 해의 태풍 발생일의 5번째 분위수를 태풍 주요 활동기간의 시작일, 95번째 분위수를 태풍 주요 활동기간의 종료일로 정의하였다. 이렇게 정의한 태풍 주요 활동기간 길이와 발생 개수 사이의 상관계수는 0.16으로 통계적으로 유의미하지 않은 수치였으며, 연간 태풍 발생 개수가 태풍 주요 활동기간에 영향을 미치지 않기 때문에 분위수를 기반으로 한 정의가 적절함을 확인할 수 있었다.

Fig. 1은 1951년부터 2014년까지 64년간 태풍 주요 활동기간의 시작일과 종료일을 나타낸 그림이다. 시작일과 종료일 모두 경년 변동과 장기 변동이 함께 나타나고 있다. 장기적인 추세를 살펴보면 시작일은 점차 늦어지고, 종료일은 약간이지만 앞당겨져 전체 태풍 주요 활동기간은 감소하는 추세가 나타나고 있다. 장기 추세의 기울기는 시작일은 약 0.26 day yr^{-1} , 종료일은 약 $-0.14 \text{ day yr}^{-1}$ 로써 통계적인 유의성은 없는 것으로 나타났다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 태풍 활동 시기는 강한 경년 변동성을 가지고 있다. 태풍 주요 활동기간의 시작일, 종료일, 길이의 표준편차는 각각 35.81, 19.22, 37.72일이다.

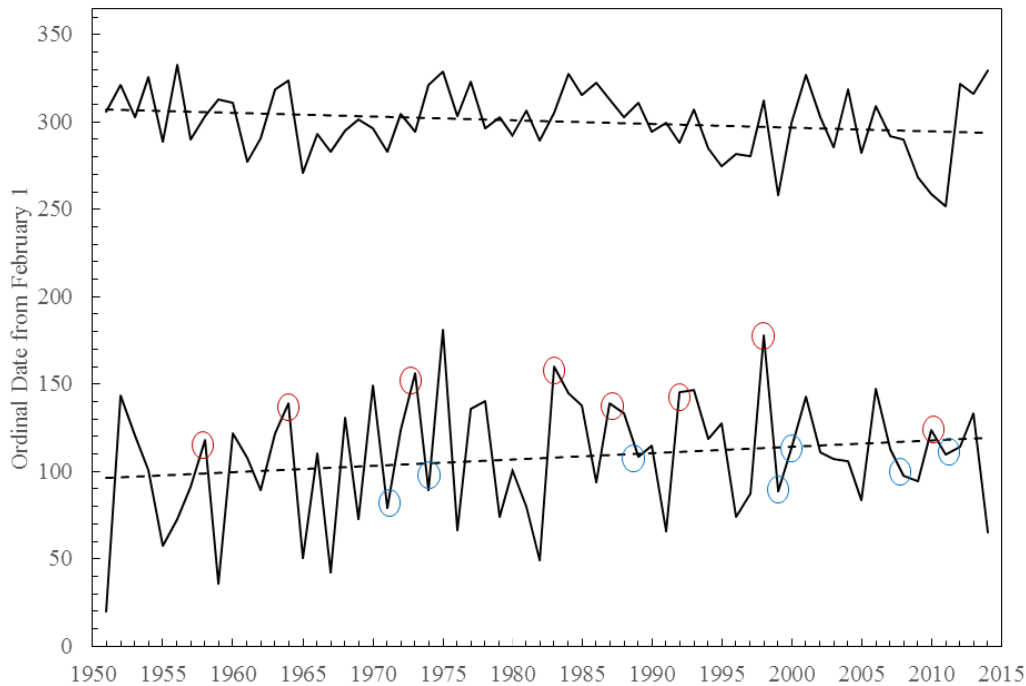


Fig. 1. Time series of the start and the end dates of TC season in the WNP (black lines). Dashed lines denote linear trends for the periods 1951~2014 of the start and the end dates. The red (blue) circles denote the start of TC season following the El Niño (La Niña) in the preceding winter.

즉, 시작일과 길이는 한 달 이상의 큰 표준편차를 가지고 있으나, 종료일의 경우에는 변동성이 상대적으로 작다. 또한 길이와 시작일과의 상관계수는 -0.86 으로 길이와 종료일과의 상관계수 0.35 , 시작일과 종료일과의 상관계수 0.17 보다 월등히 높은 값을 나타내고 있다. 이는 전체 태풍 주요 활동기간은 종료일보다는 시작일에 크게 의존하고 있음을 알려준다. 따라서 본 연구에서는 전체 태풍 주요 활동기간을 조절하고 있는 시작일의 변동에 초점을 두고, 분석 및 모델 실험을 진행하였다.

3.2 태풍 주요 활동기간 시작일의 변동성과 관련된 해수면 온도의 변동

태풍은 해수면온도가 26°C 이상인 열대 해역에서 발달하며, 이동 경로의 해수면온도는 태풍의 세기와 지속 시간 등 태풍의 활동을 조절하는 주요 인자 중 하나이다. Fig. 2는 1951년부터 2015년까지 연간 태풍 주요 활동기간의 시작일과 해수면온도의 상관관계를 나타낸 그림이다. 겨울과 이른 봄에 인도양과 동태평양에서 0.4 이상의 높은 양의 상관관계가, 북서태평양 동쪽 부근에서는 음의 상관관계가 나타났는데, 이는 겨울철에 인도양과 동태평양의 해수면온도가 상대적으로 높

고, 북서태평양 동쪽 부근의 해수면온도가 낮을 때, 그 다음에 이어지는 태풍 주요 활동기간의 시작일이 늦어짐을 의미한다.

Fig. 2에서 나타난 해수면온도와와의 상관계수의 분포는 엘니뇨 시기의 해수면온도 분포와 상당히 유사하다. 그래서 Nino 3.4 지수를 이용하여 엘니뇨/라니냐와 태풍 주요 활동기간 시작일과의 관련성을 살펴보았다. 이를 위해, Fig. 1에서 앞선 12월부터 2월까지의 Nino 3.4 지수가 평년보다 1 표준편차 이상 증가한 경우 엘니뇨, 1 표준편차보다 감소한 경우 라니냐로 정의하여, 겨울철 엘니뇨/라니냐에 뒤따르는 태풍 주요 활동기간의 시작일을 각각 붉은색과 파란색 원으로 표시하였다. 선행하는 겨울에 엘니뇨가 강했을 경우, 태풍 주요 활동기간의 시작일은 확연하게 늦춰지는 것을 확인할 수 있다. 정량적인 값을 살펴보면, 겨울철 엘니뇨 이후 태풍 주요 활동기간의 시작일의 평균은 7월 2일이며, 라니냐 이후 태풍 주요 활동기간의 시작일의 평균은 4월 20일로써 그 차이는 93일에 이른다. 이러한 엘니뇨와 라니냐와 관련된 태풍 주요 활동기간 시작일 평균의 차이는 95% 신뢰도에서 통계적으로 유의미하다. 즉, 북서태평양 지역의 태풍 주요 활동기간 시작일은 선행하는 겨울철의 엘니뇨와 관련된 해수면 온도 변동과 매우 밀접한 관련이 있다고 할 수 있다.

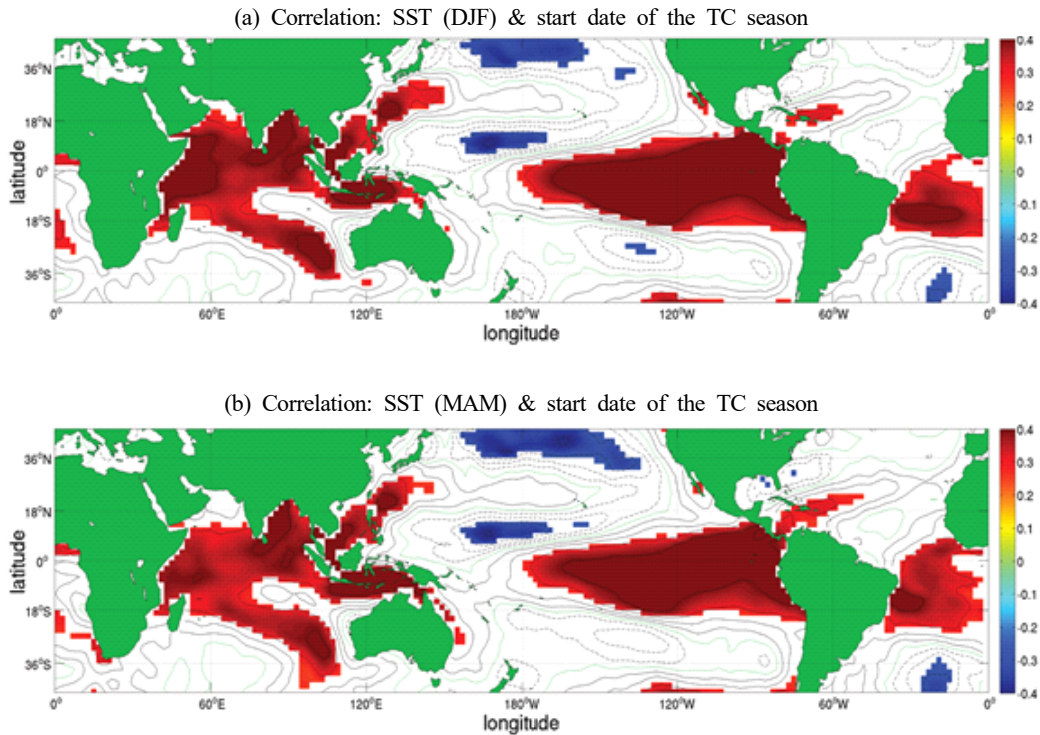


Fig. 2. Correlation between the start date of the TC season and SST in previous winter (a, from previous December to following February) and following spring (b, from March to May). Solid lines and dashed lines denote positive and negative values, respectively, and green lines denote zero. Shading denotes more than 95% confidence.

4. 모델 실험을 통한 기작 분석

4.1 WRF 모델 실험

앞서 이야기한 겨울철 엘니뇨와 관련된 해수면 온도의 분포가 어떠한 기작을 통해 태풍 주요 활동기간의 시작일을 조절하는 지 모델 실험을 통해 살펴보았다 이 연구에서는 Weather Research and Forecasting(WRF) Advanced Research WRF (ARW) 모델 3.7.1 버전(Skamarock *et al.*, 2008)을 사용하여 실험을 진행하였다. 모델 영역은 Fig. 3과 같이 전지구 영역과 북서태평양(90°E~190°E, 10°S~50°N) 2개의 영역으로 설정하였으며, 각 영역의 해상도는 각각 110 km, 37 km이고, 연직으로는 27개 층으로 구성되어 있다. 초기 자료로는 FNL 자료를 사용하였고, 해수면 경계 자료로는 OISST 자료를 사용하여 일주일 간격으로 해수면온도를 업데이트하여 해수면온도의 상대적인 분포가 태풍 발생에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다.

실험은 Table 1과 같이 경계자료로 해수면온도 기후값(1971~2010)을 사용한 실험(CNTL)과 인도양과 동태평양 지역에

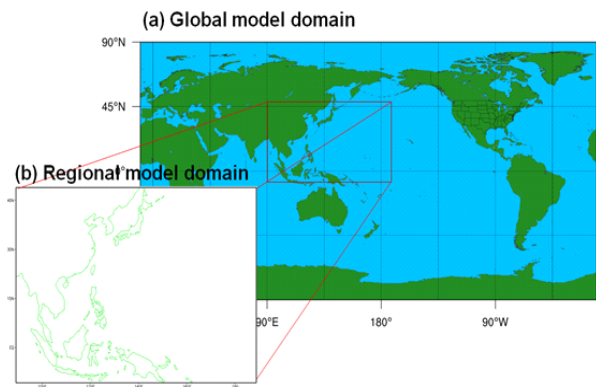


Fig. 3. (a) Global and (b) regional model domains.

강한 엘니뇨 시기(1982/1983, 1997/1998)의 평균 해수면온도의 강제력을 준 실험(EXP_EN)을 진행하였다. Fig. 4는 CNTL과 EXP_EN에서 사용한 해수면 경계 자료의 차이를 보여주고 있다. EXP_EN에서 사용한 해수면온도 자료의 인도양(20°S~20°N, 40°E~100°E)과 동태평양(20°S~20°N, 80°W~180°W)을 제외한 지역에는 CNTL과 마찬가지로 기후값을 사용하였

Table 1. Design of experiments. IO and EP denote the Indian Ocean (20°S-20°N, 40°E-100°E) and the East Pacific (20°S-20°N, 80°W-180°W), respectively

Experiments	SST boundary condition	Simulation time (Ensemble number)	Initialized date
CNTL	Climatological OISST (1971~2000)	50 months (1)	25 Dec
EXP_EN	Climatological OISST (1971~2000) + SST anomaly of strong El Nino Years (1982/1983, 1997/1998) in IO, EP	14 months (4)	04,11,18,25 Dec
EXP_2016	OISST for simulating years (2015, 2016)	10 months (4)	02,09,16,23 Dec

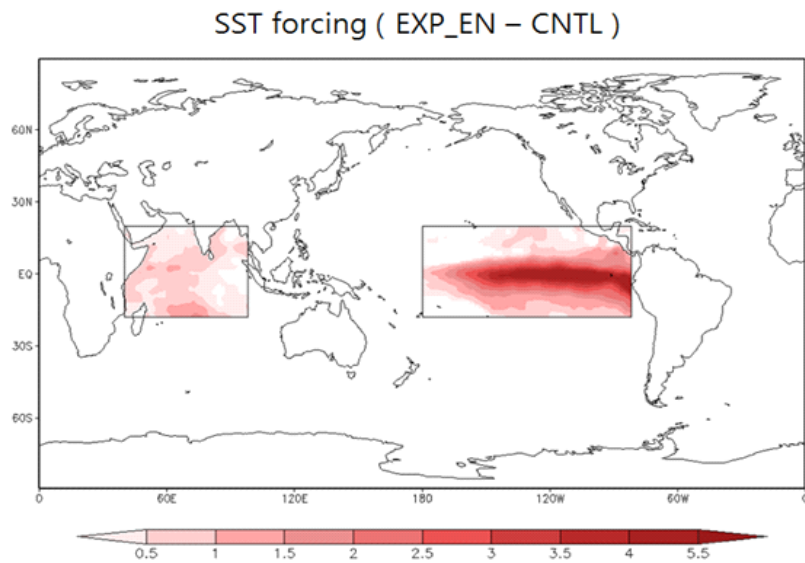


Fig. 4. Difference in the sea surface temperature boundary conditions for the simulations of EXP_EN and CNTL.

으며, 인도양과 동태평양에만 강한 엘니뇨 시기의 해수면온도가 사용되었음을 보여준다. 이러한 해수면 온도의 강제력을 가한 실험이외에 실제 앞선 겨울에 강한 엘니뇨가 존재하였던 실제 사례인 2016년 대해서도 살펴보기 위해 2015/2016년 관측값을 초기 자료와 해수면 경계 자료로 사용한 실험 (EXP_2016)을 추가하였다. 2015/2016년 겨울의 엘니뇨는 지난 50년간 가장 강한 엘니뇨에 해당하였으며(L'Heureux *et al.*, 2016), 2016년은 1호 태풍이 7월 3일 발생할 정도로 태풍 활동의 시작이 매우 늦은 사례에 해당한다.

모든 실험의 시작일은 모델 초기값의 영향을 줄이기 위해 12월로 하였다. CNTL에서는 모델 초기값인 12월 25일로부터 50개월(약 4년)간의 적분 결과를 얻었으며, EXP_EN은 초기값을 전년도 12월 중 시작일을 다르게 하여(12월 4일, 11일, 18일, 25일) 각 14개월(약 1년) 적분한 4개의 실험 결과를 얻었다. EXP_2016의 경우에는 EXP_EN과 비슷하게 2015년 12월 중 시작일을 다르게 초기값을 지정한 4개의 실험을 진

행하였다. 다만, 2016년 해수면 온도 및 대기 분석장의 자료가 충분하지 않아 초기값으로부터 9월까지 약 10개월 적분한 결과를 얻을 수 있었다. 모델 적분 기간은 상대적으로 짧지만, 2016년 태풍 주요 활동기간의 시작일은 충분히 모델에서 모의될 수 있었다. 모델 결과 분석에서는 불확실성을 최소화하기 위해 각각의 모델 실험 결과를 앙상블 평균하여 분석하였다.

모델실험 결과로부터의 태풍의 추적은 Zhao *et al.*(2009)를 참고하였으며, 그 방법은 아래와 같다.

- 850 hPa 상대 소용돌이도가 $3.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 이상인 지점의 2° 내에서의 해면기압 최솟값이 태풍의 중심으로 정의된다.
- 태풍의 중심 2° 내에서 300~500 hPa 사이의 평균 기온 최댓값이 나타나는 지역의 기온이 주변 평균 기온보다 적어도 1K 이상 높아야 한다.
- 태풍의 시작점은 40°S와 40°N 사이에 위치해야 하며, 6시간 간격으로 이어지는 두 개의 소용돌이도 사이의 거

리는 400 km 이내에 있어야 한다.

- 최종적으로 태풍의 진로는 17 m/s 이상의 중심 최대 풍속이 연속되지 않더라도 적어도 3일 이상 유지해야 한다.

4.2. WRF 모델 실험 결과

Fig. 5는 1951년부터 2014년까지 관측된 월평균 태풍 발생 분포와 CNTL, EXP_EN 실험 결과 발생한 태풍의 월별 분포를 나타낸 그림이다. 이 그래프에서도 관측값과 CNTL 실험의 결과, 모두 8월에 최댓값을 가지고 2월에 최솟값을 갖는 월별 태풍 발생 분포가 동일하게 나타나고 있다. Table 2에서는 각 실험에서 나타나는 태풍 주요 활동기간의 시작일, 종료일, 길이 및 기간에 대한 정보를 보여주고 있다. CNTL 실험의 경우, 태풍 주요 활동기간의 시작일은 5월 23일, 종료일은 12월 1일, 총 길이는 192일, 태풍 발생 개수는 26.75개로 지난 64년(1951~2014) 관측 평균값인 5월 18일, 11월 28일, 195일, 26.11개와 매우 유사하게 모의되고 있었다. 이는 본 연구에서 사용한 WRF 모델이 북서태평양의 태풍 활동의 연중 변화 및 태풍 주요 활동기간을 적절히 모의하고 있음을 알려주고 있다.

인도양과 동태평양에 강한 엘니뇨 시기의 해수면 온도를 준 실험(EXP_EN)의 경우, 태풍 주요 활동기간의 시작일이 6월 27일로 CNTL에 비해 한 달 이상 늦어진 것으로 모의되었다(Table 2). 태풍 발생 개수는 24.7개로 CNTL에 비해 다소 적었으나, 통계적으로 유의미한 차이는 보이지 않았다. Fig. 5를 보면, CNTL에서는 5월 이전부터 태풍 발생이 나타나며, 5월에 태풍의 발생이 증가하지만, EXP_EN 실험에서 5월까지 태풍이 거의 발생하지 않고 6월에 들어서 태풍 발생이 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다.

실제 앞선 겨울에 강한 엘니뇨가 있었던 2016년에 대한 실험(EXP_2016)에서 나타나는 태풍에 대한 월별 평균 발생수를 나타낸 Fig. 6을 보면, 5월까지 태풍이 발생하지 않으며, 6월에 들어서야 첫 태풍이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 태풍 주요 활동기간 전체에 대한 모의가 진행되지 않아 분위수 기반의 태풍활동의 시작일은 계산할 수 없지만, 4개의 앙상블 실험에서 발생하는 첫 번째 태풍의 발생일의 평균은 6월 26일로 실제 2016년 태풍 발생일 7월 3일에 근접하게 나타나고 있으며, 앞선 CNTL 실험에서의 태풍 주요 활동기간 시작일보다 한 달 이상 늦은 것으로 확인할 수 있었다.

앞선 결과를 통해 본 연구에서의 모델 실험은 엘니뇨와 관련된 동태평양 및 인도양 해수면온도 상승에 따른 태풍 주요 활동기간 시작일의 지연을 적절히 모의하고 있음을 알 수 있었다. 이러한 현상을 유발하는 역학과정을 알아보기 위해 EXP_EN과 CNTL 실험에서 모의된 대기 순환장 차이를 분석

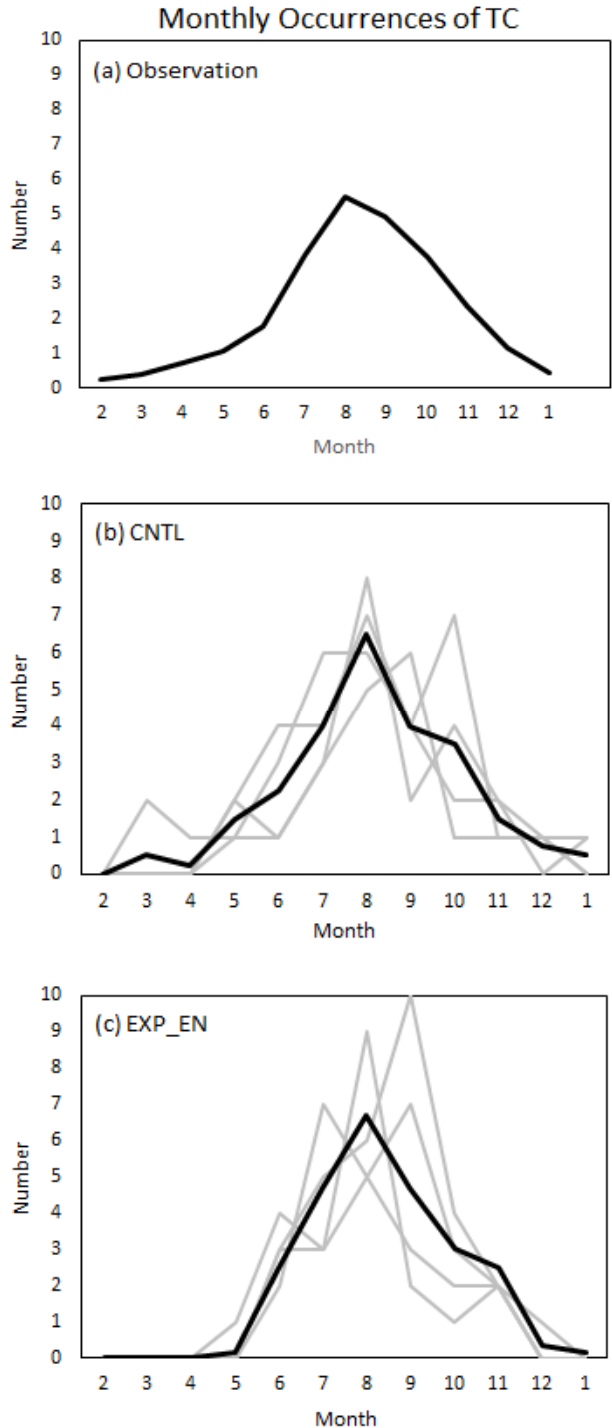


Fig. 5. Distribution of monthly mean TC frequency in the WNP from (a) observations (1951~2014), (b) CNTL and (c) EXP_EN simulations. The grey lines indicate each simulation and the black lines denote ensemble mean of simulations.

Table 2. Statistics of the TC season for observations and simulations

	Observation (1951~2014)	Simulation	
		CNTL	EXP_EN
Start date	18 May	23 May	27 Jun
End date	28 Nov	1 Dec	14 Nov
Length	195 days	192 days	140 days
Number	26.1	26.8	24.7

하여 EXP_EN 실험에서 해수면 온도의 강제력이 어떠한 대기 순환장을 유도하고 있는지 확인해 보았다. Fig 7은 EXP_EN과 CNTL의 850hPa 지위고도, 상대소용돌이도 및 수평 바람의 차이를 그린 그림이다. 우선 850 hPa 지위고도의 차를

Monthly occurrences of TC

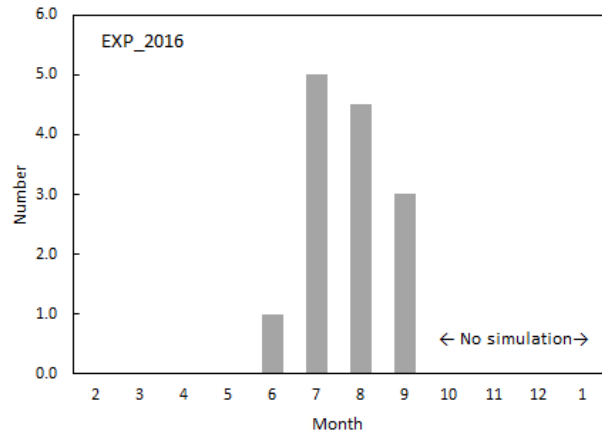


Fig. 6. Distribution of monthly mean TC for simulation (EXP_2016).

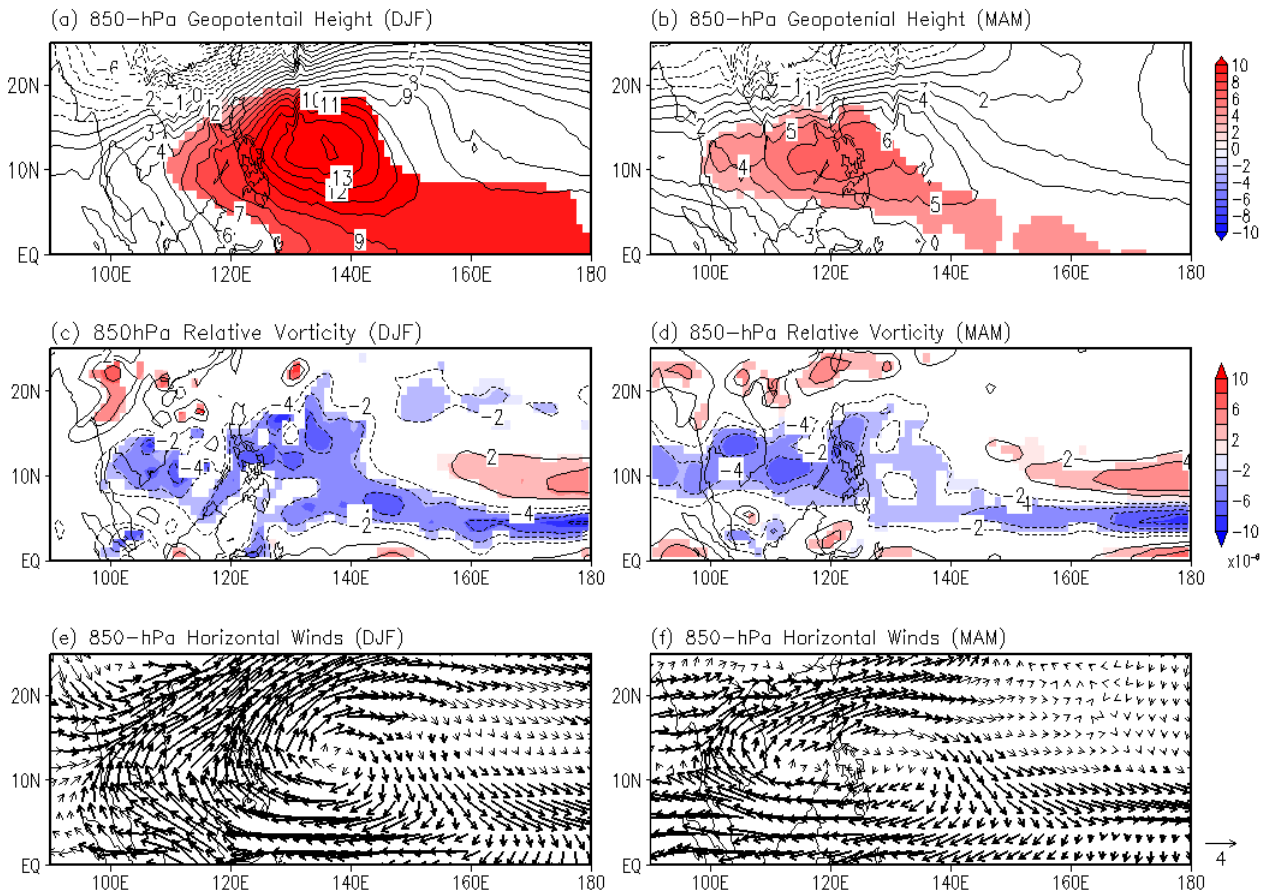


Fig. 7. Differences in (a, b) 850 hPa geopotential height, (c, d) relative vorticity, (e, f) horizontal winds from EXP_EN and CNTL. (EXP_EN minus CNTL). The left panels show the differences in the environments from December to February and the right panels show them in March to May. The shading and thick vector indicate the significance at the 90% confidence level.

그런 Fig. 5 (a)를 보면 겨울철(12~2월)에 북서태평양 부근에 상대적인 고기압성 편차가 존재하며, 이 고기압은 봄철(3~5월)까지도 지속된다. 850hPa 상대 소용돌이도와 바람장을 보면 겨울과 봄철까지 북서태평양 부근에서의 음의 상대소용돌이도와 고기압성 회전이 유도되고 있다. 즉, 인도양과 동태평양의 해수면온도 상승을 강제력으로 주었을 때, 북서태평양 지역에서는 고기압 편차와 함께 고기압성 회전이 유도되면서 봄철 태풍의 발생을 억제하여 태풍 활동의 시작을 늦추는 기작으로 작용하고 있음을 확인할 수 있었다.

엘니뇨와 관련하여 북서태평양 지역의 고기압성 편차가 나타나는 현상은 과거 연구들에서 알려진바 있다. 엘니뇨 시기 중태평양과 동태평양의 해수면 온도의 상승으로 워커 순환이 약해지면서 열대 서태평양지역의 대류활동이 억제되고, 이에 대한 Rossby wave 반응에 의해 필리핀해 지역에는 고기압 편차가 나타날 수 있다(Wang *et al.*, 2000; Wang and Zhang, 2002; Wu *et al.*, 2010). 또한, 엘니뇨 시기에는 원격상관의 효과로 인해 인도양의 해수면온도 또한 증가한다고 알려져 있는데(Klein *et al.*, 1999; Webster *et al.*, 1999), 이러한 인도양의 해수면 온도의 상승 역시 북서태평양 지역이 고기압 편차를 강화·지속시키는 역할을 하고 있다는 과거 연구들이 존재한다 (Watanabe and Jin, 2002; Du and Yang, 2011). Yang *et al.*(2007)에 따르면 엘니뇨 발생지역의 해수면 온도는 12월에 최댓값을 가지고 봄철에 급격히 쇠퇴하지만, 엘니뇨로 인해 발생하는 인도양의 해수면 온도의 증가의 경우 겨울부터 봄철까지 최댓값을 가지고, 여름철까지도 지속되어 엘니뇨의 효과를 연장시켜주는 역할을 한다. 또한 Du & Yang(2011)에 따르면 이 인도양의 해수면 온도의 증가는 대류권 상층에서 따뜻한 켈빈파를 동쪽으로 전파시키고, 그로 인해 북서태평양 부근에 대류가 억제되고, 고기압 아노말리를 형성시킨다. Wang *et al.*(2000)에 따르면 엘니뇨 해의 겨울철에 필리핀해 지역에서 고기압성 흐름이 발달하여 동아시아 기후에 많은 영향을 미친다. 이 필리핀해 고기압은 다음해 여름까지 지속되며, 인도양의 해수면온도 증가로 인해 강해질 수 있다(Watanabe and Jin, 2002). 따라서 엘니뇨 시기에 동태평양과 인도양의 해수면 온도의 증가, 그리고 북서태평양의 고기압은 서로 상관성이 높으며, 이러한 고기압이 태풍의 발생을 억제하여 태풍의 개수가 감소할 뿐 아니라, 태풍 주요 활동기간의 시작일 또한 늦추게 된다.

5. 결론 및 토의

북서태평양에서 태풍 주요 활동기간은 강한 경년 변동을

가지고 있는데, 이는 시작일에 크게 의존한다. 또한 태풍 주요 활동기간의 시작일은 열대 인도양과 동태평양 지역의 상대적인 해수면 온도와 밀접한 관련을 가지고 있다. 엘니뇨 시기 인도양과 동태평양 지역의 해수면 온도 편차를 강제력으로 준 모델 실험 결과, 관측과 비슷하게 엘니뇨 이후 태풍활동의 시작이 한 달 가량 늦춰지는 것으로 나타났다. 인도양과 동태평양 지역의 해수면 온도 편차의 강제력은 겨울과 이른 봄철에 태풍 발생지역인 북서태평양 부근에 고기압성 흐름을 유도하였으며, 이는 봄철 태풍의 발생을 억제하는 기작으로 작용하여 태풍 주요 활동기간의 시작일을 크게 늦추게 된다.

본 연구에서는 모델 실험을 통해 북서태평양의 태풍 주요 활동기간의 시작일이 인도양과 동태평양의 해수면 온도와 밀접한 관련성을 가지고 있음을 제시하였다. 이는 태풍 발생지역인 북서태평양과 멀리 떨어진 인도양과 동태평양의 해수면 온도의 변동이 북서태평양 지역의 태풍활동에 영향을 미칠 수 있음을 암시하고 있으며, 향후 지구 온난화와 관련된 북서태평양 태풍 활동의 변동을 예상하는데 있어, 단순한 태풍 발생 지역의 해수면 온도의 증가뿐만 아니라, 열대 해수면 온도의 지역적 분포가 어떻게 변하는지도 중요한 인자로 작용할 수 있음을 알려 주고 있다.

사 사

이 연구는 기상청 「기상·지진Sec-At기술개발연구」(KMIPA 2015-1100)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Chan JCL, Liu KS. 2004. Global warming and western North Pacific typhoon activity from an observational perspective. *J Clim* 17:4590-4602.
- Du Y, Yang L, Xie SP. 2011. Tropical Indian Ocean influence on Northwest Pacific tropical cyclones in summer following strong El Nino. *J Clim* 24:315-322.
- Julian PR, Chervin RM. 1978. A study of the Southern Oscillation and Walker circulation phenomenon. *Mon Wea Rev* 106:1433-1451.
- Klein SA, Soden BJ, Lau NC. 1999. Remote sea surface variations during ENSO: Evidence for a tropical atmospheric bridge. *J Clim* 12:917-932.
- Kossin JP. 2008. Is the North Atlantic hurricane season getting longer? *Geophys Res Lett* 35:L23705.

- Kim D, Kim HS, Park DSR, Park MS. 2017. Variation of the tropical cyclone season start in the Western North Pacific. *J Clim*. doi: 10.1175/JCLI-D-16-088.1.
- L'Heureux ML, Takahashi K, Watkins AB, Barnston AG, Becker EJ, Liberto TED, Gamble F, Gottschalek J, Halpert HS, Huan B, Mosquera-Vasquez K, Witternberg AT. 2017. Observing and predicting the 2015-16 El Niño. *Bull Amer Meteor Soc*. doi: 10.1175/BAMS-D-16-0009.1.
- Park DSR, Ho CH, Nam CC, Kim HS. 2015. Evidence of adaptation effectiveness on tropical cyclones in Republic of Korea, *Env Res Lett* 10:054003. doi: 10.1088/1748-9326/10/5/054003
- Reynolds RW, Rayner NA, Smith TM, Stokes DC, Wang W. 2002. An improved *in situ* and satellite SST analysis for climate. *J Climate* 15:1609-1625.
- Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, Gill DO, Barker DM, Duda MG, Huang XY, Wang W, Powers JG. 2008. A description of the advanced research WRF version 3, Tech. Note TN-475, Natl Cent Atmos Res, Boulder, CO.
- Smith TM, Reynolds RW, Peterson TC, Lawrimore J. 2008. Improvements to NOAA's historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880-2006). *J Clim* 21:2283-2296.
- Sugi MA, Noda A, Sato N, 2002. Influence of the global warming on tropical cyclone climatology: An experiment with the JMA Global Model. *J Meteor Soc Jpn* 80:249-272.
- Walsh KJ, McBride E, Klotzbach JL, Balachandran PJ, Camargo SJ, Holland G, Knutson TR, Kossin JP, Lee, TC, Sobel A, Sugi, M. 2016. Tropical cyclones and climate change. *WIREs Clim Change* 7:65-89.
- Wang B, Zhang Q. 2002. Pacific-East Asian teleconnection. Part II: How the Philippine Sea anomalous anticyclone is established during El Niño development. *J Clim* 15:3252-3265.
- Wang B, Wu R, Fu X. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? *J Clim* 13:1517-1536.
- Watanabe M, Jin FF. 2002. Role of Indian Ocean warming in the development of Philippine Sea anticyclone during ENSO. *Geophys Res Lett* 29:1478.
- Webster PJ, Moore AM, Loschnigg JP, Leben RR. 1999. Coupled oceanic-atmospheric dynamics in the Indian Ocean during 1997-98. *Nature* 401:356-360.
- Wiles GJ, Rodda GH, Fritts TH, Taisacan EM. 1999. Abundance and habitat use of reptiles on rota, Mariana Islands. *Micronesia* 23:153-166.
- Wu B, Li T, Zhou T. 2010. Asymmetry of atmospheric circulation anomalies over the western North Pacific between El Niño and La Niña. *J Clim* 23:4807-4822.
- Yang JL, Liu QY, Xie SP, Liu ZY, Wu LX. 2007. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon. *J Geophys Res* 34:L02708
- Zhao M, Held IM, Lin SJ, Vecchi GA. 2009. Simulations of global hurricane climatology, interannual variability, and response to global warming using a 50-km resolution GCM. *J Clim* 22:6653-6678.