

대기 대순환 모형과 해수면 온도 관측 자료를 이용한 태풍 활동의 계절 예측 가능성

한지영 · 백종진*

서울대학교 지구환경과학부, 151-742 서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

Seasonal Predictability of Typhoon Activity Using an Atmospheric General Circulation Model and Observed Sea Surface Temperature Data

Ji-Young Han and Jong-Jin Baik*

School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

Abstract: The seasonal predictability of typhoon activity over the western North Pacific is investigated using an atmospheric general circulation model GPCP. A ten-member ensemble with different initial conditions is integrated for five months using observed sea surface temperature data for each year from 1979 to 2003. It is shown that the monthly variation of occurrence frequency of simulated tropical storms and the distribution of tropical storm genesis location are similar to those of observed tropical storms, but the model is unable to reliably predict the interannual variation of the occurrence frequency of tropical storms. This is largely because the observed relationship between tropical storm occurrence frequency and ENSO is different from the simulated one. Unlike the observation, in which the tropical storm occurrence frequency has no relation to ENSO, the model has a tendency to generate more (less) tropical storms than normal during El Nino (La Nina). On the other hand, the interannual variation of the mean longitude of tropical storms that shows a close connection with ENSO in both observations and simulations is simulated similar to the observation.

Keywords: seasonal prediction, typhoon activity, general circulation model, ENSO

요 약: 대기 대순환 모형인 GPCP를 이용하여 북서태평양에서의 태풍 활동의 계절 예측 가능성을 조사하였다. 1979년부터 2003년까지 각 해에 대해 해수면 온도 관측 자료를 사용하여 5개월간 초기 조건을 달리한 10개의 앙상블 멤버를 적분하였다. 모형은 발생 빈도의 평균적인 월변화 경향과 발생 분포를 관측과 유사하게 모의하였으나, 발생 빈도의 경년 변화는 신빙성 있게 예측하지 못하였다. 이는 관측과 모형간 태풍 발생 빈도와 ENSO의 상관성 차이에 인한 것으로 실제 태풍 발생 빈도와 ENSO가 뚜렷한 상관 관계를 갖지 않는 것과 달리, 모형에서는 엘니뇨 시기에 평년에 비해 많은 태풍이 발생하고 라니냐 시기에 평년에 비해 적은 태풍이 발생하는 경향을 보였기 때문이다. 반면에, 관측과 모형 모두 ENSO와의 상관 관계가 높게 나타난 태풍 발생 경도의 경우에는 모형이 발생 경도의 경년 변화를 관측과 유사하게 모의하였다.

주요어: 계절 예측, 태풍 활동, 대기 대순환 모형, ENSO

서 론

태풍은 동아시아 지역의 기후와 일기에 직접적인 영향을 미치는 중규모 기상 현상으로, 사회·경제적으로 막대한 손실을 야기하는 자연 재해 중 하나이다.

따라서 태풍의 진로, 강도, 발생 빈도 등에 대한 정확한 예측을 위한 연구는 동아시아 기상 연구의 주 관심사 중 하나이다. Manabe et al.(1970)이 최초로 낮은 분해능의 전구 모형을 이용한 태풍 모의를 시도한 이후 역학 모형의 장기 적분을 통한 태풍 활동 예측 연구가 활발하게 진행되어 왔다. Vitart and Stockdale(2001)은 전구 모형을 이용하여 태풍 발생 빈도와 생성 위치의 계절 예측가능성을 제시하였고, 김지선과 권혁조(2003)는 기상청 GDAPS(Global Data

*Corresponding author: jjbaik@snu.ac.kr

Tel: 82-2-880-6990

Fax: 82-2-883-4972

Assimilation and Prediction System)를 이용하여 북서태평양에서 발생하는 태풍의 계절 예측을 시도하였다.

기존의 연구 결과에 의하면 종관 규모의 예측가능성은 2주 이내로 한정되어 있기 때문에 전구 모형의 장기 적분을 통한 태풍의 강도, 진로, 강수량 등에 대한 예측은 한계가 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 태풍의 형성은 해수면 온도, 연직 바람 시어 등과 같은 대규모 인자와 밀접한 관계가 있기 때문에 (Gray, 1968, 1979), 전구 모형이 관측과 유사하게 대규모 순환을 모의해낼 수 있다면 태풍 발생 빈도에 대한 계절 예측이 가능할 것으로 보인다. 본 연구에서는 이러한 논의를 위해 전구 모형을 이용한 태풍 활동의 계절 예측가능성을 살펴보고자 한다.

연구 방법 및 절차

본 연구에서는 서울대학교에서 개발된 대기 모형인 SNU/KMA(Seoul National University/Korea Meteorological Administration) GCPS(Global Climate Prediction System)를 사용하였다. GCPS는 평균장의 기후 모의 및 장기 예측에 중요한 동아시아 몬순 구조 및 변동성을 비교적 현실적으로 모의하는 모형으로(서울대학교 대기환경연구소, 2001), T63(위·경도 격자 간격이 약 1.875°)의 수평 해상도를 가지며 연직으로는 21개 층을 갖는다. 1979년부터 2003년까지 각 해에 대해 5월 17일 00Z부터 21일 12Z까지 12시간 간격으로 초기 조건을 달리한 10개의 앙상블 멤버를 사용하여 10월까지 5개월간 모형 적분을 수행하였다. 초기 조건의 직접적인 효과를 제거하기 위해 최초 10일간의 적분 수행 결과는 분석에서 제외하였다. PCMDI(Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison)에서 AMIP(The Atmospheric Model Intercomparison Project) II 실험을 하기 위해 제공한 해수면 온도 관측 자료를 경계 조건으로 사용하였다. 일반적인 경우 전구 모형으로부터 일평균 값의 적분 결과를 산출하나, 평균장이 태풍의 생성과 진로 등에 대한 정보를 완화시킬 가능성을 배제하기 위하여 전구 모형 적분 결과를 12시간 간격으로(00Z, 12Z) 저장하였다.

실제 태풍은 하층의 강한 저기압성 흐름과 유입, 상층의 약한 고기압성 흐름과 온난핵 등의 특징을 갖는다. 모형 내에서는 3일 이상 다음 조건이 동시에 만족될 경우 태풍으로 간주하였다. 조건 3은 온대 저

기압이 태풍으로 분류되는 것을 제외하기 위한 것이다.

- 1) 850 hPa 상대 소용돌이도 $> 3.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$
- 2) 해면 기압 $< 1007 \text{ hPa}$
- 3) 발생 위도 $< 30^\circ\text{N}$

결과 및 토의

Fig. 1은 북서태평양에서의 6월부터 10월까지의 태풍 발생 빈도를 나타낸 것이다. 실선은 1979년부터 2003년까지 25년간 실제 관측된 월별 태풍 발생 빈도를 평균한 것으로 RSMC(Regional Specialized Meteorological Center) Tokyo-Typhoon Center의 자료를 사용하였다. 점선은 같은 기간 동안 전구 모형이 모의한 월별 태풍 발생 빈도를 평균한 것으로 앙상블 평균값을 사용하였다. 모형은 실제 태풍 발생 빈도의 평균적인 월변화 경향과 유사하게 해수면 온도가 상대적으로 높은 8, 9월에 발생 빈도가 높게 나타나고 해수면 온도가 낮은 6월에 발생 빈도가 낮게 나타나는 경향을 비교적 잘 모의하였으나, Vitart and Stockdale(2001)의 모형 적분 결과와 마찬가지로 태풍이 가장 많이 발생하는 달을 8월이 아닌 9월로 모의하였다. 또한 모형이 실제 관측 값보다 적게 태풍 발생을 모의하였는데 이는 모형의 낮은 분해능에 의한 것으로 보인다(Kobayashi and Sugi, 2004).

Fig. 2는 1979년부터 2003년까지 6월과 10월 사이에 북서태평양에서 발생한 태풍의 발생 위도 분포를 나타낸 것이다. 모의한 태풍의 발생 위도는 실제 태풍과 유사한 분포를 보이지만 평균 발생 위도가 관

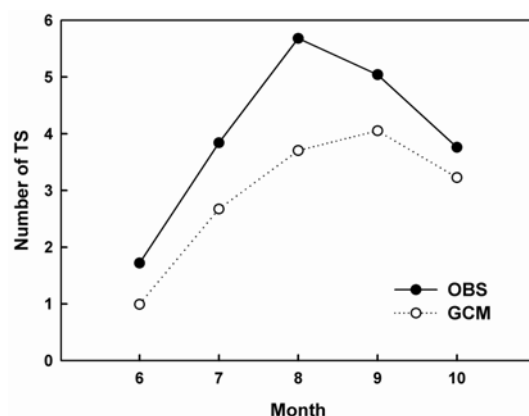


Fig. 1. Monthly mean occurrence frequency of observed (solid line) and simulated (dotted line) tropical storms over the western North Pacific for the period 1979-2003.

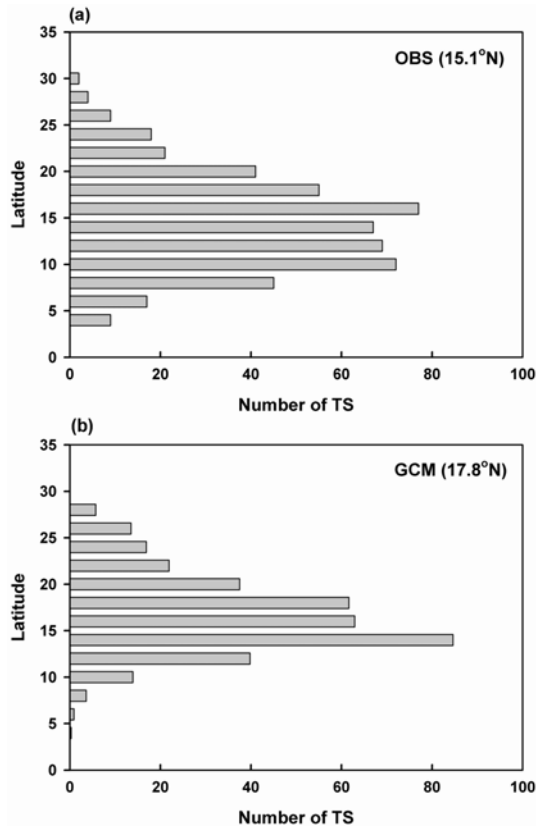


Fig. 2. Distribution of (a) observed and (b) simulated tropical storm genesis latitude over the western North Pacific for the period June-October of 1979-2003. Mean values are in parentheses.

측된 것보다 높은 위도에서 나타나고 있다. Fig. 3은 발생 경도 분포를 나타낸 것으로 위도 분포와 마찬가지로 관측과 유사한 분포를 보이지만 평균 발생 경도가 관측보다 서쪽에 나타나고 특히 남중국해($108^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$)에 실제보다 많은 비율의 태풍을 모의하였다. 이처럼 모의한 태풍의 평균적인 발생 위치가 관측에 비해 북서쪽으로 편향된 분포를 보이는 것은 모형의 낮은 분해능으로 인해 실제보다 약한 강도를 가진 태풍을 모의하기 때문인 것으로 생각할 수 있다. 초기의 약한 강도의 태풍은 본 연구에서 제시한 태풍 확인 조건을 동시에 만족시키지 못해 태풍으로 분류되지 못하고 어느 정도 발달한 뒤에야 태풍으로 분류되는 것으로 보인다.

Fig. 4는 1979년부터 2003년까지 6월과 10월 사이에 북서태평양에서 발생한 태풍의 연도별 발생 빈도를 나타낸 것이다. 대체로 모형이 실제 관측 값보다

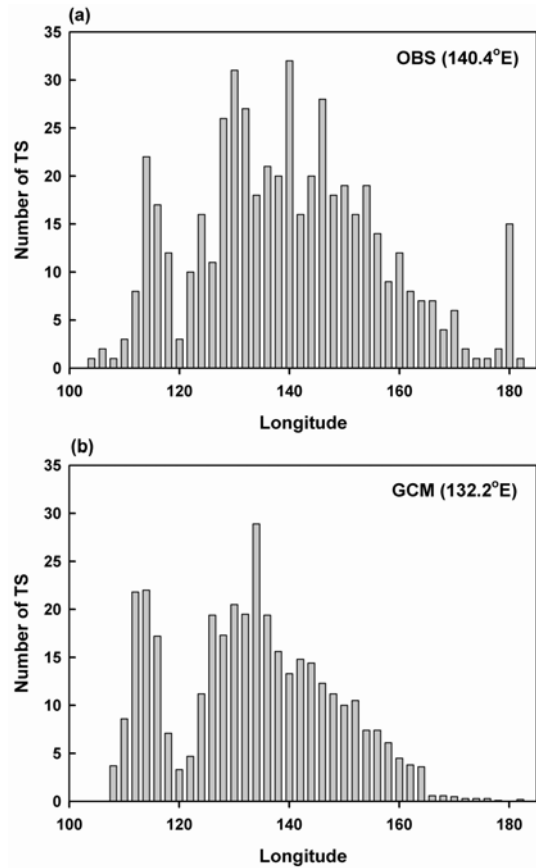


Fig. 3. Distribution of (a) observed and (b) simulated tropical storm genesis longitude over the western North Pacific for the period June-October of 1979-2003. Mean values are in parentheses.

적게 태풍 발생을 모의하였으나 연도별 발생 빈도의 변화 정도는 더 크게 모의하였다(Table 1). 고려한 전체 기간에 대해 관측과 모형간의 연도별 태풍 발생 빈도의 상관 계수(r)는 0.3으로 그리 높지 않은 양의 상관 관계를 보였지만, 발생 빈도가 증가하다가 감소하는 장기간 변화 경향은 유사하게 나타났다. 또한 1979년부터 1992년까지의 앞 기간에는 관측과 모형간의 연도별 태풍 발생 빈도가 낮은 음의 상관 관계($r = -0.22$)를 갖는 반면, 1993년부터 2003년까지의 뒤 기간에는 높은 양의 상관 관계($r = 0.75$)를 갖는 특징을 보였다.

Fig. 5는 태풍 발생 빈도와 남방 진동 지수(Southern Oscillation Index; SOI)의 시계열을 나타낸 것이다. 남방 진동 지수는 적도 태평양의 무역풍 강도를 나타내는 지수로 남태평양의 타이티(Tahiti)와 호주 다윈

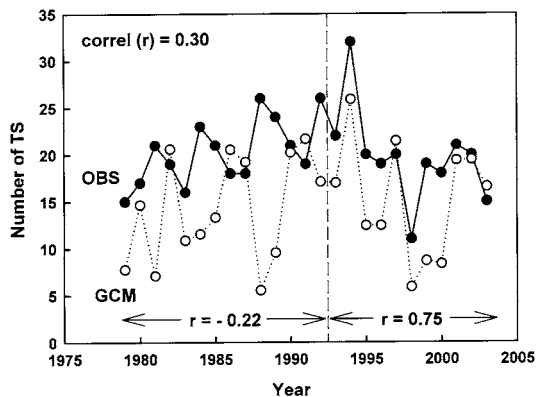


Fig. 4. Yearly variation of occurrence frequency of observed (solid line) and simulated (dotted line) tropical storms over the western North Pacific for the period June-October.

Table 1. Mean tropical storm occurrence frequency and longitude over the western North Pacific for the period June-October of 1979-2003. Standard deviations are in parentheses

	OBS	GCM
Mean number	20 (4.2)	14.7 (5.8)
Mean longitude	140.4°E (4.2)	132.2°E (6.1)

(Darwin)의 월평균 해면 기압 차이로 정의되며, 엘니뇨 시기에는 음의 큰 값을 갖는 반면 라니냐 시기에는 양의 큰 값을 갖는다. 본 연구에서는 남방 진동 지수의 6-10월 평균값을 사용하였다. 실제 태풍 발생 빈도와 ENSO(El Nino Southern Oscillation)는 이전 연구를 통해 알려진 것처럼(Lander, 1993; Wang and Chan, 2002) 뚜렷한 상관 관계를 보이지 않는 반면($r = -0.26$), 모의한 태풍 발생 빈도와 ENSO는 높은 상관 관계를 보이는 것으로 나타나($r = -0.82$) 관측과 모형에서 태풍 발생 빈도와 ENSO의 상관성이 다르게 나타남을 확인하였다. 모형의 경우 엘니뇨가 나타난 시기(예, 1982, 1997)에는 평년에 비해 많은 태풍이 발생하고 라니냐가 나타난 시기(예, 1988, 1998)에는 평년에 비해 적은 태풍이 발생하는 경향을 보였다(Fig. 5b). 관측과 모형간 태풍 발생 빈도와 ENSO의 상관성 차이로 인해 고려한 전체 기간 중 실제 태풍 발생 빈도와 ENSO의 상관 관계가 낮게 나타난 앞 기간(1979-1992)에는 관측과 모형간의 연도별 태풍 발생 빈도의 상관 관계도 낮게 나타난 반면, 모형에서와 마찬가지로 엘니뇨/라니냐 시기에 따른 태풍 발생 빈도의 변화가 비교적 뚜렷하게 나타난 뒤 기간(1993-2003)에는 관측과 모형간 연도별 태풍 발생 빈도의

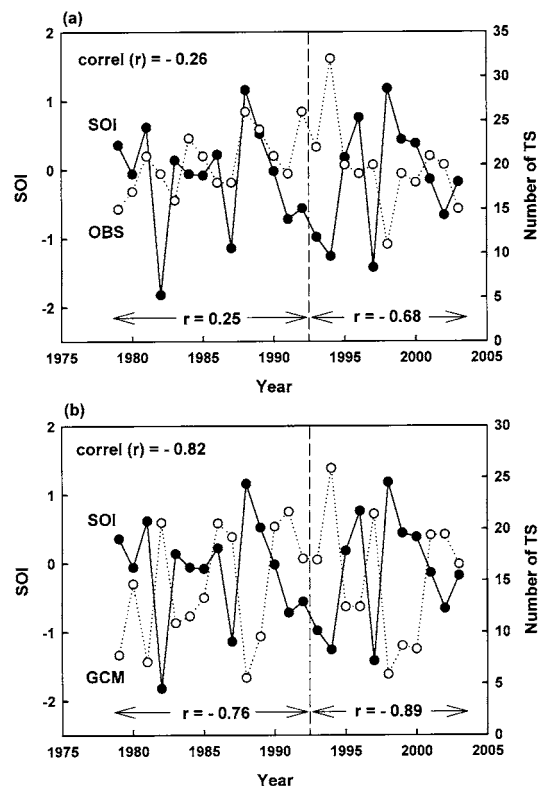


Fig. 5. Yearly variation of SOI (solid line) and (a) observed and (b) simulated tropical storm occurrence frequency over the western North Pacific (dashed line) for the period June-October.

상관 관계도 높게 나타났다(Fig. 4와 Fig. 5a).

태풍 발생 빈도와 달리 실제 태풍 발생 경도와 ENSO는 뚜렷한 상관 관계를 갖는 것으로 알려져 있다(예, Chan, 2000; Wang and Chan, 2002; Chia and Ropelewski, 2002). 엘니뇨가 나타난 시기에는 실제 태풍 발생이 평년에 비해 동쪽으로 편향된 분포를 보이는 반면, 라니냐가 나타난 시기에는 평년에 비해 서쪽으로 편향된 분포를 보이는데(Fig. 6a) 모형에서 이러한 경향이 더욱 뚜렷하게 나타나는 것을 확인하였다(Fig. 6b). 이러한 분석 결과로부터 예상할 수 있듯이 관측과 모형 모두 ENSO와의 상관 관계가 높게 나타난 태풍 발생 경도의 경우에는 모형이 실제 태풍 발생 경도의 변화를 대체로 잘 모의하는 것으로 나타났다(Fig. 7). 고려한 전체 기간 동안 모의한 태풍의 평균 발생 경도가 실제보다 서쪽에 나타났으며 연도별 발생 경도의 변화 정도가 관측에 비해 크게 나타나는 특징을 보였다(Table 1).

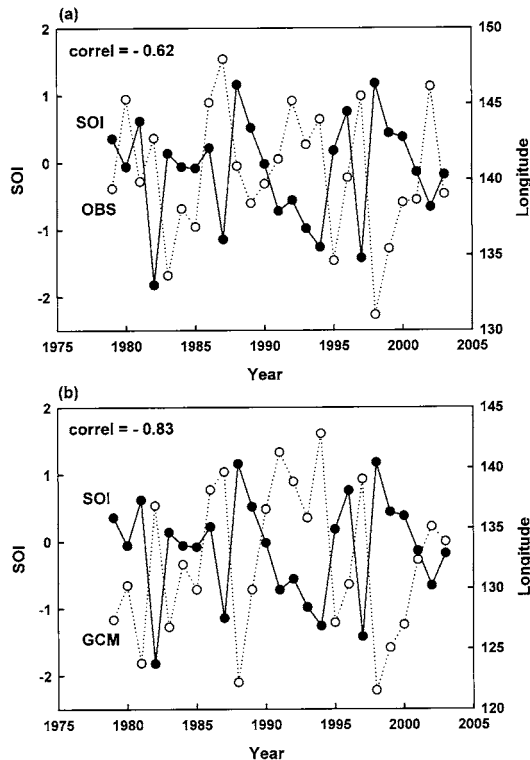


Fig. 6. Yearly variation of SOI (solid line) and (a) observed and (b) simulated tropical storm genesis longitude over the western North Pacific (dashed line) for the period June-October.

요약 및 결론

본 연구에서는 대기 대순환 모형을 이용한 북서태평양에서의 태풍 활동의 계절 예측가능성과 태풍 활동의 장기간 변화를 조사하기 위해, 관측 해수면 온도를 하층 경계 조건으로 사용하여 1979년부터 2003년까지 각 해에 대해 5개월간 모형 적분을 수행하였다. 모형은 발생 빈도의 평균적인 월변화 경향과 발생 분포를 관측과 유사하게 모의하였으나, 발생 빈도의 경년 변화는 신빙성 있게 예측하지 못하였다. 이는 관측과 모형간 태풍 발생 빈도와 ENSO의 상관성 차이에 인한 것으로 실제 태풍 발생 빈도와 ENSO가 뚜렷한 상관 관계를 갖지 않는 것과 달리, 모형에서는 엘니뇨 시기에 평년에 비해 많은 태풍이 발생하고 라니냐 시기에 평년에 비해 적은 태풍이 발생하는 경향을 보였기 때문이다. 반면에, 관측과 모형 모두 ENSO와의 상관 관계가 높게 나타난 태풍 발생 경도의 경우에는 모형이 발생 경도의 경년 변화를

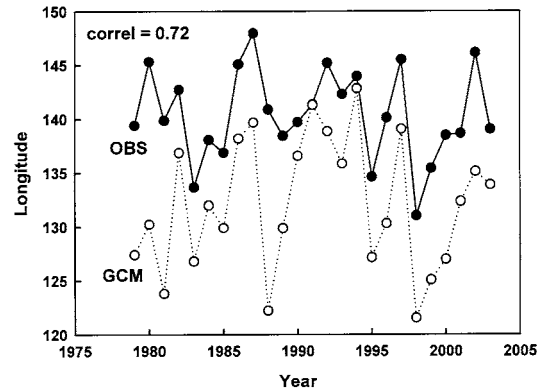


Fig. 7. Yearly variation of observed (solid line) and simulated (dotted line) tropical storm genesis longitude over the western North Pacific for the period June-October.

관측과 유사하게 모의하였다.

분석에 의하면 모의한 태풍의 개수 및 위치는 상대 소용돌이도, 중심 최소 기압 등의 기준 값에 따라 민감하게 반응하기 때문에 최적의 태풍 확인 조건을 찾는 연구가 선행되어야 할 것이다. 또한 이번 연구에서는 모의한 태풍의 발생 빈도를 계산하는데 단순히 앙상블 멤버의 평균값을 고려하였으나, 이를 다루기 위한 적절한 통계적 방법을 찾아 적용시키고자 한다. 향후 연구는 예측된 해수면 온도 자료를 사용한 적분 수행 결과에 대한 분석과 함께 모형에서 모의한 대규모 인자들과 태풍의 발생 빈도, 발생 위치 등과의 연관성을 밝히고자 한다.

사 사

본 연구는 기상청 기상지진기술개발사업의 일환으로 ‘한반도 이상기후 예측 시스템’ 과제에서 수행된 것입니다. 태풍 감지 프로그램을 제공해주신 공주대학교 권혁조 교수님과 모형 적분 수행에 도움을 주신 APEC 기후 센터 이두영님, 그리고 논문에 대해 유익한 지적을 해주신 심사위원님께 감사드립니다.

참고문헌

- 김지선, 권혁조, 2003, GDAPS 앙상블 예보 시스템을 이용한 태풍의 계절 예측. 한국기상학회 추계학술발표회, 36-37.
- 서울대학교 대기환경연구소, 2001, 6개월 예보를 위한 전지구 해양 및 기후 예측 능력 향상. 174 p.

- Chan, J.C.L., 2000, Tropical cyclone activity over the western North Pacific associated with El Nino and La Nina events. *Journal of Climate*, 13 (16), 2960-2972.
- 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*, 15 (20), 2934-2944.
- Gray, W.M., 1968, Global view of the origin of tropical disturbances and storms. *Monthly Weather Review*, 96 (10), 669-700.
- Gray, W.M., 1979, Hurricanes: Their formation, structure and likely role in the tropical circulation. In Shaw, D.B. (ed.), *Meteorology over the tropical oceans*. Royal Meteorological Society, 155-218.
- Kobayashi, C. and Sugi, M., 2004, Impact of horizontal resolution on the simulation of the Asian summer monsoon and tropical cyclones in the JMA global model. *Climate Dynamics*, 23 (2), 165-176.
- Lander, M.A., 1993, Comments on "A GCM simulation of the relationship between tropical storm formation and ENSO". *Monthly Weather Review*, 121 (7), 2137-2143.
- Manabe, S., Holloway, J.L., and Stone, H.M., 1970, Tropical circulation in a time-integration of a global model of the atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 27 (4), 580-613.
- Vitart, F. and Stockdale, T.N., 2001, Seasonal forecasting of tropical storms using coupled GCM integrations. *Monthly Weather Review*, 129 (10), 2521-2537.
- 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 (13), 1643-1658.

2006년 9월 21일 접수
2006년 11월 20일 수정원고 접수
2006년 11월 23일 채택