

## 기상청 기후예측시스템(GloSea6-GC3.2)의 열대저기압 계절 예측 특성

이상민\* · 현유경 · 신범철 · 지희숙 · 이조한 · 황승언 · 부경은  
국립기상과학원 기후연구부

(접수일: 2024년 2월 9일, 수정일: 2024년 2월 28일, 게재확정일: 2024년 3월 12일)

## The Seasonal Forecast Characteristics of Tropical Cyclones from the KMA's Global Seasonal Forecasting System (GloSea6-GC3.2)

Sang-Min Lee\*, Yu-Kyung Hyun, Beomcheol Shin, Heesook Ji,  
Johan Lee, Seung-On Hwang, and Kyung-On Boo

*Climate Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea*

(Manuscript received 9 February 2024; revised 28 February 2024; accepted 12 March 2024)

**Abstract** The seasonal forecast skill of tropical cyclones (TCs) in the Northern Hemisphere from the Korea Meteorological Administration (KMA) Global Seasonal Forecast System version 6 (GloSea6) hindcast has been verified for the period 1993 to 2016. The operational climate prediction system at KMA was upgraded from GloSea5 to GloSea6 in 2022, therefore further validation was warranted for the seasonal predictability and variability of this new system for TC forecasts. In this study, we examine the frequency, track density, duration, and strength of TCs in the North Indian Ocean, the western North Pacific, the eastern North Pacific, and the North Atlantic against the best track data. This methodology follows a previous study covering the period 1996 to 2009 published in 2020. GloSea6 indicates a higher frequency of TC generation compared to observations in the western North Pacific and the eastern North Pacific, suggesting the possibility of more TC generation than GloSea5. Additionally, GloSea6 exhibits better interannual variability of TC frequency, which shows relatively good correlation with observations in the North Atlantic and the western North Pacific. Regarding TC intensity, GloSea6 still underestimates the minimum surface pressures and maximum wind speeds from TCs, as is common among most climate models due to lower horizontal resolutions. However, GloSea6 is likely capable of simulating slightly stronger TCs than GloSea5, partly attributed to more frequent 6-hourly outputs compared to the previous daily outputs.

**Key words:** Tropical cyclones, GloSea6, Hindcast, Seasonal forecasts, Interannual variability

### 1. 서론

태풍을 포함한 열대저기압(Tropical Cyclones, TCs)은 강풍, 폭우 등 격렬한 기상 현상을 동반하여 단시간에 막대한 재산과 인명의 피해를 입히는 복합적인

기상재해 중 하나이며, 인구 증가, 도시화 등에 따라 그 피해는 더욱 증가하고 있다(Ahn et al., 2015; Ho et al., 2023). 지난 50년간 전세계에서 발생한 홍수, 가뭄, 한파, 폭염, 산불, 태풍 등의 자연재해 중 사망자 수가 가장 많았던 것은 38%를 차지한 태풍이었으며, 경제적 피해 또한 태풍이 38%로 가장 컸다(WMO, 2021). 우리나라의 경우 1979~2013년 동안의 통계에 의하면, 태풍은 자연재해 중 발생비율은 9%에 불과하나, 그 피해액은 전체 피해의 46%로 가장 많은 비율을 차지하고 있다(Ahn et al., 2015). 특히 기후변화

\*Corresponding Author: Sang-Min Lee, Climate Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, 33 Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, Korea.  
Phone: +82-64-780-6630, Fax: +82-64-738-9072  
E-mail: lsmin9@gmail.com

로 인해 강한 태풍들의 발생이 증가하는 추세로 보고 되거나 추정되고 있으며(Utsumi and Kim, 2022; Camargo et al., 2023; Park et al., 2024), 한반도에 영향을 주는 태풍들 또한 강도가 증가하면서 그 피해도 점차 커지는 실정이다(Kang et al., 2018; Na and Jung, 2020; Basconcillo and Moon, 2023). 이로 인해 최근 태풍의 계절예측 전망은 국민의 인명과 재산을 보호하는데 있어 국가적 사회적 차원에서 중요한 요소라고 할 수 있겠다.

이러한 계절예측에 대한 시도, 방법, 연구 현황과 성과 등에 관해서 Lee et al. (2020)에 이미 기술했듯이 많은 과학적인 연구가 수행되고 있지만, 단기 예보가 아닌 기후예측에 있어 열대저기압은 기후모델의 구조적 오차와 낮은 해상도 문제로 인하여 여전히 불확실성이 크고 예측이 어려운 실정에 있다.

이러한 한계를 기반으로 국립기상과학원은 기상청 현업 기후예측시스템(GloSea6)의 태풍 계절 예측정보 생산을 위한 프로그램을 국제협력을 통해 구축, 검증하여 태풍 계절예측의 실효성을 분석해오고 있으며, 지속적인 개선을 통해 현업을 위한 시험운영을 준비중에 있다. 이의 일환으로, Lee et al. (2020)은 기상청 현업 기후예측시스템(GloSea5)를 활용하여 버전 개선에 따른 열대저기압의 계절예측 특성을 분석하였으며, 그 계절 예측성에 대해 관측자료를 기반으로 검증한 바 있다. 다만 대기 60 km, 해양 27 km의 상대적으로 낮은 기후모델의 해상도로 인하여 그 강도는 관측과 대비하여 상당히 약하게 모의되고 있었다. 또한 Lee et al. (2020)에서는 GloSea5에서 생산된 자료를 추가적인 후처리를 통해 열대저기압 정보를 계산하였다. 그러나 2021년 말부터 새롭게 구축된 기후예측시스템(GloSea6)에서는 열대저기압 예측이 즉각 생산될 수 있도록 시스템 내에 예측 코드가 탑재되었다.

본 연구에서는 이의 시험운영에 앞서 과거 24년 기간(1993~2016년)의 기후장을 생산하여, GloSea6의 열대저기압 발생과 이동 오차 예측에 관한 통계적 특성을 제시하고, 태풍의 계절 예측성을 이전 GloSea5과 간단히 비교 검증하였다. 그리고 태풍의 연변동 및 계절 변동 예측성을 살펴봄으로써 예측성능이 실효적인 단계에 이르렀는지를 평가해 보고자 하였다. 또한, GloSea6는 이전 버전인 GloSea5에 비해 역학, 복사과정, 앙상블시스템의 추계역학, 해양모델 등의 개선을 통해 적도지역 대류권과 대류권계면의 기온, 지위고도, 바람장 등의 편차가 감소한 것으로 보고 되어서(Walters et al., 2019; Kim et al., 2021), 적도지역 부근에서 발생하는 열대저기압에 대해 모의가 어떻게 개선되는지를 알아보는 것은 의미가 있을 것이다. 따라서, 본 연구에서는 열대저기압에 대한 GloSea5 예측성능을 분석한 Lee et al. (2020)의 후속연구로서 이

와 동일한 방법에 따라 GloSea6 기후예측 결과를 분석하였다. 한편, 여기서는 Lee et al. (2020)의 14년 기간(1996~2009년)을 포함하는 24년 간(1993~2016년)의 장기간을 분석했기 때문에, 직접적인 상호 비교 시 주의해서 해석할 필요가 있다.

제2장에서는 자료 및 분석방법에 대해 간단히 설명하고, 제3장에는 시공간적 빈도 분석과 태풍 강도에 대한 모의 성능에 대해 기술하였다. 제4장에서는 결과를 요약하였다.

## 2. 자료 및 분석방법

### 2.1 기후예측시스템(GloSea6) 과거 기후 모의 자료

기후예측시스템은 2021년 10월에 GloSea5-GC2.0에서 GloSea6-GC3.2 버전으로 개선되었다(Kim et al., 2021; Hyun et al., 2022). Table 1은 본 연구에서 사용한 GloSea6-GC3.2 버전의 상세 구성 사항을 나타내고 있다. GloSea6는 이전 버전과 동일한 해상도를 가지고 있으나(N216eORCA025, 대기 60 km, 해양 27 km), 앙상블 멤버수는 forecast 8개, hindcast 7개로 확대되었다. GC3.2 버전 모델 구성은 대기 모델 GA7.2(UM11.5), 지면 모델 GL8.0(JULES5.6), 해양 모델 GO6.0(NEMO3.6), 해빙 모델 GSI8.1(CICE5.1.2)을 채택하고 있다. 과거기후 모의(Hindcast) 기간은 24년(1993~2016)이다.

본 연구에서는 GloSea6 hindcast의 3개 초기 시간(4월 25일, 5월 1일, 5월 9일), 3개 앙상블 멤버를 이용한 9개 앙상블 평균 값을 이용하여 5월부터 11월까지 7개월 동안 모의된 열대저기압에 대해 계절예측 성능을 검증하였다.

### 2.2 열대저기압 관측 자료

열대저기압 발생과 이동진로에 관한 관측자료는 1993~2016년 재분석된 자료를 이용하였다. 북대서양과 북동태평양 해역 관측 자료는 미 해양대기청 국립허리케인센터 베스트트랙 자료(HURDAT2; Landsea and Franklin, 2013)를 이용하였으며, 북서태평양 해역의 경우 일본기상청 자료, 북인도양 해역은 인도기상청 자료를 이용하였다. 본 연구에서는 이름이 부여된 34 knots (39 mph; 17.5 m s<sup>-1</sup>) 이상의 풍속을 가지는 강도 분류상 열대폭풍(Tropical Storm) 이상인 열대저기압을 대상으로 분석하였다(Kim et al., 2022).

### 2.3 열대저기압 탐지 및 분석방법

열대저기압 탐지와 검증을 위한 분석방법은 이전 Lee et al. (2020)에서 기후예측시스템(GloSea5)에 대해 수행했던 것과 동일하다. 열대저기압 탐지는 영국 레딩(Reading) 대학의 TRACK 알고리즘(Hodges, 1999;

**Table 1.** Descriptions of GloSea6.

Model Configuration	Atmosphere		GA7.2	Model version	UM vn11.5
	Land		GL8.0		JULES vn5.6
	Ocean		GO6.0		NEMO vn3.6
	Sea Ice		GSI8.1		CICE vn5.1.2
Resolution	Atmosphere-Land Ocean-Sea Ice		N216L75 eORCAO25L75		
Initial Field	Forecast	Atmosphere: KMA UM GDAPS analysis Land: KMA JULES-ERA5 analysis (near real time) Ocean-Sea Ice: KMA NEMOVAR			
	Hindcast	Atmosphere: ECMWF ERA-Interim Land: KMA JULES-ERA5 analysis Ocean/Sea Ice: UKMO NEMOVAR			
Forecast range/period & Ensemble member	Forecast (2021~now)	4 mem (72 days) 4 mem (216 days)			
	Hindcast (1993~2016)	7 mem (252 days)			

Bengtsson et al., 2007)을 이용하여 검증하였다. TRACK 알고리즘은 해상도에 관계없이 표준 탐지 기준을 모든 해상도와 모델에 적용하여 탐지하는 알고리즘으로서 상이한 해상도를 가지는 결과와의 직접적인 비교가 가능하다. 또한, 850 hPa 상대와도가  $3.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  이상, 풍속이  $17 \text{ m s}^{-1}$  이상인 상태가 2일 이상 연속될 때를 기준으로, 북반구 4개 해역(북인도양 해역 the North Indian Ocean, NI; 북서태평양해역 the Western North Pacific, WP; 북동태평양해역 the Eastern North Pacific, EP; 북대서양해역 the North Atlantic, NA)에서의 열대저기압 활동에 대해 검증을 수행하였다(Lee et al., 2020). 열대저기압 발생 지점과 이동진로의 밀도에 대한 공간적인 빈도 분석을 위해 격자  $4^\circ \times 4^\circ$  해상도로 계산하였으며, 앙상블 수와 분석기간으로 나누어 정규화한 후 관측자료와 비교하였다.

### 3. 결 과

#### 3.1 발생 빈도의 공간 분포

검증기간 동안 열대저기압 발생의 빈도수에 대한 공간 분포를 살펴보았다(Fig. 1). 관측 대비 북태평양에서는 전체적으로GloSea6가 더 많은 발생을 모의하고 있는데, 북서태평양 해역의 경우 약한 과대 모의 경향, 북동태평양 해역의 경우 북쪽에서의 과소 모의, 남쪽에서의 과대 모의 경향을 보인다. 북인도양에서는 GloSea6가 다소 많이 발생하는 것으로 보인다. 북대서양에서는  $20^\circ\text{N}$  이상에서 관측되는 열대저기압을 GloSea6는 거의 모의하지 못하고 있으며, 대부분 해

역에서 과소모의 경향이 뚜렷하였다. 또한 실제 열대저기압이 거의 존재하지 않는 중앙 북태평양 해역에서 모의는 대부분의 기후 모델의 구조적 오차와 유사한 결과를 보였다(Kim et al., 2014; Camp et al., 2015). 또한, 선행연구 Lee et al. (2020)과 비교해 볼 때, 이전 버전인 GloSea5에서 북서태평양과 북동태평양에서의 발생 빈도가 약했던 것에 비하여 관측과 유사하게 증가한 것을 확인할 수 있다. 다만 중앙 북태평양에서도 GloSea6가 더 많이 불필요한 열대저기압을 모의하는 단점이 나타나고 있다.

#### 3.2 이동 진로 밀도의 공간 분포

이 절에서는 열대저기압의 진로밀도 분포를 살펴보았다(Fig. 2). 이동 진로밀도의 전체적인 분포는 Fig. 1의 발생 빈도 분포와 크게 다르지 않으나, 이동하는 궤적이 나타나므로 좀더 넓게 퍼진 모습으로 나타나고 있다. 북서태평양 해역에서는  $20^\circ\text{N}$  이하에서 발생한 열대저기압이  $40^\circ\text{N}$ 까지 북상하여 멀리까지 이동하는 분포가 관측된다. 그에 비해 북동태평양 해역은 이동 진로 분포가 Fig. 1에서 보인 발생 지점과 유사하여 이동 거리가 짧고, 북동태평양에서 발생한 열대저기압이 중앙 북태평양 해역으로 이동하는 경우는 극히 드물게 나타나는 양상을 보인다. 북인도양 해역도 이동 진로의 범위는 크지 않으며, 북대서양의 경우 발생 빈도는 북서태평양 해역 보다 적으나 발생 지점 대비 이동 진로의 영역이 넓게 분포하는 것으로 관측되고 있다.

이러한 관측에서 나타나는 열대저기압의 활동에 대

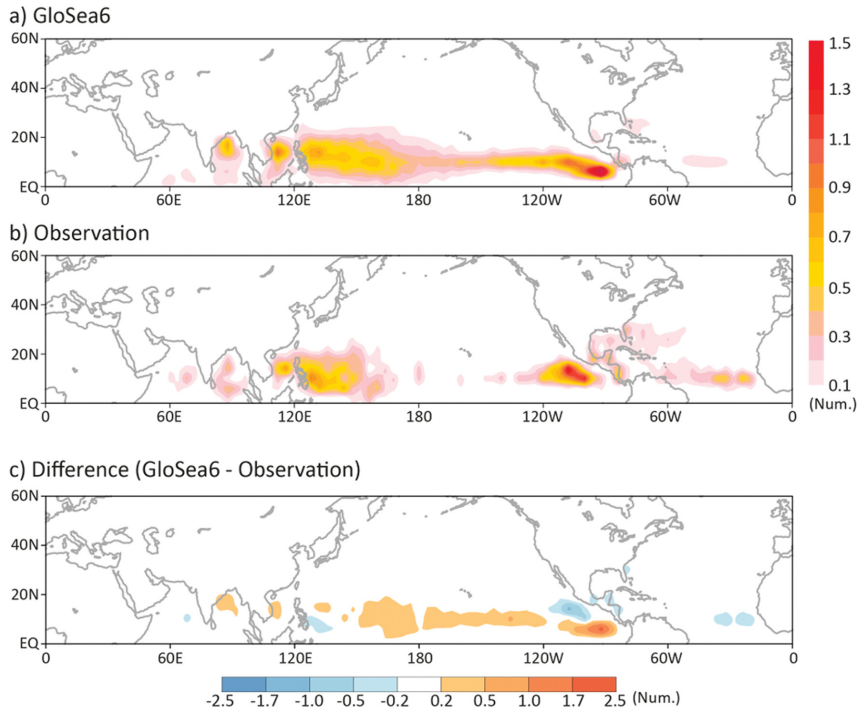


Fig. 1. Seasonal mean number of TC occurrences for (a) GloSea6, (b) observations, and (c) the difference (GloSea6 - Observation) during the period 1993~2016. TC occurrence density plots are generated by binning TC counts into  $4^\circ \times 4^\circ$  boxes.

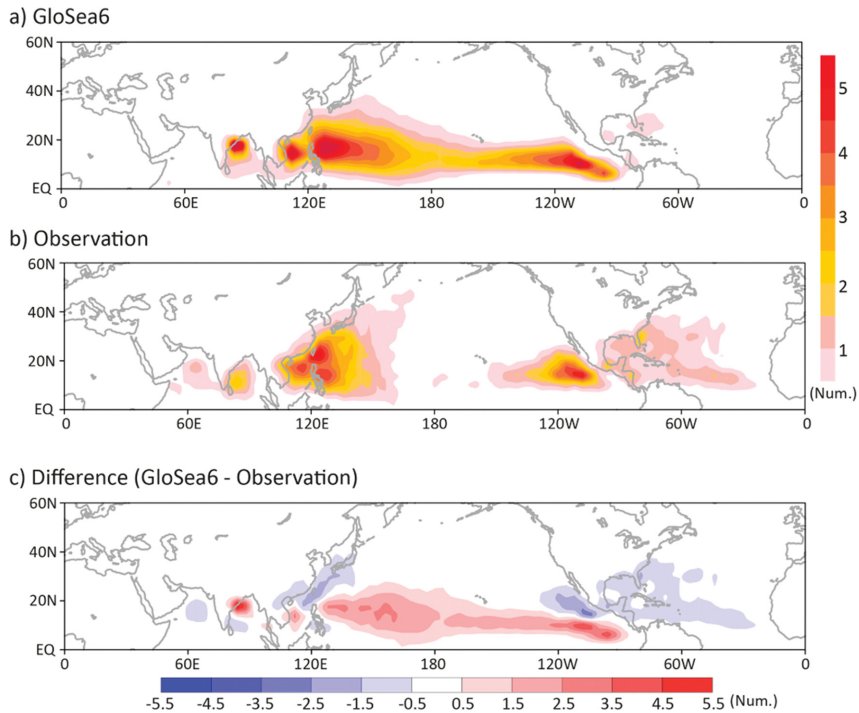


Fig. 2. The same as Fig. 1 but for TC tracks.

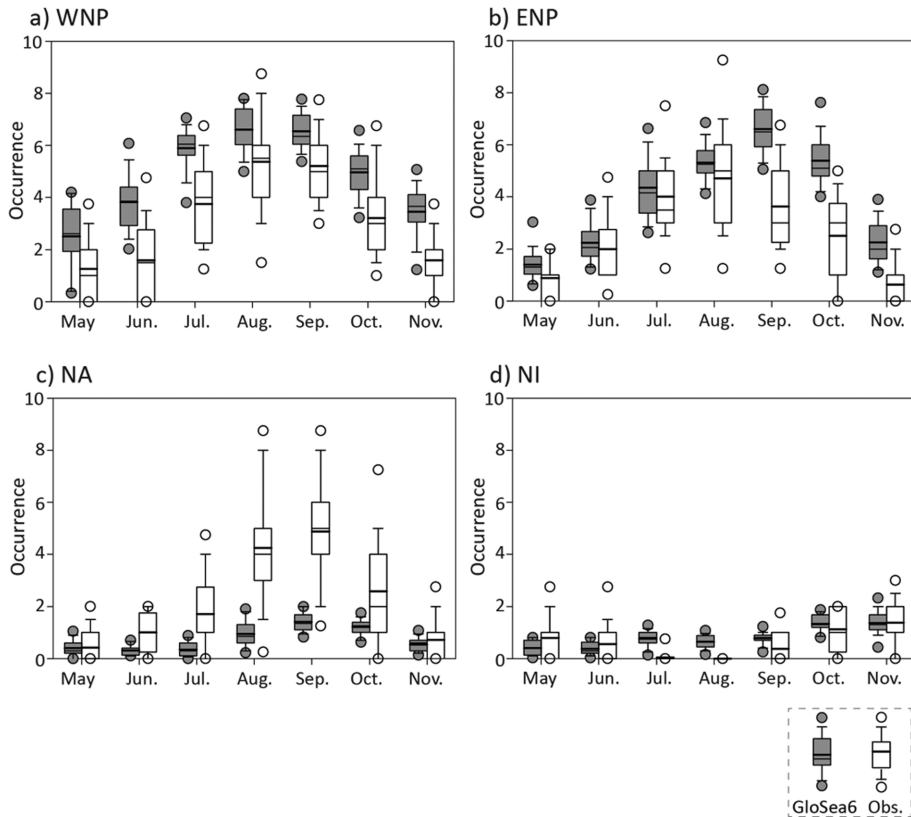
해 기후예측시스템 GloSea6의 모의에서는 북서태평양의 경우 Lee et al. (2020)에서 보여준 이전 시스템(GloSea5)과 유사하게 중위도까지 북상하는 열대저기압의 과소모의가 나타나지만, 이보다는 개선된 결과를 보인다. 그러나 필리핀 동쪽 해역에서 GloSea5는 관측보다 적게 모의한 반면, 이번 GloSea6는 과대 모의 경향이 더 강하게 나타나는 특징을 보인다. 북동태평양 해역은 북쪽으로 과소 모의, 남쪽으로 과대 모의 경향이 유사하나 더 강한 경향을 보이고, 북대서양 해역은 이전 시스템과 유사하게 전반적으로 과소 모의 경향을 보인다. 북인도양 해역은 관측에서 벵갈만과 아라비아해에서 열대저기압의 발생과 이동이 나타나지만, GloSea6 모의 결과에서는 이전 시스템과 크게 다르지 않게 벵갈만에서만 열대저기압의 활동이 모의되는 특징을 보였다.

**3.3 월별, 연평균 빈도와 지속기간**

검증 기간 동안 열대저기압의 해역별 월별 발생 분

포를 분석하였다(Fig. 3). 관측에서 북서태평양과 북동태평양 해역은 5월부터 점차 증가하여 8월에 가장 많은 발생 빈도를 보이고 다시 11월까지 감소하고 있으며, GloSea6에서 이러한 월별 발생 경향이 관측과 유사하게 잘 나타나고 있다. 그러나 모든 월에서 GloSea6가 관측보다 열대저기압을 과대 모의하고 있으며, 북동태평양에서는 9월에 가장 많은 열대저기압을 모의하였다. 북대서양 해역은 계절적 변화가 뚜렷이 관측되는 반면, 모델에서는 모든 월에서 2개 이하의 발생 빈도를 보이고, 특히 7~10월 기간(JASO) 기간 발생 빈도의 변동성이 관측에 비해 매우 적은 경향을 보인다. 북인도양의 경우 GloSea6와 관측 모두 매월 2개 이하의 적은 열대저기압이 발생하고 있으며, 열대저기압이 거의 관측되지 않는 7~8월에 모델에서는 과대 모의 경향이 나타난다.

해역 별 연평균 발생 빈도를 살펴보면(Fig. 4), 관측의 경우 평균 발생 수는 북서태평양 해역이 약 25개로 가장 많이 발생하였으며, 북동태평양 해역과 북대

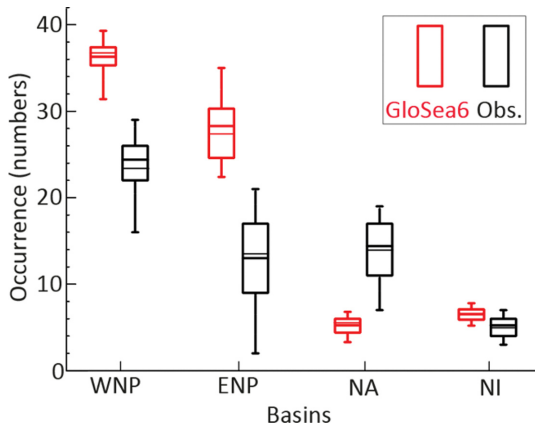


**Fig. 3.** Distribution of monthly TC occurrences for GloSea6 and observation over individual ocean basins. Box and whisker plot shows the percentiles (5<sup>th</sup>, 25<sup>th</sup>, 75<sup>th</sup> and 95<sup>th</sup>) with solid line (median) and thick solid line (mean). Circle denotes 1<sup>st</sup> and 99<sup>th</sup> percentiles in bottom and top, respectively.

서양 해역은 약 14개로 유사하며, 북인도양 해역이 약 5개로 가장 적게 발생하였다. 연별 발생 수의 분산은 북동태평양 해역이 가장 크고, 북인도양 해역이 가장 작다. 이에 비해 GloSea6의 발생 수는 앞서 월별 빈도에서도 보였듯이 북서태평양 및 북동태평양 해역에서는 과대 모의 경향, 북대서양 해역은 과소 모의 경향, 북인도양 해역은 유사한 경향을 보였다. GloSea6 역시 관측에서 가장 큰 변동을 보인 북동태평양에서 변동성이 가장 컸다. Lee et al. (2020)과 비교해 볼 때, 북동태평양 및 북서태평양에서 GloSea5 보다 GloSea6가 열대저기압의 발생 수가 상대적으로 크게 늘었다는 것은 눈여겨볼 점이라 할 수 있다. 한편, 북대서양 해역에서 보인 뚜렷한 과소 모의 경향은 Lee

et al. (2020)에서 뿐 아니라 이전 연구 결과에서도 나타난 바 있다(e.g. Camargo, 2013; Strachan et al., 2013).

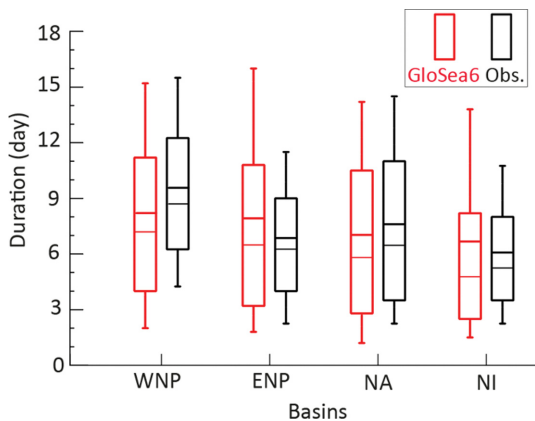
이번에는 열대저기압의 지속시간이 해역 별로 어떤 빈도를 보이는지 분석하였다(Fig. 5). 해역 별로 지속기간 분포는 관측 대비 비교적 유사한 분포로 나타나고 있으며 1일 내외 정도 차이를 보이는데, GloSea6가 대체로 관측보다는 지속기간의 범위가 큰 것으로 나타나고 있다. 북동태평양, 북대서양, 북인도양 해역에서 발생 수의 과대(과소) 모의 해역에서 지속기간도 과대(과소) 모의되는 경향을 보였으나 북서태평양의 경우 발생 빈도는 과대 모의하지만 지속기간은 관측 대비 짧은 경향을 보였다. 이는 북서태평양 동아시아 연안 20~40°N 해역의 진로밀도가 음의 편차(Fig. 2c)를 보이는 것을 고려할 때, GloSea6가 전향하며 긴 지속시간을 가지는 태풍들을 충분히 모의하지 못한 결과로 이해된다.



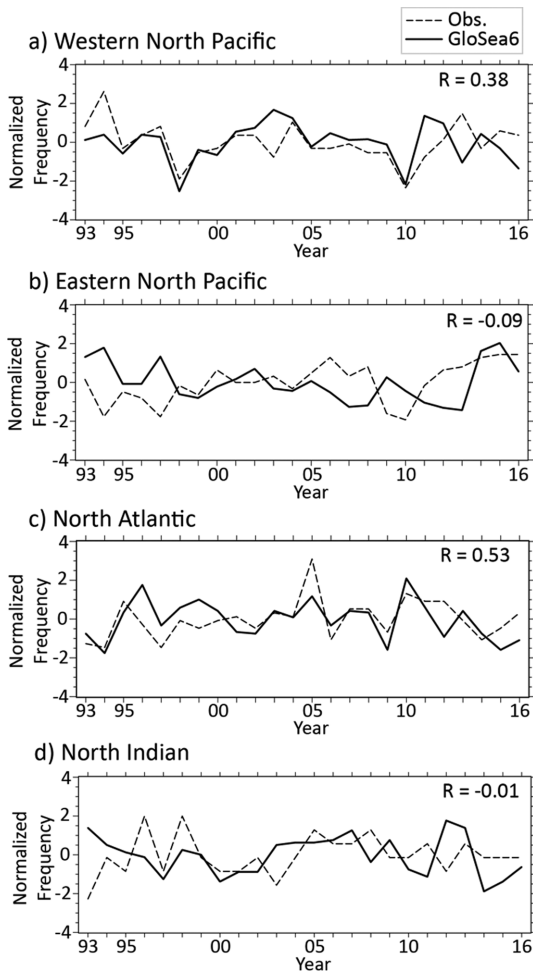
**Fig. 4.** Seasonal mean number of TC occurrences in GloSea6 (red) and observations (black) for individual ocean basin during the period 1993~2016. Box and whisker plot shows the percentiles (10<sup>th</sup>, 25<sup>th</sup>, 75<sup>th</sup> and 90<sup>th</sup>) with horizontal line (median) and dot (mean value).

### 3.4 발생 빈도의 경년 변동성

이 절에서는 해역 별 열대저기압의 빈도에 대한 연년 변동성을 각각 분석하였다(Fig. 6). 여기서, 연별 발생 빈도는 전체 기간에 대해서 모의된 발생 수의 평균과 표준편차를 이용하여 정규화(normalization)하였다. 전체적으로 특정 해역에서 열대저기압 빈도의 장기적 추세가 뚜렷이 관측되고 있지는 않다. 4개 해역 가운데 북서태평양과 북대서양에서 관측의 증가 또는 감소 경향의 경년 변동성을 GloSea6가 비교적 잘 따르고 있는 것으로 보이며, 반면 북인도양과 북동태평양에서는 관측과 GloSea6의 연별 변동 경향이 잘 일치하지 않는 것으로 보인다. 이상의 결과는 보다 정량적인 방법으로서 관측 대비 Pearson 상관 계수와 p-value를 분석한 결과와도 유사하게 나타난다 (Table 2). 95% 신뢰수준에서 관측 대비 유의한 상관은 북서태평양(0.38)과 북대서양(0.53) 해역으로 나타났다. 선행 연구 Lee et al. (2020)에서의 GloSea5 결과와 비교하였을 때 모든 해역에서의 경년 변동성이 개선되었으며, 여기서 높은 상관을 보인 북서태평양 및 북대서양 해역은 주변 지역에 큰 영향을 주는 주요한 태풍의 기원지이므로 GloSea6의 결과는 의미 있는 것으로 볼 수 있다. 특히, 본 논문은 기후예측모델의 개선의 영향 이외에 분석기간을 더 길게 한 영향이 있기 때문에 선행연구인 Lee et al. (2020)과 직접적 비교는 어렵지만, 한반도에 영향을 미치는 태풍의 발생 해역인 북서태평양에서의 상관관계가 개선된 것은 고무적인 결과라 볼 수 있다. 이는 GloSea6가 GloSea5에 비해 이 해역에서 보다 더 많은 열대저기압을 모의하고 또한 북상하는 경로를 더 잘 모의하고 있다는 것으로 유추할 수 있다. 반면, 북인도양과 북동태평양 해역은 상관 관계가 거의 없는 것으로 나타



**Fig. 5.** The same as Fig. 4 but for TC duration.



**Fig. 6.** Normalized number of TC observation (dotted line) and GloSea6 (solid line) over individual basins during the period 1993–2016. For GloSea6, normalized frequency is obtained by subtracting the mean of the whole ensembles for all years and then dividing by the standard deviation of the ensemble means for each year. For convenience, correlation coefficient as shown in Table 1 is displayed at the upper-left corner.

났다. 이는 앞서 빈도 분석에서 살펴보았듯이, 북인도 양은 GloSea6의 열대저기압 발생 빈도가 관측과 유사

하나 관측 대비 7~8월 발생 빈도와 지속기간의 과대 모의가 그 원인으로 판단되며, 북동태평양 해역은 중앙 북태평양에서 과대 모의되는 열대저기압 발생 수에 따른 원인으로 판단된다.

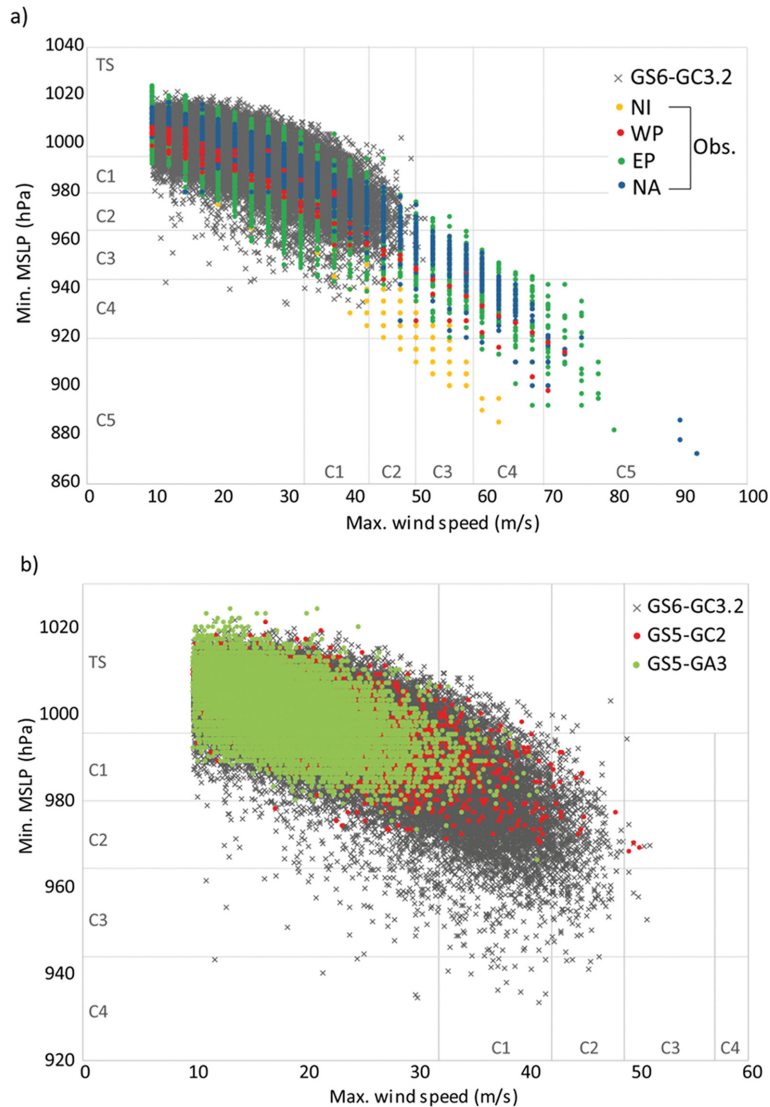
### 3.5 중심 기압과 최대 풍속

GloSea6가 열대저기압의 강도를 모의하는 수준을 알아보기 위해 중심기압과 최대풍속에 대해서 관측과 비교하였다(Fig. 7a). 참고를 위해 북대서양의 허리케인의 강도 분류에 사용되는 Saffir-Simpson 등급 기준 [Category1 (C1): 풍속 33~42 m s<sup>-1</sup>, 중심기압 > 979 mb, Category2 (C2): 풍속 43~49 m s<sup>-1</sup>, 중심기압 965~979 mb, Category3 (C3): 풍속 50~58 m s<sup>-1</sup>, 중심기압 945~964 mb, Category4 (C4): 풍속 58~70 m s<sup>-1</sup>, 중심기압 920~944 mb, Category5 (C5): 풍속 > 70 m s<sup>-1</sup>, 중심기압 < 920 mb]을 함께 표기하였다. GloSea6의 결과는 해역별로 구분하는 게 큰 의미 없을 것 같아서 모두 다 함께 표기하였다. 해역별로는 열대저기압의 중심기압과 최대풍속의 분포가 조금씩 다르게 나타났다. GloSea6는 관측보다도 훨씬 낮은 풍속과 높은 중심기압 쪽으로 즉 중심기압으로 볼 때는 C3까지와 최대풍속으로 볼 때는 C2까지 분포하고 있는데, 이는 모델의 낮은 해상도로 인하여 열대저기압의 강도를 잘 모의하지 못하는 것으로 보이며 Lee et al. (2020)의 결과와 전반적으로 크게 다르지 않다. 다만 GloSea6는 C2 허리케인 등급까지도 모의하고 있다는 점을 주목할 만하다. 이는 분석 기간은 상이하긴 하지만, Lee et al. (2020)에 나타난 관측의 C5 범주의 강한 태풍의 풍속과 기압이 본 연구의 Fig. 7a의 관측에서의 것과 크게 다르지 않다는 점을 고려하면, GloSea6가 C2 범주까지 좀 더 강한 태풍까지 상당수 모의한 결과를 보이는 것은 GloSea5 보다 GloSea6가 좀 더 현실적으로 열대저기압과 성장한 태풍을 모의하고 있다는 것을 시사한다고 볼 수 있다.

한편, 이러한 기후예측모델간 결과를 직접적으로 비교하기 위해서, 이전의 Lee et al. (2020)의 GloSea5와 본 연구에서의 GloSea6의 최대풍속과 중심기압을 비교하였다(Fig. 7b). GloSea6가 이전의 GloSea5 두 버전들 보다 좀 더 낮은 중심기압과 더 강한 최대풍속을 모의하고 있는데, 특히 중심기압을 좀 더 낮게 함

**Table 2.** Pearson correlation coefficient and P-value with respect to oceans. Bold text denotes the statistical significance at the 95% confidence level. GloSea5 results are from Lee et al. (2020).

Model	Ocean Basin			
	WNP	ENP	NA	NI
GloSea6	<b>0.38 (0.035)</b>	-0.09 (0.669)	<b>0.53 (0.004)</b>	-0.01 (0.514)
GloSea5	0.23 (0.433)	-0.40 (0.159)	0.09 (0.756)	-0.13 (0.662)



**Fig. 7.** Scatter plot of 10 m wind speed and central mean sea level pressure (MSLP) of tropical cyclones for comparison between (a) GloSea6 simulations and observation and for (b) GloSea6 and two previous versions of GloSea5 during the period 1993~2016. C1~C5 denote the categories of the Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale.

으로써 더 강한 태풍을 구현하고 있는 것으로 보인다. 이는 기후모델 물리과정 자체의 개선 이외에 GloSea6가 6시간 간격으로 산출한 물리량을 일일 평균함으로써 시간적으로 좀 더 세밀한 특성을 모의할 수 있게 된 결과 때문이라고 사료된다.

#### 4. 요약 및 결론

국립기상과학원은 현업으로 운영하는 기후예측시스템(GloSea6)의 태풍 계절예측 정보 생산을 위한 프로

그램을 국제협력을 통해 구축, 태풍 계절예측의 실시간 생산 현업을 위한 시험운영을 준비 중에 있다. 이에 앞서 24년 과거 기간 기후장을 생산하여, GloSea6의 열대저기압 발생과 이동 오차 특성을 제시하고, 태풍의 계절 예측성을 이전 버전과 비교 검증하였다. 그리고 태풍의 연변동 및 계절 변동에 대한 예측성을 살펴보았다.

열대저기압의 발생은 전반적으로 GloSea6가 관측 대비 과대 모의하는 경향을 나타냈으며, 특히 북서태평양 및 북동태평양 해역에서 두드러졌다. 이는 이전



GloSea5가 관측과 거의 유사하게 열대저기압을 발생시키는 것과는 다른 양상이었다. 반면, 대서양 지역과 이와 연관된 북동태평양의 일부 지역에서는 과소 모의 하는 경향을 나타냈다. 그리고 중앙 북태평양에서는 실제로 발생하지 않는 열대저기압을 비현실적으로 모의하는 문제점이 뚜렷하게 나타났으나, 이는 대부분의 모델들이 가지고 있는 구조적인 오차와 일치하고 있었다. 그리고 이동 진로의 분포 또한 발생 분포와 유사한 오차 분포를 가지고 있었다. 월별 발생 빈도 분포를 분석한 결과에서도 대서양에서 특히 8~10월에 GloSea6가 모의하는 열대저기압의 빈도가 현저하게 작은 것을 알 수 있었으며, 북동태평양 및 북서태평양에서는 월별 발생 빈도가 관측과 유사하게 잘 따라주고 있다고 판단되었다.

열대저기압의 변동성을 살펴보았을 때 태풍이 가장 많이 발생하는 북서태평양 해역에서 관측과 GloSea6 간에 유의한 상관(0.38)이 나타났으나, 북동태평양에서는 거의 예측 성능이 없었다. 오히려 과소모의하고 있는 북대서양에서의 연변동성은 높은 예측성( $R = 0.53$ )을 보이고 있었다. 즉 이는 전지구적으로 가장 열대저기압의 발생이 많은 북서태평양을 중심으로 생각해 보았을 때, 태풍의 기후적인 발생 빈도와 월별 변동 분포는 GloSea6 모델이 매우 잘 따르고 있으나, 매해 다른 연 변동성의 분포는 아직 낮은 성능을 가지고 있다는 것을 시사한다. 그러나, 이전 선행연구에서 나타난 매우 낮은 GloSea5의 연 변동성에 비해서는 매우 향상된 연 변동성을 보임으로써 한반도에 영향을 주는 이 지역에서의 태풍 발생에 대한 GloSea6의 예측성은 향상된 것으로 보인다.

또한, 주목할 만한 점은 GloSea6 모델의 해상도가 이전 버전 GloSea5와 동일함에도 불구하고, 관측보다는 약하지만, 허리케인 강도 분류 기준인 Saffir-Simpson 등급 기준으로 2등급 이상 더 강한 열대저기압을 모의하고 있는 것으로 나타나서 태풍 강도 모의에 큰 개선이 있었음을 알 수 있었다.

GloSea6를 통한 태풍의 계절예측은 당장 현업 운영을 통해 서비스 될 수 있을만한 실효성에는 이르지 못하고 있다고 판단되나, 현업 운영을 통해 생산된 계절예측 자료는 태풍의 계절예측 개선을 위한 연구개발 자료로 활용될 수 있을 것이며, 지속적인 검증과 개선을 통해 대국민 서비스가 될 수 있는 자료를 생산할 수 있는 기반이 될 것으로 생각된다.

## 감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기후예측 현업 시스템 개발」(KMA2018-00322)의 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Ahn, S.-H., K.-J. Park, J.-Y. Kim, and B.-J. Kim, 2015: The characteristics of the frequency and damage for meteorological disasters in Korea. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, **15**, 133-144, doi:10.9798/KOSHAM.2015.15.2.133 (in Korean with English abstract).
- Basconcillo, J., and I.-J. Moon, 2023: Increasing peak intensity of tropical cyclones passing through the Korean Peninsula. *Sci. Rep.*, **13**, 5097, doi:10.1038/s41598-023-32020-w.
- Bengtsson, L., K. I. Hodges, M. Esch, N. Keenlyside, L. Kornblueh, J.-J. Luo, and T. Yamagata, 2007: How may tropical cyclones change in a warmer climate? *Tellus A*, **59**, 539-561, doi:10.1111/j.1600-0870.2007.00251.x.
- Camargo, S. J., 2013: Global and regional aspects of tropical cyclone activity in the CMIP5 models. *J. Climate*, **26**, 9880-9902, doi:10.1175/jcli-d-12-00549.1.
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2023: An update on the influence of natural climate variability and anthropogenic climate change on tropical cyclones. *Trop. Cyclone Res. Rev.*, **12**, 216-239, doi:10.1016/j.tcr.2023.10.001.
- Camp, J., M. Roberts, C. MacLachlan, E. Wallace, L. Hermanson, A. Brookshaw, A. Arribas, and A. A. Scaife, 2015: Seasonal forecasting of tropical storms using the Met Office GloSea5 seasonal forecast system. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **141**, 2206-2219, doi:10.1002/qj.2516.
- Ho, C.-H., B.-G. Kim, B.-M. Kim, D.-S. R. Park, C.-K. Park, S.-W. Son, J.-H. Jeong, and D.-H. Cha, 2023: Review of the weather hazard research: Focused on typhoon, heavy rain, drought, heat wave, cold surge, heavy snow, and strong gust. *Atmosphere*, **33**, 223-246, doi:10.14191/Atmos.2023.33.2.223 (in Korean with English abstract).
- Hodges, K. I., 1999: Adaptive constraints for feature tracking. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 1362-1373, doi:10.1175/1520-0493(1999)127<1362:ACFFT>2.0.CO;2.
- Hyun, Y.-K., and Coauthors, 2022: The KMA global seasonal forecasting system (GloSea6) - part 2: climatological mean bias characteristics. *Atmosphere*, **32**, 87-101, doi:10.14191/Atmos.2022.32.2.087 (in Korean with English abstract).
- Kang, H., C. Son, J. Park, S. Jang, and J. Kim, 2018: A Study on the time-periodic characteristics of changes in typhoon activities and typhoon-induced rainfall over the Korean peninsula. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, **18**, 395-402, doi:10.9798/KOSHAM.2018.18.

- 7.395 (in Korean with English abstract).
- Kim, H., J. Lee, Y.-K. Hyun, and S.-O. Hwang, 2021: The KMA Global Seasonal forecasting system (GloSea6) - Part 1: Operational system and improvements. *Atmosphere*, **31**, 341-359, doi:10.14191/Atmos.2021.31.3.341 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.-S., G. A. Vecchi, T. R. Knutson, W. G. Anderson, T. L. Delworth, A. Rosati, F. Zeng, and M. Zhao, 2014: Tropical cyclone simulation and response to CO2 doubling in the GFDL CM2.5 high-resolution coupled climate model. *J. Climate*, **27**, 8034-8054, doi: 10.1175/jcli-d-13-00475.1.
- Kim, J., S.-O. Hwang, S.-S. Kim, I. Oh, and D.-J. Ham, 2022: Algorithms for determining Korea Meteorological Administration (KMA)'s official typhoon best tracks in the National Typhoon Center. *Atmosphere*, **32**, 381-394, doi:10.14191/Atmos.2022.32.4.381 (in Korean with English abstract).
- Landsea, C. W., and J. L. Franklin, 2013: Atlantic hurricane database uncertainty and presentation of a new database format. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 3576-3592, doi:10.1175/mwr-d-12-00254.1.
- Lee, S.-M., J.-H. Lee, A.-R. Ko, Y.-K. Hyun, and Y. Kim, 2020: Seasonal Forecasting of Tropical Storms using GloSea5 Hindcast. *Atmosphere*, **30**, 209-220, doi: 10.14191/Atmos.2020.30.3.209 (in Korean with English abstract).
- Na, H., and W.-S. Jung, 2020: Autumn Typhoon Affecting the Korean Peninsula - Past and present characteristics. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **36**, 482-491, doi:10.5572/KOSAE.2020.36.4.482 (in Korean with English abstract).
- Park, D.-S. R., E. Seo, M. Lee, D.-H. Cha, D. Kim, C.-H. Ho, M.-I. Lee, H.-S. Kim, and S.-K. Min, 2024: Sea surface temperature warming to inhibit mitigation of tropical cyclone destructiveness over East Asia in El Niño. *Npj. Clim. Atmos. Sci.*, **7**, 24, doi:10.1038/s41612-023-00556-3.
- Strachan, J., P. L. Vidale, K. Hodges, M. Roberts, and M.-E. Demory, 2013: Investigating global tropical cyclone activity with a hierarchy of AGCMs: The role of model resolution. *J. Climate*, **26**, 133-152, doi:10.1175/jcli-d-12-00012.1.
- Utsumi, N., and H. Kim, 2022: Observed influence of anthropogenic climate change on tropical cyclone heavy rainfall. *Nat. Clim. Chang.*, **12**, 436-440, doi: 10.1038/s41558-022-01344-2.
- Walters, D. N., and Coauthors, 2019: The Met Office Unified Model Global Atmosphere 7.0/7.1 and JULES Global Land 7.0 configurations. *Geosci. Model Dev.*, **12**, 1909-1963, doi:10.5194/gmd-12-1909-2019.
- WMO, 2021: *WMO atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes (1970~2019)*. WMO-No. 1267, World Meteorological Organization, 90 pp [Available online at [https://library.wmo.int/viewer/57564/download?file=1267\\_Atlas\\_of\\_Mortality\\_en.pdf&type=pdf&navigator=1](https://library.wmo.int/viewer/57564/download?file=1267_Atlas_of_Mortality_en.pdf&type=pdf&navigator=1)].