

## 한반도 영향 태풍 활동에 해양열파가 미치는 영향

최수민\* · 김형석\*\*†

\*국립한국해양대학교 해양과학기술전문대학원 해양과학기술융합학과 석사과정학생,

\*\*국립한국해양대학교 해양과학기술전문대학원 해양과학기술융합학과 교수

### Influence of marine heatwaves on tropical cyclones affecting the Korean Peninsula

Choi, Soo Min\* and Kim, Hyeong-Seog\*\*†

\*Master Course Student, Dept. of Convergence Study on the Ocean Science and Technology Ocean Science and Technology School, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

\*\*Professor, Dept. of Convergence Study on the Ocean Science and Technology Ocean Science and Technology School, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

#### ABSTRACT

This study investigates the impact of marine heatwaves (MHW) on tropical cyclones (TCs) affecting the Korean Peninsula. TC events occurring between June and October from 1982 to 2023 were analyzed. The categorization of MHW TCs or non-MHW TCs was determined based on whether they passed through MHW-affected ocean regions prior to reaching the Korean Peninsula. The results of this study demonstrate that MHW TCs exhibit stronger maximum sustained winds when approaching the Korean Peninsula than non-MHW TCs. This intensification effect was statistically significant only for strong TCs with maximum wind speeds exceeding  $33 \text{ ms}^{-1}$ . Analysis of rainfall shows that MHW TCs produce significantly more precipitation, with peak rainfall rates nearly eight times higher than those of non-MHW TCs. Our analysis of the physical mechanisms involved shows that high sea surface temperatures during MHWs increase surface saturation specific humidity, resulting in enhanced air - sea moisture disequilibrium. Combined with strong low-level winds in intense TCs, this leads to increased ocean-to-atmosphere latent heat flux and strengthened moisture flux convergence near the TC core. These processes sustain deep convection and reinforce TC intensity and rainfall. These findings suggest that MHWs can substantially amplify the wind and rainfall hazards posed by strong TCs approaching the Korean Peninsula. This indicates an increased risk in future climate warming scenarios characterized by more frequent and intense MHWs.

*Key words : Tropical Cyclone, Marine Heatwaves, Korean Peninsula, Rainfall*

### 1. 서론

최근 전 지구적인 기후 변화의 가속화로 인해 북서태평양 해역에서는 해수면 온도가 장기적으로 상승하고 있으며, 이에 따라 해양열파(Marine Heatwave, MHW)의 발생 빈도와 강도가 증가하고 있다(Lee et al., 2020; Sun et al., 2023). MHW는 계절 평균과 같은 장주기 변동이 아닌, 수

일에서 수주 규모로 지속되는 단기적 극한 해양 현상으로, 일반적으로 평년 대비 높은 해수면온도(Sea surface temperature, SST)가 연속적으로 5일 이상 지속되는 경우로 정의한다(Hobday et al., 2016; Oliver et al., 2019). 이러한 MHW는 해양 생태계의 공간적 분포와 구조를 변화시키며, 강한 용승과 저산소화 현상으로 인한 해양 생물 다양성 및 연안 생태계에 부정적인 영향을 끼친다(Evans

†Corresponding author : [hyeongseog@kmou.ac.kr](mailto:hyeongseog@kmou.ac.kr) (Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea. Tel. +82-51-410-5397)

ORCID 최수민 0009-0000-8785-660X

김형석 0000-0003-2577-3301

et al., 2015; Smale et al., 2019). 이러한 MHW는 태풍과 같이 시공간적으로 중첩될 경우, 태풍의 발달 환경에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 특히 한반도에 접근하는 태풍이 주로 지나가는 동중국해는 MHW가 반복적으로 발생하는 지역으로(Lee et al., 2020), 태풍이 한반도로 접근하기 전에 MHW 해역을 통과할 가능성 또한 점차 높아지고 있다.

태풍은 한반도에 가장 큰 피해를 야기하는 자연재해 중 하나이며, 태풍의 강한 바람과 폭우는 홍수나 시설물 피해와 같은 큰 피해를 초래한다(Lin et al., 2015; Ranjan et al., 2025). 태풍의 강도는 해양으로부터 공급받는 열에너지에 크게 의존하며, 해수면 온도가 높을수록 강한 잠열 플럭스를 통해 태풍 발달을 촉진할 수 있다(Emanuel, 1986; Gao and Chiu, 2010; Radfar et al., 2024; Shay et al., 2000). 특히 MHW와 태풍의 상호작용은 더 강하고 더 많은 강수를 동반하는 태풍을 유발함이 보고되고 있어(Choi et al., 2024; Pun et al., 2023), MHW는 태풍 활동 변화에 직접적으로 기여하는 요소로 평가되고 있다.

MHW가 태풍 활동에 미치는 영향을 살펴보는 과거 연구들은 주로 개별 사례 분석 또는 태풍의 성장 단계에 초점을 두고 있으며, 한반도 영향 태풍 전체 사례를 바탕으로 MHW의 영향을 분석한 연구는 드물다(Choi et al., 2024; Pun et al., 2023; Zhou et al., 2025). 특히 한반도 영향 태풍의 경우에는 중위도 환경으로 진입하면서 그 강도가 약화되는 과정에 있는데, 이 경우에는 MHW의 영향에 대한 효과는 어떻게 나타나고 있는지, 또는 한반도 영향 태풍의 강도에 따른 MHW 영향이 어떻게 달라지는지에 대한 정보는 아직 부족한 실정이다.

이에 본 연구는 최근 40여년간 한반도에 영향을 미친 태풍을 대상으로, MHW가 한반도 영향 태풍의 활동성에 어떠한 영향을 미치고 있는지 살펴보았다. MHW의 영향을 유무에 따라 한반도 영향 태풍의 중심 풍속 및 강수가 어떻게 달라지는지 분석하였다. 그리고, 이러한 차이점을 발생시키는 여러 물리·역학적 요소를 분석함으로써, MHW가 태풍의 강도 및 강수 강화에 기여하는 주요 기작을 살펴보았다.

## 2. 자료 및 방법

이 연구에서는 1982~2023년까지 태풍이 한반도의 영향을 가장 많이 미치는 6~10월을 분석 기간으로 정하였다. 태풍 자료는 Regional Specialized Meteorological

Center Tokyo-Typhoon Center에서 제공하는 best-track 자료를 사용하였다. 본 연구에서는 6시간 간격으로 제공되는 태풍의 중심 위치(위도, 경도)와 최대지속풍속을 분석에 사용하였다. 또한 태풍의 중심 부근 풍속이  $17 \text{ ms}^{-1}$  (34 knot) 이상인 경우만을 태풍으로 정의하여 분석하였다. Basconcillo and Moon (2023)의 방법에 따라 태풍이 한반도에 영향을 미칠 수 있는 영역을 해안선으로부터 250 km 떨어진 영역으로 정의하고 이 영역에 태풍이 진입하면 한반도 영향 태풍으로 분류하였다.

MHW는  $0.25^\circ$  해상도와 1일 간격을 가진 National Oceanic and Atmospheric Administration Optimum Interpolation Sea Surface Temperature version 2자료(Huang et al., 2021)를 이용하여 탐지하였다. MHW는 Hobday et al. (2016)의 정의를 따라, 각 격자점의 일평균 해수면온도가 해당 날짜의 기후 평균값을 기준으로 산정한 90번째 백분위 임계값을 최소 5일 이상 연속으로 초과하는 기간으로 정의하였다. 이때 일별 기후 평균값과 임계값은 해당일을 포함하여 전후 5일(총 11일)의 SST를 이동 평균하여 산출하고, 이후 31일 이동평균을 적용해 스무딩(smoothing)하였다. 이러한 작업은 각 격자점별로 수행하여, MHW의 발생 지역을 공간적으로 파악할 수 있도록 하였다.

한반도 영향 태풍에서 MHW의 영향 유무는, 태풍이 열대 지역보다는 한반도 접근 경로에 위치한 동중국해 인근 해역에서 MHW의 영향을 받는 경우를 고려하기 위해 정의하였다. 이에 따라 태풍이 최대 강도를 갖는 평균 위도인  $20^\circ\text{N}$  (Choi et al., 2016, 2024) 이북으로 진출한 이후, 태풍 중심으로부터  $1^\circ$  반경 내에서 MHW 영향을 연속적으로 2일 이상 받은 한반도 영향 태풍을 MHW TC로 분류하였다. 반면 해당 구간에서 한 번도 MHW 영향을 받지 않은 태풍은 non-MHW TC로 정의하였다. 이렇게 정의된 한반도에 영향을 미친 MHW TC는 15개, non-MHW TC는 54개였으며, 선정된 사례들은 유사한 월별 분포를 보이고 있어 계절에 따른 태풍 강도의 변화는 분석 결과에 영향을 미치지 않는 것으로 판단하였다(Table 1). 추가적으로 태풍의 강도에 따른 차이를 살펴보기 위해 한반도 영향권 이내에서 최대 풍속  $33 \text{ ms}^{-1}$  (64 knot)를 기준으로, 그 이상은 Strong TC, 미만은 Weak TC로 분류하였다. 그 결과 MHW 영향을 받은 Strong TC는 8개, Weak TC는 7개였으며, MHW 영향을 받지 않은 Strong TC는 21개, Weak TC는 33개였다. 각 태풍의 사례 수가 적으므로 데이터의 정규 분포를 가정하기 어렵고, 데이터 특성상 이

상치(outlier)가 존재할 가능성이 높기 때문에 유의성 검정으로는 두 그룹간 차이를 비모수적으로 검정하는 방법 중에 하나인 Mann-Whitney U test (Mann and Whitney, 1947)를 이용하였다.

MHW가 한반도 영향 태풍에 미치는 영향 및 메커니즘을 분석하기 위한 대기 환경장 자료는 1° 해상도의 Global Precipitation Climatology Centre (Schneider et al., 2017) 일평균 강수량과 0.25°의 수평해상도를 갖는 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts ERA5 reanalysis (Hersbach et al., 2020)의 6시간 간격 자료를 이용하였다.

Table 1. Monthly number of MHW TC and non-MHW TC selected in this study

	June	July	August	September	October
MHW TC	0	3	5	6	1
non-MHW TC	4	18	21	8	3

### 3. 결과

#### 3.1. MHW가 한반도 영향 태풍 활동에 미치는 영향 분석

먼저, MHW가 한반도에 영향을 미친 태풍의 강도에 어

떤 영향을 주는지 분석하였다. Fig. 1은 앞서 정의한 MHW TC와 non-MHW TC의 진로를 비교하고, 한반도 영향권에 태풍이 최초로 진입한 시점(TA)을 기준으로 TA 24시간 이전부터의 강도 변화를 상자수염 그림으로 제시한 것이다. TA를 기준으로 -24시간부터 -6시간 전까지의 태풍 중심 위치를 평균한 지점을 별표로 표시하였다(Fig. 1a). MHW TC와 non-MHW TC의 평균 태풍 중심 위치가 거의 동일한 위치에 분포한다. 이는 MHW 발생 여부에 따른 차이가 태풍 이동 경로의 차이보다는, 경험하는 해양 환경 조건과 관련되어 있음을 시사한다. 사례 간 강도 편차가 커 분포가 넓게 나타나고 있지만, 전반적으로 MHW TC가 non-MHW TC보다 더 높은 강도를 유지하는 특징을 확인할 수 있다(Fig. 1b). 특히 TA 12시간 이전에는 두 그룹의 중앙값을 기준으로 약 8 ms<sup>-1</sup> (15 knot) 이상의 차이가 통계적으로 유의하게 나타났으며, TA 이후에는 그 차이가 점차 감소하였으나 MHW TC가 전반적으로 더 강한 강도를 지속적으로 유지하는 경향이 나타났다.

Choi et al. (2024)에 따르면 MHW의 영향을 받은 태풍은 그렇지 않은 태풍에 비해 평균 생애 최대 강도가 약 35% 증가한다. 또한 Do and Kim (2021)의 연구에서는 한반도 영향 태풍의 경우 중위도(30°N 이상) 지역의 상대적으로 낮은 해수면 온도 및 상층 제트기류로 인한 강한 연직 윈드시어의 영향으로, 강한 태풍일수록 중위도 지역에

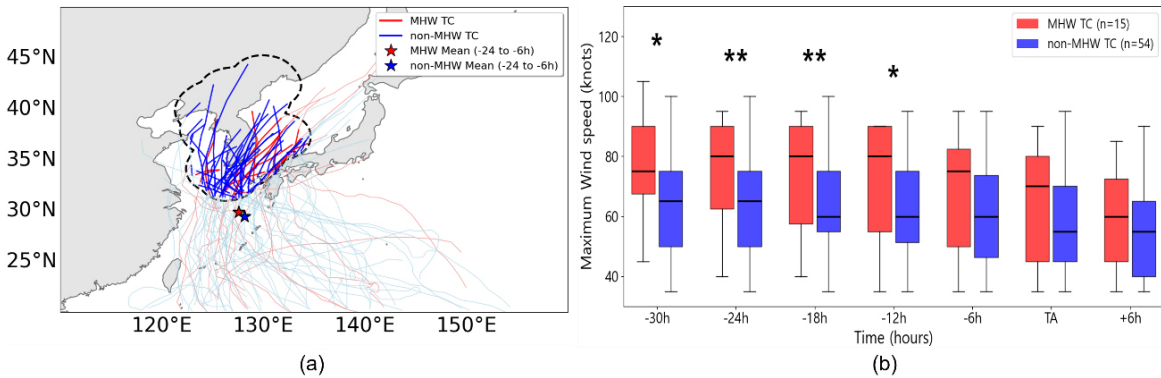


Fig. 1. Comparison of (a) tracks and (b) intensity evolution for MHW TCs (red, n=15) and non-MHW TCs (blue, n=54). (a) Tracks of TCs affecting the Korean Peninsula. The gray dashed line denotes the 250 km Tropical cyclone Affected area (TA) from the coastline. Tracks are shown in solid colors when inside the buffer zone and are faded when outside. (b) Time-series comparison of maximum wind speeds (knots) for MHW TCs (red) and non-MHW TCs (blue). The x-axis represents the time relative to the entry into the TA, from 30 hours before (-30h) to 6 hours after (+6h). Asterisks (\*\*) indicate time steps where the difference between the two groups is statistically significant ( $p < 0.05$ ) and Asterisks (\*) is statistically significant ( $p < 0.1$ )

서 강도 약화가 더 크게 나타나게 되어 약 24시간 내에 한반도 영향 태풍의 평균 강도로 수렴함을 보였다. 이러한 기존 연구 결과를 고려하면, Fig. 1(b)에서 확인되는 MHW TC와 non-MHW TC의 강도 차이는 MHW 해역을 통과한 태풍이 한반도 접근 이전에 상대적으로 높은 강도를 획득하고, 이후 중위도 환경의 구조적 특성에 의해 자연스러운 약화 과정을 겪기 때문인 것으로 이해된다.

Fig. 2는 앞서 분석한 태풍을 최대풍속 33 ms<sup>-1</sup> 기준으로 Strong TC와 Weak TC로 구분하여, MHW 영향에 따른 평균 강도 차이를 비교 분석한 결과이다. 그 결과 Strong TC에서는 MHW의 영향이 존재하는 경우 태풍의 강도가 증가하는 경향이 나타나고 있었으나, Weak TC에서는 두 그룹 간 유의미한 차이를 확인할 수 없었다. 즉 MHW 유무에 따른 한반도 영향 태풍의 강도 차이는 강도가 강한 태풍에서만 두드러지게 나타나고 있다. 태풍은 주로 해양에서 증발되는 수증기의 응결과정으로 발생하는 잠열을 통해 에너지를 공급받는다. 이러한 잠열의 전달 과정은 해수면과 하층 대기 간 수분 불균형이 크고 하층 바람이 셀 수록 강해지게 된다(Jaimes et al., 2016; Montgomery et al., 2002). 강한 태풍의 경우에는 강한 하층 바람으로 인해 비슷한 수분 불균형 상태에서도 더 많은 잠열이 대기중으로 전달될 수 있다. 따라서 Strong TC

는 한반도 영향권에 진입하기 이전부터 Weak TC에 비해 현저히 높은 강도를 가지고 있기에(Fig. 2) MHW의 영향이 더욱 극대화될 수 있으며, Fig. 2와 같이 강한 태풍의 강도 증가 효과가 약한 태풍의 경우보다 두드러지게 나타나게 된다.

또한 MHW가 태풍의 강도뿐 아니라 동반 강수에 미치는 영향을 분석하기 위해, TA 전후 한반도 영향 태풍 중심 부근의 강수량 평균과 중앙값을 비교하였다(Table 2). 여기서 강수율은 격자별 일 강수량을 태풍 중심 반경 5° 이내에서 공간 평균한 후, 각 사례에 대한 중앙값을 계산

Table 2. Composite mean and median of precipitation rate (mm day<sup>-1</sup>) for the Strong/Weak TC MHW and non-MHW

		-12h	-6h	TA	+6h	+12h
Strong TC MHW	mean	16.6	16.7	19.9	13.9	12.6
	median	6.0	7.3	12.4	8.5	7.1
Strong TC non-MHW	mean	3.2	3.2	2.3	3.0	4.4
	median	0.6	1.4	1.1	0.7	1.1
Weak TC MHW	mean	4.9	3.2	2.8	2.8	2.4
	median	4.9	3.4	2.5	2.2	1.3
Weak TC non-MHW	mean	6.7	7.2	6.5	5.5	6.7
	median	2.6	2.8	2.9	1.0	3.0

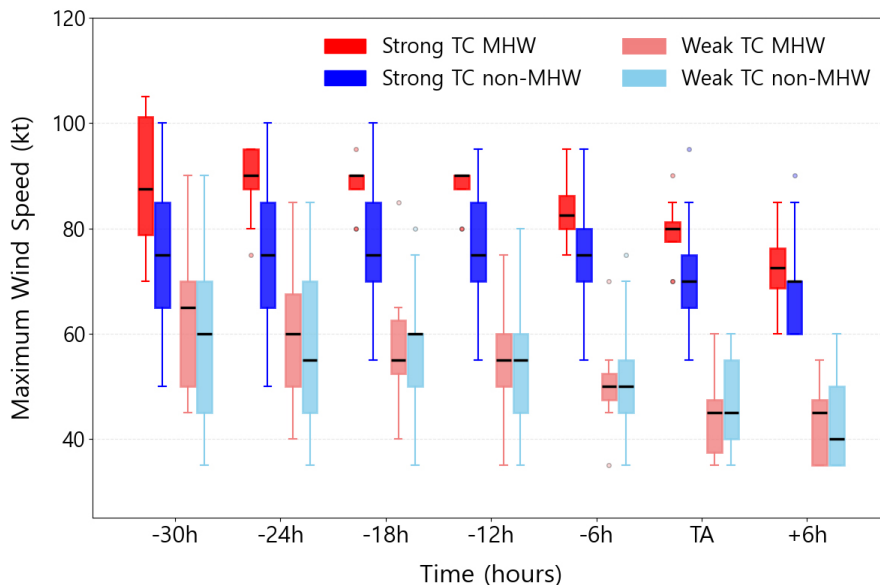


Fig. 2. Box plots of maximum wind speed (kt) for strong and weak TCs under MHW and non-MHW conditions. Red boxes indicate MHW TCs, and blue boxes indicate non-MHW TCs. The x-axis represents time (hours) relative to TA. Horizontal line (black) indicates the median

하였다. 분석 결과, Strong TC MHW의 경우에 다른 경우보다 일관되게 월등히 높은 강수율을 보였다. 그러나 Weak TC의 경우에는 앞선 태풍의 강도와 비슷하게 MHW 경험 여부에 따른 유의미한 차이가 보이지 않았다. Strong TC MHW의 강수율은 TA -12 h에 평균 16.6 mm day<sup>-1</sup> (중앙값 6.0 mm day<sup>-1</sup>), TA 시점에서 평균 19.9 mm day<sup>-1</sup> (중앙값 12.4 mm day<sup>-1</sup>)로 최대에 도달한 뒤 TA +12 h에서 평균 12.6 mm day<sup>-1</sup>(중앙값 7.1 mm day<sup>-1</sup>)로 감소하였다. 반면 non-MHW TC는 평균 2.3-4.4 mm day<sup>-1</sup> (중앙값 0.6-1.4 mm day<sup>-1</sup>) 범위의 낮은 강수율을 지속적으로 유지하였다. 두 그룹 간 차이는 TA 시점에서 가장 컸으며, MHW TC의 강수율은 non-MHW TC에 비해 평균으로는 약 8.7배, 중앙값으로는 약 12배 높았다. 특히 Strong TC MHW가 Strong TC non-MHW에 비해 월등히 높은 강수율을 유지하고 있다는 점은 MHW가 한반도 영

향 태풍의 강도뿐 아니라 태풍의 강수 기작까지도 중요한 영향을 미칠 가능성을 시사한다.

### 3.2. MHW가 한반도 영향 태풍 활동에 미치는 물리/역학적 요인 분석

MHW가 한반도 영향 태풍의 강도와 동반 강수에 미치는 물리/역학적 기작을 분석하기 위해 태풍의 강도 및 강수 강화에 직접적인 요인으로 작용할 수 있는 잠열 플럭스(Latent Heat Flux, LHF)와 수분 플럭스 수렴(Moisture Flux Convergence, MFC)에 대한 분석을 진행하였다. 분석은 MHW 영향이 두드러지는 Strong TC를 대상으로 진행하였다.

우선, MHW 영향 유무에 따른 태풍 중심 부근 LHF의 시간적 변화(Fig. 3(a)-(j))와 차이(Fig. 3(k)-(o))를 살펴보았다. 분석 결과, MHW의 영향을 받은 태풍은 non-MHW

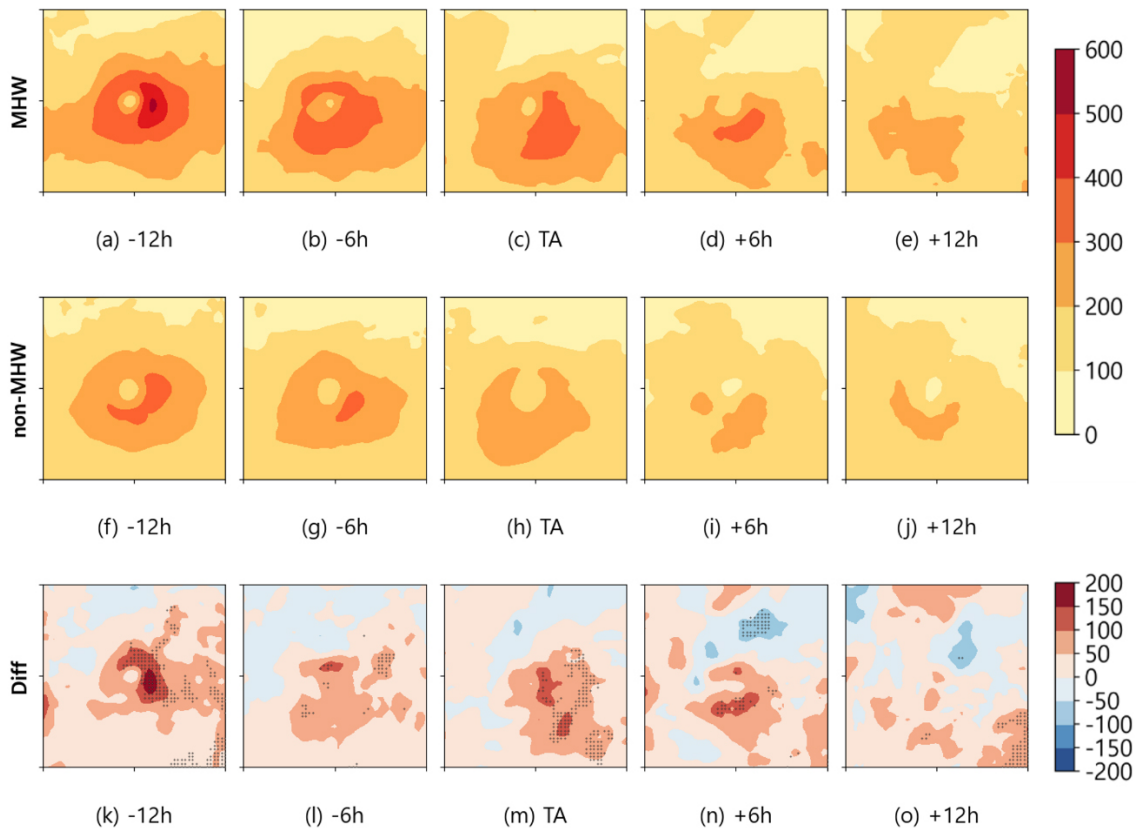


Fig. 3. Panels a-e, f-j, k-o show the latent heat flux (LHF, W m<sup>-2</sup>) within 5° radius at 6-hour interval relative to TA for MHW (a-e) and non MHW (f-j). Panels k-o illustrates Difference between MHW and non-MHW. Statistically significant differences at the 95% confidence level based on a two-sided Mann-Whitney U test are indicated by dots

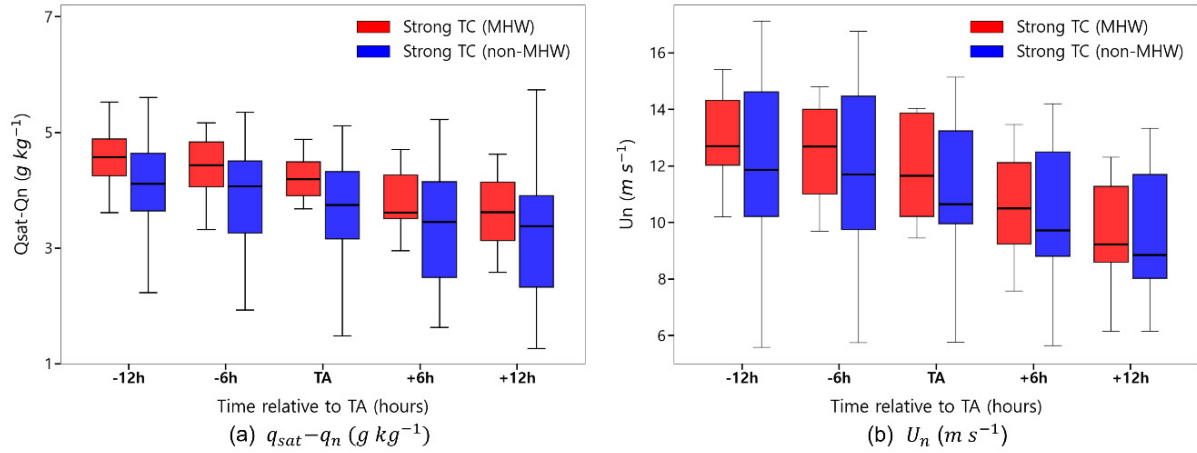


Fig. 4. Box plots of (a)  $q_{sat} - q_n$  ( $g\ kg^{-1}$ ) and (b)  $U_n$  ( $m\ s^{-1}$ ) for Strong TC MHW (red) and Strong TC non-MHW (blue). The x-axis represents time (hours) relative to TA. The central line indicates the median

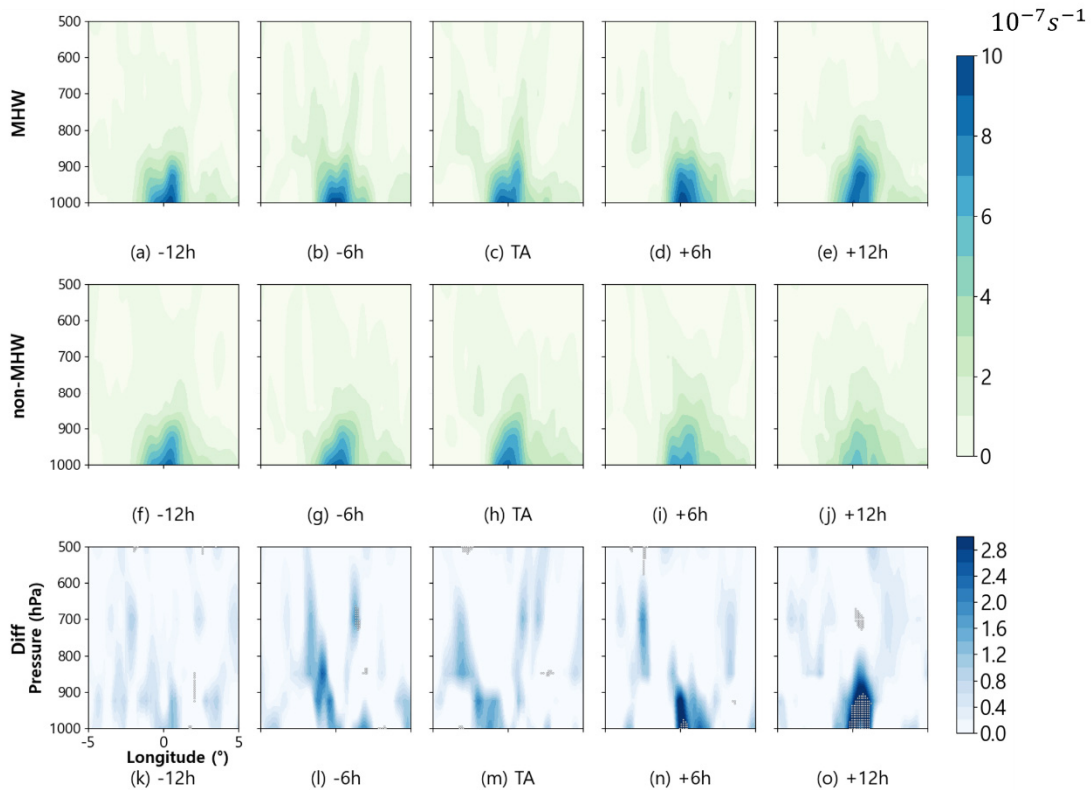


Fig. 5. Composite means of vertical cross section of moisture flux convergence (MFC,  $10^{-7}\ s^{-1}$ ) within  $5^\circ$  radius at 6-hour relative to TA for MHW (a-e) and Non MHW (f-j). Panels k-o illustrates Difference between MHW and non-MHW. Statistically significant differences at the 95% confidence level based on a two-sided Mann-Whitney U test are indicated by dots

TC에 비해 태풍 중심 부근에서 약  $50\text{--}100\text{ Wm}^{-2}$  더 많은 잠열이 해양에서 대기로 전달되는 것으로 나타났다. 두 그룹 간 LHF의 차이는 TA 이전에 가장 크게 나타나고 이후 점차 감소했는데, 이러한 경향은 TA를 기점으로 두 그룹의 강도 차이가 줄어드는 특징과 일관된 결과라 할 수 있다.

추가적으로 해양에서 대기로 전달되는 LHF를 구성하는 주요 성분인 수분 불균형( $q_{sat} - q_n$ )과 지면풍속( $U_n$ )을 분리해서 살펴보았다. Fig. 4는 각각의 성분을 태풍 중심 반경  $5^\circ$  이내에서 평균한 값을 각 시점에서의 상자수염 그림으로 보여주고 있다. 여기서 수분 불균형을 계산할 때 사용되는  $q_{sat}$ 은 해수면에서의 포화 수증기량으로 해수면 온도에 직접적인 영향을 받으며,  $q_n$ 은 대기 하층의 실제 수증기량으로 계산된다. 분석 결과, MHW TC에서는 분석 기간동안 수분 불균형이 non-MHW TC 보다 지속적으로 크게 유지되었다. 풍속 항은 두 그룹 모두 태풍의 강한 바람의 영향으로 평균  $10\text{ ms}^{-1}$ 의 상대적으로 높은 값을 유지하였지만, 두 그룹 간의 유의미한 차이는 나타나지 않았다. 즉, MHW 환경에서 상승한 해수면 온도로 인해 해수면의 포화 수증기량( $q_{sat}$ )이 증가하여 해수면-하층 대기 간의 강한 수분 불균형을 형성하게 된다. 여기에 태풍의 강한 하층 바람은 강화된 수분 불균형과 결합하여 증발 및 하층 난류 혼합을 증가시키고, 이를 통해 해양으로부터 잠열이 대기로 더욱 효율적으로 전달되는 기작이 형성되는 것으로 보인다.

Fig. 5는 MHW TC와 non-MHW TC의 중심 반경  $5^\circ$ 에서 방위각 평균한 MFC의 연직 분포 비교 결과를 보여주고 있다. MFC는 태풍 주변에서 강수 생산에 필요한 수증기가 역학적으로 어느정도 공급되는지 나타내는 지표로서 태풍 중심 부근의 MFC의 증가는 강한 연직 대류 활동 및 강수의 증가와 직접적으로 연결된다. 분석 결과, MHW TC는 태풍 중심부에서 non-MHW TC보다 지속적으로 더 강한 MFC가 지속적으로 유지되는 것으로 나타났다. 특히, MHW TC의 경우 TA 이후에도 강한 MFC가 유지되는 반면, non-MHW TC에서는 TA 이후 MFC가 크게 약해지는 것을 확인할 수 있었다. 앞선 LHF 분석과 함께 고려하면, MHW에 기인한 해양-하층대기 간 강한 수분 불균형으로 인해 해양으로부터의 수증기 증발 및 잠열 공급이 증가하고, 이로 인해 강화된 태풍의 저기압성 회전에 따른 하층 바람 수렴이 태풍 중심 부근의 MFC를 강화시키는 것으로 파악된다. 이러한 LHF 및 MFC의 강화는 태풍 중심부의 하층 와도 및 연직 대류 활동을 구조적

으로 더욱 강화시켜 추가적인 잠열 공급 및 수분 수렴을 일으키는 양의 피드백으로 이어질 수 있다(Emanuel, 1986; Shay et al., 2000). 결국 MHW를 경험한 태풍은 한반도 영향권 진입 전후로 보다 강한 강도와 높은 강수량을 유지할 수 있는 물리적 기반을 갖출 수 있다.

#### 4. 결론 및 토의

본 연구에서는 한반도 영향 태풍의 활동성에 MHW가 어떠한 영향을 미치는지에 대해 분석하였다. 분석 결과, MHW를 경험한 한반도 영향 태풍은 그렇지 않은 경우에 비해 강한 강도를 가지고 한반도 영향권에 진입하고, 진입 이후 그 강도 차이는 점차 줄어드는 것으로 나타났다. 이러한 경향성은 주로 최대풍속  $33\text{ ms}^{-1}$  이상인 강한 태풍에서만 두드러지게 나타났는데, 이는 한반도 영향 태풍의 경우 그 강도가 충분히 강할 경우에만 MHW의 영향이 효과적으로 나타나고 있음을 보여주고 있다. 태풍에 동반된 강수에서도 MHW의 뚜렷한 영향이 확인되었는데, Strong TC만을 고려하면 MHW TC는 non-MHW TC보다 평균값을 기준으로 8배가량 높은 강수량을 보였다. 이는 MHW가 태풍의 강도뿐만 아니라 강수 기작도 함께 강화하고 있음을 나타내고 있다.

이와 관련된 LHF와 MFC를 분석한 결과, MHW로 인해 해수면 포화 수증기량이 크게 증가하여 수분 불균형이 강화된 배경장이 형성되고, 여기에 태풍의 강한 하층 바람이 결합하여 해양에서 대기로 전달되는 LHF가 강화되는 것으로 나타났다. 이와 더불어, 잠열과 수증기의 증가는 태풍의 저기압성 회전으로 인한 바람의 수렴을 더욱 강화하여 태풍 중심 부근에서 강한 MFC와 대류 활동이 지속될 수 있는 구조가 형성됨을 보였다. 이러한 기작을 통해 MHW를 경험한 태풍이 한반도 영향권으로 진입하는 경우 MHW를 경험하지 않은 태풍보다 강한 강도와 강수량을 유지할 수 있었다고 판단된다.

미래에는 지구 온난화로 인해 태풍의 강도는 강해지고, MHW 발생 빈도와 강도는 지속적으로 증가할 것으로 예상되고 있다. 이에 향후 강한 태풍이 MHW 해역을 통과할 가능성은 점차 높아지고 있다. 본 연구 결과에서 볼 수 있듯이, 강한 태풍이 MHW를 경험할 경우 태풍의 강도뿐 아니라 동반 강수량까지 크게 증가할 수 있으며, 이는 미래에 MHW를 경험한 강한 태풍이 한반도에 상륙하는 경우 강풍 및 폭우로 인한 피해를 동시에 증폭시킬 수 있음을 암시하고 있다. 한편, 본 연구에서 사용한 태풍의 사례

수가 상대적으로 적다는 점은 MHW가 태풍 활동에 미치는 영향을 분석하는데 한계로 지적될 수 있다. 따라서 향후 연구에서는 실제 관측 사례뿐 아니라, MHW 환경을 가정한 고해상도 수치모델 실험을 병행하여 MHW가 한반도 영향 태풍의 강도 및 강수 기작에 미치는 물리 역학적 과정을 보다 정밀하게 분석할 필요가 있다고 사료된다. 결론적으로 본 연구의 결과는 태풍의 단기 강도 예측 측면에서 매우 유용한 기초 자료를 제공한다. 태풍이 한반도 영향권 내에 들어오기 전 MHW가 제공하는 막대한 열에너지를 고려하는 것은 향후 태풍 영향 예측의 불확실성을 줄이고 예보 정확도를 개선하는 데 크게 기여할 것으로 기대된다.

## 사사

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-24534063, RS-2023-00207866).

## Reference

- Basconcillo J, Moon I-J. 2023. Increasing peak intensity of tropical cyclones passing through the Korean Peninsula. *Sci Rep* 13(1): 5097. doi: 10.1038/s41598-023-32020-w
- Choi H-Y, Park M-S, Kim H-S, Lee S. 2024. Marine heatwave events strengthen the intensity of tropical cyclones. *Commun Earth Environ* 5(1): 69. doi: 10.1038/s43247-024-01239-4
- Choi J-W, Cha Y, Kim H-D, Kang S-D. 2016. Latitudinal change of tropical cyclone maximum intensity in the Western North Pacific. *Adv Meteorol* 2016(1): 5829162. doi: 10.1155/2016/5829162
- Do G, Kim H-S. 2021. Effect of mid-latitude jet stream on the intensity of tropical cyclones affecting Korea: Observational analysis and implication from the numerical model experiments of Typhoon Chaba (2016). *Atmosphere (Basel)* 12(8): 1061. doi: 10.3390/atmos12081061
- Emanuel KA. 1986. An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: Steady-state maintenance. *J Atmos Sci* 43(6): 585-605. doi: 10.1175/1520-0469(1986)043<0585:AASITF>2.0.CO;2
- Evans W, Hales B, Strutton PG, Shearman RK, Barth JA. 2015. Failure to bloom: Intense upwelling results in negligible phytoplankton response and prolonged CO<sub>2</sub> outgassing over the Oregon shelf. *J Geophys Res Ocean* 120(3): 1446-1461. doi: 10.1002/2014JC010580
- Gao S, Chiu LS. 2010. Surface latent heat flux and rainfall associated with rapidly intensifying tropical cyclones over the western North Pacific. *Int J Remote Sens* 31(17-18): 4699-4710. doi: 10.1080/01431161.2010.485149
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, Hirahara S, Horányi A, Muñoz-Sabater J, Nicolas J, Peubey C, Radu R, Schepers D, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc* 146(730): 1999-2049. doi: 10.1002/qj.3803
- Hobday AJ, Alexander L V, Perkins SE, Smale DA, Straub SC, Oliver ECJ, Benthuisen JA, Burrows MT, Donat MG, Feng M, et al. 2016. A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Prog Oceanogr* 141: 227-238. doi: 10.1016/j.pocean.2015.12.014
- Huang B, Liu C, Banzon V, Freeman E, Graham G, Hankins B, Smith T, Zhang H-M. 2021. Improvements of the Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (DOISST) Version 2.1. *J Clim* 34(8): 2923-2939. doi: 10.1175/JCLI-D-20-0166.1
- Jaimes B, Shay LK, Brewster JK. 2016. Observed air-sea interactions in tropical cyclone Isaac over loop current mesoscale eddy features. *Dyn Atmos Ocean* 76: 306-324. doi: 10.1016/j.dynatmoce.2016.03.001
- Lee S, Park M-S, Kwon M, Kim YH, Park Y-G. 2020. Two major modes of East Asian marine heatwaves. *Environ Res Lett* 15(7): 74008. doi: 10.1088/1748-9326/ab8527
- Lin Y, Zhao M, Zhang M. 2015. Tropical cyclone rainfall area controlled by relative sea surface temperature. *Nat Commun* 6(1): 6591. doi: 10.1038/ncomms7591
- Mann HB, Whitney DR. 1947. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than

- the other. *Ann Math Stat* 18(1): 50-60. doi: 10.1214/aoms/1177730491
- Montgomery MT, Vladimirov VA, Denissenko P V. 2002. An experimental study on hurricane mesovortices. *J Fluid Mech* 471: 1-32. doi: 10.1017/S0022112002001647
- Oliver ECJ, Burrows MT, Donat MG, Sen Gupta A, Alexander L V, Perkins-Kirkpatrick SE, Benthuyesen JA, Hobday AJ, Holbrook NJ, Moore PJ, et al. 2019. Projected marine heatwaves in the 21st century and the potential for ecological impact. *Front Mar Sci* 6: 734. doi: 10.3389/fmars.2019.00734
- Pun I-FF, Hsu H-HH, Moon I-JJ, Lin I-II, Jeong J-YY. 2023. Marine heatwave as a supercharger for the strongest typhoon in the East China Sea. *npj Clim Atmos Sci* 6(1): 128. doi: 10.1038/s41612-023-00449-5
- Radfar S, Mofatkhari H, Moradkhani H. 2024. Rapid intensification of tropical cyclones in the Gulf of Mexico is more likely during marine heatwaves. *Commun Earth Environ* 5(1): 421. doi: 10.1038/s43247-024-01578-2
- Ranjan R, Hari V, Ghosh S, Karmakar S. 2025. Comprehensive multivariate characterization of tropical cyclone and its district-level exposure characteristics over India. *npj Nat Hazards* 2(1): 94. doi: 10.1038/s44304-025-00128-w
- Schneider U, Finger P, Meyer-Christoffer A, Rustemeier E, Ziese M, Becker A. 2017. Evaluating the hydrological cycle over land using the newly-corrected precipitation climatology from the Global Precipitation Climatology Centre (GPCC). *Atmosphere (Basel)* 8(3): 52. doi: 10.3390/atmos8030052
- Shay LK, Goni GJ, Black PG. 2000. Effects of a warm oceanic feature on hurricane opal. *Mon Weather Rev* 128(5): 1366-1383. doi: 10.1175/1520-0493(2000)128<1366:EOAWOF>2.0.CO;2
- Smale DA, Wernberg T, Oliver ECJ, Thomsen M, Harvey BP, Straub SC, Burrows MT, Alexander LV, Benthuyesen JA, Donat MG, et al. 2019. Marine heatwaves threaten global biodiversity and the provision of ecosystem services. *Nat Clim Chang* 9(4): 306-312. doi: 10.1038/s41558-019-0412-1
- Sun W, Yin L, Pei Y, Shen C, Yang Y, Ji J, Yang J, Dong C. 2023. Marine heatwaves in the Western North Pacific Region: Historical characteristics and future projections. *Deep Sea Res Part I Oceanogr Res Pap* 200: 104161. doi: 10.1016/j.dsr.2023.104161
- Zhou X, Xu K, Ashok K, Shi J, Zhang L, Yu J-Y, Liu B, Tam C-Y, Xu H, Wang W. 2025. Compound marine heatwaves and tropical cyclones delay the onset of the Bay of Bengal summer monsoon. *npj Clim Atmos Sci* 8(1): 162. doi: 10.1038/s41612-025-01061-5