J. Korea Water Resour. Assoc. Vol. 59, No. 2 (2026), pp. 115-129
doi: 10.3741/JKWRA.2026.59.2.115
pISSN 2799-8746
eISSN 2799-8754

Simulation of storm surges and waves using the coupled ADCIRC-SWAN model based on JMA-MSM meteorological fields: A case study of typhoons Maysak (2009) and Haishen (2010)

Hwang, Taegeon[a,b] · Kim, Hyeon-Jeong[c] · Min, Byung-Il[d] · Lee, Sang-Yeop[e] · Lee, Woo-Dong[f]*

[a]Ph.D. Student, Department of Ocean Civil Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea
[b]Researcher, Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea
[c]Researcher, Environmental Safety Technology Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, Korea
[d]Principal Researcher, Environmental Safety Technology Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, Korea
[e]Researcher, Earthquake Disaster Reduction Center, National Disaster Management Research Institute, Ulsan, Korea
[f]Professor, Department of Ocean Civil Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

Paper number: 25-127
Received: 9 November 2025; Revised: 13 December 2025; Accepted: 16 December 2025

Abstract

This study employed the coupled ADCIRC − SWAN model driven by meteorological fields from the Japan Meteorological Agency Meso - Scale Model (JMA-MSM) to simulate and analyze storm surges and waves induced by Typhoons Maysak (2009) and Haishen (2010), which successively struck the Korean Peninsula in 2020. Model performance was verified through quantitative comparisons with observed water levels, in-situ wave data, and hindcast results, confirming the physical validity and predictive reliability of the coupled surge − wave interaction analysis. The results revealed that the temporal evolution and spatial distribution of storm surges and waves varied significantly depending on the typhoon tracks and the locations of strong wind fields. The simultaneous effects of surge-induced water level rise and wave radiation stresses produced complex coupled behaviors in coastal regions. Benefiting from the accurate representation of large-scale pressure and wind variations in the JMA-MSM fields, the model successfully reproduced high storm waves in regions severely affected by overtopping and inundation, including the southeastern and eastern coasts, Ulleungdo, and Dokdo. These findings demonstrate the practical applicability of high-resolution reanalysis or forecast meteorological data with coupled modeling for precise prediction of compound coastal hazards under changing climate conditions.

Keywords: Storm surge-wave interaction, Reanalysis/forecast meteorological fields, Sea surface wind, Unstructured grid system, Coupled ADCIRC − SWAN model

JMA-MSM 기상장 기반 ADCIRC-SWAN 연성모델을 이용한 폭풍해일 및 폭풍파 모의: 태풍 마이삭(2009)과 하이선(2010)을 대상으로

황태건[a,b] · 김현정[c] · 민병일[d] · 이상엽[e] · 이우동[f]*

[a]경상국립대학교 해양토목공학과 박사과정, [b]경상국립대학교 해양산업연구소 연구원, [c]한국원자력연구원 환경안전평가연구부 연구원, [d]한국원자력연구원 환경안전평가연구부 책임연구원, [e]국립재난안전연구원 지진방재센터 연구원, [f]경상국립대학교 해양토목공학과 교수

요 지

본 연구는 일본기상청 중규모모델(JMA-MSM) 기상장을 외력으로 적용하여 ADCIRC-SWAN 연성해석을 수행하였다. 대상 태풍은 2020년 한반도를 연이어 강타한 태풍 마이삭(2009)과 하이선(2010)이며, 내습 시기의 폭풍해일 및 폭풍파를 추산하고 그 특성을 분석하였다. 먼저, 관측 수위, 관측 파랑, 후측 파랑 자료와의 정량적 비교를 통해 폭풍해일-파랑 비선형 상호작용 해석의 타당성과 모델의 유효성을 확인하였다. 연성해석 결과, 태풍의 경로와 강풍역의 위치에 따라 해일과 파랑의 발달 및 소멸 시점과 공간분포가 상이하게 나타났다. 특히, 해일 상승에 따른 수심 변화와 파랑 복사응력에 의한 해면상승이 동시에 작용함으로써 연안역의 수위와 파고가 상호 영향을 주는 복합 거동을 보였다. JMA-MSM 기상장은 태풍 전후의 광역 기압 및 풍속 변동을 반영하고 있기 때문에 두 태풍 내습 시에 월파 및 침수 피해가 심각했던 남해 동부, 동해 남부와 북부, 울릉도 및 독도 해역에서 높은 폭풍파가 추산되었다. 이러한 결과는 복합 해양 재해 예측에 성공적으로 적용될 수 있음을 보여줌과 동시에, 기후 변화에 따른 태풍 피해에 대응하기 위한 월파 · 침수 등 연안 재해 평가에 고해상도 재분석/예측 기상장 적용 및 연성해석의 중요성을 시사한다.

핵심용어: 폭풍해일-파랑 상호작용, 재분석 기상장, 예측 기상장, 해상풍, 비구조 격자 체계 ADCIRC-SWAN 연성모델

***Corresponding Author.** Tel: +82-55-772-9126
E-mail: wdlee@gnu.ac.kr (Lee, Woo-Dong)

© 2026 Korea Water Resources Association

1. 서 론

기후변화에 따른 해수면 상승과 더불어 폭풍해일 및 폭풍파의 강도가 점차 증대됨에 따라, 이들의 복합 작용으로 인한 연안 침수 피해가 빈번하게 발생하고 있다. 태풍 시 발생하는 폭풍해일과 고파랑은 월류 및 월파 현상을 유발하여 광범위한 침수와 구조물 피해를 초래한다. 따라서 효과적인 연안 방재를 위해서는 태풍에 의한 폭풍해일뿐만 아니라 동반된 폭풍파의 정밀 예측이 필수적이다. 폭풍해일은 기압 저하와 강풍으로 인한 해수면 상승 현상으로, 대기압 분포와 바람장의 시·공간적 변동에 의해 결정된다. 한편, 폭풍파는 태풍의 강풍에 의해 생성·발달하며, 풍속, 풍향, 지속시간, 취송거리 등의 인자에 따라 파고와 주기가 변화한다. 이처럼 폭풍해일과 폭풍파의 발생 원인이 되는 기상장은 3차원적으로 복잡하게 거동하기 때문에, 이들을 정확히 예측하거나 재현하는 것은 매우 어렵다. 그럼에도 불구하고 태풍에 의한 극한 해양재해로부터 연안을 보호하기 위해서는 폭풍해일과 폭풍파를 동시에 고려한 통합적 평가와 예측 기술이 요구된다.

1951년부터 2023년까지 한반도에 영향을 미친 태풍의 연평균 개수는 약 3.25개로 보고되었다(Jin *et al*., 2024). 1980년대 이후 영향 태풍의 빈도가 증가하는 추세이며, 2000년대 들어 그 속도가 더욱 가속되고 있다. 2024년에는 북서태평양에서 발생한 26개의 태풍 중 2개가 한반도에 영향을 미쳤으며(NTC, 2025), 이는 평년보다 다소 적은 수치이다. 일반적으로 태풍은 북태평양 고기압이 확장하는 6월에서 10월 사이에 한반도에 영향을 주며, 주로 7-9월에 집중된다. 8월의 내습 빈도가 가장 높지만, 피해 규모는 주로 가을철(9월)에 최대치에 달한다. 이는 7-8월에 태풍 발생 수가 많기 때문이기도 하지만, 북태평양 고기압이 수축하며 한반도 쪽으로 진로 통로를 형성하기 때문이기도 하다(Kim *et al*., 2014; Kim *et al*., 2019a, 2019b). 대표적인 사례로, 2003년 제14호 태풍 매미(0314)는 북태평양 고기압 가장자리를 따라 북상하다가 진로를 북동쪽으로 전환하여 대한해협을 통과, 동해로 진출하며 기록적인 폭풍해일과 최대풍속을 발생시켰다. 이러한 경로를 보이는 태풍은 서진 또는 북서진 후 북동진하는 포물선형 진로를 따라 이동하며, 한반도와 일본 규슈 사이의 대한해협을 통과한 뒤 동해상에서 소멸하는 경향이 있다.

2020년 초가을, 한반도를 연이어 강타한 제9호 태풍 마이삭(2009) 과 제10호 태풍 하이선(2010) 은 광범위한 피해를 초래하였다. 두 태풍 모두 필리핀과 괌 인근 해상에서 발생하여 세력을 강화하며 북서진하였고, 한반도 접근 이후에는 전형적인 북진 경로를 나타냈다(Seo *et al*., 2023). 마이삭은 25°-30°N 구간에서 이동 속도가 최고 23 km/h, 최저 12 km/h, 평균 18.7 km/h로 비교적 느리게 이동하였으며, 35.3°N 부근에서는 54 km/h로 급격히 가속되었다(Kim *et al*., 2021). 반면, 하이선은 북상하면서 이동 속도가 점차 증가하여, 상륙 시점인 35.3°N에서 약 48 km/h에 달했다. 두 태풍의 최저 중심기압은 각각 935 hPa와 915 hPa, 최대 풍속은 49 m/s와 55 m/s로, 특히 하이선은 슈퍼태풍급 강도를 기록하였다. 또한, 이 두 태풍은 불과 4-5일 간격으로 연속 상륙하는 이례적 경로를 보이며, 남해안과 동해안뿐 아니라 제주도와 울릉도 지역에도 심각한 폭풍해일과 고파랑 피해를 초래하였다(Son and Do, 2021; Seo *et al*., 2023).

태풍의 기상장을 재현할 때는 일반적으로 미국 합동태풍경보센터(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)의 베스트트랙(Best Track, BT) 자료를 기반으로 한 파라메트릭 모델이 널리 사용된다. 이 모델은 태풍 중심 경로, 중심기압, 최대풍속, 최대풍속반경 등의 정보를 이용하여 바람장을 산정하지만, 태풍 영향권 외의 광역 기상장 변화를 반영하지 못하는 한계가 있다. 따라서 이 파라미터 기반 바람장을 폭풍해일 모의에 적용하면, 태풍 통과 전후의 배경 기압장 변동이 재현되지 않아 해수위 변화를 과소평가할 우려가 있다(Kwon *et al*., 2020). Son and Do (2021)는 Holland 모델이 태풍 중심 주변의 국지 바람만 재현하고, 광역 배경장의 영향을 고려하지 못한다는 구조적 한계를 지적하였다. 그 결과, 태풍 마이삭과 하이선의 폭풍파 모의에서 강한 바람이 한정된 영역에 집중되어 전체 파랑 분포가 저평가되는 현상이 보고되었다.

최근에는 기상 예측 및 재분석 기술의 발전으로, 고해상도 지역 예보 또는 재분석 기상장 데이터를 활용하여 파라메트릭 모델의 한계를 극복하려는 연구가 활발히 수행되고 있다. MOF (2019)는 일본기상청의 중규모 모델(Japan Meteorological Agency - Meso-Scale Model, JMA-MSM) 재분석 기상장을 활용하여 심해설계파 제원을 산정하고 그 타당성을 검증한 바 있다. Kwon *et al*. (2020)은 태풍 콩레이(1825)에 대한 해일-파랑 연성해석에서 JMA- MSM 기상장을 적용한 경우가 JTWC-BT 기반 파라메트릭 모델보다 폭풍해일고와 폭풍파고 추산 정확도가 높았다고 보고하였다. Yoon *et al*. (2020)은 태풍 매미 사례 연구에서 JMA-MSM 기상장이 가장 높은 신뢰도를 보였으며, Son and Do (2021) 및 Seo *et al*. (2023)도 태풍 마이삭과 하이선의 폭풍파 재현에 JMA-MSM 또는 RDAPS 기상장을 적용한 결과, 관측과 가장 근접한 결과를 얻었다고 제시하였다. 또한, 태풍 볼라벤(1215)을 대상으로 JMA-MSM 기상장을 적용한 폭풍파 모의에서도 관측파랑을 높은 정확도로 예측하였다(Hwang *et al*., 2024).

한편, 파랑은 해안 근처에서 쇄파 및 복사응력을 유발하며, 이는 해수면 상승을 초래한다. Murty *et al*. (2020)은 인도 동해안 사례에서 파랑 복사응력으로 인한 수위 상승이 최대 20-

30%까지 증가할 수 있음을 보고하였다. 따라서 폭풍해일 예측 시 파랑 복사응력의 효과를 배제할 경우 수위 예측 정확도가 저하될 수 있다. 또한 폭풍해일에 의한 수위 상승은 연안에서의 천수 · 쇄파 · 반사 과정에 영향을 주어 파랑 변형을 유발한다. 즉, 폭풍해일과 폭풍파는 상호 의존적인 물리적 현상이므로, 두 과정을 동시에 해석할 수 있는 연성모델의 적용이 필수적이다(Dietrich *et al*., 2011; Xie *et al*., 2016). 이러한 상호작용을 고려하지 않으면 극한 해양재해 예측력과 해안·항만 구조물 설계의 신뢰도가 모두 저하될 수 있다.

한반도를 대상으로 한 폭풍해일과 파랑의 비선형 상호작용을 고려한 수치 모델링 연구가 지속적으로 수행되어 왔다. Yoon *et al*. (2012)은 태풍 매미와 곤파스(1007)를 대상으로 FVCOM-SWAN 연성모델을 적용하여 해일-파랑 상호작용을 모의하고, 파랑 효과로 인해 폭풍해일고가 최대 25%까지 상승할 수 있음을 정량적으로 제시하였다. 이후, 한반도 연안과 같이 섬이 많고 조차가 크며 수심이 얕은 복잡한 지형에서는 비정형 격자 체계가 정밀 모의에 유리함을 실증하였다(Yoon and Jun, 2015). 기상 장의 중요성을 강조한 Kim *et al*. (2020)은 태풍 볼라벤을 대상으로 JMA-MSM과 JTWC-BT 기상장을 각각 ADCIRC-SWAN 연성모델에 적용하여 서해안 폭풍해일 및 파랑 재현성을 비교 평가하였다. 그 결과, JMA-MSM 기상장이 관측치를 안정적으로 재현한 반면, JTWC-BT 기반 기상장은 태풍 영향 범위를 과소평가하여 해일 및 파랑을 모두 저평가하는 한계를 보였다. 한편, 조석을 동적으로 결합한 수치 접근법도 제안되었다. Chun *et al*. (2009)은 POM-WAM 연성모델을 다중 격자체계로 구성하여 태풍 매미 사례에 적용, 해일-조석-파랑 상호작용 해석의 적용 가능성과 정확도를 검증하였다. Suh and Kim (2012)은 비대칭 태풍 풍장 모델을 ADCIRC-SWAN에 적용하여 태풍 곤파스와 프라피룬(0012)을 모의하고, 폭풍해일과 조석의 중첩 효과, 파랑 기여도를 정량 분석함으로써 위상 결합에 의한 수위 증폭 현상을 규명하였다. Park *et al*. (2013) 역시 POM-SWAN 연성모델을 다중 격자 기반으로 구성하여 통영, 마산, 부산 등에서 관측된 수위 및 파랑 자료와 비교 검증하며 모델의 신뢰성을 입증하였다.

최근에는 기존의 물리적 과정 모의를 넘어 실용적 위험 평가 및 정책 지원으로 연구 범위가 확장되고 있다. Kim (2025)은 ADCIRC-SWAN 연성해석을 통해 생성된 폭풍해일 및 파랑 자료를 기반으로, 기후변화 시나리오에 따른 해수면 상승과 극한 강우를 복합적으로 고려한 침수위험지도를 구축하고, 객체 기반 피해 산정을 수행하여 맞춤형 연안 재해 대응 전략을 제안하였다. 이는 기존의 단일 위험 평가를 넘어 복합재해 리스크 관리로의 전환을 보여주는 대표적 사례이다.

이러한 배경에서 폭풍해일과 폭풍파의 상호작용을 물리적으로 일관되게 재현하기 위해서는 신뢰도 높은 기상장과 연성수치모델의 적용이 필수적이다. 이에 본 연구는 고해상도 기상장의 신뢰성을 바탕으로, 2020년 태풍 마이삭과 하이선 내습 시 한반도 주변 해역에서 발생한 폭풍해일 및 폭풍파의 비선형 상호작용과 그에 따른 해양물리 환경 변화를 정밀하게 재현 및 분석하는 데 목적을 두었다. 이를 위해 해일-파랑 상호작용을 직접 해석할 수 있는 ADCIRC-SWAN 연성모델을 활용하였으며, JMA-MSM 기상장을 입력하여 폭풍해일고와 폭풍파를 동시 모의하였다. 먼저, 검조소의 수위 자료, 파랑 관측소의 유의파고 자료 및 전국파랑관측자료 제공시스템(Wave Information Network of Korea, WINK)의 후측 파랑 자료(MOF, 2025)와 비교함으로써 연성해석의 타당성 및 유효성을 면밀히 검증한다. 이를 토대로 태풍 마이삭과 하이선 내습에 따른 폭풍해일뿐만 아니라 폭풍파의 특성 변화를 심도 있게 분석하고, 이를 통해 연안에 미치는 영향을 논의한다.

2. 해일-파랑 상호작용 해석법

2.1 ADCIRC 모델

ADCIRC (Luettich *et al*., 1992)는 유한요소법(Finite Element Method, FEM)을 기반으로 한 2차원 또는 3차원 천수방정식 모델로, 광범위한 해역에서 장기적인 해수유동 및 해수위 변동을 모의할 수 있도록 개발되었다. 이 모델은 조석, 폭풍해일, 지진해일 등 장주기성 동수역학적 현상 해석에 적합하며, 기상장 입력에 따른 시간적 수위 변동 및 해수 유동을 효율적으로 재현할 수 있다. 본 연구에서는 2차원 수심적분형(Two-Dimensional Depth-Integrated, 2DDI) 모델을 적용하였으며, 그 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\frac{1}{R\cos\phi}\frac{\partial UH}{\partial \lambda}+\frac{1}{R}\frac{\partial VH}{\partial \phi}-\frac{VH\tan\phi}{R}=0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned}&\frac{\partial U}{\partial t}+\frac{U}{R\cos\phi}\frac{\partial U}{\partial \lambda}+\frac{V}{R}\frac{\partial U}{\partial \phi}-\left(\frac{U\tan\phi}{R}+f\right)V= \\ &-\frac{1}{R\cos\phi}\frac{\partial}{\partial \lambda}\left[\frac{P_s}{\rho_0}+(g\zeta-\alpha\eta)\right]+\frac{\tau_{s\lambda}^{wind}+\tau_{s\lambda}^{wave}-\tau_{b\lambda}}{\rho_0 H} \\ &+M_\lambda+D_\lambda-B_\lambda\end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}&\frac{\partial V}{\partial t}+\frac{U}{R\cos\phi}\frac{\partial V}{\partial \lambda}+\frac{V}{R}\frac{\partial V}{\partial \phi}+\left(\frac{U\tan\phi}{R}+f\right)U \\ &=-\frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial \phi}\left[\frac{P_s}{\rho_0}+g(\zeta-\alpha\eta)\right]+\frac{\tau_{s\phi}^{wind}+\tau_{s\phi}^{wave}-\tau_{b\phi}}{\rho_0 H} \\ &+M_\phi+D_\phi-B_\phi\end{aligned} \tag{3}$$

여기서 t는 시간, ζ는 평균 해수면으로부터의 수면변위, R은 지구의 반경, λ와 ϕ은 경도와 위도, UH와 VH는 단위 너비당 유량, f는 코리올리 계수, g는 중력 가속도, α는 지구 탄성 감소계수, η는 뉴턴 평형 조석 에너지, ρ_0는 물의 밀도, p_s는 해수면의 기압, H는 지오이드의 수심 h에 ζ를 더한 총수심, U와 V는 수심 평균한 유속, $\tau_{s\lambda}^{wind}$와 $\tau_{s\phi}^{wind}$는 해면 풍응력, $\tau_{s\lambda}^{wave}$와 $\tau_{s\phi}^{wave}$는 파랑에 의한 해면응력, $\tau_{b\lambda}$와 $\tau_{b\phi}$는 바닥 마찰응력, M_λ와 M_ϕ는 수심 평균한 수평 응력의 기울기, D_λ와 D_ϕ는 난류 확산항, B_λ와 B_ϕ는 수심 평균한 경압의 기울기를 각각 나타낸다.

2.2 SWAN 모델

ADCIRC은 비구조 격자체계를 사용하므로, 동일한 격자상에서 파랑을 계산하기 위해 UnSWAN (Zijlema, 2010) 모델을 적용하였다. UnSWAN은 삼각형 기반의 비구조 격자를 사용하여 복잡한 해안선 및 천해역 지형을 자연스럽게 구현할 수 있는 SWAN (Simulating WAves Nearshore) 모델의 확장 버전이다. 본 연구에서는 SWAN Ver. 40.95를 적용하였으며, 파랑의 시·공간적 변화를 지배하는 파랑작용 평형방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial N}{\partial t}+\nabla_x \cdot [(\overrightarrow{c_g}+\overrightarrow{U})N]+\frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta}+\frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma}=\frac{S}{\sigma} \tag{4}$$

여기서 $N(\overrightarrow{x},t,\sigma,\theta)$은 파랑 작용에 따른 밀도 스펙트럼이며, σ는 절대 각주파수, θ는 파향, $\overrightarrow{U}$는 평균 유속을 나타낸다. S는 파랑의 생성 · 소멸 및 상호작용에 의한 소스항들의 합으로 구성된다.

SWAN 모델에서 파랑에 의해 유도되는 복사응력은 다음과 같이 계산되는 해면 응력 성분(τ_{sx}^{wave}와 τ_{sy}^{wave})으로 나타낼 수 있다(Dietrich *et al*., 2011).

$$\tau_{sx}^{wave}=-\frac{\partial S_{xx}}{\partial x}-\frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \tag{5}$$

$$\tau_{sy}^{wave}=-\frac{\partial S_{xy}}{\partial x}-\frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \tag{6}$$

여기서 S_{xx}, S_{xy}, S_{yy}는 파랑에 의해 전달되는 운동량 플럭스(복사응력 텐서 성분)이며, 다음과 같이 계산된다.

$$S_{xx}=\rho_0 g\iint\left(n\cos^2\theta+n-\frac{1}{2}\right)\sigma N d\sigma d\theta \tag{7}$$

$$S_{xy}=\rho_0 g\iint(n\sin\theta\cos\theta)\sigma N d\sigma d\theta \tag{8}$$

$$S_{yy}=\rho_0 g\iint\left(n\sin^2\theta+n-\frac{1}{2}\right)\sigma N d\sigma d\theta \tag{9}$$

여기서 n은 군속도와 위상속도의 비율로 다음과 같이 정의되며, k는 파수, h는 수심이다. kh는 파랑의 상대 수심을 나타내며, 천해파 및 심해파 조건을 구분하는 지표이다.

$$n=\frac{1}{2}\left(1+\frac{2kh}{\sinh(2kh)}\right) \tag{10}$$

비구조 격자체계에서 구면 좌표계를 적용한 파랑 운동량 플럭스의 경 ·위도 성분(해면 응력)은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\tau_{s\lambda}^{wave}=-\frac{1}{R\cos\phi}\left[\frac{\partial S_{\lambda\lambda}}{\partial\lambda}-\frac{\partial S_{\lambda\phi}(\cos\phi)}{\partial\phi}\right] \tag{11}$$

$$\tau_{s\phi}^{wave}=-\frac{1}{R}\frac{\partial S_{\phi\phi}}{\partial\phi}-\frac{1}{R\cos\phi}\frac{\partial S_{\lambda\phi}}{\partial\phi}+\frac{1}{R}\frac{\tan\phi}{R}S_{\lambda\lambda} \tag{12}$$

이와 같이 SWAN 모델은 파랑에 의해 유도된 복사응력을 계산하여 이를 ADCIRC 모델에 해면 응력으로 전달함으로써, 폭풍해일-파랑 비선형 상호작용을 모의한다.

2.3 연성해석 절차

ADCIRC-SWAN 연성모델은 폭풍해일, 조석, 그리고 파랑의 상호작용을 고려할 수 있는 계산 체계로서, 두 모델 간의 물리적 상호작용을 시간적으로 반복 교환함으로써 해석의 정확도를 향상시키는 수치적 접근법이다.

두 수치모델 간의 연성해석은 동일한 비구조 격자체계에서 수행된다. ADCIRC에서 계산된 수면 변위, 해수 유동장, 바람장 정보가 SWAN으로 전달되어 파랑장이 계산되며, SWAN에서 산정된 파랑 작용에 따른 복사응력은 다시 ADCIRC으로 피드백되어 해면 응력으로 적용된다. Fig. 1처럼 양방향 연성해석은 계산 시간 간격 단위로 반복되며, 두 모델 간의 상호작용은 계산이 수렴하고 안정성이 확보될 때까지 지속된다. 이 해석법을 통해 파랑에 의한 해면 응력이 해수유동에 미치는 영향, 해수유동이 파랑 전파에 미치는 영향을 상호 고려할 수 있어, 복잡한 해양환경에서 폭풍해일 및 파랑 거동을 보다 효과적이고, 정확하게 모의할 수 있다.

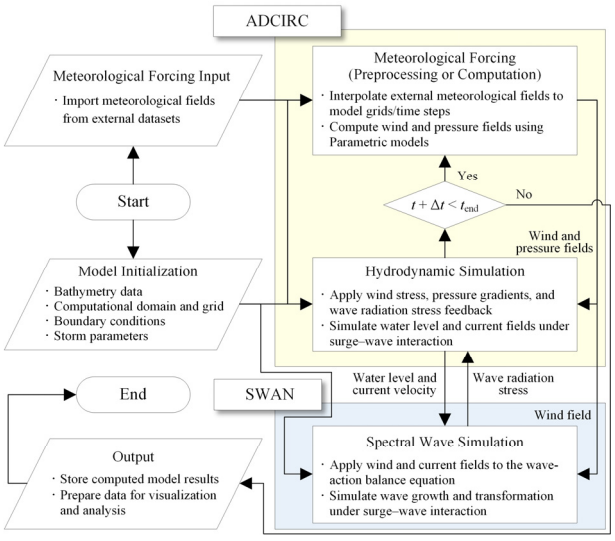


Fig. 1. Flowchart of the two-way ADCIRC-SWAN coupling procedure for storm surge-wave interaction

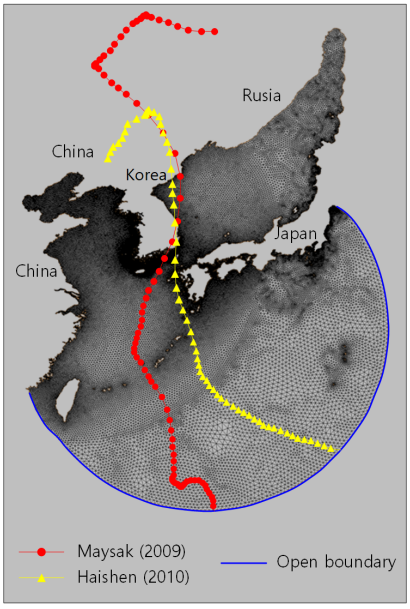


Fig. 2. Computational domain and unstructured mesh configuration covering the Korean Peninsula and surrounding seas, including the best tracks of Typhoons Maysak and Haishen

2.4 수치계산 조건

2.4.1 계산 영역 및 격자 구성

본 연구의 계산 영역(Fig. 2)은 동해, 남해, 서해를 포함한 한반도 전역과 북서태평양 일부를 포괄하도록 구성하였다. 이 영역은 일본(북해도 제외), 대만, 오가사와라 제도 인근 해역까지 포함하여 태풍 이동 경로에 따른 해역 반응을 충분히 반영할 수 있도록 설정하였다. 계산 효율을 고려하여, 우선 광역 격자를 구성한 뒤, 최신 해도 및 수심측량 자료를 이용해 한반도 연안역을 고해상도 세부 격자로 세분화하였다. 격자 크기는 해안선 부근에서 약 10 m로 시작하여 외해로 갈수록 점진적으로 증가하며, 최대 약 60 km 규모에 이른다. 전체 계산 격자는 398,909개의 요소와 216,241개의 노드로 구성된다.

2.4.2 계산 조건

해일-파랑 연성 모의에 사용된 주요 계산 조건과 입력 매개변수는 Table 1에 요약하였다. ADCIRC 모델의 시간 설정은 계산 간격 0.5 s, 결과 저장 간격 1.0 s로 설정하였으며, 폭풍해일-파랑 상호작용 해석 기간은 2020년 8월 28일부터 9월 8일까지 이다. 그리고 바람 마찰에 대한 항력계수는 Garratt (1977)이 제안한 경험식에 따라 계산하며, 최대값을 0.003으로 제한하였다.

SWAN 모델에서는 파랑 스펙트럼의 형태로 JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) 스펙트럼을 적용하였으며, 장주기 성분을 포함하기 위해 주파수 범위를 0.04-1.0 Hz로 설정하고, 34개 구간으로 분할하였다. 또한, 파향 분해는 10° 간격으로 36개 방향으로 수행하여 파랑 에너지 스펙트럼을 계산하였다. 기타 파랑 쇄파, 바닥 마찰, 백파 소산 등은 Table 1의 기본적 파라미터를 따른다.

Table 1. Model parameters and coefficient settings applied in the coupled ADCIRC-SWAN simulation

Model	Category	Setting
ADCIRC	Bottom friction	0.03
	Drag	Max: 0.003
	Reduction	0.9
SWAN	Directional spreading	36
	Discrete frequency	0.04-1.0
	Wave breaking	0.73
	Bottom friction coefficient	0.038
	Whitecapping dissipation	GEN3 KOMEN
	Others	Default

2.4.3 태풍의 기상장

본 연구에서는 JMA-MSM 기상장 자료를 이용하여 태풍 마이삭과 하이선의 기상 특성을 분석하였다. 해당 자료는 수평 해상도 0.05°, 시간 간격 1시간으로 제공되며, 태풍의 이동 경로를 포함한 한반도 주변 해역의 풍속 및 기압 분포를 Figs. 3 and 4에 각각 나타내었다.

태풍 마이삭의 기상장은 2020년 9월 2일 14:00부터 9월 3일 11:00까지, 태풍 하이선은 9월 6일 20:00부터 9월 7일 17:00까지를 3시간 간격으로 시각화하였다. 태풍 마이삭은 동중국

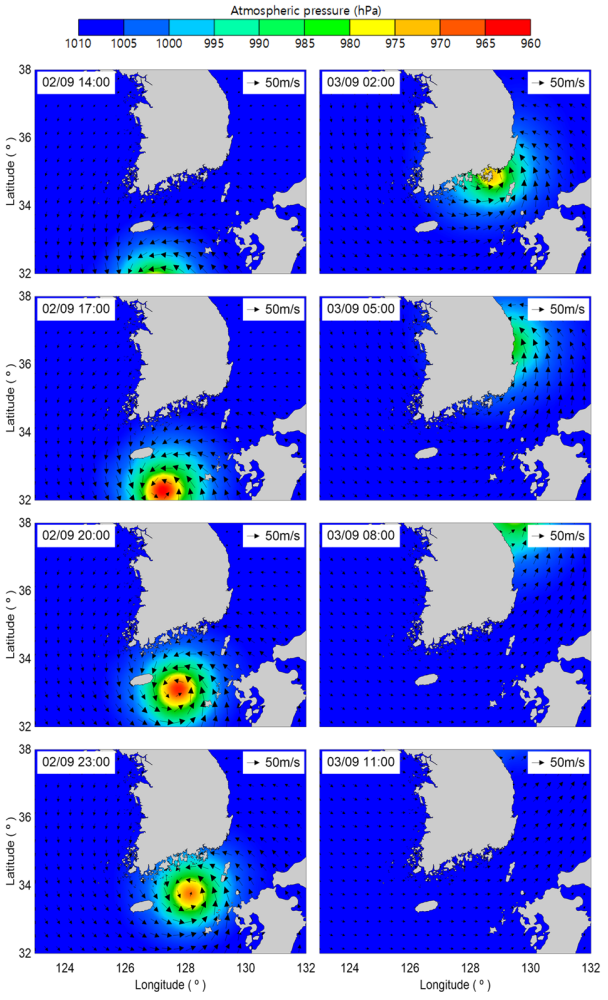


Fig. 3. Wind and pressure fields of Typhoon Maysak around the Korean Peninsula from JMA-MSM data

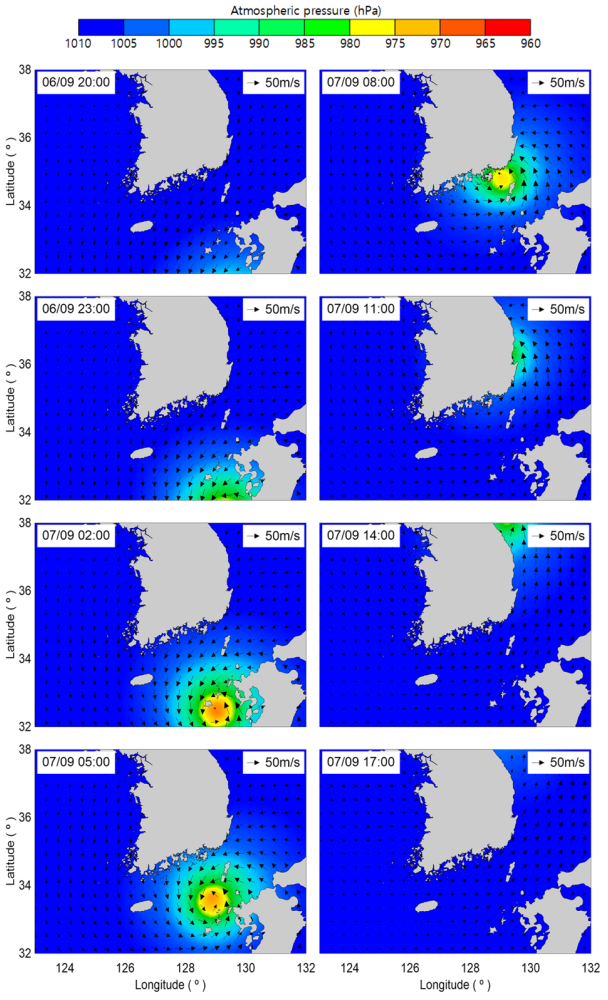


Fig. 4. Wind and pressure fields of Typhoon Haishen around the Korean Peninsula from JMA-MSM data

해를 북상하여 남해를 통해 한반도에 접근하였고, 하이선은 일본 규슈 서해안을 따라 북상하면서 한반도 남해로 진입하였다. 이로 인해 마이삭은 북상 과정에서 풍속이 비교적 유지된 반면, 하이선은 일본 열도를 스치며 이동하면서 풍속이 점차 약화되는 경향을 보였다. 두 태풍이 한반도에 상륙하기 직전 시점의 최대 풍속은 마이삭은 2020년 9월 3일 01:00에 129.5 °E, 34.5°N에서 38.68 m/s, 하이선은 9월 7일 08:00에 129.625 °E, 34.708°N에서 35.85 m/s로 각각 나타났다.

이러한 시간별 JMA-MSM 기상장(2020년 9월 1일-9월 9일, 1시간 간격)은 ADCIRC-SWAN 연성모델의 입력 자료로 적용되어 태풍 내습 기간의 바람장과 기압장을 구현하는 데 사용되었다.

3. 해일-파랑 연성모델의 검증

본 연구에서 사용한 ADCIRC-SWAN 연성모델의 폭풍해일-파랑 비선형 상호작용 해석의 타당성과 신뢰성을 검증하였다. 이를 위해 2020년 한반도를 연속적으로 내습한 태풍 마이삭과 하이선을 대상으로 검조소 및 파랑관측소의 실측자료와 WINK의 예측자료와 수치모의 결과를 비교 · 분석하였다.

3.1 폭풍해일 검증

3.1.1 검조소의 정보

JMA-MSM 기상장을 적용한 ADCIRC-SWAN 모델의 폭풍해일 모의 결과를 검증하기 위해, 태풍 마이삭과 하이선의 이동 경로 인근에 위치한 6개 검조소의 조위 관측자료를 활용하였다(Fig. 5). 검증 기간은 두 태풍이 한반도에 직접적인 영향을 미친 2020년 9월 1일부터 8일까지로 설정하였다.

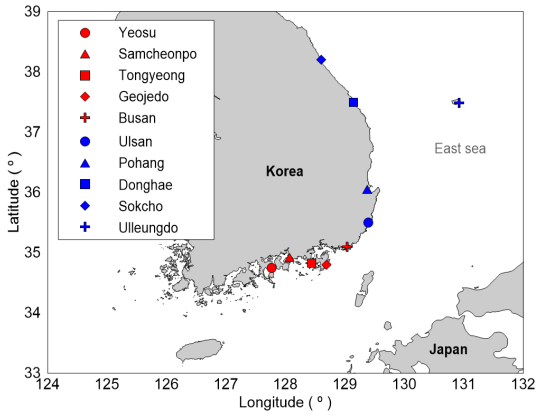


Fig. 5. Locations of tide gauge stations used for model verification along the coast of Korea

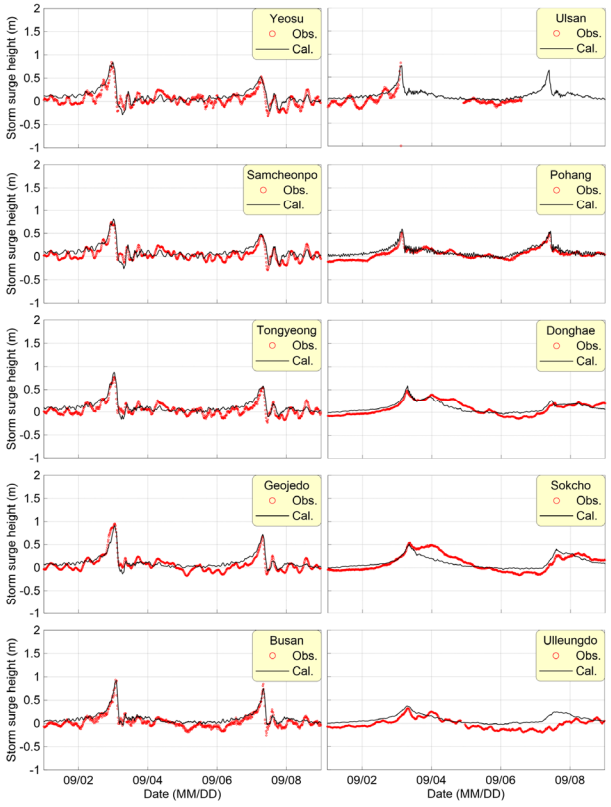


Fig. 6. Comparison of observed and simulated storm surge heights at tide gauge stations

3.1.2 폭풍해일 파형 비교

Fig. 6은 태풍 마이삭과 하이선 내습 시 검조소에서 관측된 폭풍해일 파형과 ADCIRC-SWAN 모델의 계산 결과를 비교한 것이다. 관측자료는 8대 주요 분조(M_2, N_2, S_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1)를 고려한 조화분해를 통해 천문조를 제거하여 폭풍해일 파형을 추출하였다.

Table 2. Quantitative accuracy metrics for maximum storm surge heights

Metric	Typhoons	
	Maysak (2009)	Haishen (2010)
Bias (m)	0.027	0.023
RMSE (m)	0.070	0.066
NRMSE	0.103	0.145
CC	0.942	0.966
R^2	0.887	0.934
IOA	0.962	0.961

연성해석 결과는 각 검조소별로 폭풍해일의 발생-발달-소멸 과정의 시간적 변화를 잘 재현하였으며, 전반적으로 태풍의 상륙 시점과 해수위 상승·하강 경향이 관측자료와 유사한 양상을 보였다. 다만, 울산 검조소는 태풍 내습 기간 중 관측 결측이 존재하였다. 동해와 속초 검조소에서는 두 태풍 모두에서 폭풍해일 파형의 폭이 관측보다 좁게 산정되었다. 울릉도 검조소에서는 태풍 하이선에 의한 폭풍해일이 과소평가 될 뿐 아니라, 위상 차도 발생하였다.

최대 폭풍해일고의 정량적 정확도는 Table 2에 제시하였다. 태풍 마이삭의 경우 평균편차(Bias)는 0.027 m, 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)는 0.070 m, 정규화 평균제곱근오차(Normalized Root Mean Square Error, NRMSE)는 0.103으로 산정되어, 계산값이 관측값을 소폭 과대추정하는 경향을 보이지만, 오차의 절대적 및 상대적 규모는 모두 크지 않은 수준으로 나타났다. 태풍 하이선(2010)에서도 Bias는 0.023 m, RMSE는 0.066 m, NRMSE는 0.145로 유사한 오차 특성이 확인되었다. 상관계수(Correlation Coefficient, CC)는 각각 0.942와 0.966으로 관측값과의 변화 경향을 잘 반영하였으며, 결정계수(Coefficient of Determination, R^2)는 0.887과 0.934로 관측 변동성의 대부분을 설명하였다. 일치도지수(Index of Agreement, IOA)는 0.962과 0.961로 산정되어 모의값이 관측값의 시간적 변화 패턴을 안정적으로 재현하고 있음을 보여준다.

이러한 결과는 ADCIRC-SWAN 연성모델이 서로 다른 태풍 조건에서도 최대 폭풍해일고를 정량적으로 신뢰성 있게 모의하고 있음을 시사한다.

3.2 후측 파랑 자료와의 비교

3.2.1 전국 파랑 관측자료 제공 시스템

해양수산부는 2019년 3월 2일부터 WINK를 공식적으로 운영하고 있다. 이 시스템은 기상청(24개소), 국립해양조사원(6개소), 해양수산부(31개소) 등 총 61개소에서 관측된 파

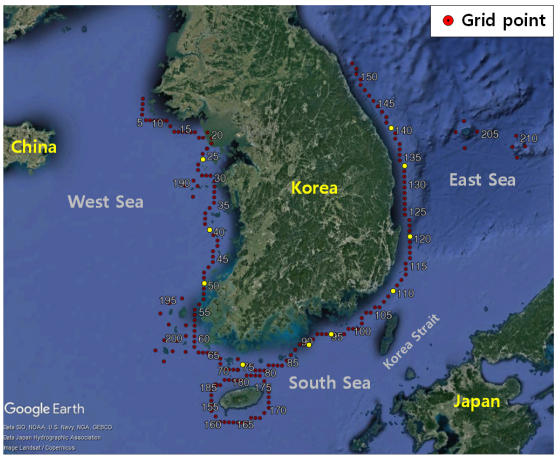


Fig. 7. Coastal grid points around the Korean Peninsula

랑자료를 통합 관리하며, 품질관리 절차를 거쳐 신뢰도 높은 파랑자료를 제공한다. 또한, 외해 관측지점에서는 실시간 관측이 어려운 해역을 보완하기 위해 수치모델링을 기반으로 계산된 후측 파랑 자료도 함께 제공한다. WINK의 후측 파랑 산정은 JMA-MSM 바람장을 입력조건으로 사용하고, SWAN 모델을 통해 20°-50°N, 117°-147°E 범위의 계산영역을 0.05° (약 5 km) 간격으로 등분한 격자망에서 수행된다. 이 계산 결과는 한반도 주변의 심해 및 연안 해역을 포함하는 고해상도 파랑자료로 구축된다.

본 연구에서는 ADCIRC-SWAN 모델의 폭풍파 재현성 검증을 위해 태풍 마이삭과 하이선이 한반도를 통과한 기간(2020년 9월 1일-9일) 동안 연안 격자점에서의 모의 결과를 WINK의 후측 파랑 자료와 비교·분석하였다(Fig. 7).

3.2.2 연안 격자점에서의 폭풍파 특성

Fig. 8은 태풍 마이삭과 하이선 내습 기간 동안, 본 연구의 ADCIRC-SWAN 연성해석과 WINK의 후측 파랑 자료에서 산정된 유의파고(H_s) 분포를 Fig. 7에 노란색으로 표기된 주요 연안 격자점에서 비교한 결과이다. 두 결과는 태풍의 접근 및 통과 시기에 따른 폭풍파의 생성, 발달, 소멸 과정을 유사한 시점에서 재현하고 있으며, 피크 시점과 감쇠 구간의 시간적 위상 또한 잘 일치한다.

Fig. 9는 각 격자점에서 산정된 최대 H_s를 일대일로 비교한 산포도로, 전체적으로 높은 상관성을 보이지만 WINK의 후측 파랑이 ADCIRC-SWAN 결과보다 체계적으로 크게 산정되는 경향이 확인된다. 태풍 마이삭과 하이선에 의한 최대 H_s는 ADCIRC-SWAN이 WINK보다 각각 10.29%, 13.92% 작게 추산되었다. 특히 태풍의 직접적인 영향을 상대적으로 적게 받는 서해안 격자점에서 차이가 가장 크게 나타났으며(12.19

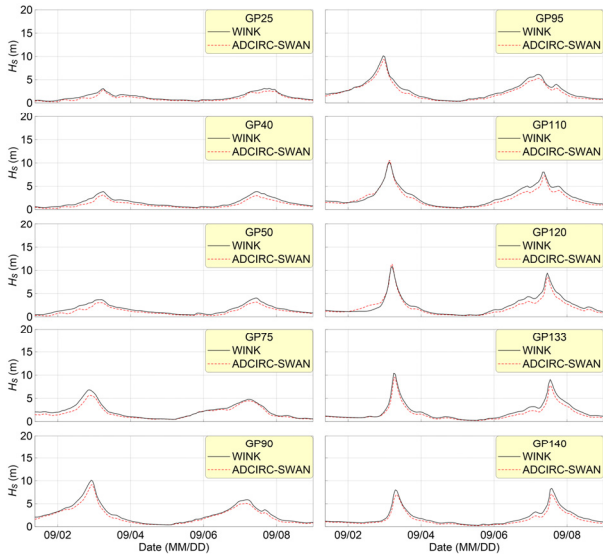


Fig. 8. Comparison of significant wave heights at coastal GPs between the ADCIRC-SWAN simulation and hindcast data

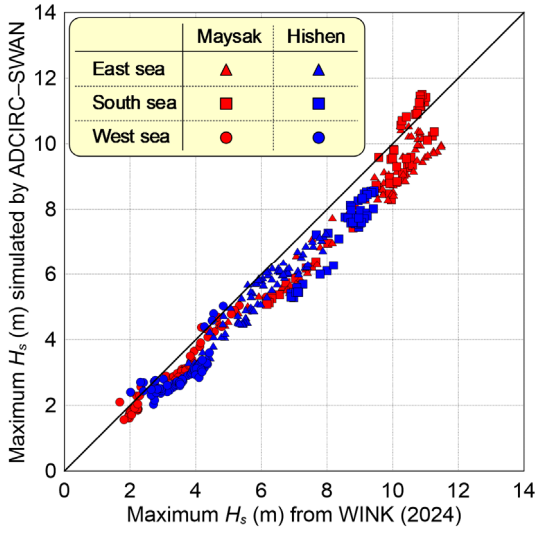


Fig. 9. Scatter plot comparing maximum significant wave heights obtained from ADCIRC-SWAN simulation and hindcast data at each coastal GPs

% 수준), 고파랑이 발생한 남해안과 동해안 격자점에서는 각각 8.56%, 7.50% 수준의 차이를 보였다.

이러한 결과는 ADCIRC-SWAN 연성해석이 폭풍파의 시간적 변동 특성과 공간적 분포를 물리적으로 합리적으로 재현하고 있음을 보여준다. 다만, WINK의 후측 파랑은 동일한 JMA-MSM 바람장을 입력으로 하더라도 SWAN 모델 기반의 후산출 자료로 구성되어 있기 때문에 내부 물리 매개변수(쇄파, 백파 소산, 저면마찰 등)의 설정 차이에 따라 상대적으로 높은 파고가 산정될 가능성이 있다.

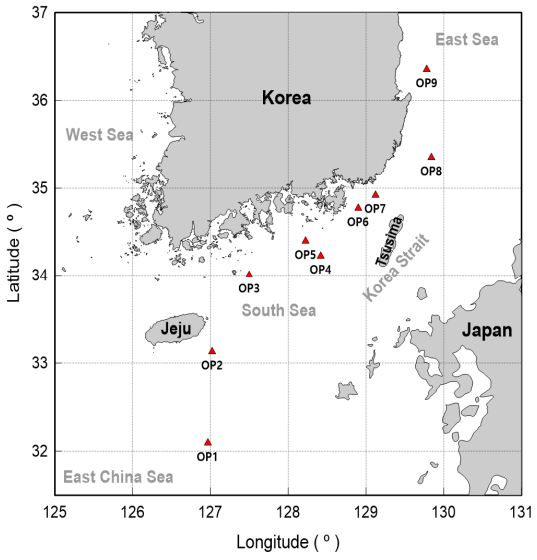


Fig. 10. Locations of wave observation stations used for storm wave verification

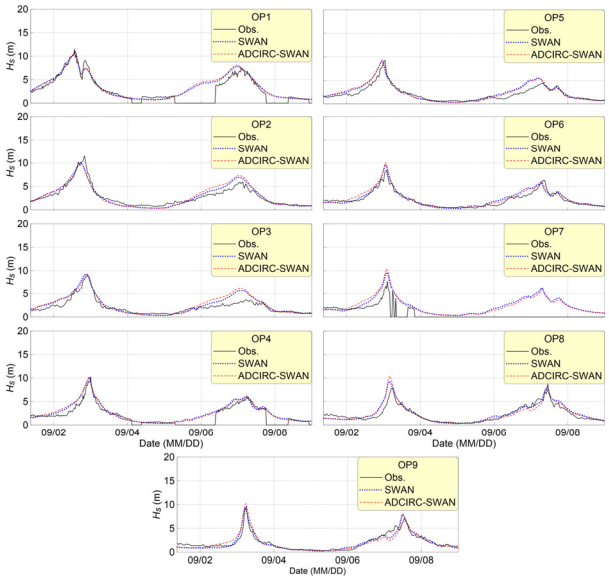


Fig. 11. Comparison of observed and simulated significant wave heights at OPs

3.3 관측 파랑과의 비교

3.3.1 파랑관측소의 정보

폭풍해일-파랑 상호작용 해석을 통해 추산된 폭풍파의 정확도와 신뢰성을 검증하기 위하여, 본 연구에서는 실제 관측된 파랑자료를 이용하였다. Fig. 10은 태풍 마이삭과 하이선의 이동경로 인근에 위치한 9개의 파랑관측소(OP1-OP9)의 위치를 나타낸 것이다. 여기서 GP1, GP4, GP7은 국립해양조사원에서, 나머지는 기상청에서 운영 중이다. 이들 파랑관측소에서는 주로 주요 연안 및 외해 지역의 파랑 특성을 상시 관측하고 있다.

관측 기간 중 일부 지점에서는 결측이 발생하였으며, 특히 OP1, OP4, OP7 관측소에서 관측 공백이 확인되었다. 그중 OP7은 태풍 하이선 내습 기간 동안 전 구간에서 결측 상태를 보여, 해당 자료는 비교 분석에서 제외하였다.

3.3.2 관측 파랑과의 비교

9개 파랑 관측지점(OP1-OP9)에서 태풍 마이삭과 하이선이 한반도를 통과한 2020년 9월 1-9일 동안 관측된 H_s의 시간변화를 Fig. 11에 나타내었다. 또한, 비교를 위해 Seo *et al.* (2023)이 동일한 JMA-MSM 바람장을 적용하여 SWAN 모델(본 연구와 동일한 매개변수 설정)을 이용하여 산정한 폭풍파 결과를 함께 제시하였다.

Fig. 11로부터 태풍 마이삭과 하이선은 각각 9월 2-4일, 9월 7-8일에 한반도 주변 해역에서 폭풍파의 생성-발달-소멸 과정에 주요한 영향을 미친 것을 확인할 수 있다. 대부분의 관측지점에서 태풍 마이삭 시기의 최대 H_s가 하이선보다 크게 나타났으며, 이는 OP8을 제외한 대부분의 관측소에서 일관된 경향을 보였다. ADCIRC-SWAN 연성해석은 관측 파고의 시간적 변동 및 피크 시점을 전반적으로 잘 재현하였으며, 일부 지점(OP2)에서 첫 번째 피크를 제외하면 관측보다 다소 높은 H_s가 산정되는 경향을 나타냈다.

평균적으로 살펴보면, ADCIRC-SWAN 모델에서 추산된 각 태풍에 관한 피크 폭풍파고(H_{peak})는 관측값 대비 태풍 마이삭과 하이선에서 각각 -1.53-2.65 m, -0.55-2.55 m 범위의 ΔH_{peak}를 보이며, 유사한 수준이다. 그러나 오차율은 태풍 하이선의 경우가 16.16%로 마이삭(8.88%)보다 더 과대 평가된 것을 Table 3으로부터 확인할 수 있다. 특히, 태풍 마이삭은 동해안의 울산과 포항 해역의 OP7과 OP8에서 각각 2.65 m와 2.54 m를 과대 추산하여 국지적 오차율이 34.23%와 32.15%로 나타났다. 태풍 하이선은 거문도 해역의 OP3에서 2.55 m 차이를 보여 68.92%의 오차율을 나타냄으로서 현저한 과대 추산이 확인되었다. 이러한 폭풍파의 과대 추산은 Son and Do (2021)의 분석과 같이 JMA-MSM 바람장 과대 추산되었기 때문으로 판단된다.

유의파고의 시간적 변동성에 대한 모델 재현성은 결측 자료가 포함된 시점을 제외한 시계열 자료를 바탕으로 Table 3과 같이 정량지표를 산정하여 평가하였다. Bias, RMSE, NRMSE는 전반적으로 작은 값을 보여 시계열 전반에서 과도한 오차가 발생하지 않았음을 확인하였다. 일부 지점(OP3, OP7, OP8)에서는 Bias가 양의 값을 나타내 유의파고가 다소 과대추정되는 경향이 확인되었으나, 이는 H_{peak} 분석에서 확인된 바람장 과대추정의 영향과 동일한 원인(Son and Do, 2021)에 기인한

Table 3. Peak storm wave heights and time-series statistical metrics at OPs during Typhoons Maysak and Haishen

OP	Peak storm wave height, H_{peak} (m)								Time-series statistical metrics					
	Maysak (2009)				Haishen (2010)				Bias (m)	RMSE (m)	NRMSE	CC	R^2	IOA
	Obs.	Cal.	ΔH_{peak}	Error (%)	Obs.	Cal.	ΔH_{peak}	Error (%)						
1	11.5	11.06	-0.44	-3.83	7.55	8.09	0.54	7.15	0.441	0.687	0.073	0.971	0.944	0.973
2	11.5	9.97	-1.53	-13.3	6	7.29	1.29	21.5	0.16	0.797	0.074	0.947	0.897	0.968
3	9	9.29	0.29	3.22	3.7	6.25	2.55	68.92	0.478	1.009	0.12	0.915	0.838	0.925
4	10.29	10.33	0.04	0.39	6.06	6.1	0.04	0.66	0.264	0.669	0.067	0.966	0.933	0.974
5	9.3	9.42	0.12	1.29	4.3	5.39	1.09	25.35	0.276	0.709	0.08	0.947	0.896	0.957
6	8.4	10.01	1.61	19.17	6.3	6.18	-0.12	-1.90	0.211	0.573	0.072	0.963	0.927	0.972
7	7.74	10.39	2.65	34.23	-	6.11	-	-	0.986	1.605	0.322	0.928	0.862	0.819
8	7.9	10.44	2.54	32.15	8.7	8.15	-0.55	-6.32	0.059	0.794	0.096	0.925	0.854	0.958
9	9.6	10.23	0.63	6.56	7.1	8.09	0.99	13.94	-0.014	0.588	0.07	0.935	0.932	0.964
Mean	9.47	10.13	0.66	8.88	6.21	6.85	0.73	16.16	-	-	-	-	-	-

결과로 해석될 수 있다. CC는 0.915-0.971 범위로 나타나 유의파고의 상승 및 하강에 따른 시간적 변동성이 안정적으로 재현되었음을 보여주며, R^2 또한 이에 상응하는 높은 값으로 관측 변동성의 대부분을 설명하였다. IOA 역시 OP7을 제외하고 0.9 이상의 높은 값을 유지하여, 파고뿐 아니라 시간적 변화 패턴까지 일관되게 모의하고 있음을 확인하였다.

종합적으로, ADCIRC-SWAN 모델은 H_{peak}뿐만 아니라 파랑의 시간적 생성-발달-소멸 과정까지 정성적·정량적으로 합리적으로 재현하였다. 또한, Seo *et al.* (2023)의 SWAN 해석에 비해 파고가 더 높게 나타난 것은 폭풍해일로 인한 수위 상승이 파랑의 유효 수심을 증가시켜 파랑 발달을 강화하는 연성 효과에 기인한다. 이러한 결과는 ADCIRC-SWAN 모델이 폭풍해일-폭풍파 상호작용을 물리적으로 적절히 반영하며, 연성 수치모델로서의 타당성과 활용 가능성이 충분함을 보여준다.

4. 해일-파랑 연성해석의 결과

4.1 최대 폭풍해일고 특성

Fig. 12는 태풍 마이삭과 하이선이 한반도를 통과하는 동안, JMA-MSM 기압장과 바람장을 외력으로 적용하여 계산된 최대 폭풍해일고의 공간분포를 나타낸 것이다.

태풍의 이동 경로를 따라 폭풍해일이 발달하면서, 경로 인근 해역에서 높은 해수위 상승이 집중되는 양상이 뚜렷하게 나타난다. 태풍 마이삭의 경우, 2020년 9월 2일 14시부터 3일 14시까지 남해안을 중심으로 폭풍해일이 급격히 발달하였다. 특히 여수-통영-마산-거제도-부산에 이르는 남해 동부 연안에서는 0.73-1.10 m 수준의 최대 폭풍해일고가 추산되었으

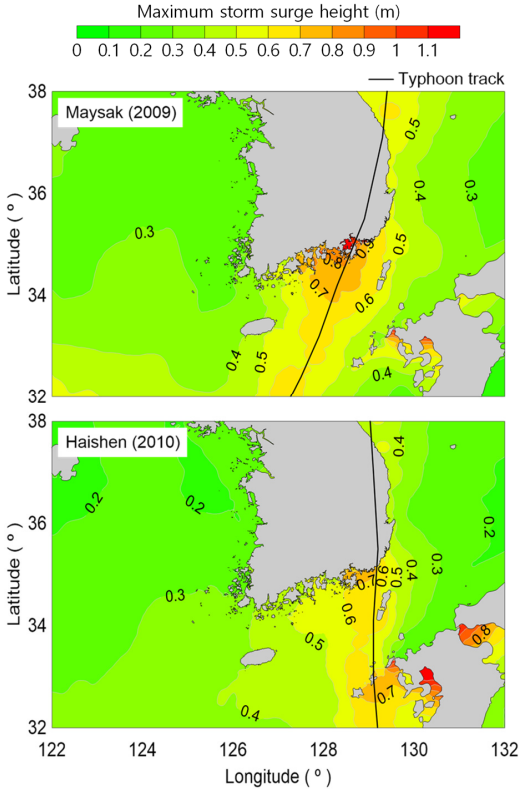


Fig. 12. Spatial distribution of the maximum storm surge height simulated by the ADCIRC-SWAN model

며, 이 중 마산 연안에서 1.10 m로 가장 높게, 거제도 인근에서 0.73 m로 가장 낮게 계산되었다. 태풍이 거제도를 관통한 이후 부산을 통해 상륙하면서 내륙을 통과하는 동안에는 경주-포항-영덕으로 이어지는 동해 남부 연안에서 상대적으로 낮은 해일고가 관측되었으나, 태풍 중심이 동해로 진입한 이후

삼척 인근에서는 다시 해수위가 상승하는 경향을 보였다.

태풍 하이선은 마이삭보다 다소 동쪽으로 편향된 경로를 따라 북상하여 2020년 9월 7일 오전 울산에 상륙하였다. 이로 인해 거제-마산-부산으로 이어지는 남해 동부 연안에서는 0.68-0.75 m, 울산-경주-포항에 이르는 동해 남부 연안에서는 0.32-0.65 m의 최대 폭풍해일고가 계산되었다. 특히, 부산 연안에서 0.75 m, 포항 연안에서 0.32 m로 각각 가장 높고 낮은 해일고가 추산되었다. 이후 태풍 하이선은 강릉을 지나 동해로 빠져나가면서 묵호-속초 연안에서도 0.40-0.53 m 수준의 폭풍해일이 발생하였다.

이상의 결과로부터, 태풍 마이삭은 남해안을 중심으로 더 강한 폭풍해일을 유발하였으며, 하이선은 보다 동쪽으로 편향된 경로로 인해 동해 남부 및 중부 연안에서 상대적으로 국지적인 해수위 상승이 발생한 것으로 분석된다.

4.2 최대 폭풍파고

Fig. 13은 태풍 마이삭과 하이선이 한반도 주변 해역에 영향을 미치는 동안 계산된 각 태풍의 피크 유의파고(최대 H_s) 공간분포를 나타낸 것이다.

태풍 마이삭은 2020년 9월 2일 14시경 제주도 남부 해상에 접근하면서(Fig. 3), 제주 남쪽과 남해 전역에서 폭풍파가 형성되기 시작하였다. 약 17시경에는 남해안 전역에서 높은 파고가 출현하였고, 이후 태풍이 북상함에 따라 동해 남부 연안의 파고가 점차 증가하였다. 특히 9월 2일 23시부터 9월 3일 02시 사이 태풍이 대한해협을 통과할 때, 여수-통영-마산-거제도-부산-울산 연안에서 8.46-11.14 m 수준의 폭풍파가 발생하였다. 이 중 울산과 여수 연안에서 가장 높고, 낮은 파고가 나타났다. 이후 태풍 중심이 내륙으로 진입함에 따라 경주-포항 해역에서는 9.80-11.49 m, 삼척 연안에서는 최대 9.54 m의 유의파고가 계산되었다. 이러한 결과는 태풍의 강풍역이 대한해협을 통과하며 남해와 동해 남부 해역에 직접적인 바람 응력을 가한 데 기인하며, 태풍이 삼척 부근으로 진입한 이후 동해 북부 해역에서 폭풍파가 추가로 발달한 결과로 해석된다.

태풍 하이선은 2020년 9월 6일 20시경 제주도 남동쪽 해상에서 북상하기 시작하여, 9월 7일 02시 일본 규슈 서쪽 해역을 통과하면서 일시적으로 풍속이 약화되었다. 이후 대한해협을 통해 북상하면서 연안역에서 폭풍파가 발달하였다. 태풍 하이선이 9월 7일 11시경 울산에 상륙하면서 거제-부산을 포함한 남해 동부 연안에서는 6.17-8.04 m, 울산-감포-포항으로 이어지는 동해 남부 연안에서는 8.55-9.43 m의 최대 유의파고가 산정되었다. 이 중 울산과 거제 연안에서 가장 높고, 낮은 파고가 나타났다. 이후 태풍이 강릉을 거쳐 동해로 진입함에 따라, 삼척-동해-강릉-속초로 이어지는 북부 연안에서도 5.29-8.36 m 수준의 높은 폭풍파가 형성되었다.

전반적으로 태풍 하이선의 최대 파고는 마이삭보다 낮게 계산되었으며, 이는 태풍의 북상 경로가 일본 열도에 보다 근접하여 한반도 연안에서의 직접적인 바람 응력이 상대적으로 약화되었기 때문이다. 요약하면, 태풍 마이삭은 남해와 대한해협을 중심으로 광범위한 고파랑 영역을 형성한 반면, 태풍 하이선은 동남해안을 중심으로 국지적 폭풍파 발생이 두드러졌으며, 이러한 차이는 두 태풍의 이동 경로와 바람장 분포의 차이에 기인한다.

4.3 연안격자점에서의 폭풍파 특성

Fig. 13에서 제시된 최대 유의파고 분포에서 볼 수 있듯이 태풍의 북상 경로와 직접적인 영향 범위에 따라 지역별 폭풍파고 분포가 뚜렷하게 구분되었다. 이에 연안 격자점(Fig. 7)에서 계산된 지역별 폭풍파고를 50년 재현빈도 심해 설계파고(MOF, 2019)와 비교하였다. 지역은 서해 북부·남부와 태안·신안 도서 지역, 남해 서부·중부·동부, 동해 남부·북부, 울릉도 및 독도, 제주 해역으로 구분하였으며, 각 지역별 평균 및 최대 폭풍파고와 설계파고의 비교 결과를 Tables 4 and 5에 나타내었다.

태풍 마이삭의 경우, 전체 연안격자점의 평균 폭풍파고는

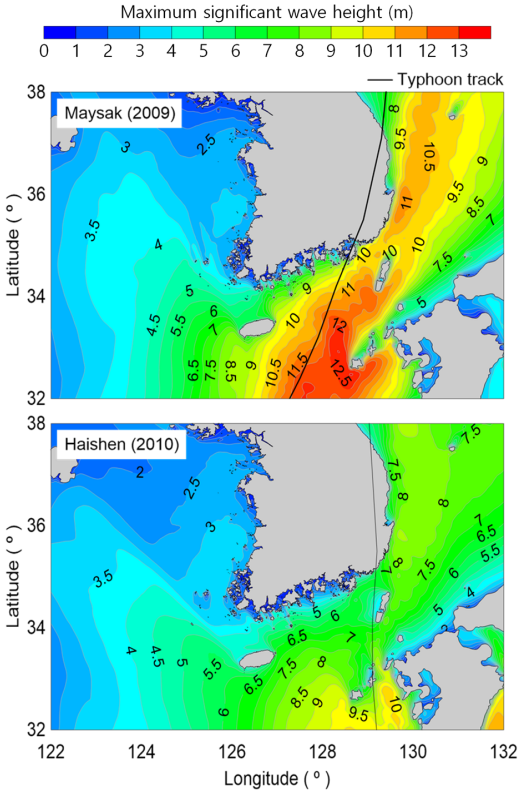


Fig. 13. Spatial distribution of the maximum storm wave height simulated by the ADCIRC-SWAN model

Table 4. Regional comparison of mean storm wave heights with deepwater design wave heights

Region		Mean storm wave height (m)					
		Design wave		Maysak		Haishen	
		GP	Height	Cal.	Ratio (%)	Cal.	Ratio (%)
West Sea	North	1-29	7.3	2.19	30.00	2.53	34.66
	South	31-61	8.74	3.27	37.41	3.09	35.35
	Taean Islands	187-189	8.7	2.81	32.30	2.68	30.80
	Shinan Islands	191-201	10.59	4.44	41.93	3.67	34.66
South Sea	West	63-73	9.77	4.93	50.46	3.76	38.49
	Central	75-89	11.97	8.18	68.34	5.48	45.78
	East	91-108	12.44	9.91	79.66	5.78	46.46
East Sea	South	110-126	9.53	10.78	113.12	8.19	85.94
	North	128-151	9.36	7.19	76.82	6.66	71.15
	Ulleungdo & Dokdo	203-209	10.38	9.53	91.81	7.7	74.18
Jeju Island		153-186	11.74	8.06	68.65	5.81	49.49

Table 5. Regional comparison of maximum storm wave heights with deepwater design wave heights

Region		Maximum storm wave height (m)							
		Design wave		Maysak		Design wave		Haishen	
		GP	Height	Cal.	Ratio (%)	GP	Height	Cal.	Ratio (%)
West Sea	North	30	8.6	3.1	36.05	23	7.2	2.79	38.75
	South	62	11.7	4.39	37.52	56	9.9	3.36	33.94
	Taean Islands	188	8.8	2.88	32.73	188	8.8	2.78	31.59
	Shinan Islands	197	11.9	5.29	44.45	197	11.9	5.03	42.27
South Sea	West	73	8.8	5.61	63.75	74	9.5	4.25	44.74
	Central	90	13.1	9.16	69.92	84	12.8	6.2	48.44
	East	108	10.5	10.57	100.67	109	10	6.74	67.40
East Sea	South	118	9.3	11.49	123.55	120	9.6	8.57	89.27
	North	132	9.5	9.59	100.95	137	9.6	7.97	83.02
	Ulleungdo & Dokdo	204	10.2	10.36	101.57	204	10.2	8.02	78.63
Jeju Island		169	14.4	9.97	69.24	170	14.5	7.26	50.07

설계파고의 62.77% 수준으로 산정되었다. 태풍의 직접적인 영향권에서 벗어난 서해 북부와 남부, 그리고 태안 및 신안 도서지역에서는 각각 평균 30.00%, 37.41%, 32.30%, 41.93%로 비교적 낮은 비율을 보였다. 반면, 남해안에서는 동쪽으로 갈수록 증가하는 경향을 보이며, 서부는 50.46%, 중부는 68.34%, 동부는 79.66% 수준으로 나타났다. 특히, 남해 동부의 GP108(부산 해역)은 설계파고 10.5 m에 대해 폭풍파고 10.57 m로 산정되어, 설계파고를 상회하는 것으로 추산되었다. 폭풍파 피해가 집중되었던 동해 남부는 평균 113.12%로 설계파고를 초과하였으며, GP118(경주 해역)에서 최대 폭풍파고 11.49 m가 산정되어 가장 높은 값을 보였다. 동해 북부의 평균은 76.82%로 비교적 낮았으나, GP132(울진 해역)은 100.95%로 설계파고와 거의 동일한 수준을 보였다. 또한, 울릉도 및 독도 해역은 평균 91.81%이고, 최대 폭풍파고 10.36 m로 설계파고보다 높았다. 한편, 제주 해역은 태풍의 경로에서 다소 떨어져 있었음에도 평균 68.65%이고, 모든 격자점에서 비슷한 수준이었다.

태풍 하이선은 마이삭보다 세력이 약해 전반적으로 낮은 폭풍파고가 산정되었다. 전체 평균은 설계파고의 49.73% 수준으로 평가되며, 서해 북부와 남부, 태안 및 신안 도서지역에서는 각각 34.66%, 35.35%, 30.80%, 34.66%로 마이삭과 큰 차이가 없었다. 남해에서도 서부 38.49%, 중부 45.78%, 동부 46.46%로 나타나 마이삭에 비해 전반적으로 낮은 값을 보였다. 그러나 폭풍파 피해가 집중된 동해 남부에서는 평균 85.94

%로 비교적 높은 파고가 나타났으며, GP120(포항 해역)에서 최대 폭풍파고 8.57 m로 설계파고에 89.27%에 달하였다. 동해 북부의 평균은 71.15%, 설계파고 대비 가장 높은 비율 83.02%을 나타낸 GP137(삼척 해역)에서는 7.97 m의 폭풍파고를 나타났다. 또한, 태풍 피해가 심했던 울릉도 및 독도 해역은 평균 74.18%, 최대 78.63%의 설계파고 대비 폭풍파가 추산되었다. 태풍 경로에 크게 벗어난 제주도 주변 해역은 평균 49.49% 수준의 폭풍파가 발생하였고, 전 해역이 유사한 수준이었다.

본 연구의 폭풍해일-파랑 모의에서 태풍 마이삭 내습 시기에 남해 동부와 동해 남부·북부, 울릉도 및 독도 해역의 연안 격자점에서 50년 재현빈도 심해 설계파고를 초과하는 폭풍파가 추산되었다. 실제로 연안 격자점에서 설계파고를 초과하는 폭풍파가 발생하였는지를 단정하기는 어렵지만, 수치모델 검증 결과에서 ADCIRC-SWAN 해석이 다소 과대평가 경향을 보이는 점을 고려하더라도 해당 해역에서 상당히 높은 폭풍파가 발생하였음은 분명하다. 또한, 설계파와 유사하거나 이를 초과한 파고가 산정된 연안격자점 인근 지역에서는 실제로 월파와 침수 피해가 집중적으로 발생하였다.

5. 토 의

본 연구에서는 JMA-MSM 기상장을 외력으로 적용한 ADCIRC-SWAN 연성모델을 이용하여 태풍 마이삭과 하이선 내습 시의 폭풍해일-폭풍파 상호작용을 모의하였다. 검조소의 폭풍해일, 파랑관측소 유의파고, 그리고 WINK의 후측 파랑 자료(MOF, 2025)와의 비교 결과, 전반적으로 관측된 시간적 변동 경향을 합리적으로 재현하였다. 다만, SWAN 단독 파랑추산 결과와의 비교에 있어서는 해석적 한계가 존재하며, 이러한 한계의 원인과 연성해석이 갖는 물리적 의미를 중심으로 논의하고자 한다.

본 연구의 폭풍파 산정 결과만으로 SWAN 모델과 ADCIRC-SWAN 연성모델의 정량적 성능 평가를 비교하는 것은 어렵다. 동일한 JMA-MSM 바람장을 적용한 SWAN 기반 기존 수치해석 결과와 비교하면, ADCIRC-SWAN의 파고는 WINK보다는 작고, Seo *et al*. (2023)보다는 크게 나타난다. 이는 각 수치 계산에서 사용된 격자 체계, 수심 자료, 입력 파라미터(백파, 쇄파, 저면마찰 등), 경계조건 등의 차이에 기인한 결과로 판단된다. 특히, SWAN 모델은 입력 파라미터 설정에 따라 파고 산정 결과가 크게 달라질 수 있으므로, 이러한 조건 차이를 고려하지 않은 상태에서 단일모델과 연성모델을 정량적으로 비교하는 것은 합리적이지 않다. 따라서 본 연구의 목적은 연성모델이 SWAN 모델보다 우수함을 입증하는 데 있지 않으며, 폭풍해일-폭풍파 상호작용에 따른 물리적 변화를 타당하고 합리적으로 재현하는 데 있다.

ADCIRC-SWAN 연성해석의 가장 큰 장점은 폭풍해일로 인한 수위 상승이 파랑의 유효 수심을 증가시켜 파랑 발달을 강화하는 물리적 상호작용을 모의할 수 있다는 점이다. 이러한 과정은 SWAN 모델로는 재현이 어려운 해석 요소로, 특히 수심 변화와 지형 효과가 복합적으로 작용하는 연안역에서 연성해석의 필요성이 더욱 커진다.

한편, 태풍의 강한 풍역은 해양 혼합층 내 난류 혼합과 심층수 용승을 유발하여 표층 수온을 급격히 하강시키는 것으로 알려져 있다(Price, 1981). 이러한 해수면 냉각(cold wake)은 후속 태풍이 해수로부터 공급받을 수 있는 열에너지를 감소시켜 태풍의 잠재 강도를 약화시키는 음의 피드백 메커니즘으로 작용한다(Schade and Emanuel, 1999). 연이어 한반도에 영향을 미친 태풍 마이삭과 하이선의 경우에도 동해에서 마이삭 통과 이후 강한 상층 혼합과 수온 하강이 발생하였으며, 하이선 내습 시 추가적인 혼합과 냉각이 관측되었다(Byun, 2024). 이러한 해양 열 환경의 변화는 본 연구에서 하이선의 폭풍해일고 및 폭풍파고가 마이삭에 비해 상대적으로 작게 산정된 경향과 부합한다. 이는 JMA-MSM 기상장이 당시의 해양 열적 상태를 적절히 반영하고 있음을 시사하며, 폭풍해일뿐 아니라 폭풍파 산정에서 BT 기반 파라메트릭 모델보다 정밀한 기상장을 사용하는 것이 타당한 접근법임을 의미한다.

Son and Do (2021)가 지적한 바와 같이, JMA-MSM 바람장의 일부 과대 평가가 설계파 이상으로 파고가 추산된 원인 중 하나로 작용했을 가능성이 있다. 그럼에도 불구하고 JMA-MSM 기상장은 BT 기반 파라메트릭 모델(Kim *et al*., 2025; Hwang *et al*., 2025)보다 태풍의 물리적 특성과 시간적 변동을 보다 현실적으로 반영하므로, ADCIRC-SWAN 연성모델과 같은 폭풍해일-파랑 상호작용 해석이 연안 재해 평가에 있어 매우 유효한 수치적 접근법이라고 판단된다.

향후에는 해일-파랑 상호작용 해석의 정밀도를 향상시키기 위해 수치모델의 물리모듈을 지속적으로 개선하고, 파랑의 백파소산, 쇄파, 저면마찰 등 주요 물리 과정에 대한 최적의 파라미터 및 계수 설정이 필요하다. 이를 위해 관측자료를 기반으로 한 경험적 보정과 사례 기반의 최적화가 병행되어야 하며, 폭풍해일 및 폭풍파의 재현 정확도를 높이기 위한 연성 수치모델의 개량과 상호 보정 역시 중요한 과제로 남아 있다. 궁극적으로는 이러한 개선된 연성모델을 통해 폭풍해일-파랑 상호작용뿐만 아니라, 강우, 하천 유출, 해수면 상승과 같은 다양한 해양·기상 요인을 함께 고려하는 통합 해양재해 예측체계로의 확장이 가능할 것으로 판단된다. 최근에는 연안역을 대상으로 폭풍해일과 침수 위험 정보를 활용한 복합 재해 위험도 평가 및 관리체계

구축 연구가 수행되고 있어(Kim and Kim, 2025), 본 연구와 같이 물리적 타당성이 검증된 폭풍해일-폭풍파 연성해석 결과는 향후 이러한 응용 연구의 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 이를 통해 연안 방재 대책 수립과 해안구조물 설계 기준의 고도화에 기여할 수 있을 것이다.

6. 결 론

본 연구에서는 JMA-MSM 기상장을 외력으로 적용한 ADCIRC-SWAN 연성모델을 이용하여, 2020년 한반도에 연이어 상륙한 제9호와 제10호 태풍인 마이삭과 하이선 내습 시 발생한 폭풍해일과 폭풍파의 상호작용을 모의하였다. 검조소 조위, 파랑관측소 실측자료, 그리고 WINK의 후측 파랑 자료(MOF, 2025)를 이용하여 모델의 타당성과 예측 신뢰성을 검증하였으며, 해일과 파랑의 복합 작용이 연안역에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

ADCIRC-SWAN 연성모델은 태풍 내습 시 관측된 수위 및 파랑 자료, WINK 자료와 비교하여 폭풍해일과 유의파고의 시간적 변동과 피크 값을 전반적으로 잘 재현하였다. 이는 JMA-MSM 기상장이 태풍의 공간적 구조와 이동에 따른 기상장 변화를 효과적으로 반영함으로써, 태풍 통과 전·후의 기상장 전이 과정과 해수위 변동, 파랑의 생성과 소멸을 동시적으로 재현하였기 때문이다. 이러한 결과는 ADCIRC-SWAN 연성모델이 해일-파랑 간 상호작용을 물리적으로 합리적으로 모의할 수 있음을 입증한다.

태풍 마이삭은 남해 중부와 동부에서, 하이선은 동해 남부 연안에서 각각 뚜렷한 폭풍해일을 유발하였으며, 이는 태풍의 이동 경로 및 강풍역의 위치와 밀접한 관련이 있었다. 특히 마이삭은 마산 연안에서 최대 1.10 m의 해일고를, 하이선은 부산 연안에서 약 0.75 m의 해일고를 보였다.

태풍 마이삭은 대한해협과 남해 동부, 동해 남부 전역에 걸쳐 광범위한 고파랑대를 형성하였으며, 반면 하이선은 일본 규슈 연안을 따라 북상하면서 강풍역이 약화되었지만 남해 동부와 동해 남부를 중심으로 높은 폭풍파가 추산되었다. 두 태풍 모두 동해 북부의 삼척 및 강릉 인근에서도 국지적 고파랑이 관찰되었으며, 이는 태풍 경로의 미세한 차이가 연안 파고 분포에 직접적인 영향을 미친다는 점을 보여준다.

태풍 마이삭 내습 시기에는 남해 동부, 동해 남부·북부, 울릉도 및 독도 해역의 연안 격자점에서 50년 재현빈도 심해설계파를 초과하는 폭풍파가 산정되었고, 하이선의 경우는 설계파고를 초과하지는 않았으나 동해 연안과 울릉도·독도 해역에서 약 80% 수준의 폭풍파가 발생하였다. 이들 지역은 실제 월파 및 침수 피해가 집중된 곳으로, 해일-파랑의 복합 작용이 연안 재해의 주요 요인으로 작용하였음을 보여준다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2022-00144263, RS-2024-00356327).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Byun, S.S. (2024). “Ocean response caused by two typhoons (Maysak, Haishen) in 2020.” *Journal of the Korea Society for Naval Science and Technology*, Vol. 7, No. 2, pp. 167-174. doi: 10.31818/JKNST.2024.6.7.2.167.

Chun, J.H., Ahn, M., and Yoon, J.T. (2009). “Development of the combined typhoon surge-tide-wave numerical model: 2. Verification of the combined model for the case of Typhoon Maemi.” *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 21, No. 1, pp. 79-90.

Dietrich, J.C., Zijlema, M., Westerink, J.J., Holthuijsen, L.H., Dawson, C., Luettich, R.A., Jensen, R.E., Smith, J.M., Stelling, G.S., and Stone, G.W. (2011). “Modeling hurricane wave and storm surge using integrally-coupled, scalable computations.” *Coastal Engineering*, Vol. 58, No. 1, pp. 45-65.

Garratt, J.R. (1977). “Review of drag coefficients over oceans and continents.” *Monthly Weather Review*, Vol. 105, No. 7, pp. 915-929.

Hwang, T., Kim, H.J., Min, B.I., Seo, M., and Lee, W.D. (2025). “Assessment of potential storm surge hazards at nuclear power plant sites on Korea’s eastern coast.” *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 39, No. 6, pp. 611-620. doi: 10.26748/KSOE.2025.039.

Hwang, T., Seo, S. C., Jin, H., Oh, H., and Lee, D. (2024). “Effects of storm waves caused by typhoon Bolaven (1215) on Korean coast: A comparative analysis with deepwater design waves.” *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 38, No. 4, pp. 149-163.

Jin, H., Hwang, T., Kim, H.J., Min, B.I., and Lee, W.D. (2024). “Storm surge simulations using hypothetical scenarios based on historical typhoons impacting the Korean Peninsula: analysis of storm surge and overtopping volumes.” *Journal of*

Korean Water Resources Association, Vol. 57, No. 12, pp. 1037-1051.

Kim, A.J., Lee, M.H., and Suh, S.W. (2021). "Effect of summer sea level rise on storm surge analysis." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 33, No. 6, pp. 298-307.

Kim, G.H., Ryu, K.H., and Yoon, S.B. (2020). "Numerical simulation of storm surge and wave due to Typhoon Bolaven of 2012." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 32, No. 4, pp. 273-283. doi: 10.9765/KSCOE.2020.32.4.273.

Kim, H.J., Hwang, T., Min, B.I., Seo, M., and Lee, W.D. (2025). "Assessment of potential storm surge hazards using the probabilistic synthetic typhoon ensemble: The western coast nuclear power plant site in Korea." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 39, No. 5, pp. 512-521. doi: 10.26748/KSOE.2025.035.

Kim, T.J., Kwon, H.H., and Kim, K.Y. (2014). "Assessment of typhoon trajectories and synoptic pattern based on probabilistic cluster analysis for the typhoons affecting the Korean Peninsula." *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 47, No. 4, pp. 385-396.

Kim, Y. (2025). "Damage mitigation strategies for flood-prone coastal areas under climate change and sea level rise." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 39, No. 6, pp. 646-657. doi: 10.26748/KSOE.2025.060.

Kim, Y., and Kim, J.H. (2025). "Development of an integrated environmental information management system for estuary-coastal areas: Focusing on risk assessment." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 39, No. 6, pp. 658-670. doi: 10.26748/KSOE.2025.064.

Kim, Y.J., Kim, T.W., Yoon, J.S., and Kim, I.H. (2019a). "Study on prediction of similar typhoons through neural network optimization." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 33, No. 5, pp. 427-434.

Kim, Y.J., Kim, T.W., Yoon, J.S., and Kim, M.K. (2019b). "Study of the construction of a coastal disaster prevention system using deep learning." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 33, No. 6, pp. 590-596.

Kwon, K.K., Jho, M.H., and Yoon, S.B. (2020). "Numerical simulation of storm surge and wave due to typhoon Kong-Rey of 2018." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 32, No. 4, pp. 252-261.

Luettich, R.A., Westerink, J.J., and Scheffner, N.W. (1992). *ADCIRC: An advanced three-dimensional circulation model for shelves coasts and estuaries report 1: Theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL*. Report No. CERC-TR-DRP-92-6, Coastal Engineering Research Center, US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, U.S., p. 137.

Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) (2019). *Report on estimation of deepwater design waves of Korea*.

Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) (2024). Long-term hindcast wave data. Wave Information Network of Korea (WINK). accessed 25 September 2025, <http://wink.go.kr/main.do>.

Murty, P.L.N., Rao, A.D., Srinivas, K., Rao, E.P.R., and Bhaskaran, P.K. (2020). "Effect of wave radiation stress in storm surge-induced inundation: A case study for the east coast of India." *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 177, No. 6, pp. 2993-3012.

National Typhoon Center (NTC) (2025). Analysis report of typhoons affecting the Korean Peninsula (2024). Report No. 11-1360000-100030-10, Korea Meteorological Administration, pp. 3-73.

Park, J.K., Kim, M.K., Kim, D.C., and Yoon, J.S. (2013). "Study on development of surge-tide-wave coupling numerical model for storm surge prediction." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 27, No. 4, pp. 33-44. doi: 10.5574/KSOE.2013.27.4.033.

Price, J.F. (1981). "Upper ocean response to a hurricane." *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 11, No. 2, pp. 153-175. doi: 10.1175/1520-0485(1981)011<0153:UORTAH>2.0.CO;2.

Schade, L.R., and Emanuel, K.A. (1999). "The ocean's effect on the intensity of tropical cyclones: Results from a coupled hurricane-ocean model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 56, No. 4, pp. 642-651. doi: 10.1175/1520-0469(1999)056<0642:TOSEOT>2.0.CO;2.

Seo, S.C., Kim, H.J., Hwang, T., and Lee, W.D. (2023). "Storm wave characteristics during typhoons Maysak and Haishen on the east and south coasts of Korea." *Journal of Coastal Research*, Vol. 39, No. 1, pp. 129-142.

Son, B., and Do, K. (2021). "Optimization of SWAN wave model to improve the accuracy of winter storm wave prediction in the East Sea." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 35, No. 4, pp. 273-286.

Suh, S.W., and Kim, H.J. (2012). "Typhoon surge simulation on the west coast incorporating asymmetric vortex and wave model on a fine finite element grid." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 24, No. 3, pp. 166-178.

Xie, D., Zou, Q., and Cannon, J.W. (2016). "Application of SWAN+ADCIRC to tide-surge and wave simulation in Gulf of Maine during Patriot's Day storm. *Water Science and Engineering*, Vol. 9, No. 1, pp. 33-41.

Yoon, J.J., and Jun, K.C. (2015). "Coupled storm surge and wave simulations for the southern coast of Korea." *Ocean Science Journal*, Vol. 50, No. 1, pp. 9-28. doi: 10.1007/s12601-015-0002-8.

Yoon, J.J., Jun, K.C., Park, K.S., and Shim, J.-S. (2012). "Simulation of storm surge with wave-current coupled model on unstructured grids." *2012 Oceans-Yeosu*, IEEE, pp. 1-4. doi: 10.1109/OCEANS-Yeosu.2012.6263595.

Yoon, S.B., Jeong, W.M., Jho, M.H., and Ryu, K.H. (2020). "Analysis of reliability of weather fields for Typhoon Maemi (0314). *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 32, No. 5, pp. 351-362.

Zijlema, M. (2010) "Computation of wind-wave spectra in coastal waters with SWAN on unstructured grids." *Coastal Engineering*, Vol. 57, pp. 267-277.