

비정형격자 기반 국지연안 파랑예측시스템 구축을 위한 예측정확도 및 모델성능 비교분석

Comparative Analysis of Forecasting Accuracy and Model Performance for Development of Coastal Wave Forecasting System Based on Unstructured Grid

노민* · 오상명** · 장필훈*** · 강현석**** · 김형석*****

Min Roh*, Sang Myeong Oh**, Pil-Hun Chang***, Hyun-Suk Kang**** and Hyung Suk Kim*****

요 지 : 전지구수치예보모델의 해상풍 예측자료를 기반으로 비정형격자의 국지연안 파랑예측시스템을 구축하고, 파랑모델의 수행성능 및 예측성능을 검증하였다. 기존의 정형격자는 복잡한 해안선과 연안지형에서의 파랑예측이 제한적이기 때문에 정밀한 국지연안 수치모의를 위해 비정형격자체계를 적용하고, 현업 예보 지원에 대한 적용가능성을 검토하였다. 두 격자체계 모두 근해와 연안에서 유사한 예측경향을 보였고, 격자체계에 따른 예측오차의 차이도 크지 않았다. 또한 정형격자와 비교하여, 비정형격자의 모델수행시간이 동일한 조건에서 현저히 감소하는 것을 통해 비정형격자 기반 파랑예측시스템의 현업 예보 지원에 대한 적용가능성을 확인하였다.

핵심용어 : 전지구수치예보모델, 비정형격자, 국지연안 파랑예측시스템, 검증

Abstract : We develop a coastal wave forecasting system by using the unstructured grid based on sea wind data of Global Data Assimilation and Prediction System. The verification is performed to examine the performance and accuracy of the wave model. Since the conventional grid has limited wave forecasting on complex coastlines and bathymetry, the unstructured grid system is applied for precise numerical simulation, and applicability for operational support is evaluated. Both grid systems show similar prediction trends in offshore and coastal areas, and the difference in prediction errors according to the grid system is not large. In addition, the applicability of the operational wave forecasting system is confirmed by dramatically reducing the model execution time of the unstructured grid under the same conditions.

Keywords : global data assimilation and prediction system, unstructured grid, coastal wave forecasting system, verification

1. 서 론

파랑모델은 대기모델에서 예측한 해상풍을 사용하여 파랑의 발달 및 전파과정을 수치모의하기 위해 개발되었다. 현재는 스펙트럼 기반의 3세대 파랑모델이 현업 예보와 연구 분야에 사용되고 있으며, 계산 알고리즘 개선(Rogers et al., 2012; Zieger et al., 2015; Liu et al., 2019) 및 고성능컴퓨팅(Tolman, 2002; Li, 2022; Zheng et al., 2022)을 통해 지속적으로 예측성능 및 정확도 그리고 계산속도가 향상되고 있

다. 나아가, 이종모형간의 결합모델을 통해 복잡한 실제 문제에 대한 접근이 가능하게 되었다(Fan et al., 2012; Chen et al., 2013; Theurich et al., 2016; Moghimi et al., 2020).

파랑예측에서 예보를 목적으로 구축된 시스템의 경우, 예측정확도 뿐만 아니라 수치모형의 계산시간도 매우 중요한 요소이며, 모델의 시간간격과 격자구성, 운영환경 등에 따라 계산시간이 달라지기 때문에 다양한 실험조건에서 파랑모델을 테스트해야 한다. 특히 계산시간에 영향을 주는 많은 요소들 가운데 모델의 격자구성은 계산수행시간과 가장 밀접한 관련

*국립기상과학원 예보연구부 선임연구원(Corresponding author: Min Roh, Senior Researcher, Forecast Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, 33, Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju-do 63568, Korea, Tel: +82-64-780-6574, Fax: +82-64-738-6514, rohmin@korea.kr)

**국립기상과학원 예보연구부 연구사(Research Scientist, Forecast Research Department, National Institute of Meteorological Sciences)

***국립기상과학원 예보연구부 연구관(Senior Research Scientist, Forecast Research Department, National Institute of Meteorological Sciences)

****국립기상과학원 예보연구부 연구관(Senior Research Scientist, Forecast Research Department, National Institute of Meteorological Sciences)

*****군산대학교 토목공학과 조교수(Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Kunsan National University)

이 있으므로 예보 목적의 파랑예측시스템을 구축하기 위해서는 격자구성에 따른 모델의 정확도와 계산시간에 대해 충분한 검토가 필요하다(Li, 2012; Abdolali et al., 2020).

일반적으로 파랑모델의 계산격자는 정형격자와 비정형격자로 구분할 수 있으며, 모델의 규모와 목적에 따라 선택하여 적용할 수 있다(Roland et al., 2012; Bakhtyar et al., 2020). 정형격자의 경우, 격자구성이 간단하고, 전지구 규모와 같은 큰 규모의 흐름을 수치모의하기에 적합하며(Park and Kang, 2012), 비정형격자는 작은 규모의 흐름으로 연안이나 하구에서의 상세흐름을 수치모의하기에 유리하다(Amrutha et al., 2016; Allahdadi et al., 2019; Brus et al., 2021). 특히 비정형격자는 섬이 많고, 복잡한 연안 지형을 실제와 가깝게 구현할 수 있기 때문에 우리나라 국지연안에 대한 파랑예측을 위해서는 정형격자보다는 비정형격자구조가 적합하며, 정형격자로는 구현하기 어려웠던 주요 항만시설과 연안 및 해양 활동 그리고 선박운항 등에 필요한 상세연안에서의 해상상황 및 위험기상에 관한 유용한 해양기상정보를 제공할 수 있을 것이다. 그러나 많은 장점이 있음에도 기존의 모델 격자체계와 비교하여, 모델수행의 안정성과 정합성, 전산자원 활용 등에 대해 충분한 연구가 진행 되지 않았으며, 특히 현업 예보 지원을 위한 비정형격자 기반 파랑모델에 대한 수치모의 실험연구도 많이 부족한 상황이다(Do and Kim, 2018; Mentaschi et al., 2020; Lira-Loarca et al., 2022).

따라서 본 연구에서는 우리나라 국지연안에서의 파랑예측 수행을 목적으로 비정형격자 기반의 국지연안 파랑예측시스템을 구축하고, 해양기상부이와 파고부이에서 관측한 유의 파고와 비교하여 파랑모델의 예측성능을 검증하였다. 또한, 비정형격자의 해상도를 변화시켜, 파랑모델을 수행하고, 기존의 정형격자 기반의 파랑예측시스템과 비교하여, 비정형격자 구조의 예측정확도 및 예보 적용 가능성에 대해 검토하였다.

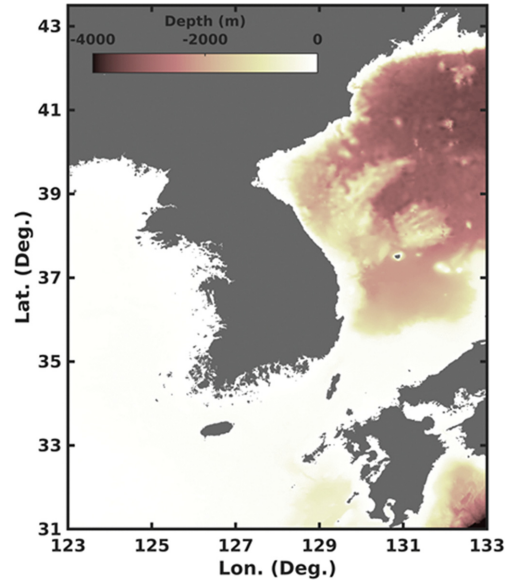


Fig. 1. Numerical domain of coastal wave forecasting system.

2. 연구방법

2.1 모델 set-up

국지연안 파랑예측시스템은 3세대 스펙트럼 파랑모델 WAVEWATCH3(WW3)를 기반으로 구축하였으며, 계산영역은 위도 31° ~ 43.5° , 경도 123° ~ 133° 이다(Fig. 1). WW3의 격자구성을 위해, 전지구 해양 중심자료는 SRTM15+V2.3(Tozer et al., 2019)을 사용하였으며, GSHHS(Global Self-consistent Hierarchical High-resolution Shoreline) 해안선 자료를 사용하였다. 스펙트럼 분석을 위해 $0.0412\sim 0.4056$ Hz의 진동수 범위와 10° 방향 분포를 설정하였고, 해상풍-파랑과 관련된 물리메커니즘은 ST4(Ardhuin et al., 2010)를 적용하였다. 파랑모델의 물리패키지에는 예측성능을 결정하는 주요 물리변수들이 있으며, 물리변수의 영향과 예측정확도에 대한 관계를

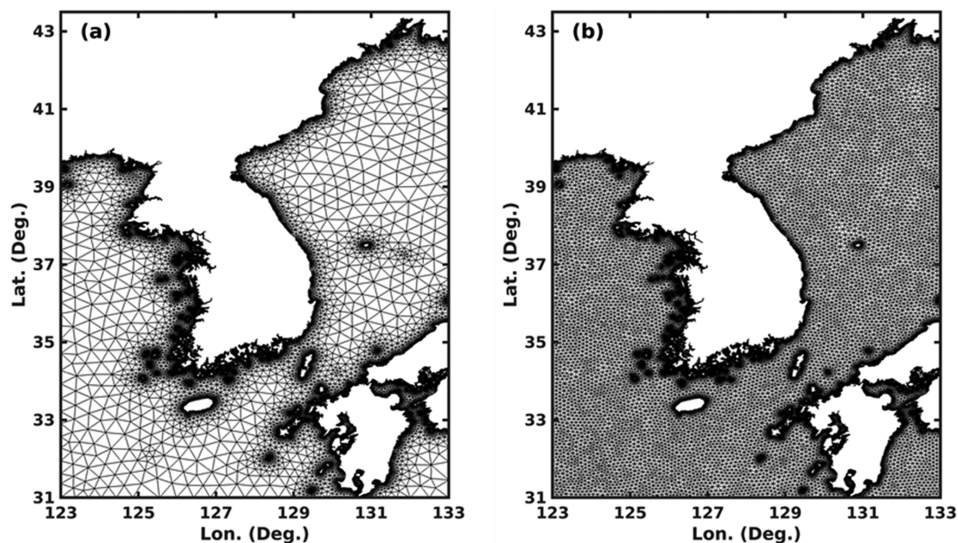


Fig. 2. Unstructured grids of the simulated domain for wave forecasting model ((a): Case 1, (b): Case 2).

고려하여, 입력해상도에 적합한 물리변수를 결정해야한다(Roh et al., 2020). ST4 물리패키지의 주요 물리변수인 풍과 성장 계수는 1.66으로 설정하였고, 입력바람장의 높이는 10 m로 설정하였다. 본 연구에서는 제시하지 않았지만, 주요 물리변수를 결정하기 위해 여름철과 겨울철 각각에 대한 계절별 민감도 실험을 수행하여, 연구에 이용한 해상풍 예측자료에 대해 최적화된 정형격자의 설정을 사용하였다. 비정형격자의 해상도에 따른 예측성능 차이를 확인하기 위해, 근해와 연안의 해상도를 최대간격 50 km, 최소간격 500 m(Fig. 2(a), Case 1)와 최대간격 8 km, 최소간격 300 m(Fig. 2(b), Case 2)로 각각 구성하였고, 정형격자는 전체 계산영역에 대해 1 km 해상도(Case 0)로 구성하였다.

파랑모델의 입력자료는 전지구수치예보모델의 해상풍 예측자료이며, 전지구 파랑모델을 수행하여 예측한 경계영역에서의 파랑자료를 경계장으로 사용하였다. 모델은 하루 2회(00 UTC, 12 UTC) 수행되며, 초기장 자료는 12시간 전에 수행된 파랑모델의 예측결과를 사용하였고, 수행시간 기준으로 72 시간까지 예측하도록 설계하였다.

2.2 관측자료

파랑모델의 예측성능을 검증하기 위해 근해는 기상청에서 운영하는 20개소의 해양기상부이에서 관측한 유의파고를 사용하였고, 연안은 기상청에서 운영하는 42개소 연안파고부이의 유의파고를 사용하였다(Fig. 3). Fig. 3에 22105와 22107은 해양기상부이이고, 22476과 22479는 해양기상부이와 근접한 위치에 설치된 연안파고부이이다. 위 4개소 부이위치에서 2021년 12월 1일부터 2022년 2월 28일까지 관측한 유의파고를 Fig. 4에 나타냈다. 근해와 연안에서의 예측성능 검증은 품질관리를 마친 유효한 관측자료만을 사용하였고, 결측

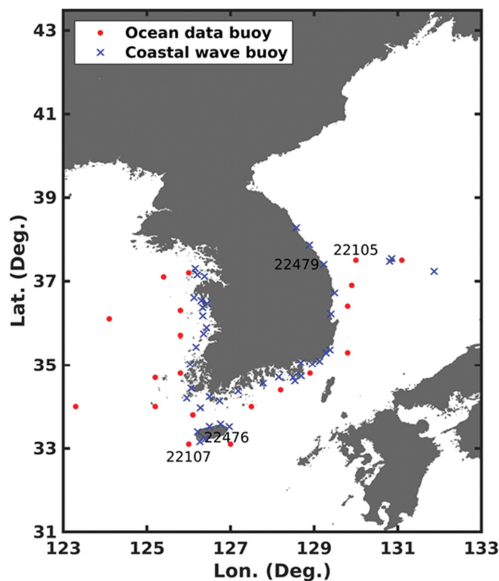


Fig. 3. Locations for wave observation buoys by the Korea Meteorological Administration.

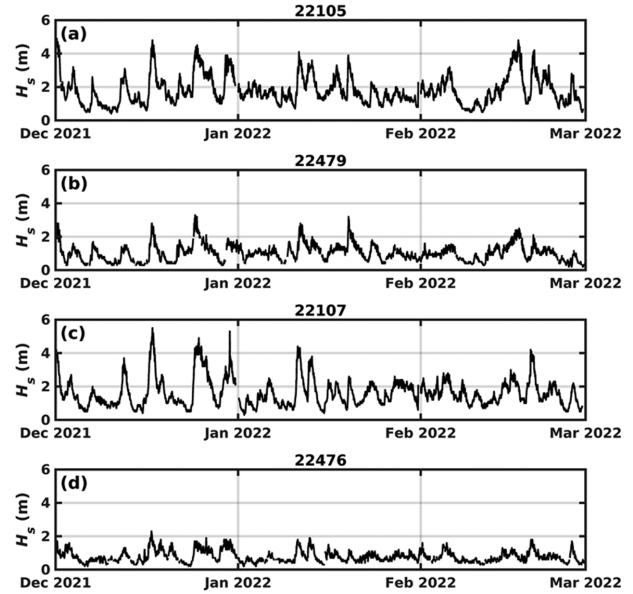


Fig. 4. Time series of significant wave height measured at the locations of ocean data buoy ((a), (c)) and coastal wave buoy ((b), (d)).

및 이상관측자료는 사용하지 않았다. 파랑모델의 예측성능 검증에 위해 부이위치와 동일한 지점에서 파랑모델의 예측시간별 유의파고와 유효관측자료를 비교하여, 모델격자 조건에 따른 예측성능 검증지표를 산정하였다.

2.3 검증방법

파랑모델의 예측성능 검증지표로는 평균오차(*bias*), 평균제곱근오차(RMSE), 상관계수(*r*)를 사용한다. *bias*, RMSE 그리고 *r*은 아래의 식(1)~(3)을 통해 각각 산정하며, 각 격자조건별 예측결과를 비교분석하기 위해 해양기상부이와 연안파고부이로 구분하여, 근해와 연안에서의 예측정확도를 검증한다.

$$bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_i - A_i) \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_i - A_i)^2} \quad (2)$$

$$r = \frac{\sum (F_i - \bar{F}_i)(A_i - \bar{A}_i)}{\sqrt{\sum (F_i - \bar{F}_i)^2 \sum (A_i - \bar{A}_i)^2}} \quad (3)$$

여기서, F_i 는 예측값, A_i 는 관측값, \bar{F}_i 는 평균예측값, \bar{A}_i 는 평균관측값이다. 동일한 관측위치에서의 검증지표 산출을 위해 모델 격자점 기준의 예측결과에서 부이관측위치로 내삽하고, 이를 예측값(F_i)으로 사용하였다. 각각의 해양기상부이위치와 연안파고부이위치에서 수집된 예측값과 관측값을 사용하여 월별로 *bias*, RMSE, *r*을 산정하고, 검증결과를 부이별로 구분하였다. Fig. 5는 검증지표 산출을 위해 사용한 관측값과 모델예측값을 월별로 나타낸 그림이다. 모델예측값은 Case 2에서 예측한 +24 hr의 유의파고 예측결과이며, Fig.

5(a)~(c)는 전체 해양기상부이의 월별 관측값이고, Fig. 5(d)~(f)는 전체 연안파고부이의 월별 관측값이다.

검증기간은 겨울철 3개월(2021년 12월, 2022년 1월, 2022년

2월)이며, 해양기상부이와 연안파고부이에 대한 월별 검증결과와 전체 검증기간(3개월)에 대해 평균한 검증결과를 토대로 근해와 연안에서의 겨울철 파랑모델의 예측성능을 비교하였다.

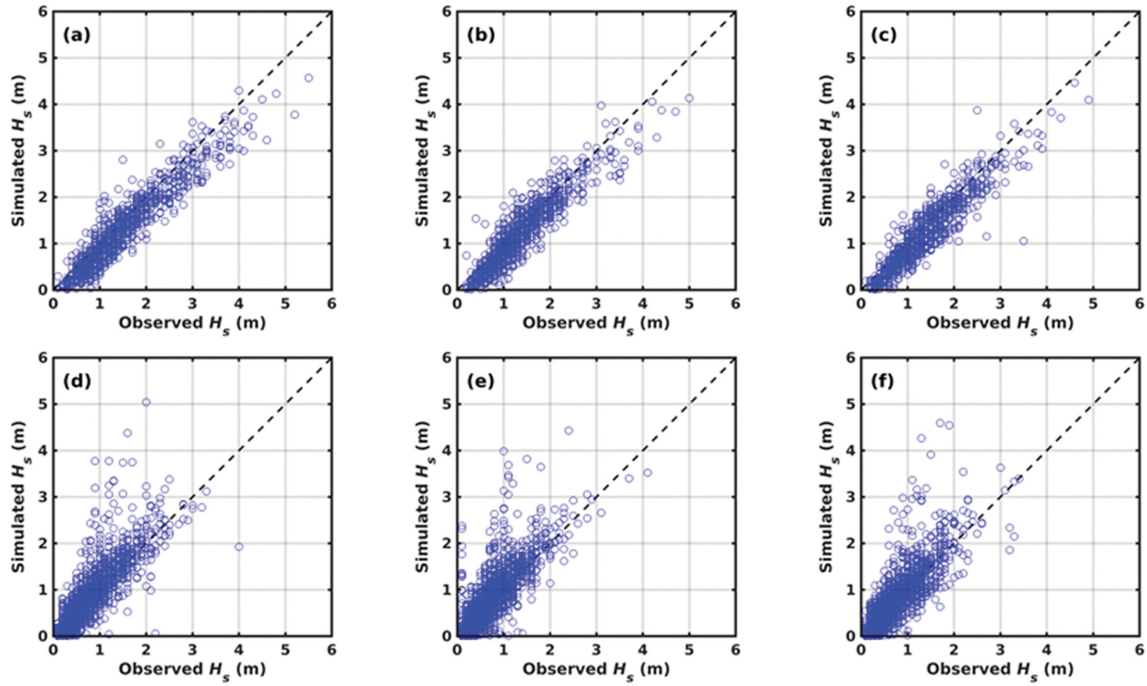


Fig. 5. Comparison of the simulated (Case 2, +24 hr) and observed significant wave heights (ocean data buoy: (a) Dec. 2021, (b): Jan. 2022, (c): Feb. 2022, coastal wave buoy: (d) Dec. 2021, (e) Jan. 2022, (f) Feb. 2022).

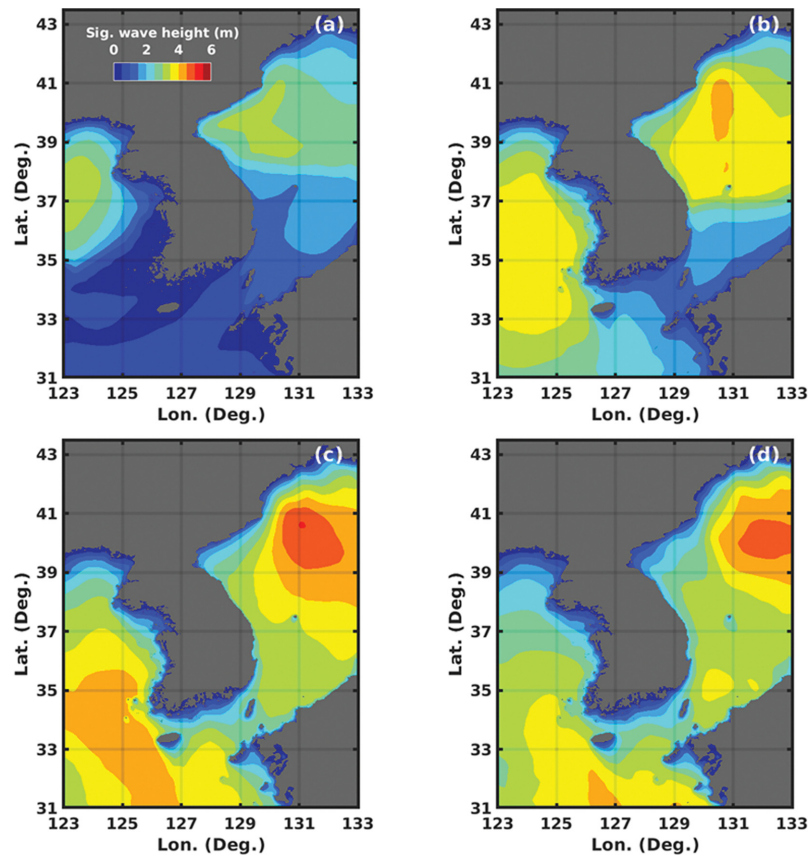


Fig. 6. Distribution of significant wave height according to the forecast lead time on Case 1 ((a): +0hr, (b): +12 hr, (c): +24 hr, (d): +36 hr).

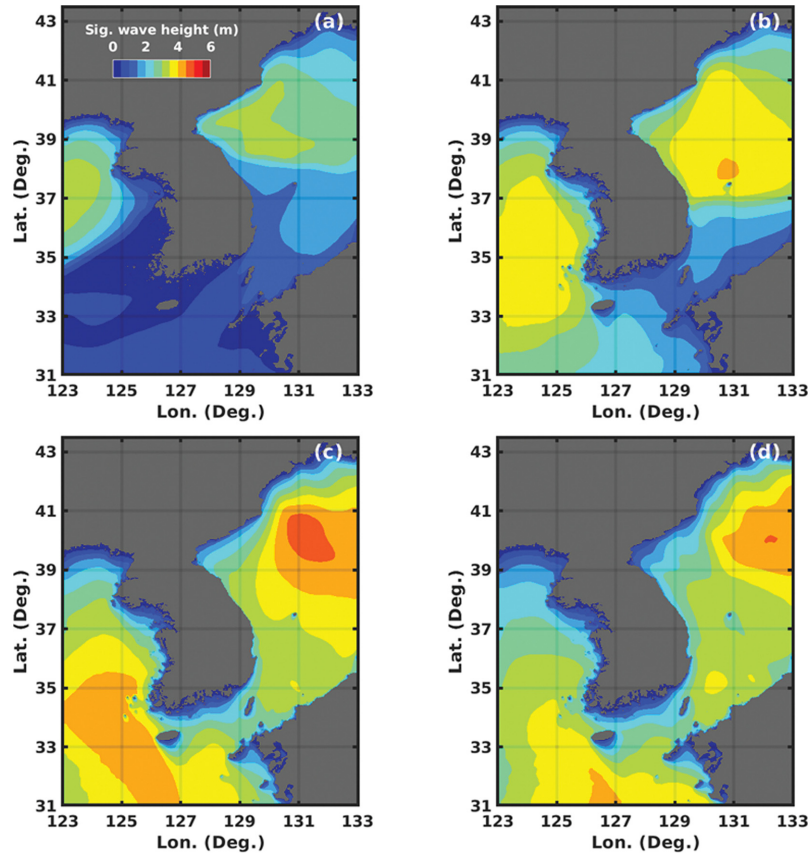


Fig. 7. Distribution of significant wave height according to the forecast lead time on Case 2 ((a): +0 hr, (b): +12 hr, (c): +24 hr, (d): +36 hr).

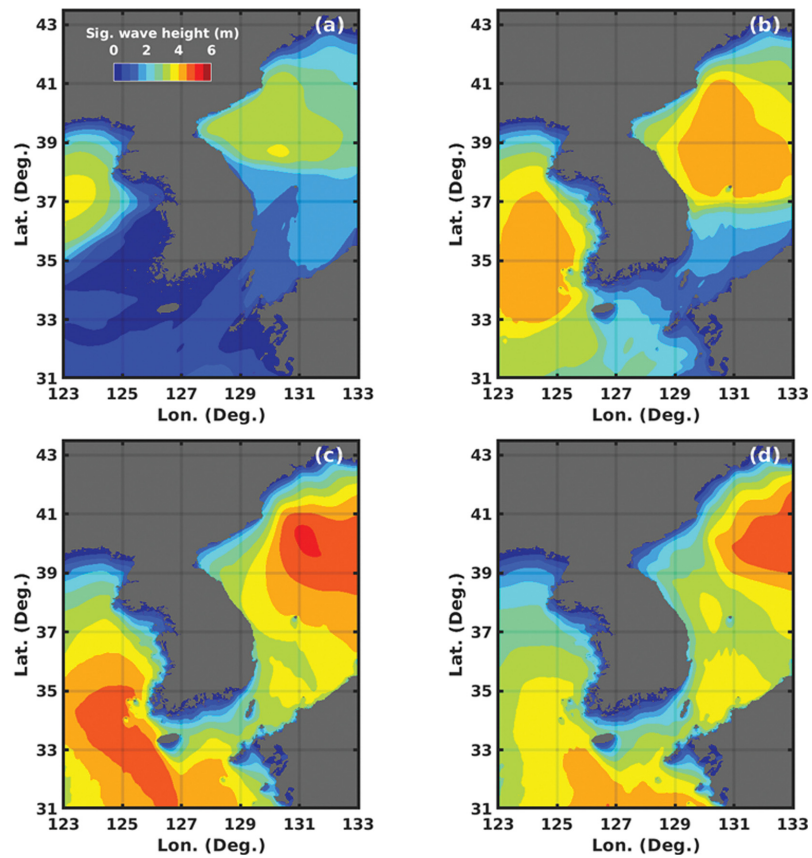


Fig. 8. Distribution of significant wave height according to the forecast lead time on Case 0 ((a): +0 hr, (b): +12 hr, (c): +24 hr, (d): +36 hr).

3. 수치모의결과

3.1 비정형격자 수치모의 예측결과

비정형격자의 격자구조는 Fig. 2(a)와 (b)로 구성되어 있으며, 일반적인 격자구조 형태로 외해에서는 큰 격자구조로 이루어져 있고, 연안으로 접근할수록 매우 조밀한 격자로 되어 있다. 따라서 근해에서의 큰 흐름과 연안에서의 작은 흐름에 대해 수치모의 할 수 있는 격자구조 형태로, 특히 우리나라 서해와 남해 같이 복잡한 해안선과 연안지형에 적용하는 데 적합한 격자구조이다.

비정형격자 기반으로 수행한 파랑모델의 예측결과를 Figs. 6~7에 나타냈다. Fig. 6은 비정형격자 기반 Case 1의 예측시간별 유의파고를 나타낸 그림이고, Fig. 7은 Case 2의 유의파고 예측결과이다. 동일한 파랑모델 수행시간인 2021년 12월 24일 00 UTC를 기준으로 12시간 간격의 예측시간별 유의파고 변화를 (a)부터 (d)까지 각각 나타냈다. 비정형격자의 해상도에 따른 예측시간별 유의파고 분포 변화를 비교해보면, 근해(동해)에서는 유의파고 예측결과에 차이가 있었으나, 전반적으로 예측경향이 유사하며, 특히 모델의 해상도 차이가

크지 않은 연안에서는 비슷한 경향을 나타낸다.

3.2 정형격자 수치모의 예측결과

전체 계산영역에 대해 1 km 간격의 정형격자로 구성된 Case 0은 육지 부분을 제외한 바다 영역에 대해서만 비정형격자와 동일한 입력바람장을 사용하여, 모델예측을 수행하였다. Fig. 8은 정형격자 기반 파랑모델의 예측시간별 유의파고 분포이며, 비정형격자의 예측결과와 동일한 12시간 간격의 예측결과를 나타낸 것이다. 모델수행시간은 비정형격자와 같은 2021년 12월 24일 00 UTC이며, 예측시간은 각각 +0 hr, +12 hr, +24 hr, +36 hr이다. 전반적으로 유의파고 분포는 비정형격자의 예측결과와 유사한 경향을 나타내며, 근해에서 정형격자 모델의 유의파고가 비정형격자 모델보다 약 10cm가량 높게 예측하는 경향을 보였다.

4. 검증결과

비정형격자와 정형격자의 예측결과를 검증하기 위해 해양 기상부이와 연안파고부이에서 관측한 유의파고를 기준으로

Table 1. Monthly *bias* (m) corresponding to the forecast lead time using ocean data buoys

Lead time (hr)	Dec. 2021			Jan. 2022			Feb. 2022		
	Case 1	Case 2	Case 0	Case 1	Case 2	Case 0	Case 1	Case 2	Case 0
0	-0.20	-0.22	-0.16	-0.18	-0.18	-0.13	-0.19	-0.20	-0.14
12	-0.20	-0.22	-0.16	-0.18	-0.18	-0.13	-0.19	-0.20	-0.14
24	-0.18	-0.20	-0.14	-0.15	-0.16	-0.11	-0.17	-0.18	-0.12
36	-0.18	-0.20	-0.14	-0.14	-0.14	-0.09	-0.14	-0.14	-0.08
48	-0.20	-0.22	-0.15	-0.11	-0.12	-0.06	-0.11	-0.12	-0.06
60	-0.19	-0.21	-0.14	-0.11	-0.11	-0.06	-0.12	-0.13	-0.07
72	-0.19	-0.21	-0.14	-0.12	-0.13	-0.07	-0.14	-0.15	-0.09

Table 2. Monthly RMSE (m) corresponding to the forecast lead time using ocean data buoys

Lead time (hr)	Dec. 2021			Jan. 2022			Feb. 2022		
	Case 1	Case 2	Case 0	Case 1	Case 2	Case 0	Case 1	Case 2	Case 0
0	0.35	0.35	0.33	0.31	0.31	0.31	0.32	0.32	0.30
12	0.34	0.35	0.32	0.31	0.31	0.31	0.32	0.32	0.30
24	0.34	0.35	0.33	0.32	0.32	0.33	0.32	0.33	0.32
36	0.35	0.36	0.33	0.31	0.31	0.32	0.33	0.33	0.33
48	0.36	0.37	0.34	0.31	0.32	0.33	0.33	0.34	0.34
60	0.37	0.38	0.35	0.34	0.34	0.36	0.36	0.36	0.37
72	0.38	0.39	0.36	0.36	0.37	0.38	0.39	0.39	0.40

Table 3. Monthly *r* corresponding to the forecast lead time using ocean data buoys

Lead time (hr)	Dec. 2021			Jan. 2022			Feb. 2022		
	Case 1	Case 2	Case 0	Case 1	Case 2	Case 0	Case 1	Case 2	Case 0
0	0.95	0.95	0.95	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94
12	0.95	0.95	0.95	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94
24	0.95	0.95	0.95	0.93	0.92	0.92	0.93	0.93	0.93
36	0.94	0.94	0.95	0.93	0.93	0.93	0.92	0.92	0.92
48	0.94	0.94	0.95	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
60	0.94	0.94	0.94	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
72	0.93	0.93	0.93	0.89	0.89	0.88	0.89	0.89	0.89

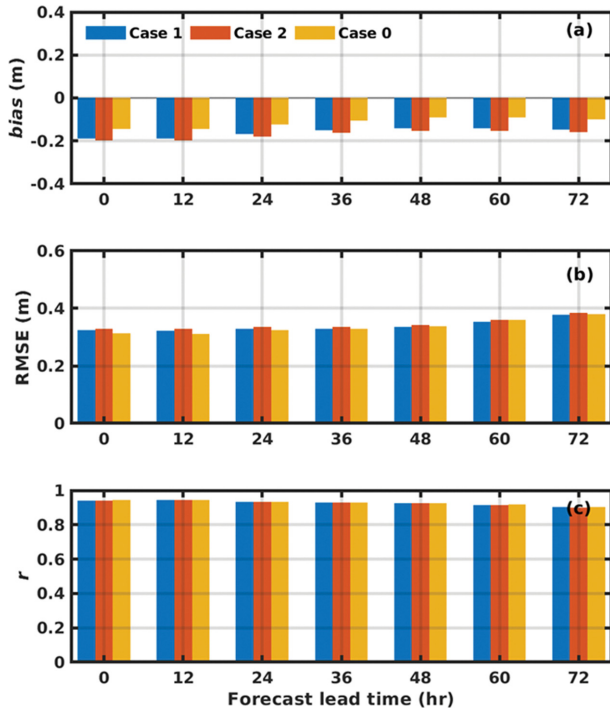


Fig. 9. Comparison of (a) averaged *bias* and (b) averaged RMSE (c) averaged *r* based on ocean data buoys.

bias, RMSE 그리고 r 을 예측시간별로 각각 산출하였다. Table 1~3은 해양기상부이의 관측유역과정을 기준으로 월별 검증결과를 예측시간별로 산정한 결과이다. 모델격자구조에 의한 편향과 예측오차는 분석기간 3개월 동안 크게 변화하지 않았지만, 모든 격자조건에서 겨울철 음의 편차를 보이며, 모델의 과소모의경향이 확인되었다. 또한, 전체 예측시간에 걸쳐 높은 상관계수를 나타냈으며, 예측시간 후반부에는 상관

계수가 감소하는 경향을 보였다. Fig. 9는 겨울철 3개월에 대한 예측시간별 평균한 결과를 나타낸 것이다. 격자조건에 따른 편향은 모두 음의 편향으로 과소모의하고 있음을 나타냈고, 예측시간이 증가할수록 RMSE는 증가하는 추세를 보였으며, 근해에서 격자간격이 가장 작은 정형격자가 가장 낮은 RMSE를 나타냈다.

Table 4~6은 연안파고부이의 관측자료를 이용하여 검증한 월별 검증결과이다. 결과를 보면, 대체로 연안에서는 격자조건에 따른 파랑모델의 편향은 크지 않았고, 비교적 높은 상관계수를 보였다. RMSE는 격자조건에 따라 연안에서의 모델 해상도가 높을수록 예측오차는 감소하였고, 전체 예측시간에서 1 km 해상도의 정형격자가 가장 높은 RMSE를 나타냈다. Fig. 10은 월별 검증결과를 격자조건별로 3개월 평균한 것이다. 모든 격자조건에서 양의 편향을 보이지만, 뚜렷한 편향은 아니므로 모델의 과소·과대모의 경향은 크지 않다고 판단된다.

비정형격자 모델의 예측정확도와 함께 현업 예보 지원을 위해서는 파랑모델의 계산시간이 반드시 확보되어야 한다. 같은 전산 자원을 사용하여, 각 모델의 72시간 예측을 위해 소요되는 계산시간을 측정하고, 이를 비교하였다. 모델 수행을 위한 계산시스템은 Intel Ice Lake 8368Q(2.6 GHz, 38 cores) 프로세서가 탑재되어 있고, 대규모 병렬처리 작업 수행에 적합하도록 설계되어 있다. 파랑모델의 병렬화는 MPI와 OpenMP를 결합한 하이브리드 형태로 스펙트럼 해상도에 맞춰 900개(36(방향 분포) × (진동수 범위))의 MPI 프로세스를 사용하고, 동시에 OpenMP를 6-threads까지 확장하여 모델 예측을 수행한다(WAVEWATCH III Development Group,

Table 4. Monthly *bias* (m) corresponding to the forecast lead time using coastal wave buoys

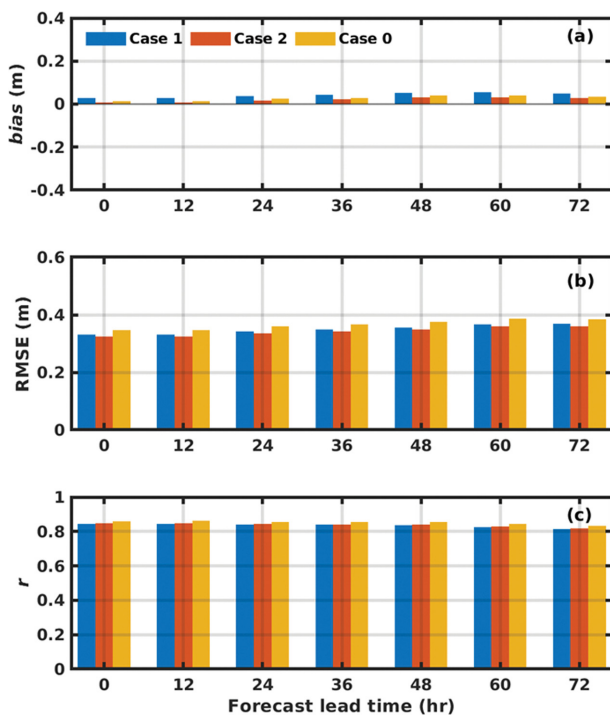
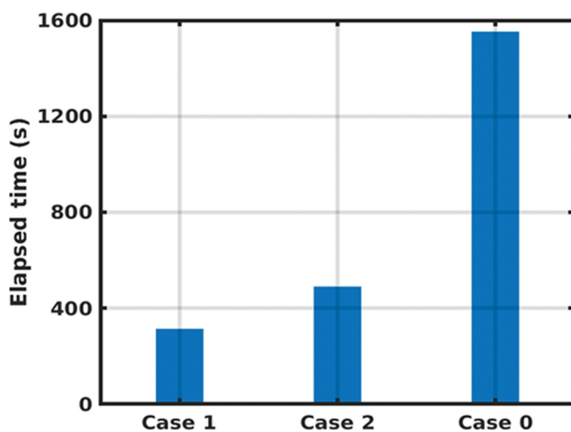
Lead time (hr)	Dec. 2021			Jan. 2022			Feb. 2022		
	Case 1	Case 2	Case 0	Case 1	Case 2	Case 0	Case 1	Case 2	Case 0
0	0.04	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02	0.01	-0.01	0.00
12	0.04	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	-0.01	0.00
24	0.05	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.00	0.01
36	0.05	0.02	0.03	0.05	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02
48	0.04	0.02	0.03	0.06	0.05	0.05	0.05	0.03	0.04
60	0.05	0.02	0.03	0.07	0.05	0.05	0.04	0.02	0.04
72	0.05	0.03	0.03	0.06	0.04	0.04	0.03	0.02	0.03

Table 5. Monthly RMSE (m) corresponding to the forecast lead time using coastal wave buoys

Lead time (hr)	Dec. 2021			Jan. 2022			Feb. 2022		
	Case 1	Case 2	Case 0	Case 1	Case 2	Case 0	Case 1	Case 2	Case 0
0	0.33	0.33	0.34	0.33	0.33	0.35	0.33	0.32	0.35
12	0.33	0.33	0.35	0.34	0.33	0.35	0.32	0.32	0.35
24	0.34	0.33	0.36	0.35	0.34	0.36	0.34	0.33	0.36
36	0.34	0.34	0.36	0.35	0.35	0.37	0.35	0.34	0.37
48	0.35	0.34	0.36	0.36	0.36	0.38	0.35	0.35	0.38
60	0.36	0.35	0.38	0.37	0.37	0.39	0.36	0.36	0.39
72	0.36	0.35	0.37	0.37	0.36	0.38	0.37	0.36	0.40

Table 6. Monthly r corresponding to the forecast lead time using ocean data buoys

Lead time (hr)	Dec. 2021			Jan. 2022			Feb. 2022		
	Case 1	Case 2	Case 0	Case 1	Case 2	Case 0	Case 1	Case 2	Case 0
0	0.86	0.86	0.87	0.83	0.83	0.85	0.84	0.85	0.86
12	0.86	0.86	0.87	0.83	0.83	0.85	0.85	0.85	0.86
24	0.86	0.86	0.87	0.82	0.82	0.84	0.84	0.84	0.85
36	0.86	0.86	0.87	0.82	0.82	0.84	0.84	0.84	0.85
48	0.85	0.85	0.86	0.81	0.82	0.84	0.84	0.84	0.86
60	0.84	0.84	0.85	0.80	0.81	0.83	0.83	0.83	0.84
72	0.83	0.83	0.84	0.79	0.80	0.82	0.82	0.82	0.83

**Fig. 10.** Comparison of (a) averaged bias and (b) averaged RMSE (c) averaged r based on coastal wave buoys.**Fig. 11.** Comparison of the elapsed calculation time according to the grid systems.

2019).

Fig. 11은 각각의 격자조건 따른 계산시간을 나타낸 것으

로 정형격자의 계산시간은 대략 1500 s가 소요됐지만 비정형격자의 경우, Case 1은 약 310 s가 소요되었고, Case 2는 490 s가 소요되었다. 결과적으로 정형격자와 비교하여, 비정형격자의 예측정확도가 충분히 확보되었다고 보이며, 계산시간도 약 70% 정도 개선되는 것을 알 수 있었다. 비정형격자는 정형격자와 매우 유사한 예측경향과 정확도를 보였고, 계산시간도 현저히 감소함에 따라 현업 예보 지원에 있어서 적용가능성이 충분한 격자구조임을 확인하였다. 하지만 격자형태 및 해상도에 따라 비정형격자 기반 수치모델은 예측정확도, 계산 성능 및 전산 비용 등에 큰 영향을 받기 때문에 수치모델의 실험을 통해 다양한 격자구조 조건들을 검토하고, 이를 적용해야 한다(Brus et al., 2021).

5. 결 론

본 연구에서는, 비정형격자 기반의 국지연안 파랑예측시스템 구축을 위한 예측정확도를 평가하였고, 현업 예보 지원을 목적으로 활용할 수 있는지에 대해 종합적으로 검토하였다. 이를 위해, 우리나라 근해와 상세연안역의 격자 크기를 달리 하여 격자구조를 구성하고, 동일한 입력해상도를 사용하여, 겨울철을 연구기간으로 수치실험을 수행하였다. 비정형격자의 예측성능을 살펴보기 위해 해양기상부이와 연안파고부이의 관측결과를 사용하여, 정형격자 모델결과와 비교하였다. 또한, 각 모델의 계산시간을 측정하여, 예보 활용가능성에 대해 파악하였다.

전체 예측시간에 대해 비정형격자의 예측경향과 예측오차는 정형격자와 비교하여 전반적으로 큰 차이는 없었고, 모든 격자조건에서 공통적으로 근해와 연안의 예측경향이 다르게 나타났다. 근해에서는 예측시간별로 음의 편향을 나타내며, 모든 모델이 과소모의하는 경향을 보였고, 연안에서는 편향이 0에 근접하며 안정적인 예측결과를 나타냈다. 또한, 각 모델의 근해와 연안에서의 해상도 차이가 예측오차에 영향을 준 것으로 파악되는데 근해에서는 격자간격이 가장 작은 정형격자의 예측오차가 가장 작았으며, 상대적으로 모델격자의 해상도 차이가 작은 연안에서는 격자간격이 가장 작은 고해상도 비정형격자의 예측오차가 가장 작았다. 비정형격자 모델의 계산시간은 정형격자 모델보다 현저히 감소하

였으며, 예측정확도와 계산시간 분석을 통해 현업에서 보다 상세한 연안파랑정보 생산을 위한 비정형격자의 활용가능성을 확인하였다.

본 수치실험의 연구결과를 바탕으로 현업 운영을 위한 비정형격자 기반의 국지연안 파랑예측시스템을 구축할 예정이며, 예측성능 개선을 위해 근해와 연안에서의 해상도 구성 및 민감도 실험을 통한 모델파라미터 최적화 등의 연구를 지속적으로 수행하고자 한다. 향후 고해상도 파랑모델의 예측성능 향상으로 우리나라 연안의 상세한 해상상황 및 위험기상과 관련된 유용한 해양기상정보를 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 기상청 국립기상과학원 「해양기상감시 및 차세대 해양예측시스템 개발」(KMA2018-00420)과 국토교통부/국토교통과학기술진흥원(21DPSC-C163249-01)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Abdolali, A., Roland, A., Van Der Westhuysen, A., Meixner, J., Chawla, A., Hesser, T.J., Smith, J.M. and Sikiric, M.D. (2020). Large-scale hurricane modeling using domain decomposition parallelization and implicit scheme implemented in WAVEWATCH III wave model. *Coast. Eng.*, 157, 103656.
- Allahdadi, M.N., Gunawan, B., Lai, J., He, R. and Neary, V.S. (2019). Development and validation of a regional-scale high-resolution unstructured model for wave energy resource characterization along the US East Coast. *Renew. Energy*, 136, 500-511.
- Amrutha, M.M., Kumar, V.S., Sandhya, K.G., Nair, T.B. and Rathod, J.L. (2016). Wave hindcast studies using SWAN nested in WAVEWATCH III-comparison with measured nearshore buoy data off Karwar, eastern Arabian Sea. *Ocean Eng.*, 119, 114-124.
- Arduhin, F., Rogers, E., Babanin, A., Filipot, J.F., Magne, R., Roland, A., van der Westhuysen, A., Queffelec, P., Lefevre, J.M., Aouf, L. and Collard, F. (2010). Semiempirical dissipation source functions for ocean waves. Part I: definition, calibration and validation. *J. Phys. Oceanogr.*, 40(9), 1917-1941.
- Bakhtyar, R., Maitaria, K., Velissariou, P., Trimble, B., Mashriqui, H., Moghimi, S., Abdolali, A., Van Der Westhuysen, A.J., Ma, Z., Clark, E.P. and Flowers, T. (2020). A new 1D/2D coupled modeling approach for a riverine-estuarine system under storm events: Application to Delaware River Basin. *J. Geophys. Res. Oceans*, 125, e2019JC015822.
- Brus, S.R., Wolfram, P.J., Van Roekel, L.P. and Meixner, J.D. (2021). Unstructured global to coastal wave modeling for the Energy Exascale Earth System Model using WAVEWATCH III version 6.07. *Geosci. Model Dev.*, 14(5), 2917-2938.
- Chen, S.S., Zhao, W., Donelan, M.A. and Tolman, H.L. (2013). Directional wind-wave coupling in fully coupled atmosphere-wave-ocean models: Results from CBLAST-Hurricane. *J. Atmos. Sci.*, 70(10), 3198-3215.
- Do, K.-D. and Kim, J.-A. (2018). A study on the predictability of eastern winter storm waves using operational wind forecasts of KMA. *J. Korean Soc. Coast. Ocean Eng.*, 30(5), 223-233 (in Korean).
- Fan, Y., Lin, S.J., Held, I.M., Yu, Z. and Tolman, H.L. (2012). Global ocean surface wave simulation using a coupled atmosphere-wave model. *J. Clim.*, 25(18), 6233-6252.
- Li, J.-G. (2012). Propagation of ocean surface waves on a spherical multiple-cell grid. *J. Comput. Phys.*, 231(24), 8262-8277.
- Li, J.-G. (2022). Hybrid multi-grid parallelisation of WAVEWATCH III model on spherical multiple-cell grids. *J. Parallel Distrib. Comput.*, 167, 187-198.
- Lira-Loarca, A., Cáceres-Euse, A., De-Leo, F. and Besio, G. (2022). Wave modeling with unstructured mesh for hindcast, forecast and wave hazard applications in the Mediterranean Sea. *Applied Ocean Research*, 122, 103118.
- Liu, Q., Rogers, W.E., Babanin, A.V., Young, I.R., Romero, L., Zieger, S., Qiao, F. and Guan, C. (2019). Observation-based source terms in the third-generation wave model WAVEWATCH III: Updates and verification. *J. Phys. Oceanogr.*, 49(2), 489-517.
- Mentaschi, L., Vourdoukas, M., Montblanc, T.F., Kakoulaki, G., Voukouvalas, E., Besio, G. and Salamon, P. (2020). Assessment of global wave models on regular and unstructured grids using the Unresolved Obstacles Source Term. *Ocean Dynamics*, 70(11), 1475-1483.
- Moghimi, S., Van der Westhuysen, A., Abdolali, A., Myers, E., Vinogradov, S., Ma, Z., Liu, F., Mehra, A. and Kurkowski, N. (2020). Development of an ESMF based flexible coupling application of ADCIRC and WAVEWATCH III for high fidelity coastal inundation studies. *J. Mar. Sci. Eng.*, 8(5), 308.
- Park, J.S. and Kang, K.-R. (2012). Sensitivity analysis of Global wind-wave model. *J. Korean Soc. Coast. Ocean Eng.*, 24(5), 333-342 (in Korean).
- Rogers, W.E., Babanin, A.V. and Wang, D.W. (2012). Observation-consistent input and whitecapping dissipation in a model for wind-generated surface waves: Description and simple calculations. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 29(9), 1329-1346.
- Roh, M., Oh, S.M., Kang, K.-R. and Chang, P.-H. (2020). Development and verification of a rapid refresh wave forecasting system. *J. Korean Soc. Coast. Ocean Eng.*, 32(5), 340-350 (in Korean).
- Roland, A., Zhang, Y.J., Wang, H.V., Meng, Y., Teng, Y.C., Made-rich, V., Brovchenko, I., Dutour-Sikiric, M. and Zanke, U. (2012). A fully coupled 3D wave-current interaction model on unstructured grids. *J. Geophys. Res. Oceans*, 117(C11), C00J33.
- Theurich, G., DeLuca, C., Campbell, T., Liu, F., Saint, K., Vertenstein, M., Chen, J., Oehmke, R., Doyle, J., Whitcomb, T., Wall-

- craft, A., Iredell, M., Black, T., Da Silva, A.M., Clune, T., Ferraro, R., Li, P., Kelley, M., Aleinov, I., Balaji, V., Zadeh, N., Jacob, R., Kirtman, B., Giraldo, F., McCarren, D., Sandgathe, S., Peckham, S. and Dunlap IV, R. (2016). The earth system prediction suite: Toward a coordinated US modeling capability. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 97(7), 1229-1247.
- Tolman, H.L. (2002). Distributed-memory concepts in the wave model WAVEWATCH III. *Parallel Comput.*, 28(1), 35-52.
- Tozer, B., Sandwell, D.T., Smith, W.H., Olson, C., Beale, J.R. and Wessel, P. (2019). Global bathymetry and topography at 15 arc sec: SRTM15+. *Earth and Space Science*, 6(10), 1847-1864.
- WAVEWATCH III Development Group (2019). User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III Version 6.07. Techn., 250.
- Zheng, Z., Ma, X., Huang, X., Ma, Y. and Dong, G. (2022). Wave forecasting within a port using WAVEWATCH III and artificial neural networks. *Ocean Eng.*, 255, 111475.
- Zieger, S., Babanin, A.V., Rogers, W.E. and Young, I.R. (2015). Observation-based source terms in the third-generation wave model WAVEWATCH. *Ocean Model.*, 96(1), 2-25.

Received 28 October, 2022

Revised 18 November, 2022

Accepted 21 November, 2022