경기만에서의 동계 파랑 모델 정확도 개선 인자 분석

김기환[1], 김명환[1], 우승범[1*]
[1]인하대학교 해양과학과
* 연락처: 김기환(khkimocean@gmail.com), 우승범*(sbwoo@inha.ac.kr)

Introduction & Methods

- 파랑은 연안의 환경에서 구조물에 미치는 외력과 더불어 퇴적물 및 오염물질의 이동에 영향을 미친다.
- 수치모델은 해상 부이, 위성 데이터와 함께 중요한 파랑 데이터 확보 방법의 하나로 활용되며, 특히 관측 데이터의 시공간적 한계를 보완한다는 측면에서 중요하다.
- 복잡한 해양환경을 갖는 연안 지역에서의 파랑은 지형, 해수 유동 등의 요인으로 인한 파랑의 변형이 발생하며, 이는 모델 정확도를 감소시키는 원인 중 하나로 지목된다.
- 본 연구에서는 서해 경기만 해역을 대상으로 수치모델의 입력자료 (파랑 경계조건, 바람 입력조건, 해수 유동조건) 및 모델 접합 방법을 점진적으로 조절하여 파랑 모델 정확도 개선 방안을 검토하였다.

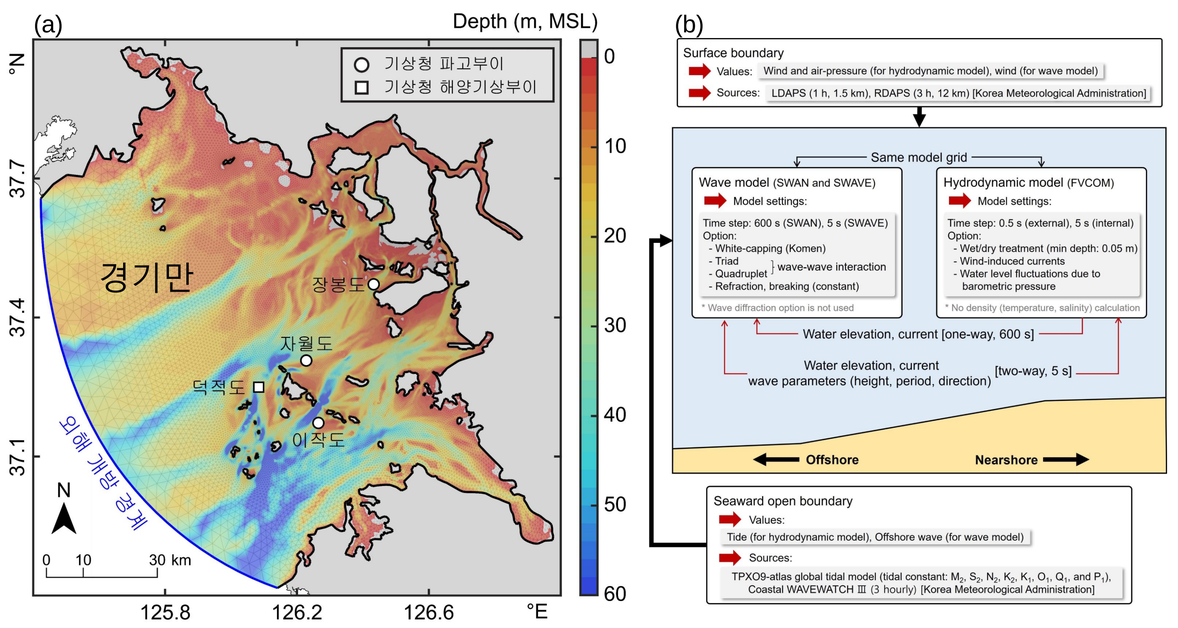


Figure 1. (a) Model grid system, bathymetry, and four wave observation points in Gyeonggi Bay. The blue line indicates the model open boundary where the boundary conditions of the tide and offshore wave are entered. The observation data is provided by the Korea Meteorological Administration (KMA) and points are as follows: three wave buoys, located at Jaweoldo (JW), Ijakdo (IJ), and Jangbongdo (JB); one weather buoy at Duckjeokdo (DJ). Model bathymetry based on the mean sea level (MSL). The gray shaded area is the area where the water depth is less than 0 m with respect to the mean sea level. (b) A schematic diagram for model simulation (input data and numerical schemes)

Table 1. Wave model scenarios

Case	Model	Wave boundary	Wind	Hydrodynamic (Coupling)	Simulation period
1	SWAN	-	RDAPS	-	January–March, 2020 (+ 6-day spin-up period)
2	SWAN	CWW3	RDAPS	-	
3	SWAN	CWW3	LDAPS	-	
4	SWAN	CWW3	LDAPS	FVCOM (one-way)	
5	FVCOM+SWAVE	CWW3	LDAPS	FVCOM (two-way)	

*LDAPS: Local Data Assimilation and Prediction System
*RDAPS: Regional Data Assimilation and Prediction System } three models are provided by Korea Meteorological Administration (KMA)
*CWW3: Coastal WAVEWATCH III

- **Statistical indicators (correlation coefficient (r), index of agreement (IOA), Hanna and Heinold (HH))**

$$r = \frac{\sum_1^n (O_i - \bar{O})(M_i - \bar{M})}{\sqrt{\sum_1^n (O_i - \bar{O})^2}\sqrt{\sum_1^n (M_i - \bar{M})^2}}$$ Range: −1 (negative) ~ 1 (positive)

$$IOA = 1 - \left[\frac{\sum_1^n (M_i - O_i)^2}{\sum_1^n (|M_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}\right]$$ Range: 0 (bad) ~ 1 (good)

$$HH = \sqrt{\frac{\sum_1^n (M_i - O_i)^2}{\sum_1^n M_i O_i}}$$ Range: 0 (good) ~ ∞ (bad)

O_i: i-th observed data, M_i: i-th modeled data, n: number of data pairs, $\bar{M}, \bar{O}$: mean values

Results

(a) SWH

	Correlation coefficient (r)				Index of agreement (IOA)				Hanna and Heinold (HH)			
	DJ	JW	IJ	JB	DJ	JW	IJ	JB	DJ	JW	IJ	JB
Case 1	0.90	0.94	0.88	0.86	0.94	0.94	0.92	0.91	0.30	0.31	0.34	0.37
Case 2	0.95	0.95	0.91	0.87	0.95	0.97	0.89	0.92	0.27	0.21	0.39	0.31
Case 3	0.95	0.93	0.90	0.89	0.95	0.96	0.89	0.91	0.27	0.25	0.38	0.32
Case 4	0.94	0.93	0.92	0.88	0.95	0.95	0.92	0.93	0.27	0.26	0.32	0.30
Case 5	0.93	0.93	0.90	0.88	0.95	0.96	0.89	0.92	0.26	0.24	0.37	0.31

(b) T_{peak}

	Correlation coefficient (r)				Index of agreement (IOA)				Hanna and Heinold (HH)			
	DJ	JW	IJ	JB	DJ	JW	IJ	JB	DJ	JW	IJ	JB
Case 1	0.34	0.39	0.14	−0.28	0.48	0.52	0.41	0.35	0.57	0.50	0.60	0.96
Case 2	0.65	0.70	0.47	0.07	0.76	0.82	0.68	0.43	0.24	0.20	0.26	0.51
Case 3	0.64	0.67	0.46	0.05	0.75	0.81	0.67	0.43	0.24	0.21	0.26	0.53
Case 4	0.61	0.69	0.46	0.07	0.72	0.80	0.65	0.42	0.27	0.23	0.30	0.62
Case 5	0.64	0.65	0.46	0.03	0.73	0.78	0.64	0.41	0.26	0.24	0.29	0.70

Figure 2. Comparison of statistical values for five cases evaluating (a) significant wave height (SWH) and (b) peak wave period (T_{peak}). The values presented are the correlation coefficient (r), index of agreement (IOA), and Hanna and Heinold (HH) index. Each column represents different observation points (DJ, JW, IJ, and JB) with varying color (red: relatively good and blue: relatively bad) to indicate the range of the values.

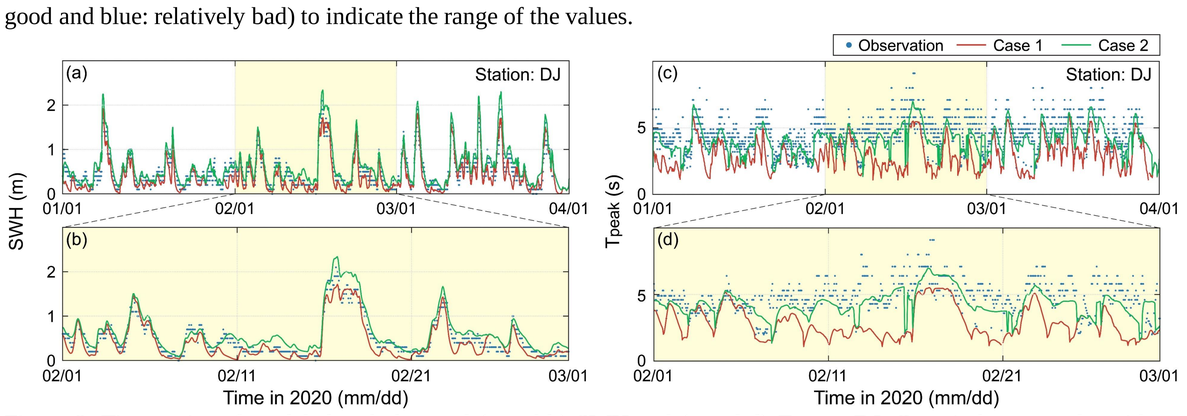


Figure 3. Time series of modeled and observed (a and b) SWH and (c and d) T_{peak} at DJ. Case 1 shows results without wave boundary conditions, while Case 2 incorporates wave boundary conditions. For clarity, a zoomed-in view of the one-month time series for SWH and T_{peak} is presented.

- 외해측(DJ)에서 내만측(JB)로 이동할수록 파랑 모델의 정확도가 제한되었다.
- 외해 개방 경계에 파랑 경계조건을 적용한 경우(Case 2), 유의파고(SWH)와 파주기(T_{peak})에 대한 모델의 정확도가 개선되었으며, 특히, 외해측에 위치한 DJ와 JB에서의 개선이 두드러졌다.

Discussion

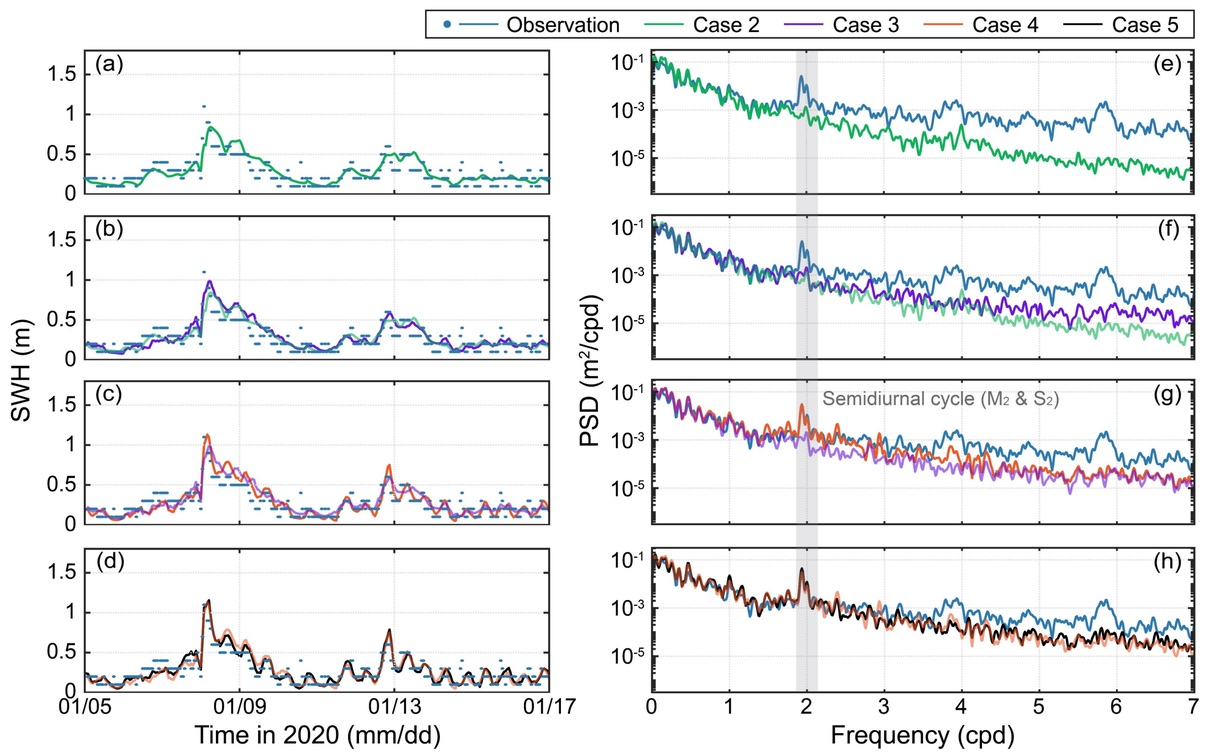


Figure 4. Observed SWH at JB is presented alongside modeled SWH results that sequentially control boundary condition (Case 2), wind input (Case 3), hydrodynamic condition (Case 4), and coupling method (Case 5). Refer to Table 1 for details on model input for each case. (a–d) Time series showcases January 5–17 for clarity. (e–h) The power spectral density (PSD) represents both modeled and observed SWH over the 3-month simulation period, processed using fast Fourier transform analysis. For clarity, the results were smoothed using a Parzen window to 0.110 cycles per day (cpd). Vertical gray shading indicates the semidiurnal tidal cycle. Except for Case 2 (a and e), subsequent cases are overlaid with previous ones with adjusted opacity.

- 고해상도의 바람 입력자료를 적용한 경우(Case 3), 짧은 주기(>2 cpd)에서 모델의 정확도가 개선되었으며, 해수 유동 조건을 입력한 경우(Case 4–5)에서는 조석(반일주조) 주기대에서의 파랑의 변형이 재현되었다.

- **Inverse wave age (IWA): An indicator of wave type**

$$\mathrm{IWA} = (U_{10}\cos\theta_r)/C_p \qquad \begin{cases} Swell: & IWA < 0.15 \\ Intermediate\ waves: & 0.15 < IWA < 0.83 \\ Wind\ sea: & IWA > 0.83 \end{cases}$$

U_{10}: 10-m wind speed, θ_r: relative angle between wave and wind direction,
C_p: phase speed at spectral peak ($gT_{peak}/(2\pi)$), g: gravitational constant, T_{peak}: peak wave period

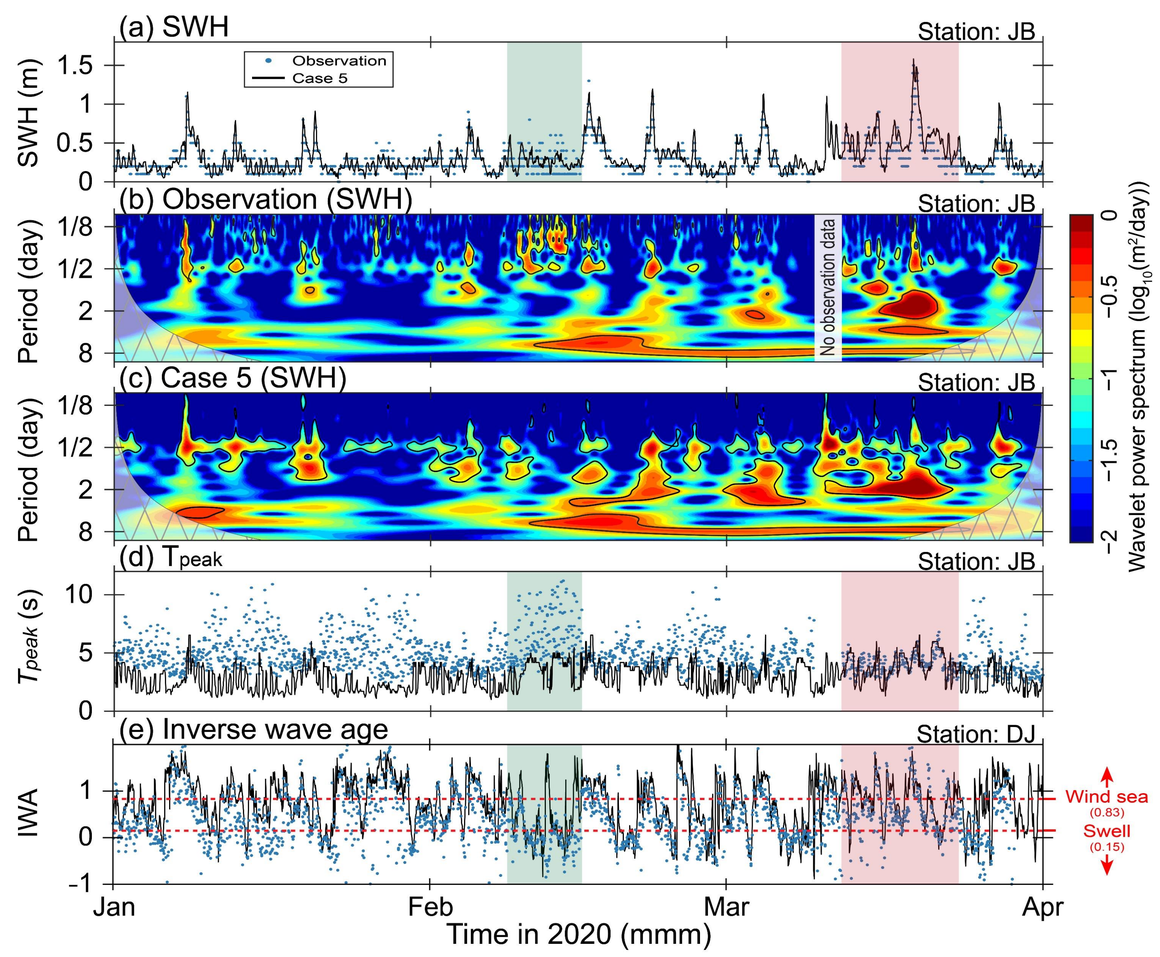


Figure 5. (a) Time series and (b and c) wavelet analysis of the modeled and observed SWH at JB. The black lines in (b and c) indicate the regions corresponding to a 99% confidence interval in the wavelet analysis. (d) Modeled and observed T_{peak} at JB wave buoy. Inverse wave age (IWA) at DJ, calculated using wave and atmospheric variables. The red horizontal lines indicate the thresholds for wind-sea (0.83) and swell (0.15). In panels (a) and (d and e), the red and green bounding boxes highlight representative periods that clearly illustrate the characteristics of the wind-sea and swell phases.

- 장봉도(JB)에서 나타나는 파랑의 변형은 파형(wave type)에 따라서 다른 패턴을 보였다.
- 너울성 파랑(swell)이 지배적인 시기에서는 짧은 주기(<1/2 day)의 유의파고 변형과 5–10 s 범위에서의 파주기 변동이 확인되었으나, 모델 결과에서는 확인되지 않았다.
- 이 시기의 모델의 성능이 제한되는 원인은 분석에 활용된 모델 격자의 제한된 취송거리가 원인으로 추정되며, 광역 파랑모델 가동을 통한 파랑 경계조건의 개선을 통해 해결될 수 있을 것으로 예상된다.

Conclusions

- 본 연구에서는 경기만 해역을 대상으로 파랑 모델의 정확도 개선을 위한 여러 방법을 적용 및 평가하였으며, 너울성 파랑이 지배적인 시기에 대한 모델 정확도를 높이기 위한 연구의 필요성이 확인되었습니다.
- 향후, 기상 모델과의 양방향 접합, 광역 파랑모델에서의 네스팅 기법을 통해 보다 모델의 정확도를 개선할 수 있을 것으로 예상되며, 모델의 추가 개선에 대한 연구의 방향을 보여줍니다.

- 이 연구는 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2022-00155915, 인공지능융합혁신인재양성사업 (인하대학교))
- 이 연구는 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 해양·극지기초원천기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 한국연구재단 NRF-2021M1A5A1075516) (KOPRI-PN22013)