

서남해 파랑 후측모의 실험을 통한 왕등도 인근 파랑 특성 분석

Analysis of Wave Characteristics near Wangdeungdo through Southwest Sea Wave Hindcasting

노영주* · 선민영**

Young Ju Noh* and Min Young Sun**

요 지 : 해상풍력 단지 개발 시 파랑은 구조물 설계 하중 결정과 단지 배치 등에 있어서 필수적으로 고려되어야 한다. 그러나 해상풍력 개발지역으로 간주되고 있는 왕등도 인근 해역에 대한 파랑 후측 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 MIKE 21 모델을 이용하여 2021년 1년간 왕등도 중심의 서남해 파랑 후측을 통해 왕등도 인근 파랑 특성을 분석하였다. 파랑 후측 결과 상왕등도 부이와 부안 부이에서 유의파고에 대한 RMSE가 0.177, 0.225 Pearson 상관계수는 0.971, 0.970으로 높은 재현성을 보여주었다. 모델의 검증 후 왕등도 인근 해역에 대한 파랑 특성을 분석한 결과 계절에 따라 파랑이 크게 달라지는 경향을 보였다. 최대 유의파고 발생 시 위치별로 큰 차이를 보였으며 이는 해상풍력 구조물의 설계 하중 결정에 있어 중요한 영향을 미칠 것으로 예상된다.

핵심용어 : 해상풍력단지, 파랑 후측, 유의파고, MIKE 21

Abstract : Wave conditions are crucial for offshore wind farm design, particularly in determining structural loads and layout. However, there is limited wave hindcasting research for the Wangdeungdo Island area, a potential offshore wind site. This study used the MIKE21 model for a year-long wave hindcast around Wangdeungdo in 2021. Validation showed high reproducibility for significant wave heights with RMSE values of 0.177 and 0.225 and Pearson correlations of 0.971 and 0.970 at Sangwangdeungdo and Buan buoys. Subsequent analysis of the wave characteristics near Wangdeungdo indicated significant seasonal variations and differences in maximum significant wave heights across locations, which are expected to significantly impact the design loads for offshore wind structures.

Keywords : offshore wind farms, wave hindcast, significant wave height, MIKE 21

1. 서 론

기후 변화와 환경 문제에 대응하기 위하여 전 세계 국가들이 탄소 배출을 줄이고 재생 에너지로의 전환을 적극적으로 추진하고 있다. 이 중 해상풍력발전은 최근 풍력 터빈의 대형화 및 대규모 단지 개발에 따른 경제성이 개선됨에 따라 타 재생에너지원 대비 경쟁력을 가지게 되어 에너지 생산의 중요한 축으로 고려되고 있다.

해상풍력의 개발을 위한 입지 조사와 구조물 설계에 있어 해당 부지의 파랑 특성은 가장 중요한 인자 중에 하나이다 (Kim and Kang, 2010). 해상풍력 단지개발에서 해상풍력 설계기준인 IEC 61400-3-1(2019)에 따르면 설계 하중 케이스 (DLC) 6.1, 6.2, 6.3과 같이 파랑이 극치 해상 상태(Extreme

sea state)에 해당하는 경우 1년 및 50년 재원주기 극치유의파고가 요구되며 이는 사이트 측정값을 분석하거나 파랑 후측을 통해 결정하여야 한다.

파랑 후측 연구로는 Kang et al.(2016)은 장기간의 연안 파랑 후측을 통해 권역별 통계분석을 수행하였다. Eum et al. (2016)은 수위와 해류의 영향을 고려한 파랑 후측 모델링을 수행하였으며 Ryu et al.(2015)는 파랑 수치 모의를 수행하여 서남해 해상풍력 발전단지의 해저케이블 경과지와 해저케이블 보호 공법 설계를 위한 기초자료를 제공하였다. Jeong et al.(2018)은 “전국파랑관측자료시스템”의 파랑 자료 품질관리를 수행하기 위해 수치모델링을 통한 역추산 파랑 자료를 산출하였다.

파랑 후측 연구는 한국 해역을 대상으로 다수 진행되었지

*전북대학교 에너지공학과 석사과정(Master Course, Department of Energy Engineering, Jeonbuk National University)

**전북대학교 기계설계공학부 부교수(Corresponding author: Min Young Sun, Associate Professor, Department of Mechanical Design Engineering, Jeonbuk National University, 567 Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju, Jeollabuk-do 54896, Korea, Tel: +82-63-270-2453, smy4439@jbnu.ac.kr)

만, 서남해 해상풍력 확산단지로 고려되고 있는 왕등도 인근 해역에 대한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 또한 국내에서는 파랑 후측 연구 시 파랑 모델은 SWAN이 주로 이용되며 MIKE 21 SW를 사용한 연구는 드물다. MIKE 21 SW는 여러 응용 분야에서 검증된 모델로 SWAN과 동등한 성능을 발휘하고 지형에 대한 그리드 생성이 적합하여 엔지니어링 분야에 널리 사용된다(Xiang et al., 2019). 따라서 본 연구에서는 MIKE 21 SW를 사용하여 왕등도를 중심으로 한 서남해 해역에 대해 파랑 후측모의 실험을 진행하였다. 파랑 후측 결과는 서남해 인근 부이 데이터를 활용하여 검증하고 왕등도 인근 해역에 대한 파랑 특성을 분석하였다.

2. 연구 방법

파랑 후측모의 실험은 MIKE 21 SW 모델을 이용하였으며 모델의 실험 영역은 전해역의 결과를 상세역에 대한 경계조건으로 입력하기 위해 Fig. 1과 같이 전해역 이후 상세역에 대한 파랑 후측모의 실험을 수행했다. 파랑 후측모의 실험 시 수위와 유속의 영향은 Hydrodynamic(HD) 모델인 MIKE 21 Flow Model의 결과로 입력되었다. 파랑 후측 기간은 왕등도 인근 상왕등도 부이의 누락 데이터가 가장 적은 2021년 1

년간 수행되었다. 파랑 모델에 입력된 바람장은 미국 국립환경 예측센터(National Centers for Environmental Prediction: NCEP)의 $0.205^{\circ} \times 0.204^{\circ}$ 의 수평 격자 해상도를 가진 CFSR 데이터를 사용하였다(Saha et al., 2011). Kim et al.(2018)은 3세대 재분석 데이터 중 서남해 해역에서 CFSR 데이터가 높은 신뢰성을 가지고 있다고 평가했다. 수심 데이터는 전해역의 경우 수평 해상도가 15초인 격자형 글로벌 수심 데이터(GEBCO, 2023)를 사용했고 상세역에 대해서는 국립해양조사원에서 제공하는 수평방향으로 150 m 간격의 해양수치모델 전용 수심데이터(Yoo et al., 2019)를 사용하였다. 전해역과 상세역에 대한 격자 간격은 10~3 km와 1500~700 m로 관심 영역에서 격자가 조밀하게 생성하였다.

2.1 관측 데이터

서남해 인근에 위치한 관측 데이터는 국립해양조사원에서 제공하는 해양관측부이(상왕등도) 및 조위관측소(위도) 데이터와 기상청에서 제공하는 파고부이(비안도, 위도, 영랑) 및 해양기상부이(부안) 데이터를 활용하였다. 관측 데이터는 HD 및 SW 모델에 대한 검증으로 사용되었으며 각 관측 부이의 위치는 Fig. 2과 같고 관측 부이의 좌표, 데이터 유형, 관측 주기 및 관측 시작일은 Table 1과 같다.

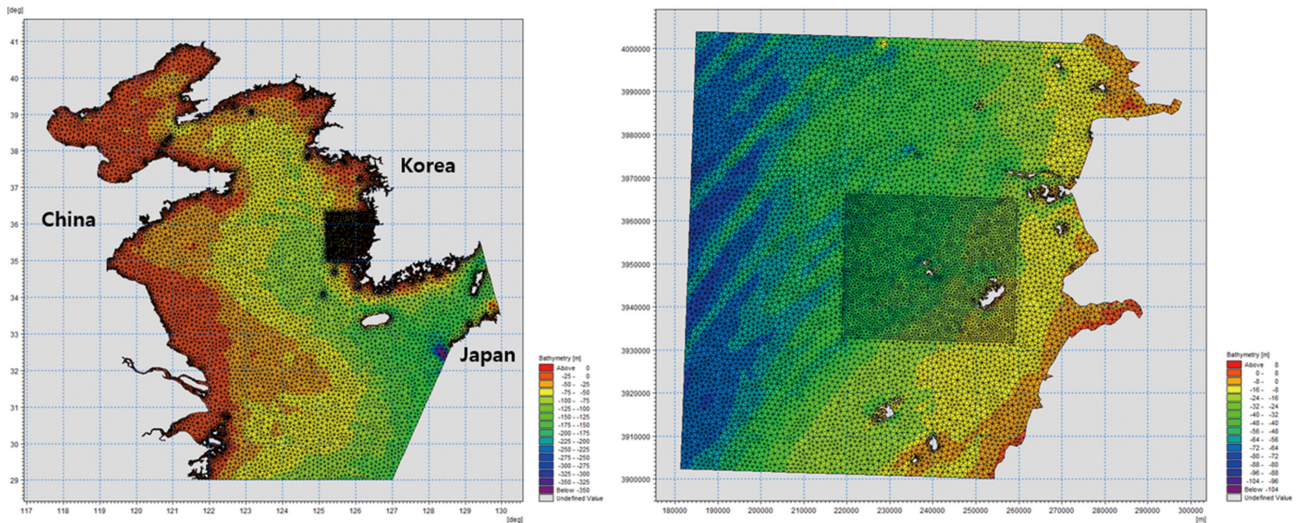


Fig. 1. Bathymetry and mesh for far field domain and near field domain.

Table 1. Observation data of buoy and tide station

Buoy	Latitude	Longitude	Data type	Time step	Start date
Sangwangdeungdo	35.653°	126.194°	Wave Current	1 hour	2019-01-01 2016-01-01
Buan	35.658°	125.814°	Wave	1 hour	2015-12-22
Biando	35.436°	126.177°	Wave	1 hour	2011-01-15
Wido	35.658°	126.261°	Wave	1 hour	2017-11-16
Younggwang	35.740°	126.352°	Wave	1 hour	2013-07-27
Wido (Tide Station)	35.618°	126.302°	Water Level	1 hour	2000-01-01



Fig. 2. Location of observation station in the southwestern sea of Korea.

2.2 Hydrodynamic 모델

2.2.1 지배방정식

HD 모델은 자유표면 유동에 대한 수력학적 관련 연구에 널리 사용되며 수위와 유속에 대한 결과를 제공한다. 이 모델의 지배방정식은 비압축성 Reynolds 평균 Navier-Stokes 방정식을 기반으로 하는 2차원 천수 방정식이다. 지배방정식의 공간 이산화는 격자셀 중심 유한 체적 방법을 사용하여 수행된다(DHI, 2017a). 데카르트 좌표계에서 지배방정식은 연속 방정식(1)과 운동량 방정식(2), (3)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} = & fhv - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_A}{\partial x} \\ & - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\tau_{fx}}{\rho_0} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - F_{vx} + \frac{\partial hT_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{xy}}{\partial y} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial hvu}{\partial x} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} = & -fhu - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_A}{\partial y} \\ & - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} - \frac{\tau_{fy}}{\rho_0} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - F_{vy} + \frac{\partial hT_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{yy}}{\partial y} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 t 는 시간이며 x, y 는 데카르트 좌표이다. h 는 총 수심이며 η 는 표면 고도이고 d 는 수심이다. u, v 는 x, y 방향의 속도 성분이며 f 는 코리올리 매개변수이다. g 는 중력 가속도이고 p_A 는 자유 표면에서 대기압을 나타내며 ρ 는 물의 밀도, ρ_0 는 물의 참조 밀도이다. τ_{fx}, τ_{fy} 는 바닥 마찰, 표면 마찰 및 유동 저항에 의한 x, y 성분의 응력이다. τ_{sx}, τ_{sy} 는 바람에 의한 x, y 성분의 표면 응력이며 F_{vx}, F_{vy} 는 초목으로 인한 항력이다. 횡방향 응력인 T_{xx}, T_{xy}, T_{yy} 는 점성 마찰, 난류 마찰 및 차이 이류를 포함한다.

2.2.2 모델의 설정

HD 모델은 해석 영역에 따른 바람 마찰, 바닥 저항 및 와

Table 2. HD sensitivity test cases

Case	Manning	Wind Friction		Eddy Viscosity
1	Varying (40~47)	2 m/s 10 m/s	0.001225 0.004525	0.28
2	47 m ^(1/3) /s	2 m/s 10 m/s	0.001225 0.004525	0.28
3	47 m ^(1/3) /s	2 m/s 10 m/s	0.001225 0.004525	0.45
4	47 m ^(1/3) /s	7 m/s 25 m/s	0.001255 0.002425	0.28

Table 3. HD sensitivity test results

Case	RMSE	r	bias
1	0.112 m/s	0.837	0.061 m/s
2	0.105 m/s	0.871	0.058 m/s
3	0.106 m/s	0.869	0.058 m/s
4	0.108 m/s	0.867	0.053 m/s

동 점성 등의 매개변수 입력이 필요하여 제한된 데이터를 활용한 민감도 분석을 통해 매개변수 추정을 수행했다. 상세역에 대한 매개변수의 추정은 서남해 해역에 대한 선행 연구(Kim et al., 2021)를 바탕으로 민감도 분석을 수행하여 이루어졌다. 민감도 분석은 Table 2와 같이 진행되었으며 선행 연구에서 선택한 매개변수(Case 1)를 기준으로 Manning 계수, 와동 점성, 바람 마찰 순으로 매개변수 입력값을 변경해 상왕등도 부이의 유속 데이터와의 민감도 분석을 수행하였다. Case별로 평균제곱근오차(RMSE)와 Pearson 상관계수(r) 및 bias를 계산한 결과 Table 3과 같이 Case 2번에서 가장 재현성이 우수했고 이를 모델에 적용하였다. RMSE, Pearson 상관계수 및 bias에 대한 계산식은 식(4), (5), (6)과 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (OBS_i - SIM_i)^2} \quad (4)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (OBS_i - \overline{OBS})(SIM_i - \overline{SIM})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (OBS_i - \overline{OBS})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (SIM_i - \overline{SIM})^2}} \quad (5)$$

$$bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (OBS_i - SIM_i) \quad (6)$$

여기서 OBS_i 는 관측된 값이고 SIM_i 는 시뮬레이션 된 값이며 $\overline{OBS}, \overline{SIM}$ 은 각각 관측된 값과 시뮬레이션 된 값의 평균이다. 최종 HD 모델 설정은 Table 4와 같다.

2.3 파랑 모델

2.3.1 지배방정식

파랑 모델은 연안 및 해안 지역에서 바람에 의해 생성된 파의 발달, 쇄파 및 변형을 예측한다. 지형 및 스펙트럼 공간에서 지배방정식은 격자 셀 중심에서 적용되는 유한 체적 방

Table 4. HD model setting

Settings	Value
Simulation Period	2021-01-01 00:00 ~ 2021-12-31 23:00(KST) 1-hourly output
Eddy Viscosity	Smagorinsky formulation constant: 0.28
Wind Forcing	CFSv2 data
Wind Friction	[Far field] 7 m/s 0.001255, 25 m/s 0.002425
	[Near field] 2 m/s 0.001225, 10 m/s 0.004525
Bed Resistance	[Far field] Manning: 35 m ^(1/3) /s if depth < -25 m, else 38 m ^(1/3) /s
	[Near field] Manning: 47 m ^(1/3) /s
Boundary Condition	DTU10 Tide Model

Table 5. Near field SW case setting

Case	Setting			Value		
	Current	Air-Sea Interaction	C _{dis}	DELTA _{dis}	k _n	
1	HD Simulation	Coupled	1.687	0.5	0.024 m	
2	Not include	Coupled	1.45	0.5	0.055 m	
3	HD Simulation	Uncoupled	1.84	0.5	0.0075 m	
4	Not include	Uncoupled	1.56	0.5	0.0185 m	

Table 6. Case results for significant wave height

Case	Sangwangdeungdo buoy			Buan buoy		
	RMSE	r	bias	RMSE	r	bias
1	0.283 m	0.959	-0.051 m	0.340 m	0.955	0.016 m
2	0.288 m	0.956	-0.054 m	0.354 m	0.953	-0.005 m
3	0.268 m	0.964	-0.052 m	0.330 m	0.957	-0.026 m
4	0.274 m	0.963	-0.063 m	0.339 m	0.956	-0.003 m

법을 통해 이산화된다(DHI, 2017b). 이 모델의 지배방정식은 파랑작용 평형방정식이 사용되며, 데카르트 좌표계에서 파랑 작용 평형방정식은 식(7)과 같다.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad (7)$$

여기서 $N(\vec{x}, \sigma, \theta, t)$ 은 파랑작용밀도이고, t 는 시간, σ 는 고유 각 주파수이다. θ 는 파동방향이고 $\vec{x} = (x, y)$ 는 데카르트 좌표이다. $\vec{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ 는 4차원 위상공간($\vec{x}, \sigma, \theta$)에서 파군의 전파속도를 나타내며, S 는 에너지 평형 방정식에 대한 에너지 생성 항이다. ∇ 는 $(\vec{x}, \sigma, \theta)$ 공간에서 4차원 미분연산자이다. 에너지 생성항은 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \quad (8)$$

여기서 S_{in} 은 바람 에너지에서 파동 에너지로의 운동량 전달, S_{nl} 은 비선형 파랑 상호작용에 의한 에너지 전달, S_{ds} 는 백파에 의한 에너지 소산을 나타낸다. S_{bot} 은 바닥 마찰에 의한 에너지 소산, S_{surf} 는 쇄파에 의한 에너지 소산을 나타낸다.

찰이 있으며 정확한 파랑 후측을 위해 매개변수 추정이 필요하다. Kim and Kang(2010)에 따르면 회절과 쇄파 관련 계수는 모델 결과에 큰 영향을 미치지 않았다. 따라서 회절과 쇄파 관련 계수에 대해서는 기본값을 적용하고 백파 계수(C_{dis} , $DELTA_{dis}$)와 바닥 마찰(Nikuradse, k_n)에 대한 매개변수 추정을 수행하였다. 매개변수 추정 시 유속과 대기-해상 상호작용의 결합상태에 따라 Case를 나누어 진행하였다. 대기-해상 상호작용의 결합 상태는 해석 영역의 크기에 따라 결정되며 해석 영역의 크기가 소규모일 경우 결합 상태를 사용할 시 유의파고를 과대평가할 수 있기 때문에 파랑 후측 정확도에 큰 영향을 미친다. 매개변수의 세부 조정은 2021년 1월에 발생한 상황등도와 부안 부이의 최대 유의파고가 파랑 후측 결과와 일치하도록 백파 계수와 바닥 마찰을 조정하였다. Case에 따른 최종 매개변수 입력 값은 Table 5와 같고 유의파고 평가 결과는 Table 6과 같다. Case에 따라 유의파고를 평가한 결과 재현성이 가장 높았던 Case 3과 같은 설정과 매개변수로 파랑 후측을 수행하였다. 최종 SW 모델의 설정은 Table 7과 같다.

3. 연구 결과

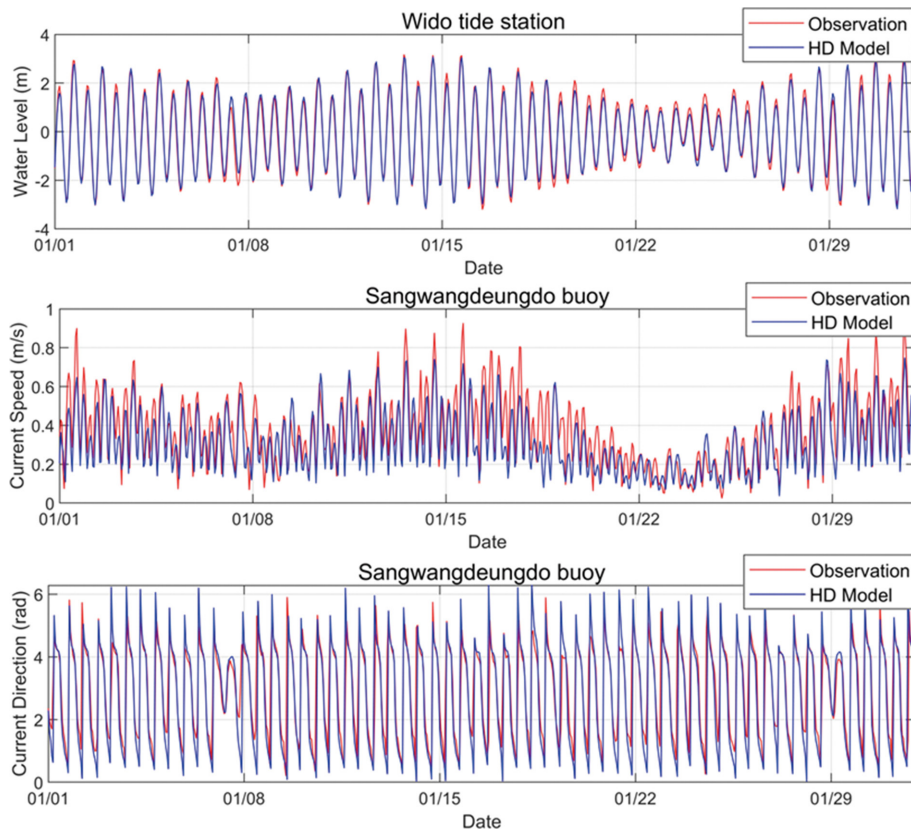
2.3.2 모델의 설정

파랑 모델의 매개변수에는 회절, 쇄파, 백파 계수, 바닥 마

파랑 모델의 검증에 앞서 파랑 후측모의 실험에 활용된

Table 7. SW model setting

Settings	Value	
Simulation Period	2021-01-01 00:00 ~ 2021-12-31 23:00 (KST) 1-hourly output	
Time Step	0.01 ~ 3600 s	
Water Level Condition	HD Result data	
Current Condition	[Far field]	Not include
	[Near field]	HD Result data
Wind Forcing	[Far field]	Charnock 0.006 (Coupled)
	[Near field]	Charnock 0.02 (Uncoupled)
Water Properties	CFSv2 data	
Air Properties	CFSv2 data	
Energy Transfer	Include quadruplet-wave interaction (no triads)	
Wave Breaking	Included, Specified Gamma, $\gamma = 0.8$, $\alpha = 1$	
Bottom Friction	[Far field]	Nikuradse, $k_n = 0.03$ m
	[Near field]	Nikuradse, $k_n = 0.0075$ m
White Capping	[Far field]	$C_{dis} = 1.33$, $DELTA_{dis} = 0.5$
	[Near field]	$C_{dis} = 1.84$, $DELTA_{dis} = 0.5$
Boundary Condition	[Far field]	Closed boundary
	[Near field]	Far field SW Result data

**Fig. 3.** Comparisons between the observation and HD results.

HD 모델의 결과를 검증하였다. Fig. 3은 관측 데이터와 HD 모델 결과의 경향성을 알아보기 위해 2021년 중 1월에 한해서 비교하였고 Table 8은 파랑 후측 기간에 대한 모델의 평가이다. 수위의 경우 RMSE가 0.241 m Pearson 상관계수가

0.991로 높은 정확성을 보여주지만 유속과 유향 모두 RMSE가 0.119 m/s, 1.132 rad Pearson 상관계수는 0.792, 0.787로 재현성이 낮았다. 이는 DTU 10 Tide Model을 포함한 전지구 조석 모델들이 얇은 바다와 연안 지역을 포함할 경우, 해

Table 8. Evaluation of the HD model

	RMSE	r	bias
Wido tide station	0.241 m	0.991	0.100 m
Sangwangdeungdo buoy (CS)	0.119 m/s	0.792	0.049 m/s
Sangwangdeungdo buoy (CD)	1.132 rad	0.787	0.216 rad

수면과 해류 특성을 정밀하게 예측하기 어렵기 때문이다 (Romanenkov et al., 2023).

Fig. 4에서 H_s 와 T_p 는 각각 유의파고와 침두주기를 나타내며 상왕등도와 부안 부이의 관측 데이터와 파랑 후측 결과를

Table 9. Model evaluation for H_s at each observation buoy

	RMSE	r	bias
Sangwangdeungdo buoy	0.177 m	0.971	0.032 m
Buan buoy	0.225 m	0.970	-0.051 m
Biando buoy	0.217 m	0.953	-0.020 m
Wido buoy	0.255 m	0.961	-0.105 m
Younggwang buoy	0.237 m	0.926	-0.049 m

비교하였다. 관측 부이에서 유의파고에 대한 모델의 평가는 Table 9와 같다. 상왕등도와 부안 부이에서 RMSE가 0.177 m, 0.225 m Pearson 상관계수는 0.971, 0.970으로 높은 정확도

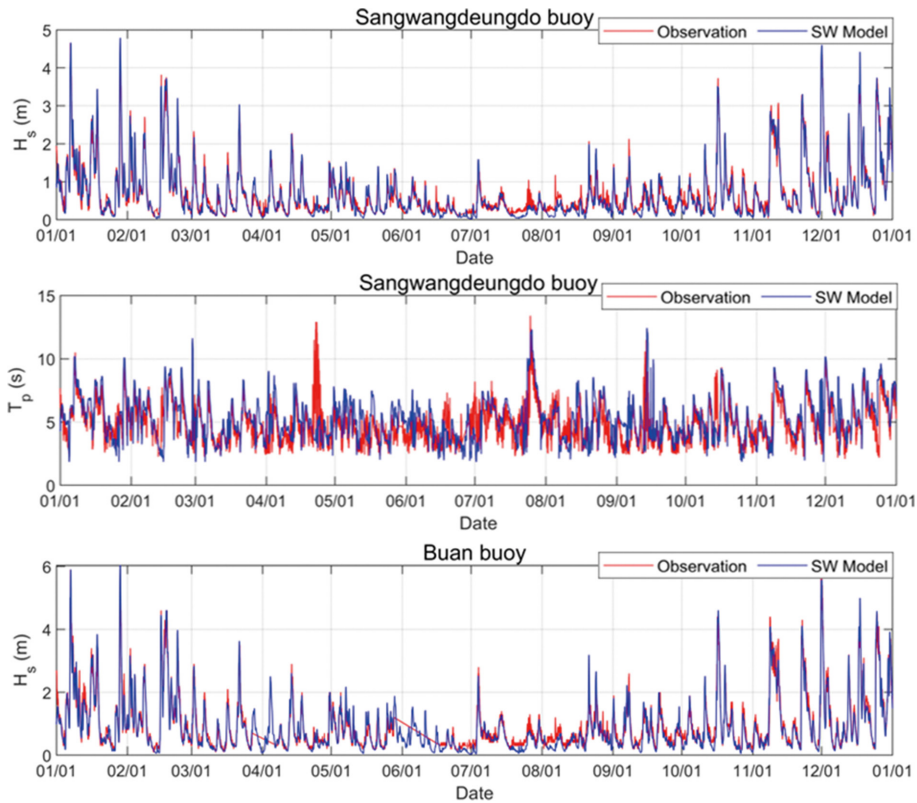
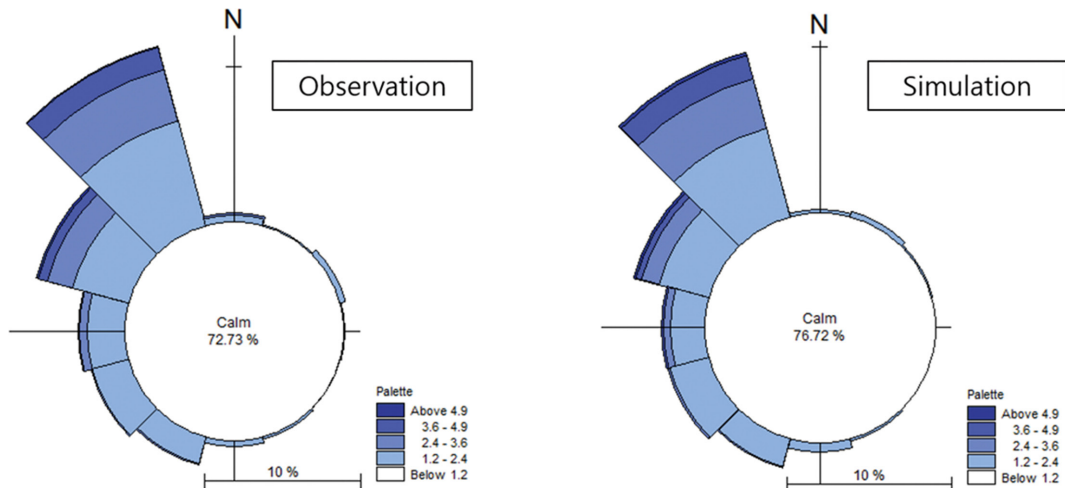
**Fig. 4.** Comparisons between the observation and SW results.**Fig. 5.** Mean wave direction as a rose plot at Buan buoy.

Table 10. Comparison of observation and SW results

	Sangwangdeungdo buoy	SW model
Date	2021-1-7 04:00	2021-1-7 07:00
H_s	4.66 m	4.662 m
T_p	10.17 s	10.165 s

를 보였다. 그러나 상왕등도 부이에서 관측된 최대 유의파고 시기는 1월 7일 4시였으나, 모델의 결과는 1월 28일 21시로 예측되었다. 유속을 고려하지 않을 경우 최대 유의파고는 1월 7일 7시에 발생하였으며 유속과 유향의 재현성이 낮아 유의파고 예측에 오차가 발생한 것으로 보인다. 비안도와 위도 부이에서는 RMSE가 0.217 m, 0.255 m Pearson 상관계수는 0.953, 0.961로 비교적 정확도가 높았다. 영광 부이에서는 RMSE가 0.237 m로 타 부이와 비슷한 결과였으나 Pearson 상관계수는 0.926으로 다른 부이에 비해 낮은 결과를 보였다. 이는 상왕등도와 부안 부이 데이터를 기준으로 매개변수 추정이 이루어졌기 때문에 영광 부이 인근의 해양 환경 특성을 충분히 반영하지 못한 것으로 추정된다. 침두주기의 경우 Table 10에서 볼 수 있듯이 상왕등도 부이에서 최대 유의파고 발생 시 침두주기는 실제 관측치에 근접한 결과를 얻은

**Fig. 6.** Geographical locations of points.

것을 확인할 수 있었다. 그러나 유의파고가 낮게 관측된 기간에는 침두주기를 다소 과도하게 예측하였다. Fig. 5에서는 부안 부이에서 실제로 관측된 평균 파향과 SW 모델의 평균 파향을 보여준다. 두 평균 파향 모두 높은 파고에 대해서 주로 북서쪽에서 파도가 접근하는 경향을 보이며 모델이 파향을 정확하게 재현하였다.

모델의 검증 후 Fig. 6과 같이 왕등도 인근 4곳에 대한 파랑 분포 특성을 확인해 보았다. Fig. 7과 같이 지점별로 파랑

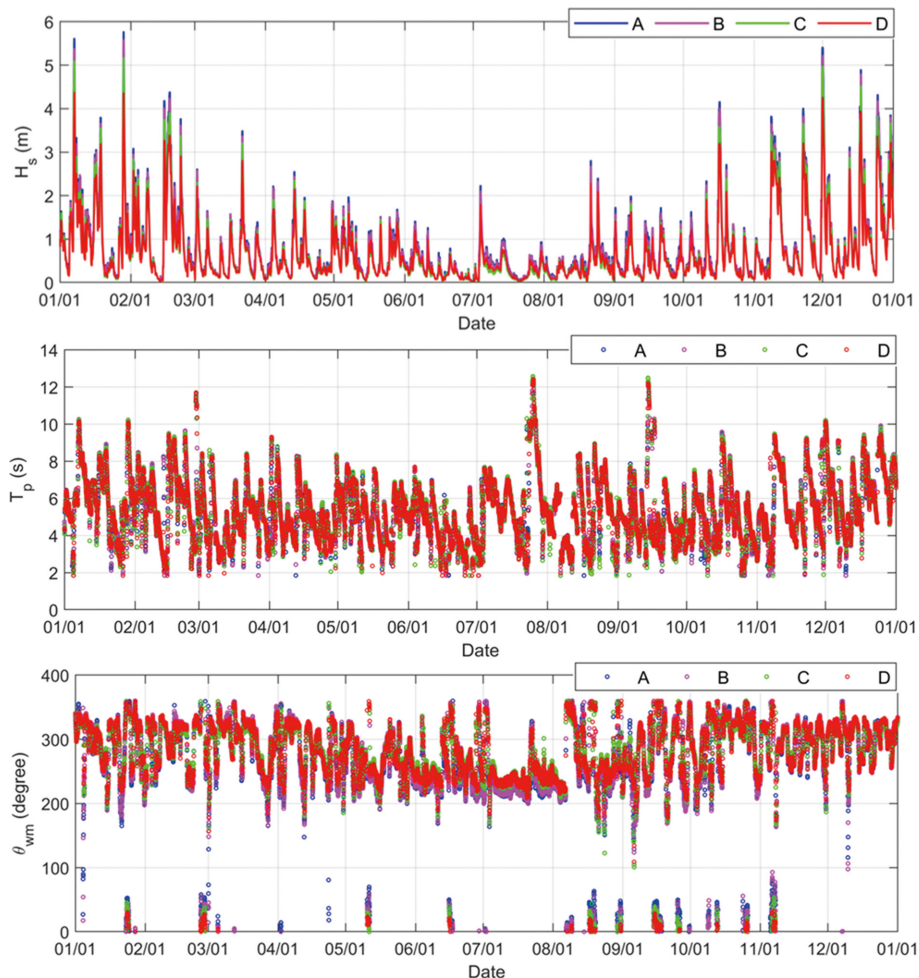
**Fig. 7.** Comparison of H_s , T_p , and θ_{wm} at Points A,B,C and D.

Table 11. Wave hindcast results at the moment of maximum significant wave height

	A	B	C	D
H_s	5.78 m	5.60 m	5.19 m	4.37 m
T_p	10.13 s	10.16 s	10.13 s	10.00 s
θ_{wm}	307.77°	311.20°	306.27°	312.64°

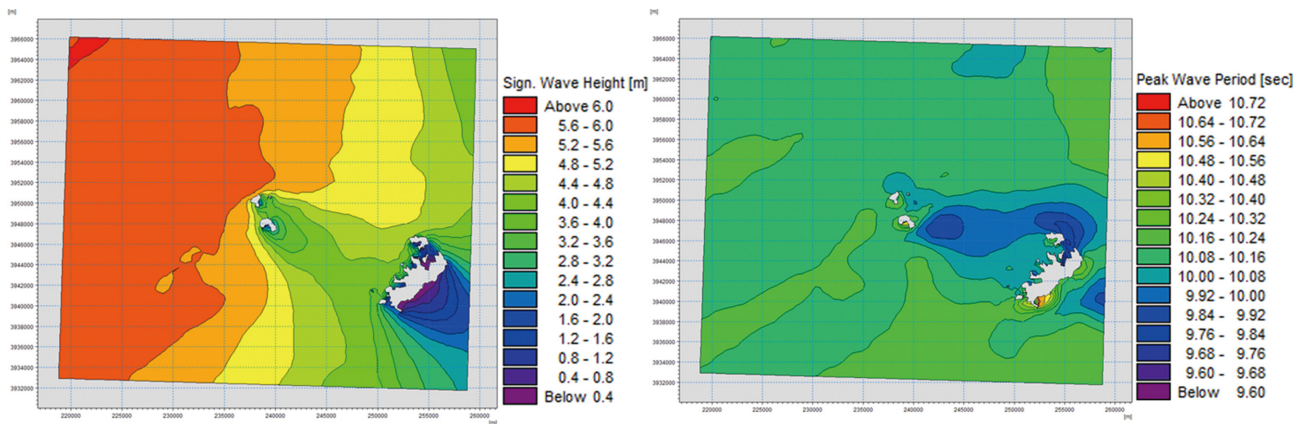
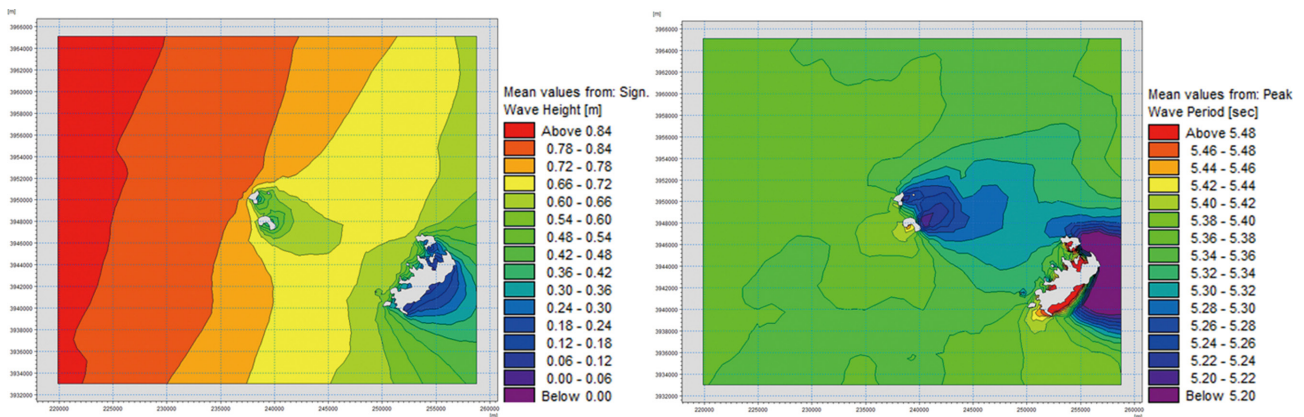
특성을 비교한 결과 모든 지점이 겨울철(12, 1, 2월)에 4 m를 초과하는 유의파고가 자주 나타났으며 파향은 북서풍의 영향으로 북서 계열 파가 우세하였다. 반면 여름철(6, 7, 8월)에는 다른 계절에 비해 상대적으로 유의파고가 낮았으며 주로 남서쪽에서 오는 경향을 보였다. 침두주기의 경우 유의파고가 강한 겨울철과 여름철 태풍의 영향에 의해서 10초 이상의 침두주기가 다수 발생하였고 봄과 가을의 경우 상대적으로 낮은 침두주기가 나타났다. Table 11은 최대 유의파고가 발생한 시점에서 지점별 유의파고, 침두주기와 평균 파향을 나타낸다. 침두주기와 평균 파향의 경우 비슷한 결과를 나타냈지만 유의파고는 A 지점은 5.78 m, D 지점은 4.37 m로 1.41 m의 큰 차이가 발생했다. Fig. 8은 최대 유의파고와 침두주기의 분포를 나타내며 전반적으로 서쪽이 강한 유의파고가 발생했으며 왕등도 인근 동쪽에서 회절의 영향으로 파동에

너지가 감소하여 약한 유의파고가 나타나는 모습을 보였다. Fig. 9는 연평균 유의파고와 침두주기의 분포를 나타내며 연평균 유의파고의 경우 최대 유의파고 분포와 비슷한 양상을 보였다.

4. 결 론

파랑은 해상풍력 구조물 설계 하중 결정과 단지 배치, 구조물의 세굴 및 설치 과정의 부유사 확산 등에 있어서 필수적으로 고려되어야 한다. 그러나 서남해 해상풍력 확산단지로 고려되고 있는 왕등도 인근 해역 파랑 후측에 대한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 파랑 모델을 통하여 왕등도를 중심으로 한 서남해에 대해서 파랑 후측도의 실험을 진행하고 왕등도 인근 해역에 대해 파랑 특성 분석을 수행하였다.

모델의 검증 결과 상왕등도와 부안 부이에서 유의파고에 대한 모델의 평가에서 RMSE가 0.177, 0.225이며 Pearson 상관계수는 0.971, 0.970으로 높은 재현성을 보여주었다. 비안도와 위도 부이의 경우 RMSE가 0.217, 0.255이고 Pearson 상관계수는 0.953, 0.961으로 비교적 재현성이 높게 나타났다. 영광 부이의 경우 RMSE는 0.237로 타 부이의 결과와 비슷

**Fig. 8.** Distribution of maximum H_s and T_p .**Fig. 9.** Average distribution of H_s and T_p for 2021.

하지만, Pearson 상관계수는 0.926으로 상대적으로 낮은 결과를 보였다. 이는 모든 지역의 해양 환경 특성이 정확히 반영되지 않았을 것으로 추정되며 모든 관측 부이 데이터를 포괄하는 매개변수 추정으로 보다 정밀한 파랑 후측 모의가 가능할 것으로 예상된다. 침두주기는 상왕등도 부이의 최대 유의파고 기간에서 관측치에 근접한 결과를 확인했다. 평균 파향은 부안 부이 데이터와의 비교를 재현성이 우수함을 확인하였다.

모델의 검증 후 왕등도 인근 해역에 대해 파랑 특성을 분석한 결과 계절에 따라 파랑의 특성이 크게 달라지는 경향을 보였다. 특히 겨울철에는 4 m를 초과하는 유의파고가 자주 발생하였으며 북서풍에 의한 북서 계열 파가 우세하였고 여름철에는 유의파고가 다른 계절에 비해 상대적으로 낮으며 주로 남동쪽에서 오는 경향을 보였다. 침두 주기의 경우 유의파고가 강한 겨울철과 여름철 태풍의 영향으로 10초 이상의 침두주기가 다수 발생하였지만 봄과 가을의 경우 상대적으로 낮은 침두주기가 나타났다. 왕등도 인근 최대 유의파고 발생 시 지점별로 큰 차이를 보였으며 이는 재현주기 별 극치유의파고를 산정하는 극치 분석 과정에서 지점 간에 큰 변동성이 존재할 수 있음을 알려준다. 재현주기 별 극치유의파고는 해상풍력 구조물의 설계 하중 결정에 있어 큰 영향을 미치며 이는 설계의 안정성과 경제성을 평가하는 데 필수적이다.

왕등도 인근 해역에 대한 파랑 후측 결과와 파랑 특성 분석은 서남해 해상풍력 확산단지 개발 시 해상풍력 발전기의 위치선정과 구조물 설계 시 신뢰할 수 있는 기반을 제공할 것으로 예상된다. 상왕등도와 부안 부이에서 얻은 높은 재현성의 유의파고 데이터는 극치 해상 조건에서 정확한 파랑 하중 예측을 가능하게 함으로써 구조물의 안전성 확보와 프로젝트의 경제성 평가에 중요한 역할을 할 것이다. 하지만 1년간의 파랑 후측 기간만으로는 파랑 기후의 전체적인 대표성을 충분히 반영하기 어렵기 때문에 장기간에 걸친 파랑 후측을 통해 복합적인 파랑 기후 변동성의 평가와 예측이 필요하다.

References

- DHI, M. (2017a). MIKE 21 & MIKE 3 flow model FM, hydrodynamic and transport module, scientific documentation. Hørsholm, Denmark: DHI Water Environment Health.
- DHI, M. (2017b). MIKE 21 Spectral Wave Module, Scientific Documentation. Hørsholm, Denmark: DHI Water Environment Health.
- Eum, H.-S., Kang, T.-S., Nam, S.-Y. and Jeong, W.-M. (2016). Wave modeling considering water level changes and currents effects. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 28(6), 383-396 (in Korean).
- GEBCO, G. (2023). GEBCO gridded bathymetry data download.
- Jeong, W.-M., Oh, S.-H., Ryu, K.-H., Back, J.-D. and Choi, I.-H. (2018). Establishment of wave information network of Korea (WINK). *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 30(6), 326-336 (in Korean).
- Kang, T.-S., Park, J.-J. and Eum, H.-S. (2016). Wave tendency analysis on the coastal waters of Korea using wave hind-casting modelling. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 22(7), 869-875 (in Korean).
- Kim, H.-G., Kim, J.-Y. and Kang, Y.-H. (2018). Comparative evaluation of the third-generation reanalysis data for wind resource assessment of the southwestern offshore in South Korea. *Atmosphere*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/atmos9020073>
- Kim, J.-Y. and Kang, K.-S. (2010). Analysis on the change of wave behaviour due to installation of offshore wind turbine foundations. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 22(5), 306-315 (in Korean).
- Kim, M., Kim, J. and Jeon, I.-S. (2021). Numerical simulation of environmental change in south west offshore wind farm using MIKE. *KEPCO Journal on Electric Power and Energy*, 7(1), 145-152.
- Romanenkov, D., Sofina, E. and Rodikova, A. (2023). Modeling of barotropic tide off the southeastern coast of the kamchotka peninsula in view of the accuracy of global tidal models in the northwest pacific ocean. *Fundamental and Applied Hydrophysics*, 16(4), 45-62.
- Ryu, H.-J., Kim, S.-H., Kwoun, C.-H., Cho, K.-W. and Maeng, J.-H. (2015). Wave simulation for submarine cable route of southwest sea offshore wind farm using the SWAN model. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 21(5), 583-590 (in Korean).
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Y.-T., Chuang, H.-Y. and Iredell, M. (2011). NCEP climate forecast system version 2 (CFSv2) selected hourly time-series products.
- Xiang, Y., Fu, Z.-M., Meng, Y., Zhang, K. and Cheng, Z.-F. (2019). Analysis of wave clipping effects of plain reservoir artificial islands based on MIKE21 SW model. *Water Science and Engineering*, 12(3), 179-187.
- Yoo, S.C., Mun, J.Y., Park, W., Seo, G.H., Gwon, S.J. and Heo, R. (2019). Development of bathymetric data for ocean numerical model using sea-floor topography data: BADA ver. 1. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 31(3), 146-157 (in Korean).

Received 21 February, 2024

Revised 2 April, 2024

Accepted 15 April, 2024