



Original Article

SWAN 모델 계수보정에 의한 황·동중국해 파랑모델의 재현성 향상

이보형 · 안석진[†]
(주)지오시스템리서치

Improved Reproducibility of the Yellow and East China Sea Wave Model by Adjusting Parameter of SWAN

Bohyung Lee and Sukjin Ahn[†]

GeoSystem Research Corporation, Gyeonggi-do 15807, Korea

요 약

황·동중국해를 대상으로 SWAN 모델을 이용하여 파랑모델을 구축하였으며, 2014년 1년간 파랑을 모의하였다. 모의결과는 외연도와 마라도 해양부이 및 이어도 해양과학기지의 관측자료와 검정을 수행하였다. 초기 모의결과에서 연간 유의파고의 증감현상 및 고파 출현시기는 양호하게 재현되었으나 동계 고파시에 모델의 첨두치가 관측치보다 과대평가되었다. 이를 개선하기 위하여 모델의 계산간격, 삼파상호작용, Whitecapping(백파) 등의 모델계수를 조정하여 검토하였으며, Whitecapping 계수의 변화에 모델의 유의파고가 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 황해의 파랑특성을 분석하였으며, 모델의 Whitecapping 계수를 조정하여 재현성을 향상시켰다.

Abstract – The wave modeling system was established for the Yellow and East China Sea using SWAN (Simulating WAVes Nearshore) model, and wave modeling system was performed for 2014. The modeling results were verified with observation data from wave buoys installed in the Oeyeondo, Marado and Ieodo ocean research stations. Although the results were agreed well with observation data, peak value of wave heights during winter were overestimated. The parameters of model such as time interval, triad wave interaction, and the whitecapping coefficient were adjusted to improve the modeling results, and the wave height was sensitive to whitecapping coefficient change. The statistical analysis in the Yellow Sea have been carried out, and the reproducibility of the model was improved by adjusting the whitecapping coefficient.

Keywords: SWAN model(스완), Whitecapping(백 파), Yellow and East China Sea(황·동중국해), Wave Steepness(파형경사)

1. 서 론

최근 구축되어 운영되는 해양 파랑모델링 시스템에는 스펙트럼 형태를 사전에 가정하지 않고 파동평형방정식을 해석하는 3세대 파랑모델이 이용되고 있다(Booij *et al.*[1999]; Tolman[1991]; WAMDI Group[1988]). 3세대 파랑모델의 재현성은 과거 수많은 검증실험을 통해 입증되었으며, 유의파고, 첨두주기, 평균파향 등의 매개변수의 예측정확도가 높은 것으로 알려져 있다.

3세대 파랑모델 중 최근 가장 활발히 이용되고 있는 SWAN (Simulating WAve Nearshore)은 네덜란드 델프트 공과대학에서 개

발한 모형으로 계산시간 등의 문제로 전지구 영역의 파랑예측에 이용된 사례는 드물지만, 우리나라 서해, 남해, 동해를 대상으로 중역 파랑예측에 이용되고 있으며, 천해 파랑변형을 모의할 수 있어 항만시설 인근의 상세파랑변형 모의에 활용되고 있다.

한국해양과학기술원에서는 2009년 8월부터 해양수산부 연구사업으로 「운용해양예측시스템(KOOS: Korea Operational Oceanographic System) 연구」를 수행하였으며, 2013년 6월부터 해양예측시스템 KOOS(쿠스)가 운용되고 있다. KOOS의 파랑 예측시스템은 우리나라 전 해역을 대상으로 WW3, SWAN 등의 모델을 이용하여 파랑을 예측하고 있으며, 입력자료는 한국해양과학기술원에서 자체적으로 운영하고 있는 기상모델인 WRF 모델의 계산결과를 이용하고 있다. 황·동중국해를 대상으로 Choi *et al.*[2012]은 JRA25 바

[†]Corresponding author: sjahn@geosr.com

람장 자료를 사용하여 2009년 후반 새롭게 Unstructured 격자를 채택한 SWAN 모델과 ADCIRC를 동일격자체계를 일체형으로 동적 결합해 2010년 Notre Dame 대학에서 공개한 2차원 모형 PADCIRC +PUNSWAN(Dietrich *et al.*[2011])을 사용해 장기 파후 산정에 적용하였다.

해안선 및 해상구조물 인근의 상세 파랑의 재현성을 확보하기 위해서는 경계조건으로 이용되는 증역 모형의 재현성 확보가 필요하며, 수심이 깊은 해역에서 파랑에너지 예측에 큰 영향을 미치는 해상풍 조건, 비선형상호작용, 에너지소산의 정확한 예측이 필요하다. 심해에서의 에너지소산은 비선형상호작용으로 인해 파형경사가 임계치보다 커지게 되면 파봉이 부서지는 현상인 백파(Whitecapping)에 의해 주로 발생한다. 백파는 일반적으로 수식화가 어려워 계산된 에너지스펙트럼을 평형 또는 준평형 상태의 에너지스펙트럼 형상과 비교하여 에너지를 소산시키는 방식으로 적용한다(Pierson and Moskowitz[1964]).

그러나 평형상태의 에너지스펙트럼을 기준으로 에너지소산을 계산하는 방식은 파랑의 성장과정 초기에 일반적으로 평형상태에 도달하는 고주파 성분의 예측에는 적합하지만 평형상태 도달에 시간이 필요한 저주파 영역의 파랑에너지 예측에는 큰 오차가 발생할 수 있다. 또한 해역별로 기상 및 지형특성에 따라 파랑에너지의 소산이 다양하게 나타날 수 있으므로 일률적인 방식의 에너지 소산을 고려하는 것은 적합하지 않다. 이 같은 한계를 극복하기 위해 평형상태의 에너지스펙트럼 형상과 함께 파수(k)와 평균파수(k_m)의 비율을 고려한 에너지 소산모델이 개발되었으며(Booij *et al.*[1999]; Donelan and Yuan[1994]; Ris[1997]), 해역별 특성을 고려할 수 있도록 조정계수를 설정하였다.

Kahma and Calkoen[1992]는 호소, 만 등 취송거리 제한 조건의 해역에서 백파 계수의 조정을 통해 파랑예측 재현성 향상을 확인하였으며, Rogers *et al.*[2002]은 노스케롤라이나 및 미시시피 연안과 미시건 호수를 대상으로 백파계수 조정을 통해 저주파수 영역의 파랑예측 재현성 향상을 확인하였다.

Kim[2016]은 이어도 종합해양과학기지의 비디오 모니터링 자료를 이용하여 단위면적당 백파점유율인 Whitecap coverage에 대한 관측 기법을 수립하고 백파 추출의 기준이 되는 하한치 결정 과정에서 연구자의 주관적인 판단을 따른 오차를 줄이고자 픽셀밀도와 픽셀밀도의 경사를 이용한 하한치 결정 방법을 제시하였으며, 비디오 이미지의 샘플링 주파수 따른 오차를 줄이고자 샘플링 주파수 기준을 제시하였다. 또한 제시된 기준을 적용하여 이어도해역의 Whitecap coverage를 산정하였다.

기존 국외의 백파계수 조정에 의한 파랑예측 재현성 향상에 대한 연구는 연안, 호소, 만 등과 같은 소규모 영역에서 단기간에 대해 수행되었으며, 국내에서 모델의 백파계수 조정에 의한 파랑모델의 재현성 향상에 대한 연구는 활발하지 않다. 본 연구에서는 황·동중국해를 대상으로 DELFT3D-WAVE(SWAN)모델을 이용하여 파랑모형을 구축하고, 대상해역의 파랑 특성에 적합하도록 모델의 백파계수 조정을 통하여 모델의 재현성을 검토하였다.

2. 모델 구축

2.1 SWAN 모델

황·동중국해 모델링에 사용한 모델은 네덜란드 델프트(Delft) 공과대학에서 개발한 다방향 불규칙파 모델인 SWAN(Simulating Wave Nearshore)이다. 모델에서 파랑의 전과과정은 이동 및 수심과 흐름에 의한 굴절, 천수효과와 섬 등의 제약 요인들에 의한 전달 및 차단, 반사, 회절현상 등이 반영된다. 또한, 바람에 의한 파랑에너지가 생성되고, 백파 및 쇄파, 저면마찰에 의한 파랑에너지의 소산과 2차 또는 4차 비선형 작용에 의한 에너지 교환과정에 의해 파랑에너지가 소산된다. 또한, 사용되는 파랑에너지의 원천항(Source term)에 따라 제1세대, 제2세대, 및 제3세대 모델로 분류된다.

SWAN 모델의 지배방정식인 파작용 평형방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (1)$$

위 식에서 $N = S(f, \theta)/\sigma$ 는 파작용 밀도이고, $S(f, \theta)$ 는 방향 스펙트럼 밀도이다. $\sigma = \omega - \vec{k} \cdot \vec{U}$ 는 흐름의 속도 \vec{U} 로 움직이는 좌표에서의 각주파수이고, $c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta$ 는 각각 x, y, σ, θ 에서의 위상속도이다. 평형방정식의 우변 S_{tot} 는 파랑의 생성, 감소 및 비선형 상호작용 등에 의한 파에너지 밀도(wave energy density)를 나타내는 항으로 식 (2)와 같이 표현된다.

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad (2)$$

여기서, $S_{in}, S_{nl3}, S_{nl4}, S_{ds,w}, S_{ds,b}, S_{ds,br}$ 는 각각 바람에 의한 에너지 유입, 3파 및 4파 상호작용에 의한 에너지의 비선형 전이, 백파, 저면마찰과 쇄파에 의한 에너지 소산을 나타낸다.

본 연구에서 사용한 SWAN 모델에 대한 상세한 내용은 매뉴얼(The SWAN team[2018])을 참고하기 바란다.

2.2 격자구성 및 외력조건

모델의 계산영역은 황해 및 동중국해를 포함하여 동서방향으로 1,340 km, 남북방향으로 1,864 km로 설정하여 최소격자 간격 3.4 km인 직교곡선 가변격자로 구성하였다. 수심은 NOAA ETOP01과 국립해양조사원의 수치해도를 이용하여 구성하였다(Fig. 1).

외력조건은 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration) NCEP의 CFSv2(Climat Forecast System version 2) 기상 예측자료를 이중선형 보간하여 모형의 격자점마다 매시별 입력하였다. CFSv2는 전 지구 해양을 0.2° 간격으로 매시별 기상자료를 예측한 자료이다. 또한 DELFT3D FLOW 모델을 이용하여 동일격자에서 모의한 조위 및 조류 공간장을 입력자료로 사용하였다(Korea Institute of Marine Science & Technology promotion[2016]).

3. 모델 보정

3.1 초기 모의결과

황·동중국해 파랑모델을 이용하여 2014년 1년간 파랑을 모의하

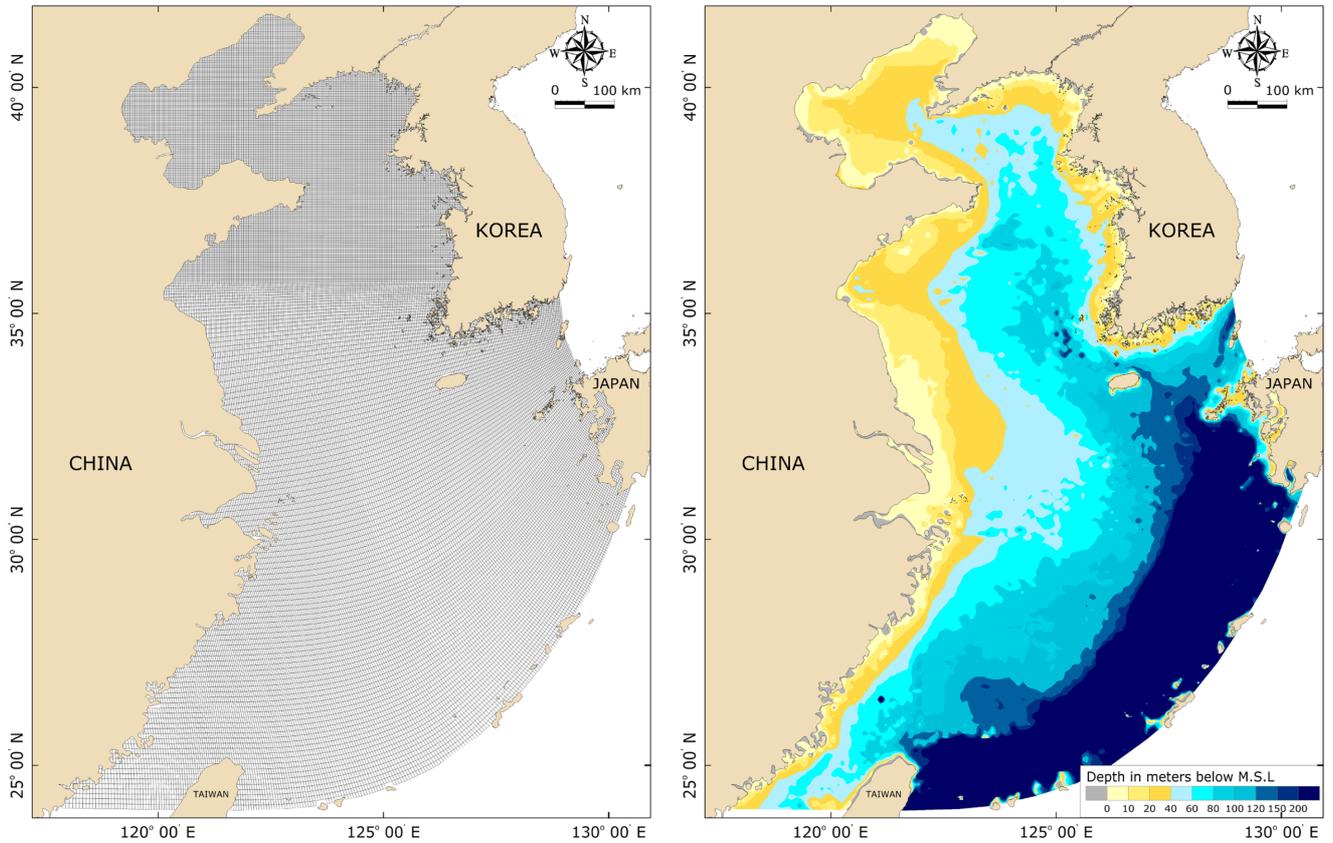


Fig. 1. Grids configuration and bathymetry of the modeling domain.

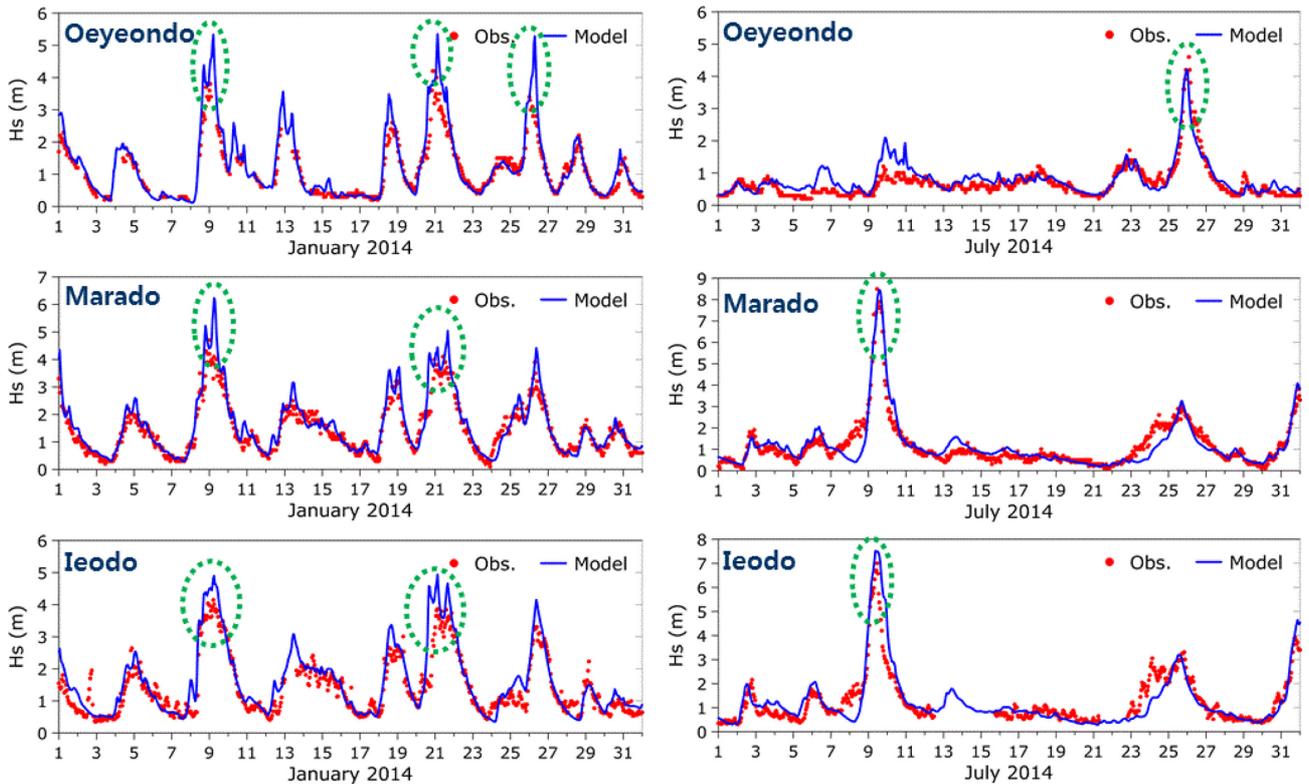


Fig. 2. Preliminary calibration results of significant wave height applying the default whitcapping parameters(left: January, right: July).

였다. 모의결과는 외연도와 마라도 해양부이 및 이어도 해양과학기지의 관측자료와 비교하였다. 모델이 연간 유의파고의 증감양상과 하계의 고파시 침투치는 양호하게 재현하였으나 동계에는 모델치가 관측치보다 과대평가되었다(Fig. 2).

모델치가 동계 고파시에 관측치보다 과대평가된 것을 개선하기 위하여 모델의 계산간격, 삼파상호작용, 백파 등의 모델계수를 조정하여 보정실험을 수행하였다. 모델의 계산간격을 기존 설정한 10분에서 5분으로 조정하여 모의결과, 동계 고파시 피크치를 다소 감소시켰으나 여전히 관측치보다 과대평가되었다. 모델의 삼파상호작용 계수를 기본값인 LTA(Lumped Triad Approximation)에서 SPB(Stochastic Parametric model based on the Boussinesq-type wave equations)로 조정하여 모의하였으나 거의 변화가 없었다. 모델의 백파계수를 조정하여 모의한 결과, 백파계수 변화에 모델이 민감하게 반응하였다.

3.2 SWAN 모델의 Whitecapping 계수

백파는 외해에서 파고가 파장보다 큰 경우(파형경사가 큼)에 발생하며, 강한 비선형성으로 수식화가 어려워 경험식이 주로 이용된다. SWAN모델에서 백파에 의한 에너지 소산 S_{ds} 의 과정은 Hasselmann [1974]의 펄스 기반 모델로 표현된다. 이 모델은 유한 수심에도 적용할 수 있도록 주파수보다는 파수에 대한 식으로 다음 식 (3)과 같이 재구성되었다(WAMDI Group[1988]).

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \bar{\sigma} \frac{k}{\sigma} E(\sigma, \theta) \quad (3)$$

여기서, Γ 는 전체 파형경사에 의해 결정되는 계수, k 는 파수, $\bar{\sigma}$ 와 \bar{k} 는 평균 주파수와 파수를 나타낸다. Komen *et al.*[1984]은 완전히 발달한 파랑 조건의 에너지 평형에 대한 Γ 값을 다음 식 (4)와 같이 산정하였다.

$$\Gamma = \Gamma_{k,l} = C_{ds} \left((1-\delta) + \delta \frac{k}{\bar{k}} \right) \left(\frac{\bar{s}}{\bar{s}_{PM}} \right)^p \quad (4)$$

여기서, 계수 C_{ds} , δ , p 는 조정 가능한 계수들로 C_{ds} 는 백파에 의한 에너지 감쇠비를 계산하기 위한 계수, δ 는 파수에 대한 백파의 의존도를 계산하기 위한 계수, p 는 Pierson-Moskowitz 스펙트럼의 파형경사로 정규화한 값의 멱수이며, \bar{s} 는 전체 파형경사, \bar{s}_{PM} 은 Pierson-Moskowitz 스펙트럼의 \bar{s} 값으로 $\bar{s}_{PM} = \sqrt{3.02 \times 10^{-3}}$ 이다. SWAN 모델에서 $C_{ds} = 2.36 \times 10^{-5}$, $\delta = 1$, $p = 2$ 가 기본 값으로 사용된다.

3.3 황해의 파랑 특성

기상청의 외연도, 마라도 해양부이와 이어도 해양기지 관측파랑 및 파랑관측 위치에 인접한 NOAA 예측파랑을 분석하였다. 관측 및 예측자료를 이용하여 계절별 유의파고와 유의파주기의 관계를, 예측자료를 이용하여 유의파고와 파향, 유의파주기와 파향과의 관계를 분석하였다. 분석자료의 위치를 Fig. 3에 제시하였다.

유의파고와 유의파 주기의 관계에 대하여 몇몇 경험식이 제시된 바 있다. Shore Protection Manual[1977](이하, SPM으로 약칭)에서는 다음과 같은 관계식을 제안하였다.

$$T_{1/3} \cong 3.95(H_{1/3})^{0.5} \quad (5)$$

Goda[2003]는 파랑 체계가 바람에 의해 지배된다는 가정 하에 Wilson[1965]의 공식을 이용하여 풍속과 취송거리를 변화시켜가며 유의파고와 유의파주기의 상관관계를 조사하여 다음과 같은 관계식을 제안하였다.

$$T_{1/3} \cong 3.3(H_{1/3})^{0.63} \quad (6)$$

SPM과 Goda의 유의파고와 유의파주기의 상관관계식과 함께 관측자료의 동계와 하계에 대한 파고와 주기의 관계를 Fig. 4에, NOAA WWIII의 파고와 주기의 관계를 Fig. 5에 도시하였다. 관측자료 및 예측자료의 유의파고와 유의파주기의 관계로부터 동계의 파랑이 하계보다 고파의 출현율이 높으며, 고파시의 주기가 짧게 나타났다. 특히 이어도해양기지 관측자료와 NOAA WWIII 예측자료에서는 이러한 경향이 명확하게 나타난다.

NOAA WWIII 예측자료의 계절별 유의파고-파향 및 유의파주기-파향 장미도를 각각 Fig. 6과 Fig. 7에 도시하였다. 동계에는 NW와 NNW 파향이 우세하며 하계보다 파고는 높고 주기는 짧다. 하계에는 SSW 파향이 우세하며 동계와 비교하여 파고는 낮고 주기가 길다. 즉, 동계에는 하계보다 파형경사가 큰 NW와 NNW 파향의 파랑이 우세하고 하계에는 파형경사가 작은 SSW 파향의 파랑이 우세하다. 이는 동계에 주로 북서계절풍에 의해 발생하는 파랑은 황해의 남측해역 이외에는 중국과 한반도에 둘러싸여 있으므로 취송거리가 제한되어 완전히 발달하지 못하지만, 하계에는 남측해역이 개방되어 외해에서 발달한 파랑이 풍파와 너울의 형태로 전파되기 때문이다.

3.4 백파계수 보정 모의

황해의 연간 파랑특성이 하계보다 동계에 파형경사 큰 것에 착안하여 동계의 고파시에만 파랑의 에너지 소산이 증가하도록 백파계수 p 를 조정하여 보정 모의를 수행하였다. 백파계수 p 를 기본값인 2에서 4까지 0.5 간격으로 증가시켜 모의하였는데, 백파계수 p 가 증가할수록 고파시 파고가 감소하였으며, 3.5 이상인 경우에 동계 고파시 파랑은 양호하게 재현되었지만 하계 고파시 파랑이 과소평가되었다. $p=3$ 인 경우에 Fig. 8과 같이 동계 고파시 유의파고는 크게 감소하였으며, 하계에는 보정전과 유사하다.

4. 보정결과 및 고찰

황·동중국해의 초기 파랑 모의결과에서 동계 고파시 모델의 유의파고가 관측치보다 과대평가되었으며, 모델의 백파계수에 따라 유의파고가 민감하게 반응하였다. 백파계수 p 를 기본값인 2에서 3으로 조정하여 모델의 재현성을 향상시켰다. 백파계수 조정에 의한

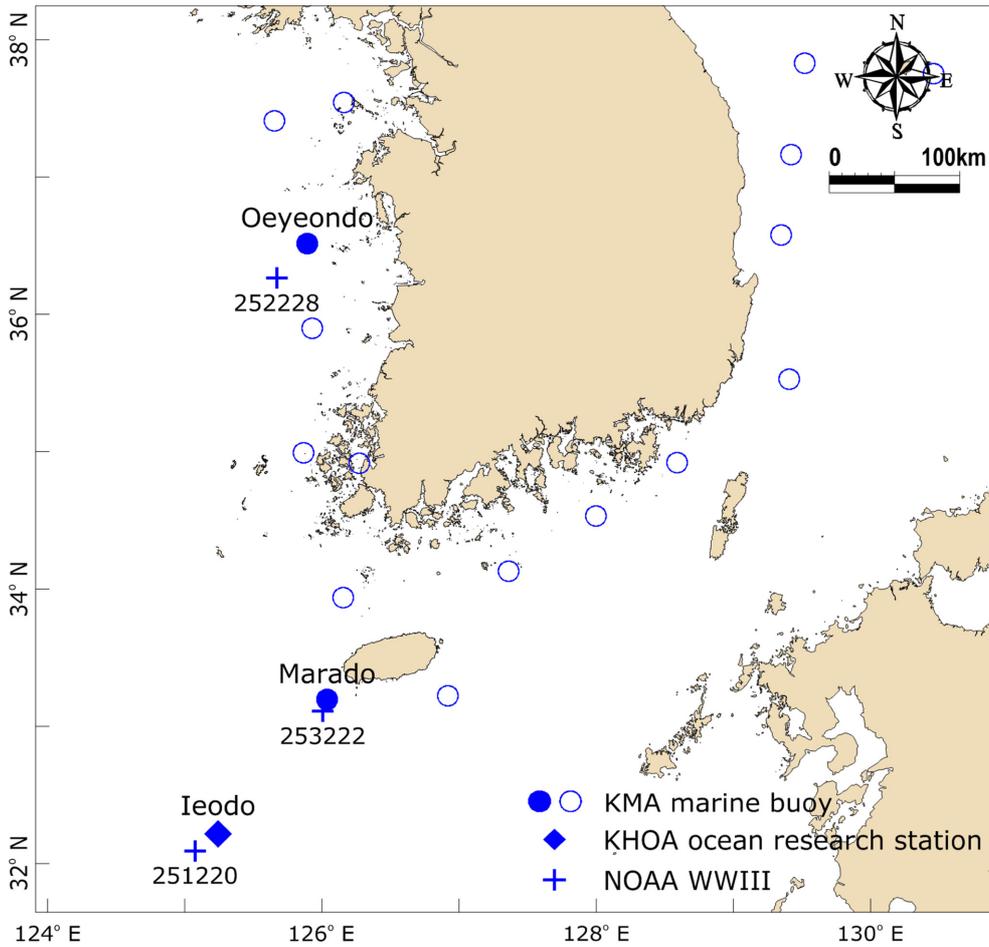


Fig. 3. Location map of wave measurement stations and grid points of NOAA WWIII.

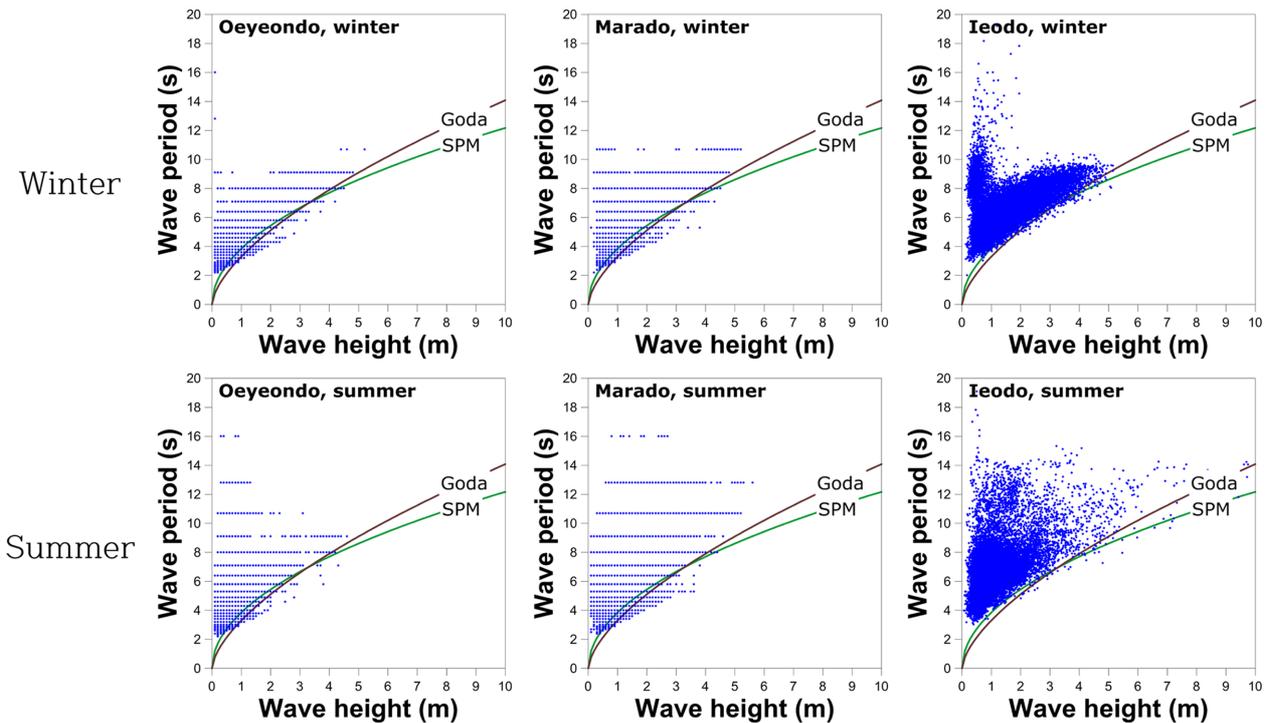


Fig. 4. Seasonal relation between significant wave height and period at measurement stations.

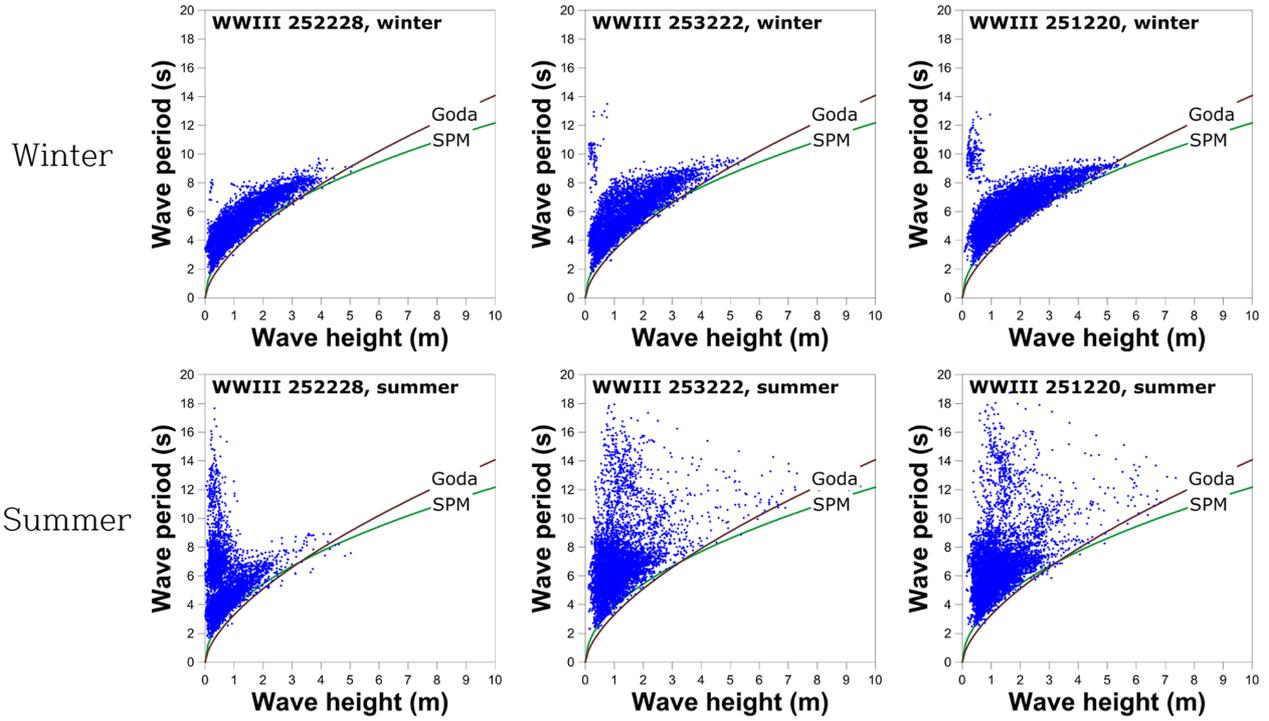


Fig. 5. Seasonal relation between significant wave height and period at three grids of NOAA WW III modeling.

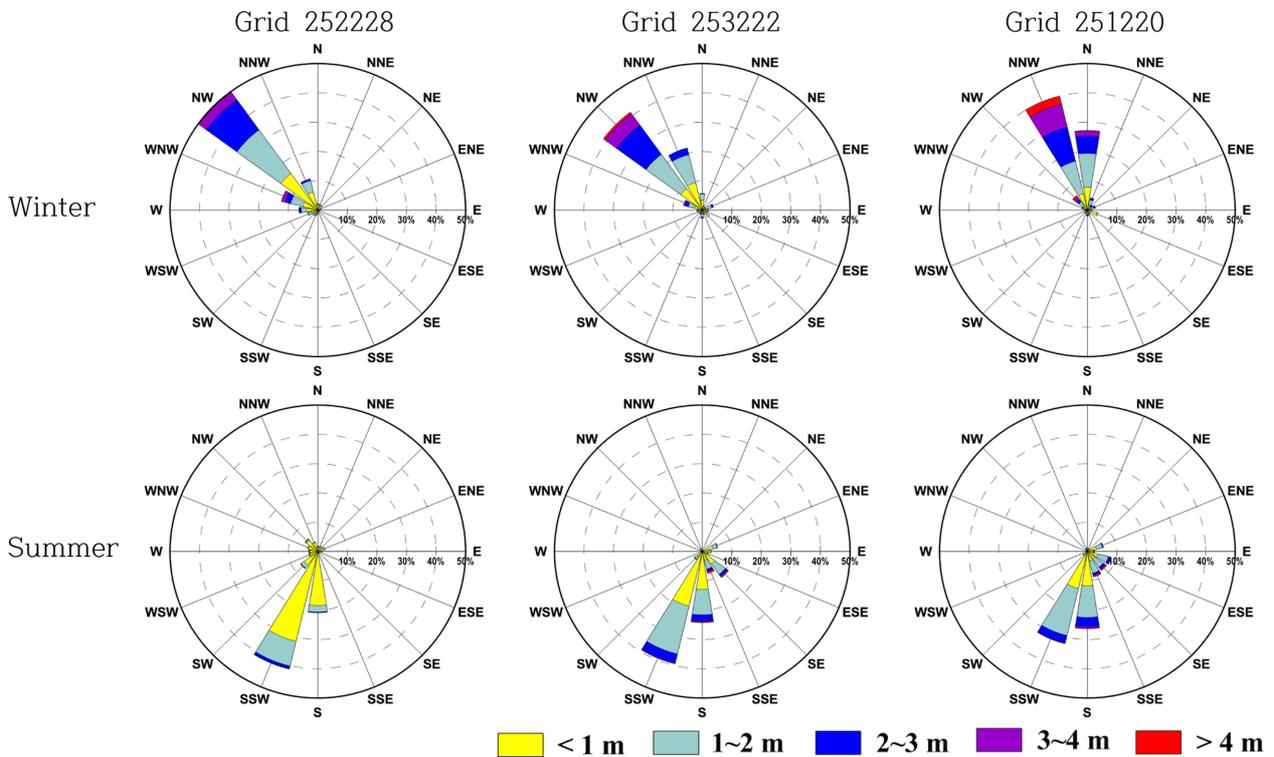


Fig. 6. Seasonal rose for directional significant wave height at three grids of NOAA WW III modeling.

보정 전·후의 관측치와 모델치의 유의파고 분산도를 Fig. 9에 도시하였다. 3개의 보·검점 정점에서 보정 전에 관측치보다 모델치가 전반적으로 과대평가되었으나, 보정 후에 3개 정점에 대한 유의파

고의 RMSE 평균은 0.43 m에서 0.36 m로 0.07 m가 감소하였으며, 상관계수(C.C) 평균은 0.92에서 0.93에서 0.01가 증가하였다.

에너지 방정식을 기본으로 하는 파랑모델의 에너지 소산은 3파

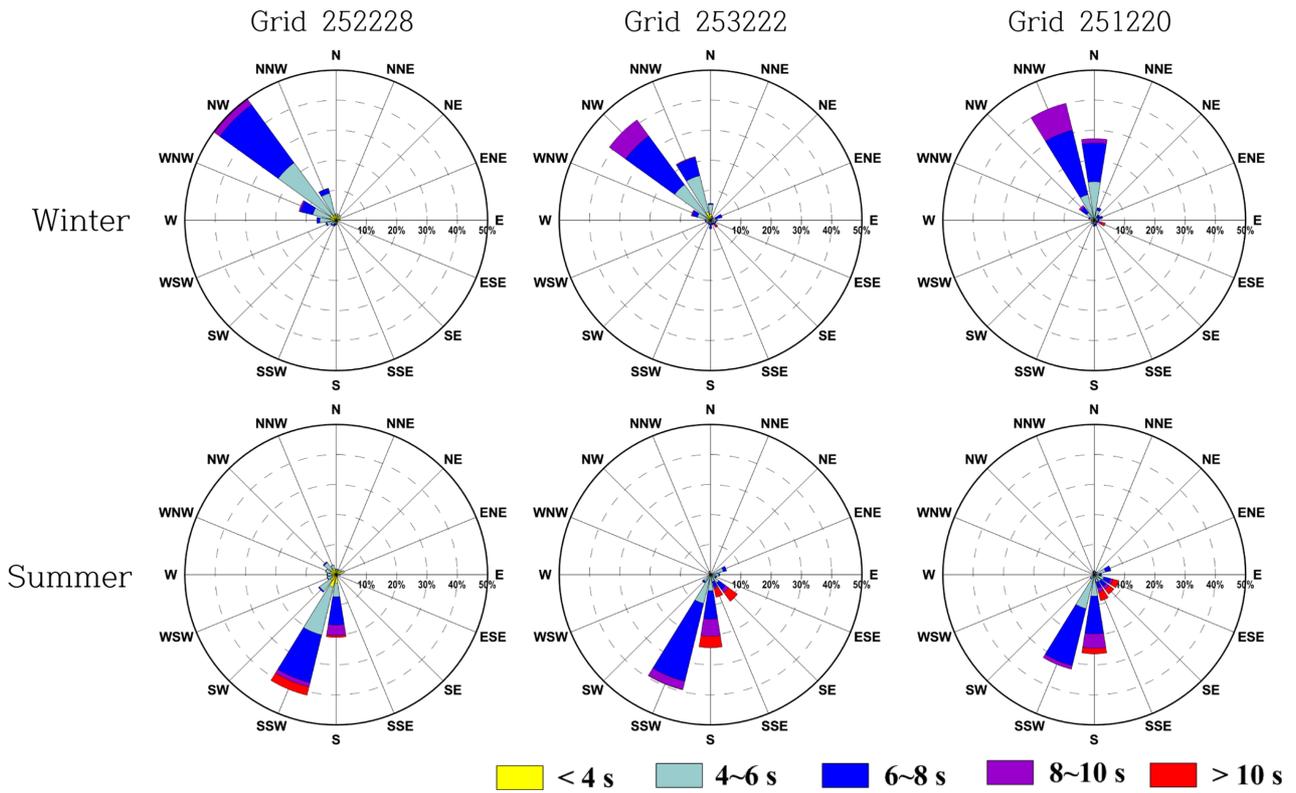


Fig. 7. Seasonal rose for directional peak wave period at three grids of NOAA WW III modeling.

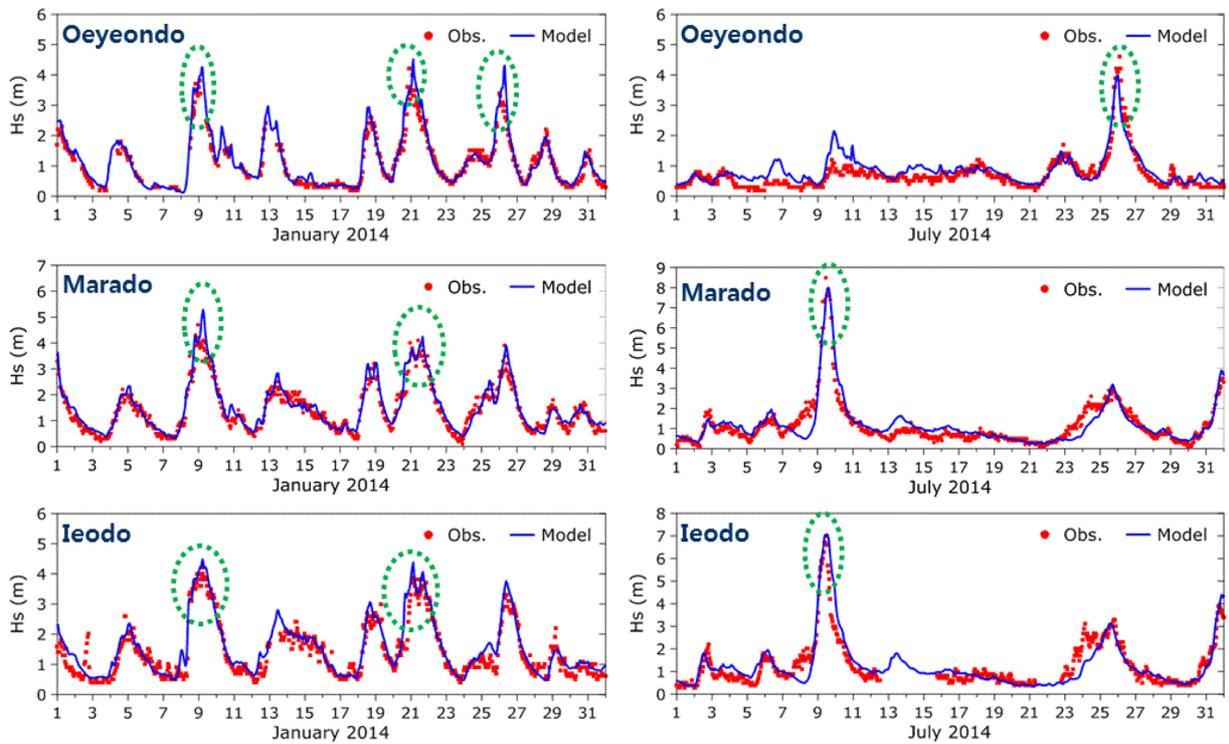


Fig. 8. Calibration results of significant wave height applying the whitcapping parameter $p=3$.

및 4차 상호작용에 의한 에너지의 비선형 전이, 백파, 저면 마찰과 쇄파에 의한 에너지 소산으로 나타낸다. 수심의 영향을 받는 연안

역에서는 저면 마찰과 쇄파에 의한 에너지 소산이 크게 작용하며, 외해역에서는 수심과 관계없이 파형경사에 따른 백파에 의한 에너

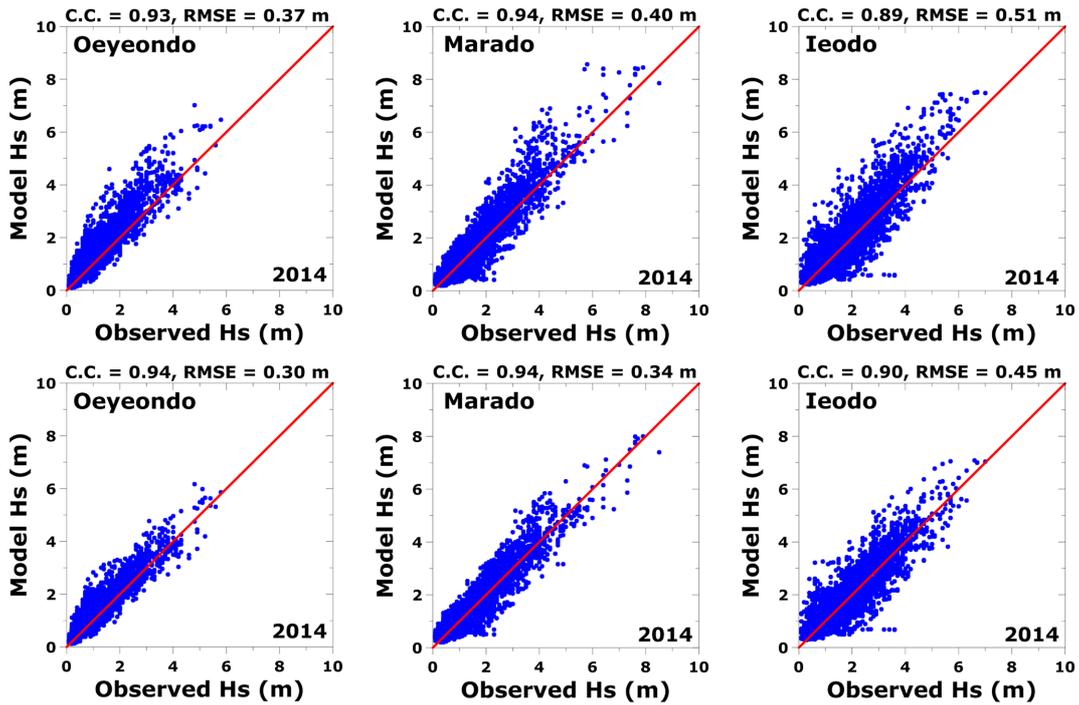


Fig. 9. The annual correlation between observation and model (upper: p=2, lower: p=3).

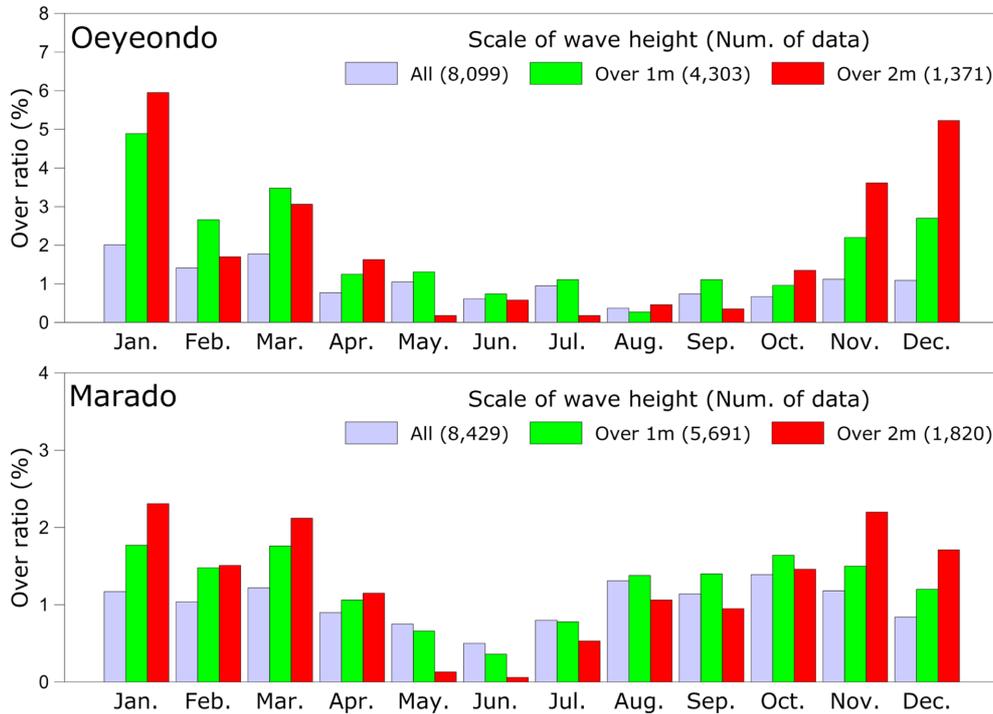


Fig. 10. Monthly occurrence ratio exceeding the steepness of Pierson-Moskowitz spectrum for each wave height class.

지 소산이 크게 작용한다.

황해의 파랑은 Fig. 10과 같이 파고가 증가할수록 δ_{pM} 보다 큰 파형경사의 출현율이 하계보다 동계에 높다. 이는 NW 계열의 파랑이 우세한 동계에는 취송거리가 제한되어 파랑이 충분히 발달하지 못하므로 파형경사 큰 파랑이 생성된다. 하계에는 외해에서 충

분히 발달한 S 계열의 파랑이 황해 남측의 외해에서 전파되므로 동계보다 주기가 길고 파형경사가 작다. SWAN 모델에서 백파계수 p 는 Pierson-Moskowitz 스펙트럼의 파형경사로 정규화한 값의 역수로 δ_{pM} 보다 큰 파형경사인 경우에 p 에 비례하여 에너지 소산이 증가한다. 따라서 SWAN 모델의 백파계수 p 가 증가됨에 따라 δ_{pM} 보

다 큰 파형경사의 출현율이 높은 동계 파랑의 유의파고는 감소되었으며, 상대적으로 동계보다 출현율이 낮은 하계에는 백파계수 p 의 증가에 의한 영향이 크지 않다. 반대로 파랑 모델의 파고가 관측치보다 과소평가되는 경우에는 백파계수 p 를 작게 하여 백파에 의한 에너지 소산을 감소시킴으로써 파고를 증가시킬 수 있다.

5. 결 론

황·동중국해 파랑모형을 이용하여 2014년에 대해 연간 파랑을 모의하였으며, 초기 모의에서 동계 고파시 첨두부분이 과대 산정되었다. 황해의 파랑특성을 고려하여 SWAN 모델의 Whitecapping 계수 p 를 2에서 3으로 증가시켜 동계 고파시 피크부분을 양호하게 재현하였으며, 연간 유의파고의 재현성도 향상하였다. 보정 후에 3개 보·검정 정점에 대한 유의파고의 연간 RMSE 평균은 0.07 m가 감소하였으며, 연간 상관계수(C.C) 평균은 0.01가 증가하였다.

황해와 같이 계절별로 파랑의 생성 및 발달에 대한 메커니즘이 상이한 해역에서는 대상해역의 파랑특성을 검토하고 이에 상응하는 백파계수와 같은 모델 계수를 조종함으로써 파랑 예측 및 후측시 모델의 재현성을 향상할 수 있다.

후 기

본 연구는 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 해양수산환경기술개발사업 “하구역 종합관리시스템개발연구 II” 및 “새만금 주변해역 해양환경 및 생태계관리 연구개발”의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Booij, N., R.C. Ris and L.H. Holthuijsen, 1999, A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, *J. Geoph. Research*, 104(C4), 7649-7666.
- [2] Choi, B.H., Kim, K.O., Min, B.I. Cho, W.H., 2012, Wave climate and design waves for seas around Korean peninsula, in *proc. of KAOSTS Meeting, Daegu EXCO, Korea*, 2222-2225.
- [3] 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., Stone, G.W., 2011, Modeling hurricane waves and storm surge using integrally-coupled, scalable computations, *Coastal Engineering*, 58, 45-65.
- [4] Donelan, M.A. and Y. Yuan, 1994, Wave dissipation by surface processes, in: G. J. Komen et al., (Eds.), *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*, Cambridge University Press, 143-155.
- [5] Goda, Y. 2003, Revisiting Wilson's formulas for simplified wind-wave prediction, *J. Waterw., Port, Coast. and Ocean Eng.* 129(2), 93-95.
- [6] Hasselmann, K., 1974, On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecapping, *Bound.-layer Meteor.*, 6(1-2), 107-127.
- [7] Kahma, K.K. and C.J. Calkoen, 1992, Reconciling discrepancies in the observed growth of wind-generated waves, *J. Phys. Oceanogr.*, 22, 1389-1405.
- [8] Kim, S.S., Min, Y.C., Jeong, J.M., Min, I.K., Jeong, J.Y., Shim, J.S., 2016, Establishing whitecap coverage observation techniques using video image of Ieodo Ocean Research Station, *J. Coastal Disaster Prevention*, 3(4), 179-187.
- [9] Komen, G.J., S. Hasselmann, and K. Hasselmann, 1984, On the existence of a fully developed wind-sea spectrum, *J. Phys. Oceanogr.*, 14, 1271-1285.
- [10] Korea Institute of Marine Science & Technology Promotion, 2016, Integrated management of marine environment and ecosystems around Saemangeum.
- [11] Ministry of Oceans and Fisheries, 2013, Development of Korea Operational Oceanographic System (KOOS).
- [12] Pierson, W.J. and L. Moskowitz, 1964, A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii, *J. Geophys. Res.*, 69(24), 5181-5190.
- [13] Ris, R.C., 1997, Spectral modelling of wind waves in coastal areas, Ph.D. dissertation, Dept. Civil Eng. and Geosc., Delft Univ. of Tech., Delft, Netherlands.
- [14] Rogers, W.E., J.M. Kaihatu, H.A. H. Petit, N. Booij, and L.H. Holthuijsen, 2002, Diffusion reduction in a arbitrary scale third generation wind wave model, *Ocean Engng.*, 29, 1357-1390.
- [15] The SWAN team, 2018, SWAN Cycle III version 41.20A, Scientific and technical documentation.
- [16] Tolman, H.L., 1991, A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents, *J. Phys. Oceanogr.*, 21(6), 782-797.
- [17] U.S. Army Coastal Engineering Research Center, 2002, Shore Protection Manual, Books for Business, Oakville.
- [18] WAMDI group, 1988, The WAM model - a third generation ocean wave prediction model, *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1775-1810.
- [19] Wilson, B.W., 1965, Numerical prediction of ocean waves in the north Atlantic for December, 1959, *Deutsche Hydrographische Z.* 18(3), 114-130.

Received 22 June 2018

Revised 21 August 2018

Accepted 22 August 2018