

HeMOSU-2 관측 자료를 이용한 파랑 스펙트럼 매개변수 추정 및 분석 Estimation and Analysis of Wave Spectrum Parameter using HeMOSU-2 Observation Data

이욱재* · 고동휘** · 김지영*** · 조홍연****

Uk-Jae Lee*, Dong-Hui Ko**, Ji-Young Kim*** and Hong-Yeon Cho****

요지 : 본 연구에서는 국내 서해안에 설치된 HeMOSU-2 기상타워에서 5 Hz 간격으로 관측한 수면변동자료를 이용하여 파랑 스펙트럼 정보를 산정하였으며, 이를 통해 파랑 매개변수를 추정하였다. 모든 유의 파고 범위에 대하여 관측 스펙트럼을 기준으로 JONSWAP 스펙트럼의 첨두증대계수(γ_{opt})와 수정 BM 스펙트럼의 척도계수(α) 및 형상계수(β)를 추정하였으며, 각각의 매개변수 분포를 확인하였다. 분석 결과, JONSWAP 스펙트럼의 첨두증대계수(γ_{opt})는 기존에 제안되고 있는 3.3에 비해 매우 낮은 수준인 1.27로 산정되었으며, 전체 파고 범위에서 첨두증대계수(γ_{opt})의 분포는 확률질량함수와 확률밀도함수의 결합형태로 나타났다. 또한, 수정 BM 스펙트럼의 척도계수(α) 및 형상계수(β)는 기존 [0.300, -1.098]에 비해 낮은 수준인 [0.253, -1.377]로 추정되었으며, 두 매개변수간 선형 상관관계 분석 결과 $\beta = -3.86\alpha$ 로 나타났다.

핵심용어 : HeMOSU-2, 파랑 스펙트럼, 유의 파고, 첨두증대계수, 척도계수, 형상계수

Abstract : In this study, wave spectrum data were calculated using the water surface elevation data observed at 5Hz intervals from the HeMOSU-2 meteorological tower installed on the west coast of Korea, and wave parameters were estimated using wave spectrum data. For all significant wave height ranges, the peak enhancement parameter (γ_{opt}) of the JONSWAP spectrum and the scale parameter (α) and shape parameter (β) of the modify BM spectrum were estimated based on the observed spectrum, and the distribution of each parameter was confirmed. As a result of the analysis, the peak enhancement parameter (γ_{opt}) of the JONSWAP spectrum was calculated to be 1.27, which is very low compared to the previously proposed 3.3. And in the range of all significant wave heights, the distribution of the peak enhancement parameter (γ_{opt}) was shown as a combined distribution of probability mass function (PMF) and probability density function (PDF). In addition, the scale parameter (α) and shape parameter (β) of the modify BM spectrum were estimated to be [0.245, -1.278], which are lower than the existing [0.300, -1.098], and the result of the linear correlation analysis between the two parameters was $\beta = -3.86\alpha$.

Keywords : HeMOSU-2, wave spectrum, significant wave height, peak enhancement parameter, scale parameter, shape parameter

1. 서 론

해양은 풍부한 자원이 존재하며, 이에 대한 관심도가 높아짐에 따라 파랑을 분석하고 이해하는 것은 매우 중요하다. 파랑은 다양한 성분과의 조합으로 이루어져 있으며, 시간과 장소에 따라 지속적으로 변화하기 때문에 불규칙한 파랑을 분석하기 위한 기법으로 파랑 스펙트럼이 널리 사용되고 있다.

또한, 파랑은 스펙트럼으로 표현이 가능하며, 파랑의 에너지 밀도 분포는 여러 통계 분석을 통해 결정할 수 있다. 파랑 스펙트럼은 대부분 매개변수화된 함수로 제공되며, 스펙트럼 모델로는 완전히 성장한 풍파를 대상으로 제안된 PM 스펙트럼(Pierson and Moskowitz, 1964)과 BM 스펙트럼(Bretschneider, 1968; Mitsuyasu, 1970), 수심이 깊은 심해와 얕한 수심에 대하여 JONSWAP 스펙트럼(Hasselmann et al.,

*한국해양과학기술원 해양빅데이터센터 연수생(Student Apprentice, Marine Bigdata Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology)

**한국해양과학기술원 연안개발에너지연구센터 선임연구원(Senior Research Scientist, Coastal Development and Ocean Energy Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology)

***한국전력공사 전력연구원 책임연구원(Principal Researcher, Korea Electric Power Research Institute)

****한국해양과학기술원 해양빅데이터센터 책임연구원, 과학기술연합대학원 대학 KIOST SCHOOL 교수(Corresponding author: Hong-Yeon Cho, Principal Research Scientist, Marine Big-data Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, 385 Haeryang-ro, Youngdo-gu, Busan 49111, Korea, Tel: +82-51-664-3786, hycho@kiost.ac.kr & Professor, University of Science and Technology)

1973)과 TMA 스펙트럼(Tucker, 1994) 및 천해역을 진행하는 파에 대하여 제안된 Wallops 스펙트럼(Huang et al., 1981) 등 다양한 해역 조건에서 적용이 가능한 스펙트럼 분포형이 있다.

기존에 제안된 스펙트럼은 대상 분석 해역의 파랑 특성이 반영된 매개변수들이 적용되어 있으며, 매개변수를 변화하여 관심 해역에 적합한 최적 파랑 매개변수를 추정하는 연구는 매우 중요하다. 이러한 연구를 수행하기 위해 일반적으로 BM 스펙트럼 및 JONSWAP 스펙트럼이 적용되고 있지만, BM 스펙트럼의 경우, Cho et al.(2020)이 수행한 남항진에서 관측된 스펙트럼 정보를 이용하여 최적 매개변수 추정을 통해 척도계수(α)와 형상계수(β)를 [0.284, -1.079]로 제안한 연구를 제외하고, 대부분 수리실험의 불규칙파를 적용하기 위한 목적으로 사용되고 있다(Lee et al., 2016; Jung and Yoon, 2019; Kim and Lee, 2019). 한편, JONSWAP 스펙트럼의 첨두중대계수를 추정하는 연구는 비교적 활발하게 이루어지고 있는데, Feng et al.(2012)은 중국 Jiangsu 해역을 대상으로 최적 첨두중대계수의 값을 $\gamma_{opt} = 3.43 - 3.70$ 의 범위로 제안한 바 있으며, Amurot et al.(2014)은 Malaysia의 Sabah와 Sarawak 해역에 대하여 JONSWAP 스펙트럼을 이용한 비교 분석을 통해 첨두 주파수(f_p) 범위에 따른 파랑 스펙트럼 적용 범위를 제안한 바 있다. 또한, Mazaheri and Imani(2019)는 페르시아 만의 연안을 대상으로 JONSWAP 스펙트럼 매개변수를 단순한 수치가 아닌 유의파고(H_s)와 첨두 주파수(f_p)의 함수로 정의하였으며, Ewans and McConochie(2018)는

JONSWAP 매개변수 추정치의 불확실성에 대하여 민감도 분석을 통해 첨두중대계수와 스펙트럼의 폭을 나타내는 대역폭(Bandwidth)을 동시에 추정하는 방법을 제안하였다. 국내에서는 Cho et al.(2020)이 남항진에서 관측한 파랑 스펙트럼 자료를 이용하여 $\gamma_{opt} = 1.4$ 로 추정했고, Kang and Lee(2014)는 제주 북동부 연안의 추동계 관측 자료를 이용하여 JONSWAP 스펙트럼의 매개변수 추정을 통해 $\gamma_{opt} = 2.072$ 로 제안한 바 있으며, Suh et al.(2010)은 한반도 연안의 다양한 파랑 관측 및 후측 자료를 이용하여 $\gamma_{opt} = 2.14$ 임을 밝혀낸 바 있다.

한편, 대부분의 파랑 스펙트럼 분석은 스펙트럼 자료의 신뢰성, 구조물의 설계 등의 이유로 고파 영역을 대상으로 이루어지고 있지만, 최근 파력발전 등 해양 공간에 대한 활용도가 다양해짐에 따라 모든 파고 범위에 대하여 대상 해역을 분석하는 연구가 필요한 실정이다.

이에 본 연구에서는 국내 서해안에서 약 5개월간 관측된 수면변동자료를 이용하여 전 범위의 파고를 대상으로 한반도 서해안에 적용 가능한 JONSWAP 스펙트럼의 첨두중대계수(γ_{opt})와 수정 BM 스펙트럼의 척도계수(α) 및 형상계수(β)를 추정하였으며, 첨두중대계수의 분포를 제안하고, 척도계수와 형상계수의 분포 양상을 파악하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 분석 자료

해상 관측을 위해 산업통상자원부에서 설치한 HeMOSU-2

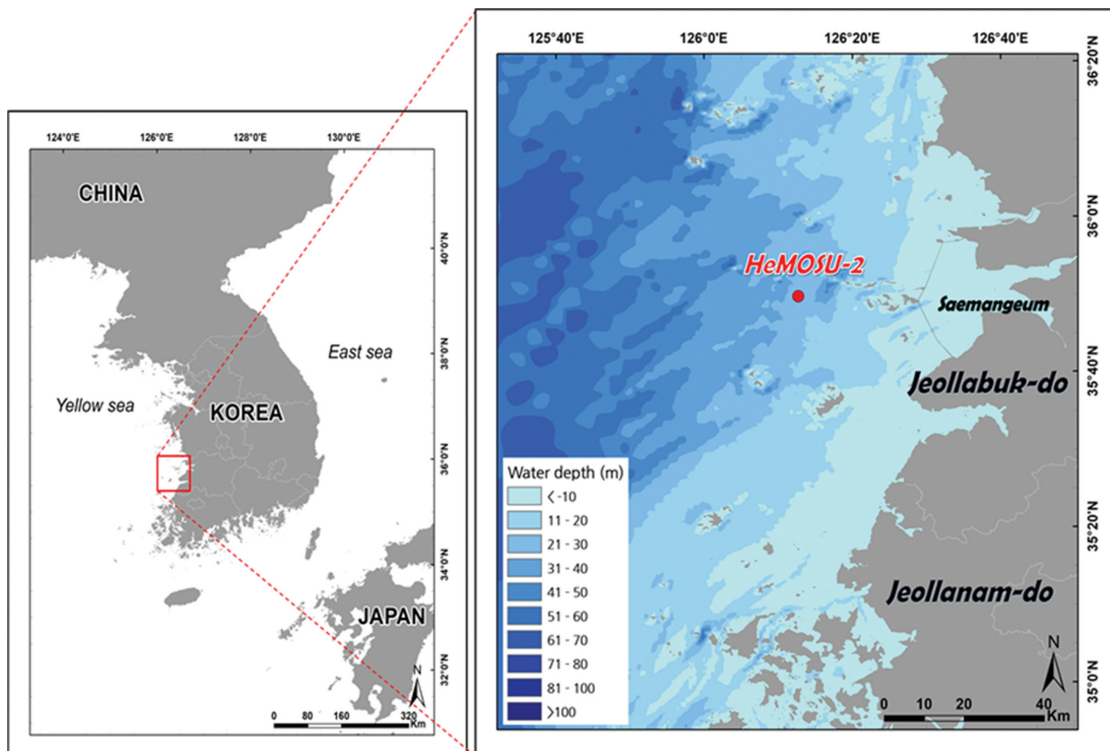


Fig. 1. Location map of HeMOSU-2 in Korean west sea.

기상타워는 Fig. 1에 제시한 바와 같이 E 126°12' 45", N 35°49' 40" 위치에 석션 트라이포드 형태의 기초가 적용됐으며, 적용 수심은 기본 수준면(D.L.) 기준 30 m이다(Lee et al., 2021). 본 연구에서는 국내 서해안에 위치한 HeMOSU-2 기상타워에서 2013.11.26~2014.04.23.(131일) 기간 동안 관측된 수면변동자료(WSE, Water Surface Elevation)를 이용하여 유의파고(H_s), 침투주기(T_p) 및 스펙트럼 정보를 10분 간격으로 산정하였으며, 스펙트럼의 총 개수는 18,864개이다. 관측 장비로는 RADAC사의 WaveGuide Radar를 이용하였으며, 관측 주기는 5 Hz(0.2초)이다.

산정된 파랑 스펙트럼 정보는 국내 해역 조건을 적용하였다. 통상적으로 풍파는 주기의 관점에서 엄격하게 정해진 기준이 없으며, 파형경사를 통해 풍파의 범위를 정하게 되는데, 수면변동자료를 이용하여 파랑 정보를 산출하는 경우 파형경사에 대한 정보를 적용할 수 없기 때문에 Munk(1951)가 제안한 기준과 전국 심해설계과 산출 보고서(MOF, 2019)에서 제안한 주기 기준을 적용하여 한반도 해역의 적정 풍파 기준을 1~20초로 적용한 후, 스펙트럼 분석을 수행하였다. 스펙트럼 추정값의 정확도를 향상시키기 위해 다음 식과 같이 편향-분산 트레이드 오프(Bias-Variance Trade-off) 이론이 적용되는 데이터 평활화 기법을 적용하였다. 편향-분산 트레이드 오프는 임의의 분포를 일반화 하는 과정에서 과적합(Overfitting) 또는 과소적합(Underfitting)과 같은 오차를 최소화하는 경우 사용되는 이론 중 하나이다(식(1) 참조).

$$E[(\hat{X} - X)^2] = (X - E(\hat{X}))^2 + (E(X) - [E(\hat{X})])^2 \quad (1)$$

여기서, \hat{X} 는 스펙트럼 추정치, X 는 실제 스펙트럼 값이다. 또한, 식(1)에서 좌변은 평균제곱오차(MSE, Mean Square Error)이며, $(E(X) - [E(\hat{X})])^2$ 은 분산, $(X - E(\hat{X}))^2$ 항은 편향(Bias)의 제곱이다.

본 연구에서 적용한 평활화 기법은 식(2)~(3)과 같이 스펙트럼 밀도(I_k)를 추정한 후, 평활화 함수 ψ_j 를 산정하여 수행하였다(Goda, 2010).

$$I_k = \begin{cases} N(A_k^2 + B_k^2) & : 1 \leq k \leq N/2 - 1 \\ NA_0^2 & : k = 0 \\ NA_{N/2}^2 & : k = N/2 \end{cases} \quad (2)$$

$$S(f_k) = I_k \cdot C_p \cdot (\Delta t/2) \quad (3)$$

여기서, C_p 는 스펙트럼 에너지 손실에 대한 보정 계수이며, A_k, B_k 는 Fourier 계수이다. 상기 식으로 산정된 스펙트럼에 대하여 평활화는 다음과 같은 식(4)~(6)으로 표현할 수 있다.

$$\hat{S}(f_k) = \sum_{j=-n}^n \psi_j S(f_{k+j}) \quad (4)$$

$$\sum_{j=-n}^n \psi_j = 1 \quad (5)$$

$$\psi_j = \psi_2(f_k) = \frac{1}{\psi_2} \left\{ 1 - \frac{|j|}{[(n-1)/2]} \right\} : -[(n-1)/2] \leq j \leq [n/2] \quad (6)$$

여기서, n 은 평활화 개수, ψ_j 는 평활화 함수를 의미하며, 이후, 파랑 스펙트럼 매개변수 추정을 위한 관측 스펙트럼은 평활화를 적용한 스펙트럼($\hat{S}(f_k)$)을 이용하였다.

2.2 분석 방법

본 연구에서는 한반도 해역의 파랑 스펙트럼 비교에 널리 사용되는 수정 BM 스펙트럼과 JONSWAP 스펙트럼을 통해 전 파고 범위를 대상으로 파랑 매개변수 추정을 수행하였다.

BM 스펙트럼($S_{BM}(f_k)$)은 다음 식(7)로 표현이 가능하며, Goda(1988)에 의해 다시 제안된 BM 스펙트럼($S_{GBM}(f_k)$)은 식(8)로 표현이 가능하다.

$$S_{BM}(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp[-1.03 (T_{1/3} f)^{-4}] \quad (7)$$

$$S_{GBM}(f) = 0.205 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp[-0.75 (T_{1/3} f)^{-4}] \quad (8)$$

그러나, 식(7)~(8)은 개별파 분석을 통해 얻어지는 유의파고($H_{1/3}$)와 유의파주기($T_{1/3}$)의 함수로서, 이는 스펙트럼 분석법을 통해 얻어지는 유의파고(H_s)와 침투주기(T_p)의 함수로의 변형이 필요하다. 이에 Cho et al.(2020)는 $T_{1/3} \approx 0.95 T_p$ 의 선형관계를 적용하여 다음 식(9)와 같이 수정 BM 스펙트럼($S_{mBM}(f_k)$)을 제안하였으며, 본 연구에서는 수정 BM 스펙트럼을 이용하여 척도계수(α , Scale Parameter)와 형상계수(β , Shape Parameter)를 추정하였다.

$$S_{mBM}(f) = 0.300 H_s^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp[-1.098 (T_p f)^{-4}] \quad (9)$$

척도계수와 형상계수는 비선형 최소 제곱 방법(Nonlinear Least Squares Method)를 이용하여 산정하였다. 한편, 스펙트럼 분포의 일반식은 다음과 식(10)과 같이 표현이 가능하며, 이를 통해 척도계수와 형상계수의 관계 기준을 $H_s = 4\sqrt{m_0}$ 를 따를 때, $\beta = -4\alpha$ 로 표현할 수 있다.

$$S(f) = \alpha f^{-5} \exp(-\beta f^{-4}) \quad (10)$$

JONSWAP 스펙트럼은 복해를 대상으로 기존 스펙트럼에 침투중대계수(γ_{opt})를 적용하여 제안된 스펙트럼 분포이며, 다음과 같이 표현한다(식(11)~(15) 참조).

$$S_J(f) = B_J H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp[-1.25 (T_p f)^{-4}] \times \gamma_{opt}^{p^*} \quad (11)$$

$$B_J = \frac{0.0624(1.094 - 0.01915 \times \ln \gamma)}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{(-1)}} \quad (12)$$

$$T_p = T_{1/3} / [1 - 0.132(\gamma + 0.2)^{-0.559}] \quad (13)$$

$$p^* = \exp \left[- \frac{(T_p f - 1)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (14)$$

$$\sigma \approx \begin{cases} \sigma_a = 0.07 : f \leq f_p \\ \sigma_b = 0.09 : f > f_p \end{cases} \quad (15)$$

또한, JONSWAP 스펙트럼의 γ_{opt} 를 추정하기 위해서 γ_{opt} 의 범위를 1부터 10까지 0.05 간격으로 변화시켰으며, 식(16)과 같이 관측 스펙트럼과 추정 스펙트럼의 RMSE를 계산하여 오차가 가장 작게 나타나는 γ_{opt} 값을 산출하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n [\hat{S}(f_k) - S(f_k)]^2}{n}} \quad (16)$$

여기서, $\hat{S}(f_k)$, $S(f_k)$ 는 각각 관측 스펙트럼과 추정 스펙트럼이며, n 은 스펙트럼의 주파수(f) 개수($n = 1,485$)를 의미한다.

3. 결 과

3.1 첨두중대계수(γ_{opt}) 산정 결과

전 파고 범위를 대상으로 JONSWAP 스펙트럼의 첨두중대

계수(γ_{opt})를 산정한 결과, JONSWAP 스펙트럼 분포식에서 첨두중대계수를 나타내는 γ_{opt} 는 고파영역에서 표준값 3.3을 적용하는 것으로 제안되고 있는 것에 비해 약 40% 작은 $\gamma_{opt} = 1.27$ 로 나타났다. 파고가 4.0 m 이상의 경우, γ_{opt} 의 범위는 [1.0, 3.65]이며, 평균은 1.79로 나타났으며, 파고가 3.0~4.0 m 범위인 경우, γ_{opt} 는 [1.0, 3.9]의 변동을 보이며, 이때의 평균은 1.44로 나타났다. 또한, 파고가 2.0~3.0 m인 경우, γ_{opt} 의 범위는 [1.0, 4.8]이며, 평균은 1.32, 파고가 1.0~2.0 m인 경우, γ_{opt} 의 범위는 [1.0, 6.85]이며, 평균은 1.39, 파고가 1 m 이하인 경우, γ_{opt} 의 범위 및 평균은 [1.0, 5.9], 1.20으로 산정됐다(Fig. 2 참조).

JONSWAP 스펙트럼의 매개변수인 첨두중대계수(γ_{opt})의 값이 커질수록 파랑 스펙트럼이 충분히 발달하지 못함을 의미하는데, Fig. 2에서 γ_{opt} 의 전반적인 경향을 살펴보면, 파고가 작아질수록 γ_{opt} 의 평균값은 작아지고 있지만 전반적으로 γ_{opt} 의 분포 범위가 매우 넓음을 확인할 수 있다. 이는 파고가 작아짐에 따라 파랑 스펙트럼이 충분히 발달하지 못하고 있는

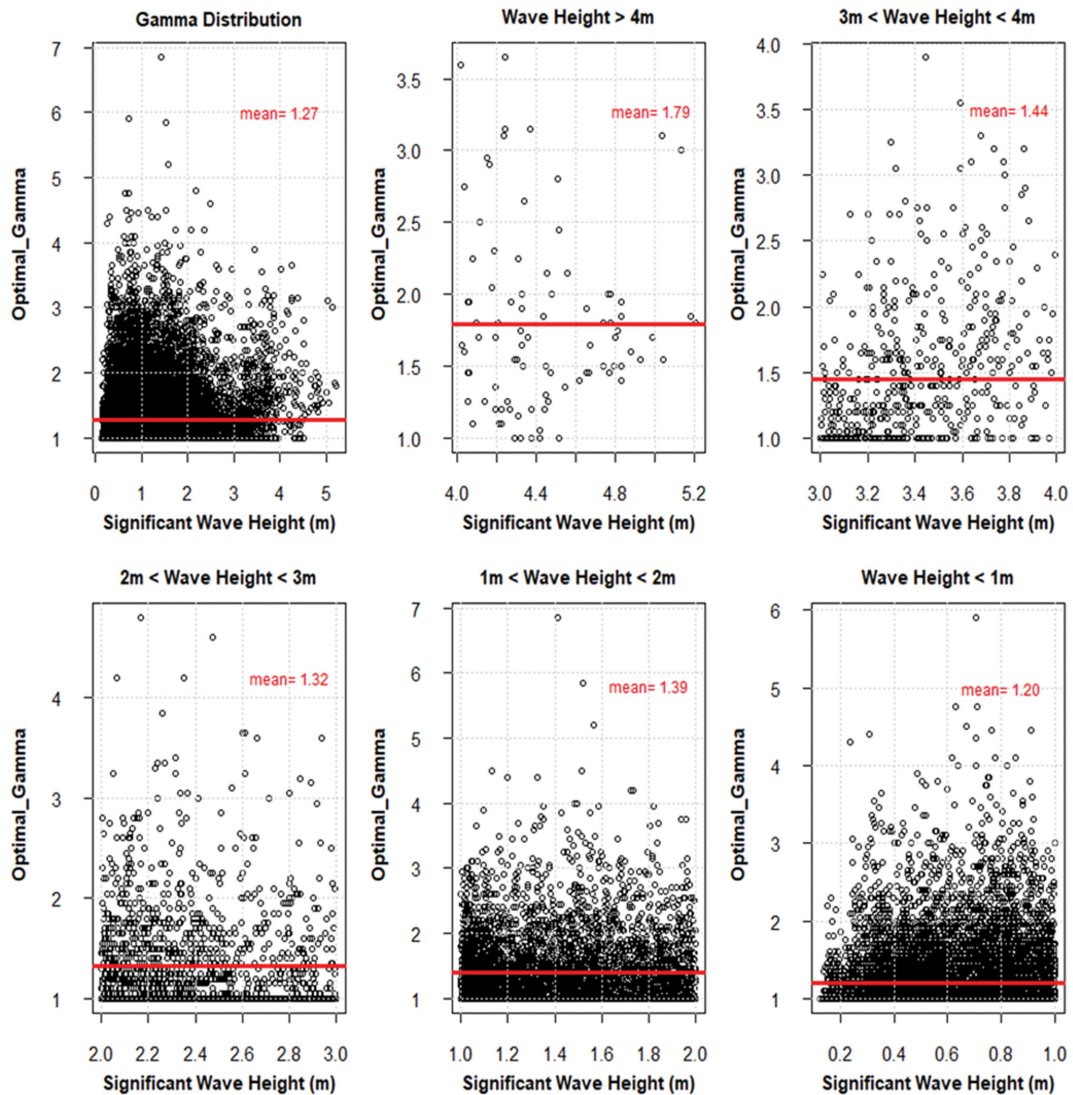
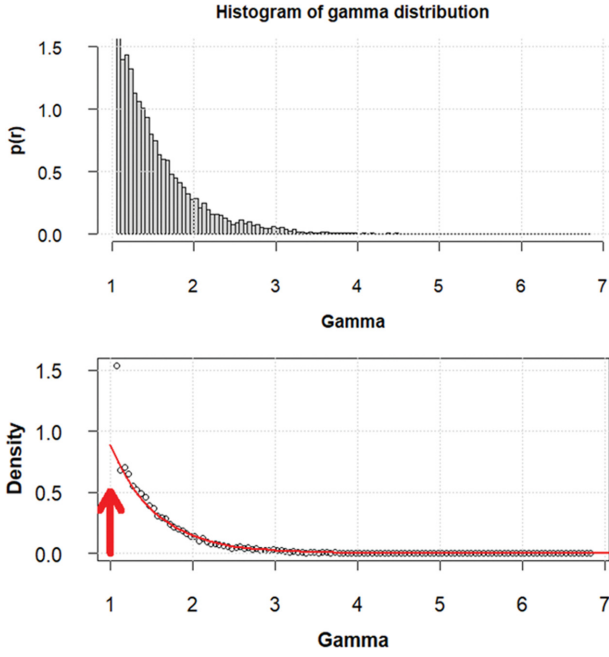


Fig. 2. Optimal γ_{opt} distribution by significant wave height.

Fig. 3. Optimal γ_{opt} density distribution.

특성을 보여주고 있으며, 이러한 경향은 Xie et al.(2019)의 연구결과와 유사하게 나타남을 확인할 수 있다.

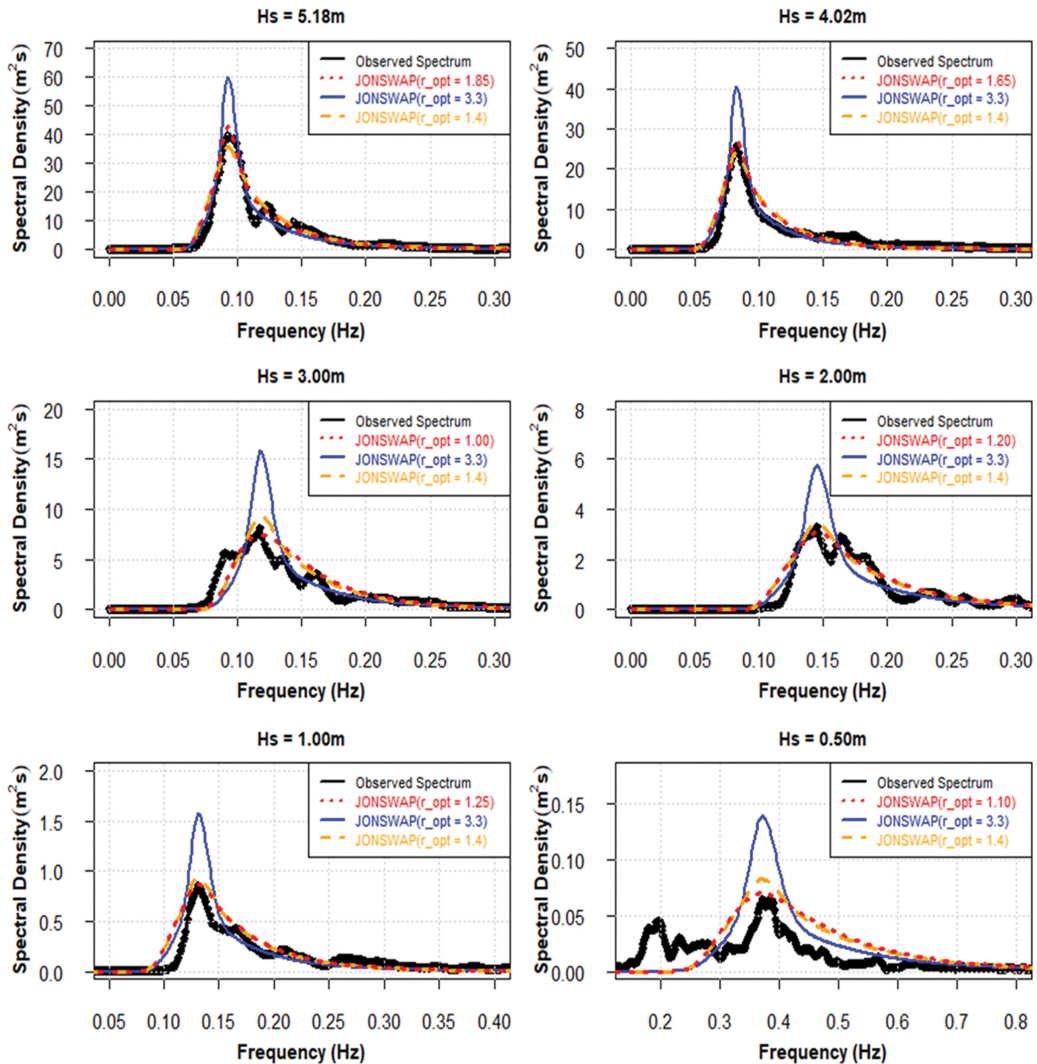
분석 대상 해역인 한반도 서해안 HeMOSU-2 위치에서 γ_{opt} 는 파고가 작아짐에 따라 전반적으로 감소하는 경향을 보이고 있었으며, 전체 파고범위에 대하여 γ_{opt} 의 분포는 이산 확률 변수에서 특정한 값에 대한 확률을 나타내는 확률 질량 함수(PMF)와 연속 확률 변수 분포인 확률 밀도 함수(PDF)의 합으로 표현이 가능하다(식(17) 및 Fig. 3 참조).

$$P_{HeMOSU-2}(\gamma_{opt}) \quad (17)$$

$$= \begin{cases} 0.509 & : \gamma_{opt} = 1 \\ (1 - P(\gamma_{opt} = 1)) \times 1.803 \exp(-1.803(\gamma_{opt} - 1)) & : \gamma_{opt} > 1 \end{cases}$$

한편, 추정된 γ_{opt} 를 이용하여 각 파고 구간 별 가장 높은 파고의 관측 스펙트럼과 비교한 결과를 다음 Fig. 4에 제시하였으며, 추가 비교를 위해 Cho et al.(2020)에서 동해 남향진 해역을 대상으로 산정한 $\gamma_{opt} = 1.4$ 를 이용하였다.

분석 결과, JONSWAP 스펙트럼에서 제안하는 $\gamma_{opt} = 3.3$ 을

Fig. 4. Comparison result of observed spectrum and JONSWAP spectrum with estimated γ_{opt} , $\gamma_{opt} = 3.3$, $\gamma_{opt} = 1.4$

이용하여 추정된 스펙트럼은 모든 파고 범위에서 최대 50% 과대 추정되는 경향이 발생했으며, $\gamma_{opt} = 1.4$ 의 경우 파고 4.0 m 이상의 범위에서 적절한 추정이 되고 있지만, 파고가 작아짐에 따라 과대 추정됐다. 각 파고 범위에 따라 산정된 γ_{opt} 를 적용하여 스펙트럼을 추정하는 경우 역시 파고가 작아짐에 따라 불규칙한 관측 스펙트럼에 대한 침두 주파수 전·후의 영역을 추정하는데 한계가 있으며, 평상파 영역 ($H_s \leq 1.0$ m)에서 JONSWAP 스펙트럼 적용의 한계를 보이고 있었다. JONSWAP 스펙트럼은 스펙트럼의 간격을 결정하는 계수 σ_{opt} 가 있으며, 이를 γ_{opt} 와 동시에 추정하여 추정 스펙트럼의 정확도를 향상시킬 필요가 있을 것으로 사료된다.

3.2 척도계수(α) 및 형상계수(β) 추정 결과

BM 스펙트럼의 척도계수와 형상계수를 모든 파고 범위에 대하여 추정한 후, 관측 스펙트럼과 비교한 결과는 다음 Fig. 5와 같다. BM 스펙트럼은 관측 스펙트럼에 비해 전체 파고

범위에서 과소평가되는 경향을 보이고 있으며, JONSWAP 스펙트럼과 동일하게 관측 스펙트럼의 침두 주파수 전·후 급격한 증가 및 감소에 대한 경향을 재현함에 있어 한계를 보이고 있었다. 또한, 파고가 충분히 성장하지 못하여 작아지는 경우 다중 침두 주파수(Multi- peak frequency) 등 불규칙한 스펙트럼의 형태로 인하여 침두 주파수 추정에 차이가 발생하는 것으로 나타났다.

전체 파고 범위에 대하여 추정된 척도 계수(α)의 평균 범위는 [0.21, 0.31]이며, 파고가 감소함에 따라 같이 감소하는 경향을 보였고, 형상 계수(β)의 평균 범위는 [-1.39, -1.24]로서, 파고 변화에 따른 뚜렷한 변화 양상을 보이고 있지 않았다. 또한, 파고가 0.5 m 이하의 범위로 매우 작은 경우 이상치로 판단되는 매개변수들이 추정되고 있으며, 이는 BM 스펙트럼 내 두 개의 매개변수로는 충분히 성장하지 못한 관측 스펙트럼을 추정함에 무리가 있는 것으로 사료된다.

한편, 척도 계수(α)는 평균 0.253, 형상 계수(β)는 -1.377

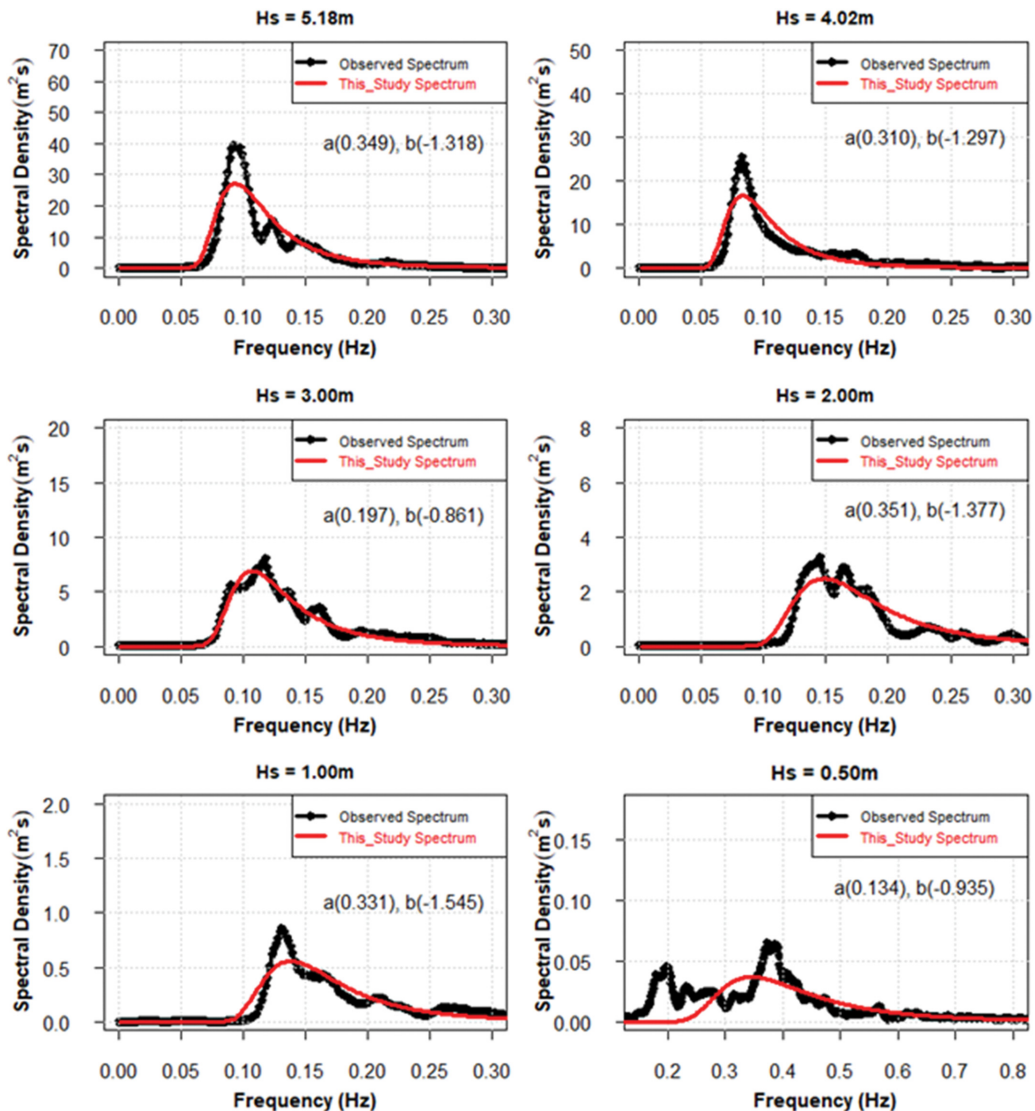
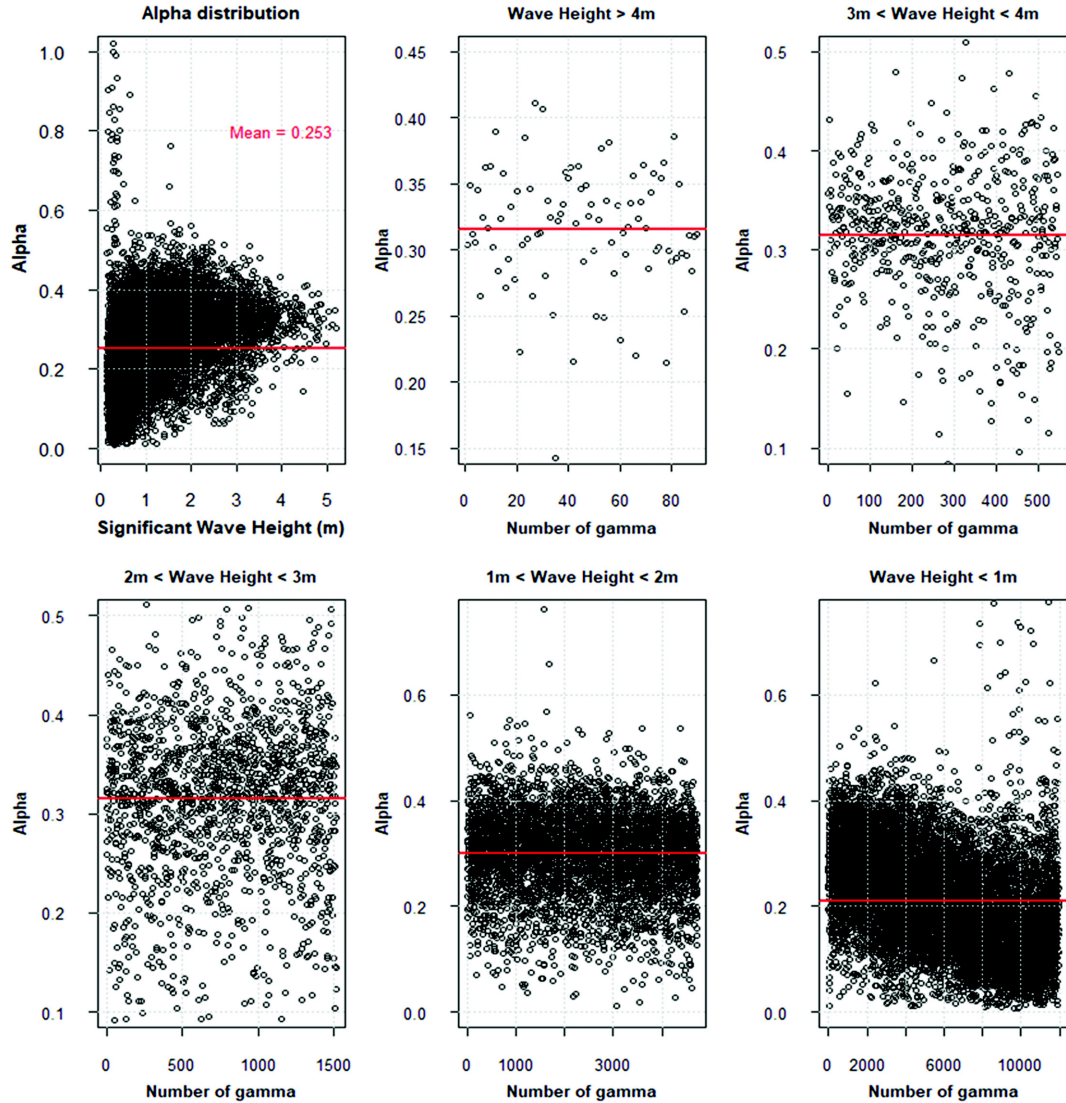


Fig. 5. Comparison of observed spectrum and estimated spectrum.



(a) Scale parameter distribution

Fig. 6. Estimation result of BM spectrum parameter.

로 나타났으며, 이는 기존 수정 BM 스펙트럼의 계수인 $[0.300, -1.098]$ 과 각각 약 20%, 15%의 차이를 보였고, Cho et al. (2020)에서 산정된 매개 변수인 $[0.284, -1.079]$ 와도 약 10%, 21%의 차이를 보였다(Fig. 6 참조).

스펙트럼 분포의 일반식을 통해 $\beta = -4\alpha$ 의 관계를 산술적으로 계산할 수 있지만, 본 연구에서 추정된 두 매개변수(α, β) 간의 관계는 $\beta = -3.86\alpha$ 로 약 3.5%의 차이가 발생하였으며, 이는 모든 파고 범위에 대한 분석이 이루어지면서 평상파($H_s = 1.0$ m) 이하에서 산정되는 매개변수 값의 감소로 인해 발생하는 차이로 사료된다(Fig. 7 참조).

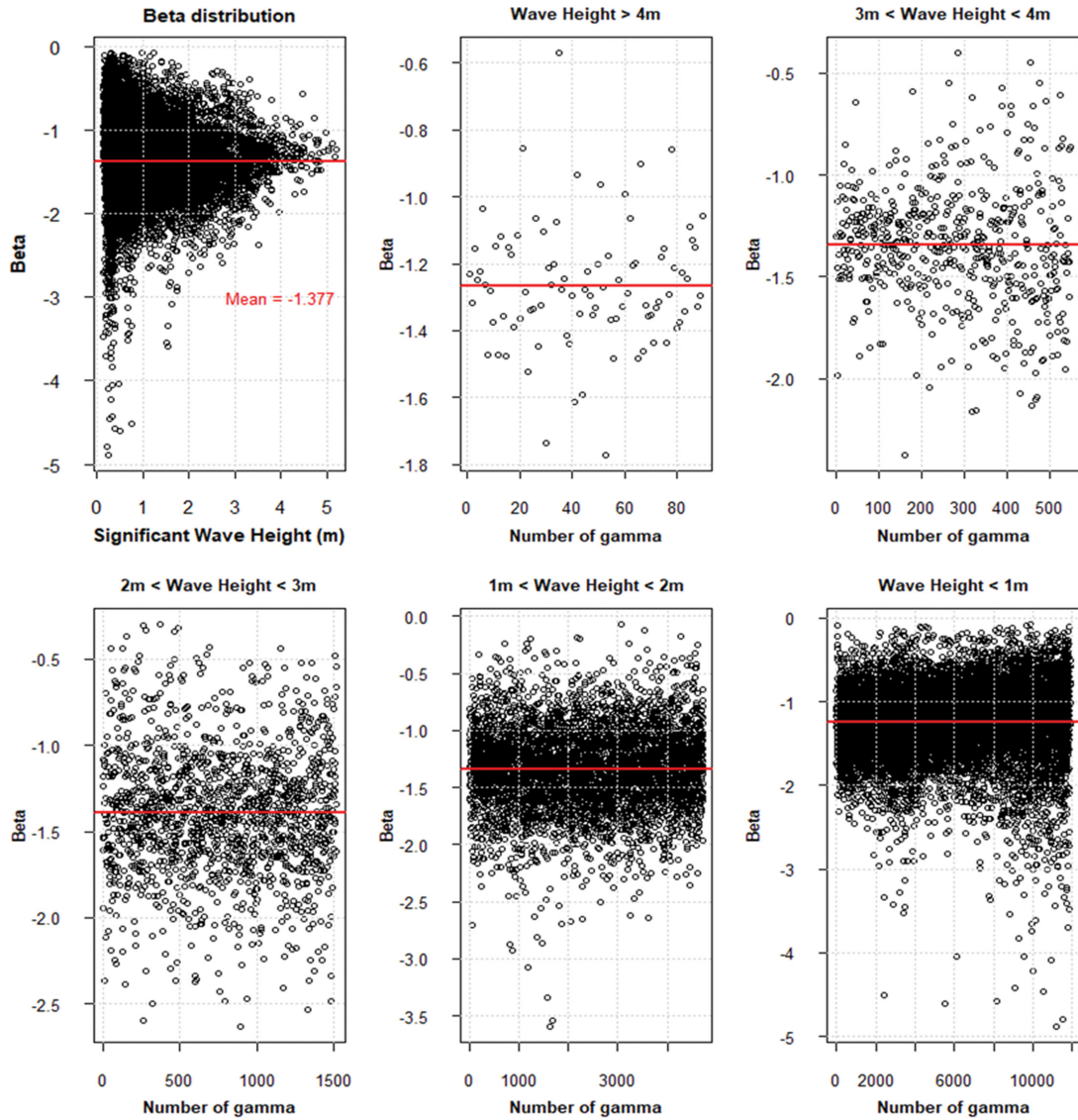
4. 결론 및 제언

본 연구에서는 한반도 해역 특성의 조건을 적용하여 산정된 관측 파랑 스펙트럼 자료를 기준으로 모든 파고 범위에 대

하여 JONSWAP 스펙트럼의 첨두증대계수(γ_{opt}), 수정 BM 스펙트럼의 척도계수(α) 및 형상계수(β)를 추정하였으며, 이를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 풍파의 기준은 파형경사로 결정이 가능하지만, 수면변동 자료를 이용하여 스펙트럼을 추정하는 경우 파형경사 조건을 적용함에 어려움이 있다. 이에 한반도 해역의 풍파 기준을 주기의 관점에서 1-20초로 적용한 후, 파랑 변수 및 스펙트럼 정보를 산정하였으며, 이후 스펙트럼의 밀도($S(f_k)$, Spectral density)와 주파수(f)의 신뢰구간 문제를 해결하기 위해 평활화 기법을 적용하여 산정된 관측 스펙트럼을 매개변수 추정을 위한 기준 스펙트럼 자료로 이용하였다.

2. 모든 파고 범위에서 관측 스펙트럼을 기준으로 JONSWAP 스펙트럼의 매개변수인 첨두증대계수(γ_{opt})를 추정한 결과, 기존 제안되고 있는 $\gamma_{opt} = 3.3$ 에 비해 현저히 작은 $\gamma_{opt} = 1.27$ 로 산정됐다. 또한, 평균 γ_{opt} 는 파고가 감소함에 따라 전반적



(b) Shape parameter distribution

Fig. 6. Continued.

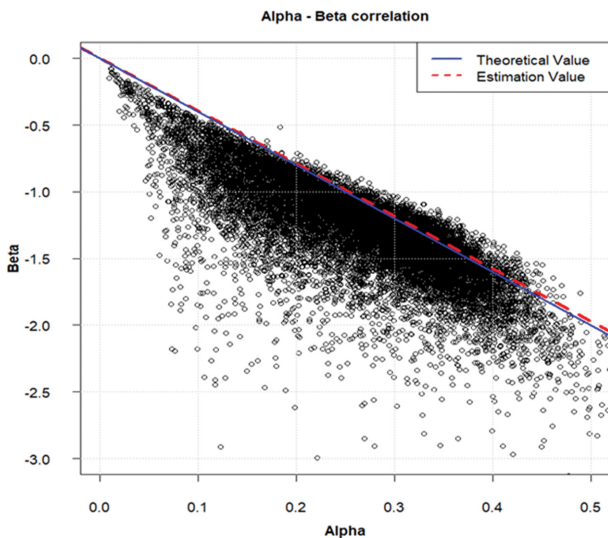


Fig. 7. Correlation between scale parameter and shape parameter.

으로 감소하는 경향을 보이고 있었으며, γ_{opt} 의 분포는 확률질량함수(PMF, probability mass function)와 확률밀도함수(PDF, probability density function)의 결합 형태로 나타났다.

3. 유의파주기($T_{1/3}$)와 첨두주기(T_p) 사이의 선형관계를 적용하여 제안된 수정 BM 스펙트럼의 매개변수인 척도계수(α)와 형상계수(β)를 추정한 결과, 기존 매개변수 $[0.300, -1.098]$ 와 약 20%, 15%의 차이를 보이는 $[0.253, -1.377]$ 로 산정됐다. 또한, 파고가 작아짐에 따라 스펙트럼의 불안정한 형태로 인하여 매개변수를 추정함에 무리가 있었으며, 이는 BM 스펙트럼의 한계로 판단된다. 한편, 수정 BM 스펙트럼의 일반식으로 통해 두 매개변수간의 상관식은 $\beta = -4\alpha$ 의 관계가 있지만, 본 연구에서 산정한 두 매개변수간의 상관관계는 $\beta = -3.86\alpha$ 로 나타났다.

이러한 파랑 스펙트럼의 매개변수 추정 연구를 통해 산정된 결과는 연안 및 해양구조물을 설계함에 있어 매우 중요한

요소이다. 그러나 기존에 제안된 매개변수들을 사용함에 있어 시간과 공간적인 검증이 요구되지만 해양관측자료의 한계 때문에 다각적으로 이루어지지 않는 실정이다. 본 연구에서는 JONSWAP 스펙트럼과 수정 BM 스펙트럼을 대상으로 γ_{opt} , α , β 를 추정하였으나, 보다 더 많은 매개변수를 동시에 추정함으로써 스펙트럼의 정확도를 향상시켜 분석 대상 지점의 스펙트럼 매개변수를 제안할 필요가 있다. 또한, 다양한 지점에 대한 추가 분석이 필요하며, 이러한 분석 결과를 바탕으로 한반도 해역에 적용가능한 파랑 스펙트럼 분포식을 제안할 필요가 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부의 “독도의 지속가능한 이용연구 - 독도 데이터베이스 구축 관리 및 독도종합정보시스템 개편(과제번호: PG-52262)”의 일환으로 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

References

- Amuro, Jamal, S., Ewans, K. and Sheikh, R. (2014). Measured Wave Spectra Offshore Sabah & Sarawak, Malaysia. In Offshore Technology Conference-Asia. OnePetro.
- Bretschneider, C.L. (1968). Significant waves and wave spectrum. *Ocean Industry*, 40-46.
- Cho, H.Y., Jeong, W.M., Oh, S.H. and Baek, W.D. (2020). Parameter estimation and fitting error analysis of the representative spectrums using the wave spectrum off the Namhangjin, East Sea. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 32(5), 363-371 (in Korean).
- Ewans, K. and McConochie, J. (2018). On the Uncertainties of Estimating JONSWAP Spectrum Peak Parameters. In International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (Vol. 51227, p. V003T02A034). American Society of Mechanical Engineers.
- Feng, W.B., Yang, B., Cao, H.J. and Ni, X.Y. (2012). Study on wave spectra in south coastal waters of Jiangsu. In *Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech Publications Ltd, 212, 193-200.
- Goda, Y. (1988). Statistical variability of sea state parameters as a function of wave spectrum. *Coastal Engineering in Japan*, 31(1), 39-52.
- Goda, Y. (2010). Random seas and design of maritime structures (Vol. 33). World Scientific Publishing Company.
- Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Carwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W. and Walden, H. (1973). Measurements of windwave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Deutsches Hydrographisches Zeitschrift*, 8(12), 1-95.
- Huang, N.E., Long, S.R., Tung, C.C., Yuen, Y. and Bliven, L.F. (1981). A unified two-parameter wave spectral model for a general sea state. *Journal of Fluid Mechanics*, 112, 203-224.
- Jung, J.S. and Yoon, J.S. (2019). Experimental study for overtopping discharges of sea dike having Low Mound and High Wave Wall (LMHW). *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 31(6), 335-343 (in Korean).
- Kang, D.H. and Lee, B.G. (2014). Evaluation of wave characteristics and JONSWAP spectrum model in the northeastern Jeju island on fall and winter. *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, 17(2), 63-69 (in Korean).
- Kim, Y.T. and Lee, J.I. (2019). Hydraulic experiments on reflection coefficients for perforated wall caisson with rock fill. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 31(6), 403-408 (in Korean).
- Lee, D.S., Oh, S.-H. and Cho, B.S. (2016). Experimental investigation on the change of stability coefficient of Tetrapod according to difference in density. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 28(3), 124-131 (in Korean).
- Lee, U.J., Ko, D.H., Cho, H.Y. and Oh, N.S. (2021). Correlation analysis between wave parameters using wave data observed in HeMOSU-1&2. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 33(4), 139-147 (in Korean).
- Mazaheri, S. and Imani, H. (2019). Evaluation and modification of JONSWAP spectral parameters in the Persian Gulf considering offshore wave characteristics under storm conditions. *Ocean Dynamics*, 69(5), 615-639.
- Ministry of Oceans and Fisheries (2019). Report on the deep water design wave estimation in the Korea (in Korean).
- Mitsuyasu, H. (1970). On the growth of wind-generated waves (2) - spectral shape of wind waves at finite fetch. *Proc. 17th Japanese Conf. Coastal Eng.*, 1-7.
- Munk, W.H. (1951). Origin and generation of waves. Scripps Institution of Oceanography La Jolla Calif.
- Pierson, W.J. and Moskowitz, L. (1964). A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii. *Journal of Geophysical Research*, 69, 5181-5190.
- Suh, K.D., Kwon, H.D. and Lee, D.Y. (2010). Some statistical characteristics of large deepwater waves around the Korean Peninsula. *Coastal Engineering*, 57(4), 375-384.
- Tucker, M.J. (1994). Nearshore waveheight during storms. *Coastal Engineering*, 24(1-2), 111-136.
- Xie, B., Ren, X., Jia, X. and Li, Z. (2019). Research on ocean wave spectrum and parameter statistics in the northern South China Sea. In Offshore Technology Conference. OnePetro.

Received 10 November, 2021

Revised 30 November, 2021

Accepted 30 November, 2021