

# 국내 서해안 파랑 관측자료를 이용한 대표주기 산정 및 최적 확률밀도함수 추정

## Estimation of Representative Wave Period and Optimal Probability Density Function Using Wave Observed Data around Korean Western Coast

이육재\* · 조홍연\*\* · 박진호\*\*\* · 고동희\*\*\*\*

Uk-Jae Lee\*, Hong-Yeon Cho\*\*, Jin Ho Park\*\*\* and Dong-Hui Ko\*\*\*\*

**요** **지** : 본 연구에서는 서해안 해상기상타워 2기에서 관측된 수면변동자료를 이용하여 해양특성을 구분하는 주요 인자인 첨두주기  $T_p$ 와 평균주기  $T_{02}$ 와  $T_{m-1,0}$ 를 산정하고 이상자료의 비율, 상관관계 분석 및 최적 확률밀도함수를 추정하였다. 산정된 대표주기 중 첨두주기의 경우, 이상 자료의 비율은 각각의 지점에서 5.73 %, 0.67 %로 나타났으며,  $T_{02}$ 는 4.35%, 0.01%,  $T_{m-1,0}$ 는 2.82%, 0.03%로 나타났다. 한편,  $T_{02}$ 와  $T_p$  사이의 관계를 분석한 결과 각 지점 별로 0.53, 0.63의 관계로 산정되었으며,  $T_{m-1,0}$ 와  $T_p$ 의 관계는 각각 1.15, 1.32로 나타났다.  $T_{02}$ 와  $T_{m-1,0}$ 는 서로 1.18, 1.22의 관계를 보이고 있었다. 산정된 대표주기의 최적 확률밀도함수를 추정한 결과,  $T_p$ 는 각각의 지점에서 'Log-normal', 'Normal' 분포를 따르고 있었으며,  $T_{02}$ 는 'Gamma', 'Normal' 분포,  $T_{m-1,0}$ 는 각각 'Log-normal', 'Normal' 분포가 우세한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 서해안을 대상으로 수행되는 파랑 분석에 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 해상기상타워, 첨두주기, 평균주기, 상관관계분석, 최적 확률밀도함수

**Abstract** : In this study, the peak wave period  $T_p$  and mean wave period  $T_{02}$  and  $T_{m-1,0}$ , which are major parameters for classifying ocean characteristics, were calculated using water surface elevation data observed from the second west coast oceanographic and meteorological observation tower. In addition, the ratio of abnormal data, correlation analysis, and optimal probability density function were estimated. In the case of  $T_p$  among the calculated representative periods, the proportion of abnormal data was 5.73% and 0.67% at each point, and  $T_{02}$  was 4.35% and 0.01%.  $T_{m-1,0}$  was found to be 2.82% and 0.03%. Meanwhile, as a result of analyzing the relationship between  $T_{02}$  and  $T_p$ , the relationship was calculated to be 0.53 and 0.63 for each point. The relationship between  $T_{m-1,0}$  and  $T_p$  was 1.15 and 1.32, respectively, and  $T_{02}$ ,  $T_{m-1,0}$  was 1.18 and 1.22. As a result of estimating the optimal probability density function of the calculated representative period,  $T_p$  followed the 'Log-normal' and 'Normal' distributions at each point, and  $T_{02}$  was 'Gamma', 'Normal' distribution and  $T_{m-1,0}$  showed that 'Log-normal' and 'Normal' distribution were dominant, respectively. It is decided that these results can be used as basic data for wave analysis conducted on the west coast.

**Keywords** : oceanographic and meteorological observation tower, peak wave period, mean wave period, correlation test, optimal probability density

### 1. 서 론

해양에서 주로 수행되는 해양구조물 설계, 극치 분석, 파랑 스펙트럼 분포형 추정 등의 다양한 분석에서는 주로 파고와 주기가 이용된다. 파고와 주기는 파열분석법(Wave Train Analysis)과 파랑 스펙트럼 분석법(Wave Spectrum Analysis)

을 통해 산정되며, 이를 산정하기 위한 기초 자료로 수면변동자료(WSE, Water Surface Elevation)가 이용된다. 최근에는 다양한 해양 특성을 분석하기 위해 유의파고( $H_m$  ≈  $H_s$ )와 첨두주기가 적용되고 있기 때문에 파랑 스펙트럼 분석이 주로 사용되고 있으며, 이를 통해 정확한 파랑 변수를 산정하는 것이 매우 중요하다(Karunaratna et al., 2014; Vanem,

\*한국해양과학기술원 해양공간개발·에너지연구부 연수연구원(Post Doctoral Scientist, Ocean Space Development and Energy Research Department, Korea Institute of Ocean Science and Technology)

\*\*한국해양과학기술원 해양빅데이터·AI센터 책임연구원(Principal Research Scientist and Professor, Marine Bigdata and AI Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Univ. of Science and Technology)

\*\*\*한국선급 선박해양기술팀 수석연구원(Research Engineer, Ship and Offshore Technology Team, Korean Register)

\*\*\*\*한국해양과학기술원 해양공간개발·에너지연구부 선임연구원(Corresponding author: Dong-Hui Ko, Senior Research Scientist, Ocean Space Development and Energy Research Department, Korea Institute of Ocean Science and Technology, 385, Haeyang-ro, Yeongdo-gu, Busan 49111, Korea, Tel: +82-51-664-3530, kodh02@kiost.ac.kr)

2018; Shao et al., 2018).

파랑 스펙트럼 분석을 통해 산정되는 유의파고( $H_s$ )의 경우, 추정되는 스펙트럼의 면적을 통해 계산되기 때문에 산정되는 유의파고에 대한 불확실성 문제는 발생하지 않는다. 그러나, 첨두주기의 경우, 파랑 스펙트럼에서 최대 주파수에 해당되는 값을 이용하여 산정되고 있지만 낮은 파고에서 주로 발현하는 다중 첨두 스펙트럼(Bimodal Spectrum) 형상으로 인하여 첨두주기 산정에 불확실성 문제가 발생하고 있다. 이에 다중 첨두 스펙트럼으로 인해 발생하는 파랑 변수 산정 및 매개변수 추정의 문제점을 해결하기 위해 수치모델 및 관측자료 분석이 다양하게 이루어지고 있다(Vettor and Soares, 2020; Garcia-Gabin, 2015). 또한, Lee et al.(2022)는 최적 평활화 기법과 신뢰구간 추정 기법을 적용하여 최적 첨두주기를 추정하는 연구를 수행하였으며, 파랑 스펙트럼 에너지 밀도가 작은 경우 및 다중 첨두 스펙트럼 형상이 발생하는 경우 정확한 첨두주기를 추정함에 한계가 있음을 확인한 바 있다.

일반적으로 파랑 스펙트럼 분석 과정을 거쳐 산출되는 첨두주기뿐 아니라 0차 모멘트( $m_0$ ), 1차 역모멘트( $m_{-1}$ ), 2차 모멘트( $m_2$ )를 이용하여 산정되는 평균주기도 매우 중요한 파랑 변수로 강조되고 있으며, 최근 유럽에서는 파랑 스펙트럼을 통해 추정되는 첨두주기의 불확실성 문제로 인하여 평균주기 사용의 중요성이 대두되고 있다(IHAR, 1989; Goda, 2010; Allsop et al., 2016). 대상 해역의 파랑 분포 특성을 파악하기 위해서는 스펙트럼 분포 모델(PM, BM, JONSWAP, TMA 스펙트럼 등)에서는 첨두주기를 주로 사용하지만, 첨두주기는 불연속적인 주파수에 대하여 계산되기 때문에 첨두주기 또한 불연속적인 값이 되며, 높은 파고에서 시간 변화를 확인했을 때, 첨두주기는 불연속적으로 변화할 수 있기 때문에 평균주기를 추정하는 것이 필요하다(Goda, 2010).

한편, 해양에서 주로 분석되고 있는 극치분석의 한 방법으

로 결합화률분포 분석이 요구되고 있다. 결합화률분포 분석은 해양의 다양한 주요 변수(파고, 주기, 파향 등)는 각각의 항목이 독립적인 항목이 아닌 상호 어느 정도의 관계가 예상되는 항목으로 기존 단변량 분석 방법으로 추정 정보가 제한되는 한계가 있기 때문에, 각각의 항목에 대한 상관성을 고려한 조건에서 목표 초과화률에 대한 범위를 산정하는 연구가 수행되어지고 있으며, 국제 표준에서도 I-FORM(Inverse First Order Reliability Method)을 이용한 분석이 요구되고 있는 설정이다(Veritas, 2010; Lee et al., 2023). 이러한 분석을 수행함에 있어 각각의 파랑 변수에 대하여 정확한 확률밀도함수를 추정하는 것이 매우 중요하게 여겨지고 있으며, 이에 따라 이에 본 연구에서는 산정된 대표주기에 대하여 두 가지 분포 적합도 검정을 통한 최적 확률밀도함수를 추정하였다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1 분석 자료

본 연구에서 파랑 스펙트럼 분석을 통해 대표주기를 산정하기 위해 사용된 자료는 해상풍력 단지 구축을 위해 설치된 HeMOSU 기상타워 2기에서 관측된 수면변동자료를 이용하였으며, 이때, HeMOSU-1의 설치 위치는  $126^{\circ}07'45"E$ ,  $35^{\circ}27'55"N$ , HeMOSU-2의 설치 위치는  $126^{\circ}12'45"E$ ,  $35^{\circ}49'40"N$ 이다(Fig. 1 참조).

수면변동자료는 파랑 스펙트럼 분석에 사용되는 가장 기본적인 관측자료이며, 관측에 사용된 Waveguide 장비는 Radac B.V.에서 1996년 개발된 장비로서, 수면변동자료를 200 ms (0.2 s) 간격으로 관측하는 고해상도 장비이다. HeMOSU-1의 관측 기간은 2013.07.28부터 2014.07.06이며, 결측을 제외한 총 170일 관측자료를 사용하였다. 또한, HeMOSU-2의 관측 기간은 2013.11.26부터 2014.04.23이며, 결측을 제외한 총

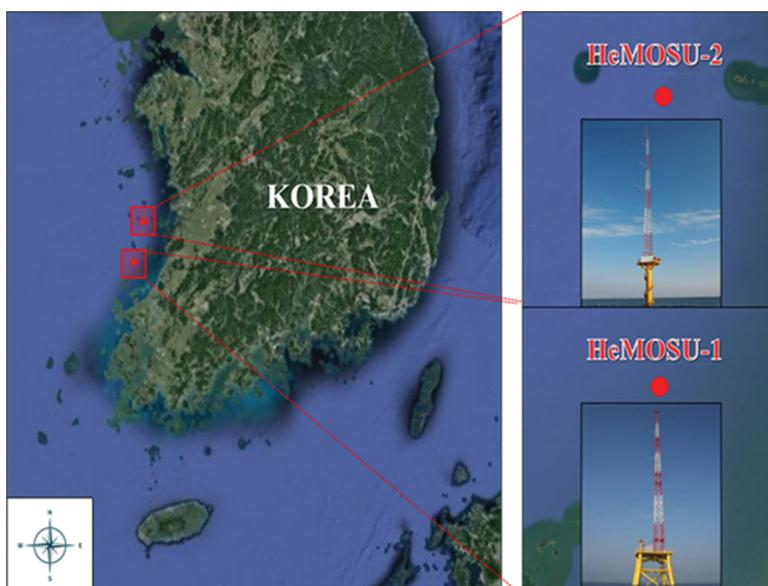
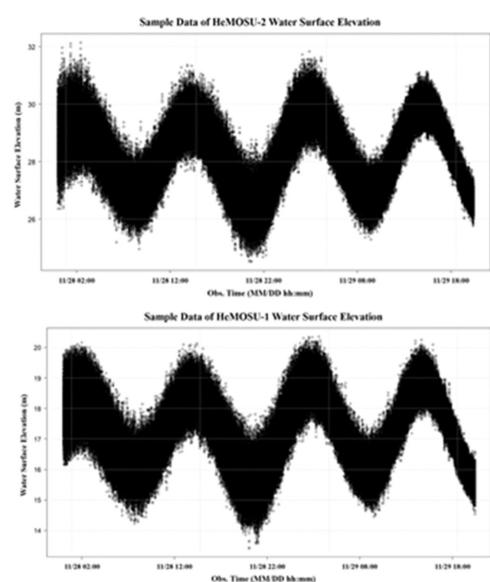


Fig. 1. Location map and water surface elevation data of HeMOSU-1, 2 in the western coast of the Korea.



**Table 1.** Waveguide server details

Model	Waveguide system
Manufacturer	RADAC (NL)
Sampling rate	5 Hz
Wave heights	0~60 m
Wave periods	1~100 s
Accuracy water level	1.0 cm
	WSE
Accuracy	±1.0 m
	Wave Height
	±3.0 cm
	Wave Period
	±50 ms
Environmental conditions	Temperature
	-40°C~65°C
	Humidity
	0~100%

133일 관측자료로서, 각각의 지점에 결측률은 각각 28.5%, 12.1%이다. 자료의 결측은 장비의 시스템 결함 및 유지보수 기간으로 인하여 발생된 것으로 판단된다. 두 지점의 수심은 각각 13.5 m와 30.0 m이며, 관측장비의 수면변동 관측 정확도는 ±1.0 cm이다(Table 1 참조).

## 2.2 대표주기 산정

해양에서 주로 사용되는 인자는 파고와 주기이며, 본 연구에서는 주기에 대한 분석을 수행하였다. 일반적으로 해양구조물 설계, 파랑 분포모델 산정 등에 주로 사용되는 주기는 첨두주기이며, 이는 파랑 스펙트럼 분석을 통해 계산되는 스펙트럼 에너지밀도에서 첨두주파수의 역수( $1/f_p$ )로 산정이 된다. 첨두주기 산정을 위해 파랑 스펙트럼 분석은 Lee et al. (2022)에서 사용된 분석 방법을 적용하였다. 해당 스펙트럼 분석 방법은 시간 영역에서 관측된 수면변동자료를 영점보정한 후, 데이터 원도우가 적용된 자료를 변환을 통해 주파수 영역에서 최적 첨두주기를 산정하였으며, 신뢰구간 문제를 해결하기 위한 평활화를 수행한다. 본 연구에서 사용한 첨두주기 자료는 해당 방법을 통해 산정된 값을 이용하였다. 또한, 최근 중요성이 강조되고 있는 평균주기에 대한 추가 분석을 수행하기 위하여 추정된 스펙트럼 정보를 통해 평균주기를 산정하였다. 파랑 스펙트럼 분석을 통해 산정 가능한 평균주기는  $T_{02}$ 와  $T_{m-1,0}$ 이 있으며, 과열분석법을 통해 산정되는 평균주기  $\bar{T}$ 가 있다.  $\bar{T}$ 의 경우, 스펙트럼 분석을 통해 산정되는  $T_{02}$ 와 유사한 값을 같기 때문에 본 연구에서는  $\bar{T}$  대신  $T_{02}$ 를 고려하여 분석을 수행하였으며,  $T_{02}$ 와  $T_{m-1,0}$ 의 산정 방법은 다음과 같다.

$$\bar{T} \approx T_{02} = \sqrt{m_0/m_2} \quad (1)$$

$$T_{m-1,0} = m_{-1}/m_0 \quad (2)$$

여기서,  $m_{-1}$ ,  $m_0$ ,  $m_2$ 은 각각 스펙트럼 에너지 밀도에서의  $n$ 차 모멘트를 의미하며, 이는 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$m_{-1} = \int_0^{\infty} f^{-1} S(f_k) df \quad (3)$$

$$m_0 = \int_0^{\infty} S(f_k) df \quad (4)$$

$$m_2 = \int_0^{\infty} f^2 S(f_k) df \quad (5)$$

한편, CIRIA et al.(2007)은 파랑 스펙트럼 분석을 통해 산정되는 두 개의 평균주기 중,  $T_{m-1,0}$ 에 대하여 수리실험을 통해 관측된 스펙트럼을 기반으로  $T_{m-1,0}$ 와  $T_p$  사이의 선형관계를 다음 식(6)과 같이 산정하였다. 해당 선형관계식을 통하여 특별한 정보 없이 첨두주기만을 알고 있는 경우  $T_{m-1,0}$ 을 추정할 수 있으나, 수심이 매우 낮은 지점 및 다중 피크의 영향이 주로 발생하는 경우에는 수치 해석을 통해 보다 정확한 값을 결정하여 사용하여야 한다.

$$T_p = 1.1 T_{m-1,0} \quad (6)$$

## 2.3 최적 대표주기 확률밀도함수 추정

일반적으로 주기의 최적 확률밀도함수는 대수정규분포(Log-normal distribution)가 제시되고 있다(Kamphuis, 2000; Holthuijsen, 2007). 본 연구에서는 대표주기( $T_{02}$ ,  $T_{m-1,0}$ ,  $T_p$ )에 가장 적합한 확률밀도함수를 추정하기 위해 일반적으로 가장 널리 사용되고 있는 최우도법(MLE, Maximum Likelihood Estimation)을 사용하였다(Venables and Ripley, 2013). 최우도법은 표본자료의 확률이 최대가 되도록 추정하는 방법이며, 점 추정에 의한 방법이다. 이러한 최우도법은 매개변수를 추정하는 방법 중 하나이며, 이를 위해 다음 식(7), (8)과 같이 우도 함수 또는 대수 우도 함수를 사용한다.

$$L(\delta; x) = \prod_{i=1}^n f_{\delta}(x_i) \quad (7)$$

$$\text{Log}L(\delta; x) = \prod_{i=1}^n \log f_{\delta}(x_i) \quad (8)$$

여기서,  $f$ 는 변수  $\delta$ 로 결정되는 확률변수들의 확률 밀도함수를 의미한다.

첨두주기의 최적 확률밀도함수 추정에 사용된 후보함수는 'Normal', 'Lognormal', 'Gamma' 분포를 적용하여 최적 확률밀도함수를 산정하였다(식(9)-(11) 참조).

### - Normal distribution

$$f(X; \mu, \sigma_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left(-\frac{(X-\mu)^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (9)$$

### - Log-normal distribution

$$f(X; \mu, \sigma_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s X} \exp\left(-\frac{(\ln X - \mu)^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (10)$$

### - Gamma distribution

$$f(X; k, \lambda) = \frac{1}{\lambda^k \Gamma(k)} X^{k-1} \exp\left(-\frac{X}{\lambda}\right) \quad (11)$$

여기서,  $\mu$ 는 평균(Mean),  $\sigma_s$ 는 표준편차(Standard Deviation),  $\lambda$ 는 척도계수(Scale parameter),  $k$ 는 형상계수(Shape parameter),  $\zeta$ 는 위치계수(Location parameter),  $X$ 는 대표주기를 나타낸다.

한편, 분포 적합도 검정을 수행하기 위해 K-S test (Kolmogorov-Smirnov Test)를 통해 산정된 p-value를 이용하여 첨두주기의 확률 밀도 분포와 분포 적합도 검정을 수행하였다. 그러나, K-S test는 확률 밀도 분포의 양 끝단과 같은 무의미한 작은 차이까지 계산이 이루어지기 때문에 적절한 분포 차이 검정에는 한계가 있다. 이에 따라 본 연구에서는 산정된 대표주기 자료의 1%를 무작위로 샘플링하여 1,000 번 반복 계산한 후, 산정된 p-value의 평균을 이용하여 대표주기와 가장 유사한 분포를 추정하였다(Lazariv and Lehmann, 2018). 이후, 다음 식(12)와 같이 KL Divergence(Kullback-Leibler Divergence)를 이용하여 각 확률 밀도 분포의 차이가 최소가 되는 최적 분포를 결정하였다. 여기서, KL Divergence는 관측 스펙트럼의 분포와 추정 스펙트럼의 분포의 차이를 계산하는 방법으로서,  $D_{KL}$  값이 작을수록 두 분포가 유사함을 의미한다(Below and Armstrong, 2011).

$$D_{KL}(P \parallel Q) = \sum_i P(i) \log \frac{P(i)}{Q(i)} \quad (12)$$

여기서,  $P(i)$ 는 추정된 스펙트럼 에너지 밀도,  $Q(i)$ 는 비교를 위해 사용된 확률 밀도 분포 함수를 의미한다.

### 3. 분석 결과

#### 3.1 대표주기 산정 및 대표주기 간 상관관계

본 연구에서 산정한 대표주기의 시계열 그림은 다음 Fig. 2~3과 같다. 분석에 사용된 수면변동자료의 결측으로 인하여

Fig. 2의 (A)~(C)는 HeMOSU-1의 첨두주기, (D)~(F)는  $T_{m-1,0}$ , (G)~(I)는  $T_{02}$ 의 시계열 그림을 기간에 따라 나눠서 제시하였다. 이와 마찬가지로 Fig. 3의 (A)~(B)는 HeMOSU-2의 첨두주기, (C)~(D)는  $T_{m-1,0}$ , (E)~(F)는  $T_{02}$ 의 분석 결과 그림을 제시하였다.

본 연구에서 파랑 스펙트럼 분석 방법을 통해 산정된 대표주기의 통계적 특성을 분석하기 위해 다음 Fig. 4와 같이 박스플롯을 제시하였다. 대표주기 중 첨두주기의 경우, HeMOSU-1, 2 각각의 평균은 6.01 s, 6.53 s으로 나타났으며,  $T_{m-1,0}$ 의 평균은 각각 4.11s, 4.56 s로 산정됐다. 또한,  $T_{02}$ 의 평균은 3.48 s, 3.90 s으로 나타났다. 또한, HeMOSU-2의 대표주기의 평균이 HeMOSU-1의 대표주기보다 크게 산정됐으며, 이는 상대적으로 HeMOSU-2 지점의 깊은 수심으로 인해 발생하는 것으로 판단된다. 산정된 대표주기의 이상자료 비율은 박스플롯을 통해 계산하였으며, 그 결과는 다음 Fig. 4에 제시하였다. 이상자료 비율 산정은 3분위수(75%)에 1.5IQR을 더한 값( $Q_3 + 1.5IQR$ )을 기준으로 이를 넘어가면 이상자료라고 판단하였다. 그 결과, 두 지점의 첨두주기의 이상자료 비율은 5.73%, 0.67%로 나타났으며,  $T_{m-1,0}$ 는 각각 4.35%, 0.01%,  $T_{02}$ 는 각각 2.82%, 0.03%로 산정됐다. HeMOSU-1에서 추정된 첨두주기의 이상자료 비율은 HeMOSU-2에 비해 높은 수준으로 나타났다. 이는 HeMOSU-1에서 주로 발생하는 낮은 파고의 영향으로 인해 추정되는 스펙트럼의 형상이 다중첨두형상(Bimodal Spectrum)으로 정확한 첨두주기 추정에 한계가 있는 것으로 판단된다(Lee et al., 2022).

일반적으로 대표주기 사이의 관계는  $T_p$ ,  $\bar{T}$ ,  $T_{1/3}$ ,  $T_{1/10}$ ,  $T_{max}$  사이의 관계를 제안하고 있으며(Goda, 2010; Lee et al., 2021), 유럽에서는  $T_{m-1,0}$ 와 첨두주기 사이의 관계를 1.1로 제안하고 있다. 그러나, 파열분석법을 통해 산정되는  $\bar{T}$ 를 제

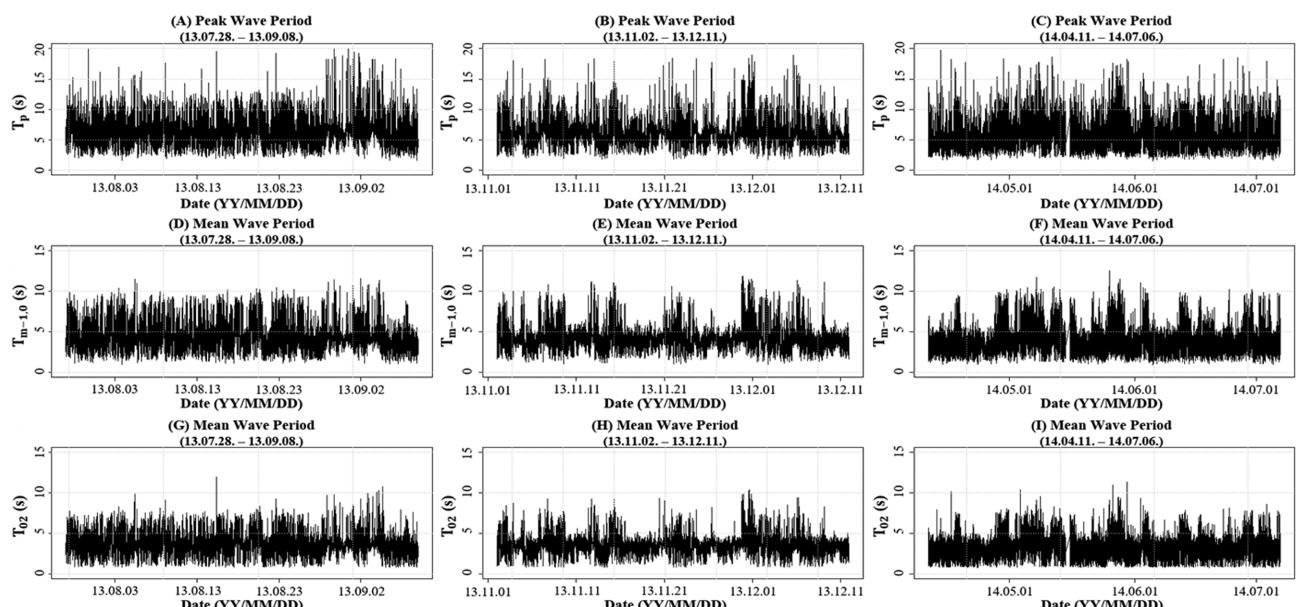


Fig. 2. Time series of representative wave period at HeMOSU-1 (A, B, C:  $T_p$ , D, E, F:  $T_{m-1,0}$ , G, H, I:  $T_{02}$ ).

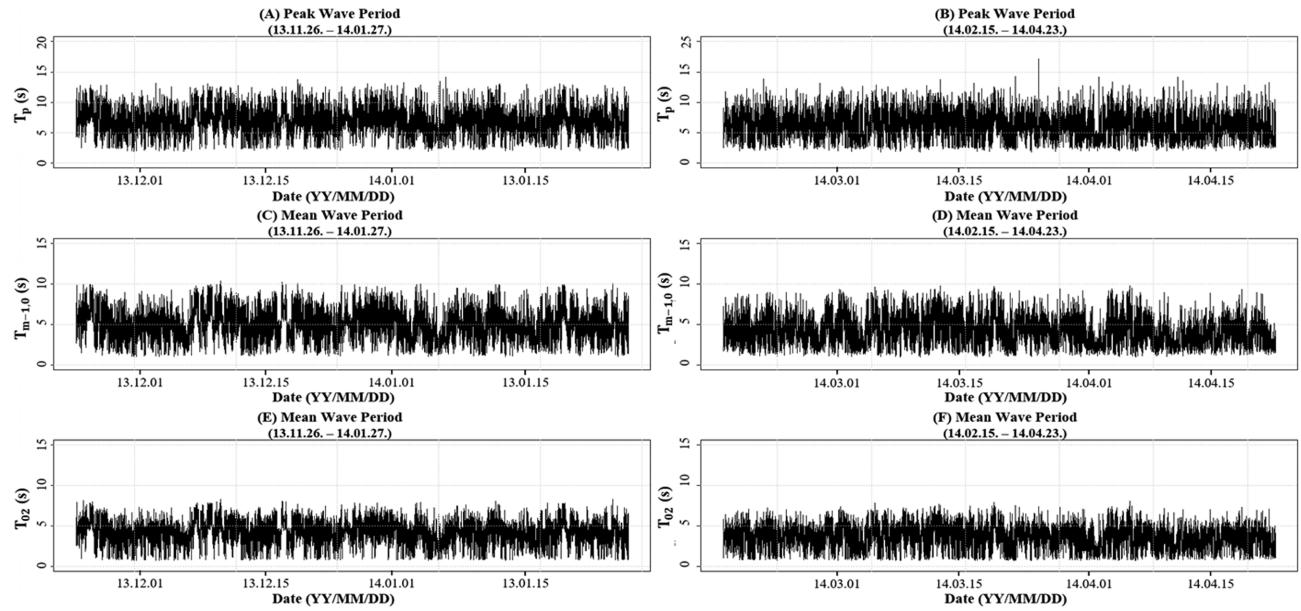


Fig. 3. Time series of representative wave period at HeMOSU-2 (A, B:  $T_p$ , C, D:  $T_{m-1,0}$ , E, F:  $T_{02}$ ).

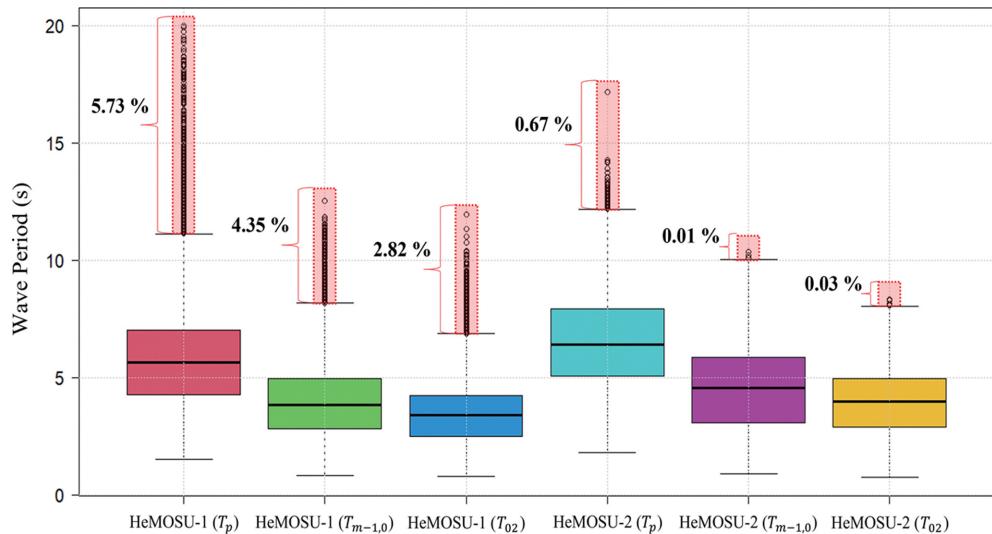


Fig. 4. Boxplot of calculated peak wave period and mean wave period (HeMOSU-1, HeMOSU-2).

Table 2. The relationships between representative wave period

Relationship Formula	Previous Studies	HeMOSU-1		HeMOSU-2	
		$\alpha$	$R^2$	$\alpha$	$R^2$
$T_{02} = \alpha_1 T_p$	-	0.527	0.822	0.633	0.883
$T_p = \alpha_2 T_{m-1,0}$	1.1 (Rock Manual, 2007)	<b>1.153</b>	0.691	<b>1.325</b>	0.746
$T_{m-1,0} = \alpha_3 T_{02}$	-	1.177	0.902	1.218	0.912

외한  $T_{m-1,0}$ ,  $T_{02}$ 에 대한 관계는 고려되고 있지 않으며, 본 연구에서는 국내 서해안에서 관측된 파랑 자료를 이용하여 선형 상관 관계 분석을 통해  $T_{m-1,0}$ ,  $T_{02}$ 와 첨두주기의 상관성 및 관계식을 산정하였다(Fig. 5, Table 2 참조).

분석 결과, HeMOSU-1, 2에서 첨두주기와  $T_{02}$ 의 선형 관계는 각각 0.53, 0.63으로 나타났으며, 이때 상관 계수 값

(CC, Correlation Coefficient)은 각각 0.91, 0.94, 결정 계수 값( $R^2$ )은 0.82, 0.88로 매우 높은 상관관계를 보여주는 것으로 나타났다(Fig. 5(A), (D) 참조). 또한, HeMOSU-1, 2에서  $T_{m-1,0}$ ,  $T_{02}$  사이의 관계를 분석한 결과, 두 지점에서 각각 1.18, 1.22의 관계를 보였으며, 이때 상관 계수 값은 각각 0.949, 0.955, 결정 계수 값은 0.90, 0.91로 매우 높은 상관

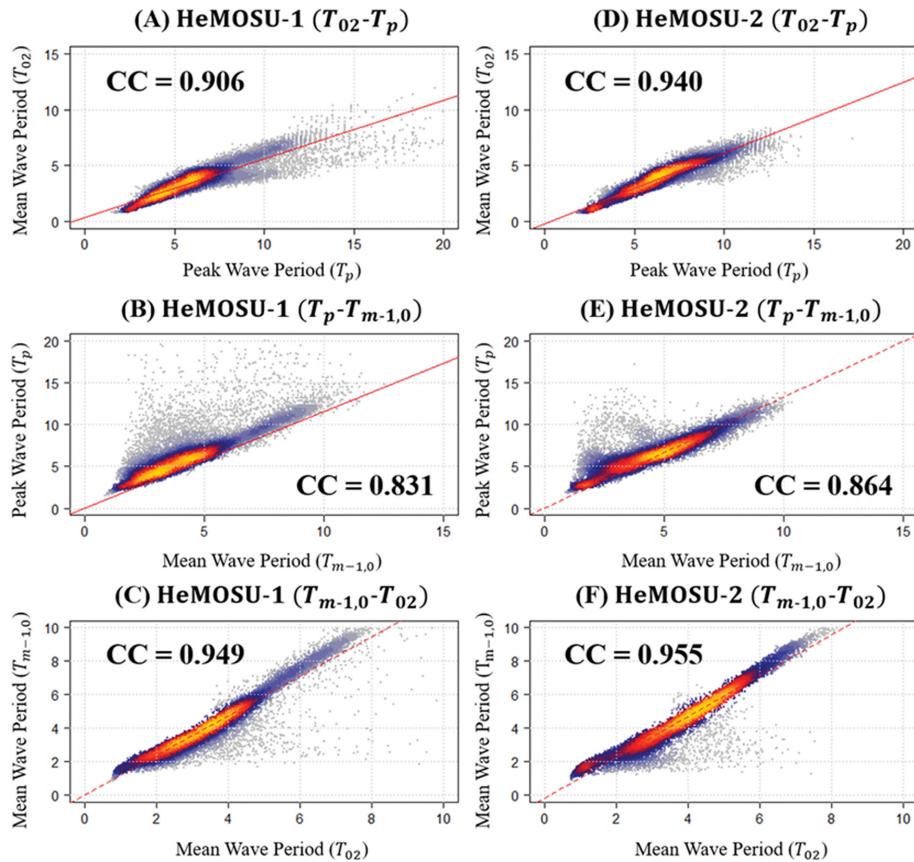


Fig. 5. Relationships between  $T_p$  and  $T_{02}$ ,  $T_p$  and  $T_{m-1,0}$ ,  $T_{m-1,0}$  and  $T_{02}$ .

관계를 보이고 있었다(Fig. 5(C), (F) 참조). 한편, 두 지점에 대하여  $T_{m-1,0}$ 와 첨두주기 사이의 관계를 분석한 결과, HeMOSU-1의 경우,  $T_{m-1,0}$ 와 첨두주기의 관계는 1.153으로 CIRIA et al.(2007)에서 제안하고 있는 1.1과 유사하게 나타났으며, 이 때, 상관 계수 값은 0.831, 결정 계수 값은 0.691로 나타났다. HeMOSU-2의 경우,  $T_{m-1,0}$ 와 첨두주기의 관계는 1.325로 다소 기준에 제안되고 있는 계수값보다 높게 산정됐으며, 상관

계수 값은 0.864, 결정 계수 값은 0.746으로 나타났다(Fig. 5(B), (E) 참조).

### 3.2 대표주기 최적 확률밀도함수 추정

HeMOSU-1, 2의 대표주기 분포 특성을 확인하기 위하여 본 연구에서 산정된  $T_{m-1,0}$ ,  $T_{02}$ 와 첨두주기에 대하여 최적 확률밀도함수를 추정하였다. 이를 추정하기 위해 사용된 후보

Table 3. Distribution goodness-of-fit test results and optimal probability density function parameter estimation results (\* Goodness-of-fit test, \*\* Parameter)

		$T_p$ (H1)	$T_{02}$ (H1)	$T_{m-1,0}$ (H1)	$T_p$ (H2)	$T_{02}$ (H2)	$T_{m-1,0}$ (H2)
*Fit	Log-nor.	$P_v$ <b>0.266</b>	0.026	<b>0.328</b>	0.019	0.0003	0.0100
		$D_{KL}$ <b>31.706</b>	64.135	<b>22.301</b>	73.281	209.47	63.400
**Par	Gamma	$P_v$ 0.103	<b>0.142</b>	0.262	0.110	0.007	0.070
		$D_{KL}$ 64.379	<b>42.868</b>	32.312	40.017	106.84	51.954
	Normal	$P_v$ 0.0005	0.061	0.005	<b>0.270</b>	<b>0.303</b>	<b>0.210</b>
		$D_{KL}$ 222.02	85.017	163.659	<b>34.522</b>	<b>29.4</b>	<b>48.982</b>
	Log-nor.	$\mu$ <b>1.715</b>	1.156	<b>1.324</b>	1.813	1.265	1.417
		$\sigma_s$ <b>0.394</b>	0.448	<b>0.430</b>	0.370	0.478	0.470
	Gamma	$k$ 6.557	<b>5.576</b>	5.655	8.071	5.413	5.178
		$\lambda$ 1.091	<b>1.600</b>	1.374	1.236	1.389	1.135
	Normal	$\mu$ 6.011	3.484	4.115	<b>6.529</b>	<b>3.897</b>	<b>4.560</b>
		$\sigma_s$ 2.488	1.447	1.794	<b>2.202</b>	<b>1.483</b>	<b>1.891</b>

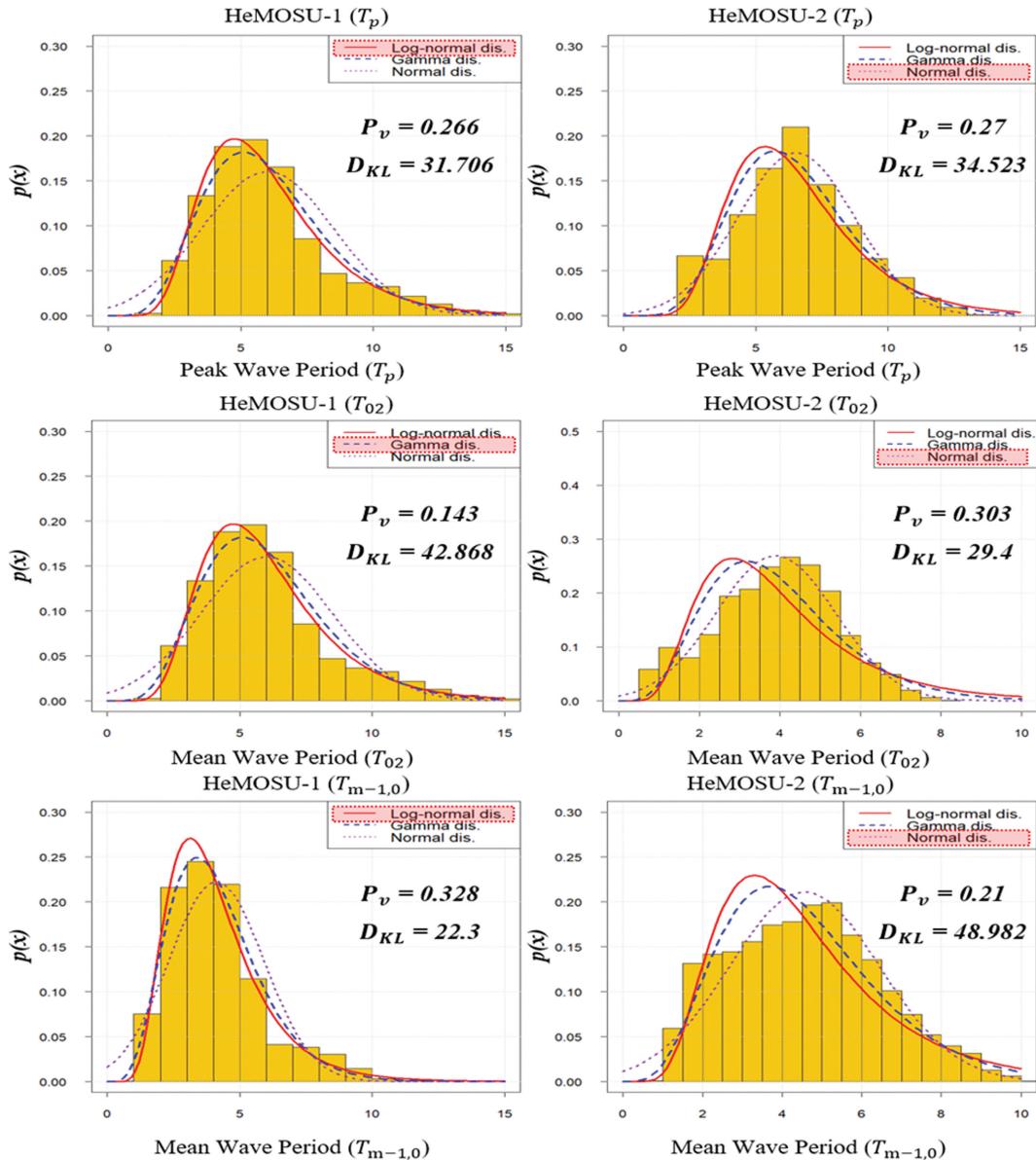


Fig. 6. Estimation results of the optimal probability density function of the calculated representative wave period.

함수는 해양에서 주기 추정에 주로 사용되는 ‘Log-normal’, ‘Gamma’, ‘Normal’ 분포를 적용하였으며, 정량적인 평가를 위해 K-S Test를 통해 산정되는  $p$ -value( $P_v$ )와 KL-Divergence를 통해 산정되는  $D_{KL}$ 을 이용하여 평가하였다(Fig. 6, Table 3 참조).

HeMOSU-1의 첨두주기에 대하여 최적 확률밀도함수 추정을 위한 분포적합도 검정 결과, ‘Log-normal’과 ‘Gamma’ 분포의  $P_v$  값이 0.05 이상으로 산정되어 적합한 확률밀도함수로 나타났으며,  $D_{KL}$ 를 계산한 결과, ‘Log-normal’ 분포의  $D_{KL}$  값이 ‘Gamma’ 분포의  $D_{KL}$  값보다 작게 나타나면서 HeMOSU-1의 첨두주기는 ‘Log-normal’ 분포에 더 적합한 확률밀도함수인 것으로 산정됐다. HeMOSU-2의 첨두주기의 최적 확률밀도함수를 추정한 결과,  $P_v$  값은 ‘Gamma’와 ‘Normal’ 분포가 0.05보다 크게 산정되었으며,  $D_{KL}$  계산을 통

해 ‘Normal’ 분포가 다른 후보 함수에 비해 작게 산정됨에 따라 더욱 우세한 것으로 나타났다. 한편, HeMOSU-1의  $T_{02}$ 의  $P_v$ 를 산정한 결과, ‘Gamma’ 분포와 ‘Normal’ 분포가 우세하였으며,  $D_{KL}$  값은 ‘Gamma’ 분포가 더 적합한 확률밀도함수인 것으로 산정됐다. HeMOSU-1의  $T_{m-1,0}$ 의 최적 확률밀도함수는  $P_v$  값과  $D_{KL}$  값을 통해 ‘Log-normal’ 분포가 가장 적합한 것으로 나타났다. HeMOSU-2의  $T_{02}$ ,  $T_{m-1,0}$ 는  $P_v$ 와  $D_{KL}$  값을 통해 ‘Normal’ 분포가 우세하게 나타나는 것으로 산정됐다.

#### 4. 결론 및 제언

본 연구에서는 한국 서해안에 설치된 HeMOSU-1, 2에서 관측한 수면변동자료를 이용하여 첨두주기와  $T_{02}$ ,  $T_{m-1,0}$ 를 산

정하였으며, 산정된 대표주기를 이용하여 상관관계 분석 및 각각의 대표주기의 최적 확률밀도함수를 추정하였다. 최적 확률밀도함수 추정을 위해 분포 적합도 검정은 K-S Test를 통한  $P_v$  값과 KL Divergence를 통해 산정되는  $D_{KL}$ 을 이용하였으며, 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

1) 파랑 스펙트럼 분석을 통해 산정된 첨두주기,  $T_{02}$ ,  $T_{m-1,0}$ 의 이상 자료 비율을 확인하기 위해 박스플롯과  $Q_3 + 1.5IQR$  기준을 이용하여 계산하였다. HeMOSU-1의 첨두주기의 이상자료는 약 5.73%로 산정됐으며, HeMOSU-2의 첨두주기는 0.67%로 나타났다. 또한, HeMOSU-1, 2의  $T_{02}$  이상 자료 비율은 각각 4.35%, 0.01%로 나타났으며,  $T_{m-1,0}$ 의 이상 자료 비율은 각각 2.82%, 0.03%로 산정됐다. 또한, 대부분의 주기는 HeMOSU-1에 비해 HeMOSU-2에서 더 높게 산정됐으며, 이는 HeMOSU-2의 수심의 영향으로 HeMOSU-1에 비해 더 높은 파랑이 발생하여 생기는 현상으로 판단된다.

2) 산정된 대표주기를 각각의 파주기 간 상관분석을 수행한 결과,  $T_{02}$ 와 첨두주기의 선형관계는 HeMOSU-1, 2에서 각각 약 0.53, 0.63으로 나타났다. 이 때 계산된 상관계수는 각각 0.906, 0.940으로 계산됐으며, 결정계수는 약 0.822, 0.883으로 높은 선형 상관관계를 보였다. 또한, 첨두주기와  $T_{m-1,0}$ 의 선형관계는 약 1.15, 1.325로 산정됐다. 특히, 두 관계는 기준에 1.1로 제안되고 있으며, HeMOSU-1에서 산정된 결과와 매우 유사하게 나타났지만, HeMOSU-2의 경우 기준 제안값에 비해 약 20% 크게 산정됐다. 마지막으로  $T_{m-1,0}$ ,  $T_{02}$ 의 선형 상관관계를 분석한 결과 두 주기 간 약 1.17, 1.22의 관계를 보임으로서,  $T_{m-1,0}$ 가  $T_{02}$ 에 비해 크게 나타났다.

3) 또한, 첨두주기, 평균주기에 대하여 최우도법을 이용한 최적 확률밀도함수를 추정하였다. 첨두주기의 경우, HeMOSU-1, 2 각각  $P_v$ 와  $D_{KL}$ 을 통해 분포 적합도 검정을 수행한 결과 ‘Log-normal’ 분포와 ‘Normal’ 분포가 우세한 것으로 나타났으며,  $T_{02}$ 의 경우, ‘Gamma’ 분포와 ‘Normal’ 분포가 적합한 확률밀도함수로 산정됐다. 또한,  $T_{m-1,0}$ 의 최적 확률밀도함수를 추정한 결과, ‘Log-normal’ 분포와 ‘Normal’ 분포가 적합한 것으로 산정됐다.

일반적으로 파랑 분석을 수행하는 경우, 대부분의 파랑 분석에서 유의파고와 첨두주기를 이용한 분석이 주로 수행되고 있다. 그러나, 최근 유럽의 해안공학 분야에서는 첨두주기 산정에 대한 문제점으로 인하여 대부분의 파랑 분석을 수행하는 경우 평균주기를 사용하는 경우가 증가하고 있기 때문에 정확한 파주기를 산정하는 것이 중요하며, 파주기에 대한 다양한 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서 분석 대상지점으로 다루고 있는 HeMOSU-1, 2는 서해안 지역에 위치하고 있지만, 서해안 전해역에 대하여 대표성을 갖지 못하는 한계가 있다. 그러나, 대표주기를 분석함에 있어 본 연구 분석 방법 및 결과는 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 신재생에너지핵심기술개발 사업인 “해상풍력 전주기 HSE 운영지원 모델 개발(과제번호: 20213030020130)”의 일환으로 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

## References

- Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B. (2016). EurOtop II Manual on Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: An Overtopping Manual Largely Based on European Research, but for Worldwide Application, 2nd Edition, HR Wallingford, Wallingford, UK, 252.
- Belov, D.I. and Armstrong, R.D. (2011). Distributions of the Kullback-Leibler divergence with applications. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 64(2), 291-309.
- CIRIA, CUR and CETMEF (2007). The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering.
- Garcia-Gabin, W. (2015). Wave bimodal spectrum based on swell and wind-sea components. *IFAC-PapersOnLine*, 48(16), 223-228.
- Goda, Y. (2010). Random seas and design of maritime structures. World Scientific Publishing Company.
- Holthuijsen, L.H. (2007). Waves in Oceanic and Coastal Water. Cambridge Univ. Press.
- IAHR Working Group on Wave Generation and Analysis (1989). List of sea-state parameters. *J. Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 115(6), 793-808.
- Kamphuis, J.W. (2000). Introduction to Coastal Engineering and Management, Advanced Series on Ocean Engineering, 16, World Scientific.
- Karunaratna, H., Pender, D., Ranasinghe, R., Short, A.D. and Reeve, D.E. (2014). The effects of storm clustering on beach profile variability. *Marine Geology*, 348, 103-112.
- Lazariv, T. and Lehmann, C. (2018). Goodness-of-fit tests for large datasets. *arXiv preprint arXiv:1810.09753*.
- 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).
- Lee, U.J., Lee, B.W., Ko, D.H. and Cho, H.Y. (2022). Optimal estimation of the peak wave period using smoothing method. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 34(6), 266-274 (in Korean).
- Lee, U.J., Cho, H.Y., Lee, B.W. and Ko, D.H. (2023). Joint probability distribution of significant wave height and peak wave period using gaussian copula method. In International Conference on Aquatic Science & Technology (i-CoAST), 155-155.
- Shao, Z., Liang, B., Li, H. and Lee, D. (2018). Study of sampling methods for assessment of extreme significant wave heights in

- the South China Sea. *Ocean Engineering*, 168, 173-184.
- Vanem, E. (2018). A simple approach to account for seasonality in the description of extreme ocean environments. *Marine Systems and Ocean Technology*, 13(2-4), 63-73.
- Venables, W.N. and Ripley, B.D. (2013). *Modern applied statistics with S-PLUS*. Springer Science & Business Media.
- Veritas, D.N. (2010). *DNV-RP-C205 Environmental conditions and environmental loads*. Det Norske Veritas: Oslo, Norway.
- Vettor, R. and Soares, C.G (2020). A global view on bimodal wave spectra and crossing seas from ERA-interim. *Ocean Engineering*, 210, 107439.
- 
- Received 20 November, 2023  
1<sup>st</sup> Revised 18 December, 2023  
2<sup>nd</sup> Revised 26 December, 2023  
Accepted 26 December, 2023