

# HeMOSU-1&2의 파랑 관측 자료를 이용한 파랑 변수 간 상관관계 분석

## Correlation Analysis between Wave Parameters using Wave Data Observed in HeMOSU-1&2

이욱재\* · 고동휘\*\* · 조홍연\*\*\* · 오남선\*\*\*\*

Uk-Jae Lee\*, Dong-Hui Ko\*\*, Hong-Yeon Cho\*\*\* and Nam-Sun Oh\*\*\*\*

**요지** : 본 연구에서는 국내 서해안에 설치된 HeMOSU-1호와 2호 해상기상관측타워에서 관측한 수면변위자료를 이용하여 파랑을 정의하고 파랑 변수 간 상관 분석을 수행하였다. 파열 분석법과 파랑 스펙트럼법을 이용하여 파고와 주기를 결정하였으며, 파랑변수 간 관계식을 산정하여 기존 연구와 비교하였다. 대표파고 간 관계식은 기존 연구와 비교하여 상관 계수의 오차율이 0.1% 미만으로 산정되었으며, 최대파고의 경우 최대 29%의 차이를 보이고 있었다. 또한, 주기 사이의 상관관계 분석 결과 스펙트럼 에너지 밀도가 작은 경우 주로 발현하는 쌍봉형 스펙트럼의 영향으로 인하여 HeMOSU-1호와 2호에서 각각 전체 자료의 2.5%, 1.3%의 비율로 침두 주기가 유의 주기에 비해 비정상적으로 크게 산정되었다.

**핵심용어** : HeMOSU-1, HeMOSU-2, waveguide, 파열분석법, 파랑 스펙트럼법, 파고, 주기, 상관관계

**Abstract** : In this study, waves were defined using the water surface elevation data observed from the HeMOSU-1 and 2 marine meteorological observation towers installed on the west coast of Korea, and correlation analysis was performed between wave parameters. The wave height and wave period were determined using the wave-train analysis method and the wave spectrum analysis method, and the relationship between the wave parameters was calculated and compared with the previous study. In the relation between representative wave heights, most of the correlation coefficients between waves showed a difference of less than 0.1% in error rate compared to the previous study, and the maximum wave height showed a difference of up to 29%. In addition, as a result of the correlation analysis between the wave periods, the peak period was estimated to be abnormally large at rates of 2.5% and 1.3% in HeMOSU-1&2, respectively, due to the effect of the bimodal spectrum that occurs when the spectral energy density is small.

**Keywords** : HeMOSU-1, HeMOSU-2, waveguide, wave-train analysis, wave spectrum analysis, wave height, wave period, correlation

## 1. 서 론

항만 및 해양 구조물의 설계에 있어서 파랑 특성은 매우 중요한 설계 인자 중 하나이다. 이러한 파랑 정보는 파랑 관측을 통해 도출할 수 있으나 해상에서의 파랑 관측은 고비용 및 유지관리의 어려움으로 장기 자료 확보가 쉽지 않은 상황이다. 그러나 최근에는 장기 관측 자료의 중요성이 인식되고 관측 기술이 고도화되면서 국내 해역의 파랑 정보들이 장기 간 축적되고 있다.

실제 파동은 불규칙하고 시시각각변하기 때문에 파랑의 기

본 물리량을 결정하기란 쉽지 않다. 이러한 불규칙 파랑을 표현하기 위해서 주파수 영역에서 스펙트럼을 통해 분석하는 파랑 스펙트럼 분석법(Wave Spectrum Analysis Method)과 시간영역에서 수면 변동자료를 직접 분석하는 파열 분석법(Wave-Train Analysis Method)이 널리 사용된다. 또한 파열 분석 방법으로는 zero-up-crossing 방법과 zero-down-crossing 방법이 널리 사용되며, 개별파에 대한 통계적인 방법을 통해 대표파고인 최대파( $H_{max}$ ), 1/10 최대파( $H_{1/10}$ ), 유의파( $H_{1/3}$ ), 평균파( $\bar{H}$ )를 정의할 수 있다. 파랑 스펙트럼분석법은 시간영역에서 분석하는 파열분석법과 다르게 주파수 영역에서 파랑

\*한국해양과학기술원 해양빅데이터센터 연수생(Student Apprentice, Marine Big-data Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology)

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

\*\*\*한국해양과학기술원 해양빅데이터센터 책임연구원(Principal Research Scientist, Marine Big-data Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology)

\*\*\*\*목포해양대학교 해양건설공학과 교수(Corresponding author: Nam Sun Oh, Professor, Ocean Civil Engineering, Mokpo Maritime National University, 91 Haeyangdaehakro, Mokpo-si, Jeollanam-do 58628, Korea, Tel: +82-61-240-7306, Fax: +82-61-240-7341, sun@mmu.ac.kr)

변수를 산정하며, 이를 통해 유의파( $H_s$ )와 침투주기( $T_p$ )를 정할 수 있다.

한편 파랑 특성을 설명하기 위해 통계 기술이 사용되는데, Longuet-Higgins(1952, 1980)는 개별파고분포로서 Rayleigh 분포를 처음으로 제안하였으며, 이후 Rayleigh 분포는 파랑 특성을 설명하는데 널리 사용되고 있다(Hameed and Baba, 1985). 또한 대표파고간의 관계식은 파고의 출현확률분포가 Rayleigh 분포를 따른다는 가정 하에 Rayleigh 분포의 확률 밀도함수를 이용하여 제안하였다(Rattanapitikon and Shibayama, 2007). 그러나 불규칙 파고에 대한 Rayleigh 분포는 개별파 주기에서 큰 변동을 나타내지 않는 협대역 스펙트럼(narrow-banded spectrum)에서 유효하며, 대표파고 간 관계식은 실험실 조건하에 제안된 심해파에 대한 관계식으로 파랑 변형이 발생하는 천해역 또는 천이역에서의 적용에 대한 검토는 필요하다. 이에 Suh et al.(2008)은 한국 연안 심해파의 통계적 특성을 파랑 관측 및 후측 자료를 이용하여 분석한 바 있으며, Jeong et al.(2019)은 동해안 남향진 해역의 파랑 관측 자료를 이용하여 파별분석법과 스펙트럼법에 의해 파고와 주기를 분석하고 각 파랑 파라미터 사이의 관계식을 도출한 바 있다. 해외에서는 Rattanapitikon and Shibayama(2007)은 천해역에서 파고 분포가 레일리 분포를 따르지 않는 것을 지적하고 실험자료 및 현장 자료를 이용하여 새로운 관계식을 제안한 바 있다. 이처럼 파고간의 관계식은 다양한 연구를 통해

재검토되고 있으며, 각 해역별 특성이 반영 된 관측 자료를 이용하여 이에 대한 유효성을 검증할 필요가 있다.



따라서 본 연구에서는 국내 서해안에 설치 된 해상기상관측타워인 HeMOSU-1호와 2호에서 약 1년간 관측 한 수면변위자료를 이용하여 대표파고 및 대표주기를 산정하였다. 이 파랑 정보는 파열 분석법과 파랑 스펙트럼법을 이용하여 산정되었으며, 대표파고와 대표주기 간 상관관계 및 유의파고와 유의파주기의 상관관계식을 추정하여 기존 연구와 비교 검토하였다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1 관측자료

한국전력공사에서는 해상풍력 단지 구축을 위해 서해안에 해상기상관측타워 2기(Oceanographic and Meteorological Observation Tower)를 설치하고 풍황 및 해황을 조사하고 있다. 해양기상학적 연구 구조물의 시초라는 의미의 HeMOSU (Herald of Meteorological and Oceanographic Special research Unit)는 부안 위도면 인근 해역과 군산 옥도면 해역에 2010년과 2013년에 각각 설치되어 풍황 자료(풍속, 풍향, 3차원 풍속, 온습도, 대기압, 강우)와 해황 자료(파랑, 유속, 조위)를 실시간으로 취득·분석하여 운영 중에 있다(Kim and Kim, 2017). 운영방식은 CDMA 통신 및 위성채널을 상호보완 운

**Table 1.** Introduction to HeMOSU-1 & 2

Classification	HeMOSU-1	HeMOSU-2
Structure overview		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Maximum height: 100 m (Based on M.S.L)</li> <li>· Water depth: 13.5 m (D.L)</li> <li>· Foundation type: Jacket (weight: 200 ton)</li> <li>· Installation position: offshore of Wido-myeon, Buan-gun</li> <li>· Completion year: 2010</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Maximum height: 120 m (Based on M.S.L)</li> <li>· Water depth: 30 m (D.L)</li> <li>· Foundation type: Suction Tripod (weight: 370 ton)</li> <li>· Installation position: offshore of Okdo-myeon, Gunsan</li> <li>· Completion year: 2013</li> </ul>
Characteristic	<ul style="list-style-type: none"> <li>· First offshore meteorological tower in Korea</li> <li>· First establishment of integrated measurement system in Korea</li> <li>· Public relations of the performance through release of measurement data</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Offshore structure where suction piles was first applied in Korea</li> <li>· First design approval meteorological tower in Korea</li> <li>· Pretest of the offshore wind turbine</li> </ul>
Longitude and latitude	E 126° 07' 45", N 35° 27' 55"	E 126° 12' 45", N 35° 49' 40"

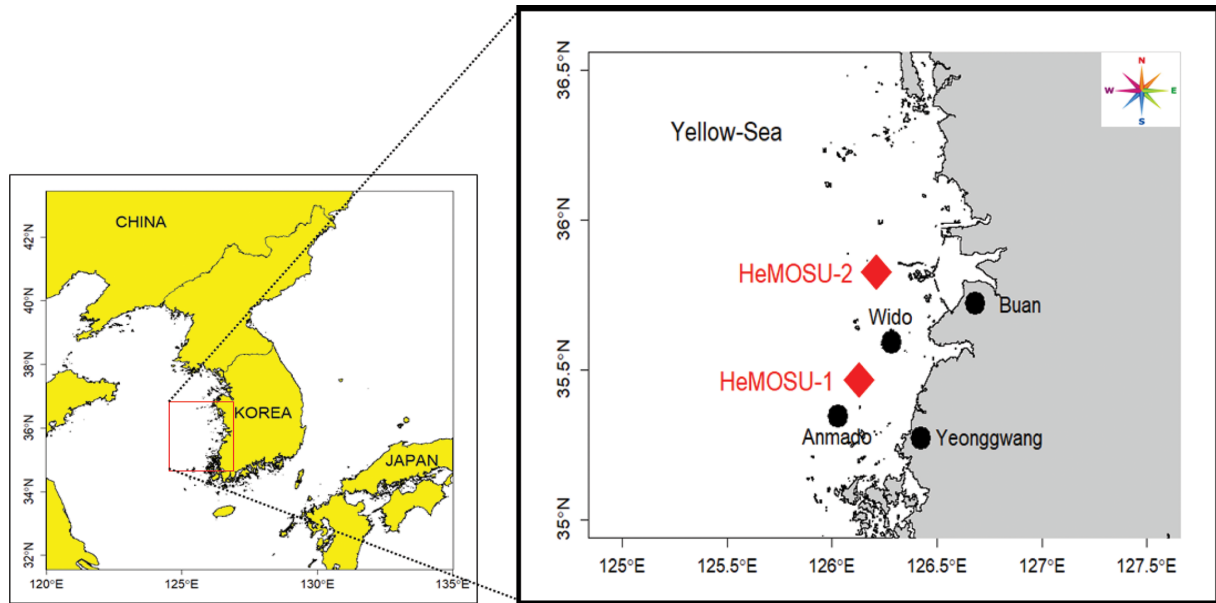


Fig. 1. Location map of HeMOSU-1 & 2 in the west sea of Korea.

Table 2. Specifications of the Wave Guide Radar system

Model		Wave Guide Radar system
Sampling rate		5 Hz
Wave heights		0~60 m
Wave periods		1~100 s
Mechanical	Dimensions	26/21 cm (diameter/height)
	Weight	Approximately 9 kg
Environmental conditions	Temperature	-40°C to 65°C
	Humidity	0~100%

영하고 있으며, 이러한 자료를 바탕으로 대상 부지의 설계, 유지관리, 환경영향평가 등에 활용하고자 지속적으로 데이터를 축적하고 있다. Table 1은 기상관측 타워에 대한 설명을 정리한 표이다.

Fig. 1은 국내 서해안에 설치되어 있는 해양기상관측탑(offshore meteorological tower)인 HeMOSU-1호와 2호의 위치를 도시한 것이다.

HeMOSU-1은 4개의 강관으로 이루어진 자켓식 기초로 설치 되어있으며, 적용 수심은 기본 수준면(D.L.) 기준 13.5 m이다. HeMOSU-2는 석션 트라이포드 형태의 기초를 적용하여 설치되었으며, 적용 수심은 HeMOSU-1에 비해 약 2배 이상 깊은 30 m이다. 파랑 관측장비로는 1996년 Delft사의 WaveGuide 장비가 사용되었으며(Choi et al., 2017), 해당 장비는 3개의 초음파 센서를 이용하여 수면 변위를 동시에 측정하고 있다. 이 장비는 관측된 수면 변위 자료에서 북/남 및 동/서 방향의 경사가 계산되며, 경사와 세 개의 수면 변위 사이의 위상 관계를 사용하여 파랑의 방향 정보까지 계산이 가능하다. Table 2와 같이 WaveGuide는 직경 26 cm, 높이 21 cm이며, 관측 해역의 온도가 -40~60°C 사이에 사용이 가능

하고 수면 변위의 관측 간격은 5 Hz(0.2 s) 간격으로 관측하는 고해상도 장비이다(RADAC, 2012).

본 연구의 분석에서 사용한 관측 자료 기간은 HeMOSU-1의 경우 2013.07.28.~2014.07.06.(169일)이며, HeMOSU-2의 경우 2013.11.26.~2014.04.23.(131일)이다. 이 기간 중 HeMOSU-1&2의 결측율은 각각 28.5%와 12.1%이며, 이는 WaveGuide 장비 이상으로 인해 관측이 중단 된 것으로 나타났다.

## 2.2 분석 방법

본 연구에서 사용한 파고와 주기는 파열분석법과 스펙트럼 분석법을 사용하여 계산하였다(Dean and Dalrymple, 1991). 두 방법 모두 분석을 수행하기 전 기본적인 관측 자료 보정이 필요하며, 관측 데이터 내 조석과 같은 외부 영향으로 인한 자료의 추세로 인해 데이터의 등질성이 허물어지기 때문에 추세를 반드시 제거해야 한다(Goda, 2010; Molenat et al., 1999; Hanson et al., 2004). 파열 분석법은 보정된 데이터를 통해 Fig. 2와 같이 영점 상향 교차(Zero-up-Crossing) 방법으로 개별파를 결정하게 되는데, 매우 작은 주기들이 발

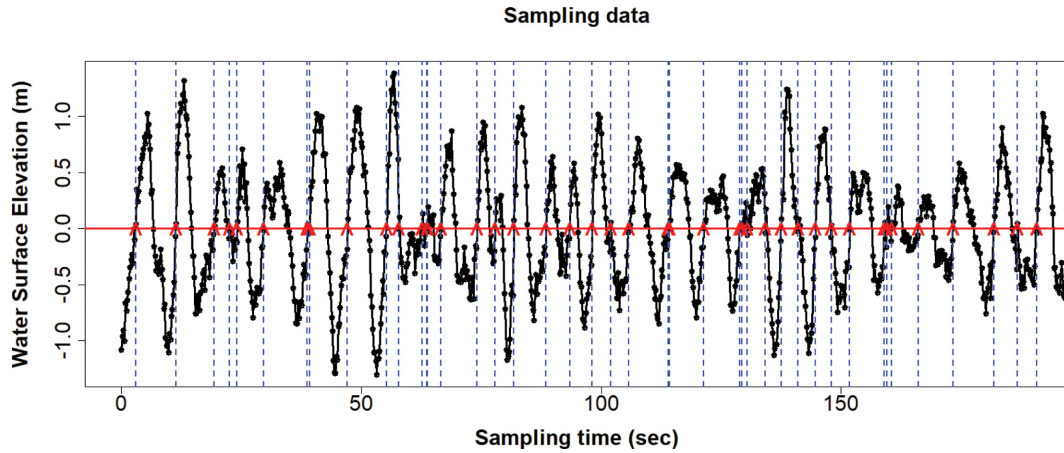


Fig. 2. Principle of wave-train analysis method.

생하는 현상에 대한 문제를 해결하기 위해 반파 처리기법을 도입하여 주요 파랑 변수를 산정하였다(Choi et al., 2017).

한편, 파랑 스펙트럼 분석법은 시간영역에서 주파수 간격( $\Delta f$ )의 정수배( $n\Delta f$ )가 아닌 영역에서 발생하는 에너지 손실(leakage)을 최소화하기 위해 식(1), (2)와 같이 ‘10% Cosine Window’ 과정을 통해 추가로 관측 자료를 보정한다.

$$\hat{\eta}(t_i) = W(t_i)\eta(t_i) : i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (1)$$

$$W(t_i) = \begin{cases} 0.5(1 - \cos[\pi t_i/l]) & : 0 \leq t_i < l \\ 1 & : l \leq t_i \leq N-l \\ 0.5(1 - \cos[\pi(N-t_i)/l]) & : N-l < t_i \leq N \end{cases} \quad (2)$$

여기서,  $\hat{\eta}(t_i)$ 는 Data Window의 결과,  $W(t_i)$ 는 Data Window 값,  $\eta(t_i)$ 는 보정된 평균 수위 값,  $N$ 은 자료의 개수,  $l$ 은 데이터의 처음과 끝의 10%( $0.1 \cdot N$ ) 범위를 나타낸다. 관측 자료에 대하여 시간 영역에서의 보정을 충분히 수행한 후, FFT(Fast Fourier Transform) 기법을 통해 주파수 영역으로 변환하여 해석을 수행하게 되며, 스펙트럼의 면적( $m_0$ )을 산정하여 이를 통해 유의파고( $H_s$ )를 계산한다. 이때, 침두 주파수( $f_p$ )의 역수를 취함으로써 침두주기( $T_p$ )를 산정하게 된다(Goda, 2010).

전술한 과정을 통해 산정된 주요 파랑 변수에 대하여 상관성 분석을 수행하였으며, 분석 방법은 식(3)과 같이 통상적으로 사용되는 Pearson의 상관계수 공식을 사용하였다(Pearson, 1895).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

여기서  $x, y$ 는 서로 독립인 변수이며,  $N$ 은 자료의 전체 길이,  $\bar{x}, \bar{y}$ 는 각 변수의 평균값을 의미한다.

이에 본 연구에서는 파랑 변수간 상관성 분석을 통하여 상관계수를 산정하였으며, 기준에 제안된 선형 상관관계식과의 비교를 수행하였다. 또한, 대상 해역의 유의파고( $H_{1/3}$ )와 유의파 주기( $T_{1/3}$ )의 분포 특성을 파악하고, 비선형 회귀분석을 통하여 두 변수 사이의 관계식을 도출하였다.

### 3. 결 과

#### 3.1 대표 파고간 상관관계 분석

대표 파고 사이의 상관관계식은 상관 분석을 통해 산출 할

Table 3. Correlation coefficient between representative wave heights

Relationship Formula	Previous Studies (Correlation Coefficient)	This Study			
		HeMOSU-1		HeMOSU-2	
		$\alpha_i$	$R^2$	$\alpha_i$	$R^2$
$H_{1/10} = \alpha_1 H_{1/3}$	1.27	1.214	0.9942	1.284	0.9963
$H_{1/10} = \alpha_2 \bar{H}$	2.03	2.085	0.9793	2.378	0.9885
$H_{1/10} = \alpha_3 H_{rms}$	1.80	1.774	0.9891	1.935	0.9946
$H_{1/3} = \alpha_4 H_{rms}$	1.416	1.464	0.9986	1.508	0.9993
$H_{1/3} = \alpha_5 \bar{H}$	1.60	1.726	0.9936	1.855	0.9961
$H_{1/3} = \alpha_6 H_s$	0.95	0.916	0.9944	0.916	0.9934
$H_{max} = \alpha_6 H_{1/3}$	1.86 (1.6~2.0)	1.401	0.9565	1.603	0.9654
$H_{max} = \alpha_7 H_{rms}$	2.863	2.043	0.9477	2.414	0.9631
$\bar{H} = \alpha_8 H_{rms}$	0.89	0.845	0.9981	0.811	0.9985

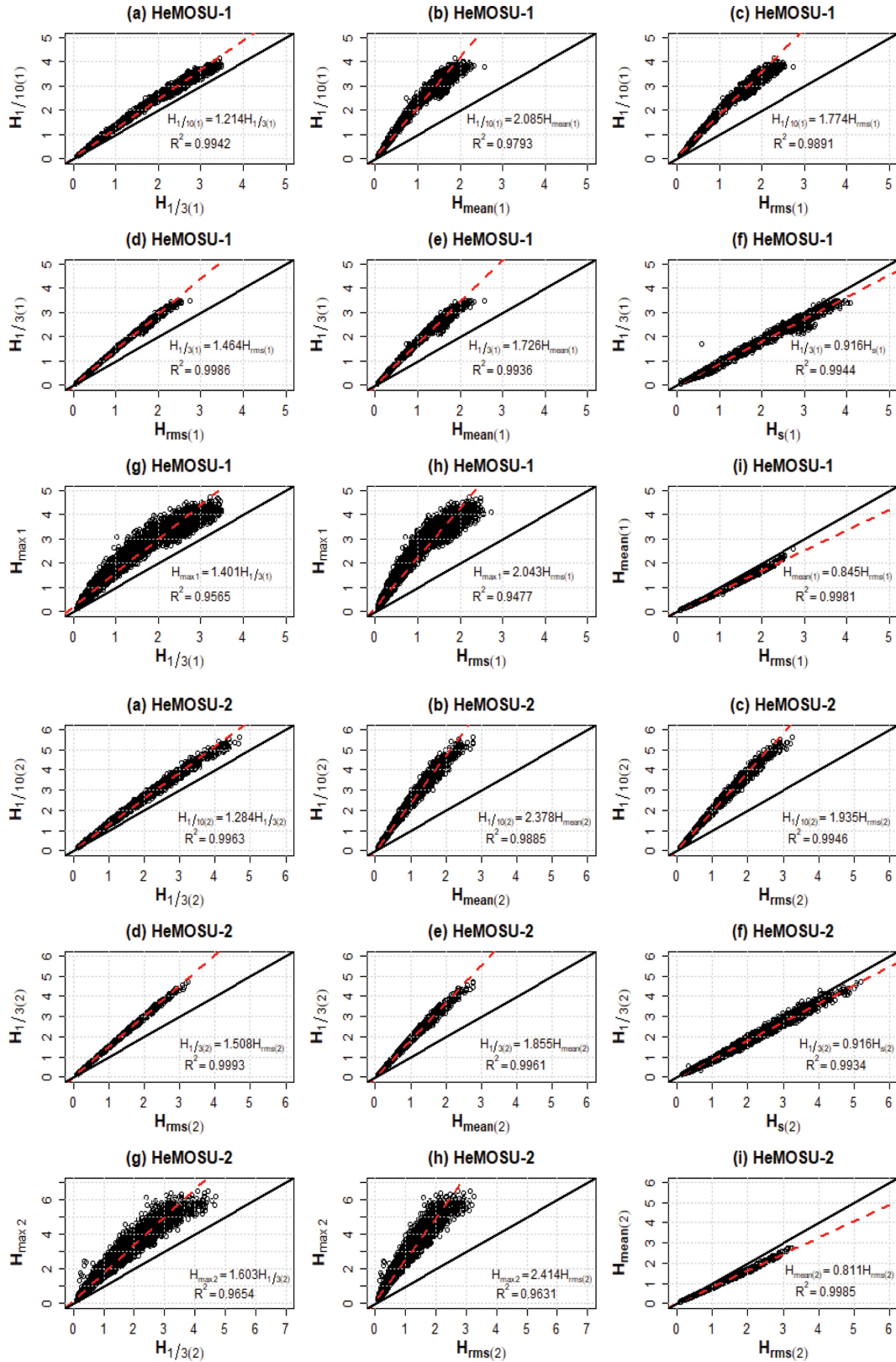


Fig. 3. Relationships between the representative wave heights observed in HeMOSU-1&2.

수 있으며, 결정 계수를 사용하여 추정된 선형 모델의 우수성을 판단할 수 있다(Ang and Tang, 2007). 다음 Table 3과 Fig. 3에는 대표파고 간 상관 분석을 통해 산출한 상관 계수와 결정 계수를 제시하였다. 분석 대상 지점의 상관 분석 결

과, 대부분의 파고 간 상관 계수는 기존에 제안된 상관 계수와 오차율이 0.1% 미만으로 산정됨으로서 Goda(2010), Rattanapitikon and Shibayama(2007)에 의해 제안된 상관 계수와 큰 차이를 보이고 있지 않았으며, 결정계수 또한 매우

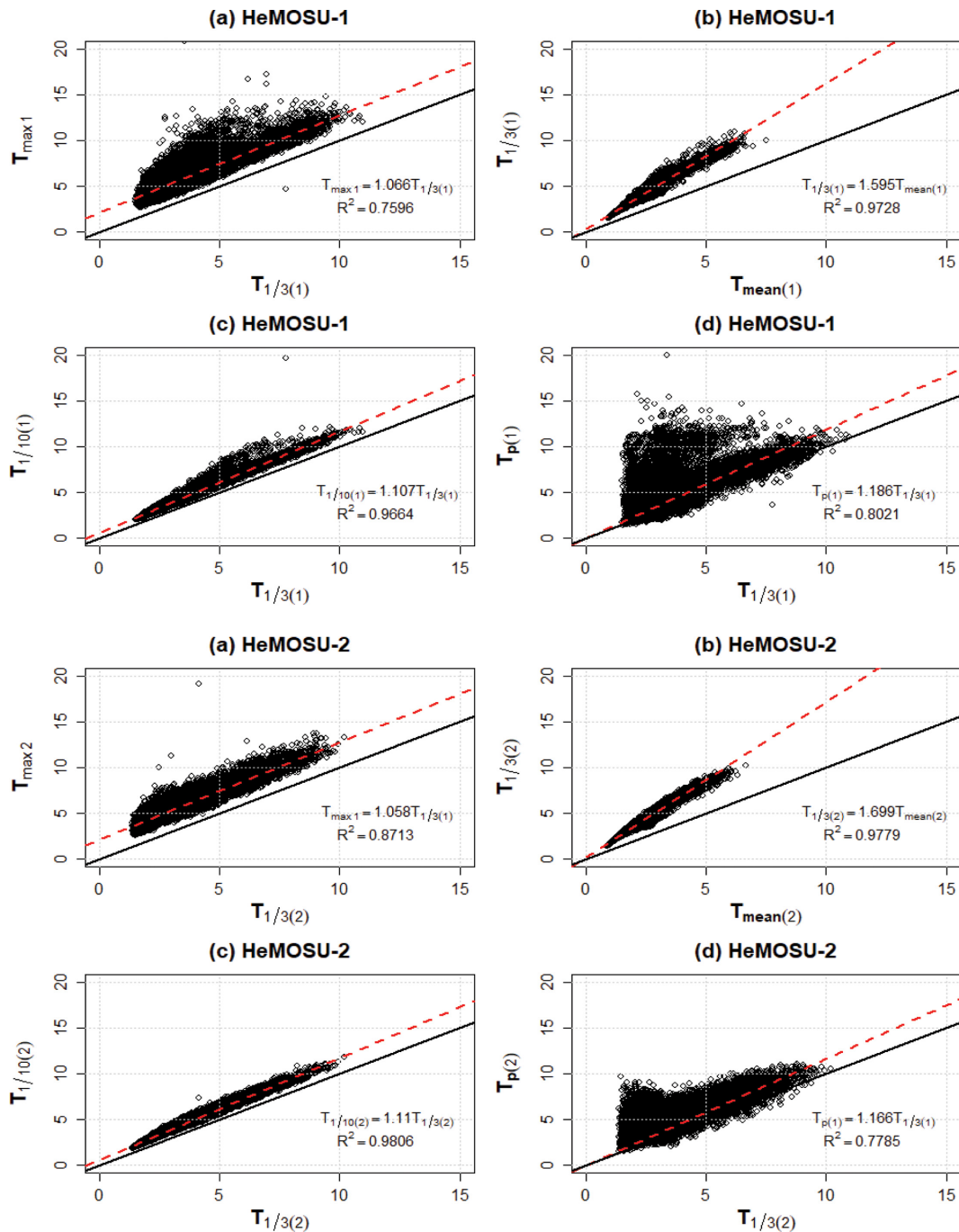


높은 수준으로 나타났다.  $H_{max}$ 와 비교를 하는 경우에는 최대 약 29% 차이가 나타났는데, 이는 분석 대상 지점의 수심이

각각 13.5 m와 30 m 수준으로 심해영역에 포함되지 않기 때문에 최대파고의 쇄파로 인한 영향으로 사료되며, Jeong et

**Table 4.** Correlation coefficient between representative wave periods

Relationship Formula	Previous Studies (Correlation Coefficient)	This Study			
		HeMOSU-1		HeMOSU-2	
		$\alpha_i$	$R^2$	$\alpha_i$	$R^2$
$T_{max} = \alpha_1 T_{1/3}$	0.6~1.3	1.066	0.7596	1.058	0.8713
$T_{1/3} = \alpha_2 T$	0.9~1.4	1.595	0.9728	1.699	0.9779
$T_{1/10} = \alpha_3 T_{1/3}$	0.9~1.1	1.107	0.9664	1.110	0.9806
$T_p = \alpha_4 T_{1/3}$	1.1	1.186	0.8021	1.166	0.7785



**Fig. 4.** Relationships between representative wave periods observed in HeMOSU-1 & 2.

al.(2019)의 연구 결과에서도  $H_{max}$ 의 관계가 기존에 제안된 상관 계수보다 과소 추정되는 결과를 확인할 수 있다.

한편, Fig. 3에는 상관관계 분석 결과를 제시하였는데, 스펙트럼법에 의해 산정되는 유의파고( $H_s$ )는 파열분석법에 의해 산정되는 유의파고( $H_{1/3}$ )보다 약 1.05배 크게 나타나는 것을 확인할 수 있으며(Goda, 2010), 대부분의 대표 파고 간 상관관계가 선형관계를 이루고 있지만 Fig. 3의 (g), (h)와 같이 파고가 어느 정도 커짐에 따라 선형 관계를 추정함에 있어 한계를 보이고 있었다.

### 3.2 대표 주기간 상관관계 분석

Goda(2010)는  $T_{1/3}$ ,  $T_{1/10}$ ,  $T_{max}$ ,  $\bar{T}$ ,  $T_p$  사이의 관계식을 제안한 바 있으며, 본 연구에서 파열분석법 및 스펙트럼 분석법을 통해 산정된 HeMOSU-1과 HeMOSU-2의 주기를 이용하여 관계식을 산정하였다(Table 4, Fig. 4 참조).

대표 주기 사이의 상관 관계 분석 결과, 대부분의 상관 계수는 기존에 제안된 상관 계수와 매우 유사한 수치를 보이고 있었다(Table 4 참조). 유의파 주기( $T_{1/3}$ )와 평균파 주기( $\bar{T}$ ) 사이에는 기존에 제안된 상관 계수의 상한값인 1.4에 비해 약 12%, 17%의 차이를 보이고 있었으며, HeMOSU-1&2에서 평균파 주기가 커짐에 따라 비선형 관계를 가지는 것으로 확인된다(Fig. 4의 (b) 참조). 또한, 최대파 주기( $T_{max}$ )와 유의파 주기( $T_{1/3}$ )의 상관 분포에서 상관계수는 기존에 제안된 상관 계수의 평균값과 유사하지만, 최대파 주기의 분산이 매우 크게 나타나고 있으며, 이러한 현상으로 평균파 주기의 비해 유의파 주기가 크게 발현하는 것으로 사료된다(Fig. 4의 (a) 참조).

한편, 유의파 주기( $T_{1/3}$ )와 침두주기( $T_p$ )의 경우 기존에 제안된 상관 계수와 유사하게 나타났지만, Fig. 5에서 보는 바와 같이 침두 주기가 유의파 주기보다 매우 큰 분포를 보이는 경향도 나타났다. 이는 스펙트럼 분석법을 통해 침두 주기를 산정하는 경우 주로 단봉형태의 스펙트럼 분포가 대다수 이지만, 스펙트럼 밀도가 작게 추정되는 구간에서 풍파의 성장이

충분하지 않아 침두 주파수( $f_p$ )가 2개 이상 출현하는 현상이 발생하는 문제 때문인 것으로 사료된다(Soares, 1984; Jeong et al., 2019). 그러나 그 비율이 HeMOSU-1&2에서 각각 전체 자료의 2.5%, 1.3%로 매우 적고 대부분의 유의파 주기( $T_{1/3}$ )와 침두주기( $T_p$ )는 5초 이하에서 분포함을 확인할 수 있다.

### 3.3 유의파고와 유의파 주기 분포

유의파고와 유의파 주기는 대상 해역의 파랑 특성을 파악하기 위한 매우 중요한 파랑 변수이며, 항만 및 해안 구조물 설계에 주로 사용된다. 이 파고와 주기는 파 추산 등에 입각하여 결정하더라도 양자는 파의 발달 및 감쇠 과정에 따라 특정 관계를 유지하고 있다. 이에 Goda(2003)는 바람에 의해 발달한 파에 대하여 Wilson의 파 추산식으로부터  $T_{1/3} \approx 3.3(H_{1/3})^{0.63}$ 의 관계식을 제안하였으며, SPM(Shore Protection Manual, 1977)에서는  $T_{1/3} = 3.85(H_{1/3})^{0.5}$ 의 관계식을 제안하였다. 또한, Suh et al.(2008)의 연구 결과를 살펴보면, 서해안에 위치한 홍도에서 관측된 자료를 통해 유의파고 및 유의파 주기에 대한 관계식을  $T_{1/3} = 5.59(H_{1/3})^{0.20}$ 과 같이 제안하였다. 이에 본 연구에서는 국내 서해안의 유의파고 및 유의파 주기의 관계에 대하여 비선형 회귀분석을 통해 관계식을 산정하였으며, 앞서 소개한 3가지 식과 비교하였다.

그 결과, 유의파고가 작을수록 유의파 주기의 변동성이 증가하였다. HeMOSU-1의 경우(Fig. 6(a), (c) 참조) 파고가 1 m 이하의 경우와 2 m~2.5 m 범위에서 이상 주기가 발현하였으며, 이는 너울 및 파의 중첩으로 발생하는 영향으로 사료된다.

또한 서해안의 유의파고 분포는 약 1 m 이하에 주로 분포하였고, 유의파 주기의 경우 대부분 5초 이하에 머물고 있었다(Fig. 6(c), (d)). 또한, Goda(2003) 및 SPM(1977)의 관계식은 유의파고와 유의파 주기 분포의 하한선을 따라가는 경향을 보이고 있었고, Suh et al.(2008)에서 제안한 관계식은 파고가 낮은 경우 어느 정도의 경향성을 보이고 있었다(Fig. 6(a), (b)). 기본적으로 유의파고와 유의파 주기의 관계식은

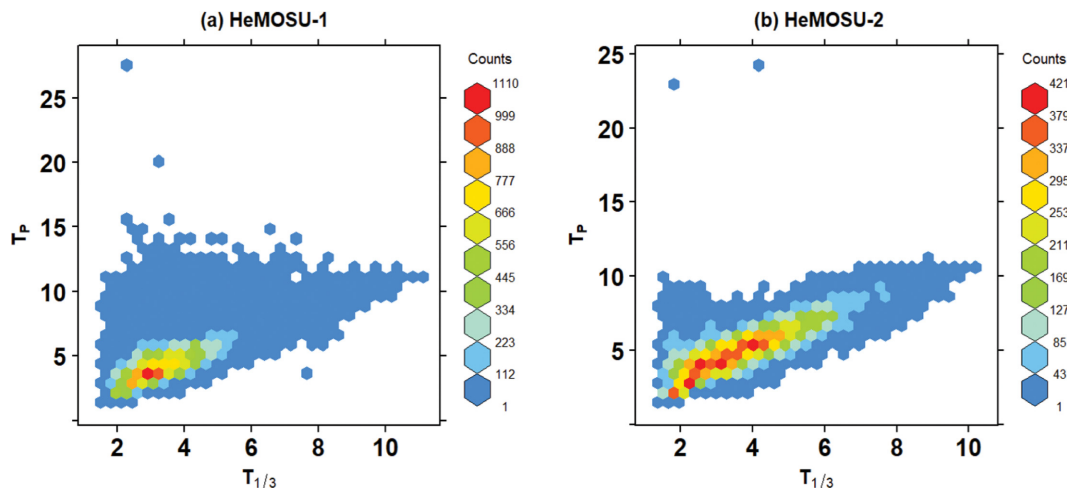


Fig. 5. Distribution of peak wave periods ( $T_p$ ) and significant wave periods ( $T_{1/3}$ ).

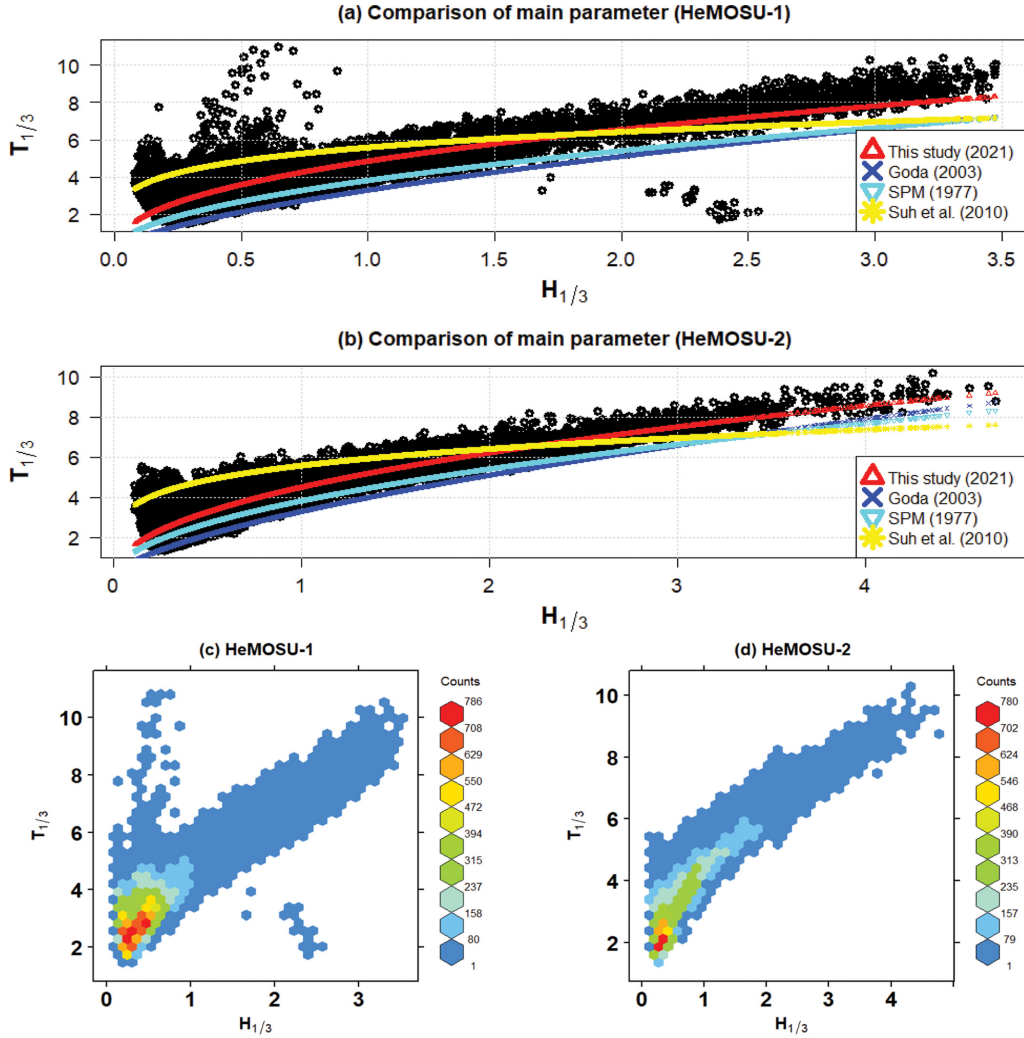


Fig. 6. Scatter plot and non-linear regression between significant wave heights ( $H_{1/3}$ ) and wave periods ( $T_{1/3}$ ).

멱함수 형태의  $T_{1/3} = \alpha(H_{1/3})^\beta$ 로 이루어져 있으며, 본 연구에서 수행한 비선형 회귀분석을 통해 산정된 HeMOSU-1과 HeMOSU-2의 관계식은 다음 식(4), (5)와 같이 나타났다.

$$T_{1/3_{\text{HeMOSU1}}} = 4.827(H_{1/3_{\text{HeMOSU1}}})^{0.43} \quad (4)$$

$$T_{1/3_{\text{HeMOSU2}}} = 4.493(H_{1/3_{\text{HeMOSU2}}})^{0.46} \quad (5)$$

관계식에서  $\alpha$  값은 기존에 제안된 Goda(2003)과 SPM(1977)에 적용된 수치보다 약 1.2~1.5배 크게 산정됐으며,  $\beta$  값은 약 1.4~1.6배 낮게 산정되었는데, 이는 풍파가 우세한 경우의 파랑에 대하여 제시된 공식이기 때문이다. 한편,  $\alpha$ ,  $\beta$  값은 Suh et al.(2008)의 관계식과도 약간의 차이가 발생하는데, 이는 대상 수심 및 쇄파 영향 등 관측 해역의 물리적 요인에 기인할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론 및 제언

본 연구에서는 국내 서해안에 위치한 HeMOSU-1과

HeMOSU-2 해상기상관측타워의 수면변위 자료를 이용하여 대표 파랑 변수가 상관관계식을 산정하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 대표 파고 간 상관관계 분석을 수행한 결과, 대부분의 상관계수는 기존에 고안된 값과 유사하게 계산되었고 결정계수가 매우 높게 나타났으나, 최대파고( $H_{max}$ )의 관계에 대해서는 대상 분석 지점의 파랑 환경의 영향으로 인하여 최대 29% 작게 추정되는 결과를 얻었다. 또한 파열 분석법을 통해 산정된 유의파고( $H_{1/3}$ )는 파랑 스펙트럼법을 통해 산정된 유의파고( $H_s$ )보다 작게 추정되는 기존의 이론과 차이가 없음을 확인할 수 있었다. 파고 간 상관 관계는 주로 선형 관계를 보이고 있지만, 파고가 커짐에 따라 선형 관계를 추정함에 그 한계를 보이고 있었다.

2) 대표주기 간 상관관계 분석을 수행한 결과, 국내 서해안의 유의파 주기( $T_{1/3}$ )와 첨두주기( $T_p$ )는 주로 5초 이하에 분포하고 있었다. 또한, 풍파의 성장이 충분하지 않아 주기가 매우 작은 경우, 스펙트럼 밀도가 작게 추정되는 구간에 쌍봉형 스펙트럼(Double-peak spectrum) 현상 나타나 첨두주기가 유



의파 주기에 비해 비정상적으로 높게 산정되는 분포를 보였다. 그러나 대부분의 주기 분포는 선형관계를 보이고 있었다.

3) 기존에 고안된 유의파고와 유의파 주기의 분포는 유의파고가 작아짐에 따라 유의파 주기의 변동성이 크게 나타났으며, 본 연구에서 비선형 회귀분석을 통해 분석한 결과  $T_{1/3} = (4.493-4.827)(H_{1/3})^{(0.43-0.46)}$ 로 나타났다. 또한, 특정 파고 범위 내에서 이상 주기가 발현하였는데, 이는 너울 및 파의 중첩으로 인한 현상으로 판단된다.

국내 해역별 파랑 관측 자료가 장기간 축적 되면서 국내 해역별 파랑 특성 분석 연구와 더불어 국내 해역을 대표하는 파랑 변수 간 관계식 수립이 필요하며, 본 연구에서는 1년 이하의 단기 파랑 관측 자료를 이용하여 HeMOSU-1호와 HeMOSU-2호에 국한되어 대표파랑 변수 간 관계식을 추정하였기 때문에, 대상 해역에 대표성을 갖기는 한계가 있다. 파랑 변수 간 제안식에 대하여 보편화를 위해서는 다양한 지점을 대상으로 장기자료 확보를 통해 계절별 파랑 특성 분석 등의 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

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

## References

- Ang, A.H-S. and Tang, W.H. (2007). Probability concepts in engineering: Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering, second ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Choi, H., Jeong, S.T., Cho, H.Y., Ko, D.H. and Kang, K.S. (2017). Development of wave by wave analysis program using MATLAB. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 29(5), 239-246 (In Korean).
- Dean, R.G and Dalrymple, R.A. (1991). Water wave mechanics for engineers and scientists (Vol. 2). world scientific publishing company.
- Goda, Y. (2003). Revisiting Wilson's formulas for simplified wind-wave prediction. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 129(2), 93-95.
- Goda, Y. (2010). Random seas and design of maritime structures (Vol. 33). World Scientific Publishing Company.
- Hameed, T.S. and Baba, M. (1985). Wave height distribution in shallow water. Ocean Engineering, 12(4), 309-319.
- Hanson, R.T., Newhouse, M.W. and Dettinger, M.D. (2004). A methodology to assess relations between climatic variability and variations in hydrologic time series in the southwestern United States, J. Hydrol., 287, 252-269.
- Jeong, W.M., Oh, S.H., Cho, H.Y. and Baek, W.D. (2019). Characteristics of waves continuously observed over six years at offshore central East Coast of Korea. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 31(2), 88-99 (In Korean).
- Kim, J.Y. and Kim, M.S. (2017). A comparison of offshore met-mast and lidar wind measurements at various heights. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 29(1), 12-19 (In Korean).
- Longuet-Higgins, M.S. (1952). On the statistical distribution of the heights of sea waves. Journal of Marine Research, 11(3), 245-266.
- Longuet-Higgins, M.S. (1980). On the distribution of the heights of sea waves: some effects of nonlinearity and finite band width. Journal of Geophysical Research, 85(C3), 1519-1523.
- Molénat, J., Davy, P., Gascuel-Oudoux, C. and Durand, P. (1999). Study of three subsurface hydrologic systems based on spectral and cross-spectral analysis of time series. Journal of Hydrology, 222(1-4), 152-164.
- Pearson, K. (1895). Notes on regression and inheritance in the case of two parents. Proc. R Soc. Lond., 58, 240-242.
- RADAC (2012). Instruction manual WaveGuide for water level, wave-height and wave-direction.
- Rattanaipitikon, W. and Shibayama, T. (2007). Estimation of shallow water representative wave heights. Coastal Engineering Journal, 49(03), 291-310.
- Soares, C.G. (1984). Representation of double-peaked sea wave spectra. Ocean Engineering, 11(2), 185-207.
- Suh, K.D., Kwon, H.D. and Lee, D.Y. (2008). Statistical characteristics of deepwater waves along the Korean Coast. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 20(4), 342-354 (In Korean).
- U.S. Army Coastal Engrg. Res. Center (1977). Shore Protection Manual 3rd ed. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., USA.

Received 14 June, 2021

Revised 5 July, 2021

Accepted 7 July, 2021