

## MATLAB을 이용한 개별파 분석 프로그램 개발 Development of Wave by Wave Analysis Program using MATLAB

최혁진\* · 정신태\* · 조홍연\*\* · 고동휘\*\*\* · 강금석\*\*\*\*

Hyukjin Choi\*, Shin Taek Jeong\*, Hong Yeon Cho\*\*, Dong Hui Ko\*\*\* and Keum Seok Kang\*\*\*\*

**요 지 :** 현장에서 파고와 주기만을 관측한 경우 주로 개별파 분석법을 사용하여 다양한 파랑 특성을 산정한다. 본 논문에서는 MATLAB 언어를 이용하여 개별파 분석 프로그램을 개발하였다. 영점 상향 교차법과 영점 하향 교차법을 이용하여 1) 평균해면 보정, 2) 영점 교차 시간 산정, 3) 개별파고 산정, 4) 자료 관측기간 변화 등의 기능을 수행할 수 있다. 해모수 1호에 설치된 레이더(WaveGuide Radar)를 사용하여 관측된 시간간격 0.2초 자료를 대상으로 개발된 프로그램의 적용성을 검토하였다. 조석성분 제거 및 영점 교차 시간 산정은 선형 혹은 2차원으로 내삽하였다. 개별 파고 산정은 Goda 방법이 적정한 것으로 판단되었으며, 본 연구에서 제안한 방법은 차후 후속 연구를 통하여 개선할 여지가 있는 것으로 판단된다. 대표파의 특징은 샘플의 유한성 등으로 인하여 영점상향교차법과 영점하향교차법으로 산정한 결과가 상이하다는 것을 알 수 있다.

**핵심용어 :** 개별파 분석법, MATLAB, 영점 상향 교차법, 영점 하향 교차법, 해모수 1호, 대표파

**Abstract :** In case of observing only wave height and period in the field, various wave characteristics are mainly calculated by wave by wave analysis method. In this paper, an wave by wave analysis program using MATLAB language is developed. It is possible to perform a function such as 1) correction for mean water level, 2) calculation for zero crossing time, 3) calculation for individual wave height, 4) time interval by using zero upcrossing and downcrossing method. The applicability of the developed program to the data of 0.2 second interval observed by using the WaveGuide Radar installed on HeMOSU-1 was examined. Tidal level variation removal and zero crossing time estimation were determined by linear or quadratic interpolation. It was judged that the Goda method was appropriate for calculating individual wave height, and the method proposed in this study seems to be improved through subsequent research. Due to the fineness of the sample, it can be seen that characteristics of representative waves are different from the results calculated by zero upcrossing and downcrossing method.

**Keywords :** wave by wave analysis method, MATLAB, zero upcrossing method, zero downcrossing method, HeMOSU-1, representative waves

### 1. 서 론

최근 해상풍력단지 건설, 조류 에너지 개발 등 연안역 개발에 대한 관심이 고조되면서 파랑 및 조석 등 연안 기본적 환경에 대한 검토가 필요하다. 대상해역의 파랑을 측정함으로써 파랑의 제원을 산정하는 것이 연안공학자 및 해양학자가 수행하는 파랑관측의 목적이다. 파랑관측 자료는 항만의 정비, 해안보전, 해역의 이용 및 개발에 관련된 시설이나 구조물의 계획, 설계, 시공 등을 실시하기 위해 필요한 기초로 사용되고, 호안의 파손과 같은 다양한 재해에 대한 파랑의 영향을 해석함으로써 그 원인 규명 및 대책안을 수립한다. 또한 계류선박이나 항행 선박 혹은 해양시설을 관리·운용하

는 데 있어서의 안전 확보, 효율적인 운영을 위한 자료로 활용된다.

파고, 파향, 주기는 파랑의 성질을 나타내는 중요한 매개변수이다. 현재 사용하는 파랑관측기기는 관측항목이 파고와 주기로 한정되는 경우와 파향을 포함하는 경우로 나눌 수 있다. 최근에는 다양한 형태의 센서가 개발되어 파고계의 종류도 다양해지고 있다. 관측항목이 파고와 주기로 한정되는 경우에는 주로 초음파식, 수압식, 가속도 계측 또는 GPS 부이, 용량식 등이 사용된다.

한편 관측항목에 파향이 포함되는 경우 전파식, 부이식, 해저설치식 등이 있으며, 이 외에도 단파 해양레이더, 마이크로파 레이더, 수압식 해저 쓰나미계 등이 있다(KIOST, 2014).

\*원광대학교 토목환경공학과(Corresponding author: Shin Taek Jeong, Department of Civil and Environmental Engineering, Wonkwang University, Iksandae-ro 460, Iksan, Jeonbuk 54538, Korea, Tel: +82-63-850-6714, Fax: +82-63-857-7204, [stjeong@wku.ac.kr](mailto:stjeong@wku.ac.kr))

\*\*한국해양과학기술원 해양자료과학실(Ocean Data Science Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology)

\*\*\*한국해양과학기술원 연안공학연구본부(Coastal & Environmental Engineering Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology)

\*\*\*\*한국전력공사 전력연구원(KEPCO Research Institute)

이처럼 관측된 해상의 불규칙파는 개별파법 혹은 스펙트럼법을 이용하여 분석을 수행하게 된다(Horikawa, 1978; IAHR, 1986; Sorensen, 1993; Goda, 2010; Holthuijsen, 2009; Hoekstra et al., 1994). 개별파법은 유의파법, 최대파법, 확률 분포법 등으로 활용되며, 스펙트럼법은 개별파법과의 관계를 이용하여 방파제 설계, 해양 구조물의 응답해석, 파랑변형 수치모형 등에 사용된다. 천해역의 경우 쇄파 등의 파랑변형으로 인하여 개별파법을 사용하는 것이 적절하다(Mizuguchi, 1982; Buckley et al., 1984; Postacchini and Brocchini, 2014).

Forristall(1978)은 멕시코만의 파랑자료를 이용하여 레일리 분포를 이용하여 산정한 최대파는 약 1.1배 과대평가된다는 것을 설명하였다. Tayfun(1993)은 PM 스펙트럼으로 생성되는 수면변위 정보를 이용하여 관측 간격에 따른 파랑정보 추정오차 분석을 수행한 바 있다. 그러나 파랑분석 방법에서 스펙트럼 방법과 파열(wave-train) 분석방법은 동일한 수면변위 정보를 time-영역, frequency-영역에서 분석하는 기본적인 개념차이의 한계를 보이고 있다. 또한 전통적인 파랑정보 추정 기법에 해당하는 영점 상향교차 또는 하향교차 방법을 이용하여 파고정보를 추정하는 경우, 관측 간격이 연속적인 파형의 최대-최소 시점에서 보통 벗어나기 때문에, 파고가 과소 추정(under-estimation)될 수 있다. Stansell et al.(2002)도 관측 간격에 따라 추정한 파고분포의 변화양상을 분석하였으며, Zheng et al.(2006)도 관측 간격에 따른 파고의 과소추정 영향을 지적한 바 있다.

본 연구에서는 수치해석 및 프로그래밍 환경을 제공하는 MATLAB을 사용하여 파고 자료를 분석하는 개별파법 프로그램을 개발하고, 해상기상탑 HeMOSU-1호의 파랑자료를 활용하여 그 적용성을 검토하였다.

## 2. 개별파 분석법

사용하는 센서의 종류에 따라 원시자료는 연직방향의 신호(파고 자료)만 포함하는 경우와 연직방향의 신호는 물론 수

평방향의 신호(파향 자료)를 포함하는 경우가 있다. 원시자료를 분석하는 과정은 Fig. 1에 도시된 바와 같이 6단계로 분류할 수 있다(Hoekstra et al., 1994).

개별파 분석법은 시간영역에서 파고자료를 분석하게 된다. 다양한 파랑 관측자료가 수집되면 다음 단계로 사전처리를 수행하게 된다. 관측 자료의 경우 이상 및 결측 여부를 파악하여, 이들 자료는 전 자료와 비교하여 분석에 사용하였다.

### 2.1 자료 수집 기간 및 관측 시간

파랑 관측 자료는 20분 자료를 획득하여 분석하는 것이 일반적이다(IAHR, 1986; Goda, 2010). 이는 파의 평균주기가 10초일 때 120개의 파를 포함하는 길이이다. 보통의 경우 파랑의 통계적 변동성 측면에서 100개 파랑이상이 실용상 타당성을 유지할 수 있는 개수이며, 파랑의 시간적 변화측면에서 너무 장시간을 대상으로 하면 그 사이의 파랑 환경이 변화되어 일정하지 않는다는 우려를 감안한 것이다.

그러나, 불규칙파랑의 경우 200파 이상의 파랑을 대상으로 하여 통계적 변동을 줄이는 것이 바람직하며, 너울과 같이 비교적 긴 주기의 파랑이 지속되는 경우에는 30분 이상의 자료를 대상으로 할 수도 있다.

파형기록의 판독 시간 간격은 짧을수록 좋고, 유의파 주기의 1/10 이하, 가능하면 1/20 정도로 한다. 그 이상 짧게 하는 것은 자료의 양이 늘어날 뿐 얻을 수 있는 정보의 양이나 질에 영향이 없기 때문에 일반적으로 좋은 대책은 아니다. 반대로 판독 시간 간격이 너무 길면 작은 파고의 파랑을 빠뜨리거나 파형의 최대 또는 최소값을 낮게 어림잡을 수 있기 때문에 파고를 작게 산정하는 등의 문제가 발생한다.

기록의 개수와 판독 시간간격이 결정되면 자료 개수가 정해진다. 이 개수를 2" 보다도 약간 크게 하면 차후 스펙트럼의 계산이 편리하다. 본 연구에서는 30분 자료를 대상으로 분석을 수행하였다.

### 2.2 평균 해면 보정

대부분의 파랑자료는 장주기파 성분인 조위자료가 있으므로

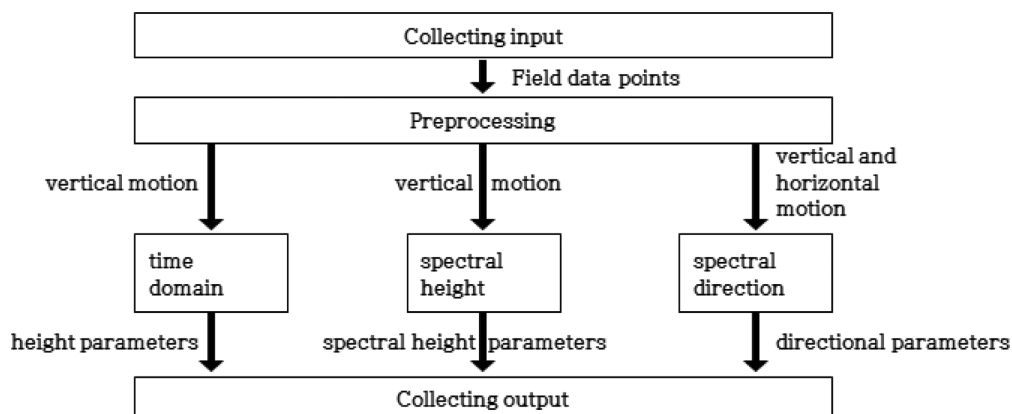


Fig. 1. The six phases of the raw data analysis.

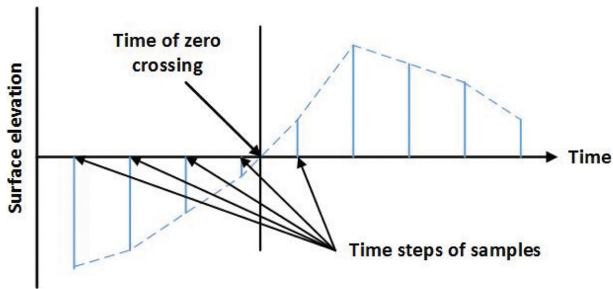


Fig. 2. Linear interpolation to determine time of zero crossings.

이 성분을 제거하여야 한다. 따라서 관측자료를 대상으로 선형 혹은 포물형 보정을 수행하여 조석성분을 제거한다. 본 연구에서는 MATLAB 함수인 `detrend`와 `polyfit` 함수(MathWorks, 2017)를 사용하여 평균 해면으로 보정하였다. `Detrend` 함수는 선형으로 경향을 제거하며, `polyfit` 함수는 다항식 커브를 이용하여 내삽을 수행한다.

### 2.3 영점 교차 시간 산정

파형의 영점 상향 교차 시간은 다음 식(1)의 범위내에서 선정된다.

$$\eta_i \cdot \eta_{i+1} < 0 \text{ and } \eta_{i+1} > 0 \quad (1)$$

여기서,  $\eta_i$ 는 평균 해면으로 보정된 자료중  $i$ 번째 수면변위이다. 따라서 영점상향 교차시간은  $\eta_i$ 와  $\eta_{i+1}$ 를 수집한 시간을 선형 혹은 2차원으로 내삽한 값이 된다. 파형의 영점 하향 교차 시간은 다음 식(2)의 범위내에서 선정된다.

$$\eta_i \cdot \eta_{i+1} < 0 \text{ and } \eta_{i+1} < 0 \quad (2)$$

영점상향교차법(zero up cross)으로 분석할 경우, 선형 내삽으로 영점 교차 시간 산정을 수행한 방법을 도시하면 Fig. 2와 같다.

### 2.4 개별 파고 산정

관측치로부터 영점상향 교차법을 이용하여 개별 최대파를 산정하는 경우, 다음 식(3)을 만족하여야 한다.

$$\eta_{i-1} < \eta_i \text{ and } \eta_i < \eta_{i+1} \quad (3)$$

본 연구에서는 개별 파고 산정을 위하여 ① 최고 및 최저 관측치만을 사용하는 기존의 방법(Range method)(Hoekstra et al., 1994; IAHR, 1986), ② 관측치만을 사용하는 경우 실제 최대치를 과소평가할 수 있기 때문에 2차원 식을 이용하여 내삽한 결과를 사용하는 방법(Goda, 2000), ③ 본 연구에서 제안한 방법으로, 정현파형으로 가정하여 半波(half wave)를 대상으로 최적 추정하는 방법을 사용하였다. 이 방법은 영점교차 시점 사이에 있는 수면변위 정보를 파형을 구성하는 자료 일부로 가정하고, 정현 파형으로 피팅(fitting)하여 개별 파고를 산정하는 방법으로 오차제거를 최소화 하는 파고를

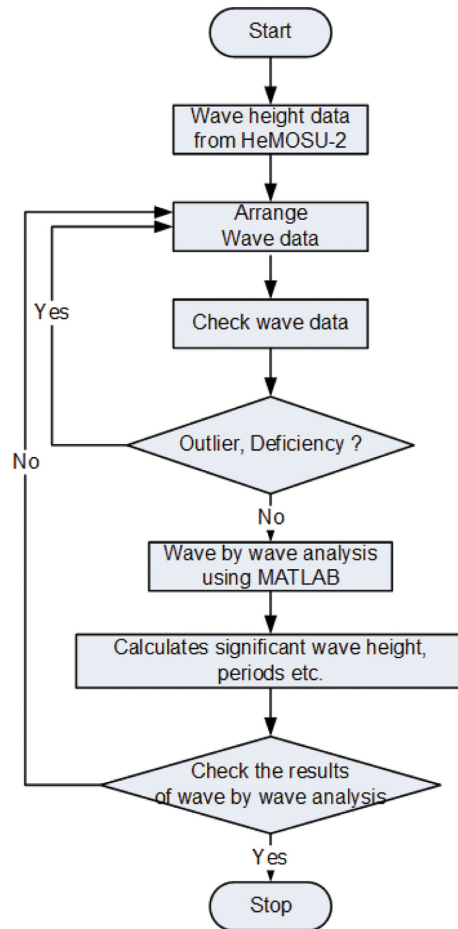


Fig. 3. Steps of wave by wave analysis.

추정하여 사용하였다. 이중 문제가 되는 파랑은 반파 주기가 1초 이하인 파랑으로 반파가 1개 존재하는 경우에는 이를 포함하고, 연속해서 2개 존재하는 경우에는 1개의 파랑으로 통합하여 평가하였다. 3개가 연속 존재하는 경우는 처음 2개 파랑은 무시하고 1개 파랑만 포함하여 검토하였다.

### 2.5 프로그램 개발

개별파 분석 프로그램은 MATLAB R2017a 환경을 바탕으로 작성하였다. MATLAB 프로그램은 이미 많은 분야에서 자료를 보다 쉽게 분석할 수 있도록 그래프와 다양한 함수를 제공하는 수치해석프로그램으로써 정교한 그래프 체계를 구축할 수 있다. 프로그램 개발 과정을 정리하면 Fig. 3과 같다.

## 3. 관측자료

산업통상자원부는 국내 서남해안의 위도와 안마도 사이에 해상풍력 실증단지 구축 연구의 일환으로 126° 07' 45.30" E, 35° 27' 55.17" N 지점에 해상 기상타워인 해모수 1호를 2010년 설치하였다(Fig. 4, 5 참조). Fig. 4에서 보는 바와 같이 해모수 1호는 4개의 강관파일에 의해 지지되는 자켓 기초에 사각 트러스 타워를 설치하였으며 평균해수면 기준으로



Fig. 4. Photo of HeMOSU-1.

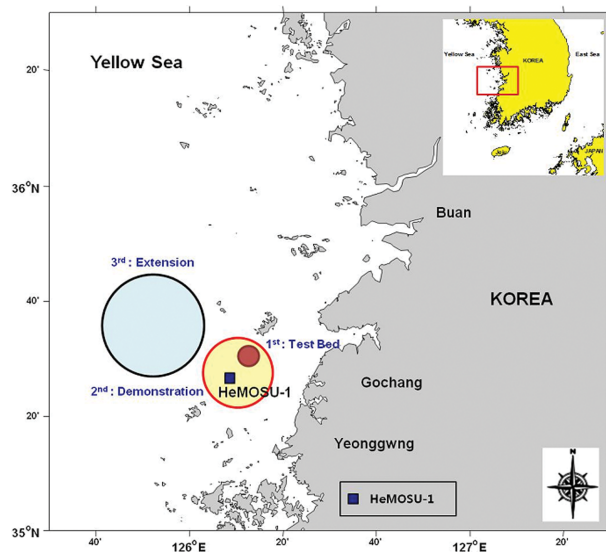


Fig. 5. Location map of HeMOSU-1.

Table 1. Specifications of WaveGuide system

Characteristics		WaveGuide system
Manufacturer		RADAC (NL)
Model no		WaveGuide ver 2.2
Sampling rate		5 Hz
Wave heights		0~60 m
Wave periods		0~1 Hz
Accuracy water level		1 cm
Processing period	Wave height	20 minutes
	Wave direction	20 minutes
	Tide	10 seconds, 1, 5 and 10 minutes
Processing interval	Wave height	User defined number of minutes (e.g. 1, 10, 20, 30)
	Wave direction	User defined number of minutes (e.g. 1, 10, 20, 30)
	Water level	User defined number of seconds (e.g. 10, 60, 600)

Table 2. Specifications of WaveGuide radar

Characteristics		WaveGuide radar
Manufacturer		Honeywell/Enraf tankgauging (NL)
Model no		973 SmartRadar LT
Mechanical	Dimensions	26 21 cm (diameter, height)
	Weight	Approximately 9 kg
	Casing material	Stainless steel 316
Electrical	Radar frequency	9.9~10.2 GHz
	Modulation	Triangular FM
	Emission	Depending on the type of antenna, a maximum radiation of 0.1 mW is generated
	Power requirements	24-64 VDC, 6 Watt per radar
Environmental conditions for the SmartRadar LT	Ambient temperature	-40 to 60°C
	Relative humidity	0~100%
	Ingress protection	IP67



Fig. 6. WaveGuide mounted.

약 100 m 높이까지 바람정보를 관측할 수 있도록 설계하였다. 기상타워에는 8개 높이 지점에 풍속계와 풍향계를 설치하여 10분 간격으로 풍속과 풍향을 관측할 수 있도록 하였다.

한편, 파고 및 조위를 관측하기 위하여 3대의 레이더 (WaveGuide Radar)를 사용하고 있다. 이 관측 장비는 1996년 Delft에 의해 개발된 장비로, 파고 및 파향 관측이 가능하며 플랫폼에 설치되어 WaveGuide server에 의하여 조정되며 자료는 원격장치에 의하여 전송되고 있다. 이 장비의 상세 특성은 Table 1, 2와 같다. Fig. 6은 현장에 설치된 WaveGuide 전경이다. 관측기간은 2013년 11월 26일부터 2014년 4월 23일까지로 시간간격은 0.2초이다.

## 4. 자료 분석

### 4.1 평균 해면 보정 방법에 따른 분석

조석성분을 제거하기 위하여 MATLAB 함수인 polyfit와 detrend 함수를 사용하여 평균 해면으로 보정하였다.

Fig. 7(a)는 관측자료와 polyfit를 이용하여 산정한 경향선을 도시한 것이며, Fig. 7(b)는 경향을 제거한 자료와 그 평균치를 도시한 것이다. 경향을 제거한 자료의 평균치는 모두 0 부근에 분포하여 polyfit 함수를 적절하게 사용한 것을 알 수 있다. 한편, Fig. 7(c)는 관측자료와 detrend 함수를 이용하여 산정한 경향선을 도시한 것이며, Fig. 7(d)는 경향을 제거한 자료와 그 평균치를 도시한 것이다. 경향을 제거한 자

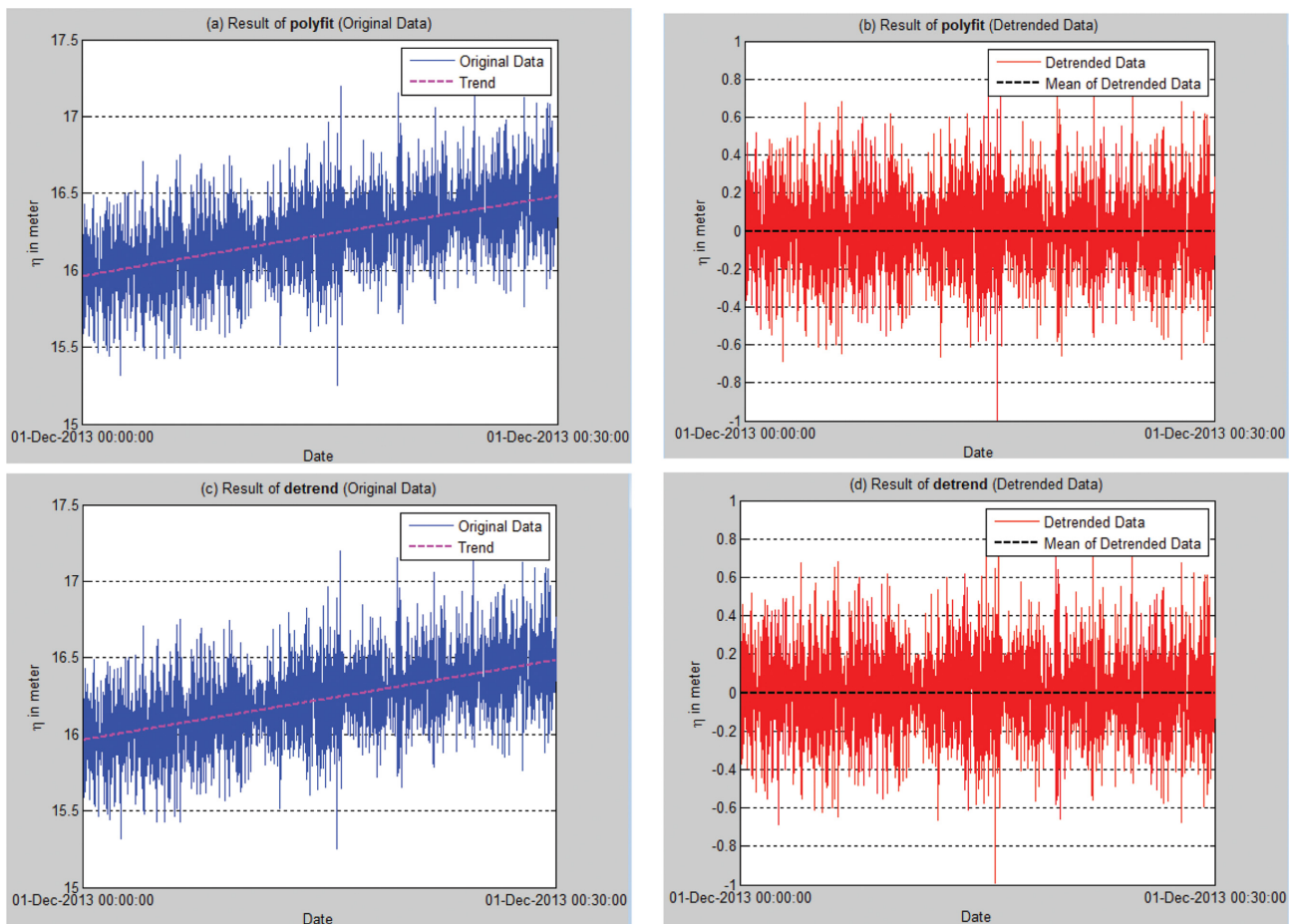


Fig. 7. Correction for mean water level.



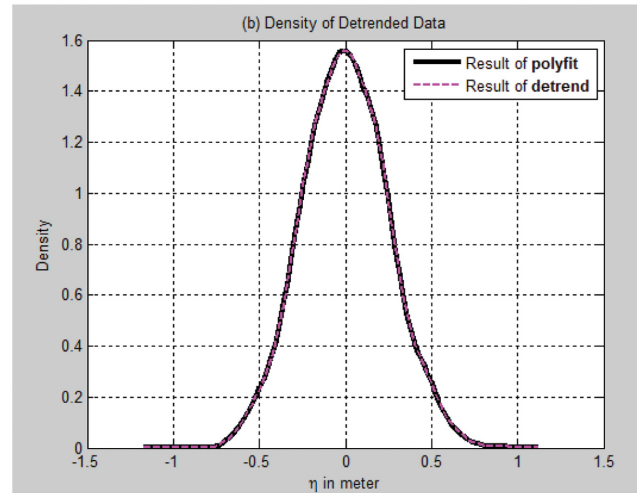
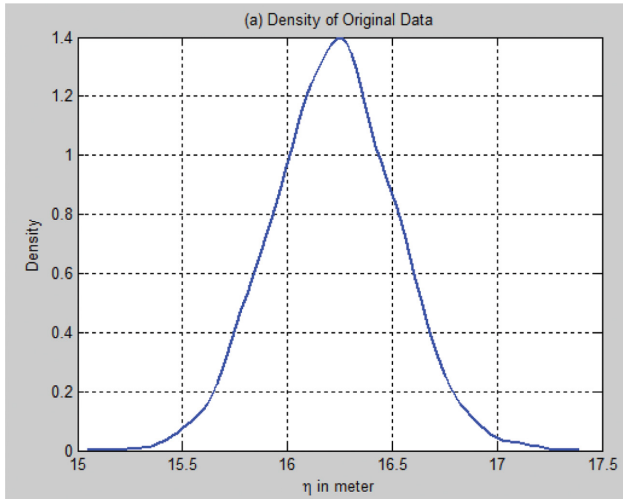


Fig. 8. Plots of water surface elevation density.

료의 평균치는 모두 0 부근에 분포하여 detrend 함수를 적절하게 사용한 것을 알 수 있다.

Fig. 8(a)는 관측자료의 밀도함수를 도시한 것이다. 한편, Fig. 8(b)는 polyfit 함수와 detrend 함수를 이용하여 경향을 제거한 자료의 밀도함수를 도시한 결과로, 서로 잘 일치하고 있다는 것을 알 수 있다. 이처럼 polyfit와 detrend 함수를 사용한 결과는 거의 동일하여 향후에는 polyfit만을 사용하여 분석을 수행하였다.

#### 4.2 영점 교차 시간 산정방법에 따른 분석

평균 해면으로 보정된 자료는 영점상향(혹은 하향) 교차시간을 산정하여야 하며, 본 연구에서는 선형 혹은 2차원으로 내삽하였다. Fig. 9(a)는 polyfit 내삽함수를 이용하여 조석성분을 제거한 자료를 이용하여 선형 및 2차원 내삽한 결과이다. 2종류의 결과가 일치하여 향후 선형 내삽한 결과를 이용하여 분석을 수행하였다. Fig. 9(b)는 영점상향 교차법과 영점 하향 교차법으로 산정한 주기의 밀도 자료로서 경향은 유사하나, 짧은 주기대에서 약간의 편차를 보이고 있다.

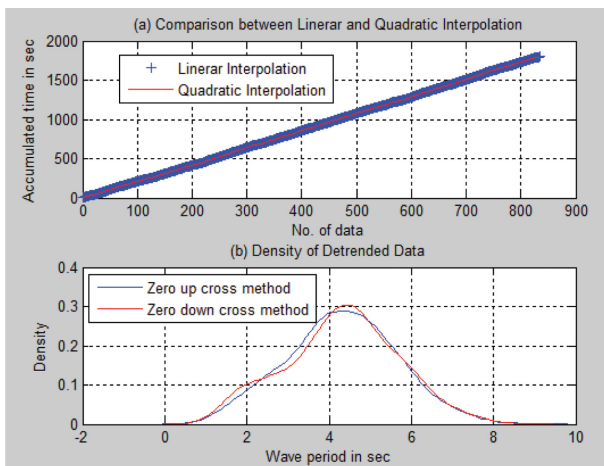


Fig. 9. Results of wave period calculation.

#### 4.3 개별 파고 산정방법에 따른 분석

Fig. 10(a)는 1) 최고 및 최저 관측치만을 사용하는 기존의 방법(Range method), 2) 2차원 식을 이용하여 내삽하는 방법(Goda method), 3) 정현파형으로 가정하여 半波(half wave)를 대상으로 최적 추정하는 방법(This study)을 사용하여 분석한 결과를 도시하였다. Fig. 10(b)에서 Goda method는 Range method에 비하여 파고가 항상 크게 산정되는 것을 볼 수 있다. Fig. 10(c)에서 본 연구에서 제안한 방법은 기존 Range method에 비하여 편차가 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 이 방법은 적은 자료를 사용하여 정현파로 가정하는 과정에서 다른 2가지 방법에 비하여 크거나, 작게 산정하는 파고가 많기 때문에 사료되며, 차후 연구에서는 반파를 대상으로 하지 않고, 완전한 1개의 정현파를 대상으로 하여 추정하는 방법 등을 검토하여야 할 것으로 사료된다.

Fig. 11(a)는 3가지 방법을 이용하여 영점상향 교차법으로 산정한 파고 빈도 결과이며, Fig. 11(b)는 영점하향 교차법으

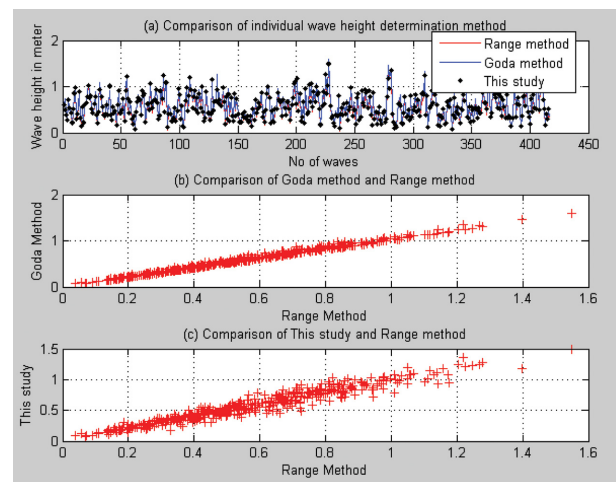


Fig. 10. Comparison of 3 wave height determination methods.

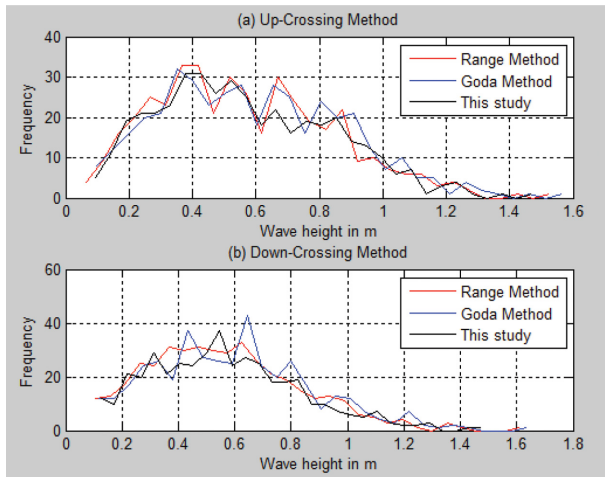


Fig. 11. Comparison of zero up and down crossing method.

로 산정한 파고 빈도 결과로, 경향은 비슷하나 6가지 방법 모두 상이한 결과가 나타난다.

#### 4.4 관측 시간 간격에 따른 분석

Wave rider buoy나 AWAC을 이용하여 파랑 관측을 수행하는 경우 관측간격은 대략 0.78125초이다. 본 연구에 사용한 WaveGuide Radar의 경우 관측간격이 0.2초로 다른 장비

에 비하여 관측간격이 짧다. 따라서 관측간격 변화에 따른 파랑정보 비교분석을 위하여 30분간의 자료를 대상으로 Table 3과 같이 5가지 경우에 대하여 분석을 수행하였다. 자료는 HeMOSU1 2013년 11월 26일 자료를 대상으로 분석을 수행하였다.

영점 상향 및 하향 교차법으로 산정한 대표파 특성은 Table 4와 같다. 통계적으로 영점상향교차법과 영점하향교차법은 같고, 대표파의 파고와 주기도 변함이 없어야 하나, 실제로는 샘플의 유한성 등으로 인하여 2가지 방법으로 산정한 대표 파고 및 주기가 상이하다는 것을 알 수 있다. 특히  $H_{\max}$ 와  $T_{H_{\max}}$ 의 경우 관측간격에 관계없이 편차가 크다. 반면 다른 파랑 특성에 비하여 많은 자료를 사용하는  $H_{1/3}$ ,  $T_{H_{1/3}}$  및  $\bar{H}$ ,  $T_{\bar{H}}$ 의 경우 2가지 방법 결과의 편차가 작고, 특히 파고의 경우 거의 일치한다는 것을 알 수 있다.

관측 시간간격이 작을수록 주기가 짧아지는 경향은  $T_{H_{\max}}$ 를 제외한 모든 대표파에서 일관되게 발생한다.

평균파의 파고 및 주기를 비교한 결과, 영점상향교차법과 영점하향교차법으로 산정한 결과는 동일하다. 그러나, 관측 간격  $\Delta t = 0.4, 0.2s$ 의 경우,  $\Delta t = 1, 0.8, 0.6s$ 에 비하여 평균파고가 작아지고, 주기는 관측 간격이 짧아짐에 따라 일관되게 짧아진다. 이는 관측간격을 줄임에 따라, 단주기 파랑의 개수가 증가하기 때문에 발생한 결과이다.

Table 3. Basic information about wave data of HeMOSU-1

Case	Sampling interval (unit: sec)	No of data	No of missing data	Data coverage	Remarks
1	0.2	9,000	14	99.84%	Recording period: 2013. 11. 26. 00
2	0.4	4,500	7	99.84%	
3	0.6	3,000	2	99.93%	
4	0.8	2,250	3	98.87%	
5	1.0	1,800	1	99.94%	

Table 4. Wave characteristics according to observation interval

Wave characteristic		Interval				
		$\Delta t = 1s$	$\Delta t = 0.8s$	$\Delta t = 0.6s$	$\Delta t = 0.4s$	$\Delta t = 0.2s$
$H_{\max}$ (m)	Up-cross method	1.59	1.56	1.65	1.75	1.68
	Down-cross method	1.66	1.55	1.75	1.60	1.78
$T_{H_{\max}}$ (s)	Up-cross method	5.54	5.29	5.30	5.18	5.33
	Down-cross method	5.32	5.17	4.94	5.23	3.72
$H_{1/3}$ (m)	Up-cross method	0.92	0.92	0.95	0.94	0.86
	Down-cross method	0.91	0.92	0.94	0.94	0.86
$T_{H_{1/3}}$ (s)	Up-cross method	4.80	4.72	4.68	4.53	3.87
	Down-cross method	4.88	4.77	4.71	4.53	3.83
$H_{1/10}$ (m)	Up-cross method	1.13	1.16	1.19	1.19	1.16
	Down-cross method	1.14	1.16	1.19	1.18	1.18
$T_{H_{1/10}}$ (s)	Up-cross method	4.91	4.87	4.76	4.68	4.45
	Down-cross method	4.92	4.96	4.89	4.70	4.52
$\bar{H}$ (m)	Up-cross method	0.59	0.59	0.59	0.57	0.47
	Down-cross method	0.59	0.59	0.59	0.57	0.47
$T_{\bar{H}}$ (s)	Up-cross method	4.31	3.98	3.69	3.27	2.15
	Down-cross method	4.31	3.98	3.69	3.27	2.15

## 5. 결론 및 토의

본 논문에서는 MATLAB 언어를 이용하여 개별과 분석 프로그램 개발하였다. 영점상향 교차법과 영점하향 교차법을 이용하여 1) 평균해면 보정, 2) 영점 교차 시간 산정, 3) 개별파고 산정, 4) 자료 관측기간 변화 등의 기능을 수행할 수 있다.

조석성분을 제거하기 위하여 MATLAB 함수인 polyfit와 detrend 함수를 사용하여 평균 해면으로 보정하였으며, 1차 및 2차 식으로 보정한 결과는 동일하였다. 영점 교차 시간은 선형 혹은 2차원으로 내삽하였다. 개별 파고 산정은 1) 최고 및 최저 관측치만을 사용하는 기존의 방법(Range method), 2) 2차원 식을 이용하여 내삽하는 방법(Goda method), 3) 정현파형으로 가정하여 半波(half wave)를 대상으로 최적 추정하는 방법(This study)을 사용하였으며, Goda method이 적절한 것으로 판단되었다. 본 연구에서 제안한 방법은 차후 후속 연구를 통하여 개선할 여지가 있는 것으로 판단된다.

해모수 1호에 설치된 레이더(WaveGuide Radar)를 사용하여 관측된 시간간격 0.2초 자료를 대상으로 개발된 프로그램의 적용성을 검토하였다. 영점 상향 및 하향 교차법으로 산정한 대표파 특성은 Table 4와 같다. 대표파의 파고와 주기는 샘플의 유한성 등으로 인하여 영점상향교차법과 영점하향교차법으로 산정한 결과가 상이하다는 것을 알 수 있다. 그러나, 많은 자료를 사용하는  $H_{1/3}$ ,  $T_{H1/3}$  및  $\bar{H}$ ,  $T_{\bar{H}}$ 의 경우 2가지 방법 결과의 편차가 작고, 특히 파고의 경우 거의 일치한다는 것을 알 수 있다. 관측 시간간격이 작을수록 주기가 짧아지는 경향은  $T_{Hmax}$ 를 제외한 모든 대표파에서 일관되게 발생한다.

평균파의 파고 및 주기를 비교한 결과, 영점상향교차법과 영점하향교차법으로 산정한 결과는 동일하다. 그러나, 관측 간격  $\Delta t = 0.4, 0.2s$ 의 경우,  $\Delta t = 1, 0.8, 0.6s$ 에 비하여 평균파고가 작아지고, 주기는 관측 간격이 짧아짐에 따라 일관되게 짧아진다. 이는 관측간격을 줄임에 따라, 단주기 파랑의 개수가 증가하기 때문에 발생한 결과이다. 따라서, 단파 처리기법을 검토하여 관측간격변화에 따른 일관성을 유지할 수 있도록 프로그램을 개선하는 후속 연구가 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 해양수산부 해양청정에너지기술 개발 사업인 “항로표지 등부표용 전력발전시스템 형상 최적화에 관한 연구(과제번호:20170323)”와 한국해양과학기술진흥원 미래해양산업기술개발 해양중소벤처지원사업인 “콘크리트 쉬라우드를 이용한 조류발전시스템 연구(과제번호 20170122)”의 지원으로

로 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

## References

- Buckley, W.H., Pierce, R.D., Peters, J.B. and Davis, M.J. (1984). Use of the half-cycle analysis method to compare measured wave height and simulated Gaussian data having the same variance spectrum. *Ocean Engineering*, 11, 423-445.
- Forristall, G.Z. (1978). On the statistical distribution of wave heights in a storm. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 83, C5, 2253-2358.
- Goda, Y. (2010). *Random Seas and Design of Maritime Structures*, World Scientific Pub., 3rd edition.
- Hoekstra, G.W., Boeré, L., A.J.M. van der Vlugt and T. van Rijn (1994). *Mathematical Description of the Standard Wave Analysis Package*.
- Holthuijsen, L.H. (2009). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*, Cambridge University Press.
- Horikawa, K. (1978). *Coastal Engineering, An Introduction to Ocean Engineering*, Univ. of Tokyo Press.
- IAHR (1986). *List of Sea State Parameters*.
- Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST) (2014). *Observation and utilization of waves - wave, tsunami, storm surge, GPS ocean buoy, Coastal wave measurement system*.
- Mizuguchi, M. (1982). Individual Wave Analysis of Irregular Wave Deformation in the Nearshore Zone. *Proc. 18<sup>th</sup> Int. Conf. Coastal Engrg.*, pp 486-504.
- Postacchini, M. and Brocchini, M. (2014). A wave-by-wave analysis for the evaluation of the breaking-wave celerity. *Applied Ocean Research*, 46, 15-27.
- Sorensen, R.M. (1993). *Basic wave mechanics for coastal and ocean engineers*.
- Stansell, P., Wolfram, J. and Linfoot, B. (2002). Effect of sampling rate on wave height statistics. *Ocean Engineering*, 29, 1023-1047.
- Tayfun, A. (1993). Sampling-rate errors in statistics of wave heights and periods. *J. of Waterway, Port, Coast, and Ocean Engineering*, 119(2), 172-192.
- MathWorks (2017). <https://kr.mathworks.com> (in Korean).
- Zheng, G., Cong, P. and Pei, Y. (2006). On the improvements to the wave statistics of narrow-banded waves when applied to broad-banded waves. *J. of Geophysical Research*, 111(C11016), DOI:10.1029/2005JC003106.

Received 10 October, 2017

Revised 18 October, 2017

Accepted 18 October, 2017