

# KMA와 ECMWF 자료를 이용한 연안 유의파고의 분포 및 추세분석 Distribution and Trend Analysis of the Significant Wave Heights Using KMA and ECMWF Data Sets in the Coastal Seas, Korea

고동휘\* · 정신태\*\* · 조홍연\*\*\* · 서경식\*\*\*\*

Dong Hui Ko\*, Shin Taek Jeong\*\*, Hong Yeon Cho\*\*\* and Kyoung Sik Seo\*\*\*\*

**요 지 :** 연안의 파랑환경은 해안지형의 변화, 해양생물의 서식조건, 해양구조물의 설계 등에 직접적인 영향을 미치는 매우 중요한 인자이다. 최근 기후변화로 인한 파랑환경의 변화도 예상되고 있는 상황에서, 가용한 자료를 이용한 파랑환경의 추세분석이 요구된다. 본 연구에서는 한국 연안 6개 지점(덕적도, 외연도, 칠발도, 마라도, 포항, 울릉도) 평상파랑의 부이관측 자료를 이용하여 장기 변화양상을 분석하였다. 먼저, 국내 기상청 해양기상부이 관측 자료의 이상치를 제거하기 위해 Rosner 방법을 사용하였으며, 이를 ECMWF 재해석 자료와 피어슨 상관분석을 수행하였다. 그 결과, 해양기상부이와 ECMWF 자료간의 상관성은 0.849~0.938로 나타났다. 한편, 맨-켄달 검정법을 이용하여 평상파랑의 장기변동 양상을 검토하였으며 그 결과, 덕적도, 외연도, 칠발도 지점은 변동이 없는 것으로 나타났다지만, 마라도, 포항, 울릉도 지점은 증가하는 경향을 보였다.

**핵심용어 :** 평상파랑, 해양기상부이, Rosner 방법, ECMWF, 피어슨 상관분석, 맨-켄달 검정법

**Abstract :** The coastal wave environment is a very important factor that directly affects the change of coastal topography, the habitat of marine life, and the design of offshore structures. In recent years, changes in the wave environment due to climate change are expected, and a trend analysis of the wave environment using available data sets is required. In this paper, significant wave heights which are measured at six ocean buoys (Deokjeokdo, Oeyeondo, Chibaldo, Marado, Pohang, Ullengdo) have been used to analyze long-term trend of normal waves. In advance, the outlier of measured data by Korea Meteorological Administration have been removed using Rosner test. And Pearson correlation analysis between the measured data and ECMWF reanalysis data has been conducted. As a results, correlation coefficient between two data were 0.849~0.938. Meanwhile, Mann-Kendall test has been used to analyze the long-term trend of normal waves. As a results, it was found that there were no trend at Deokjeokdo, Oeyeondo and Chibaldo. However, Marado, Pohang and Ullengdo showed an increasing tendency.

**Keywords :** normal waves, floating ocean buoy, Rosner test, ECMWF, Pearson correlation analysis, Mann-Kendall test

## 1. 서 론

파랑은 조석과 더불어 해저지형, 생물 서식환경, 항만 및 해양구조물 설계, 해양에너지 개발 등에 직접적으로 영향을 미치는 대표적인 해양물리 환경이다. 그러나 최근 지구온난화의 영향으로 수온과 해수면이 상승하고 있으며 이상파고의 출현도 잦아지고 있다. 이러한 변화는 인명 및 재산피해를 초래하고 해상활동에도 큰 악영향을 미치고 있다. 따라서 이 변화양상을 분석하고 예측할 수 있다면 해양환경 변화에 능동적으로 대처할 수 있으며 해양공간 활용 계획 수립에도 유용

하게 사용될 수 있다.

파랑은 외력으로 작용하게 되며 크게 이상파랑과 평상파랑으로 구분할 수 있다. 이상파랑(extreme wave)은 재현주기 동안에 출현할 수 있는 극치파랑을 의미하고 이에 반해 평상파랑(normal wave)은 해상에서 발생하는 일반적인 파랑으로서 항만가동물 산정에 사용되고 있다. 이러한 평상파랑은 구조물의 설계 및 유지 관리에도 활용되고 있어 중요하다.

한편, 항만 및 어항 설계 기준(MMAF, 2014)에 의하면 평상파는 “대상부두(berth)에서 하역한계를 넘는 항내 파고의 출현율을 100%에서 제외한 값이다”라고 정의하고 있으며 연중

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

\*\*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)

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

\*\*\*\*(주)헤인 E&C, 기업부설연구소(Research Institute, Hyein E&C)

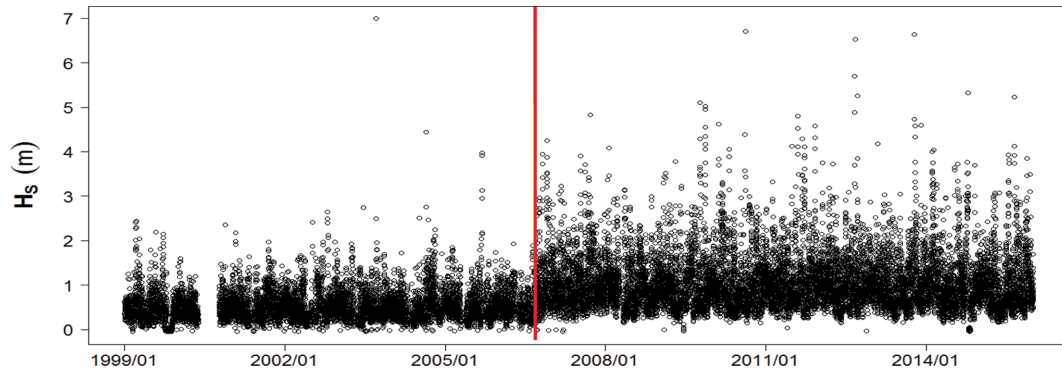


Fig. 1. Time series plot of the significant wave heights including a level shift before and after the time at vertical solid red line.

항만 가동률을 충분히 확보할 수 있도록 장기간 평상파랑의 통계적인 특성분석이 중요함을 언급하고 있다. 국내 연안의 파랑환경 자료에 대한 통계적 특성분석 연구로는 연안구조물의 설계를 위한 후측(hindcasting) 자료 생성, 평상파 산정 및 연안 파랑에너지 평가 목적(Lee et al., 1988; Ahn and Chun, 2004; Song et al., 2004; Jeong et al., 2007)으로 수행된 적이 있으나, 파랑환경의 특성 파악을 위한 연구는 장기 관측 자료의 부재로 미흡한 실정이다(Jeong et al., 2015). 장기간의 파랑관측으로 장기자료를 갖고 있는 국가에서는 다양한 통계적인 분석을 통하여 기후 변화에 대응하고 있다(Marthiesen, 1994; Sobey and Orloff, 1999; Holthuijsen, 2007; Dodet et al., 2010; Cho et al., 2012). 이처럼 국내 연안에서 발생하는 파랑 특성을 분석하고 장기 변동양상을 검토하는 것은 기후 변화 대응, 해양사고 및 재난에 대비하고 차세대 선진 해양공간을 창출하는데 매우 중요한 일이다.

따라서 본 연구에서는 중규모 유럽 기상예보센터(ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)의 37년 장기 자료를 사용하여 평상 파랑 특성분석 연구를 수행하였다. 중규모 유럽 기상예보센터의 재분석 모델링자료는 기상청 해양기상부이의 관측 자료와 비교함으로써 자료의 활용 가능성 여부를 파악하였다. 또한 장기 파랑자료의 통계적인 특성분석에 중점을 두고 기본적인 통계분석에 국한하지 않고 탐구적 자료해석의 관점에서 분석을 수행하여 뚜렷하고 기존의 분석결과에서 제시되지 않은 정량적인 장기간의 평상파랑의 통계적 특성을 파악하여 제시하였다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1 자료

#### 2.1.1 해양기상부이

한국 기상청은 1996년부터 현재까지 해양기상부이, 등표기상 관측장비를 활용하여 실해역 파랑환경 자료를 관측하고 있다. 해양기상부이는 해상에서 각종 관측센서로 해양환경을 측정하고, 측정한 값을 일정한 물리량으로 변환·처리한 후에 통신장비를 이용하여 전송하는 관측장비이다. 해양기상부이

의 관측 기본 요소로는 파고(유의, 최대, 평균), 파주기, 파향, 풍향, 풍속, 기압, 습도, 기온, 수온 등이 있다. 파고와 파주기는 해수면에서 부이의 움직이는 가속도를 측정하여 변위 자료를 산출한 후, 스펙트럼 방법에 의해 유의파고와 파주기 등을 매시간 제공한다(KMA, 2016). 그러나 기상청의 해양기상부이를 이용한 실시간 관측은 무인 운영시스템으로 자료의 품질관리를 거쳤음에도 불구하고 지역 대표성이 약하거나 신뢰성이 낮은 자료가 일부 포함되어 있고, 장비교체와 같은 인위적인 활동에 의해 기준이동(level shift) 현상이 나타나고 있다. Fig. 1은 거제도 파랑자료의 level shift 현상을 도시한 것이다.

따라서 본 연구에서 사용한 파랑환경자료는 1997년부터 2015년까지 해양기상부이의 관측 자료를 도시하여 검토하였고, 이 중 최소 4년 이상의 자료 중 기준이동(level shift) 현상이 나타나지 않은 6개 지점(덕적도, 외연도, 칠발도, 포항, 마라도, 울릉도)을 선별하였다. Fig. 2는 6개 해양기상부이의 위치도이다.

Table 1에 국내 기상청에서 운영 중인 해양기상부이의 관측 개시일, 위치 및 관측 항목 등 간략한 개요를 정리하였다.

다음 Fig. 3은 해양기상부이의 결측 구간을 도시한 것으로

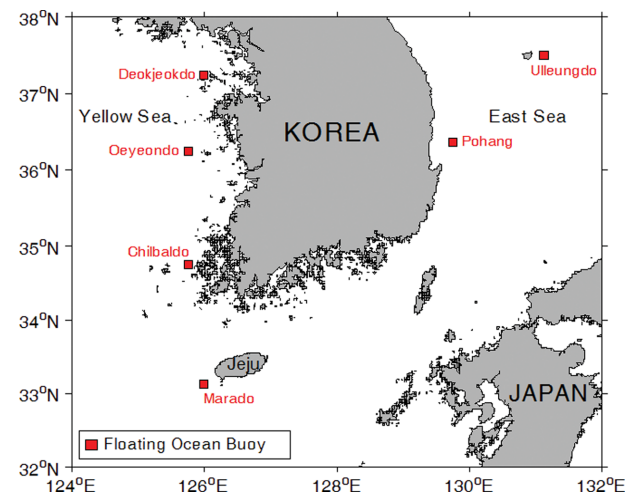
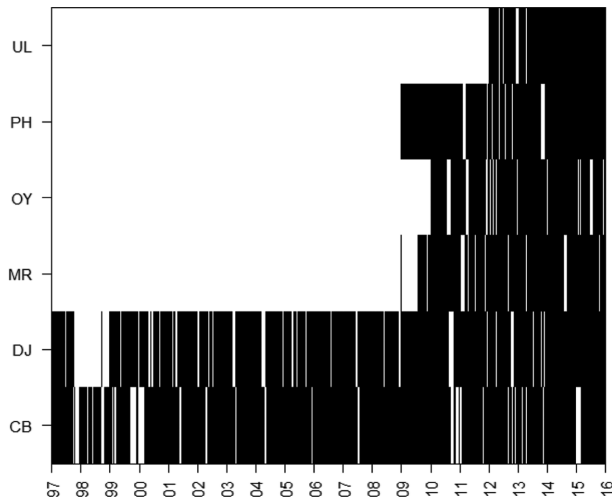


Fig. 2. Location map of KMA floating buoy.

**Table 1.** Information of floating buoy operated by KMA

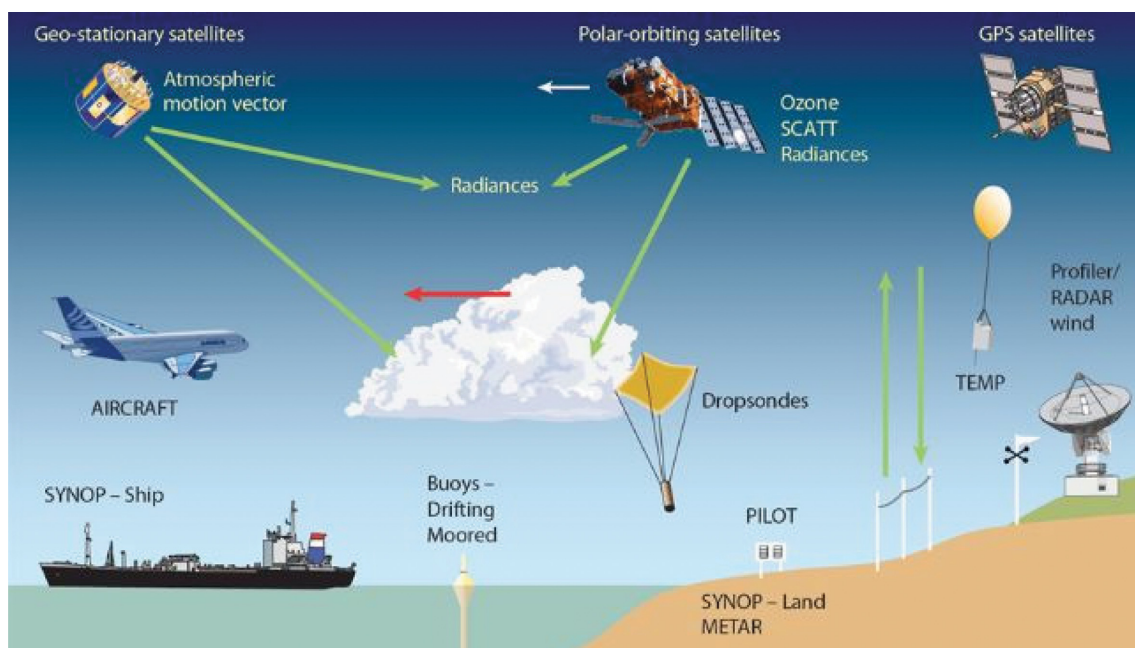
| Stations        | Measuring start date | Analyzed data period       | Location (Lat/Long)              | Observation parameters   | Monitoring interval |
|-----------------|----------------------|----------------------------|----------------------------------|--|---------------------|
| Deokjeokdo (DJ) | 1996.07              | 1997.01.01.~<br>2015.12.31 | 37° 14' 33" N/<br>126° 01' 20" E | Wave height (significant, maximum, average), wave period, wave direction, wind direction, wind speed, atmosphere, humidity, air temperature, water temperature | 1 hour              |
| Oeyeondo (OY)   | 2009.11              | 2010.01.01.~<br>2015.12.31 | 36° 15' 00" N/<br>125° 45' 00" E |  |                     |
| Chlibaldo (CB)  | 1996.07              | 1997.01.01.~<br>2015.12.31 | 34° 47' 36" N/<br>125° 46' 37" E |  |                     |
| Pohang (PH)     | 2008.11              | 2009.01.01.~<br>2015.12.31 | 36° 21' 00" N/<br>129° 47' 00" E |  |                     |
| Marado (MR)     | 2008.11              | 2009.01.01.~<br>2015.12.31 | 33° 05' 00" N/<br>126° 02' 00" E |  |                     |
| Ullengdo (UL)   | 2011.12              | 2012.01.01.~<br>2015.12.31 | 37° 27' 20" N/<br>131° 06' 52" E |  |                     |

**Fig. 3.** Missing interval of measured significant wave heights.

검정색이 관측 구간이며 빈 공간이 결측 구간을 나타낸다.

### 2.1.2 ECMWF Reanalysis

중규모 유럽 기상예보센터(ECMWF)는 지역 기상 데이터 통신 네트워크(RMDCN, the Regional Meteorological Data Communication Network)를 이용하여 수치 기상 예측과 기후변화 및 환경 연구에 이르기까지 다양한 연구를 수행 중에 있다. 특히 인공위성 관측의 해석에 주도적인 역할을 수행 중이며, SYNOP-Ship, Buoy-Drifting Moored, AIRCRAFT, Geo-stationary satellites, GPS satellites 등의 관측 방법을 사용 중에 있다(Fig. 4 참조). 또한, 50개 이상의 센서를 이용하여 대기, 해양 및 육지의 관측 정보를 생성하고 이를 수치예보모델에 활용하고 있다(ECMWF, 2016; Berrisford et al., 2011).

**Fig. 4.** Information of ECMWF observation system (ECMWF, 2016).

본 연구에서는 ECMWF ERA-Interim의 1979년~2015년 까지 37년 동안의 6시간 재분석 자료를 사용하였으며 해상도는 0.125°이다. 또한 ECMWF의 해양자료는 해양 수치모델인 NEMO와 NEMOVAR을 기반으로 운영되고 있으며, ECMWF 공공데이터 집합 웹 인터페이스 또는 MARS를 통해 제공되고 있다.

## 2.2 파랑자료의 통계적 특성 분석 방법

설계파 및 정상파에 대한 특성을 검토하기 위해서는 최소 10년 이상의 파랑정보가 필요하다. 그러나 국내 해양 관측 자료 중 10년 이상의 장기자료는 극히 드물며 이 자료는 관측 지점 인근해역의 특성정도를 검토할 수 있을 뿐 넓은 영역의 해역특성을 전부 포함하지 못한다. 따라서 본 연구에서는 ECMWF 자료의 신뢰성을 검증하기 위해 피어슨 상관분석(Pearson correlation coefficient)방법을 사용해 두 자료간의 상관관계를 분석하였다. 또한 최적분포함수 및 매개변수 추정을 위해 Log-normal, Weibull, GEV(Generalized Extreme Value) 분포를 사용하였으며, 변동양상을 추정하기 위해서 월 평균자료는 계절 맨-켄달(Seasonal Mann Kendall)검정법과 단순선형회귀분석을, 연평균자료에 대해서는 맨-켄달 검정법과 선형회귀분석을 수행하였다.

### 2.2.1 이상치(Outlier) 제거

통계 모수는 센서 오작동 및 데이터 취득 과정 등 다양한 원인으로 이상치(Outlier, abnormal data)를 포함하게 된다. 이러한 이상치는 통계적인 추론 및 검정 결과를 왜곡시키는 주요 인이기 때문에 이상 자료에 저항할 수 있는 강한 통계모수 추정방법이 필요하다(Barnett and Lewis, 1994; Cho et al., 2016). 본 연구에서는 다수의 이상치를 진단하는 Rosner 검정 방법(Rosner, 1983)을 선정하였으며, 가능한 이상치의 개수는 전체 자료의 1/2 이하로 간주하였다. Rosner 검정 방법은 이상치의 개수를 지정하지 않고, 이상치 개수의 상한 범위를 지정하여 이 범위에서 이상치 여부를 판단한다. Rosner 방법을 이용한 이상자료 검정은 R ‘EnvStats’ 패키지의 ‘rosnerTest’ 함수를 이용하여 간단하게 추정할 수 있다(Millard, 2013; R Core Team, 2015). 이 기법을 이용한 이상자료 진단은 Cho et al.(2016)이 부산연안의 환경자료에 적용-수행된 바 있으며, 자세한 진단과정이 제시되어 있다.

### 2.2.2 피어슨 상관분석(Pearson correlation analysis)

파랑 특성 분석을 위해서는 10년 이상의 품질이 확보된 파랑 정보가 필요하다. 그러나 10년 이상의 국내 해양관측자료는 많지 않아 대부분 장기 모델링 자료를 활용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 ECMWF 장기 모델링 자료의 신뢰도를 검증하기 위해 해양기상부이와 피어슨 상관분석을 수행하였다. 피어슨 상관계수는 아래 식(1)에 의해 계산되며 두 데이터간의 상관 정도를 0~1 혹은 0~-1의 척도상에서 기술해주

는 통계치이다(Ang and Tang, 2007).

$$\rho_{X,Y} = \text{corr}(X, Y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (1)$$

여기서,  $\mu_X, \mu_Y = X, Y$ 의 평균,  $\sigma_X, \sigma_Y = X, Y$ 의 표준편차,  $\text{cov}(X, Y)$ 는  $X, Y$ 의 공분산(covariance)이다.

### 2.2.3 최적 분포 함수 및 매개변수 추정

본 연구에서는 장기간의 평상파랑의 최적분포함수 및 매개변수 추정을 위해 Log-normal, Weibull, GEV 분포를 사용하였다.

#### 1) Log-normal 분포

기존에 수문자료 해석에 널리 사용되고 있는 3개의 매개변수를 갖는 Log-normal 분포의 확률밀도함수는 다음 식(2)와 같이 주어진다.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2}(x - x_0)\beta_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln(x - x_0) - \alpha_y}{\beta_y}\right]^2\right], x_0 < x < \infty \quad (2)$$

여기서,  $Y = \ln(X - x_0)$ 이고,  $\alpha_y$ 와  $\beta_y$ 는 확률변수  $Y$ 의 평균 및 표준편차로 각각 규모 매개변수 및 형상 매개변수이며,  $x_0$ 는 위치 매개변수이다(Crow and Shimizu, 1988). 따라서  $Y$ 는 2개의 매개변수를 갖는 정규분포가 된다.

#### 2) Weibull 분포

Weibull 분포는 처음에 재료의 안전성과 수명시험을 모형화하기 위해 제안되었으나(Weibull, 1939, 1951) 지역홍수빈도해석에도 이용되기도 하였으며(Boes et al., 1989; Heo et al., 1990) 3변수 Weibull 분포는 GEV-3 분포와 밀접한 관계를 갖고 있다(NERC, 1975). 3개의 매개변수를 갖는 Weibull 분포의 확률밀도함수는 다음의 식(3)과 같이 주어진다(Johnson and Kotz, 1970).

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left[\frac{x - x_0}{\alpha}\right]^{\beta-1} \exp\left[-\left[\frac{x - x_0}{\alpha}\right]^\beta\right], x_0 \leq x < \infty \quad (3)$$

여기서,  $\alpha > 0$ 은 규모 매개변수,  $\beta > 0$ 은 형상 매개변수,  $x_0$ 는 위치 매개변수이며, 3변수 Weibull 분포는  $\beta = 1$ 이면 지수 분포(exponential distribution)가 된다. 또한,  $x_0 = 0$ 인 경우 2변수 Weibull 분포가 된다.

#### 3) GEV(Generalized Extreme Value) 분포

홍수나 가뭄같은 수문사상의 빈도해석에 많이 사용되는 분포함수로서 형상 매개변수  $\beta$ 에 따라 3가지 형태로 구분될 수 있는데, 누가분포함수와 확률밀도함수는 다음의 식(4)와 식(5)와 같이 주어진다(NERC, 1975).

$$F(x) = \exp\left[-\left(1 - \frac{\beta(x - x_0)}{\alpha}\right)^{(1/\beta)}\right] \quad (4)$$

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[1 - \frac{\beta(x - x_0)}{\alpha}\right]^{(1/\beta)} \times F(x) \quad (5)$$

여기서,  $\alpha$ 는 규모 매개변수,  $\beta$ 는 형상 매개변수,  $x_0$ 는 위치 매개변수로  $\beta$ 가 음수이면 하한경계치를 갖는 GEV-2 분포이고(Frechet 분포 또는 Log-Gumbel 분포라고도 함),  $\beta$ 가 양수이면 상한경계치를 갖는 GEV-3 분포(Weibull 분포라고도 함)이며,  $\beta$ 가 0이면 GEV-1(Gumbel) 분포가 된다. 본 연구에서는 각 확률분포형의 매개변수를 추정하기 위해 최우도법(the maximum likelihood estimation method)을 이용하였으며 각 확률분포형의 평균제곱근오차(RMSE: Root Mean Square Error)를 구하여 최솟값을 갖는 분포를 최적 분포 함수로 선정 하였다.

#### 2.2.4 계절 맨-켄달 검정법(Seasonal Mann-Kendall Test)

시계열 자료의 경향성을 판단하는 통계학적 방법들은 크게 비매개변수적(non-parametric)방법과 매개변수적(parametric) 방법으로 나눌 수 있다. 매개변수적 방법은 매개변수에 대한 추론을 할 때 모집단 분포(distribution)에 대한 가정을 포함하는 것이고, 반대로 모집단 분포에 대한 가정을 하지 않고 분석하는 검정을 비매개변수적 방법이라고 한다. 비매개변수적 경향성 검정 기법은 순위(rank)에 기반한 검정과 더불어, 모든 자료간의 관계를 종합적으로 분석할 수 있기 때문에 관측

시계열에서 종종 나타나는 결측 값이나 계절성 등을 유연하게 고려할 수 있으며, 매개변수적 경향성 검정에 비해 많이 이용된다(Hirsch and Slack, 1984). 비매개변수적 경향성 검정에 널리 이용되는 분석방법으로는 맨-켄달 검정법으로 시계열 자료의 단조 경향(monotonic trend)을 분석하는데 유용하게 사용되어지고 있다. 맨-켄달 검정법의 귀무가설(null hypothesis)은 분석 대상 시계열에 경향성이 존재하지 않는다는 것이다(Mann, 1945). 본 연구에서는 자료의 연평균 값을 이용하여 95% 신뢰수준으로 변동양상을 분석하였다.

### 3. 분석 결과

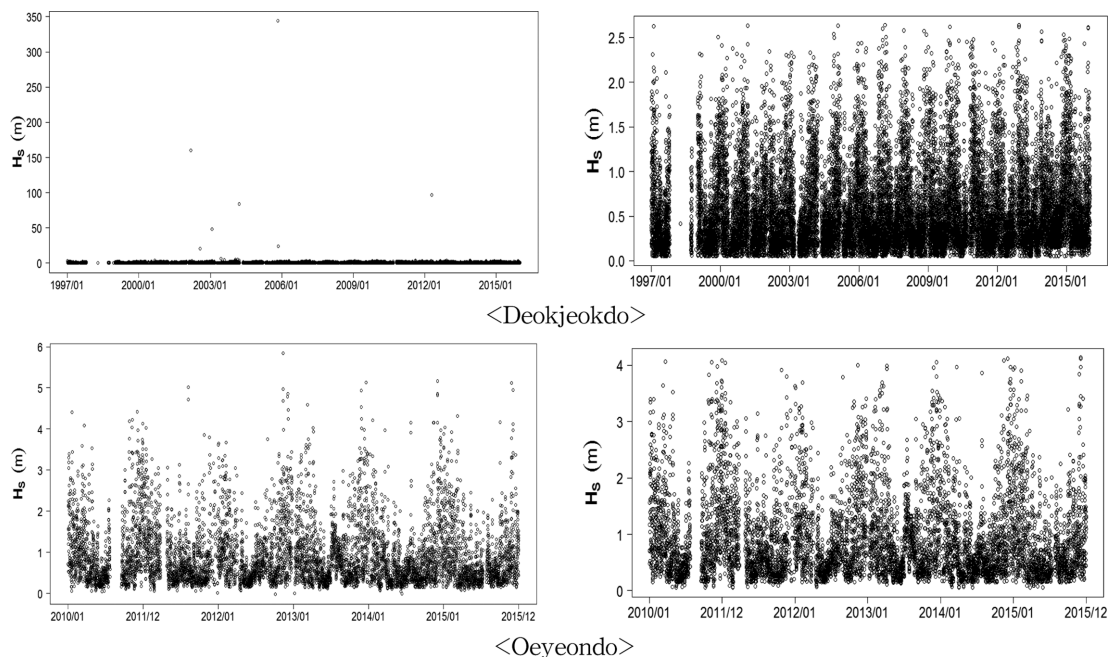
#### 3.1 피어슨 상관분석 결과

6개 지점의 관측자료와 ECMWF 모델링 유의파고 자료의 상관분석을 수행하여 자료의 신뢰도를 평가하였다. ECMWF 수치모델링 자료 격자와 해양기상부이 관측지점 간에는 위치 차이가 발생하고 있어 이에 대한 영향을 배제할 수는 없다. 한편, 다음 Table 2는 6개 지점의 비교분석기간과 총 자료수, 결측 자료수, 결측률을 정리하였다.

ECMWF 자료의 경우, 이미 모델과정에서 품질검정을 거

**Table 2.** Introduction of measured data specification at six stations

| Station    | Compared data period | The No. of measured data | The No. of outlier data | Outlier rate (%) |
|------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|------------------|
| Deokjeokdo | 1997.01~2015.12      | 23,460                   | 322                     | 1.37             |
| Oeyeondo   | 2010.01~2015.12      | 7,875                    | 32                      | 0.41             |
| Chlibaldo  | 1997.01~2015.12      | 24,745                   | 140                     | 0.57             |
| Marado     | 2009.01~2015.12      | 8,623                    | 34                      | 0.39             |
| Pohang     | 2009.01~2015.12      | 9,595                    | 26                      | 0.27             |
| Ullengdo   | 2012.01~2015.12      | 5,628                    | 21                      | 0.37             |



**Fig. 5.** Before and after elimination of outlier data on significant wave height at six stations.

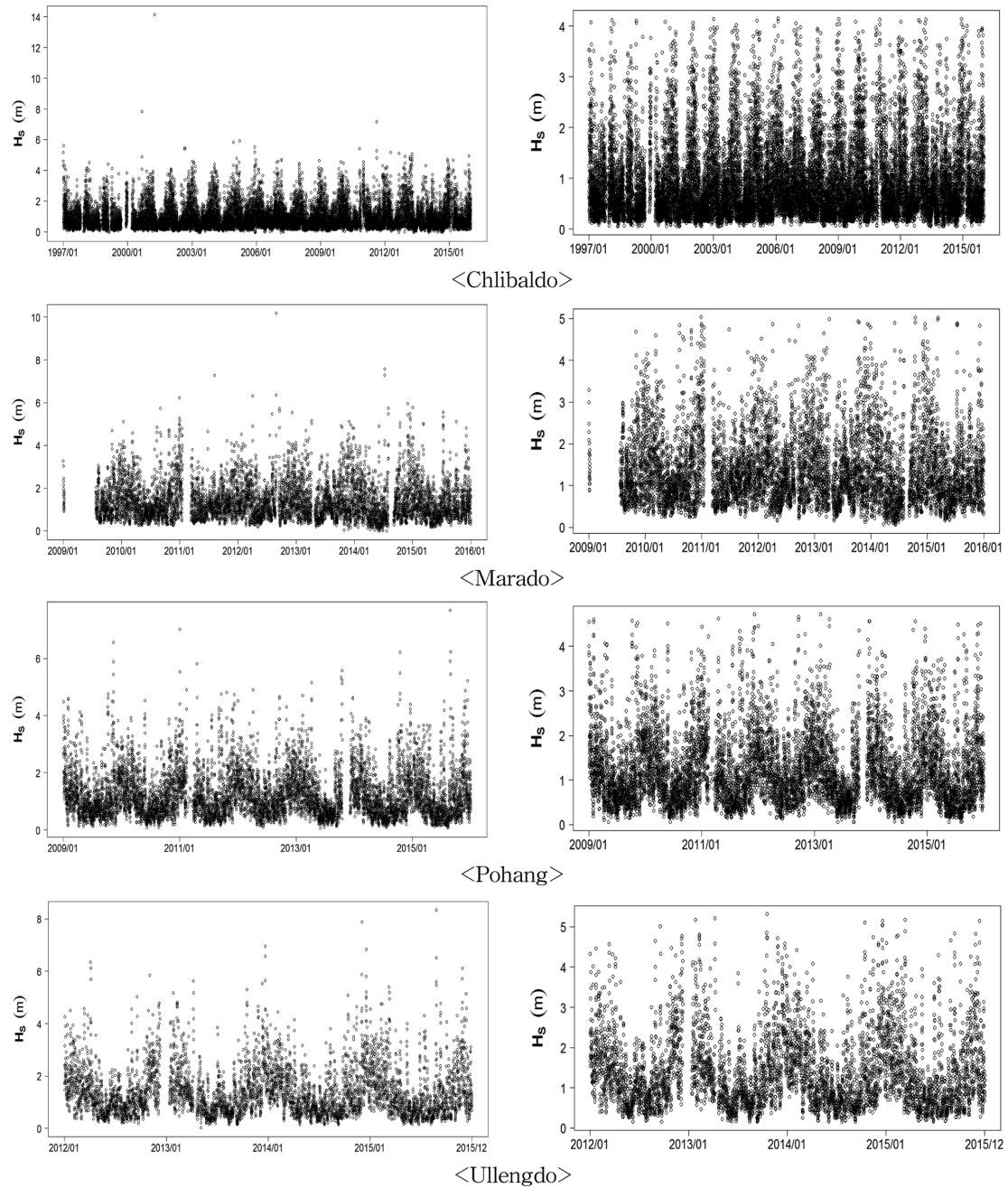


Fig. 5. Continued.

쳐 양질의 자료가 확보된 반면, 관측자료들은 이상치를 포함하고 있어 상관계수 추정에 많은 오차를 수반할 수 있다. 따

Table 3. The results of correlation analysis

| Station    | Correlation of coefficient | 95% confidence interval |       |
|------------|----------------------------|-------------------------|-------|
|            |                            | Lower                   | Upper |
| Deokjeokdo | 0.849                      | 0.845                   | 0.853 |
| Oeyeondo   | 0.938                      | 0.935                   | 0.940 |
| Chlibaldo  | 0.891                      | 0.888                   | 0.893 |
| Marado     | 0.936                      | 0.933                   | 0.938 |
| Pohang     | 0.865                      | 0.860                   | 0.870 |
| Ullengdo   | 0.927                      | 0.923                   | 0.930 |

라서 본 연구에서는 관측자료의 품질을 향상시키기 위해 Rosner 검정 방법을 이용하여 이상치를 제거하였다.

다음 Fig. 5는 각 지점별 이상치 제거 전과 후의 자료들을 도시화한 것이다.

다음 Table 3은 6개 지점의 상관분석 결과이다. 대체로 마라도와 울릉도, 외연도와 같이 개방형 해역에서는 0.9 이상의 높은 상관계수를 보이고 있지만 덕적도, 칠발도, 포항은 상대적으로 낮은 상관계수를 보이고 있었다. 그러나 대체로 선형관계를 보이는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 장기 모델링 자료를 활용한 평상파랑의 장기변동성을 살펴보기 위해 ECMWF와 단기 해양기상부이와



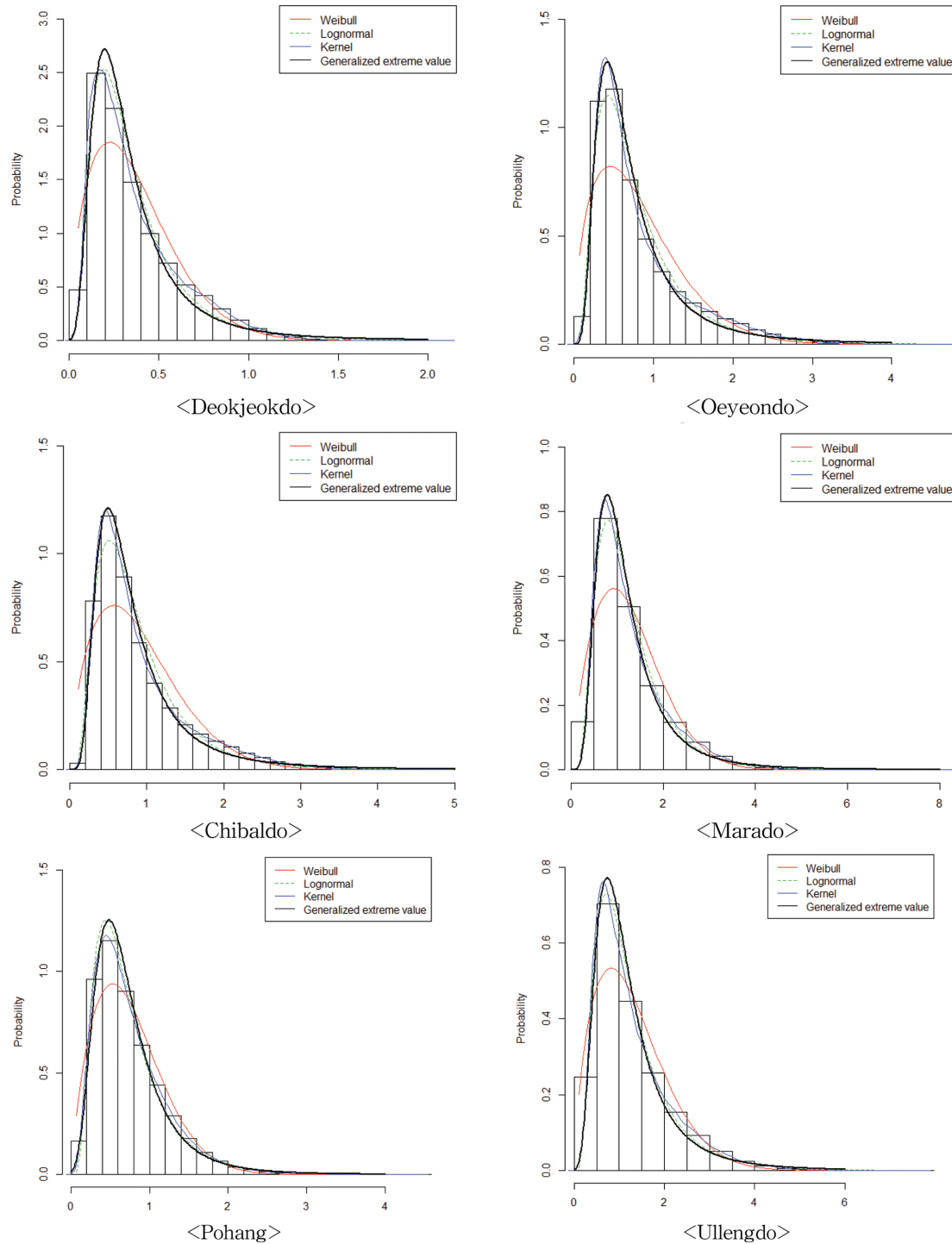


Fig. 6. Histogram and theoretical densities of signigicant wave heights.

의 상관관계를 분석하였다. 그 결과, 두 자료간의 완전한 선형관계는 보이지 않지만 자료의 상관성은 높을 것으로 판단 되었으며 본 연구에서는 ECMWF의 장기자료를 사용하여 변동 양상 분석을 수행하였다.

### 3.2 최적 분포 함수 및 매개변수 추정 결과

본 연구에서는 ECMWF 장기 유의파자료의 최적분포함수를 추정하기 위해 Log-normal, Weibull, GEV 분포함수를 적

합하였으며 각 분포형의 매개변수를 최우도법을 이용하여 추정하였다. 또한 적합도 검정을 위해 RMSE를 산정하여 최적 분포함수를 추정하였다.

Fig. 6은 장기자료의 히스토그램과 Log-normal, Weibull, GEV 분포함수를 적합한 결과이다.

ECMWF 유의파고 자료의 분포함수 추정결과, 덕적도, 포항, 울릉도는 Log-normal 분포형에 보다 적합한 것으로 나타났다 외연도, 칠발도, 마라도는 GEV 분포함수에 보다 적합

**Table 4.** The results of estimated parameters and RMSE

| Distribution | Parameters         | Deokjeokdo | Oeyeondo | Chlibaldo | Marado | Pohang | Ullengdo |
|--------------|--------------------|------------|----------|-----------|--------|--------|----------|
| Weibull      | $\beta$ (shape)    | 1.603      | 1.521    | 1.637     | 1.811  | 1.771  | 1.648    |
|              | $\alpha$ (scale)   | 0.412      | 0.913    | 1.010     | 1.437  | 0.850  | 1.445    |
|              | RMSE               | 0.255      | 0.169    | 0.132     | 0.079  | 0.111  | 0.102    |
| Log-normal   | $\alpha_y$ (scale) | -1.216     | -0.429   | -0.301    | 0.082  | -0.459 | 0.052    |
|              | $\beta_y$ (shape)  | 0.659      | 0.664    | 0.612     | 0.554  | 0.603  | 0.633    |
|              | RMSE               | 0.095      | 0.093    | 0.050     | 0.027  | 0.044  | 0.069    |
| GEV          | $x_0$ (location)   | 0.234      | 0.504    | 0.595     | 0.883  | 0.527  | 0.847    |
|              | $\alpha$ (scale)   | 0.142      | 0.300    | 0.319     | 0.445  | 0.297  | 0.493    |
|              | $\beta$ (shape)    | 0.314      | 0.371    | 0.321     | 0.252  | 0.161  | 0.267    |
|              | RMSE               | 0.109      | 0.075    | 0.037     | 0.023  | 0.053  | 0.073    |

한 것으로 나타났다. 한편, 각 분포형별 추정된 매개변수 값은 다음 Table 4에 정리하였다.

### 3.4 유의파고 변동양상 분석

본 연구에서는 각 지점별 장기 유의파고의 변동양상 분석을 위해 월평균 유의파고 값을 이용하여 맨-켄달 검정과 선

형회귀분석을 수행하였다. Fig. 7은 선형회귀분석을 이용한 장기 유의파고 자료의 변동 양상을 나타낸 것으로, 원형 심볼(circle symbol)은 월평균 유의파고의 수치이며, 이를 연결하여 도시하였다.

한편, Table 5는 6개 지점 관측 유의파고의 변동 양상 분석 결과이다. 맨-켄달 검정법에서는 유의수준  $p$  값이 통계 유

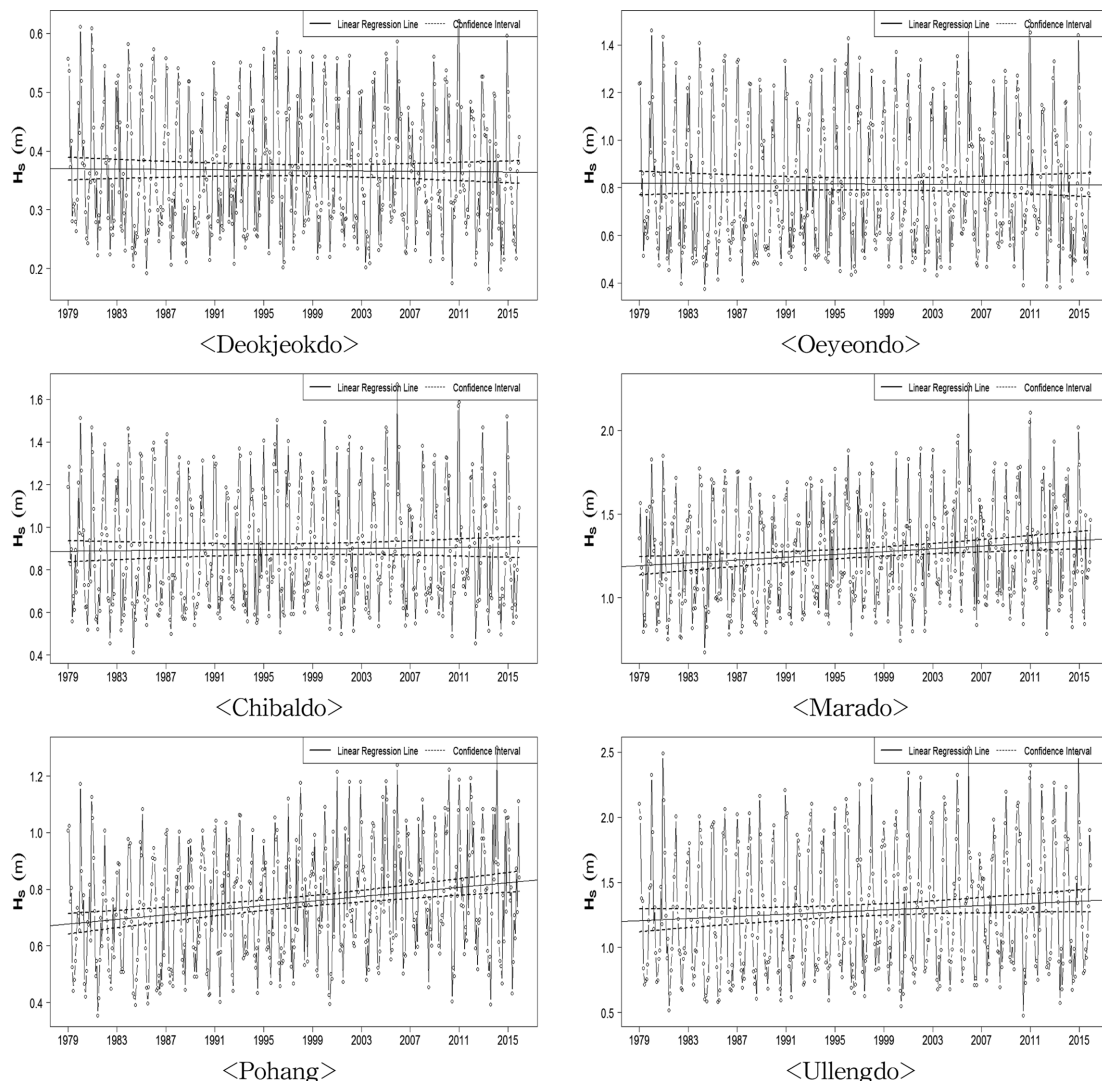
**Fig. 7.** Long-term trend analysis of monthly averaged significant wave height.



Table 5. The results of long-term trend analysis

| Station    | Significant wave height |         |                            |                                   |
|------------|-------------------------|---------|----------------------------|-----------------------------------|
|            | Mann-Kendall test       |         | Linear regression analysis |                                   |
|            | z-Value                 | p-Value | Gradient                   | Confidence interval (lower/upper) |
| Deokjeokdo | -0.193                  | 0.85    | -0.00001                   | -0.0001/0.0001                    |
| Oeyeondo   | 0.140                   | 0.89    | -0.00002                   | -0.0002/0.0002                    |
| Chlibaldo  | 1.590                   | 0.11    | 0.00004                    | -0.0002/0.0002                    |
| Marado     | 5.690                   | 0.00    | 0.00035                    | 0.0001/0.0006                     |
| Pohang     | 7.834                   | 0.00    | 0.00034                    | 0.0002/0.0005                     |
| Ullengdo   | 5.743                   | 0.00    | 0.00035                    | 0.000004/0.0007                   |

의수준 5% 보다 작으면 경향성이 있다고 판단할 수 있으며 본 연구에서는 95% 신뢰수준에서 변동양상을 분석하였다.

덕적도 지점의 경우, 자료 검정에 대한 유의수준,  $p$ -value 가 0.85로 산정되었으며, 통계 유의수준인 0.05 보다 크게 나타나 월 평균 변동 양상이 보이지 않았다. 또한 선형회귀분석 결과도 기울기에 대한 신뢰구간에 zero(영)를 포함하고 있으며, 따라서 귀무가설을 기각할 수 없어 통계적인 유의수준으로 볼 때 변동 양상이 보이지 않는다고 판단하였다(Fig. 6 참조).

외연도와 칠발도도 마찬가지로, 월 평균 유의파고 값을 이용하여 맨-켄달 검정을 하였을 때 자료 검정에 대한 유의수준이 각각 0.89와 0.11로서 통계유의수준보다 크게 나타나 변동 양상이 보이지 않는 것을 확인하였다. 또한 선형회귀분석의 결과도 기울기가 -0.00002와 0.00004 값을 각각 보였지만 이에 대한 신뢰구간이 -0.0002~0.0002로서 본 연구에서 설정한 귀무가설을 기각할 수 없어 변동 양상이 거의 없는 것으로 나타났다(Table 5 참조).

이에 반해 마라도 지점의 경우, 맨-켄달 검정을 하였을 때 자료 검정에 대한 유의수준이 0.05 보다 작게 나타났으며, 검정통계량이 0.5690으로 통계적인 유의수준으로 보았을 때 양의 증가 양상을 보였다. 선형회귀분석에서는 기울기에 대한 신뢰구간이 0.0001~0.0006으로 귀무가설 내용인 기울기 0을 포함하지 않아 변동성이 없다는 귀무가설을 기각하였으며 0.00035의 기울기 값이 산정되어 장기적으로 증가하는 것으로 나타났다.

포항지점은 월 평균 유의파고의 자료 검정에 대한 유의수준값이 거의 0으로 0.05 보다 작게 나타났으며, 검정통계량이 7.384로 증가 양상이 보였다. 선형회귀분석 결과도 기울기 값이 0.00034로 마라도 지점과 마찬가지로 유의파고의 증가 양상이 있는 것으로 나타났다.

마지막으로 울릉도 지점의 경우, 맨-켄달 검정의 자료 검정에 대한 유의수준이 0으로 통계 유의수준인 0.05 보다 작게 나타났으며, 검정통계량도 5.743으로 양수의 값을 보여 증가 양상이 있는 것으로 나타났다. 선형회귀분석 결과에서는 기울기값이 0.00035이며, 신뢰수준도 상한값이 0.0007, 하한값이 0.000004로 귀무가설을 기각하였으며 장기적으로 양의 증가추세를 보였다(Fig. 7과 Table 5 참조).

#### 4. 결론 및 토의

본 연구에서는 한국 연안 평상파랑의 통계적 특성을 검토하고, 맨-켄달검정과 선형회귀분석을 수행하여 장기 변동양상을 검토하였다. 분석 대상지점은 덕적도, 외연도, 칠발도, 마라도, 포항, 울릉도 총 6개 지점이며 37년 장기간의 ECMWF 재해석 유의파고자료를 사용하였다. 분석 절차로는 먼저 관측자료의 이상치를 제거하고 이를 다시 ECMWF 모델링 자료와 상관관계를 분석하였으며, 최적 분포함수와 매개변수를 추정하였다. 그다음 마지막으로 ECMWF 자료를 이용하여 맨-켄달검정과 선형회귀분석을 수행하여 장기 변동 양상을 살펴 보았다. 이러한 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 열악한 해양환경에서의 관측은 다양한 원인에 의해 오차를 수반하게 되며, 이러한 오차는 자료를 왜곡하게 된다. 따라서 본 연구에서는 이상치를 제거하기 위해 R 패키지의 Rosner Test 방법을 적용하였다. 그 결과 덕적도 지점의 이상치 비율이 1.37%로 감지되었으며 나머지 지점은 약 0.5%의 비율로 이상치를 포함하고 있었다(Table 2 참조).

(2) 국내 해양기상부이의 경우, 관측기간이 그리 길지 않아 장기변동특성에 활용하기에는 부적절하다. 또한 장비의 교체 등으로 자료에 level shift 현상이 일어나 신뢰도에 많은 의구심이 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 장기자료 확보가 가능한 ECMWF 재해석 자료를 사용하기 위해 관측자료와의 피어슨 상관분석을 수행하였다. 그 결과, 외연도, 마라도 울릉도의 상관계수가 각각 0.938, 0.936, 0.927로 높게 나타났다. 덕적도 지점이 0.849로 가장 낮은 상관성을 보이고 있었다. 그러나 대체로 높은 상관성을 띄는 것으로 판단하였으며, 변동성 검토를 위해 사용하기에는 큰 무리가 없을 것으로 판단되었다(Table 3 참조).

(3) ECMWF 재해석 유의파고 자료를 이용하여 최적분포함수 및 매개변수를 추정하였다. 분포함수로는 Log-normal, Weibull, GEV 분포를 이용하였으며 매개변수 추정방법으로는 최우도 법을 사용하였다. 또한 RMSE를 산정하여 최적분포함수를 추정하였다. 그 결과 덕적도, 포항, 울릉도는 Log-normal 분포에 적합한 것으로 나타났으며 반면, 외연도, 칠발도, 마라도 해역은 GEV 분포가 적합한 것으로 추정되었다.

(4) 본 연구에서는 최근 지구온난화와 해양공간개발로 인

한 해양환경의 변화 및 파랑 변동 특성을 검토하기 위해 맨-캔달 검정법과 선형회귀분석을 수행하였다. 귀무가설(null hypothesis)로는 경향성이 존재하지 않는 것으로 설정하여 분석을 수행하였다. 그 결과, 덕적도, 외연도, 칠발도 지점은 장기변동성이 없는 것으로 나타났으며 반면, 마라도, 포항, 울릉도 지점은 기술키가 0.00035, 0.00034, 0.00035로 각각 산정되어 양의 증가형태를 보이는 것으로 나타났다.

(5) 본 연구에서는 ECMWF 재해석 자료를 이용하여 국내 연안 유의파고의 특성을 검토하였다. 추후에는 장기 현장 관측 자료와 해양기상자료를 결합하여 분석이 수행되어야 할 것으로 판단되며 이를 통해 관측 자료의 품질검증 및 국내 파랑 특성 보고가 가능할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 논문은 2016학년도 원광대학교의 교비 지원에 의해서 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

## References

- Ang, A.H.-S. and Tang, W. H. (2007). Probability concepts in engineering : Emphasis on applications to civil and environmental engineering-2nd edition, Wiley.
- Ahn, K. and Chun, J.H. (2004). A methodology of estimating design waves for the operable harbor condition using long-term wave data. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 16(3), 178-189 (in Korean).
- Barnett, V. and Lewis, T. (1994). Outliers in statistical data. John Wiley Sons, 584.
- Boes, D.C., Heo, J.-H. and Salas, J.D. (1989). Regional quantile estimation for a Weibull model. *Water Resources Research*, 25(5), 979-990.
- Berrisford, P., Dee, D., Poli, P., Brugge, R. and Fielding, K. (2011). ERA report series; The ERA-Interim archive, Version 2.0. ECMWF.
- Cho, H., Jeong, W., Baek, W. and Kim, S. (2012). Analysis of the variation pattern of the wave climate in the Sokcho coastal zone. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 24(2), 120-127 (in Korean).
- Cho, H.-Y., Lee, K.-S. and Ahn, S.-M. (2016). Impact of outliers on the statistical measures of the environmental monitoring data in Busan coastal sea. *Ocean and Polar Research*, 38(2), 149-159 (in Korean).
- Crow, E.L. and Shimizu, K. (1988). Lognormal distributions, Marcel Dekker, Inc., New York.
- Dodet, G., Bertin, X. and Taborda, R. (2010). Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades. *Ocean Modelling*, 31, 120-131.
- ECMWF (2016). <http://www.ecmwf.int/>. European centre for medium-range weather forecasts.
- Heo, J.-H., Boes, D.C. and Salas, J.D. (1990). Regional flood frequency modeling and estimation, Water Resources papers No. 101, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Hirsch, R.M. and Slack, J.R. (1984). A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water Resources Research*, 20(6), 727-732.
- Holthuijsen, L.H. (2007). Waves in oceanic and coastal waters. Cambridge Univ. Press.
- Johnson, N.L. and Kotz, S. (1970). Continuous univariate distributions: distributions in statistics. Houghton Mifflin.
- Jeong, W.M., Oh, S.-H., Lee, D.-S. and Lee, D.Y. (2007). Comparison of wave power resources in the coastal zone of the Korean east sea estimated by using field measurement wave data. *New & Renewable Energy*, 3(3), 28-35 (in Korean).
- Jeong, W.M., Ryu, K.-H. and Cho, H. (2015). Long-term wave monitoring and analysis off the coast of Sokcho. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 27(4), 274-279 (in Korean).
- KMA (2016). <http://www.kma.go.kr>.
- Lee, D.-S., Ahn, H.-D., Chae, J.-W. and Lee, K.-S. (1988). Characteristics of wave energy distribution in coastal waters off Hupo, Korea. *Ocean Research*, 10(2), 43-49 (in Korean).
- Mann, H.B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245-259.
- Marthiesen, M. (1994). Estimation of wave height duration statistics. *Coastal Engineering*, 23, 167-181.
- MMAF (2014). Harbor and fishery design criteria. Ministry of Maritime Affairs and Fisheries (in Korean).
- Millard, S.P. (2013). EnvStats: an R package for environmental statistics. Springer, New York, 291.
- National Environment Research Council (1975). Flood studies report, Volume No.1 Hydrological Studies, Whitefriars Press Ltd., London.
- R Core Team (2015). R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://cloud.r-project.org/index.html>.
- Rosner, B. (1983). Percentage points for a generalized ESD many-outlier procedure. *Technometrics*, 25(2), 165-172.
- Sobey, R.J. and Orloff, L.S. (1999). Intensity duration - frequency summaries for wave climate. *Coastal Engineering*, 36, 37-58.
- Song, M., Kim, D., Kim, M., Hong, K. and Jun K. (2004). Analysis of wave energy density for Korean coastal sea area based on long-term simulated wave data. *Journal of the Korean Society*, 7(3), 157-157 (in Korean).
- Weibull, W. (1939). A statistical theory of the strength of material, Ingeniors Vetenskaps Akademiens Handigar, No. 151, Stockholm, Sweden.
- Weibull, W. (1951). Statistical distribution function of wide application, *Jour. Appl. Mech.*, ASME, 293-297.

Received 10 March, 2017

1<sup>st</sup> Revised 25 April, 2017

2<sup>nd</sup> Revised 17 June, 2017

Accepted 23 June, 2017