

제주도 북동부 연안에서 추동계 파랑특성과 JONSWAP 스펙트럼의 적용성 평가

강동협¹ · 이병걸^{2,†}

¹제주대학교 대학원 풍력특성화협동과정

²제주대학교 해양과학대학 토목공학과

Evaluation of Wave Characteristics and JONSWAP Spectrum Model in the Northeastern Jeju Island on Fall and Winter

Dong-Hyub Kang¹ and Byung-Gul Lee^{2,†}

¹Jeju National University Graduate School of Specialized Wind Energy, Jeju 690-756, Korea

²Department of Civil Engineering, Jeju National University College of Ocean Science, Jeju 690-756, Korea

요 약

제주도 북동부 연안에서 추 동계에 관측된 파랑자료를 주파수 분석을 통해 파랑의 특성을 검토하였다. 그리고 최대파고를 산정하기 위해 1차 회귀식을 이용하여 유의파고와 최대파고를 비를 계산하였다. 또한, JONSWAP 스펙트럼을 계산하기 위해 계산된 유의파고와 침두주파수를 이용하여 관측해역에 맞는 γ 값을 추정하였다. 그 결과, 유의파고의 경우 1 m 이하의 파랑이 가장 높은 빈도를 가지고 발생하였으며, 1차 관측 시 평균 0.523 m로 관측이 되었고, 2차 관측 시 평균 0.423 m로 관측이 되었다. 그 중 가장 높은 유의파고는 9월 15일부터 9월 17일까지 발생한 태풍으로 인해 4.8 m로 관측되었다. 침두주파수의 경우 0.12~0.15 Hz(주기는 약 6.67~8.33초)가 가장 높은 빈도로 나타났으며, 유의파고와 침두 주파수를 이용하여 계산된 γ 값은 평균 2.72를 나타내고 있다. 또한 직선 회귀 식을 이용해 계산된 유의파고와 최대파고의 비는 1.635 H_s로 계산되었다.

Abstract – Analysis frequency spectrum through observed wave data in northeastern shore, jeju island, during winter and fall, and review wave characteristics. In order to compute maximum wave height, we calculate the ratio of significant wave height to maximum wave height using the linear regression equation. In addition, for calculating JONSWAP spectrum, we assumed γ value using significant wave height and peak frequency in the observation area. Consequently, the highest frequency is below 1 m in the case of significant wave height and during the first observation, the mean of height was estimated at 0.523 m and during the scend observation, it was 0.423 m. Furthermore, in peak frequency, the highest frequency was 0.12 Hz~0.15 Hz (period is nearly 6.67s~8.33s), the results of γ from using significant wave height and peak frequency is 2.72 and the significant wave height calculated by straight linear regression equation was 1.635 H_s.

Keywords: Spectrum Moment(스펙트럼 모멘트), JONSWAP Spectrum model(JONSWAP 스펙트럼 모델), significant wave height(유의파고), maximum wave height(최대파고), peak frequency(침두 주파수)

1. 서 론

해역에서의 파랑의 발생원인은 바람의 영향이 가장 크다. 바람에 의해 발생한 파랑은 그 성질이 기본적으로 불규칙하며, 여러 방향으로 발생하는 각각의 성분파의 합으로 이루어져 있다(Kim[2006]). 이

러한 특성 때문에 해상구조물에 작용하는 파력을 계산할 경우 우선적으로 파악되어야 하는 정보는 파랑이 가지고 있는 에너지 량과 물리적 분포 특성이다. 이러한 정보를 얻기 위해서 가장 먼저 진행되어야 하는 것은 대상해역에서 파랑관측이 절대적으로 필요하다. 하지만, 필요로 하는 모든 지점에서 결측없이 관측하기란 거의 불가능에 가깝다. 그리고 현재의 현장관측기술로는 한 지점에서 정확한 자료를 제공하지만 시간과 공간축면에서는 상당한 제한이 따른다. 그

[†]Corresponding author: leebgprof@empas.com

리고 수심이 깊어짐에 따라 수압이 증가하여 관측장비를 설치하지 못하는 경우가 발생하기도 한다. 이러한 단점을 보완하기 위해 개발된 것이 JONSWAP 스펙트럼이다(Ryu[2011]). 스펙트럼모델의 종류는 여러 가지가 있다. 예를 들어, 바람관측자료($U_{19.5}$)를 이용하여 인접 해역에서의 파랑스펙트럼을 예측하는 Pierson-Moskowitz 스펙트럼, 유의파고와 침두주파수를 가지고 인접해역에서의 파랑스펙트럼을 예측하는 JONSWAP 스펙트럼등이 있다. 최근 JONSWAP 스펙트럼변수에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 그 중 한반도연안에 대한 연구에서 γ 을 2.14로 제시한바가 있다(Suh[2010]). 하지만 이 연구에서는 깊은 바다에서 관측된 자료를 이용하였으며, 본 연구에서는 천해에서 가장 적합하다는 JONSWAP 스펙트럼을 이용하였으며(IEC61400-3[2009]), 제주 북동부 해역에서의 파랑 관측 자료를 적용하여, JONSWAP의 변수 γ (침두 상승계수)를 비교해 보았다. 그리고 최대파고가 확정되지 않은 것은, 설계할 때 매우 불편하고 또 불안하다. 그러나, 이것은 해양파의 본질상 할 수 없는 부분이다. 설계의 대상으로 되는 파의 계속시간 즉, 파수를 고려하여, 어떤 쪽의 오차를 수용하면서 최대파고를 선택해야 한다. 이 때 일반적으로 이용되어지는 관계식은 $H_{max}=(1.6\sim 2.0)H_s$ 이다(Goda[1985]). 이것을 검토하여 유의파고와 최대파고간의 관계변수가 무엇인지 확인하기 위해 유의파고와 최대파고는 Zero-Up Cross Method를 이용하여 계산하였으며, 유의파고와 최대파고에 직선 회귀 식($Y=aX$)을 이용하여 1.6~2.0의 범위 중 가장 근사한 직선 식을 계산해 보았다. 여기서 Y는 최대파고를 의미하며 X는 유의파고, a는 1.6~2.0의 값을 의미한다.

2. 관측 자료

본 논문에서 사용된 파랑 관측자료는 Fig. 1과 같이 제주도 북동부지역에 위치한 김녕-월정 중간 지역에서 관측이 되었으며, 위도는 $33^{\circ}34'21.1''$ 이며, 경도는 $126^{\circ}47'23.6''$ 이고, 수심이 18 m이다. 이 위치는 해안선으로부터 직선거리로 약 1.3 km 떨어진 지점에 위치하고



Fig. 1. Observation area in northeastern shore, jeju island.

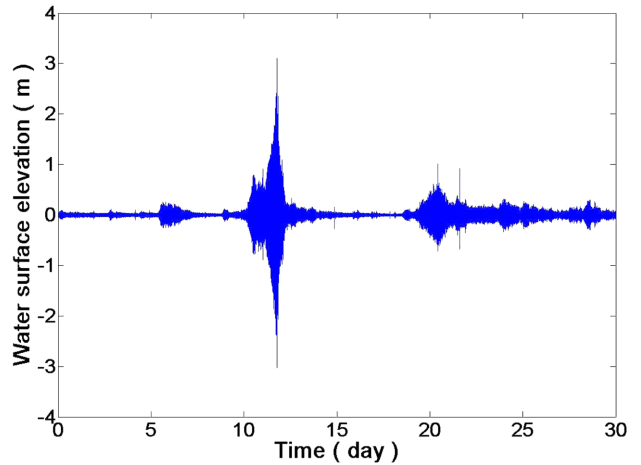


Fig. 2. Surface elevation by waves from Sep. 5, 2012 to Oct. 5, 2012.

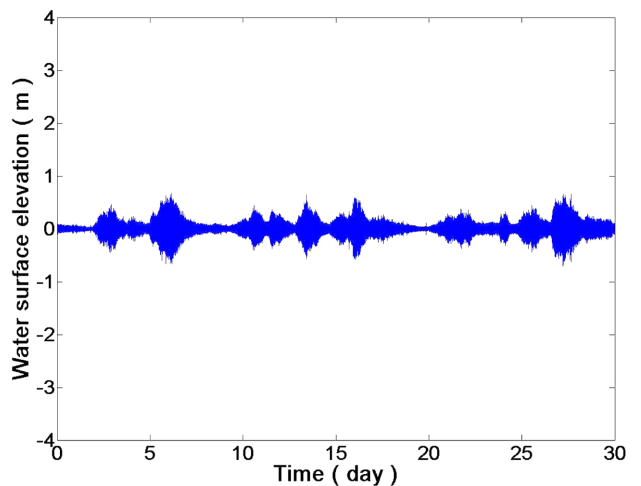


Fig. 3. Surface elevation by waves from Jan. 11, 2013 to Feb. 11, 2013.

있으며, 현재 관측지점에서 불과 200~300 m 떨어진 지점에 두산중공업에서 시공한 해상풍력발전기 2대가 설치되어 가동되고 있다. 또한, 국가 R&D사업의 일환인 광역경제권사업에서 해상풍력발전단지 타깃으로 삼은 위치 중 일부이다. 관측기간은 2012년 9월 5일부터 10월 5일까지 한차례 조사를 진행하였으며, 2013년 1월 11일부터 2월 10일까지 2차 조사를 진행하여 데이터를 수집하였으며, 각각 30일간의 관측데이터이다. Fig. 2는 1차 관측 전체 데이터중 High pass filter를 통과시켜, 조석이 간접 제거된 시계열이며, Fig. 3은 2차 관측자료를 1차 관측자료와 마찬가지로 필터를 통과시켜 조석을 간접 제거시킨 시계열을 나타냈다. 여기서 사용된 관측 장비는 수압식 파고계를 사용하였으며, 재원은 다음 Table 1과 같다. 본 연구에서는 관측간격을 2 Hz(0.5초)로 설정하여 관측을 진행하였으며, 관측방법은 해저면에 관측 장비를 고정하고 장비에 작용하는 압력을 측정하여 수면변위로 변환하는 방식으로 진행된다.

Table 1. Information of wave Observation Equipment

	Depth	Tide and Wave	
Range	10/20/50/100/200/500/740 m (dBar)	Tide averaging	1 sec to 8 hours
Accuracy	±0.05% full scale	Wave (burst)	512, 1024, 2048, 4096 sample
Resolution	<0.001% full scale	Burst rate	1, 2, or 4 Hz

3. 분석 방법

본 연구에서 파랑이 가지고 있는 에너지밀도를 계산하기 위해 PSD(Power Spectrum Density)를 계산하였으며, PSD의 공식은 다음 식 (1)과 같다.

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} |G(f)|^2 df \quad (1)$$

여기서 $F(f)$ 는 PSD이며 단위는 $m^2 \cdot s$ 이다. 그리고 $G(f)$ 는 FT(Fourier Transform)이다. 이 계산식을 이용하여 1시간간격(7200개의 데이터)으로 분할된 시계열 데이터를 PSD를 계산하였으며, 식 (2)를 이용하여 스펙트럼 모멘트를 계산하였다.

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} |G(f)|^2 df \quad (2)$$

$$H_s \cong 4\sqrt{m_0} \quad (3)$$

유의파고에 활용되는 스펙트럼 모멘트는 0차값을 활용하며, 식 (3)과 같다. 또 한, 최대파고를 선정하기 위한 식으로 $(1.6 \sim 2.0)H_s$ 를 사용하게 되는데 이론적으로 1.6과 2.0사이의 값을 선정하는데 있어 이론적으로 파수를 이용하게 된다. 하지만, 본 연구에서는 제주 북동부지역에서 관측된 자료를 이용하여 직접적인 유의파고와 최대파고의 비를 계산하였으며, 유의파고와 최대파고를 zero-upcross Method를 이용하여 계산하였고, 유의파고와 최대파고의 비를 1차 회귀 식을 이용하여 $(1.6 \sim 2.0)H_s$ 중 가장 근접한 값을 계산하기 위해 직선 회귀분석식인 식 (4)를 활용하였다. 여기서, Y 는 최대파고를 의미하며, X 는 유의파고를 의미한다. 그리고, a 는 $(1.6 \sim 2.0)$ 사이에 있는 값을 나타낸다. JONSWAP 스펙트럼에 적용될 변수인 첨두주파수와 첨두주기값을 계산하기 위해 다음 식 (5)와 (6)를 이용하여 계산하였다.

$$Y = aX \quad (4)$$

여기서, $a = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i Y_i)}{\sum_{i=1}^N (X_i^2)}$ 이다.

$$f_p = f_{|F(f)| = \max} \quad (5)$$

$$T_p = 1/f_p \quad (6)$$

이렇게 계산된 유의파고와 첨두주파수 그리고 첨두주기의 값을 이용하여, 식 (7)의 JONSWAP 스펙트럼 계산식(IEC61400-3[2009])에 대입하였다. 그리고 γ 값을 조절하면서 실 관측 스펙트럼과의 peak값을 맞추고, 파랑 에너지 분포형태를 맞추었다. 최종적으로 얻어진 JONSWAP 스펙트럼의 스펙트럼 Moment값을 계산하여, 실 관측 스펙트럼의 스펙트럼 Moment값과 비교 검증을 하였다.

$$F(f)_{JONSWAP} = \alpha H_s^2 T_p \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-5} \exp\left\{-\frac{5}{4}\left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}\right\} (1 - 0.287 \ln \gamma) \gamma^\beta$$

여기서, $\alpha \cong \frac{0.0624}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}}$

$$\beta = \exp\left(-0.5 \left(\frac{f_p - 1}{\sigma}\right)^2\right)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & \text{for } f \leq f_p \\ 0.09 & \text{for } f > f_p \end{cases}$$

4. 분석 결과

Fig. 4(A)는 2012년 9월 5일부터 10월 5일까지(추계) 관측된 자료를 Zero Up-Cross Method를 이용해 계산된 유의파고와 최대파고이며, Fig. 4(B)는 2013년 1월 11일부터 2월 11일까지(동계) 관측된 자료를 이용해 계산된 유의파고와 최대파고이다. 2012년 9월 5일부

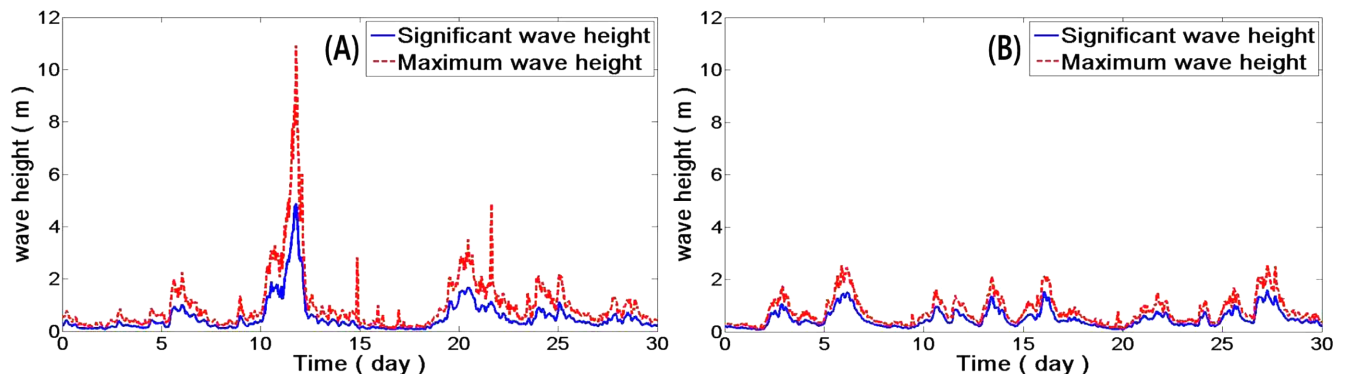


Fig. 4. Significant wave height and maximum wave height at (A) 2012.09.05~2012.10.05 and (B) 2013.01.11~2013.02.10.

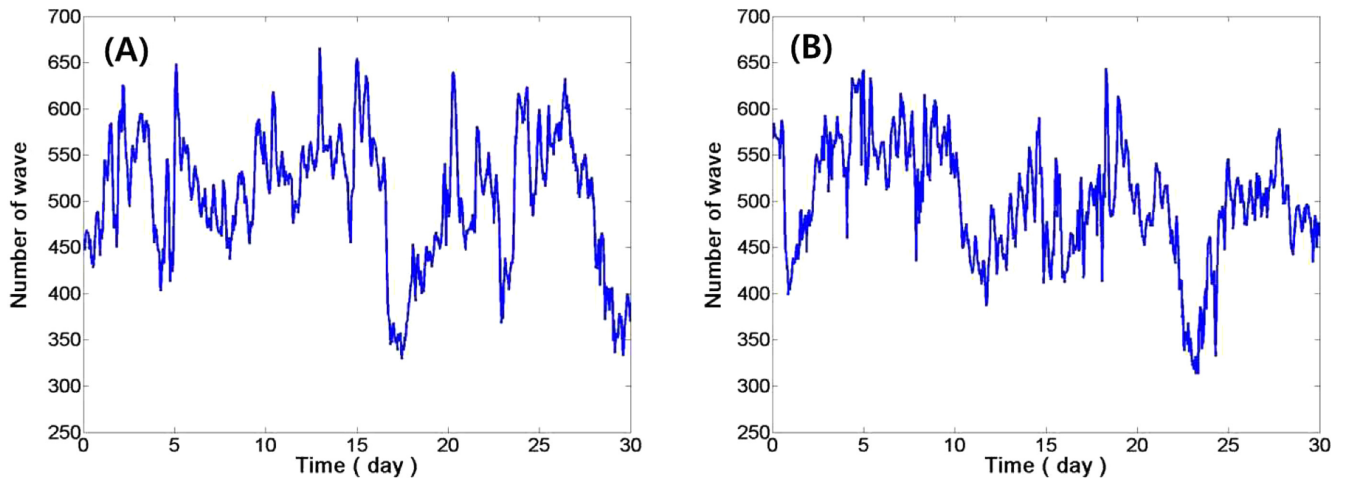


Fig. 5. Number of wave at (A) 2012.09.05~2012.10.05 and (B) 2013.01.11~2013.02.10.

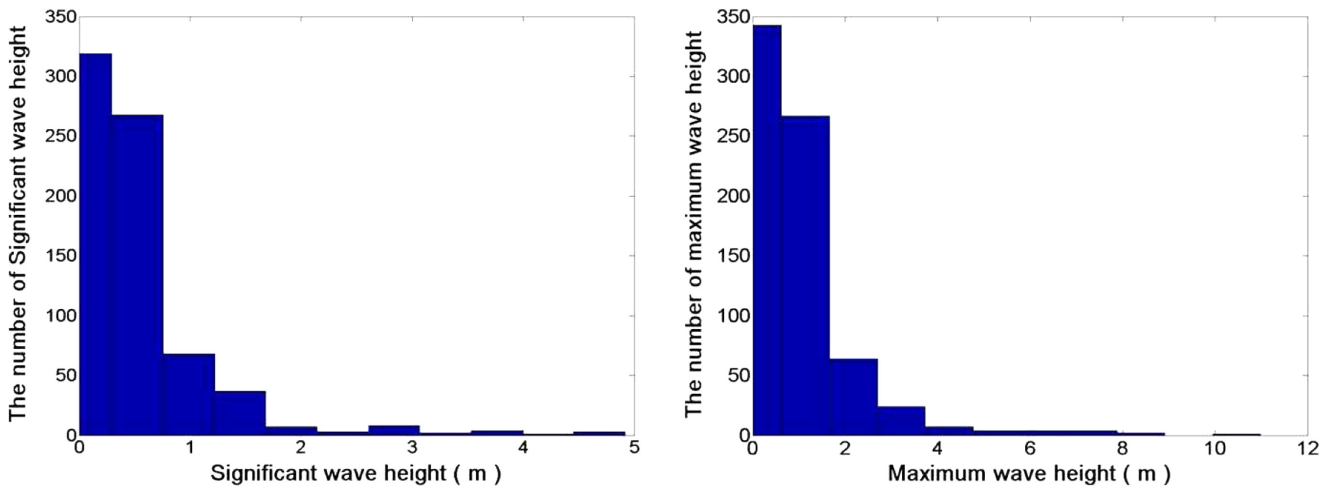


Fig. 6. Distribution of significant wave height and maximum wave height at 2012.09.05~2012.10.05.

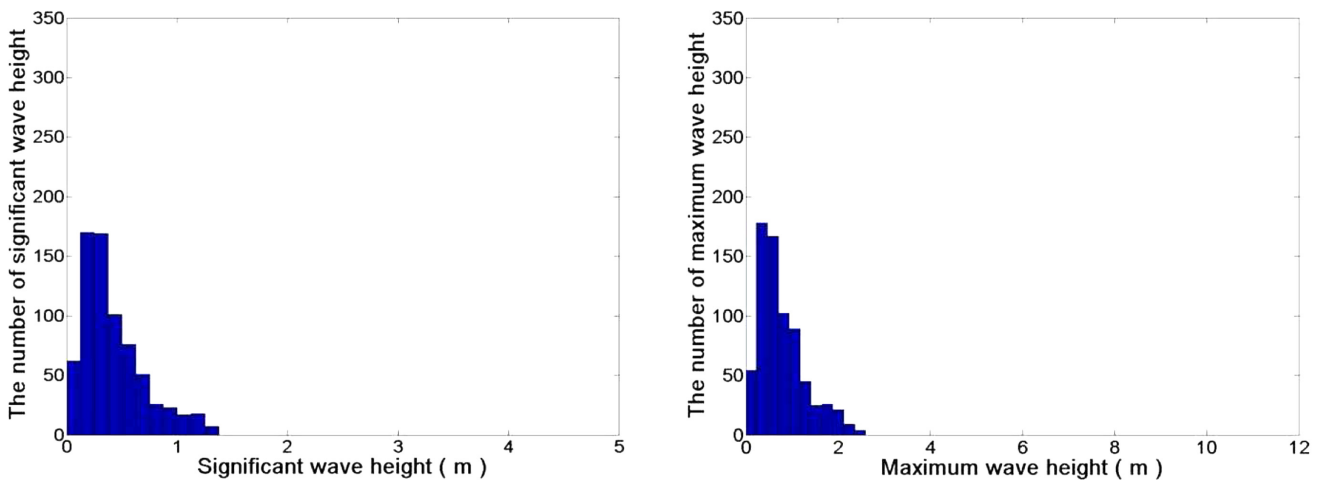


Fig. 7. Distribution of significant wave height and maximum wave height at 2013.01.11~2013.2.10.

터 2012년 10월 5일까지 관측 된 결과를 보면 유의파고 최대파고의 변화폭이 태풍발생(2012년 9월 15일부터 9월 17일)의 영향으로 인해 변화폭이 크며, 상대적으로 태풍발생 전에 발생된 파는 낮게 관

측되었다. 그리고 Fig. 5(A)와 Fig. 5(B)는 Zero Up-Cross Method를 이용해 계산된 파수를 나타내었다.

Fig. 6, 7은 Fig. 4를 분포도로 나타낸 것이다. 데이터 갯수는 각

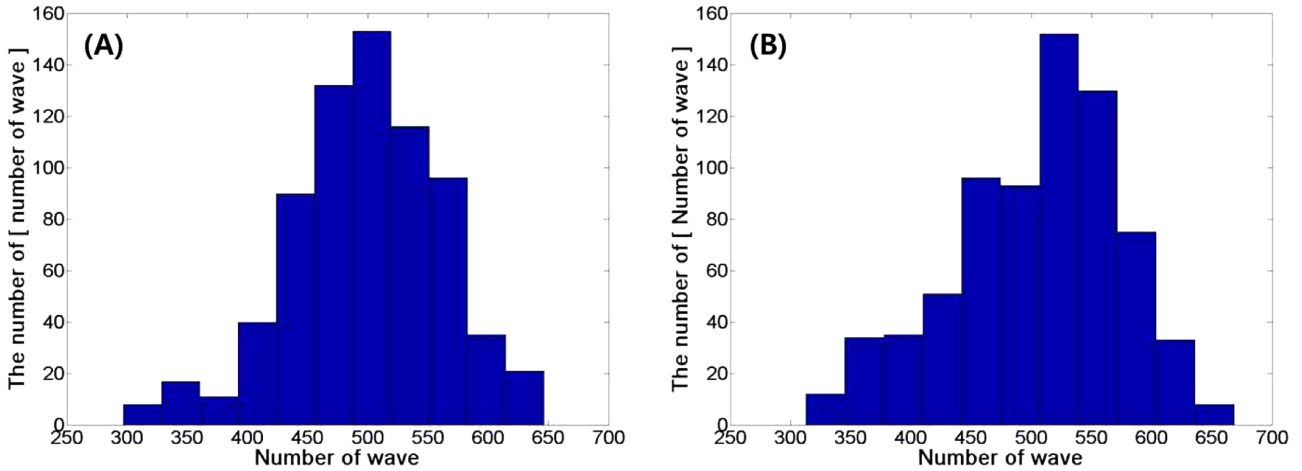


Fig. 8. Distribution of wave number at (A) 2012.09.05~2012.10.05 and (B) 2013.01.11~2013.02.10.

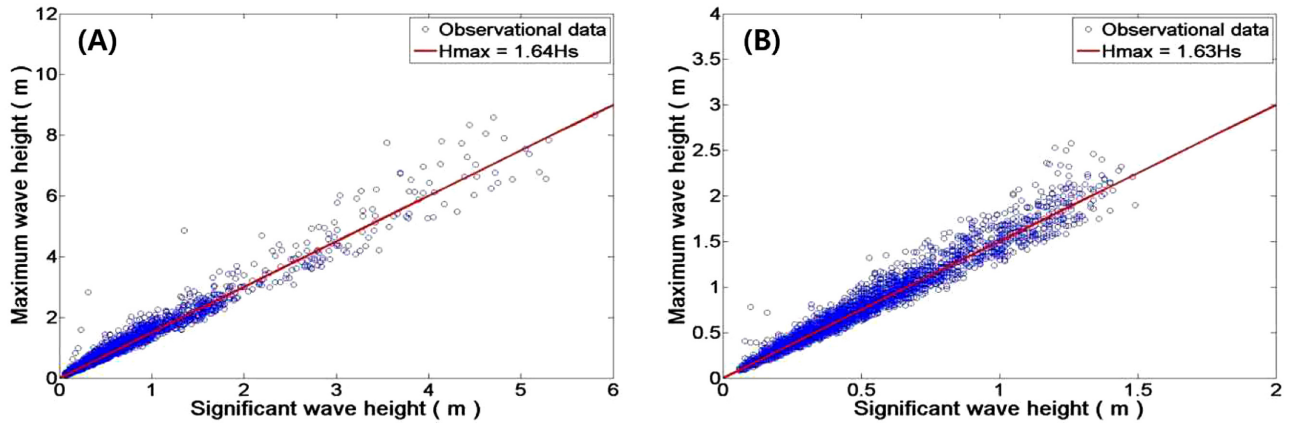


Fig. 9. The result of ratio of significant wave height and maximum wave height at (A) 2012.09.05~2012.10.05 and (B) 2013.01.11~2013.02.10.

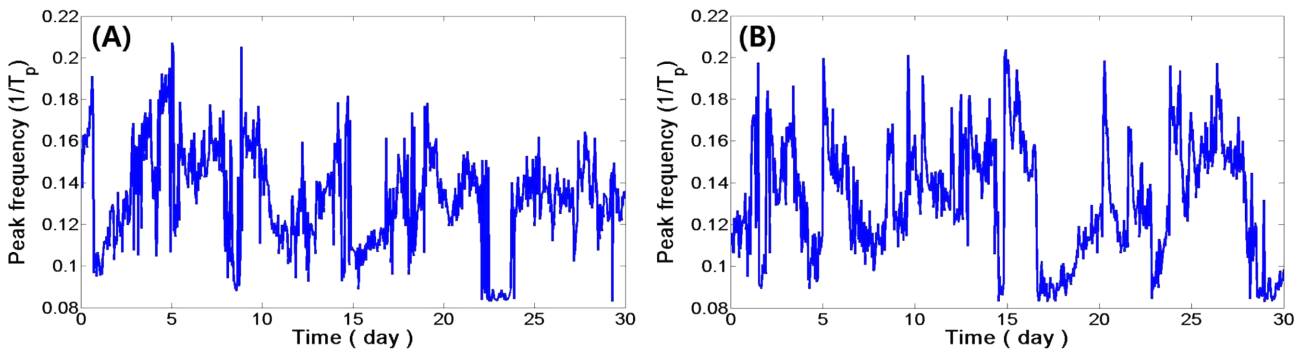


Fig. 10. Peak frequency at (A) 2012.09.05~2012.10.05 and (B) 2013.01.11~2013.02.11.

각 720개(720시간=30일)이다. 관측기간 동안 유의파고는 1m이하의 파가 높은 빈도로 관측이 된 것을 확인할 수 있으며, Fig. 8은 Fig. 5를 분포도로 나타낸 것이다. 가장 높은 분포를 보이는 파수는 500~550개이다.

Fig. 9는 유의파고와 최대파고를 이용하여 직선 회귀 식을 계산한 결과를 나타낸 것이다. 여기서 1차 관측 시(A) 최대파고는 유의파고의 1.64배를 나타내고 있으며, 2차 관측 시(B) 유의파고의 1.63배를 나타내는 것을 확인할 수 있다.

다음 Fig. 10은 식 (5)를 이용하여 계산한 침두 주파수이다. 침두 주파수의 경우 추계와 동계는 모두 0.08 Hz(약 12.5초)~0.2 Hz(약 5초)범위 안에서 발생한 것을 확인할 수 있었다.

여기서 얻어진 유의파고와 침두 주파수값을 이용하여, 식 (7)에 대입하여, 미지수 γ 값을 계산하였다. 그 결과 Fig. 11에 분포도를 나타내었으며, 평균값은 2.72값을 나타내고 있다.

본 연구에서 계산된 γ 값과 2010년에 발표된 한반도 주변 심해에서 계산된 γ 값과 차이를 보이는 이유는 관측데이터의 양이 상대적

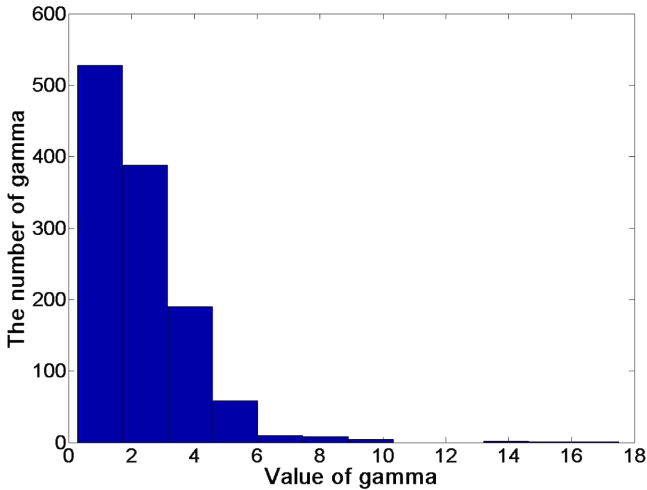


Fig. 11. Distribution of γ .

으로 부족하였거나 심해와 천해의 차이에서 발생된 차이로 생각한다. 이 부분에 대해서는 향후 계속되는 관측으로 인해 정확한 차이점을 밝히고, 제주지역에 가장 적합한 γ 값과 파랑 특성값을 얻을 수 있을 것이라 판단된다.

Fig. 12는 PSD와 JONSWAP 스펙트럼을 비교하여 나타낸 그래프이다. 여기서 (A)와 (B)는 각각 1차 관측 시 관측된 유의파고 증가

장 높은 값과 가장 낮은 값을 샘플로 나타낸 것이며, (C)와 (D)는 2차 관측 시 자료를 이용하여 나타낸 것이다. 비교해본 결과 유의파고가 낮을 때가 높을 때에 비해 γ 값이 낮은 것을 확인 할 수 있었다.

5. 결 론

제주 북동부지역에서 총 60일간의 관측자료를 이용하여 시간영역분석과 주파수영역분석을 함께 진행하였다. 그 결과 유의파고와 첨두 주파수, 스펙트럼 Moment값을 얻을 수 있었고, 최대파고와 유의파고의 비를 1차 회귀식을 이용하여 얻을 수 있었다. 그리고 JONSWAP 스펙트럼모델의 중요변수 γ 값의 범위를 계산해 본 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 관측기간 동안 유의파고를 계산해본 결과 1 m 이하의 유의파고가 가장 많이 관측되었으며, 1차 관측데이터의 평균 0.523 m로 관측이 되었으며, 2차 관측 데이터의 평균 0.423 m로 관측이 되었다. 그리고 가장 높은 유의파고는 9월 15일부터 9월 17일 오전까지 나타난 태풍의 영향으로 인해 4.8 m가 발생했으며, 총 관측 기간 동안의 평균 유의파고 높이는 0.5 m이다.

(2) 관측기간 동안 관측된 유의파고와 최대파고의 비를 1차 회귀식을 이용하여 계산해본 결과 1차 관측 시 1.64배를 나타내고, 2차 관측 시에는 1.63배를 나타내고 있다.

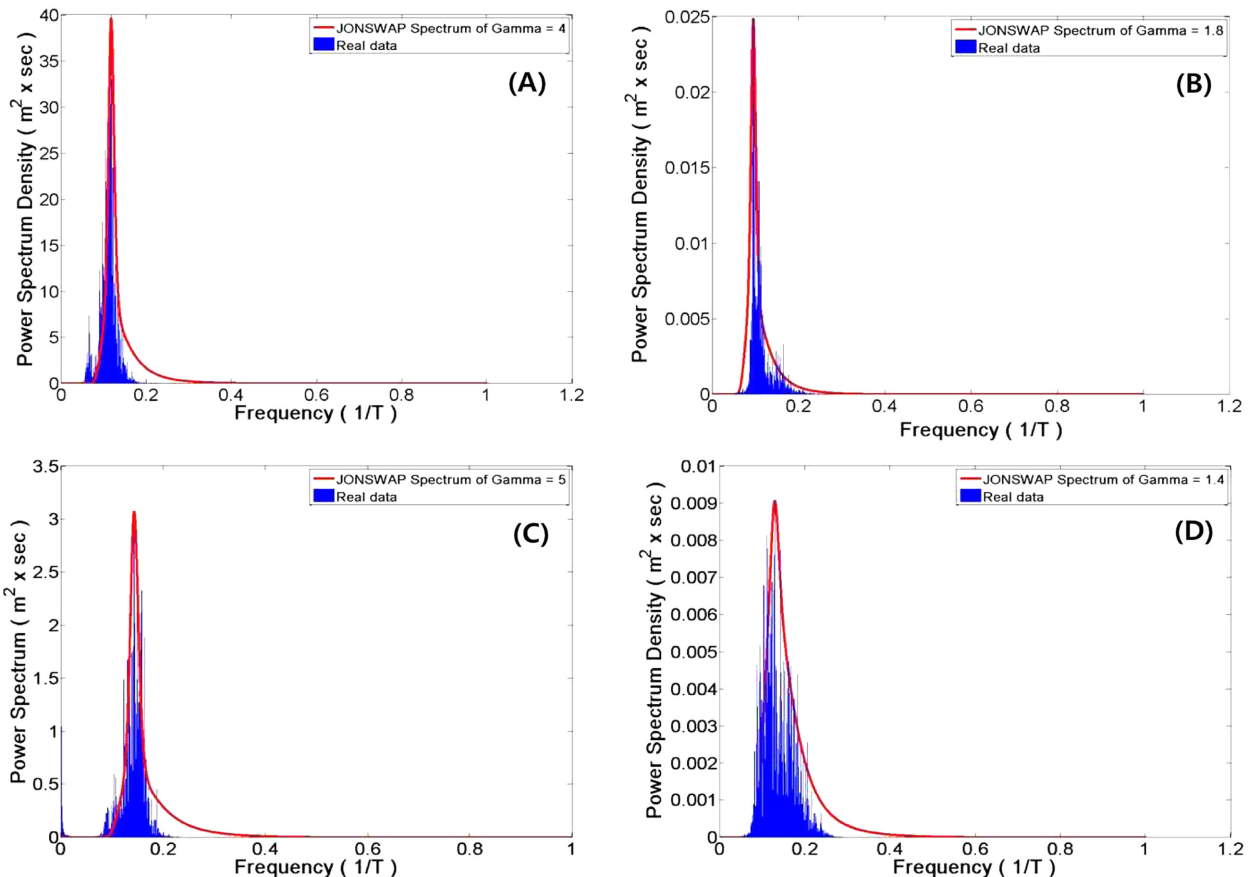


Fig. 12. Comparison of real sea wave spectrum and JONSWAP spectrum.

(3) 관측기간 동안 첨두주파수의 경우 0.12~0.15 Hz(주기는 약 6.67~8.33초)가 가장 높은 빈도로 발생을 하였다. 그리고 평균 0.13 Hz(주기는 약 7.7초)로 발생하였으며, 최대 0.2 Hz(주기는 약 5초)이며, 최저 0.08 Hz(주기는 약 13.4초)로 발생하였다.

(4) JONSWAP 스펙트럼에 제주 북동부지역의 김녕-월정 중간지역에서 관측된 자료를 적용하여 γ 값을 산정하였을 때, 2010년에 발표했던 깊은 바다에서의 JONSWAP 스펙트럼 모델의 γ 값과는 차이가 있는 2.72의 값을 계산할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP) 풍력특성화대학원 인력양성사업의 지원을 받아 수행한 연구결과입니다(NO.20094020200020). 본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP) 풍력특성화대학원 인력양성사업의 지원을 받아 수행한 연구결과입니다(NO.2012T100201731)

References

- [1] Goda, Y., 1985, "Random seas and design of maritime structures", University of Tokyo press.
- [2] Hong, K.H., 2005, "Technology of development of wave energy of commercialization", The ministry of maritime affairs and fisheries, p. 545.
- [3] International Standard IEC61400-3, 2009, Part 3: "Design Requirements for Offshore Wind Turbines", pp. 80-81.
- [4] Kim, D.Y., 2007, "On individual wave height distribution of ocean waves", The Korean Society of Ocean Engineers Vol. 21, No. 2, pp. 6-11.
- [5] Kim, N.H., 2006, "Coastal engineering" pp. 64-78.
- [6] Kim, N.H. and Sim, K.S., 2000, "Analysis of spectrum", pp. 9-34.
- [7] Kim, N.H., 2004, "Incoming waves design of harbor structures", pp.
- [8] Suh, K.D., 2010, "Some statistical characteristics of large deep-water waves around the Korean Peninsula", Coastal Engineering 57(2010) pp. 375-384.
- [9] Ryu, H.J., 2006, "Study on optimal sites of wave power generation based on numerical wave model", Hongik university department of shipbuilding & ocean engineering Doctorate thesis p. 275.
- [10] Ryu, D.H., 2005, "Coast & Harbor engineering", pp. 46-54
- [11] Ryu, H.J., 2011, "Wave properties in the Uljin sea area", The society of naval architects of Korea, Vol.2011, No.6, pp. 1810-1814.
- [12] Silvester, R., 1974, "Coastal Engineering 1", pp. 65-75.
- [13] Kumar, V. S., 2008, "Spectral characteristics of high shallow water waves", pp. 900-911.

2013년 6월 7일 원고접수

2013년 7월 15일(1차), 2013년 12월 2일(2차),
2014년 2월 13일(3차) 심사수정일자

2014년 2월 17일 게재확정일자