

비선형 해양파의 통계적 특성에 대한 해석

김도영[†]
홍익대학교

An Analysis of Statistical Characteristics of Nonlinear Ocean Waves

Do Young Kim[†]

Department Naval Architecture and Ocean Engineering, Hongik University, Jochiwon, Chungnam, Korea

요 약

이 논문에서는 Yura 해역에서 폭풍 중 24시간 연속으로 측정된 freak wave가 포함된 파랑자료를 분석하여 비선형 파도의 통계적 특성을 살펴보았다. 파고의 초과확률분포는 Edgeworth-Rayleigh(ER) 분포와, Rayleigh 분포를 이용하여 예측된 자료와 비교하였다. 파형이 stationary 상태를 유지하는 10시간 동안 측정된 파랑자료(파랑의 개수가 4600 내외)에서는, 파형의 분포는 Gram-Chalier분포가 Gaussian분포보다 파랑자료와 일치한다. 전반적인 파고의 확률분포는 Rayleigh(H_{rms})분포를 잘 따르는 것을 볼 수 있다. Freak wave 발생확률은 Rayleigh($m_o^{1/2}$) 분포로 잘 표시가 되며, ER 분포는 과대하게 예측하는 것을 볼 수 있다. 30분간 측정된 파랑자료(파랑 개수가 250개 내외)에서 freak wave가 발생된 경우는 ER 분포가 freak wave 발생확률과 잘 일치한다. 그러나 전반적인 파고의 발생확률이 과대평가된다. Freak wave가 발생하지 않은 경우는 거의 모든 파고에 걸쳐 Rayleigh(H_{rms})분포가 예측된 파고분포와 잘 일치한다. 파고가 10 m 이하의 freak wave의 파고확률분포는 10 m 이상의 파고를 가지는 freak wave와 비슷한 경향을 보인다. $H_{max}/H_{1/3}$ 은 파형의 kurtosis와 연관이 있는 것을 보여주었다. Freak wave의 발생은 높은 kurtosis 값과 관계가 있으며, freak wave가 발생하는 임계 kurtosis 값이 존재할 가능성이 있을 것으로 추정된다.

Abstract – In this paper time series wave data measured continuously for 24 hours during a storm in Yura Sea Area are used to investigate statistical characteristics of nonlinear waves. The exceedance probability of wave height is compared using the Rayleigh distribution and the Edgeworth-Rayleigh (ER) distribution. Wave data which show stationary state for 10 hours contain 4600 waves approximately. The Gram-Chalier distribution fits the probability of wave elevation better than the Gaussian distribution. The Rayleigh (H_{rms}) distribution follows the exceedance probability of wave height in general and predicts the probability of freak waves well. The ER distribution overpredicts the exceedance probability of wave heights and the occurrence of freak waves. If wave data measured for 30 minute period which contains 250 waves are used, the ER distribution can predict the occurrence probability of freak waves well. But it overpredicts the probability of overall wave height. If no freak wave occurs, the Rayleigh (H_{rms}) distribution agrees well with wave height distribution for the most of wave height ranges. The wave height distribution of freak waves of which height are less than 10 m shows similar tendency compared with freak waves greater than 10 m. The value of $H_{max}/H_{1/3}$ is related to the kurtosis of wave elevation. It seems that there exists threshold value of the kurtosis for the occurrence of freak waves.

Keywords: 비선형파 (Nonlinear Waves), 파고분포(Wave Height Distribution), 파형분포 (Distribution of Wave Elevation), 레일리분포(Rayleigh Distribution), 에지워스-레일리 분포(Edgeworth-Rayleigh Distribution), 그램-찰리어분포(Gram-Chalier Distribution), Freak wave

[†]Corresponding author: dykim@hongik.ac.kr

1. 서론

해양에서 발생 원인에 따라 여러 가지 종류의 파도가 존재하게 된다. 이중 바람에 의해서 발생한 파도는 선박 및 해양구조물에 파랑하중과, 상호간섭 그리고 운동을 발생시킨다. 따라서 파랑은 선박 및 각종 해양구조물에 가장 중요한 설계인자 중의 하나이다.

바람에 의해서 발생한 파도는 불규칙해서 이를 해석하기 위해서는 통계적인 방법이 필요하다. Longuet-Higgins[1952]는 Rice[1944]의 통계이론을 해양파의 통계적 해석에 사용하여, 미소진폭파(Small amplitude wave)의 파형은 정규분포를 따르고, 파랑스펙트럼이 협대역(narrow band)인 경우, 파고의 분포는 Rayleigh 분포함수(Rayleigh distribution function)를 따르는 것을 보였다. 그러나 파고가 큰 파도는 파형의 분포는 비대칭이 되고 파형의 분포는 정규분포로부터 벗어나게 된다. 일반적으로 Rayleigh 분포는 파고가 높은 파도의 발생확률을 과대하게 예측한다고 주장하는 연구 결과들을 볼 수 있다.

Earl[1975]은 Hurricane Camille에서 계측된 파랑자료에서 얻은 파고의 분포를 파고제곱평균을 사용한 Rayleigh분포로 표현할 수 있는 것을 보여주었다. Forristal[1978]은 Earl[1975]이 사용한 파랑자료를 이용하여 2-parameter Weibull 분포함수를 이용할 경우 Rayleigh 분포함수 보다 파고의 분포를 잘 표시할 수 있다는 것을 보였다. Longuet-Higgins[1980]는 파고제곱평균을 경험상수를 이용하여 조종한 값을 Rayleigh 분포의 파라미터로 사용하여, 2-parameter Weibull 분포함수와 비교하였고, 파고분포를 Weibull 분포함수 보다 잘 표시할 수 있는 것을 보여주었다. 그리고 경험상수를 잘 선정하면 비선형성이 강한 파고의 확률분포를 잘 표현 할 수 있다는 것을 보여주었다. 그러나 경험상수의 결정을 위해서는 시간영역에서의 파고계측치가 필요하다. Rayleigh분포는 선형파와 파형의 정규분포 그리고 협대역 파랑스펙트럼 가정에도 불구하고 비선형성이 있는 파에 대해서도 사용할 수 있다는 결과도 많이 발표되고 있다.

최근에 freak wave 또는 rogue wave로 불리는, 일반적인 해양파의 파고의 범위를 벗어나는 매우 높은 파의 특성에 대한 연구가 진행되고 있다. 일반적으로 freak wave는 파고가 유의파고의 2배가 넘는 비정상적으로 큰 파도로 정의되고 있다. 그러나 이 정의에 따르면 파고의 절대 크기가 크지 않더라도 freak wave로 분류될 수 있기 때문에 freak wave의 정의에서 파도의 절대 크기가 10 m 이상이 되는 조건을 추가로 포함하기도 한다. Liu & Pinho[2002]는 해상에서 습득한 파랑자료를 통하여 매우 큰 파도의 발생이 실제로 일어나고 있다는 것을 보여주었다. Mori[1997]도 일본 해역에서 측정된 파랑자료를 통해 freak wave가 생각보다 많이 발생한다는 것을 보여주었다.

Freak wave의 발생확률을 연구하기 위하여, Mori 등[2002]과 Mori[2004]는 비선형 급수인 Edgworth-Rayleigh 분포를 이용하여 파고의 분포 확률을 계산하여 Rayleigh분포와 비교하였고, 파

랑의 측정 수가 작은 경우 Rayleigh 분포는 freak wave의 발생확률을 Edgworth-Rayleigh 분포보다 매우 과소평가를 하고, 이러한 경향은 파고의 수가 2000 이상이 되면 완화가 되지만 그래도 과소평가하는 경향이 있다고 발표하였다. Stansell[2004]은 북해에서 발생한 파랑자료의 해석을 통해 Rayleigh 분포는 높은 파고를 가지는 Freak wave와 같은 파고의 발생을 심각하게 과소평가하는 것을 보여주었다. 신승호 등[2007]은 제주지역에서 관측된 파랑자료를 이용하여 파형의 상하, 전후 비대칭성과, 빈도분포의 첨예도 및 스펙트럼 대역폭 파라미터들은 최대파와 상관관계는 약하다는 것을 보여주었다.

본 논문에서는 폭풍 중 측정된 freak wave가 포함된 파랑자료를 이용하여 비선형 파도의 각종 통계적 특성을 살펴보고, Rayleigh 분포와 Edgworth-Rayleigh 분포를 이용해 비선형파의 파고분포에 대한 특성을 해석하고, freak wave의 발생확률을 해석하였고, 파고가 10 m 이상과 이하가 되는 freak wave의 파고확률분포를 비교하였으며, freak wave발생에 인자에 대한 고찰을 시도하였다.

2. 파랑자료 개요

본 연구에서는 일본 Yura 해역에서 1990년 1월 25일 계측된 자료를 사용하였다. 파고측정에 사용된 파고계는 초음파식 파고계(Ultra sonic wave height meter)이며, 설치 지역 수심은 45 m 이고 폭풍 시 연속으로 20시간 이상 계측할 수 있다. 이 지역에는 3개의 인접한 파고계가 설치되어 있다. 북쪽을 y 좌표, 동쪽을 x 좌표의 방향으로 설정하고, No. 3 파고계를 원점으로 볼 때, No. 1 파고계는 (-4.93 m, 25.02 m) 지점에, No. 2 파고계는 (5.80 m, 92.12 m) 지점에 위치하고 있다. 이 중에서 No. 2 파고계에서 측정된 자료는 훼손이 되어 분석할 수 없어서, No 1, No 3 파고계에서 측정된 자료를 분석하였다. Table 1에 간략한 내용을 표시하였다.

Table 1에 제시한 자료는 23.7시간 계측된 자료이며, 이 파랑자료를 30분 간격으로 47개의 구간으로 나누었으며 각각의 파랑자료는 “D01225B1_05” 형식으로 표시하였다. 파랑자료의 이름에서 B1은 No. 1 파고계를 의미하고 “_05”는 5번째 구간을 의미한다. 최대파고가 나타난 시각은 3300초가 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 각 파랑자료에 대한 최대파고(H_{max}), 유의파고($H_{1/3}$), 유의파주기($T_{1/3}$)를 계산한 것을 Fig. 1과 Fig. 2에 표시하였다.

Fig. 1과 Fig. 2에서 처음 약 10시간 정도는 유의파고와 유의파 주기가 비슷하게 지속되는 것을 볼 수 있다. 따라서 이 구간

Table 1. Wave data

Location	1	3
Data name	D0122501	D0122502
duration	23.7 h	23.7 h
H_{max}	10.39 m	9.84 m
Peak wave time	8600 s	11,900 s

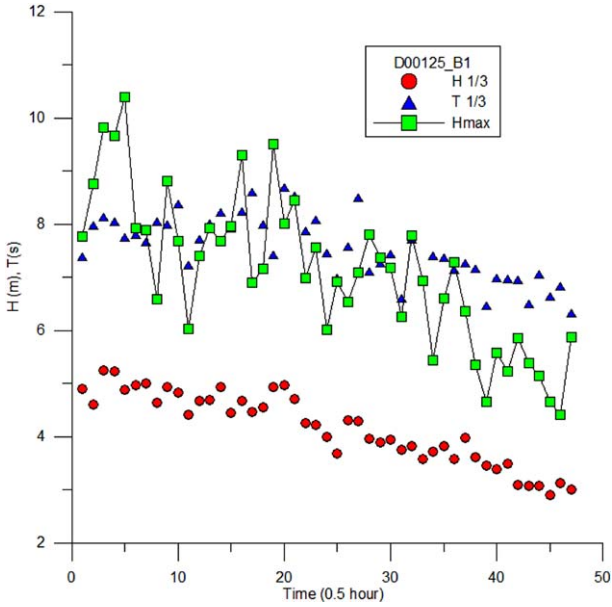


Fig. 1. Time history of H_{max} , $H_{1/3}$, and $T_{1/3}$ for 24 hours measured by wave gauge No. 1.

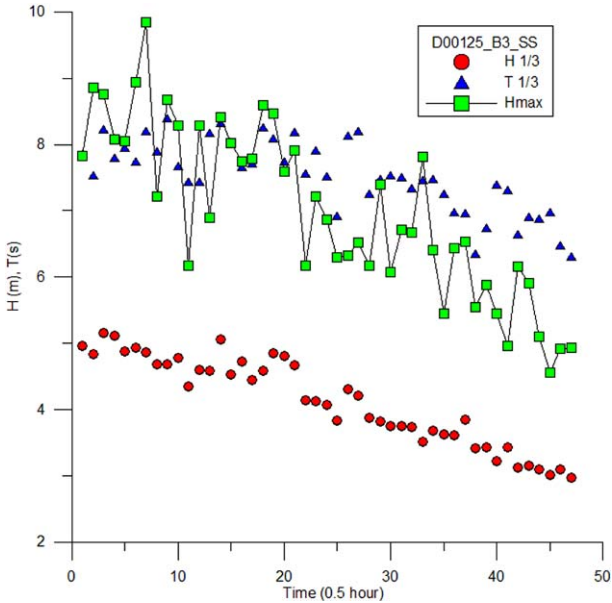


Fig. 2. Time history of H_{max} , $H_{1/3}$, and $T_{1/3}$ for 24 hours measured by wave gauge No. 3.

의 파랑자료를 stationary 하다고 가정하고, 이를 이용해 계산한 파랑의 특성을 Table 2에 정리하였다.

Table 2에서 $H_{1/3}$ 은 파랑의 시계열 자료에서 파고를 계산한 값에서 상위 1/3에 해당하는 파고의 평균으로 표시되는 유의파고이고, H_s 는 파랑스펙트럼 아래의 면적으로 표시한 유의파고이며 $H_s = 4\sqrt{m_0}$ 이다. 파형 η 의 모멘트는 파형의 확률분포 p 를 이용하여 다음과 같이 정의된다.

$$\mu = \int \eta p(\eta) d\eta \quad (1)$$

Table 2. Summary of wave statistics during 10 hours

Description	No. 1	N0. 3
Data name	D01225_B1_SS	D01225_B3_SS
Duration (s)	36,000	36,000
Number of waves	4603	4621
Mean wave height H_0 (m)	3.034	3.010
Maximum wave height H_{max} (m)	10.393	9.841
Significant wave height $H_{1/3}$ (m)	4.808	4.785
Significant wave period $T_{1/3}$ (s)	7.852	7.761
$H_{max}/H_{1/3}$	2.162	2.057
RMS of elevation h_{rms} (m)	1.290	1.284
Skewness (γ)	0.183	0.163
Kurtosis (k)	3.112	3.104
RMS wave height H_{rms} (m)	3.412	3.387
$m_0^{1/2}$ (m ²)	1.281	1.275
Significant wave height H_s (m)	5.125	5.100
Zero upcrossing period T_z (s)	7.373	7.371
Spectrum bandness (ν)	0.435	0.435
Significant steepness (S_s)	0.065	0.065
$H_s/H_{1/3}$	0.938	0.938

$$\mu_n = \int (\eta - \mu)^n p(\eta) d\eta \quad (2)$$

$$\sigma^2 = \mu_2, \quad \gamma = \frac{\mu_3}{\sigma^3}, \quad k = \frac{\mu_4}{\sigma^4} \quad (3)$$

여기서 μ 는 평균(mean), σ^2 는 분산(variance), γ 는 비대칭도(skewness), k 는 첨도(kurtosis)이다.

파랑스펙트럼의 대역폭(bandness)을 나타내는 파라미터와 유의파첨도(significant steepness)는 다음과 같이 정의된다.

$$\nu^2 = \frac{m_2 m_0}{m_1^2} - 1 \quad (4)$$

$$S_s = \frac{2\pi H_s}{g T_z^2} \quad (5)$$

여기서 m_n 은 파랑스펙트럼의 n 차 모멘트를 나타낸다.

Fig. 3에 파형을 Fast Fourier Transform(FFT)하고, 최종 frequency resolution을 0.01 Hz로 평균하여 구한 파랑스펙트럼을 Generalized Pierson-Moskowitz 스펙트럼과 비교하였다. 두 개의 파고계가 인접하게 설치되어있어서 파랑스펙트럼이 거의 동일한 것을 볼 수 있다. Generalized Pierson-Moskowitz 스펙트럼과 비교해 보면 peak이 위치는 같으나 크기는 차이를 보이고 있다. 그리고 Table 2에 보이는 각종 통계치는 최대파고를 제외하고는 거의 비슷한 값을 가지는 것을 볼 수 있다.

파형의 분포확률을 살펴보기 위해서, Gaussian 분포와, 비정규 확률분포에 사용되는 Gram-Chalier 급수를 사용하였고, Gram-Chalier 급수는 다음과 같이 정의된다.

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$$

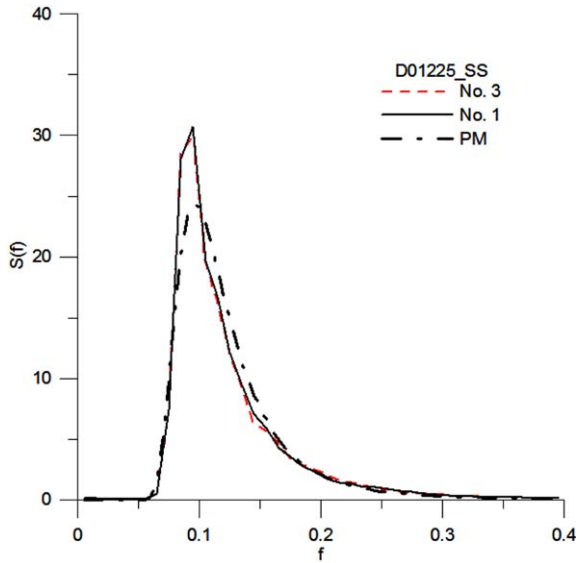


Fig. 3. Wave spectrum of D01225_SS.

$$\left[1 + \frac{k_3}{3! \sigma^3} H_3\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) + \frac{k_4}{4! \sigma^4} H_4\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \right] \quad (6)$$

$$k_3 = \gamma, \quad k_4 = k - 3$$

$$H_3(x) = x^3 - 3x$$

$$H_4(x) = x^4 - 6x^2 + 3 \quad (7)$$

Gaussian 분포와 Gram-Chalier 급수를 이용한 파형의 확률분포를 Fig. 4에 표시하였다. 파형의 확률분포는 정규분포로도 잘 표현되는 것으로 보인다. 그러나 중앙부분을 확대한 Fig. 5에서는 Gram-Chalier 분포가 정규분포보다 자료에 더 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 분포의 최대치가 약간 음의 방향으로 이동하는 것을 볼 수

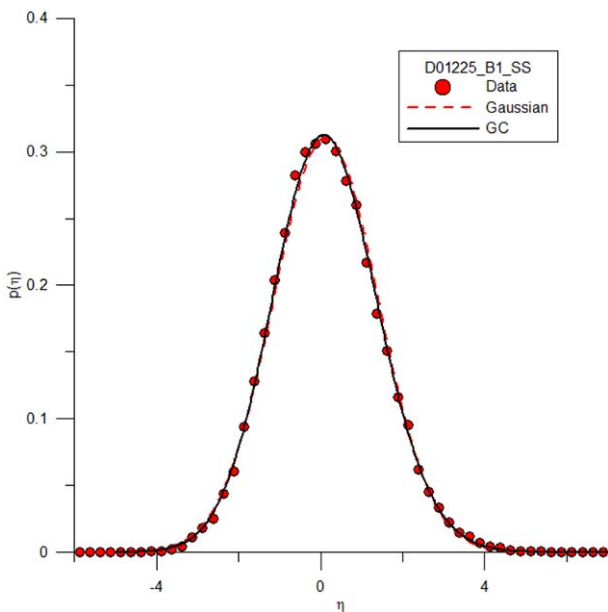


Fig. 4. Probability distribution of wave elevation.

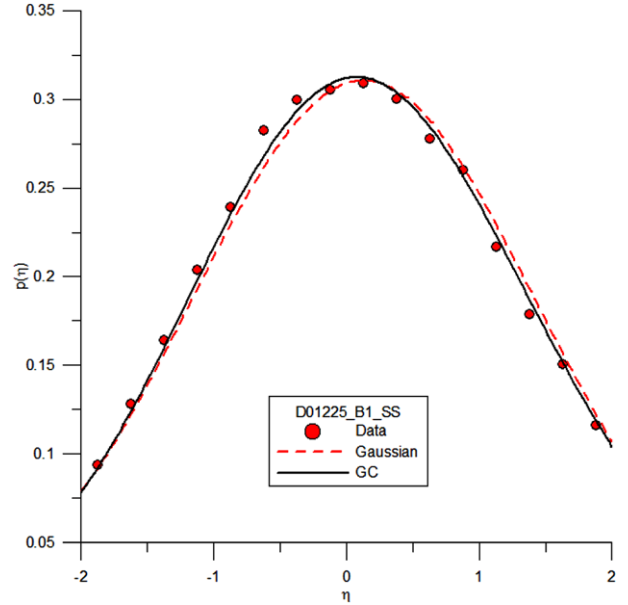


Fig. 5. Detail of probability distribution of wave elevation (center).

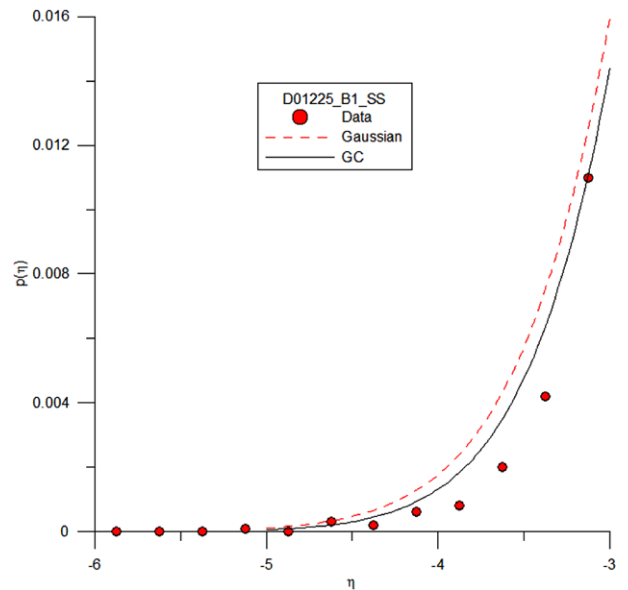


Fig. 6. Detail of probability distribution of wave elevation (low end).

있다. 이것은 파랑의 비선형 특성으로 인한 비대칭도가 양의 값을 가지기 때문이다. Fig. 6과 Fig. 7에서 파형의 확률분포는 Gram-Chalier 분포가 정규분포 보다 조금 더 파랑자료와 일치할 하나, 파형의 음수인 경우의 두 분포 모두 실제 자료 보다 높은 확률을 나타내고 있다. 이에 반해서 파형이 양인 경우 두 분포 모두 파랑 자료에 비해 낮은 확률을 나타내고 있다. 파형이 비선형성을 나타내게 되면 상대적으로 평균수면이 음의 값이 되는 구간이 양의 값을 가지는 구간보다 커지게 된다. 따라서 파형이 음이 되는 구간의 확률이 과소평가되고, 파형이 양이 되는 구간의 확률이 과대평가되는 것을 볼 수 있다.

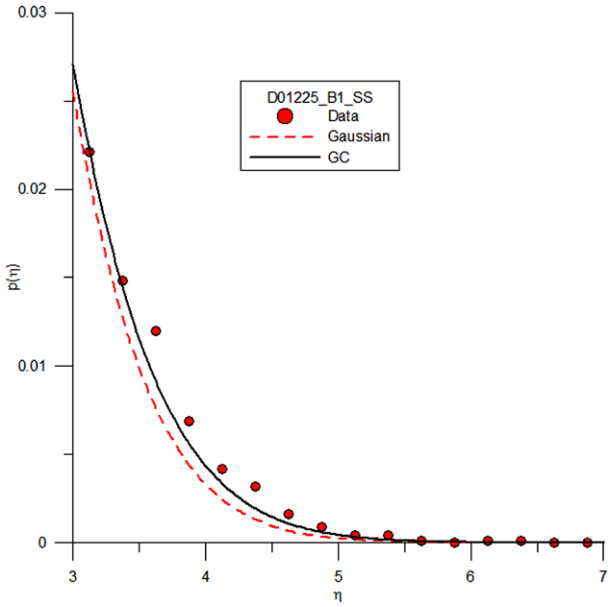


Fig. 7. Detail of probability distribution of wave elevation (high end).

3. 결과 및 토론

Rayleigh 분포와 Edgeworth-Rayleigh 분포를 사용하여 파고의 초과확률분포를 살펴보기로 한다. Longuet-Higgins[1952]가 Rice[1944]의 결과를 해양파에 적용하여 파고의 확률을 Rayleigh 분포로 표시하였으며, 초과파고 확률은 다음과 같이 주어진다.

$$P_E(H) = \exp\left(-\frac{1}{8}\left(\frac{H}{\sqrt{m_0}}\right)^2\right) \quad (8)$$

여기서 m_0 는 파랑스펙트럼 0차 모멘트이다.

일반적으로 식 (8)을 Rayleigh 분포로 부르고 있다. 이와 더불어 또 다른 형태의 Rayleigh 분포도 많이 사용되고 있는데, 파고의 초과확률분포가 다음과 같이 주어진다.

$$P_E(H) = \exp\left(-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^3\right) \quad (9)$$

식 (8)과 (9)는 선형파와 정규분포가 가정된다면 동일한 결과를 준다, 그렇지만 실제 해양파에서는 두 가지 가정이 만족되지 않기 때문에 두 식은 서로 다른 결과를 준다. 기존의 연구자들의 Rayleigh 분포의 유효성에 대한 논란은 많은 경우 식 (8)과 식 (9)의 차이에서 기인을 한다. 본 논문에서 식 (9)에 사용되는 H_{rms} 는 파도의 시계열 자료에서 얻은 값을 사용한다.

Edgeworth-Rayleigh(ER) 분포에서 파고의 초과확률 분포는 다음과 같이 주어진다.

$$P_E(H^*) = \exp\left(-\frac{H^{*2}}{8}\right) \left[1 + \sum_{i=1}^2 \beta_{4,i} E_{4,i}(H^*) + \sum_{i=1}^3 \beta_{6,i} E_{6,i}(H^*)\right] \quad (10)$$

$$H^* = \frac{H}{\eta_{rms}}$$

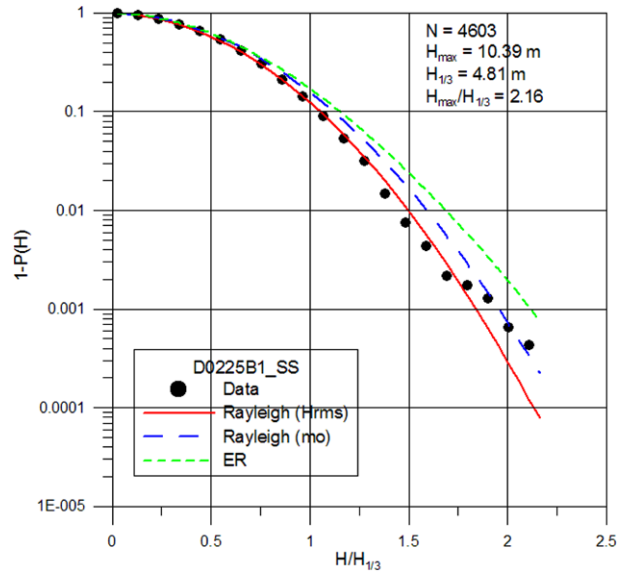


Fig. 8. Exceedance probability of wave height measured by No. 1 wave gauge.

여기서 사용된 계수는 Mori 등[2002], Mori[2004]에 정의되어 있다.

D01225_B1_SS 자료를 이용해 Rayleigh 분포함수와 ER 분포함수로 계산한 결과를 Fig. 8에 표시를 하였다. 수평축은 $H_{1/3}$ 을 이용하여 무차원화 하였다. 그림에서 식 (9)로 표시한 Rayleigh 분포함수를 Rayleigh(H_{rms})로, 식 (8)을 이용한 것을 Rayleigh(m_0)로 나타내었다. 파랑 자료에 포함된 총 파도의 개수는 4603이고, $H_{max}=10.39$ m, $H_{1/3}=4.81$ m이다. 이 그림에서 파고의 전체적인 확률분포는 Rayleigh(H_{rms}) 분포가 잘 일치할 하고 있으나 파고가 높아지면 자료에서 벗어나는 것을 볼 수 있다. 높은 파고에서는 Rayleigh(m_0) 분포가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. Rayleigh (H_{rms})와 Rayleigh(m_0) 분포의 차이는 파랑의 비선형성에 기인하는 것으로 예측되는데, 이러한 결과가 일반적인 해양파에 적용되는지 여부는 향후에 다양한 파랑자료의 검토를 통해 연구되어야 할 부분이다. ER분포는 전체적으로 파고의 확률을 과대하게 예측하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8에서 가로축을 $H_{max}/H_{1/3}$ 로 표시하였기 때문에, $H_{max}/H_{1/3} \geq 2$ 에 해당하는 부분이 freak wave가 발생할 확률이 된다. freak wave 발생 확률은 Mori(2004)의 결과와는 달리 Rayleigh(m_0) 분포가 가장 자료와 잘 일치할 하고, Rayleigh(H_{rms}) 분포는 과소평가를, ER 분포는 과대평가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 9는 No. 3 파고계에서 측정된 자료와 비교한 그림이며, Fig. 8과 동일한 경향을 보여주고 있다.

Mori[2004]는 파도의 개수가 작은 경우 Rayleigh 분포는 freak wave 발생확률을 심각하게 과소평가 하는 것을 보여 주었다. 이를 확인하기 위해 30분 동안 계속된 파랑자료 중 freak wave가 발생한 파랑자료를 사용한 계산 결과를 살펴보기로 한다. 두 파고계에서 Freak wave를 포함한 30분간 측정된 파랑자료의 특성을 Table 3에 요약하여 표시하였다. 여기에 $H_{max}/$

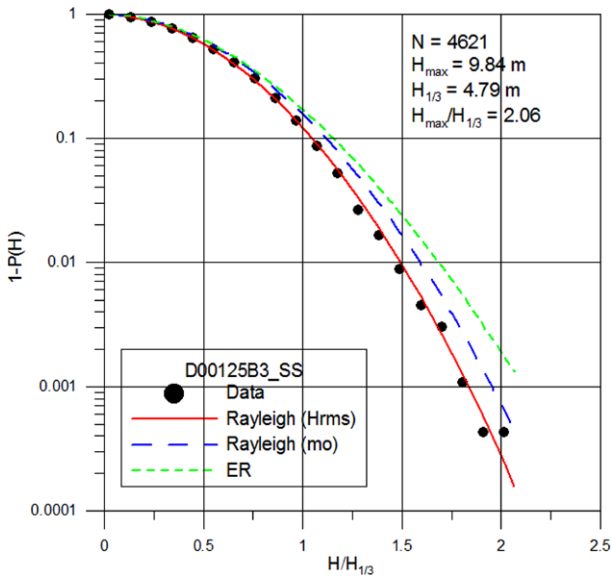


Fig. 9. Exceedance probability of wave height measured by No. 3 wave gauge.

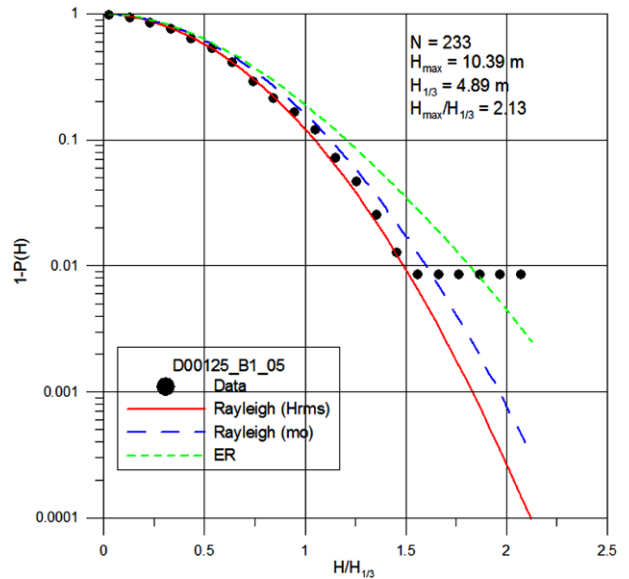


Fig. 10. Exceedance probability of wave height.

Table 3. Summary of 30 minute wave data which contain freak wave

Data (30 min)	N	H_{max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	$H_{max}/H_{1/3}$
D01225B1_05	233	10.39	4.89	2.13
D01225B1_32	244	7.79	3.83	2.03
D01225B1_36	257	7.28	3.59	2.03
D01225B1_16	226	9.30	4.68	1.99
D01225B3_07	225	9.84	4.86	2.02
D01225B3_33	249	7.81	3.51	2.23

$H_{1/3}=1.99$ 가 되는 경우도 포함하였다. 이 파랑자료에서는 파고가 10 m 보다 작지만 $H_{max}/H_{1/3} \geq 2$ 에 해당하는 freak wave가 포함되어 있다. 그리고 각 자료에는 파도의 수가 220~250개 정도 발생하고 있으며, freak wave는 각 자료에서 한 번씩만 발생하였다.

Fig. 10에 D01225B1_05에 대한 파고의 초과확률분포를, Fig. 11에는 D01225B1_16에 대한 결과를 표시하였다. 이 그림에서 자료의 점들이 점프가 발생한 이유는, 최대 파고가 다른 파도의 계급 구간보다 훨씬 높은 값을 가지고 있어 일부 최대파고 아래 부분의 파고의 발생개수가 0이 되어 그 구간의 파고 발생 확률이 0이 되고, 이에 따라서 누적확률분포는 직선적인 점프가 일어나게 된다. 두 그림 모두에서 freak wave를 제외한다면 파고의 확률분포는 Rayleigh(H_{rms})로 잘 표시되는 것을 볼 수 있다. Freak wave의 발생확률은 ER 분포가 가장 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러나 ER 분포가 30분간 측정된 자료에서 freak wave 발생확률을 잘 표시하는 이유가, ER 분포가 파고확률의 과대평가하는 경향과, 적은 수의 파고 중에서 freak wave가 발생하여 상대적으로 높은 발생 확률을 보이는 경향이 겹쳐지기 때문인 것으로도 해석할 수 있는데, 이에 대한 자세한 연구가 추후 필요할 것으로 생각한다.

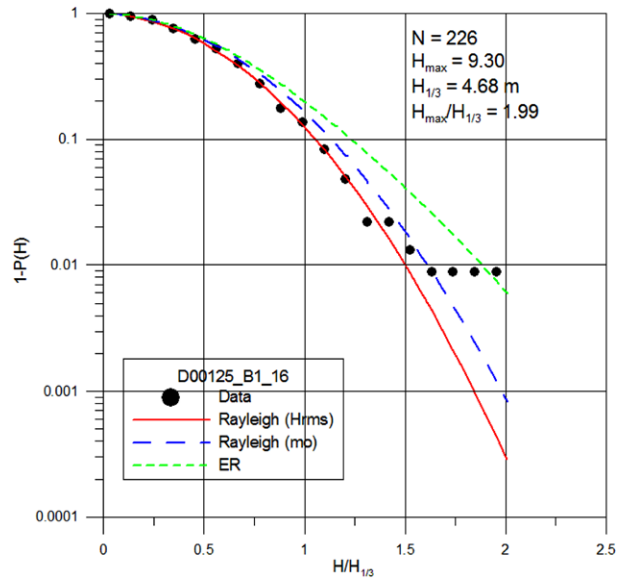


Fig. 11. Exceedance probability of wave height.

다음은 파고가 10 m보다 크지 않은 freak wave와 10 m 보다 큰 freak wave의 비교를 위해서 D01225B1_32, D01225B1_36 자료를 이용하여 파고의 초과확률분포를 비교하였고, 그 결과를 Fig. 12과 Fig. 13에 표시를 하였다. 이 그림에서 파고가 10 m 보다 작은 경우에도 10 m 이상인 경우와 파고의 확률분포에서 나타난 점프가 나타나며, 전체적인 경향은 별 차이를 보이지 않는 것을 볼 수 있다. Table 3에 포함된 다른 자료도 동일한 결과를 보여준다. 따라서 파고의 절대 크기는 freak wave의 파고분포 확률에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

Fig. 14에서는 freak wave가 발생한 D01225B1_05 자료 바로 다음 30분 간 측정된 D01225B1_06 자료에서 계산한 파고의 확률분포를 표시하였다. 이 자료에서는 freak wave가 발생하지 않

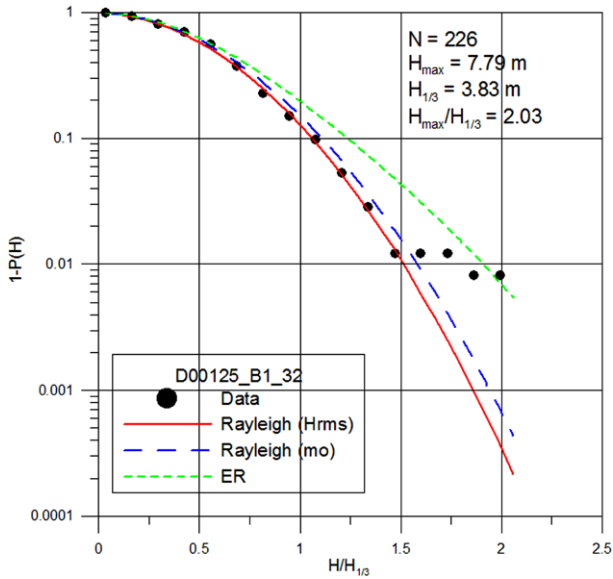


Fig. 12. Exceedance probability of wave height. $H_{max}=7.79$. $H_{max}/H_{1/3}=2.03$ (D01225B1_32).

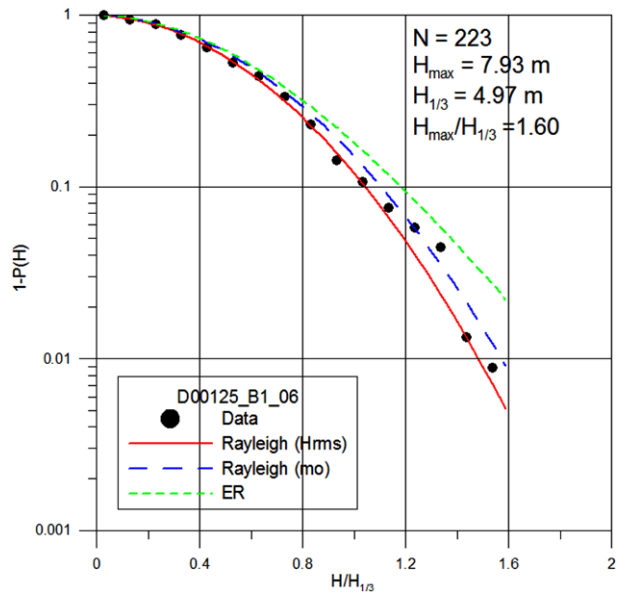


Fig. 14. Exceedance probability of wave height. $H_{max}=7.93$. $H_{max}/H_{1/3}=1.60$. (D01225B1_32) No freak wave.

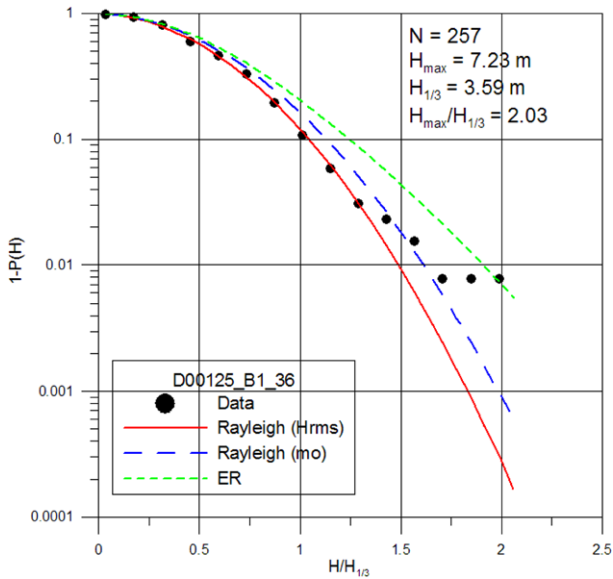


Fig. 13. Exceedance probability of wave height. $H_{max}=7.79$. $H_{max}/H_{1/3}=2.03$ (D01225B1_32).

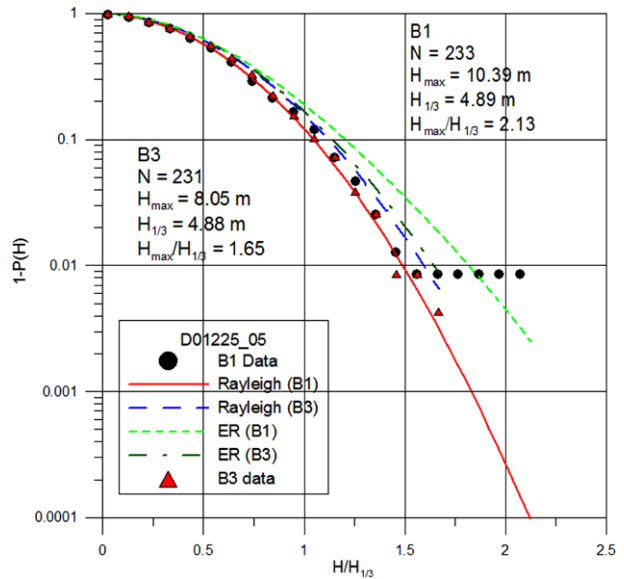


Fig. 15. Comparison of exceedance probability of wave height measured by two wave gauge during the same period. Freak wave occurred at No. 1 gauge location, but not on No. 3.

았으나, 전체적으로 높은 파고의 파도를 포함하고 있다. 이 경우에도 Rayleigh(H_{rms}) 분포가 파고의 확률분포를 잘 표시하고, ER 분포는 과대평가 하는 것을 볼 수 있다.

Freak wave 발생이 국부적인 현상인지, 아니면 근처의 wave field에 또 다른 freak wave 발생을 유발하는 지를 살펴보기 위해서 No 1 파고계와 No. 3 파고계에서 동 시간대에 측정된 자료를 비교하였다. 두 파고계의 떨어진 거리가 26 m로 비교적 근접한 거리에 위치를 하고 있어서, 한쪽 파고계에서 발생한 freak wave의 영향이 다른 파고계에 미치는 영향을 살펴볼 수 있을 것이다. 먼저 파랑자료 중 5번째 자료에서는 No. 1 파고계에서는 freak wave가 발생하였으나, No. 3 파고계에서는 발생하지 않았

다. 그리고 7번째 자료에서는 No. 3 파고계에서 freak wave가 발생하였으나 No. 1 파고계에서는 freak wave가 발생하지 않았다. Fig. 15와 Fig. 16에 동일한 시간에 측정된 파고의 확률분포를 나타내었다. 두 그림에서 2개의 파고계에서 측정된 파고의 확률분포는 freak wave가 발생한 한 점 만 제외하고는 거의 일치를 하는 것을 볼 수 있다. 그러나 freak wave가 발생 여부에 따라 최종 파고 구간에서의 확률분포는 상당히 달라지는 것을 볼 수 있다. 또한 ER분포에 의해 예측된 freak wave의 발생확률도 상당히 달라지는 것을 볼 수 있다. 이외에 freak wave가 발생한

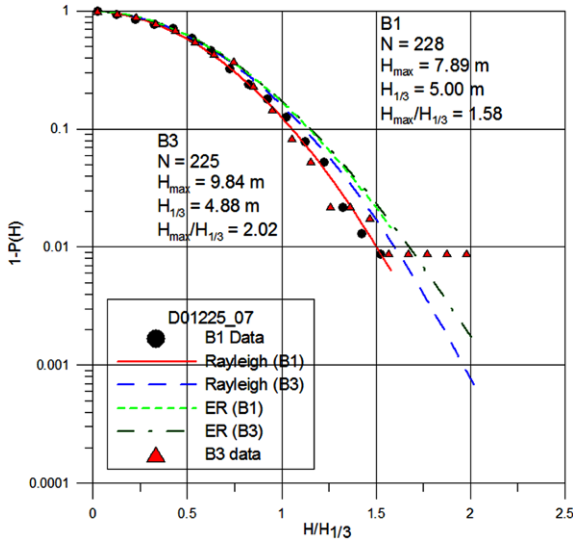


Fig. 16. Comparison of exceedance probability of wave height measured by two wave gauge during the same period. Freak wave occurred at No. 3 gauge location, but not at No. 1.

다른 자료에서도 같은 결과를 나타내고 있다. 이러한 결과를 볼 때 freak wave는 국부적인 지점에서 순간적으로 발생하는 비정상적으로 높은 파도 현상이라는 것을 간접적으로 확인할 수 있다.

Freak wave의 발생 원인과 발생 확률에 대한 연구는 여러 연구자에 의해 연구되어오고 있으나, 발생 확률에 대해서는, 해상상태의 불규칙성과 비선형 현상 등으로 인해서 아직 확실한 결과를 얻고 있지 못하고 있다. Mori(2004)와 Stansell(2004) 등의 연구 결과는 파랑의 비선형성은 파형의 skewness 보다는 kurtosis에 의한 영향이 크다는 것을 보여주고 있다. 또한 Mori(2004)는 $H_{1/3}/\eta_{rms}$ 는 kurtosis의 함수로 표시할 수 있다는 것을 보여주었다. 그러나 $H_{1/3}$ 또는 $H_{1/3}/H_{rms}$ 가 직접적인 freak wave 발생 인자는

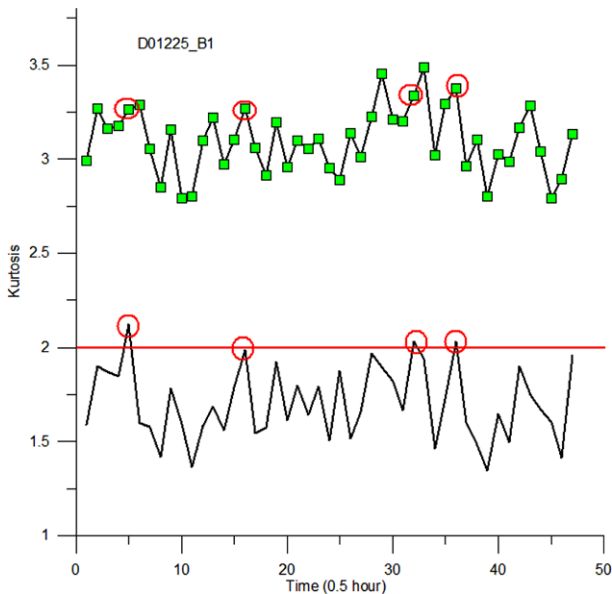


Fig. 17. Maximum wave heigh and kurtosis D0125_B1.

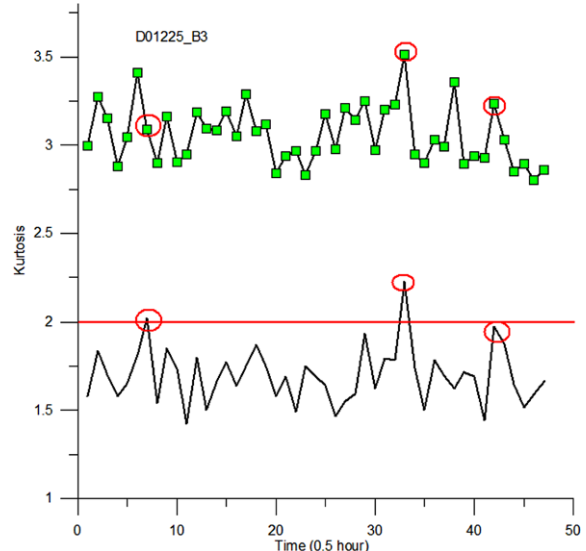


Fig. 18. Maximum wave heigh and kurtosis D0125_B1.

아닌 것을 볼 수 있다.

본 논문에서는 freak wave 발생 조건에 대한 정성적인 고찰의 일환으로 freak wave가 발생과 kurtosis와의 관계를 살펴보기로 한다. Fig. 17과 Fig. 18에 각 시간 구간 별 kurtosis와 H_{max} 를 표시하였다. Freak wave가 발생한 부분을 원으로 표시하였고 $H_{max}/H_{1/3}=2$ 를 그림에 표시를 하였다. 이 그림에서 보면 freak wave가 발생한 경우, kurtosis의 값은 분포된 kurtosis의 상한 값 근처에서 발생한 것을 볼 수 있다. 물론 kurtosis가 크다는 것이 freak wave의 발생을 의미하는 것은 아니다. 그러나 강한 연관성이 있을 가능성을 시사해 주고 있다.

Fig. 19와 Fig. 20에서는 $H_{max}/H_{1/3}$ 과 kurtosis와의 관계를 표시하였다. 이 그림에서 $H_{max}/H_{1/3}$ 과 kurtosis는 서로 연관성이 있는

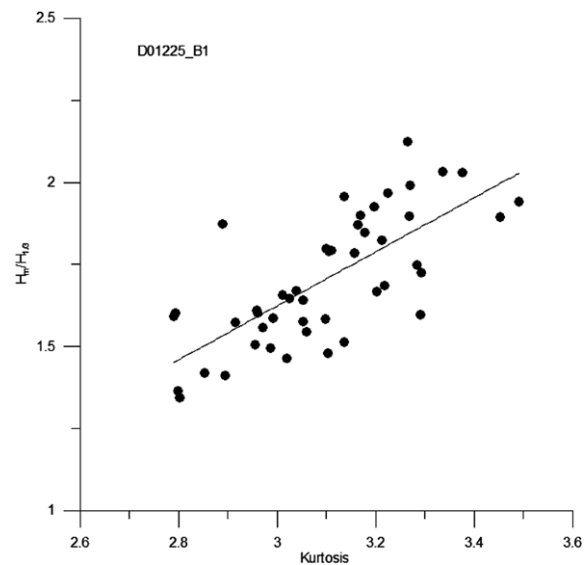


Fig. 19. $H_{max}/H_{1/3}$ vs. kurtosis (D0125_B1).

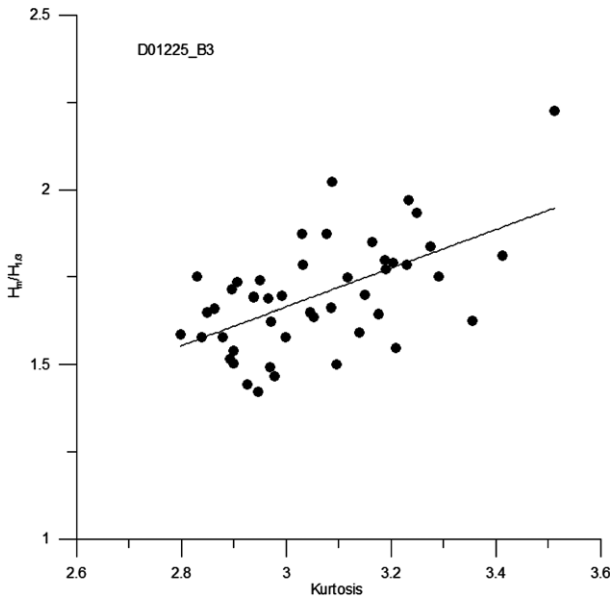


Fig. 20. $H_{max}/H_{1/3}$ vs. kurtosis (D0125_B3).

경향을 보여주고 있다. freak wave는 발생 원인이 여러 가지가 있을 수 있고, 본 논문에서 사용한 파랑자료가 제한적이어서 단언 할 수 없지만, 해상에서 발생한 freak wave의 많은 경우에서, 임계 kurtosis가 존재 할 가능성이 있다고 생각된다. 향후 이 부분에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 생각한다.

4. 결 언

이 논문에서는 Yura 해역에서 폭풍 중 24시간 연속으로 측정된 파랑자료를 분석하여 비선형 파랑의 통계적 특성을 살펴보았다. 파고의 초과확률분포는 Edgeworth-Rayleigh(ER) 분포와, Rayleigh 분포를 이용하여 계측된 자료와 비교하였다. Rayleigh 분포에서 파랑스펙트럼 면적의 제곱루트($m_0^{1/2}$)를 사용한 경우와 시계열에서 직접 얻은 파고의 제곱평균(H_{rms})을 사용한 두 가지를 비교하였다.

파형이 비교적 stationary 상태를 유지하는 10시간 간격의 파랑자료에서는 파랑의 수는 4600정도의 값을 나타냈다. 이 경우 파형의 분포는 Gram-Chalier분포가 Gaussian분포보다 더 파랑자료와 일치할 한다. 그리고 전반적인 파고의 확률분포는 Rayleigh(H_{rms})분포를 잘 따르는 것을 볼 수 있다. Freak wave 발생확률은 Rayleigh($m_0^{1/2}$) 분포와 잘 일치할 하며, ER 분포는 과대하게 예측하는 것을 볼 수 있다. 해상에서 폭풍상태가 6시간 이상 지속되는 경우가 종종 있으며, 파랑 자료는 충분한 수의 파도 수를 포함하고 있으면 Rayleigh 분포로 freak wave 발생 확률을 충분히 예측할 수 있는 것을 보여주었다.

파랑관측 시간이 30분으로 파랑 개수가 250개 내외인 경우, Freak wave가 발생하지 않으면 최대파의 크기에 상관없이, 모든 파고대에 걸쳐 파고분포는 Rayleigh(H_{rms})분포로 잘 표시할 수

있으나, ER 분포는 파고의 발생확률을 과대평가 한다. Freak wave가 발생한 경우 ER 분포가 freak wave 발생확률을 잘 표시를 한다, 그러나 ER 분포가 파고확률을 과대평가하는 경향이 있어 주의해야 할 것으로 보인다. 파고가 10 m 이하의 freak wave의 초과파고확률분포는 10 m 이상의 파고를 가지는 freak wave와 비슷한 경향을 보인다.

$H_{max}/H_{1/3}$ 은 파형의 kurtosis와 연관이 있는 것을 보여주었다. Freak wave의 발생은 높은 kurtosis 값과 관계가 있으며, freak wave가 발생하는 임계 kurtosis 값이 존재할 가능성이 있을 것으로 추정된다. 이에 대한 향후 연구가 필요할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 2007년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의해 지원되어 수행되었음.

참고문헌

- [1] Earle, M., 1975, "Extreme wave condition during Hurricane Camille", J. Geophys. Res. Vol 80, pp 377-379.
- [2] Forristall, G.Z., 1978, "On the stactical distribution of wave heights in a storm", J. Geophys. Res. Vol 80, pp 2353-2358.
- [3] Mori, N., 1997, Occurrence properties of giant freak waves in Sea Area aroud Japan, J. waterway, port, coastal Engineering, July/Aug. 1997, pp. 209-213.
- [4] Liu, P.C. and Pinho, U.F., 2004, Freak waves-more frequent that rare! Annales Geophysics, 22 pp. 1839-1842.
- [5] Longuet-Higgins, M.S., 1952, "On the statistical distribution of the heights of sea waves", J. Marine Res. Vol 11, pp 245-266.
- [6] Longuet-Higgins, M.S., 1980, "On the distribution of the heights of sea waves: some effects of non-linearity and finite bandwidth", J. Geophy. Res. Vol 85, C3, pp 1519-1523.
- [7] Mori, N., Paul, C.L. and Yasuda, T., 2002, Analysis of freak wave measurements in the Sea of Japan, Ocean Engineering 29, pp. 1399-1414.
- [8] Mori, N., 2004, Occurrence probability of a freak wave in a nonlinear wave field, Ocean Engineering 31, pp. 165-175.
- [9] Rice, S.O., 1944, "Mathematical analysis of random noise", Bell System Tech. Journal Vol 23.
- [10] Stansell, P., 2005, Distributions of extreme wave, crest and trough heights measured in the North Sea, Ocean Engineering, 32, pp. 1015-1036.
- [11] 신승호, 홍기용, 문재승, 2007, "Freak Wave 특성 파악을 위한 파랑관측 자료의 분석", 한국항해항만학회지 제31권 제6호, pp. 471-478.

2010년 4월 8일 원고접수

2010년 4월 16일 심사완료

2010년 4월 27일 수정본 채택