

## Freak Wave 발생의 통계적 특성에 대하여

김도영<sup>†</sup>  
홍익대학교 조선해양공학과

### On the Statistical Characteristics of Freak Wave Occurrence

Do Young Kim<sup>†</sup>

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

#### 요 약

이 논문에서는 Monte Carlo method를 이용하여 주어진 파랑스펙트럼에서 위상차를 임의의 수 (random number)를 발생시켜 파형의 시계열 자료를 시뮬레이션하여 freak wave의 발생 특성을 살펴보았다. 여러 가지 상태의 해상상태를 스펙트럼법에서 정의한 유의파고  $H_s$ 와 유의파첨도  $S_s$ 의 조합을 이용해서 표시하였다. 유의파첨도가 동일한 경우에는  $H_s$ 가 커질수록 freak wave 발생 확률이 낮아지며  $H_s$ 가 동일한 경우 유의파첨도가 커질수록 freak wave 발생 확률이 높아진다. 주어진 해상상태에서 최대파고  $H_{max}$ 의 평균은  $S_s$ 의 값이 증가함에 따라 조금씩 증가한다. 그러나 freak wave의 평균파고는  $S_s$ 에 관계없이 일정한 값을 가지며 freak wave 파고의 평균은  $H_s$ 의 2배가 된다.  $S_s$ 가 일정한 경우  $H_s$ 가 증가하면 파형의 평균 첨도(kurtosis)가 증가한다. 그러나  $H_s$ 가 일정한 경우  $S_s$ 가 증가하면 첨도의 평균은 감소한다. Freak wave 발생 기준인 이상지수(Abnormality index, AI)의 평균값은  $H_s$ 와  $S_s$ 에 관계없이 2.11 정도의 값을 가지며 AI의 최대값은 2.5-3.0 사이의 값을 가진다. 따라서 Linear focusing에 의해서 발생한 freak wave의 AI의 상한 값은 3.0 정도라고 추정할 수 있다.

**Abstract** – In this paper time series wave data are simulated by the Monte Calo method using random numbers to generate random phases of the wave signal. The simulated wave signals are used to study the characteristics of freak waves. Various sea states are represented by combinations of the significant wave height  $H_s$  defined in the spectrum method and the significant wave steepness  $S_s$ . For a fixed value of  $S_s$ , the probability of the occurrence of the freak wave is decreased as  $H_s$  increases. For a fixed value of  $H_s$ , the probability of the occurrence of the freak wave increases as  $S_s$  increases. The average value of the maximum wave height increase as  $S_s$  increases, but the average height of freak wave remains the same and the value approaches two times of  $H_s$ . For the fixed value of  $S_s$ , average kurtosis of wave elevation increases as  $H_s$  increases, but for a fixed  $H_s$ , the average kurtosis decreases as  $S_s$  increases. The average of abnormality index(AI) is around 2.11 irregardless of  $H_s$  and  $S_s$ . The maximum value of AI lies between 2.5 - 3.0. Therefore it is conjectured that AI maximum due to linear focusing is 3.0.

**Keywords:** Freak wave, Rogue wave, Occurrence probability of freak wave(freak wave 발생확률), Monte Carlo method(몬테칼로 메소드), Abnormality index(AI, 이상지수)

#### 1. 서 론

최근 일반적으로 알려진 해양파의 최대 파고의 범위를 벗어나는 매우 높은 파에 대한 관심이 높아지고 있고 이러한 파의 특성에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 이러한 비정상적으로 높은

파고를 가지는 파도를 freak wave 또는 rogue wave로 부르고 있다. 계측된 파고 중 가장 높은 파도는 1991년에 발생한 파고 29 m의 파도이다(Holliday 등[2006]). 일반적으로 선박이 10-15 m 정도의 파도에 대해서 설계된다는 것을 생각하면 freak wave는 선박손상의 위협하는 조건이 되며, 경우에 따라서는 선박의 전손을 초래할 수 있다(Faulkner[2001]). 1969년과 1999년 사이에 돌연히 발생한 freak wave에 의해서 542명의 인명이 희생되었고, 22척의

<sup>†</sup>Corresponding author: dykim@hongik.ac.kr

초대형선이 전손 또는 심각한 손상을 당하였다(Lawton[2001]). 1982년에 발생한 대형 파도는 Newfoundland의 Grand Bank에서 운영 중이던 Mobil사의 시추선의 조종석을 강타했고, 이어서 시추선이 전복되어 침몰되었고 승선한 승무원 84명 전원이 사망하였다(Lawton[2001]).

현재까지 freak wave의 발생 구조로 파랑의 에너지가 집중이 되는 과정은 크게 time-space focusing, current focusing 그리고 nonlinear focusing의 세 가지로 볼 수 있다(Kalif 등[2009]). 그러나 현재까지 freak wave의 발생 구조에 대한 정확한 이해와 설명이 되고 있지 않은 실정이다. Freak wave는 이상지수  $AI$ (abnormality index)를 이용해 다음과 같이 정의 된다(Kalif 등[2009]).

$$AI = \frac{H}{H_{1/3}} \geq 2 \quad (1)$$

여기서  $H$ 는 최대 파고  $H_{1/3}$ 은 zero up-crossing 법으로 정의된 유의파고이며, 보통 20-30분간 파랑의 시계열 자료에 포함된 파고 중 상위 1/3의 평균이다. 일반적으로  $AI > 2$ 인 경우를 freak wave라 정의 한다. 그러나  $AI > 2$ 를 freak wave 발생 기준으로 한다면, 파고의 절대 크기가 크지 않더라도 freak wave가 정의되고 존재할 수 있다. 그래서 혹자는 freak wave의 정의에서 파도의 절대 크기가 10 m 이상이 되는 조건을 추가로 포함하기도 한다(Stansell[2000]). Liu & Pinho[2002]는 실측된 파랑자료를 통하여 해양에서는 매우 큰 파도의 발생이 실제로 많이 일어나고 있다는 것을 보여주었다. Yasuda와 Mori[1997]도 일본 해역에서 측정한 파랑자료를 통해 freak wave가 기존에 예상되었던 것보다 많이 발생한다는 것을 보여주었다.

Mori 등[2002]과 Mori[2004]는 Freak wave의 발생확률을 연구하기 위하여 Edgworth-Rayleigh 급수를 이용하여 파고의 분포 확률을 계산하였고, Rayleigh 분포는 파랑의 측정 수가 작은 경우 freak wave의 발생확률을 Edgworth-Rayleigh 분포보다 과소평가를 하는 경향이 있는 것을 보여주었다. 이러한 경향은 파도의 수가 2000개 이상이 되면 다소 완화가 된다. Stansell[2004]은 북해의 파랑자료의 해석을 통해 Rayleigh 분포는 Freak wave와 같은 높은 파고의 발생을 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. 신승호 등[2007]은 첨도(kurtosis)가 타 파라미터 보다 freak wave 발생에 개선된 상관관계를 가진다는 것을 보여 주었다. 김도영[2010]은 해상에서 폭풍상태가 6시간 이상 지속되는 경우가 종종 있으며, 이 경우는 파랑 자료에 충분한 수의 파도 수를 포함하고 있기 때문에 Rayleigh 분포로도 freak wave 발생 확률을 충분히 예측할 수 있는 것을 보여주었다.

$AI > 2$ 를 만족하는 파도는 매우 많이 존재하며, 어떤 파도는  $AI > 3$ 에 해당하는 경우도 알려져 있다. Liu와 Mac Hutchon[2006]은 freak wave는  $AI$ 의 값이 2-4 까지 존재할 수 있다는 가설을 제시

하였다. 그러나 계측된 파고는 발생 빈도나 여러 가지 발생 환경 등을 고려할 때 체계적으로 freak wave의 특성을 해석하기가 쉽지 않다. 본 연구에서는 freak wave의 발생 특성을 체계적으로 분석하기 위해서 Monte Carlo method를 이용하여 주어진 파랑스펙트럼에서 파형의 시계열(time series) 자료를 시뮬레이션하고, 이를 바탕으로 freak wave의 발생 특성을 살펴보고자 한다.

## 2. 파형의 시계열 시뮬레이션

본 논문에서는 시뮬레이션에 사용할 파랑스펙트럼으로 Generalized Pierson Spectrum(또는 Bretschneider spectrum)을 이용하고 이는 다음과 같이 정의된다.

$$S(f) = Af^{-5} \exp(-Bf^{-4}) \quad (2)$$

여기서  $A, B$ 는 상수이다.

$m_n$ 은 스펙트럼의  $n$ 차 모멘트이고 다음 식으로 주어진다.

$$m_n = \frac{1}{4} AB^{\frac{n}{4}-1} \Gamma\left(1 - \frac{n}{4}\right) \quad (3)$$

여기서  $\Gamma$ 는 감마함수를 나타낸다.

스펙트럼법에 의한 유의파고  $H_s$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (4)$$

식 (6)은 일반적으로 많이 사용되고 있으며, 파고가 Rayleigh 분포라는 가정이 포함되어 있다. 이 가정이 만족되는 경우  $H_s = H_{1/3}$ 이 된다, 여기서  $H_{1/3}$ 는 개별파고법에서 정의된 상위 1/3의 파고평균인 유의파고이다. 그러나 실제 해상에서는 두 값이 다르며 일반적인 해상 상태에서는  $0.9 H_s < H_{1/3} < H_s$ 의 범위를 나타내고 있다(Tucker[1991]).

$T_z$  (zero up-crossing period)는 다음과 같이 정의된다.

$$T_z = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (5)$$

식 (3)에서 0차와 2차모멘트는 다음과 같이 주어진다.

$$m_0 = \frac{A}{4B} \quad (6)$$

$$m_2 = \frac{1}{4} AB^{-1/2} \Gamma\left(\frac{1}{2}\right) \quad (7)$$

$H_s$ 와  $T_z$ 가 주어지면 식 (4)-(7)을 이용하여 식 (2)에 포함된 상수  $A, B$ 를 결정할 수 있다.

파랑스펙트럼의 대역폭(bandwidth)을 나타내는 파라미터는 Rice에 의해서 정의된  $\varepsilon = (1 - m_2^2/m_0 m_4)^{1/2}$ 은 해양파의 특성상 4차모멘트가 큰 값이 되어 실제적으로 대역폭을 나타내지 못하게 되어 Longuet-Higgins[1980]은 파랑스펙트럼의 대역폭을 다음과 같이 정의하였다.

$$\nu = \sqrt{\frac{m_2 m_0}{m_1^2} - 1} \quad (8)$$

유의과첨도(significant wave steepness)  $S_s$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$S_s = \frac{2\pi H_s}{gT_z^2} \quad (9)$$

유의과첨도는 extreme wave condition을 추정하는데 사용되며 일반적으로 scatter diagram에서 유의과첨도의 크기는 1/16-1/20을 나타내며 폭풍 시 1/13 정도까지 값을 보인다(Tucker[1991]).

파형의 시계열 자료의 지속시간을  $T$ 라 하고 시간 간격을  $\Delta t$  라 하면 이산화된 파형의 개수  $N$ 은 다음과 같다

$$N = \frac{T}{\Delta t} \quad (10)$$

Fast Fourier Transform에 사용될 basic frequency는 다음과 같다.

$$\Delta f = \frac{1}{T} \quad (11)$$

파형의 시계열을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2S(f_i)} \Delta f \cos(2\pi f_i t - \varepsilon_i) \quad (12)$$

여기서  $f_i = \frac{1}{T} \cdot i$ ,  $\varepsilon_i = \text{random phase } (0 \sim 2\pi)$

파형  $\eta$ 의 모멘트는 파형의 확률분포  $p$ 를 이용하여 다음과 같이 정의 된다.

$$\mu = \int \eta p(\eta) d\eta \quad (13)$$

$$\mu_n = \int (\eta - \mu)^n p(\eta) d\eta \quad (14)$$

$$\sigma^2 = \mu_2, \gamma = \frac{\mu_3}{\sigma^3}, \kappa = \frac{\mu_4}{\sigma^4} \quad (15)$$

여기서  $\mu$ 는 평균(mean),  $\sigma^2$ 는 분산(variance),  $\gamma$ 는 비대칭도(skewness),  $\kappa$ 는 첨도(kurtosis)이다.

식 (12)에 포함된 random phase는 시뮬레이션 수행 시 random number routine을 이용하여 발생시킨다. 일반적으로 random number를 발생하는 routine은 seeding이 같은 경우 연속적으로 발생한 random number는 동일한 형태로 주어진다. 따라서 다른 조합의  $H_s$ 와  $T_z$ 에 대한 시뮬레이션에서 random number의 seeding을 각각 다른 seeding에서 시작하도록 DFLIB.F90에서 정의되어 있는 컴

퓨터의 시간 변수 RND\$TIMESEED를 상수로 설정하여 random number를 호출하도록 프로그램을 작성하였다(Campaq [2001]).

파랑을 계측할 때 sampling rate는 파고의 통계치에 큰 영향을 미치게 되며, 1 Hz보다 작은 경우 극한파의 파고의 확률을 과소 평가하게 된다는 것이 알려져있다(Stansell 등[2002]). 본 논문에서는 파형의 시계열을 표시하는 sampling rate를 결정하기 위해서 여러 가지 sampling rate에 대한 시뮬레이션을 수행해서 각종 통계치의 수렴도를 살펴보았으며 그 결과를 Table 1에 표시를 하였다. 4 Hz 정도에서 제시한 통계 특성들이 수렴하는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서는  $\Delta t = 0.25$  s를 사용해 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 1은  $T=1800$  s,  $H_s=5$  m,  $T_z=7$  s를 입력 변수로해서 파랑스펙트럼으로부터 시뮬레이션된 파형의 시계열의 한 예를 보여주고 있으며 800초 근처에서 freak wave가 발생한 것을 볼 수 있다.

시뮬레이션된 파형으로부터  $\mu$ ,  $\sigma^2$ ,  $\gamma$ ,  $H_{mean}$ ,  $H_{rms}$ ,  $H_{max}$ ,  $H_{1/3}$ 등을 계산하고, 파형을 Fast Fourier Transform(FFT)하고, 최종 frequency resolution을 0.01 Hz로 평균하여 구한 파랑스펙트럼에서  $m_n$ ,  $H_s$ ,  $T_z$ ,  $S_s$ ,  $\nu$ 를 포함한 각종 통계 특성치를 계산하고  $AI$ 를 계산하였다. 유의과첨에는 개별과첨법에 의한  $H_{1/3}$ 과 스펙트럼법에 의한  $H_s$ 가 사용되고 있다. 현재 freak wave의 발생을 정의하는  $AI$ 에서는 대부분  $H_{1/3}$ 이 사용되고 있다. 본 논문에서는 이와 더불어 다음과 같이  $AI_s$ 에 의한 freak wave 발생 기준을 정의하고 이에 대한 특성도 살펴보았다.

$$AI_s = \frac{H}{H_s} \geq 2 \quad (16)$$

Fig. 1에 제시된 파형에서 계산된 각종 주요 통계치를 Table 2에 표시를 하였다. 계산된 결과에서  $\sigma/m_0^{1/2}=1.002$ 이며, 이로부터 시뮬레이션에 의한 시계열 계산 결과와 스펙트럼에 의한 계산 결과의 일관성을 확인할 수 있다. 본 논문에서 수행한 모든 시뮬레이션에서 이 값을 확인하였으며 1.002 이하의 값을 나타낸다.

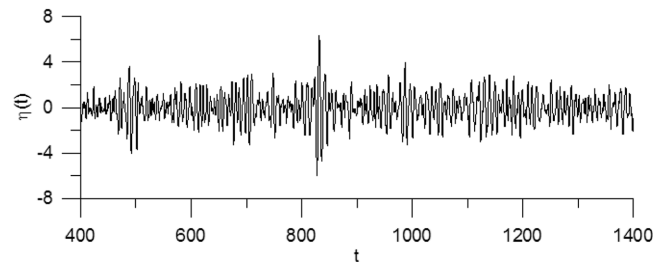


Fig. 1. A sample of simulated wave profile ( $T = 1800$  s,  $H_s = 5$  m,  $T_z = 7$  s).

Table 1. Statistical properties of simulated wave profile data ( $H_s = 5.2$  m,  $T_z = 8.2$  s,  $T = 30$  min)

$\Delta t$	Hz	$\sigma$	$\sqrt{m_0}$	$H_s$	$T_z$	$\nu$	$S_s$
1.00	1.00	1.302	1.300	5.2	8.30	0.394	0.053
0.75	1.33	1.302	1.300	5.2	8.25	0.406	0.053
0.50	2.00	1.302	1.300	5.2	8.25	0.406	0.054
0.25	4.00	1.302	1.300	5.2	8.19	0.422	0.054
0.20	5.00	1.302	1.300	5.2	8.19	0.423	0.054

**Table 2.** Various statistical properties of simulated wave profile ( $T = 1800$  s,  $H_s = 5$  m,  $T_z = 7$  s)

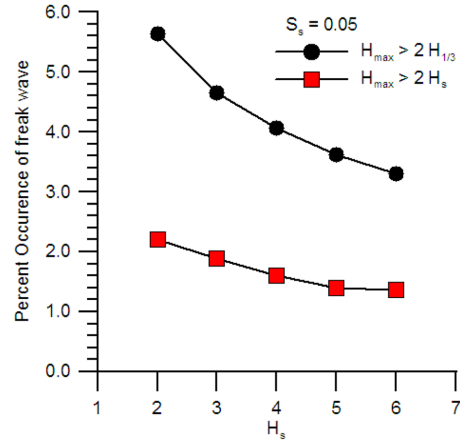
$\sigma$	$\gamma$	$\kappa$	$H_{1/3}$	$H_{mean}$	$H_{rms}$	$H_{max}$	$H_s$	$T_z$	$\nu$	$S_s$	$m_o^{1/2}$	$AI$	$AI_s$	$H_{1/3}/H_s$
1.252	-0.013	3.834	4.72	2.94	3.36	11.09	5.00	6.99	0.421	0.071	1.250	2.352	2.218	0.943

본격적으로 시뮬레이션을 수행하기 위해서 먼저 표본 크기를 정해야 한다. 사전 계산을 통해서 주어진 조합의  $H_s$ 와  $T_z$ 에서 freak wave 발생 확률은 1-5% 내외인 것으로 나타났다. 표본 크기가 커지면 각 시뮬레이션에서 얻은  $H_{max}$ 의 값은 정규분포로 수렴하게 된다는 가정을 하고, freak wave 발생 확률 예측에 95% 신뢰 수준에서  $\pm 0.2\%$ 를 오차 한계로 설정하면 표본 크기는 9500-45,000 정도가 필요하게 된다. 이를 바탕으로 본 논문에서는 주어진 조합의  $H_s$ 와  $T_z$ 에 대한 시뮬레이션에서 표본의 크기  $N_s$ 를 50,000으로 결정하였다.

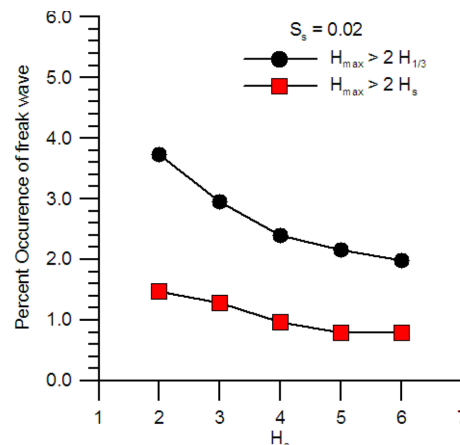
### 3. 결과 및 토론

본 논문에서는  $H_s$ 와  $S_s$ 의 변화에 따른 Freak wave 발생 확률과 특성을 살펴보기 위해서 여러 가지 조합의 해상 상태에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 유의파침도가 일정하고  $H_s$ 가 변하는 Case-I과 Case-II에 대한 시뮬레이션을 수행하였고 freak wave 발생 확률과 특성 등에 대한 주요 결과를 Table 3과 4에 표시를 하였다. 각 Case에서 개별 시뮬레이션에서는 30분 길이의 파형을 50,000번 계산하여 freak wave 발생 확률을 구하였다. 각 Run에서 구한 확률은 동일한 해상상태가 30분간 유지될 경우에 freak wave가 발생하는 확률이다. 그러나 실제로 특정 지역에서는 해상상태가 시간에 따라 변하기 때문에 특정한 지역에서 freak wave가 발생할 확률과는 다른 의미를 가진다.

Fig. 2와 Fig. 3은 유의파침도  $S_s$ 가 일정한 경우  $H_s$  변화에 따른 freak wave 발생확률을 보여주고 있다. 먼저 두 그림에서  $H_{1/3}$ 을



**Fig. 2.** Percent occurrence of freak waves vs.  $H_s$  ( $S_s=0.05$ ).



**Fig. 3.** Percent occurrence of freak waves vs.  $H_s$  ( $S_s=0.02$ ).

**Table 3.** Various statistical properties of Case-I simulations ( $N_s = 50,000$  per Run)

Run	$H_s$	$T_z$	$S_s$	$FW1^*$ occurrence (%)	$FW2^{**}$ occurrence (%)	$FW1/FW2$ occurrence	Highest $H_{max}$ (m)	$H_{max}$ average (m)	$FW1^*$ average height (m)	$FW2^{**}$ average height (m)
R01	6.00	8.78	0.054	3.30	1.37	2.41	15.16	9.48	12.03	12.57
R02	5.00	7.99	0.054	3.62	1.40	2.59	12.94	7.96	10.02	10.51
R03	4.00	7.19	0.053	4.07	1.61	2.53	10.48	6.42	8.01	8.38
R04	3.00	6.20	0.054	4.65	1.89	2.46	8.03	4.87	6.02	6.29
R05	2.00	5.10	0.053	5.64	2.21	2.55	5.76	3.29	4.01	4.20

\* $FW1$ : Freak wave based on  $AI \geq 2$ . \*\* $FW2$ : Freak wave based on  $AI_s \geq 2$ .

**Table 4.** Various statistical properties of Case-II simulations ( $N_s = 50,000$  per Run)

Run	$H_s$	$T_z$	$S_s$	$FW1^*$ occurrence (%)	$FW2^{**}$ occurrence (%)	$FW1/FW2$ occurrence	Highest $H_{max}$ (m)	$H_{max}$ average (m)	$FW1^*$ average height (m)	$FW2^{**}$ average height (m)
R06	6.00	13.84	0.022	1.98	0.79	2.51	15.68	9.12	12.00	12.56
R07	5.00	12.65	0.022	2.16	0.80	2.70	13.13	7.66	9.99	10.49
R08	4.00	11.27	0.022	2.39	0.96	2.49	10.32	6.19	8.02	8.39
R09	3.00	9.78	0.022	2.96	1.28	2.31	7.74	4.70	6.02	6.28
R10	2.00	7.99	0.022	3.73	1.48	2.52	5.12	3.19	4.01	4.18

\* $FW1$ : Freak wave based on  $AI \geq 2$ . \*\* $FW2$ : Freak wave based on  $AI_s \geq 2$ .

**Table 5.** Various statistical properties of Case-III simulations ( $N_s = 50,000$  per Run)

Run	$H_s$	$T_z$	$S_s$	$FW1^*$ occurrence (%)	$FW2^{**}$ occurrence (%)	$FW1/FW2$ occurrence	Highest $H_{max}$ (m)	$H_{max}$ average (m)	$FW1^*$ average height (m)	$FW2^{**}$ average height (m)
R07	5.00	12.65	0.022	2.16	0.80	2.70	13.13	7.66	9.99	10.49
R11	5.00	10.27	0.033	2.69	1.11	2.42	13.40	7.80	10.01	10.47
R12	5.00	8.98	0.043	3.18	1.26	2.52	13.18	7.89	10.03	10.51
R02	5.00	7.99	0.054	3.62	1.40	2.59	12.94	7.96	10.02	10.51
R13	5.00	7.29	0.065	3.89	1.54	2.53	13.02	8.01	10.02	10.47
R14	5.00	6.80	0.075	4.20	1.75	2.40	12.96	8.06	10.04	10.50
R15	5.00	6.30	0.087	4.64	1.94	2.39	13.23	8.10	10.03	10.48

\* $FW1$ : Freak wave based on  $AI \geq 2$ . \*\* $FW2$ : Freak wave based on  $AI_s \geq 2$ .

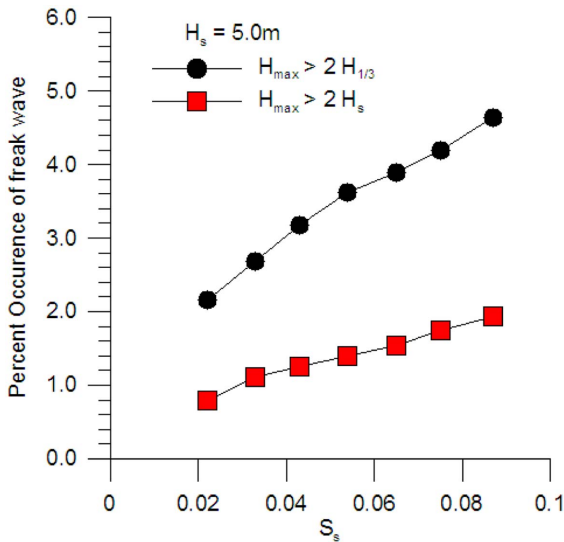
**Table 6.** Various statistical properties of Case-IV simulations ( $N_s = 50,000$  per Run)

Run	$H_s$	$T_z$	$S_s$	$FW1^*$ occurrence (%)	$FW2^{**}$ occurrence (%)	$FW1/FW2$ occurrence	Highest $H_{max}$ (m)	$H_{max}$ average (m)	$FW1^*$ average height (m)	$FW2^{**}$ average height (m)
R10	2.00	7.99	0.022	3.73	1.48	2.52	5.12	3.19	4.01	4.18
R16	2.00	6.50	0.033	4.56	1.89	2.41	5.32	3.24	4.02	4.20
R17	2.00	5.70	0.043	5.15	2.09	2.46	5.27	3.27	4.01	4.19
R05	2.00	5.10	0.053	5.64	2.21	2.55	5.76	3.29	4.01	4.20
R18	2.00	4.61	0.065	6.31	2.57	2.46	5.16	3.31	4.01	4.19

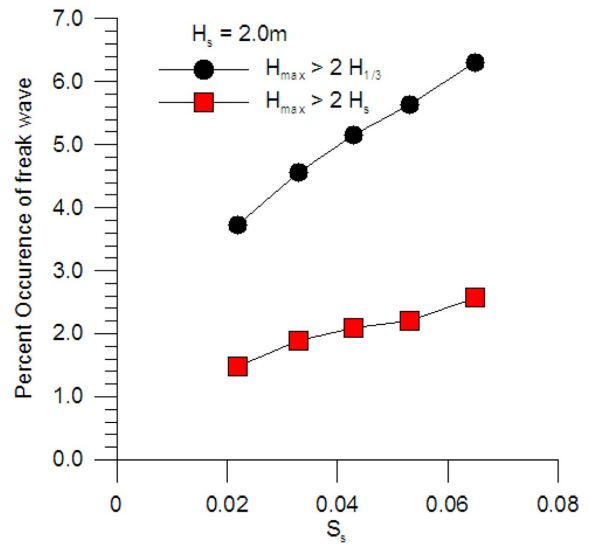
\* $FW1$ : Freak wave based on  $AI \geq 2$ . \*\* $FW2$ : Freak wave based on  $AI_s \geq 2$ .

사용한  $AI$  정의에 의한 freak wave( $FW1$ ) 발생 확률은  $H_s$ 를 사용하여 정의된  $AI_s$ 로 정의된 freak wave( $FW2$ ) 보다 발생확률이 큰 것을 볼 수 있다. Table 2에 보며  $FW1$  확률이  $FW2$  확률 보다 2.5 배 정도 큰 것을 볼 수 있다. 이 그림들에서 유의파첨도가 동일한 경우  $H_s$ 가 커질수록 freak wave 발생 확률이 낮아지는 것을 볼 수 있다.

Table 5, 6에는  $H_s$ 가 일정하고 유의파첨도가 변하는 경우에 대한 계산 결과를 나타내었다. 앞의 두 case와 마찬가지로  $FW1$  확률이  $FW2$  확률 보다 2.5배 정도 큰 것을 볼 수 있다. Fig. 4, 5에서  $H_s$ 가 동일한 경우 유의파첨도가 커질수록 freak wave 발생 확



**Fig. 4.** Percent occurrence of freak wave vs. significant wave steepness  $S_s$  ( $H_s=5.0$  m).



**Fig. 5.** Percent occurrence of freak wave vs. significant wave steepness  $S_s$  ( $H_s=2.0$  m).

률이 높아지는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 심한 해상 상태에서 freak wave의 발생확률이 높아진다는 것과 일치한다(Guedes Soares 등[2004]).

Fig. 6과 7에는 각각 Case-I과 Case-II의 각 Run의 50,000개의 시뮬레이션 중에서 발생한 최대파고  $H_{max}$ 의 최대값과 평균, 그리고 freak wave가 발생했을 때 발생한 freak wave의 평균파고를 표시하였다. 유의파첨도( $S_s$ )가 0.05와 0.02인 경우 모두  $H_s$ 가 증가하면  $H_{max}$ 의 최대값,  $H_{max}$  평균 그리고 freak wave의 평균파고가 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 8과 9에는 각각 Case-III과 Case-IV에 해당하는 경우를 그림으로 표시하였다. 먼저 각 Run의  $H_{max}$ 의

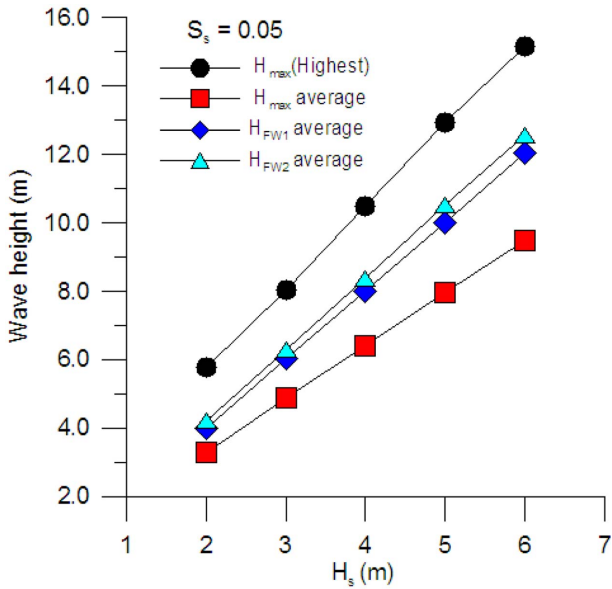


Fig. 6. Various wave height of Case-I.  $S_s=0.05$ .

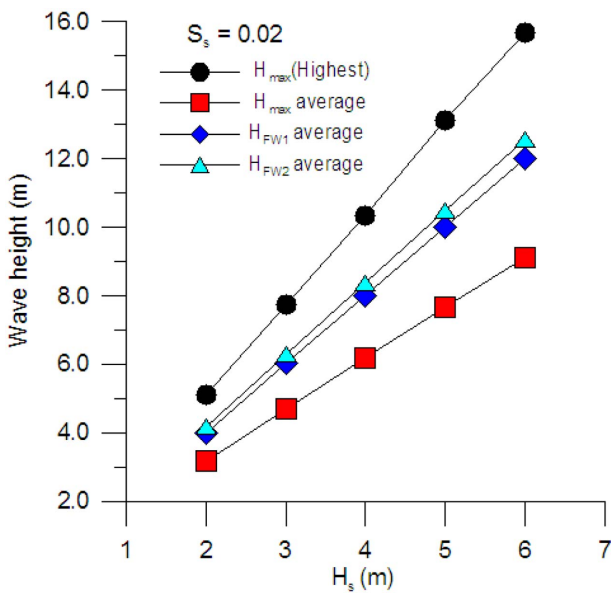


Fig. 7. Various wave height of Case-II.  $S_s=0.02$ .

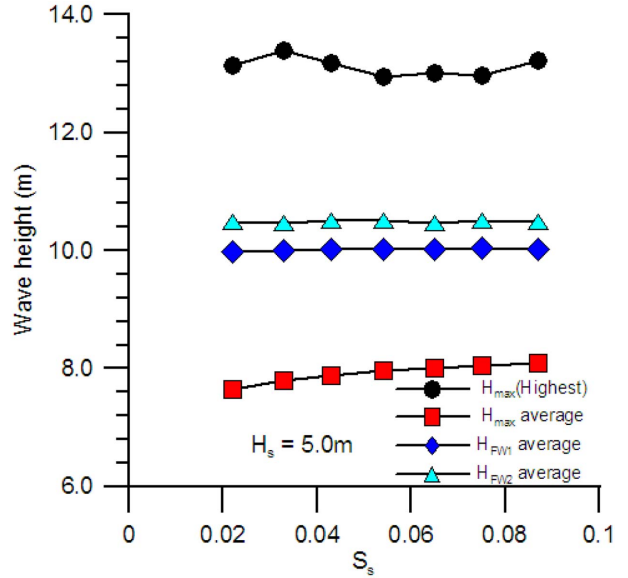


Fig. 8. Various wave height of Case-III.  $H_s=5.0$  m.

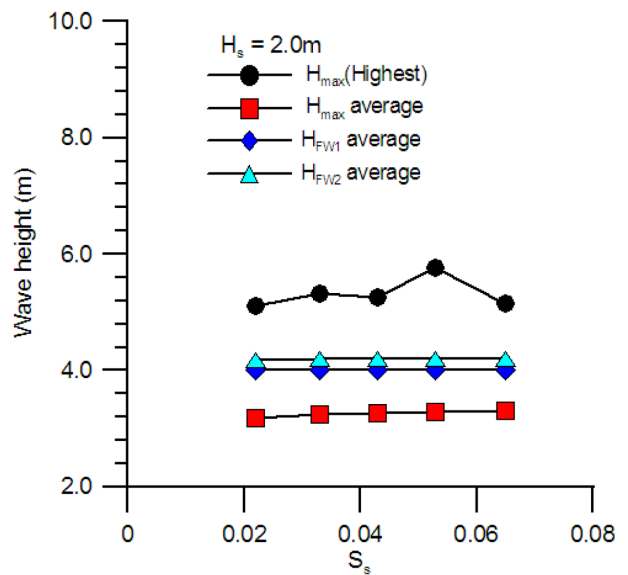


Fig. 9. Various wave height of Case-IV.  $H_s=2.0$  m.

최대값은  $S_s$ 와 명확한 상관관계가 없는 것을 볼 수 있다. 최대값과  $H_{max}$ 의 전체 평균은  $S_s$ 의 값이 증가함에 따라 조금씩 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 freak wave가 발생한 경우 발생한 freak wave의 평균값은  $S_s$ 에 관계없이 일정한 값을 보이는 것을 볼 수 있다. 그리고  $FW1$ 의 평균값은  $H_s$ 의 2배가 된다는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10에는 Case-I과 Case-II에서 이상지수  $AI$ 의 최대값과 평균값을 표시하였고, Fig. 11에는 Case-III과 Case-IV에서 이상지수  $AI$ 의 최대값과 평균값을 표시하였다. 두 그림 모두  $AI$ 의 평균값은  $H_s$ 와  $S_s$ 에 관계없이 2.11 근처의 일정한 값을 보이고 있다.  $AI$ 의 최대값과  $H_s$ 와  $S_s$ 와의 관계는 명확한 결론을 내릴 수 없는 것으로 보인다. 한편  $AI$ 의 최대값은 2.5-3.0 사이의 값을 보여주고 있다.

본 논문에서는 수행한 시뮬레이션의 전체 모집단의 크기는 1,000,000에 이른다. 한 개의 모집단은 30분에 해당하므로, 이것을 날자로 환산하면 약 20,000일 정도이고 년수로 환산하면 55년 정도의 기간이 된다. 모집단의 크기가 충분한 것을 고려할 때, linear focusing에 의한 freak wave가 발생 할 경우  $AI$ 의 상한 값은 3.0 근처라는 추정이 가능하다.  $AI$ 가 3.0 이상이 되는 경우에는 linear-focusing으로는 설명할 수 없고 non-linear focusing 등 다른 요건을 발생 원인으로 고려해야 할 것으로 보인다.

Fig. 12에는 Case-I과 Case-II에 해당하는 경우 파형의 침도(kurtosis)의 최대값과 freak wave가 발생한 경우 침도의 평균값을 표시하였다.  $S_s$ 가 일정한 경우  $H_s$ 가 증가하면 freak wave가 발생한 경우의 평균 침도는 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 침도가

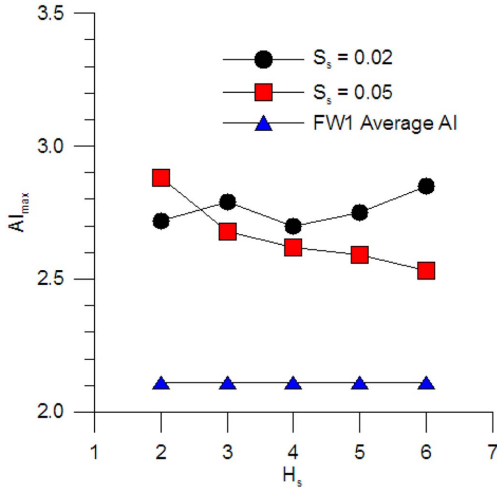


Fig. 10. Maximum AI vs.  $H_s$  (Case-I & II).

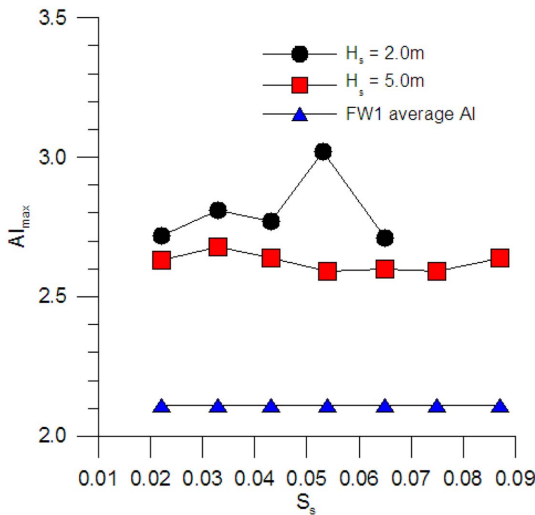


Fig. 11. Maximum AI vs.  $S_s$  (Case-III & IV).

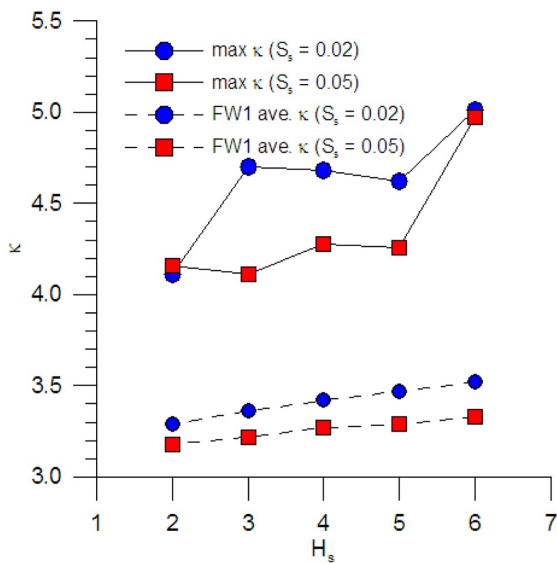


Fig. 12. Maximum kurtosis of wave elevation and FW1 average of Kurtosis vs.  $H_s$  (Case-I & II).

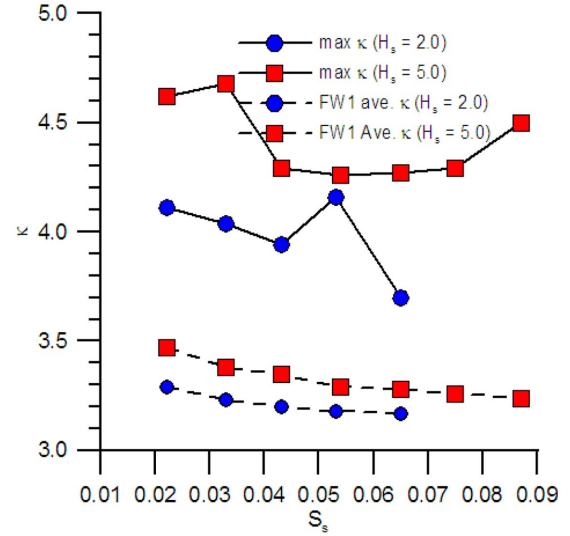


Fig. 13. Maximum kurtosis of wave elevation and FW1 average of Kurtosis vs.  $S_s$  (Case-III & IV).

최대파고와 상관관계가 존재한다는 것과 일치하는 경향이다(신승호 등[2007]), Mori[2004]). 그러나  $S_s$ 가 0.02인 경우가 0.05인 경우보다 큰 값을 나타낸다. 첨도의 최대값은  $S_s$ 가 0.05와 0.02인 경우가 다른 형태를 보이고 있어, 현재의 결과로는 특정한 경향을 논할 수는 없지만  $H_s$ 에 따른 증가 경향을 볼 수 있다. Fig. 12에서는  $H_s$ 가 일정한 경우  $S_s$ 가 증가하면 freak wave가 발생한 경우의 첨도의 평균은 감소하는 것을 볼 수 있다. 첨도의 최대값은  $S_s$ 에 따른 변화 양상이 규칙적이지 않은 것을 볼 수 있다.

### 4. 결 언

본 연구에서는 freak wave의 발생 특성을 체계적으로 분석하기 위해서 Monte Carlo method를 이용하여 주어진 파랑스펙트럼에서 위상차를 임의의 수(random number)를 발생시켜 파형의 시계열 자료를 시뮬레이션하여 freak wave의 발생 특성을 살펴보았다. 여러 가지 상태의 해상상태를 스펙트럼법에서 정의한 유의파고  $H_s$ 와 유의파첨도  $S_s$ 의 조합을 이용해서 표시하였다.

Freak wave의 정의는 이상지수  $AI$ 를 사용하는데, 일반적으로 사용되고 있는  $H_{1/3}$ 에 의한 정의된 freak wave( $FW1$ )과 더불어  $H_s$ 에 의해 정의된 freak wave( $FW2$ )를 검토하였다.  $FW1$  확률이  $FW2$  확률 보다 2.5배 정도 크게 나타났다. 유의파첨도가 동일한 경우에는  $H_s$ 가 커질수록 freak wave 발생 확률이 낮아진다. 그러나  $H_s$ 가 동일한 경우 유의파첨도가 커질수록 freak wave 발생 확률이 높아진다. 최대파고  $H_{max}$ 의 전체 평균은  $S_s$ 의 값이 증가함에 따라 조금씩 증가한다. 그러나 freak wave가 발생한 경우 발생한 freak wave의 평균파고는  $S_s$ 에 관계없이 일정한 값을 가진다. 그리고  $FW1$ 의 파고의 평균은  $H_s$ 의 2배 정도가 된다.  $S_s$ 가 일정한 경우  $H_s$ 가 증가하면 파형의 평균 첨도(kurtosis)가 증가하며  $H_s$ 가 일정한 경우  $S_s$ 가 증가하면 첨도의 평균은 감소한다. 첨도의 최대값은  $S_s$



에 따른 변호 양상이 규칙적이지 않은 것을 볼 수 있다.

이상지수  $AI$ 의 평균값은  $H_s$ 와  $S_s$ 에 관계없이 2.11 정도의 값을 가진다. 그리고  $AI$ 의 최대값은 2.5-3.0 사이에 나타난다. 본 논문에서 수행한 시뮬레이션의 전체 모집단의 크기가 1,000,000개 정도로 충분한 크기 인 것을 고려할 때, linear focusing에 의해서 발생한 freak wave의  $AI$ 의 상한 값은 3.0 정도라고 추측할 수 있다. 따라서  $AI$ 가 3.0 이상이 되는 파랑의 경우에는 non-linear focusing을 포함한 다른 원인이 작용한 것으로 생각할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 2008년 홍익대학교 학술연구진흥비에 의해 지원되어 수행되었음.

## 참고문헌

- [1] Compaq 2001, Compaq Visual Fortran version 6.6, Language Reference.
- [2] Faulkner, D., 2001, Rogue waves – defining their characteristics for marine design. In: Olagnon M, Athanassoulis GA (eds) Rogue Waves 2000, Ifremer, France, pp 3-18.
- [3] Guedes, S.C., Chereva, Z., Antao, E.M., 2004, Abnormal waves during Hurricane Camille. J Geophys Res 109.
- [4] Holliday, N.P., Yelland, M.J., Pascal, R., 2006, Were extreme waves in the Rockall Trough the largest ever recorded? Geophys Res Lett 33, L05613.
- [5] Kalif, C., Pleinovsky, E. and Slunyaev, A., 2009, Rogue Waves in the Ocean., Springer.
- [6] Mori, N., 1997, Occurrence properties of giant freak waves in Sea Area around Japan, J. waterway, port, coastal Engineering, July/Aug. pp. 209-213.
- [7] Lawton, G., 2001, Monsters of the deep (The Perfect Wave). New Scientist 170 No 2297, 28-32.
- [8] Liu, P.C. and Pinho, U.F., 2004, Freak waves-more frequent than rare! Annales Geophysics, 22, pp. 1839-1842.
- [9] Liu, P.C. and MacHutchon, K.R., 2006, Are there different kinds of rogue waves? In: Proc 25th Int Conf OMAE 2006, Hamburg, Germany, 2006, OMAE2006-92619:1-6.
- [10] Longuet-Higgins, M.S., 1980, "On the distribution of the heights of sea waves: some effects of non-linearity and finite bandwidth", J. Geophys. Res. Vol 85, C3, pp 1519-1523.
- [11] Yasuda, T. and Mori, N., 1997, Occurrence of giant freak waves in sea area around Japan, J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 123(4), pp. 209-213.
- [12] 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.
- [13] Mori, N., 2004, Occurrence probability of a freak wave in a nonlinear wave field, Ocean Engineering 31, pp. 165-175.
- [14] Rosenthal, W., Lehner, S., Dankert, H. et al., 2003, Detection of extreme single waves and wave statistics. In: RogueWaves: Forecast and Impact on Marine Structures. GKSS Research Center, Geesthacht, Germany.
- [15] Stansell, P., 2004, Distributions of extreme wave, crest and trough heights measured in the North Sea, Ocean Engineering, 32, pp. 1015-1036.
- [16] Stansell, P., Wolfram, J. and Linfoot, B., 2002, Effect of sampling rate on wave height statistics, Ocean Eng. 29, 1023-1047.
- [17] Tucker, M.J., 1991, Waves in Ocean Engineering, Ellis Horwood.
- [18] 김도영, 2010, "비선형 해양파의 통계적 특성에 대한 해석", 한국해양환경공학회지, 제13권 2호, pp. 112-120.
- [19] 신승호, 홍기용, 문재승, 2007, "Freak Wave 특성 파악을 위한 파랑관측 자료의 분석", 한국항해항만학회지 제31권 제6호, pp. 471-478.

2011년 5월 9일 원고접수

2011년 5월 12일 심사수정일자

2011년 5월 12일 게재확정일자