

## 이상고파의 발생 확률분포 특성 연구 Probability Analysis on the Occurrences of Freak Waves

안경모<sup>1</sup>, 천세현<sup>2</sup>, 김성경<sup>3</sup>

Kyungmo Ahn<sup>1</sup>, Se-Hyun Cheon<sup>2</sup> and Sung-Kyung Kim<sup>3</sup>

### 1. 서 론

해안 및 해양구조물의 설계 및 유지관리에 있어 불규칙파랑의 통계학적 특성을 정확하게 파악하여 설계에 반영하는 것은 해안구조물의 안정성 및 위험도 분석에 있어 매우 중요하다.

최근 이상고파에 의해 선박 또는 해양구조물이 훼손되거나 바닷가에서 낚시꾼이나 여행객이 목숨을 잃는 사고가 발생하여 이상고파의 발생원인 과 예측가능성에 대한 관심이 증가하고 있다.

이상고파는 freak waves 또는 rogue waves를 뜻하며 일반적으로 유의파고의 2배 이상되는 파고를 지칭한다. 즉 최대파고( $H_{max}$ )가 유의파고( $H_s$ )의 비가 2 이상이 되면 ( $H_{max}/H_s \geq 2$ ) 이상고파로 정의한다.

이상고파에 대한 전반적인 검토가 2000년도에 열린 Rogue Wave Conference에서 있었으며 (Olagnon and Athanassoulis, 2000), 이상고파의 발생원인으로 파랑성분 간의 비선형간섭 (nonlinear wave-wave interactions)이 가장 주된 원인으로 지목된 바 있다.

Mori(2004)는 파고분포의 첨도(Kurtosis)값이 커질수록 이상고파의 발생빈도가 높아진다고 예측하였으며, 파수가 250개 일 때의 이상고파의 발생확률은 Rayleigh 분포함수를 이용할 경우 저평가 된다고 주장하였다. 또한 첨도(kurtosis,  $\mu_4$ )와 왜도(skewness,  $\mu_3$ )를 매개변수로 하는 이상고파의 발생 확률분포함수를 제안하였다.

본 논문에서는 미국 North Carolina의 미육군 공병단의 Field Research Facility에서 ARSLOE

프로젝트 중에 측정된 파랑자료를 분석하여 이상고파의 발생확률을 추정하였다.

### 2. 이상고파의 발생확률

#### 2.1 이상고파의 발생 확률분포함수

이상고파의 발생 확률분포는 극치파고(extreme wave height)의 확률분포함수로부터 분석할 수 있다. Ahn (2004)에 의해 제안된 극치파고 분포함수는 비선형이 강한 비정규분포과정 (non-Gaussian random processes)의 파고분포에도 적용할 수 있는 함수로서 아래와 같다.

$$g(H_n) = n \left[ f(H) \{F(H)\}^{n-1} \right]_{H=H_n}$$

여기서  $n$ 은 파고의 수이며,  $H_n$ 은  $n$ 개의 파고 중의 극치파고값을 나타낸다.  $f(H)$ 와  $F(H)$ 는 파고의 확률분포함수 및 누적확률분포함수이며, 파고의 확률분포함수  $f(H)$ 는 아래와 같다.

$$f(H) = A \exp \left\{ -\lambda_2 \left( H + \frac{\lambda_1}{2\lambda_2} \right)^2 \right\}$$

여기서  $A = \exp(-\lambda_0 + \lambda_1^2/4\lambda_2)$  이며  $\lambda_0$ ,  $\lambda_1$ , 그리고  $\lambda_2$ 는 파고의 0, 1, 2차 모멘트로부터 구해지는 매개변수이다.

#### 2.2 ARSLOE 파랑자료의 분석

미국 North Carolina의 Duck에 위치한 미육군 공병단 Coastal Engineering Research Center (CERC)의 Field Research Facility에서 1980년에 2개월간 광범위한 현장 파랑관측이 Atlantic

1 발표자: 한동대학교 공간환경시스템공학부 교수

2 한동대학교 건설환경연구소 연구원

3 한동대학교 공간환경시스템공학부 대학원생

Ocean Remote Sensing Land Ocean Experiment (ARSLOE) Project라는 이름으로 이루어졌다. 이 프로젝트를 통해 수집된 자료 중에 1980년 10월 24일 00:15부터 10월 26일 00:30 시까지 온대성 저기압이 통과하면서 생성된 폭풍 파랑자료를 중심으로 분석하였다. 이 시간동안 연속적으로 기록된 파랑자료는 20분 길이의 134개의 시계열 자료로서, 파랑자료는 해안선으로부터 12km 떨어진 지점에서부터 60m 지점까지 8개의 파고측정지점의 파고계에서 연속적으로 측정되었다. 8개의 파고계는 해안선으로부터 60m 떨어진 수심 약 2m인 지점부터 해안선으로부터 약 12km 떨어진 수심 약 20m까지 다양한 수심에 설치되었다.

8개의 파고계에서 측정된 파랑자료는 20분의 길이를 가진 134개의 시계열자료로서 총  $8 \times 134 = 1072$ 개이다. 20분 길이의 시계열 자료는 샘플링주파수 4Hz의 4800개의 해수면자료로 이루어져 있다. 전체파랑자료 중에 이상고파는 파랑측정지점 F710의 수심 21m, 해안선으로부터 12km 떨어진 지점에서만 6개가 발견되었다.

Table 1.은 발견된 6개의 이상고파의 파고 ( $H_{max}$ )와 이상고파의 주기 그리고 이상고파를 포함하고 있는 시계열 자료의 파수, 평균파고, 평균

주기, 유의파고( $H_s$ ),  $H_{max}$ 와  $H_s$ 의 비율,  $H_{rms}$ , 그리고 해수면의 왜도와 첨도를 발생시간 별로 정리한 것이다.

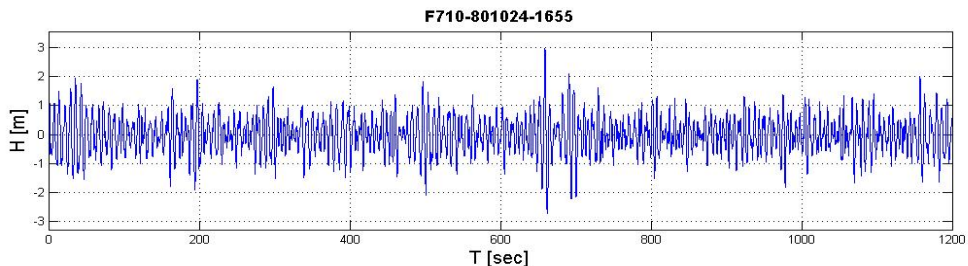
Fig. 1은 이상고파가 포함된 시계열자료 6개 중의 하나이다. Mori (2004)와 Mori and Yasuda (2002)는 첨도와 왜도를 매개변수로 하는 이상고파의 확률분포함수를 제안하였다. 본 논문에서는 Ahn (2004), Mori (2004) 그리고 Rayleigh 확률분포함수를 이용하여 이상고파의 발생확률을 구하여 비교하였다.

Fig. 2는 6개의 이상고파 중에서  $H_{max}/H_s$ 의 비가 가장 컸을 때인 10월 24일 16:55 일 때의 파고의 분포함수를 Rayleigh, Ahn, 그리고 Mori의 확률분포함수로 나타낸 것이다. Fig. 3은 위의 경우의 극치확률분포함수를 나타낸 것으로 이상고파가 발생할 확률은 Rayleigh, Mori, Ahn의 순으로 낮은 것을 알 수 있다.

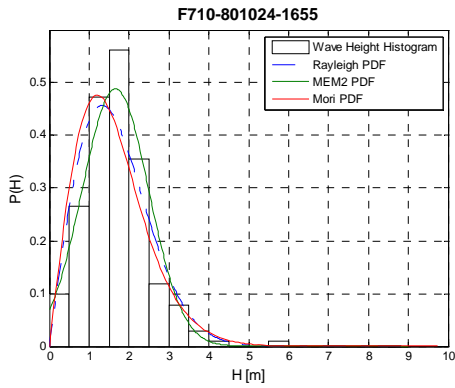
Fig. 4는 134개의 파랑시계열 자료에서 구한  $H_{max}/H_s$ , Rayleigh, Ahn, 그리고 Mori의 확률분포함수로부터 구한 이상고파가 일어나는 확률, 그리고 왜도와 첨도를 발생시간 순으로 도식한 것이다.

**Table 1.** Summay statistics for the freak waves

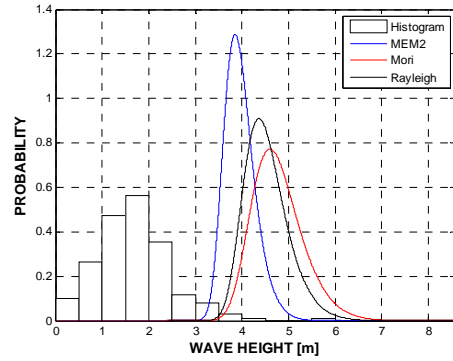
	Oct 24, 02:35	Oct 24, 16:55	Oct 24, 18:35	Oct 25, 00:35	Oct 25, 01:35	Oct 25, 09:35	Average
Number of Waves (n)	228	195	198	174	180	159	189
Mean wave height (m)	1.11	1.75	1.82	1.90	1.92	2.68	1.86
Mean wave period (s)	5.25	6.17	6.07	6.91	6.66	7.49	6.43
Hmax (m)	3.17	5.71	5.32	5.20	5.72	9.09	5.70
Wave period of Hmax (s)	5.50	6.75	7.00	7.75	7.75	9.75	7.41
Hs (m)	1.57	2.56	2.63	2.59	2.83	4.19	2.72
Hmax / Hs	2.01	2.23	2.02	2.00	2.02	2.16	2.07
Hrms	1.22	1.91	1.98	2.03	2.12	2.99	2.04
skewness	0.0000	-0.0149	0.0112	-0.0055	-0.0041	0.0708	0.0095
kurtosis	3.0457	3.4145	3.2805	2.9736	3.2330	3.5032	3.2417



**Fig. 1.** Time series of wave record which contains freak wave measured 16:00, Oct. 24, 1980 at Station F710.



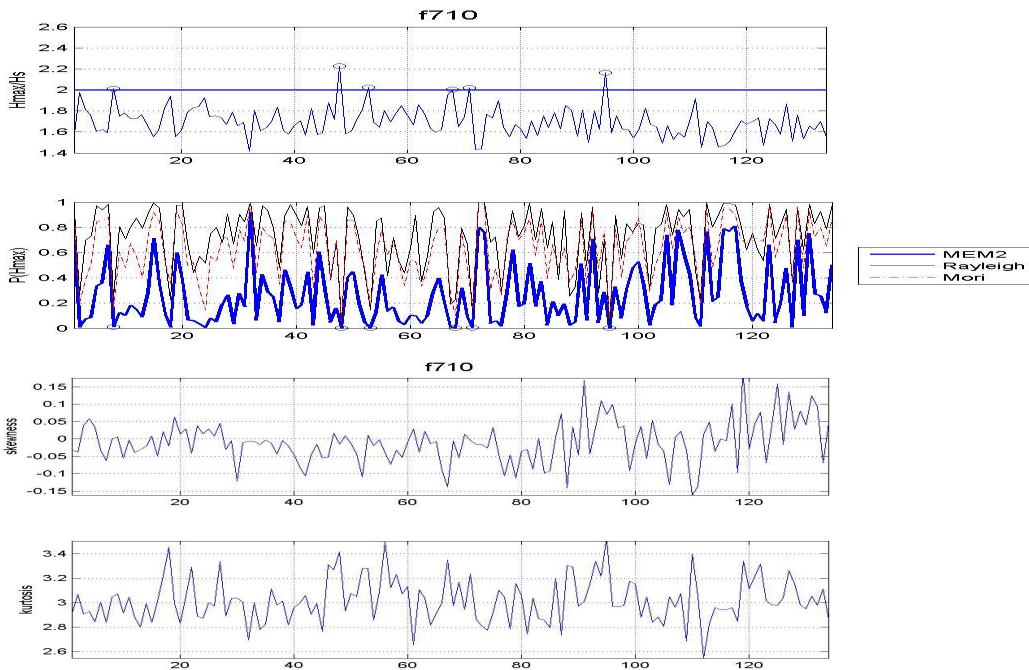
**Fig. 2.** Probability Density functions of wave heights including Rayleigh, Ahn, and Mori with the histogram obtained from data



**Fig. 3.** Probability density function of extreme wave heights including Rayleigh, Ahn, and Mori with histogram of wave heights

**Table 2.** Probability of occurrence of freak waves calculated from the probability density function of Ahn, Rayleigh, and Mori, respectively.

	Oct 24, 02:35	Oct 24, 16:55	Oct 24, 18:35	Oct 25, 0035	Oct 25, 01:35	Oct 25, 09:35	Average
MEM2 (%)	1.04111	0.00637	0.27312	0.09243	0.47119	0.04552	0.32162
Rayleigh	23.82025	2.72033	14.42578	22.93527	12.10403	1.53903	12.92412
Mori	15.30636	5.98599	18.72807	9.93475	16.42431	7.66097	0.53594



**Fig. 4.** Sequences of  $H_{max}/H_s$ , probability of occurrence of freak waves, skewness, and kurtosis of each wave record.

위의 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 이상고파가 일어나는 확률은 Ahn의 경우 가장 작은 것을 알 수 있다. 이상고파가 일어날 때의 왜도와 첨도를 그림에서 비교해 볼 수 있는데, 왜도보다 첨도가 이상고파의 발생과 관련이 조금 더 있는 것을 알 수 있다. 그러나 첨도가 높더라도 이상고파가 발생하지 않는 경우가 있으므로 첨도가 높을수록 이상고파가 발생할 확률이 높다고 단정할 수는 없다고 생각된다. 특히 이상고파는 수심이 가장 깊은 곳에서만 발생했으므로 천해파의 경우에는 첨도가 높더라도 이상고파가 발생하지 않았다는 사실을 알 수 있다.

2002년도의 Rogue Wave Conference에서 이상고파의 발생원인을 파랑성분 간의 비선형간섭(nonlinear wave-wave interactions)이 가장 주된 원인이라고 지목한 바 있는데, 이는 본 자료의 분석과는 배치된다. 본 파랑자료의 분석에 의하면 파랑성분간의 비선형 간섭이 가장 큰 천해에서 이상고파가 전혀 발생하지 않았으며 비선형 간섭이 가장 적은 심해에서만 이상고파가 발생하였다.

### 3. 결 론

수심이 약 2m인 천해로부터 수심 약 20m 인 중간수심까지 8개의 파고계를 설치해 측정된 폭풍에 의한 파랑자료를 분석하여 이상고파의 발생확률을 구하고 이상고파의 발생원인에 대해 분석하였다.

파랑성분간의 비선형 간섭이 가장 큰 천해에서는 이상고파가 발생하지 않았으며, 수심이 가장 깊은 곳에 설치한 파고계에서만 이상고파 6개가 발생되었다. 또한 첨도와 왜도가 큰 천해에서 이상고파가 발생하지 않은 반면 첨도와 왜도가 상대적으로 작은 가장 깊은 수심에서만 이상고파가 발생했음을 알 수 있다. 이는 기존의 이상고파의 발생원인에 대한 연구결과와는 배치됨을 알 수 있다.

Rayleigh, Ahn, 그리고 Mori의 파고확률분포함수에 의해 제시된 극치파고의 확률분포함수를 이용해 이상고파의 발생확률을 계산하였다. 이중에 Ahn, Mor, Rayleigh 확률분포함수의 순으로 이상고파의 발생확률이 작은 것을 알 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 건설교통부 지역특성화연구개발(C105E1020001-06E020200210)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

- Ahn, K. (2004), Probability distribution of extreme wave heights in finite water depth, Proceedings of the 28th International Conference on Coastal Engineering.
- Olagnon, M. and Athanassoulis, F., (Eds) (2000). Rogue waves, IFRMER, France.
- Mori, N. and Yasuda, T (2002). A weakly non-gaussian model of wave height distribution for random wave train, Ocean Engineering, 29(10), pp 1219-1231.
- Mori, N. (2004). Occurrence probability of a freak wave in a nonlinear wave field, Ocean Engineering, 31, pp 165-175.