

한국 연안의 극치 파랑환경과 Freak Wave의 특성에 관한 연구

류청로·윤홍주*·박종화·김현주

부산수산대학교 해양공학과, *그르노블조셉푸리에대학교 수리환경공학연구소
(1993년 4월 10일 접수)

Extreme and Freak Wave Characteristics in the Coastal Waters of Korean Peninsula

Cheong-Ro Ryu, Hong-Joo Yoon*, Jong-Hwa Park and
Hyeon-Ju Kim

Department of Ocean Engineering, National Fisheries University of Pusan, Korea

**Laboratoire detudes des transferts en hydrologie et environnement,*

Université Joseph Fourier de Grenoble, France

(Manuscript received 10 April 1993)

Abstract

Extreme environments and freak wave characteristics in the coastal waters of Korean Peninsula are analyzed using the observed wave data. Freak wave has been intensely emphasized as an important environmental force parameter in several recent research works. However, the mechanism and occurrence probability of freak wave are not clarified. The aims of this study are: to summarize the distribution of extreme environment for wind waves, and to find occurrence probability of freak wave in the coastal waters of Korean Peninsula. These extreme sea conditions are discussed by applying extreme value analysis method, and the statistic characteristics are summarized which can be used to the design and analysis of coastal structures. The mechanism and the occurrence probability of freak wave are also discussed in detail using wave parameters in considered with wave deformation in the coastal waters.

Key Words : extreme wave, freak wave, extreme analysis, design wave, probability density.

1. 서 론

해안 및 해양구조물의 설계, 배치 및 기능의 극대화는 외력환경의 합리적인 해석·평가로 부터 시작한다. 특히 해양파는 해양·해안구조물의 설계 및 안정성 평가에 있어서 가장 중요한 외력 인자

이다. 불규칙 해양파를 설계 외력 인자로 도입하기 위한 노력은 유의파 개념으로 부터, 최대파 및 wave grouping 특성 등으로 이어지고 있으며, 최근에는 해난사고 및 연안 시설물의 파괴 원인의 하나로 주목받고 있는 freak wave라고 하는 이상 고파의 해석과 응용에 관심이 모아지고 있다. 이

러한 불규칙 해양파의 외력 인자는 대상 해양구조물의 형식, 제원 등에 따라 달라지기도 한다. 예를 들면 사석이나 소파블록을 이용한 해안구조물의 설계 및 안정성 평가 등은 주로 유의파를 대상으로 하고 있으며, 선체의 전복이나 대수심 방파제의 직립부의 안정성 평가 등에는 최고파를 대상으로 검토되고 있다. 따라서 효율적인 해안 개발 및 방재 활동을 위해서는 각 해역의 극치 파랑환경의 출현 특성과 합리적인 최고파 산정 방법이 수립되어야 한다. Freak wave는 Bruun (1985)에 의해 해안구조물의 중요한 외력인자로 제기되었고, NATO의 water wave kinematics 심포지움 이후 '최고파가 유의파의 2배 이상인 이상고파'로 일반적으로 불리고 있다(Sand,1990). 그 발생 원인에 대해서는 파군 형성과 관련한 파고분포 특성의 변화(間瀬 外, 1989), 전파하는 파군의 공명간섭(安田 外, 1991) 등이 제기된 바 있으나 그 출현의 복잡성, 자료의 부족 등으로 아직 해명되지 않은 문제가 많은 실정이다.

본 연구에서는 한국 연안 파랑관측소의 관측자료를 이용하여 월최대 유의파고 및 주기에 대한 극치해석을 실시하였고, 한국 연안의 극치 파랑환경의 분포 특성을 밝히고자 하였다. 이들 연안 파랑자료 해석을 통해 합리적인 최고파 산정을 위한 기초적 연구로서 고파의 출현 특성을 분석하였고, freak wave의 출현특성을 검토하였다. 최고파의 출현 특성에 대한 이론분포와 현장자료를 비교·해석하여 이론분포식의 적용성 및 개선 방안에 대해 논의하고자 하였다. 또한, 연안해역에서 freak wave의 출현에 영향을 주는 여러가지 파랑특성 및 변형 인자의 영향을 비교 검토함으로써 freak wave의 발생기구 해명을 위한 현장 기초자료를 제시하고자 하였다.

2. 연안 파랑자료 및 해석 방법

2.1. 연안 파랑자료

우리나라 연안 파랑관측소는 현재 7개소가 운용되고 있으며, 본 연구에서 해석한 대상자료는 1990년-1993년 간의 10개소에서 행한 연속관측

자료와 해양공학상 중요한 고파시의 freak wave 출현 특성을 검토하기 위해 1978년-1982년 간의 16개소에 대한 이상파랑관측자료를 해석하였다. 또한 극치파랑 해석의 경우 이들 자료에 1974년-1977년의 자료를 부가하여 월최대 유의파를 대상으로 해석하였다. 파랑관측소의 위치 및 파고계 형식은 Fig.1과 같고 파고계 설치수심은 평시 연속관측자료의 경우 10m-153m, 이상파랑관측자료의 경우 7.2m-25m로서 천수변형 및 굴절 등의 영향을 받을수 있는 수심이다. 평시 관측자료는 3시간마다, 이상파랑자료는 6시간마다 20분간 관측한 것이며, 각 관측소별 관측기간, 수심, 자료수, 최고파 및 유의파의 파고·주기비는 Table 1에 나타낸 것과 같다.

Table 1. The summary of wave stations and observation results.

Station	Period (yr)	Depth (m)	Number of data set	Number of freak wave	H_{max}/H_s	T_{max}/T_s
Keojin	'80	12.1	49	3	1.623	0.978
Sokcho	'80~'82	14.0	147	2	1.562	1.028
Kangreung	'91~'92	15.0	2834	200	1.639	0.935
Mukho	'78~'81	15.0	143	0	1.685	1.042
Bukpyung	'81~'82	15.0	122	13	1.557	0.952
Samchok	'78~'80	16.0	82	4	1.524	0.936
Donghae	'90~'91	10.0	3301	323	1.691	1.031
Ullung-do	'90~'92	153.0	517	0	1.545	1.009
Hupo	'78~'82	13.0	158	1	1.540	1.020
Pohang	'78, '80	12.0	141	0	1.482	1.008
Pohang	'91~'92	30.0	1899	187	1.695	1.083
Mipo	'78~'82	15.0	107	0	1.451	1.019
Ulsan(1)	'78~'79 '82	12.0	89	2	1.554	0.975
Ulsan(2)	'90	15.0	2323	61	1.626	1.027
Pusan(3)	'80~'82	13.0	96	2	1.571	1.002
Pusan(4)	'90, '92	30.0	899	289	1.976	0.859
Kwangyang	'78, '80	25.0	37	3	1.697	1.209
Yosu(1)	'78, '80	13.0	55	6	1.530	1.089
Yosu(2)	'81, '82	13.5	110	2	1.653	1.248
Yosu(3)	'90~'92	50.0	1967	77	1.641	1.083
Cheju	'80~'82	11.5	216	7	1.531	1.004
Segwipo	'78, '80~'82	10.1	207	3	1.520	1.018
Mara-do	'90~'92	110.0	2071	83	1.621	1.033
Hong-do	'90~'92	40.0	1682	12	1.581	0.999
Gocheong-do	'90~'91	60.0	1082	46	1.633	1.029
Kunsan	'78~'82	7.2	63	6	1.573	1.008
Total			20397	1332		

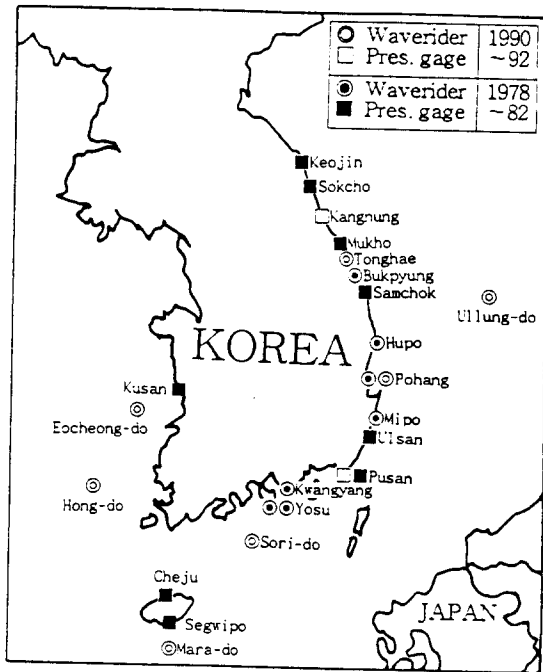


Fig. 1. Wave stations in the coastal waters of Korea.

2.2. 극치 파랑환경의 해석

파랑자료를 통계해석하여 그 변동량의 출현확률을 재현기간의 함수로 표현하여 임의 재현기간의 확률론적 고파를 추론하는 극치통계해석 방법을 사용하였다. 재현기간(return period)은 변수가 특정치보다 크거나 같게 되는 평균 기간(년)이며, 변수가 특정치보다 작거나 같은 확률인 비초과확률로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{T}{r} = \frac{1}{[1 - P(X \leq X_c, N)]} \quad (1)$$

여기서, T는 재현기간(년), $P(X \leq X_c, N)$ 는 N개의 자료 중 크기가 m번째인 자료에 대한 비초과확률, X는 변수로서 파고, 주기 등 해석 대상의 물리량, X_c 는 특정 기준치, r은 자료 간의 평균 시간간격(년)이다. 따라서 파고 등의 비초과확률을 자료의 특성을 잘 반영하는 확률분포함수로 선정하여 대응시킴으로써 임의 변량의 재현주기 또는 임의 재현주기의 극치를 산정해 낼 수 있다.

본 연구에서는 일반적으로 발생확률이 극히 작은 극대, 극소자료의 확률분포 표현에 양호한 것으로 알려진 식(2), (3)과 같은 Gumbel분포와 Weibull분포를 대상으로 적합성을 검토하였다.

$$P(X) = \exp[-\exp\{-\left(\frac{X-\alpha}{\beta}\right)\}]$$

$$-\infty < X < \infty, -\infty < \alpha < \infty,$$

$$0 < \beta < \infty \quad (2)$$

$$P(X) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{X-\alpha}{\beta}\right)^k\right], \quad X > \alpha$$

$$= 0, \quad X \leq \alpha \quad (3)$$

여기서 α 는 location parameter, β 는 scale parameter, k는 shape parameter($0.75 \leq k \leq 2.0$)를 나타낸다.

이 확률분포함수의 적합화는 대상지역의 파고 자료의 출현 특성을 비초과확률로 환산하여 최적 파라미터를 결정함으로써 이루어지며, 그 확률분포함수로 부터 임의 극치의 재현주기를 식(1)에 의해 산정할 수 있다.

한국연안 주요 지점의 월최대 유의파고 및 유의파 주기에 대한 Gumbel분포 및 $k=1.25, 1.5$ 및 2.0의 Weibull분포를 적용·해석하였다. 이러한 극치해석은 조위, 바람 등에 대해서도 적용할 수 있으며, 파랑 이외의 이들 외력인자에 대해서도 이루어졌다.

3. Freak wave의 출현 특성

3.1. Freak wave의 정의와 출현

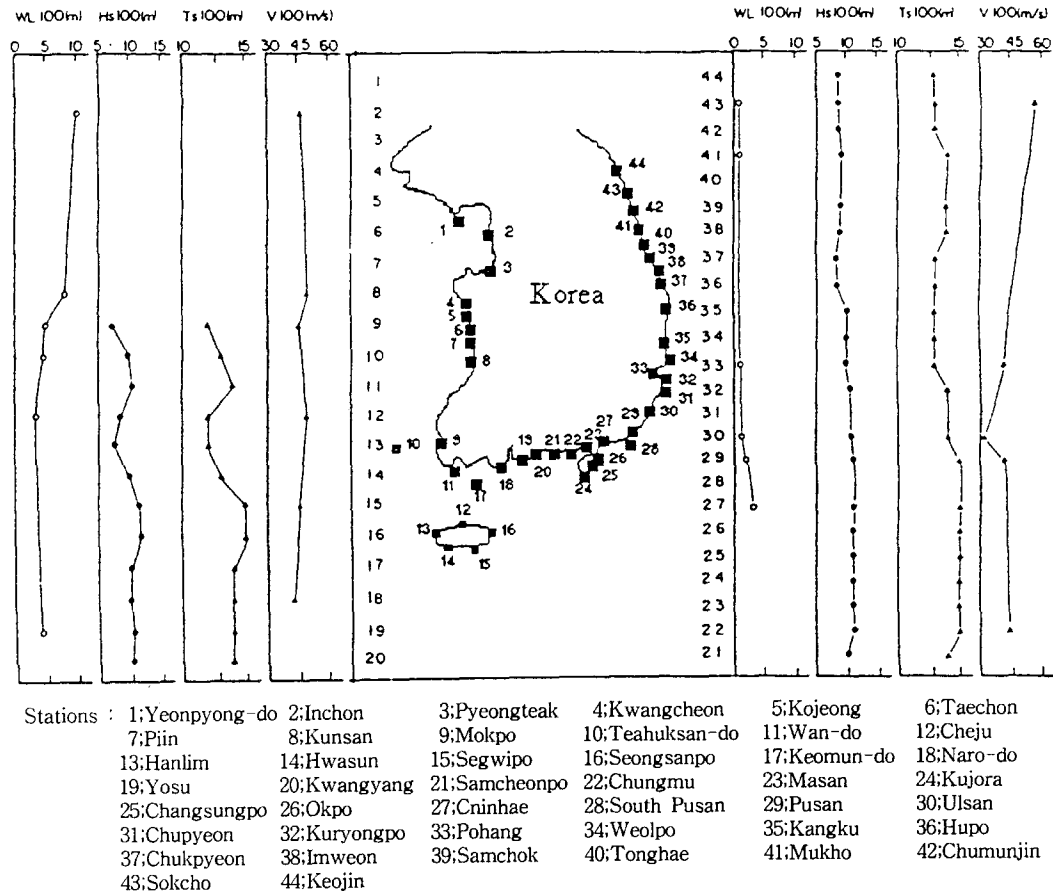
Freak wave에 대한 논의는 Bruun(1985)의 '(1) 매우 큰 파고로서 (2)갑자기 나타나며 (3)출현후 곧 쇠퇴하는 파'라는 정의를 시작으로 하여, Klitting and Sand(1987)는 '(1)파고가 유의파고의 2배 이상이며 (2)전후파가 해당 고파의 1/2 이하인 파로서 (3)파정고가 파고의 65% 이상인 파'로 정의하고 있다. NATO의 water wave kinematics 심포지움 이후 Sand(1990)의 '최고파가

유의파고의 2배 이상인 파'라는 정의가 일반적으로 통용되고 있으며, 이는 최고파고(H_{max})의 추산에 사용되고 있는 $H_{max} = (1.6-2.0)H_s$ 의 관계를 초과하는 이상고파라는 의미에서 일반화된 것으로 생각할 수 있다.

한국 연안의 재현주기 100년에 대한 주요 외력 인자에 대한 극치해석 결과를 Fig.2에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 재현주기 100년의 설계파는 큰 변동을 보이지 않았지만 하계 태풍의 영향으로 제주, 남해 동부 및 동해 남부 해역에서 비교적 높게 나타났다. 연안 파랑관측소 별 최고 파고와 유의파고의 관계를 해석한 결과로 부터 동해, 포항, 여수, 어청도의 예를 Fig.3에 $H_{max} = (1.6-2.0)H_s$ 의 관계와 비교하여 나타내었다. 그림에서 Goda(1985)의 혼성제 직립부 안정성에 대한

설계식의 H_{max} 계산을 위한 권장치인 $1.8H_s$ (실선)를 초과하는 파 뿐만 아니라 $2.0H_{max}$ 이상의 freak wave도 다수 출현하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 freak wave는 유의파고 1m 이하의 잔잔한 바다에서 많이 나타나고 있으나 유의파고 3m 이상의 거친 바다에서도 다수 출현하는 것을 볼 수 있다.

Table 1에 각 관측소별 H_{max}/H_s 및 T_{max}/T_s 의 평균치와 전 자료 수에 대한 freak wave의 출현 수를 나타내었다. 이 표에서 부산에서의 freak wave 출현율이 매우 높았으나 유의파고 1m 이하의 잔잔한 해상에서 주로 나타났으며, 이는 선박 운항 등에 의한 간섭 등으로 고려된다. 이를 제외한 해역별 freak wave의 출현 특성을 보면 동해가 6.68%로 가장 높고, 남해가 3.89%, 제주가



WL100, Hs100, Ts100, V100 : high water level(H.W.L.), significant wave height, significant wave period and maximum wind velocity correspond to return period of 100 years.

Fig. 2. A chart of environmental forces for the coastal waters around Korea.

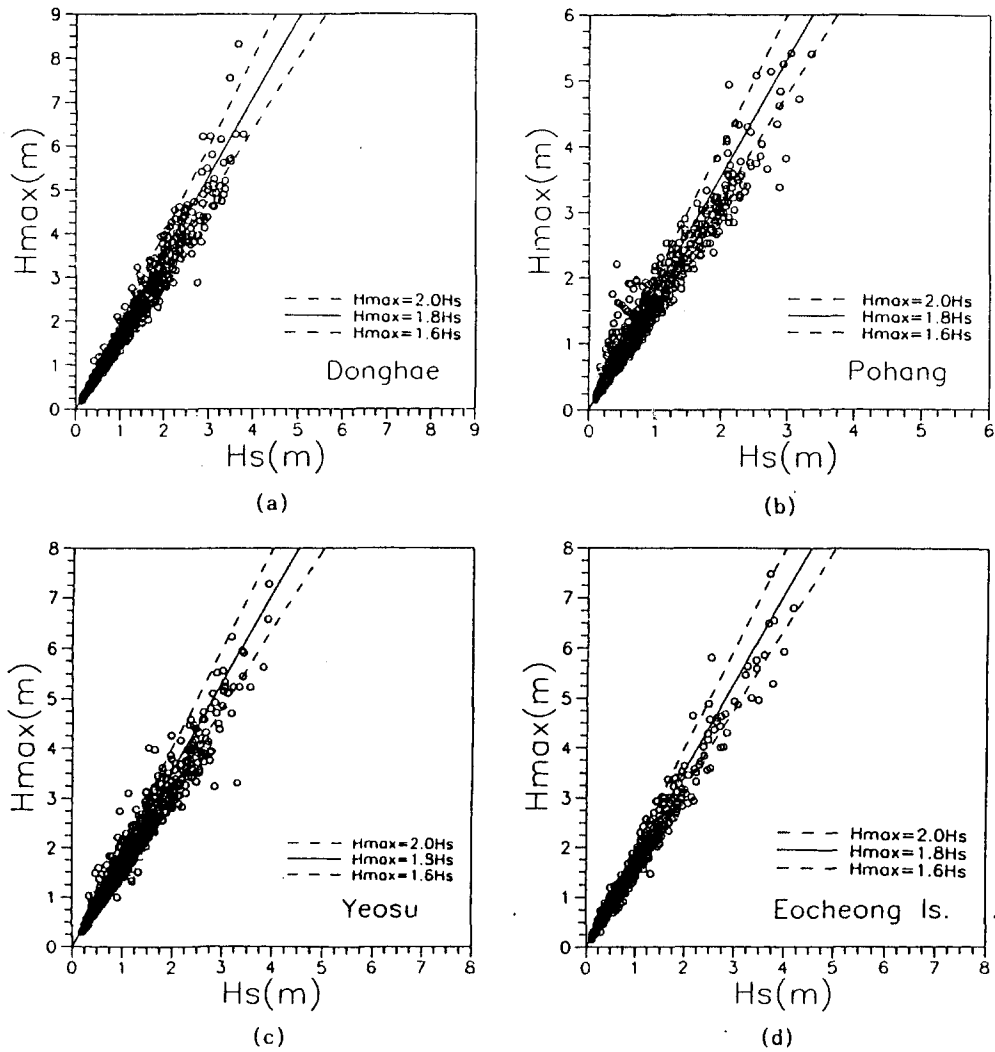


Fig. 3. Typical examples of the relation between maximum and significant wave heights in the coastal waters of Korea.

3.73%, 서해가 2.3%의 순으로 나타났다.

3.2. 최고파의 확률분포 특성

불규칙 해양파의 파고분포는 Rayleigh분포로 비교적 잘 설명되는 것으로 알려져 있으나, 최근 보다 정도 높은 파고분포 예측을 위해 Rayleigh 분포를 일반화한 Weibull분포식의 사용이 강조되고 있다. 파고분포를 기초로 한 최고파의 확률분포는 Rayleigh분포를 적용하면 식(4)와 같이 나타

낼 수 있으며(Longuet-Higgins, 1952), 같은 방법으로 Weibull분포를 적용하면 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p\left(\frac{H_{\max}}{H_s}\right) = 2a^2 \left(\frac{H_{\max}}{H_s}\right) \xi \exp(-\xi)$$

$$\xi = N \exp\left[-\left(a \frac{H_{\max}}{H_s}\right)^2\right] \quad (4)$$

$$p\left(\frac{H_{\max}}{H_s}\right) = n\beta \left(\beta \frac{H_{\max}}{H_s}\right)^{n-1} \xi \exp(-\xi)$$

$$\xi = N \exp\left[-\left(\beta \frac{H_{\max}}{H_s}\right)^n\right] \quad (5)$$

여기서, $a=1.416$ 이며, 현장자료를 이용한 Weibull 분포의 형상모수에 대한 연구로 부터 Foristall (1978)은 $n=2.126$, $\beta=1.362$ 을 제안한 바 있다. 한편, 초과확률분포는 식(4)와 식(5)의 적분에 의한 초과확률을 구하고 1에서 뺀으로써 구할 수 있다.

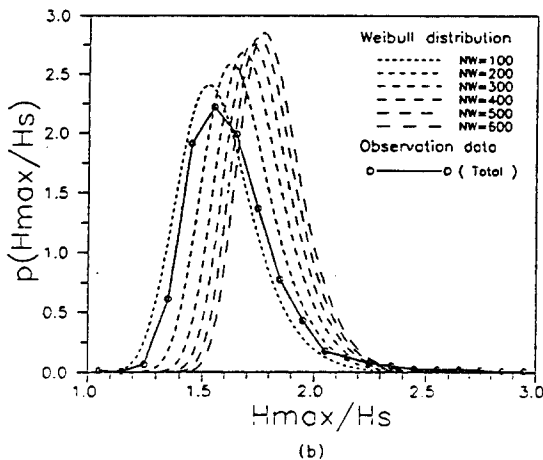
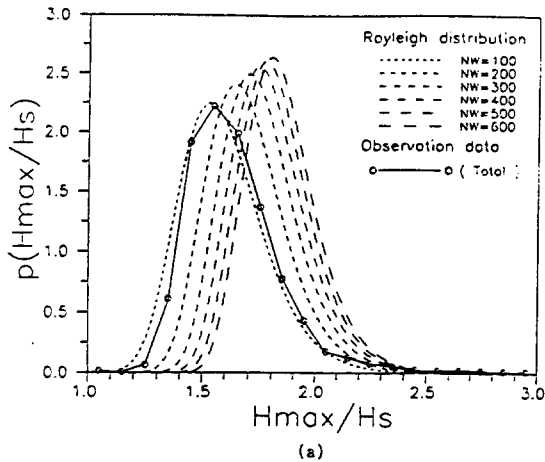


Fig. 4. The comparison between theoretical and field data for relative maximum wave height.

이 최고파고의 확률분포식의 적용성을 검토하기 위해 이론분포와 현장자료를 비교한 것이 Fig. 4이다. 여기서, 점선은 1회 관측기간(20분)동안의 기록파수에 대한 이론 분포이며, 실선이 현장자료로서 평균 기록파수 167파에 대한 분포 특성을

나타내고 있다. 이 그림으로 부터 Weibull분포식에 비해 Rayleigh분포식이 비교적 좋은 대응을 보이고 있음을 알 수 있으나, Goda(1985)에 의해 지적된 것처럼 두 이론분포 모두 $H_{\max}=(1.6-2.0)H_s$ 정도의 고파 출현은 과대평가하는 경향이 있다. 그러나, Fig. 5에서 볼 수 있듯이 이론분포가 $H_{\max}>2.0H_s$ 의 freak wave에 대해서는 과소평가하고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 기록파수가 적을수록 더욱 강해짐을 알 수 있다.

고파의 확률분포함수로 부터 기록파수에 따른 H_{\max}/H_s 의 Rayleigh분포와 Weibull분포를 기초로 한 기대치는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$E\left(\frac{H_{\max}}{H_s}\right) = \frac{\sqrt{\ln N}}{a} + \frac{\gamma}{2a\sqrt{\ln N}} - \frac{\pi^2 + 6\gamma^2}{48a(\sqrt{\ln N})^3} \quad (6)$$

$$E\left(\frac{H_{\max}}{H_s}\right) = \frac{1}{\beta} n\sqrt{\ln N} \left[1 + \left(\frac{\gamma}{n}\right) \left(\frac{1}{\ln N}\right) + \left(\frac{1}{2n}\right) \left(\frac{1}{n} - 1\right) (\ln N)^{-2} \frac{(\pi^2 + 6\gamma^2)}{6} \right] \quad (7)$$

여기서, γ 는 Euler정수로서 0.5772 이다.

Fig. 6은 총 관측자료 및 $H_s>1m$, $H_s>2m$, $H_s>3m$ 의 파랑자료에 대한 각 관측파수 구간별 평균치 및 기대치를 나타낸 것이다. 그림으로 부터 유의파고 1m 이하의 저파고시 관측파수가 적은 120파 정도에서 이론치보다 큰 값을 나타내며, 1m이상의 경우는 대체적으로 파수가 많아짐에 따라 최고파비의 평균치가 증가함을 보였다.

3.3. Freak wave의 확률론적 기대치와 영향인자 분석

Freak wave의 발생기구에 대해서는 파군 형성 파 관련한 파고분포 특성의 변화(間瀬 外, 1989), 전파하는 파군의 공명간섭(安田 外, 1991) 등이 제기된 바 있으나 현장에서의 출현 특성은 매우 복합적인 것으로 생각되며, 발생기구 해명을 위한

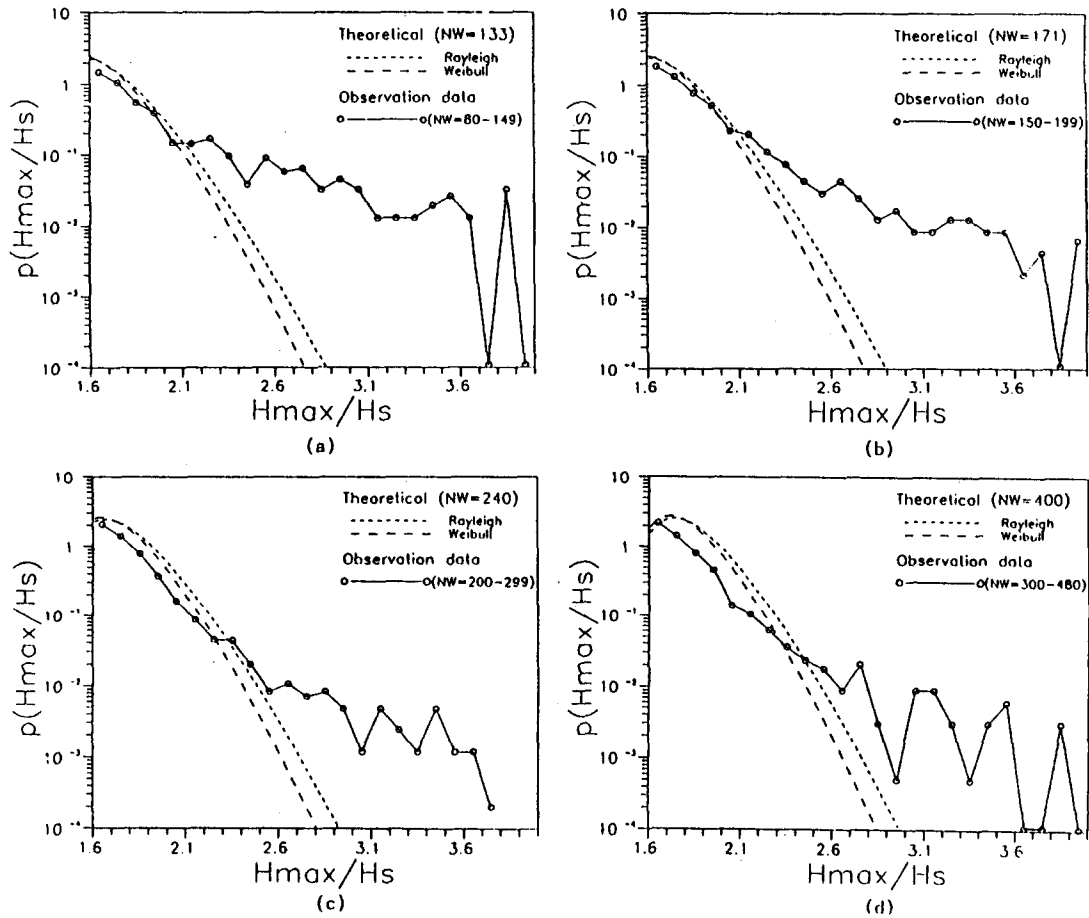


Fig. 5. The variation of probability distribution according to the number of waves analyzed.

노력의 일환으로 현장자료를 사용하여 출현 특성 및 비선형성, 분산성, 통계적 불확정성 등의 영향에 대해 고찰하였다. Fig.7은 $H_s > 1m$ 이상의 자료를 이용하여 관측파수를 20과 간격으로 분할하여 구간별 H_{max}/H_s 의 평균치를 각 영향인자별로 나타내고 기대치와 비교한 것이다. 비선형 파라미터로서 파형경사(H/L)에 대한 H_{max}/H_s 평균치는 파형경사가 급해짐에 따라 분산이 커지는 것으로 나타났고, H_{max}/H_s 의 평균치도 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 양상은 安田 外(1991)의 수치실험에서도 3차간섭의 영향이 $k_p a > 0.1$ (k_p : 탁월파수, a : 진폭)에서 현저하게 나타난 것과 일치하는 것으로 고려된다. 또한, 충분히 발달한 해상(fully developed sea)의 유의파 파형경사인 0.04-0.05에

서는 H_{max}/H_s 평균치가 이론분포에 의한 기대치와 비교적 근사해짐을 볼 수 있다. 분산성 파라미터로서 상대수심(d/L_0)에 따른 H_{max}/H_s 의 평균치는 상대수심이 알아질수록 감소하고 있으며 $d/L_0 < 0.05$ 에서의 낮은 H_{max}/H_s 평균치는 쇄파의 영향을 나타내고 있는 것으로 고려된다. 이것은 상대수심(d/L)이 감소함에 따라 GF(wave groupiness factor)가 감소하며, GF가 감소하면 파고확률분포의 폭이 좁아진다는 間瀬 外(1989)의 결과나 파군과 관계가 깊은 스펙트럼 형상의 첨예도가 감소하면 상대 고파가 감소한다는 류 외(1989)의 결과와 부합하는 것으로 고려된다. 상술한 비선형성과 분산성을 동시에 고려한 비선형성 파라미터라고 할 수 있는 $Ur(=HL^2/d^3)$ 에 따른

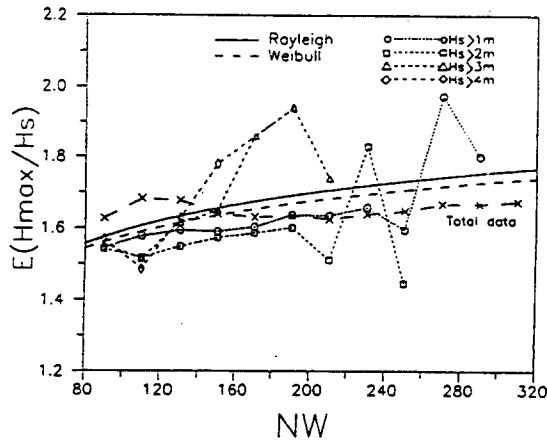
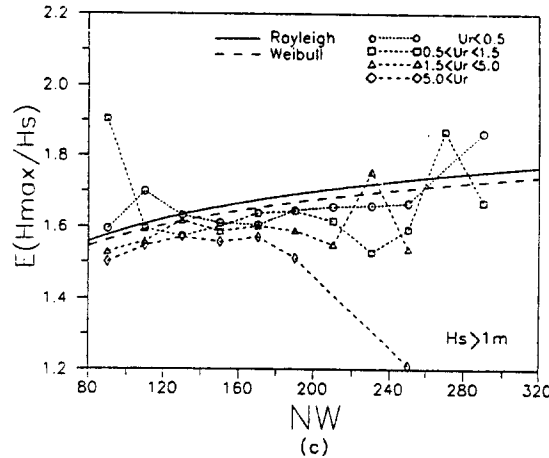
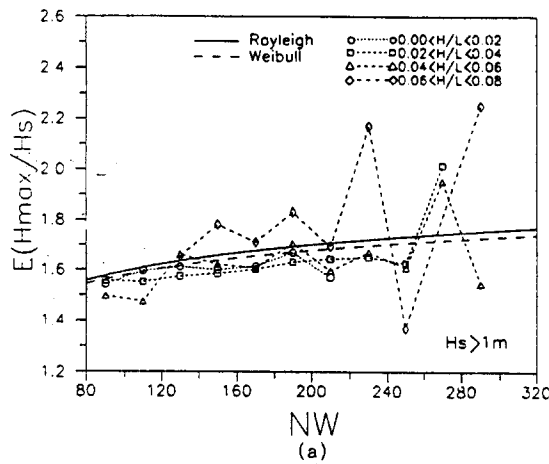


Fig. 6. The variation of mean relative maximum wave height, H_{max}/H_s versus analyzed wave numbers.



H_{max}/H_s 의 평균치의 변동을 보면 명확하지는 않지만 U_r 수가 증가할수록 H_{max}/H_s 평균치는 다소 감소하는 것으로 나타났다. 또한 파랑관측의 분해능으로서 주기당 측정점수(T/dt)의 영향은 분해능이 낮아질수록 평균치는 증가하는 것으로 나타났다. 그럼으로 나타내지는 않았지만 freak wave에 대한 평균치 변동특성도 유사한 양상을 보이지만 관측파수가 작은 부분에서 평균치가 매우 크게 나타났다.

4. 결론

한국 연안의 파랑관측자료를 이용하여 극치 파랑환경과 freak wave의 출현 특성에 관한 기초적 연구를 수행하였다. 또한 그 출현 특성에 미치는

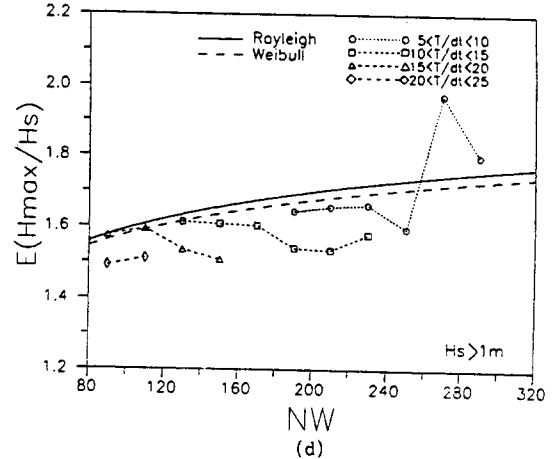
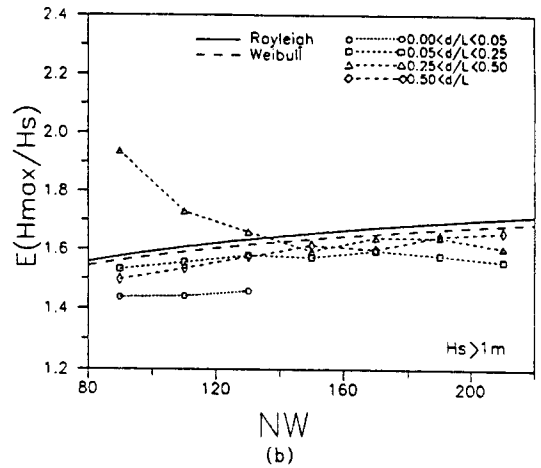


Fig. 7. The variation of expectation and mean value of H_{max}/H_s according to various wave deformation parameters.

주 영향인자에 대한 분석을 실시하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 한국 연안의 재현주기 100년의 극치파랑환경의 분포특성을 극치해석을 통해 검토하고, 유의파에 의한 설계기준의 연안 해역별로 조위 및 풍속과 함께 제시하였다.
- 2) 연안 파랑자료에서 $H_{max}/H_s < 2.0$ 의 최고파 출현은 이론분포와 비교적 잘 일치하나 $H_{max} = (1.6-2.0)H_s$ 에 대해서는 과대평가하는 편이며, Foristal의 Weibull분포에 비해서는 Rayleigh분포가 비교적 적합한 것으로 나타났다. 그러나, 이들 이론분포는 현장의 freak wave ($H_{max}/H_s \geq 2.0$)의 출현 특성을 과소평가하는 경향을 보이며, 기록과 수가 적을수록 그 차이는 커지는 것으로 나타났다.
- 3) Freak wave의 출현에 대한 비선형성 및 분산성의 영향은 명확하지는 않으나 Ursell수 ($U_r = HL^2/d^3$)가 감소할수록, 상대수심(d/L)이 증가할수록 H_{max}/H_s 의 평균치는 증가하였다. 또한, 기록파수(NW)가 증가할수록, 분해능 (T/dt)이 감소할수록 H_{max}/H_s 의 평균치는 증가하는 경향을 보였다.
- 4) 선체 전복에 의한 해난사고나 혼성제 직립부의 안정성 등의 해양구조물 안정성에 대한 신뢰성 설계를 위해서는 freak wave의 특성을 고려한 H_{max} 의 적절한 평가가 필수적인 과제이며, 이를 위한 freak wave의 출현특성을 중심으로 한 발생기구의 기초적인 특성을 한국 연안의 파랑관측자료로 부터 파악하였으며, 구조물 설계 등에의 직접적인 응용을 위해서는 금후 더욱 구체적인 연구가 요망된다.

감사의 글

본 연구는 한국기계연구원 선박·해양공학센터의 위탁연구과제로 수행된 것이며, 부산수산대학교 해양산업개발연구소의 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 류청로, 김현주, 김종욱, 1989, 해양파랑의 통계적 변동성 해석, 한국수산학회지, 22(1), 41-47.
- 해운항만청, 1979-1984, 파랑자료분석보고서(1974-1977, 1978-1982).
- 해운항만청, 1991-93, '90, '91, '92년도 파랑관측자료분석 보고서.
- 間瀬肇, 林克行, 山下隆男, 1989, 波浪観測データに基づく海岸波浪の波群特性の解析, 海岸工学論文集, 第36巻, 124-128.
- 木村晃, 太田隆夫, 1992, 深海域におけるFreak Waveの發生頻度について, 海岸工学論文集, 第39巻, 136-140.
- 安田孝志, 伊藤一教, 森信人, 1991, 非線形不規則波列におけるfreak waveとその特性, 海岸工学論文集, 第38巻, 101-105.
- Bruun, P., 1985, Design and construction of rubble mounds for breakwaters and coastal protection, Elsevier, 938pp.
- Foristall, G.Z., 1978, On the statistical distributions of wave heights in a storm, J. Geophys. Res., Vol.83, No.C5, 2353-2358.
- Goda, Y., 1985, Random sea and design of maritime structures, University of Tokyo Press, 323pp.
- Klinting, P. and S.E. Sand, 1987, Analysis of prototype freak wave, Coastal Hydrodynamics(Ed. Dalrymple), ASCE, 618-632.
- Longuet-Higgins, M.S., 1952, On the statistical distributions of sea waves, J. of Mar. Res., Vol.VI, No.3, 245-265.
- Sand, S., 1990, Report from the working group on breaking and freak wave, Water wave kinematics(Ed. Torum and Gudmestad), NATO ASI series, 17-20.