

해양파랑의 통계적 변동성 해석

柳青魯 · 金鉉周 · 金鍾旭

釜山水產大學 海洋工學科

Analysis on Variation of Ocean Wave Statistics

Cheong-Ro RYU, Hyeon-Ju KIM, and Jong-Wook KIM

*Department of Ocean Engineering, National Fisheries University of Pusan,
Pusan 608-737, Korea*

Using computer simulated irregular waves, variations of ocean wave statistics according to sea state are analyzed, and the reasonable conditions that transform the energy spectrum to individual wave statistics are discussed. Ocean wave statistics varying with sea state are found to respond linearly to the spectral peakedness parameter Q_p and spectrum moments m_n ($n=0, 1, 2, \dots, \infty$). It is clarified that the 2nd-order spectrum moment is a reasonable parameter which represents the wave statistics including wave periods, and that the spectrum analysis should be carried out under the conditions of minimum data length of 10 times of peak period T_p with time lag of $7T_p$ to satisfy the stable condition of wave statistics.

서 론

최근 수산·해양시설물의 설계 및 배치시 외력 인자로서 대표파 (설계파)를 도입함에 따른 문제점을 해결하고 해양의 풍파를 효과적으로 외력인자화 하기 위하여 해양파랑의 특성, 불규칙 파랑과 구조물의 상호작용 등에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다 (柳, 1984; Mansard et al., 1982; Goda, 1985; Rye, 1982). 그러나, 해양파랑의 통계적 특성의 변동성은 해양파랑의 simulation, analysis 및 현장에서의 계측과 그 결과의 응용에 있어 중요한 논란의 대상이 되고 있다 (Burcharth, 1980; Nolte and Hsu, 1979).

본 연구에서는 해양파랑의 통계적인 변동성을 수치파랑 simulation 및 analysis를 통해 해석·정리함으로써 해양파랑의 관측·해석 및 simulation의 신뢰도를 높이는데 기여하고자 하였다. 이를 위해 불규칙파에 대한 외력인자화가 단순한 통계파에 의한 대표파적인 개념으로부터 스펙트럼형상, 파군 특성 등을 고려하는 추세로 변화하는 것을 고려하

여, spectrum형상 등 불규칙성을 달리하는 해양파랑을 수치simulation하여 현장파랑에 대한 대표적 성질의 재현성을 먼저 확인하였다. 다음으로 스펙트럼해석 및 파별해석법을 이용한 해석결과의 비교검토를 통해 파랑통계해석의 안정한계를 구명하였다. 또한 파랑의 해석조건 및 개별파의 정의방법에 따른 파군 (wave grouping)의 변동특성과 해상상태의 변화에 따른 파랑특성의 변동성을 고찰하였다.

해양파랑의 성질과 변동성

해양파랑은 파별해석법과 스펙트럼해석법으로 대별되어 해석되어 왔다. 파별해석에 의한 해양파랑의 통계적 특성은 파고 (H), 주기 (T), 파형경사 (S)의 분포특성으로 논의되어 왔으며, 각각 Rayleigh분포 (Longuet-Higgins, 1952), Weibull분포 (Nolte and Hsu, 1979), Overvick and Houmb (1977)의 분포식 등이 잘 적용되는 것으로 알려져 있다. 이들 결과를 적용하면 통계적인 대표파간의 관

계는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} H_{\max} &= 1.42H_{1/10} = 1.8H_{1/3} = 2.88H \\ T_{\max} &= T_{1/10} = T_{1/3} = (1.1 \sim 1.3)T \\ S_{\max} &= 1.17S_{1/10} = 1.42S_{1/3} = (1.3 \sim 1.9)S \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, 첨자 max는 최대파, 1/10은 1/10최대파, 1/3은 유의파, $\bar{\quad}$ 는 평균파를 의미한다.

최근 파랑의 해석·예보·설계외력의 결정에 있어 해양파랑의 불규칙성을 고려하고자 하는 노력으로 스펙트럼법에 의한 추산 및 해석결과가 응용되고 있으며, 식 (2)와 같은 관계식을 가정함으로써 통계적인 대표파로 변환하여 사용하고 있다.

$$\begin{aligned} H_{1/3E} &= 4.0\sqrt{m_0} \\ T_{E1} &= m_0/m_1, \quad T_{E2} = \sqrt{m_0/m_2} \\ S_{E1} &= 4.0m_1^2/\sqrt{m_0}, \quad S_{E2} = 1.328m_2/\sqrt{m_0} \\ m_n &= \int_0^\infty f^n S(f) df, \quad (n=0, 1, 2, \dots, \infty) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, 첨자 E는 에너지스펙트럼으로부터 계산한 파고, 주기 및 파형경사를 의미하며 본 연구에서는 에너지파라 정의하기로 한다. m_n 은 n차 스펙트럼 모멘트이다.

불규칙파의 시계열 (real time wave train)에서 구조물의 안정성 및 동요특성 등에 중요한 영향을 미치는 파랑특성이 연속적으로 출현하는 것을 파군 (wave group)이라 정의하여, 사석구조물의 안정성 (Ryu and Sawaragi, 1986), 선체의 응답특성 (Mansard et al., 1982) 등의 해석에 응용되었으며 외력인자로서의 중요성이 강조되고 있다. 이의 외력인자화 추세에 따라, 본 연구에서는 구조물의 공진주기 ($T_R = (0.8 \sim 1.2)T$) 및 선박의 전복, 파손 등에 중요한 급경사고파 ($S_{1/3} | H$; heigher wave conditional steep wave) 및 고파 ($H > H_{1/3}$)에 대한 파군을 검토대상으로 하였으며, 지속되는 파수로 정의한 run-length를 파군지표로 사용하였다. 이 파군의 평균길이 (mean run-length, \bar{j}_r)는 random 확률과정을 가정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{j}_{H1/3} &= 1.155 \\ \bar{j}_{TR} &= 2.047 \\ \bar{j}_{(S1/3/\bar{H})} &= 1.244 \end{aligned} \quad (3)$$

이상과 같이 해양파랑의 외력인자와 관련한 통계적 특성과 그 변동성이 수치실험 및 현장조사·연구를 통해 규명되고 있으나 Nolte and Hsu (1979)는 Rayleigh분포가 고파를 과대평가한다고 지적

하였고, Rye (1982)는 에너지파와 파별해석에 의한 통계파간 차이에 대해 분석하였으며 특히 주기의 경우 30%까지의 차이를 나타낸다고 하여 통계적 특성의 변동에 주의할 것을 강조한 바 있다.

또한 Foristall (1978)은 현장조사·연구로부터

$H_{1/3E} = 3.8\sqrt{m_0}$ 의 관계를 주장하였다. 이러한 차이는 식 (1), (2)의 이론적 관계가 narrow band spectrum을 가정하고 추론되었기 때문이다. 스펙트럼형상을 고려하기 위하여 Loukakis (1970)는 spectrum width parameter ϵ 을 식 (4)와 같이 정의하여 $H_{1/3E} = 4\sqrt{m_0}\sqrt{1-\epsilon}$ 으로 나타내었다.

$$\epsilon = \sqrt{1 - m_2^2 / (m_0 m_4)} \quad (4)$$

그러나, Rye (1982)는 수치해석을 통해 ϵ 이 스펙트럼의 고주파수영역 cut-off 주파수 선택에 크게 영향을 받기 때문에, 식 (5)와 같은 spectrum peakedness parameter Q_p 가 보다 안정된 파라미터임을 보였다.

$$Q_p = 2 \int_0^\infty f S^2(f) df / m_0 \quad (5)$$

한편, 고파의 파군형상에 대한 현장조사·연구로부터 유의파보다 큰 고파의 평균파군길이 $\bar{j}_{H1/3}$ 를 Rye (1982)는 1.35, Goda (1985)는 1.42로 보고한 바 있으며, 최장파군길이 (maximum run-length) $X_{H1/3}$ 에 대해서는 Goda (1985)가 6으로 보고한 바 있으나 많은 연구자들이 서로 다른 연구결과를 보고하였다. 이들 결과로부터 그 변동 기구를 확실히 해야 할 필요성과 함께 식 (3)으로 나타낸 전후파간의 상관성을 무시한 이론치보다 파군형성이 강하게 나타난다는 공통점을 발견할 수 있다.

해양파랑의 수치simulation

심해역의 풍파를 대상으로 하여, 1지점 파형을 성분파합성법으로 simulation하였다. 그 조건은 柳·金 (1987)이 제시한 발생파의 안정한계를 고려하여 다음과 같이 결정하였다.

주파수 범위	: $f/f_p = 0.6 \sim (2.6 - 4.0)$
성분파수	: $M = 100 \sim 600$ 성분파
샘플링 시간간격	: $\Delta t = 1/20 f_p$
발생파수	: $N = 600$ 파

위상스펙트럼은 무상관 난수를 적용하였고, 분산스펙트럼은 식 (6)과 같은 JONSWAP형을 가정하였다.

$$S(f) = \gamma^8 \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp(-5/4(f/f_p)^{-4}) \quad (6)$$

$$\beta = \exp[-(f-f_p)/2\sigma^2 f_p]$$

$$\sigma = 0.07, \text{ for } f \leq f_p$$

$$\sigma = 0.09, \text{ for } f \geq f_p$$

여기서, γ 는 스펙트럼 첨예화계수이며, α 는 Phillips상수로서 0.0081이다. 본 연구에서는 대부분의 해상상태를 포함할 수 있도록 스펙트럼 첨예화계수 $\gamma=1\sim 9(Q_p=2.0\sim 5.4)$ 의 값을 택하였으며, 총 60회의 실험결과를 분석하였다. 각 발생파는 현장파랑의 범위내에서 설정한 목표스펙트럼의 재현성 및 종래 연구결과에서 잘 알려진 해양파랑의 통계적 특성에 대한 재현성을 확인한 후 해석하였다.

해석방법 및 그 안정한계

Auto correlation을 이용한 스펙트럼해석에 있어서 샘플링시간간격 (sampling time interval, Δt), 파랑기록시간 (length of wave record, t), 최대지체시간 (maximum time lag, τ)의 설정이 중요하며, 그 조건에 따라 해석결과의 변동이 심함에도 불구하고 해석조건에 대한 안정한계는 연구가 미진한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 공학적으로 중요한 파랑에너지를 나타내는 스펙트럼 0차모멘트 m_0 와 스펙트럼첨예도 파라미터 Q_p 에 대한 안정한계를 분석하였다. 샘플링시간간격은 현재 많이 사용되고 있는 현장파랑의 기록시간간격인 0.5초로 하였고, 1Hz까지의 스펙트럼을 수면변동 시계열의 상관계수를 Fourier 변환하여 계산하였다. 한편, 스펙트럼해석의 안정한계실험에서는 불규칙파랑의 시뮬레이션조건도 해석조건과 동일하게 고려하였다.

해석결과에 대한 Fig. 1, Fig. 2를 보면 Q_p 는 $\tau \leq 7T_p$, 파랑의 기록시간 $t=50T_p$ 이상으로 할때 안정된 값을 보이며, 이 Q_p 의 값은 $\gamma=7$ 의 경우 $7T_p$ 이하, $\gamma=1$ 의 경우 $9T_p$ 이하의 최대지체시간에서 목표 spectrum의 Q_p 와 같게되며, t 를 작게 할수록 점차 감소하는 양상을 보이고 있다. 또한 파랑기록시간 $t \geq 100T_p$ 일때 안정된 값을 보인다.

파별해석법의 통계적 안정성에 영향을 미치는 해석조건은 개별파의 정의방법 및 샘플링파수 (simulation에 있어서는 발생파수)로 볼 수 있다. 해양파랑에 대한 대부분의 현장관측은 $t \approx 15\sim 20$ 분

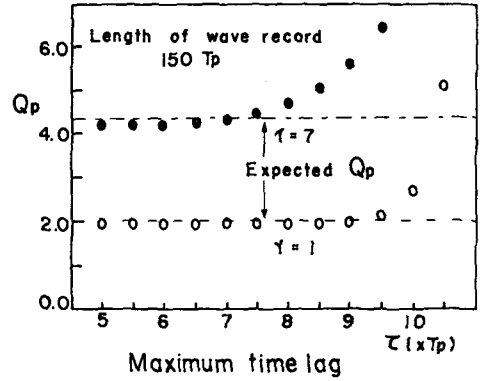
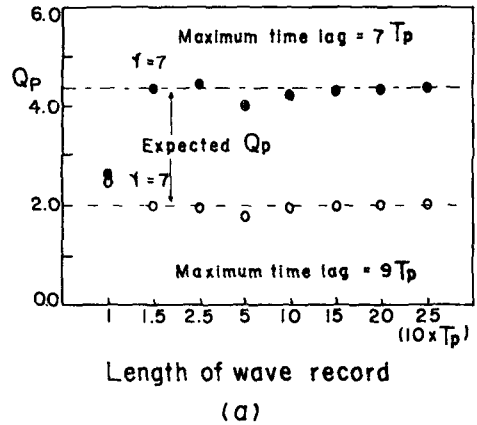
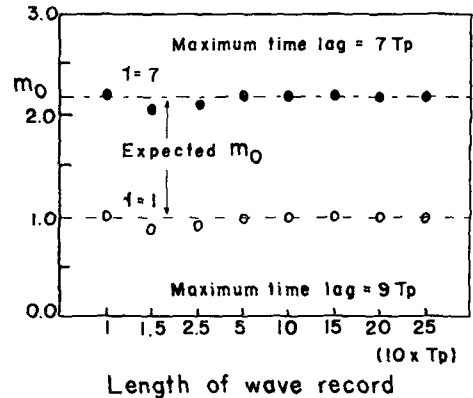


Fig. 1. Variation of spectral peakedness parameter Q_p according to the maximum time lags.



(a)



(b)

Fig. 2. Variation of Q_p (a) and m_0 (b) according to the length of wave record.

정도로 행해지고 있으며, Miguel과 Gimenez-Curto (1985)는 실험 및 현장조사·연구를 통해 이 관측 시간이 유의파고 및 주기를 다루기에는 충분한 기록시간임을 확인하였다. 반면, 合田 (1987)는 이 기록시간이 파랑통계치에 대해 최고 10%까지의 불확정성이 포함될 수 있다고 지적하였다. 柳 · 金 (1987)는 수치실험조건의 안정한계에서 파군을 비롯한 대부분의 통계적 특성을 만족시키기 위해서는 이 관측시간의 4배가 필요함을 보고하였으므로, 이와같은 통계적 안정조건을 충분히 고려하여 해

석해야할 필요가 있다.

파별해석법의 개별파를 정의하는 방법으로는 zero-up crossing, zero-down crossing, crest to crest, trough to trough법이 있다. 일반적으로 zero-up crossing법이 사용되어 왔지만, 쇄파대부근의 천해역에서는 zero-down crossing법이 적절하다는 연구 보고도 있다 (Burcharth, 1980). 본 연구에서는 이들 4개의 개별파 정의방법을 각각 적용하여 동일한 파랑의 시계열에 대하여 해석하였으며, 그 결과 얻은 통계적 변화특성은 Table 1에 보인 바와 같다.

Table 1. The difference of wave statistics and wave grouping parameters according to the definitions of individual wave

Parameters	Definition of individual wave							
	Zero-up crossing		Zero-down crossing		Crest to crest		Trough to trough	
	Mean	S. D	Mean	S. D	Mean	S. D	Mean	S. D
$H_{1/3}/H_{1/3E}$	0.963	0.011	0.962	0.013	0.963	0.011	0.962	0.013
$H_{1/3}/H$	1.578	0.019	1.578	0.018	1.578	0.019	1.578	0.018
H_{max}/H	2.736	0.125	2.709	0.115	2.736	0.125	2.709	0.115
$\overline{j}_{H1/3}$	1.856	0.487	1.714	0.297	1.856	0.487	1.714	0.297
$\overline{X}_{H1/3}$	5.183	1.921	4.901	1.759	5.183	1.921	4.901	1.759
T/T_{E1}	0.961	0.007	0.959	0.008	0.961	0.007	0.959	0.021
T/T_{E2}	1.001	0.007	1.012	0.036	1.001	0.007	1.012	0.032
$T_{1/3}/T$	1.131	0.031	1.130	0.033	1.112	0.042	1.119	0.026
T_{max}/T	1.114	0.046	1.104	0.040	1.094	0.077	1.222	0.362
j_{TR}	2.241	0.481	2.266	0.420	2.097	0.290	2.762	2.042
X_{TR}	8.583	2.168	8.600	2.123	7.883	1.777	7.187	2.548
S/S_{E1}	1.216	0.035	1.219	0.039	1.241	0.037	1.243	0.037
S/S_{E2}	1.120	0.019	1.121	0.020	1.145	0.020	1.146	0.019
$S_{1/3}/S$	1.247	0.072	1.245	0.077	1.281	0.056	1.278	0.059
S_{max}/S	2.184	0.218	2.190	0.177	2.213	0.274	2.2*1	0.270
$\overline{j}_{(S1/3, \bar{H})}$	1.332	0.094	1.308	0.112	1.277	0.075	1.256	0.056
$\overline{X}_{S1/3, \bar{H}}$	4.156	1.958	3.700	0.458	3.300	0.632	3.300	0.494

S. D. means standard deviation ; X means maximum run-length and others are the same as eq. (1), (2) and (3).

여기서 최대파와 파군형성은 개별파의 정의 방법에 따라 유의할 만한 변동을 나타내는 것을 알 수 있다. 고파와 급경사고파의 파군형성은 zero-up crossing법에 의한 해석시 큰 값을 나타내며, 공진 주기의 파군형성은 trough to trough 법에 의한 해석시 큰 값을 나타내었다. 통계파와 에너지파의 관계를 논의할 때는 zero-up crossing법을 사용할 때 가장 좋은 대응관계를 보이며, 에너지 스펙트럼으로부터 주기를 계산할 때는 식 (2)의 $\overline{T_{E2}}$ 를 사용하는 것이 개별파해석의 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

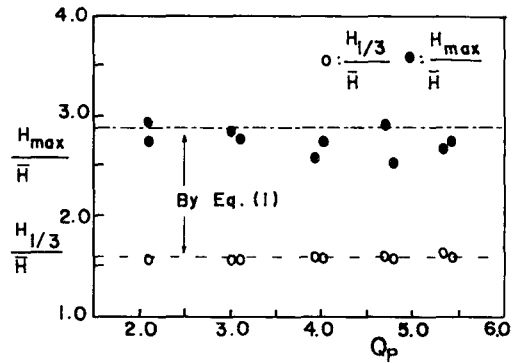
대표파와 Spectrum형태와의 관계

해양파랑의 통계적 특성은 주로 narrow band spectrum을 가정하고 추론되었으나, 해양파랑의 스펙트럼은 wide band를 가지는 다양한 형상으로 나타나고 있다. 이러한 spectrum형상효과를 해양파랑의 통계치 계산에 고려하기 위해서 주로 사용하여 온 spectrum width parameter ϵ 과 spectrum peakedness parameter Q_p 및 γ 에 따른 통계적 대표파간의 관계, 에너지파와 파별해석법으로부터 구한 통계파간의 관계, 파군형성 등의 변화를 고찰한 결과, 가장 선형적인 관계를 보인 Q_p 에 따른 통계적 변동특성을 나타낸 것이 Fig. 3이다. 이 그림에서 Q_p 가 증가함에 따라 최대파의 파고 및 주기는 감소하고 파형경사는 증가하는 양상을 볼 수 있다. 이 파별해석에 의한 통계파와 에너지파의 관계에 대한 Q_p 의 영향은 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 Q_p 가 증가할수록 통계파와 에너지파는 일치해가는 경향을 보이며, 이는 식 (7)과 같은 회귀식으로 나타낼 수 있다.

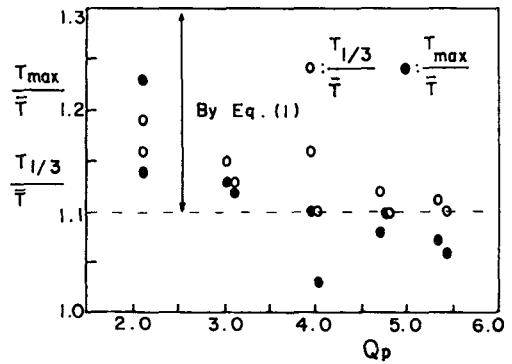
$$\begin{aligned}
 H_{1/3} &= H_{1/3E} = 4\sqrt{m_0} (0.0112 Q_p + 0.9147) \\
 T &= \overline{T_{E2}} = \sqrt{m_0/m_2} (-0.0211 Q_p + 1.0909) \quad (7) \\
 S &= \overline{S_{E2}} = 1.328m_2/\sqrt{m_0} (-0.0405 Q_p + 1.2575)
 \end{aligned}$$

Fig. 5, 6은 본 연구에서 정의한 고파, 공진주기 및 급경사고파의 평균파군길이 (mean run-length) 및 최장파군길이 (maximum run-length)에 대한 Q_p 의 영향을 나타내고 있으며, 스펙트럼 형상파라미터로서 Q_p 가 파군의 표현에 유용함을 잘 보여주고 있다. 이들 경향으로부터 고파, 공진주기 및 급경사고파의 파군형성은 Q_p 에 대한 선형함수로서 식(8)~식(13)과 같이 표현할 수 있다.

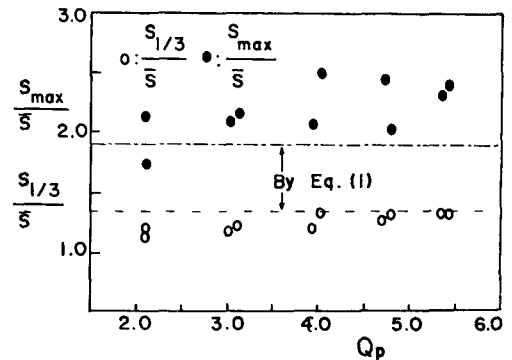
$$\overline{j_{H1/3}} = 0.270 Q_p + 0.711 \quad (8)$$



(a) Wave height



(b) Wave period



(c) Wave steepness

Fig. 3. Relations between wave statistic parameters and Q_p .

$$\overline{j_{TR}} = 0.321 Q_p + 0.981 \quad (9)$$

$$\overline{j_{(S1/3, \bar{H})}} = 0.061 Q_p + 1.207 \quad (10)$$

$$\overline{X_{H1/3}} = 1.308 Q_p + 0.129 \quad (11)$$

$$\overline{X_{TR}} = 1.503 Q_p + 2.777 \quad (12)$$

$$\overline{X_{(S1/3, \bar{H})}} = 0.365 Q_p + 2.143 \quad (13)$$

결 론

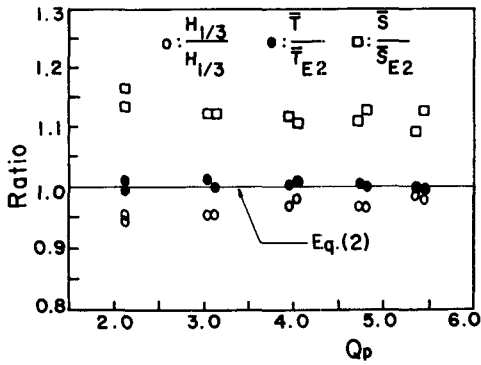


Fig. 4. Relations between wave parameters analyzed by individual wave analyzing method and energy spectrum method by means Q_p .

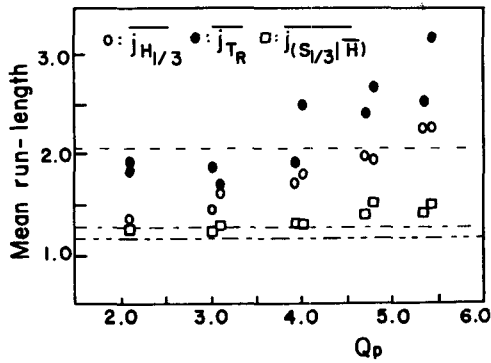


Fig. 5. Relations between Q_p and mean run-lengths of higher wave, resonance period and steeper higher waves. Lines indicate eq. (3).

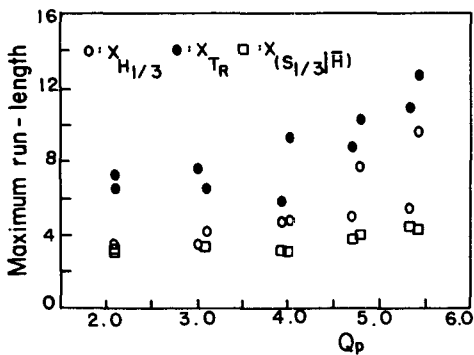


Fig. 6. Relations between Q_p and the maximum run-lengths of higher wave, resonance period and steeper higher wave.

이상 해양파랑의 해석방법 및 조건에 따른 통계적 변동기구와 그 안정한계에 대한 일련의 연구결과, single peak spectrum을 가지는 해양파랑의 경우, 스펙트럼해석시, 과별해석법에 의한 통계파와 좋은 대응을 위해서는 peak주기 T_p 의 100배 이상의 파랑기록에 대해 최대지체시간을 $7T_p$ 정도로 고려하여 해석함으로써 통계적인 안정성을 기대할 수 있다. 개별파의 정의방법에 따라서도 최대파 및 파군의 통계치는 다소의 차이를 보이며, 에너지파와의 관계 등을 고려할 때 zero-up crossing법이 유용하다. 또한 에너지파의 주기와 파형경사는 2차 스펙트럼 모멘트를 사용하여 계산하는 것이 통계파와 좋은 일치성을 보였다. 이러한 결과들을 종합적으로 평가하여, 파군형성을 비롯한 해양파랑의 통계적 특성은 스펙트럼의 첨예도와 밀접한 관계를 가지므로 해양파랑특성의 통계적 변동기구를 표현하는 파라미터로서 Q_p 가 유용함을 알 수 있었으며, 이들간의 관계식을 선형적으로 나타내었다. 이들 관계식은 스펙트럼형태에 따른 통계치의 변동을 예측하는데 중요한 기초자료가 될 것으로 기대할 수 있다.

문 헌

Burcharth, H. F. 1980. A comparison of nature waves and model waves with special reference to wave grouping. Proc. 17th Conf. Coastal Eng. ASCE, 2993~3009.

Foristall, G. Z. 1978. On the statistical distribution of wave heights in a storm. Jour. Geophys. Res. 83(C5), 2353~2358.

Goda, Y. 1985. Random seas and designs of maritime structures. Univ. of Tokyo Press. 323p.

Longuet-Higgins, M. S. 1952. On the statistical distributions of the heights of sea waves. Jour. Mar. Res. IX(3), 245~266.

Loukakis, T. A. 1970. Experimental and theoretical determination of wave form and responses extremes. M. I. T. Contract No. DSR-70098.

Mansard, E. P. D. and B. D. Pratte. 1982. Moored ship response in irregular waves. Proc. 18th Conf. Coastal Eng. ASCE. 2228~2243.

Miguel, A. C. and L. A. Gimenez-Curto. 1985. Distribution of maximum wave height. Jour.

- Waterw., Port, Coast. and Ocean Eng. 3(1), 134~138.
- Nolte, K. G. and F. H. Hsu. 1979. Statistics of larger waves in a sea state. Jour. Waterw., Port, Coast. and Ocean Eng. 3(1), 134~138.
- Overvik, T. and O. G. Houmb. 1977. A note on the distribution of wave steepness. Div. Port and Ocean Eng. The Norwegian Inst. of Tech. Rep. 11.
- Philips, O. M. 1958. The equilibrium range in the spectrum of wind-generated waves. Jour. Fluid Mech. 4, 426~434.
- Rye, H. 1982. Ocean wave groups. Dept. of Marine Tech. The Norwegian Inst. of Tech. Rep. UR-82-1.
- Ryu, C. R. and T. Sawaragi. 1986. A new design method of rubble mound structures. 20th International Conf. on Coastal Eng., ASCE, 21 88~2202.
- Thomas, K. V., M. Baba and C. M. Harish. 1986. Wave groupiness in long travelled swell. Jour. Waterw., Port, Coast. and Ocean Eng. 42(4), 498~511.
- 柳青魯·金鉉周. 1987. 數值實驗造件에 따른 海洋波浪特性的 統系的 安定限界. 韓國水産學會誌 20(5), 457~462.
- 柳青魯. 1984. 捨石防波堤の水理學的最適設計に關する基礎的研究. 大阪大學.工學部 土木工學科 博士學位論文, 162p.
- 合田良實. 1987. 數值シミュレーションによる波浪の標準スペクトルと統計的性質. 第34回 海岸工學講演會論文集. 131~135.

1988. 11. 11 접수

1989. 2. 5 수리