

〈論 文〉

태풍에 의한 파랑의 스펙트럼 및 통계적 특성
On spectral and statistical characteristics of sea waves by the typhoons

심 재 설, 오 병 철, 김 상 익
Shim, Jae Seol, Oh, Byung Chul, Kim Sang Ik

ABSTRACT

Using the wave data by typhoons LEE, VERA, THELMA which gave great damages in the Korean peninsula, the significant waves based on zero-up & down crossing and Tucker-Draper method are compared with those from the wave energy spectrum. And the histograms of individual waves obtained from zero-up crossing method are presented and compared with the Rayleigh, Weibull, Gluhovski, Ibrageemov and Goda distributions, and also the Chi-square goodness of fit test is applied to each theoretical distributions.

It is shown that the significant wave heights by zero-up crossing method are very well agreed to those by energy spectrum method. The wave heights are found to well follow the Rayleigh and Goda distributions by the Chi-square test.

요 지

한반도 주변 해상에 큰 영향을 미친 태풍 LEE, VERA, THELMA 통과시의 파랑관측 자료에 대하여 zero-up & down crossing법 및 Tucker-Draper법으로 구한 유의파고를 파랑스펙트럼법으로 구한 유의파고와 비교분석하였다. 그리고 zero-up crossing법으로 구한 개별파의 파고분포를 Rayleigh, Weibull, Gluhovski, Ibrageemov, Goda의 분포와 비교한 후 Chi-square 검증을 실시하였다. 분석결과 zero-up crossing법으로 구한 유의파고가 스펙트럼에서 구한 유의파고와 가장 잘 일치하였으며, 파고분포는 Rayleigh와 Goda 분포가 관측치에 가장 잘 맞는 것으로 나타났다.

1. 서 론

연안에서의 파랑특성을 정확히 파악하는 것은 방파제를 비롯한 연안구조물의 계획 및 설계와 표사이동의 연구에 필수적인 요소이며, 또한 해안선의 거동 및 연안재해로 인한 피해를 최소화

하기 위해서도 매우 중요한 요소 중의 하나이다. 그러나 바다에서 파랑의 시·공간적 분포는 복잡하기 때문에 그 특성을 일반적으로 통계적 기법 또는 에너지 스펙트럼 등에 의하여 잘 나타낼 수 있다. 파랑의 여러 특성 중에서 특히 파고와 주기를 통계적으로 파악하는 것은 종래부터 공학적

*한국과학기술연구원 해양연구소 해양환경공학연구소 硏究員

으로 유용한 수법이 되어 왔으며, 많은 연구자들에 의해 파고 분포에 대한 연구가 수행되어 왔다 (Goda, 1975 : Kuo and Kuo, 1975 : Forristall, 1978 : Hameed and Baba, 1985 : Harish and Baba, 1986 등).

한편 우리나라 주변 해상에서 큰 파랑은 동계에 시베리아 고기압의 장출에 의한 북서 계절풍이 강하게 유입될 때와 하계에 필리핀 주변 해상에서 발생한 태풍이 우리나라 주변을 통과할 때 발생한다(수산청, 1988).

따라서 본 연구에서는 최근 우리나라에 내습한 태풍 중 큰 영향을 끼친 태풍 LEE(8509), VERA(8613), THELMA(8705) 시에 관측한 자료를 바탕으로 파랑의 통계적 특성을 고찰하였다. 파랑의 통계분석은 관측한 시계열 자료를 zero-up crossing법, zero-down crossing법 및 Tucker(1963) - Draper(1963)법으로 구한 파랑 제원을 파랑 스펙트럼법으로부터 구한 파랑제원과 비교 분석하였고, 또한 개별파(individual wave)에 대한 파고, 주기의 통계적 분포 특성을 파악하였으며, 특히 파고에 대하여는(a) Rayleigh, (b)Weibull, (c)Gluhovski, (d)Ibrageemov, (e)Goda 분포에 적용한 후 Chi-square 적합도 검증을 실시하였다.

2. 이론적 배경

2-1. 개별파의 파고, 주기 분석방법

파고 및 주기를 정의하는 방법은 여러가지가 있으나 본 연구에서는 zero-up crossing법, zero-down crossing법을 이용하였다. zero-up crossing법은 해수의 정수면을 기준으로 하여 파형(wave trace)이 정수면을 상향으로 교차하는 점에서 다음 대응점 간의 시간을 주기라 하고, 그 사이의 최고점과 최저점의 연직 거리를 파고라고 정의하는 방법이다. zero-down crossing법은 파형이 하향으로 교차하는 점들 간의 시간과 최대 연직거리를 각각 주기와 파고로 정의한다.

이 방법들로 얻어진 개별파의 파고와 주기

(individual wave heights and periods)중에서 $H_{1/10}^u, T_{1/10}^u, H_{1/3}^u, T_{1/3}^u, H_{1/10}^d, T_{1/10}^d, H_{1/3}^d, T_{1/3}^d$ 등과 같은 대표치들을 정의하여 일련의 불규칙한 파랑의 특성을 표시한다.

한편 유의파(significant wave)를 나타내는 방법으로 zero-up & zero-down crossing 방법 외에 Tucker(1963)-Draper(1963)에 의한 법과 파랑 스펙트럼법을 사용하였다. Tucker-Draper법은 개개파랑의 진폭이 Cartwright와 Longuet-Higgins(1956)가 제안한 분포에 따른다는 가정하에 공학적으로 적합하게 개발된 방법으로 너울(swell)의 경우보다 폭풍파(storm wave)에 잘 맞는 것으로 평가되고 있다(Draper, 1963). 이 방법에 대하여 간략히 설명하면 다음과 같다. 기록지에서 중심선(정수면)으로부터 제일 큰 파봉의 높이(A)와 두번째 큰 파봉의 높이(B)를 재고, 같은 방법으로 제일 큰 파곡(C)과 두번째 큰 파곡(D)의 깊이를 재어 다음 식에 의하여 유의파고(H^m)를 구한다.

$$\sigma_1 = H_1 / [2\sqrt{2\theta} (1 + 0.289\theta^{-1} - 0.247\theta^{-2})] \quad (1)$$

$$\sigma_2 = H_2 / [2\sqrt{2\theta} (1 - 0.211\theta^{-1} - 0.103\theta^{-2})] \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \quad (3)$$

$$H^m = 4.004 \sigma \quad (4)$$

여기서, $H_1 = A + C, H_2 = B + D$

$$\theta = \ln N_z$$

$N_z =$ zero-up crossing수 이고

σ 는 해수면 변위의 표준편차이다.

2-2. 스펙트럼에 의한 분석 방법

과거에는 불규칙한 해상상태를 유의파라고 하는 단순파로 간단히 나타내었으나, 이 방법으로는 복잡한 해상상태를 충분히 표현하기에 많은 어려움이 따르기 때문에 스펙트럼의 개념이 도입되었다. 수표면이 통계적으로 stationary, ergodic, 그리고 Gaussian process이고, 수표면

(water-surface elevation)이 무수히 많은 단순파의 합으로 표시된다고 가정하면 다음과 같다.

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi f_n t + \epsilon_n) \quad (5)$$

여기서 a_n , f_n 및 ϵ_n 은 각각 성분파의 진폭, 주파수 및 위상을 나타내며, 특히 ϵ_n 은 $[0, 2\pi]$ 에서 균등분포하는 것으로 간주된다. 식(5)로부터 주파수 영역 $[f, f + df]$ 의 파랑에너지 밀도를 $E(f)$ 라고 하면,

$$E(f)df = \sum_{f}^{f+df} \frac{1}{2} a_n^2 \quad (6)$$

이 됨을 알 수 있다.

따라서 총에너지는 $E(f)$ 의 zero차 모멘트로서 다음식으로 표현된다.

$$m_0 = \int_0^{\infty} E(f)df = \overline{\eta^2} = \sigma^2 \quad (7)$$

한편 스펙트럼의 n 차 모멘트는 다음식으로 표시된다.

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n E(f)df \quad (8)$$

스펙트럼의 형상을 나타내는 형상계수(shape parameter)로서는 spectral bandwidth parameter가 많이 사용되고 있다. Cartwright와 Longuet-Higgins(1956)는 다음과 같이 bandwidth parameter를 정의하였다.

$$\epsilon^2 = 1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4} \quad (9)$$

narrow band spectrum이면 $\epsilon \rightarrow 0$ 이고 broad band spectrum이면 $\epsilon \rightarrow 1$ 이 된다. Longuet-Higgins(1975)는 spectrum의 narrowness를 나타내는 다른 파라미터를 제안하였다.

$$\nu^2 = \frac{m_2 m_0}{m_1^2} - 1 \quad (10)$$

한편 Goda(1970)는 spectrum의 peakedness를

나타내는 파라미터를 제안하였다.

$$Q_p = \frac{2}{m_0^2} \int_0^{\infty} f E^2(f)df \quad (11)$$

또한 유의파고는 다음 식으로부터 구해지고,

$$H_s = 4.004\sqrt{m_0} \quad (12)$$

평균 주기(average wave period)는

$$T_{m01} = \frac{m_0}{m_1} \quad (13)$$

로 구해진다(Hoffmann, 1974 : Longuet-Higgins, 1975).

평균주기의 또 다른 표현은

$$T_{m02} = \left(\frac{m_0}{m_2}\right)^{1/2} \quad (14)$$

이며, 이론적으로 zero crossing의 평균주기와 일치한다(Rice, 1954 : Longuet-Higgins, 1969 : Goda, 1974 : Hoffmann, 1974). 한편 파랑 스펙트럼에서 구해지는 주기로서 가장 많이 사용되는 peak period (T_p)는

$$\frac{d}{df} [E(f)] = 0 \quad (15)$$

로부터 구해진다.

2-3. 파고분포(distribution of wave height)

1) Rayleigh distribution

개별파의 파고분포에 있어서 수표면(water-surface elevation)이 narrow band인 정규분포를 하고, 파랑은 무수한 정현파(sinusoidal wave)의 중첩으로 되어 있다고 가정하면 파고에 대한 확률밀도함수(probability density function)는 Rayleigh 분포로 나타낼 수 있다(Longuet-Higgins, 1952).

$$p(x) = \frac{\pi}{2} x \exp\left(-\frac{\pi}{4} x^2\right) \quad (16)$$

여기서, $x = H/\bar{H}$ 이며, \bar{H} 는 평균파고이다.

2) Weibull distribution

Weibull 분포는 암초(reef)로 된 천해에서 파

고의 분포를 설명하는데 적합하고 (Lee and Black, 1978) 확률밀도함수는 다음과 같이 나타난다.

$$p(x) = \alpha \beta \bar{H}^\beta x^{\beta-1} \exp(-\alpha \bar{H}^\beta x^\beta) \quad (17)$$

$$\ln[-\ln \frac{m}{N+1}] = \ln \alpha + \beta \ell_1 H_m \quad (18)$$

여기서, N은 파고의 총수이고, H_m은 N개의 파고 중 작은 것부터 나열하였을 때 m번째 파고(제일작은 파고는 m=1)이다. 이 분포의 특수한 경우로서 $\beta = 2$, $\alpha = 1/H_{ms}^2$ 이면 Rayleigh 분포가 된다.

3) Gluhovski distribution

Gluhovski는 depth factor(\bar{H}/d)를 고려하여 심해에서 surf zone까지의 파고 분포를 다음과 같은 확률밀도함수로 나타내었다.

$$p(x) = \frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{H^*}{\sqrt{2\pi}}\right) \frac{1}{1-H^*} x^{\frac{1+H^*}{1-H^*}} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(1 + \frac{H^*}{\sqrt{2\pi}}\right) x^{\frac{2}{1-H^*}}\right] \quad (19)$$

여기서, $H^* = \bar{H}/d$ 이고, 심해조건에서 $H^* \rightarrow 0$ 이므로 식(19)는 Rayleigh 분포와 같아진다.

4) Ibrageemov distribution

Ibrageemov는 Gluhovski 분포와 현장자료의 분석으로부터 쇄파대(breaking zone)에서의 파고의 분포는 수심뿐만 아니라 주기에 의해서도 영향을 받는다고 하여 다음과 같은 함수를 제안하였다.

$$p(x) = \frac{\pi}{2\xi} x^{\frac{2-\xi}{\xi}} \exp\left(-\frac{\pi}{4} x^{\frac{2}{\xi}}\right) \quad (20)$$

여기서, $\xi = 1 - 0.56 \exp\left(1 - \frac{4.6d}{T^2}\right)$ 이고, 심해조건에서 $d/T^2 \rightarrow \infty$ 가 되어 $\xi = 1$ 이므로 식(20)은 Rayleigh 분포와 같아진다.

5) Goda distribution

Goda(1975)는 쇄파대 내에서 파고의 분포를

truncated Rayleigh 분포로 표현했으며, 다음 식을 제안하였다.

$$p(x) = \alpha \cdot 2 \left(\frac{a\bar{H}}{H_0}\right)^2 x \exp\left[-\left(\frac{a\bar{H}}{H_0}\right)^2 x^2\right] \quad (21)$$

$$1/\alpha = 1 - \left\{1 - \left(\frac{a\bar{H}}{H_0}\right)^2 x_1(x_1 \cdot x_2)\right\} \exp\left[-\left(\frac{a\bar{H}}{H_0}\right)^2 x_1^2\right] \quad (22)$$

$$x_0 = A \frac{L_0}{\bar{H}} \left\{1 - \exp\left[-1.5 \frac{\pi d}{L_0} (1 + 15m^{4/3})\right]\right\} \quad (23)$$

x_1 에서 $A = 0.18$, x_2 에서 $A = 0.12$

$$H_0 = K_1 H_s$$

$$a = 1.416/K_s$$

여기서, H_0 , K_1 , K_s , m 은 각각 상당심해파고, 굴절계수, 천수계수 및 해저경사를 나타낸다. x_1 과 x_2 는 쇄파대(breaking zone)의 영역을 나타내며 식(23)으로부터 구해진다.

2-4. 주기의 분포(distribution of wave period)

Longuet-Higgins(1975)는 파랑의 스펙트럼이 narrow band라는 가정하에 다음과 같은 주기 분포식을 유도하였다.

$$p(\tau) = \frac{\nu^2}{2[\nu^2 + (\tau - 1)^2]^{3/2}} \quad (24)$$

여기서, $\tau = T/\bar{T}$ 이며, \bar{T} 는 평균주기이다.

3. 태풍 통과시 기상개황 및 관측방법

Fig. 1에서 보는 바와 같이 태풍 LEE(1985. 8.9-8.15)는 최저 중심기압이 975mb이었고, 최대풍속 25m/sec의 폭풍우를 수반하고 우리나라 서해안을 거쳐 해주 부근으로 상륙하여 열대성 저기압으로 약화되면서 만주지방으로 북동진하였다. 태풍 VERA(1986. 9.15-9.30)는 제주도

해상에서 960mb의 중심시도, 중심부근에서 최대 풍속 35m/sec의 폭풍우를 동반하고 진도 부근으

리고 태풍 LEE 때는 어청도 부근 해상에서, VERA 때는 가덕도 부근 해상에서, 태풍

Table 1. Items of observation site.

관측지점	태풍	중심시도	위도	경도	기간	계류수심	사용된자료수
어청도(A)	LEE	975mb	36°07'18"N	125°57'55"E	85.8.14:03-15:06	60m	13 record
가덕도(B)	VERA	960mb	34°56'40"N	128°47'41"E	86.8.27:15-29:15	26m	36 record
고리(C)	THELMA	965mb	35°17'50"N	129°18'20"E	87.7.15:18-16:18	35m	9 record

로 상륙하여 한반도를 가로질러 원산 앞바다를 통과하여 온대성 저기압으로 약화되었다. 태풍 THELMA(1987.7.9-7.17)는 15일 21시에는 중심기압 965mb, 중심 최대풍속 35m/sec로 제주도 동쪽 해상을 통과하여 순천만 부근으로 상륙한 후 계속 북북동진하여 강릉 부근을 통과한 후 동해 북부해상으로 빠져 나갔다.

THELMA 때는 고리 앞바다에서 Wave-rider buoy로 3시간 마다 20분씩, 또는 1시간 마다 20분씩 0.5초 간격으로 관측했으며(record; 20분간 관측된 자료), 이 중에서 유의파고 1.0m 이상의 자료가 본 연구에 사용되었다. 관측자료중 본 연구에 사용된 자료의 기간 및 위치, 계류수심 등 자세한 것은 Table 1에 나타냈다.

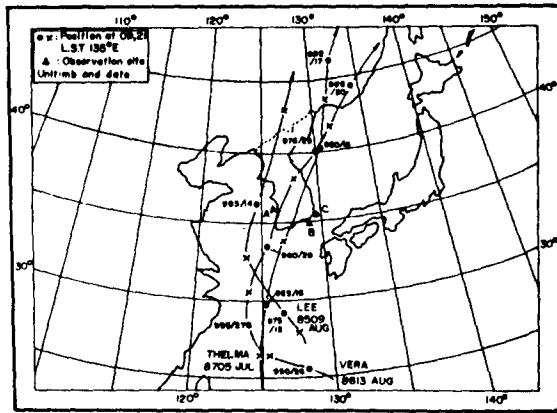


Fig. 1. Typhoon tracks and observation site(A:Eocheongdo, B:Gadeokdo, C:Gori).

Wave-rider buoy의 파랑측정 원리는 부이가 해수면을 따라 움직일때 나타나는 연직가속도를 측정하고 이 가속도를 두 번 적분하여 해수면의 변위로 바꾼 다음 전파 송신장치를 통하여 변조시킨다. 이와 같은 해수면의 변위는 연안에 설치된 전파 수신장치를 통하여 기록지에 아날로그 형태로 또는 마그네틱 테이프에 디지털 형태로 기록된다. 이 중 고리 앞바다에서 파고가 가장 클 때 기록지에 아날로그 형태로 기록된 원시자료(raw data)의 일부를 Fig. 2에 나타내었다. 그

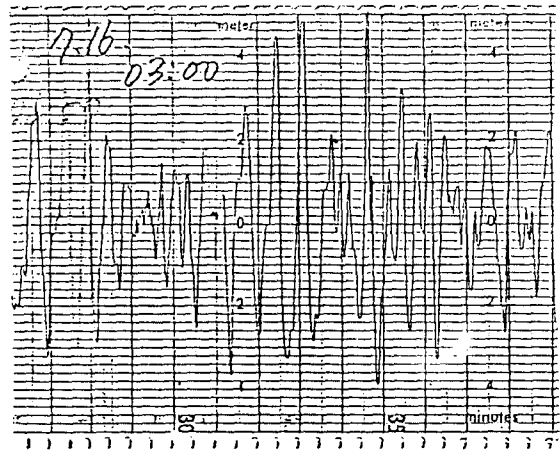


Fig. 2. Raw data obtained from Wave-rider buoy at 03:00, 16 July, 1987 in Gori.

4. 분석 결과 및 고찰

4-1. 유의파 및 spectral shape parameter

태풍통과시 각 지점에서 Wave-rider로 관측한 파랑의 유의파를 zero-up crossing ($H_{1/3}^u, T_{1/3}^u$), zero-down crossing법($H_{1/3}^d, T_{1/3}^d$), Tucker-Draper법 및 spectrum법 (H_s, T_p)으로 각 record 마다 분석하였다. 각 태풍에 대한 유의파고(H_s) 및 peak wave period(T_p)에 대하여 시간별로 도

시한 것은 Fig. 3과 같다. 가덕도 지점에서 태풍의 영향권에 들기전에 파고가 작은데도 주기가 큰 것은 다른 지점과는 달리 이 지점이 외해에 직접 연결되어 있기 때문에 심해에서 발생한 swell에 의한 것으로 사료된다.

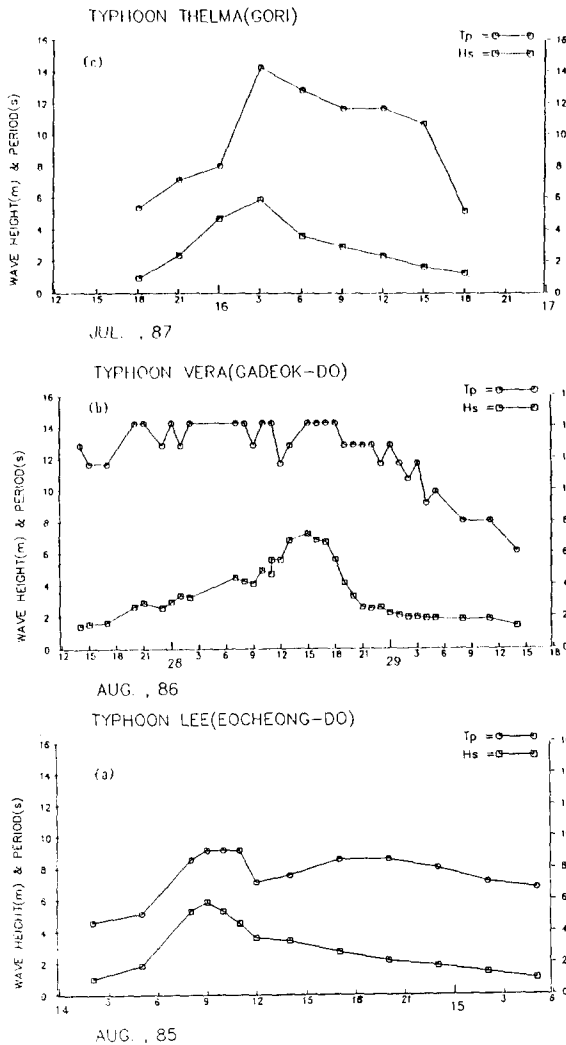


Fig. 3. Time plot of the significant wave heights and peak periods by (a) Typhoon LEE (b) Typhoon VERA (c) Typhoon THELMA.

3지점에서 관측한 58 record에 대하여 스펙트럼법으로 구한 유의파고(H_s)와 zero-up crossing 법($H_{1/3}^{(u)}$), zero-down crossing 법($H_{1/3}^{(d)}$) 및 Tucker-Draper 법($H^{(TD)}$)으로 구한 유의파고를 각

각 비교하여 Table 2에 나타내었으며, 이중 스펙트럼법과 zero-up crossing법으로 구한 유의파고의 비교를 Fig. 4에 도시하였다. 또한 각 지점에서 스펙트럼법에 의한 유의파고와 각각의 방법으로 구한 것과의 root mean square(RMS) 오차를 Table 3에 나타내었다.

Table 2. Regression analysis.

	기울기	절편	상관계수
zero-up crossing	0.9656	-0.0752	0.9993
zero-down crossing	0.9400	-0.0368	0.9991
Tucker-Draper	0.9967	0.0812	0.9885

Table 3. Root mean square error.

	어청도	가덕도	고리
zero-up crossing	0.1560	0.2200	0.2077
zero-down crossing	0.2218	0.2757	0.2584
Tucker-Draper	0.2681	0.2714	0.2506

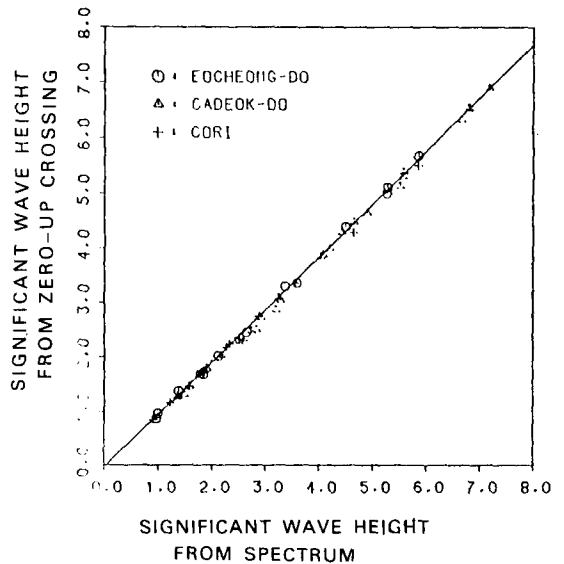


Fig. 4. Relationship between spectrally based significant wave height that from zero-up crossing method.

표에서 보는 바와 같이 세 방법에 의해 구해진 유의파고가 파랑스펙트럼법에 의해 산출된 유의파고와 모두 잘 일치하지만, 그 중 zero-up crossing에 의한 방법이 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그리고 스펙트럼에 의한 유의파고가 다

른 방법에 의한 것보다 약간 크게 나타났고, 또한 zero-up crossing법이 zero-down crossing법보다 약 3%정도 크게 계산되었다.

따라서 불규칙한 파랑의 에너지를 각 주파수별로 계산하는 스펙트럼법에 의한 유의파고의 산출이 가장 합리적이겠지만 계산절차, 계산장치가 복잡하므로 매우 손쉽게 계산할 수 있는 위의 3가지 방법에 의한 값도 설계기준치로서 공학적으로 충분히 이용할 수 있다고 사료된다.

파랑스펙트럼에서 에너지 밀도가 최고인 peak period에 대한 여러 대표 주기들과의 비율과 표준편차 및 상관계수(correlation coefficient)를 table 4에 나타내었다. 이 표에서 보는 바와 같이 spectral peak period와 대표주기들 간의 상관성이 좋지 않으나, 그 중에서 zero-up crossing법에 의한 주기가 가장 잘 일치하는 것으로 나타났으므로 이것을 도시하면 Fig. 5와 같다. 그림에서 나타났듯이 가덕도 지점에서 관측한 파랑의 주기가 회귀직선식에 많이 분산되어 있는 이유는 파랑이 완전히 발달(fully developed)했을 때 이 두 주기간에는 높은 상관관계를 갖는 것으로 밝혀졌으나(Wilson and Baird, 1972) 가덕도 지점은 아직 파랑이 완전히 발달하지 않은 상태에서 외해에서 발생한 swell이 전파되어 스펙트럼의 T_p 는 크나 zero-up crossing 주기는 작기 때문인 것으로 사료된다.

Table 4. Relationship between T_p and other representative periods.

	$T_{1.5}^p/T_p$	$T_{1.0}^p/T_p$	\bar{T}/T_p	T_{m-1}/T_p	T_{m-2}/T_p
mean	0.8274	0.8239	0.6439	0.6880	0.6203
standard deviation	0.1329	0.1343	0.1397	0.1358	0.1362
correlation coefficient	0.8376	0.8336	0.6971	0.7606	0.6893

그리고 Table 4에 나타난 것처럼 T_p 에 대한 주기의 상관계수가 H_s 에 대한 파고의 상관계수보다 상당히 낮은데, 그 이유는 두 개 이상의 서

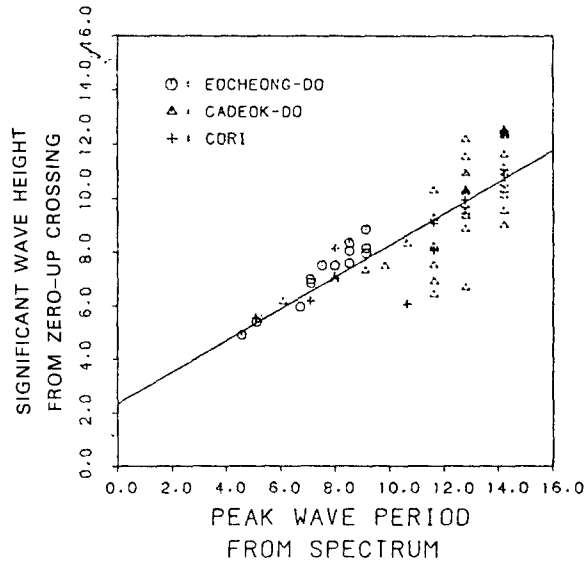


Fig. 5. Relationship between spectral peak period and significant wave period from zero-up crossing method.

로 다른 주기를 갖는 파열들 (wave trains)의 빈번한 출현에 기인한다(Harris, 1972). 따라서 설계파동을 결정할 때 대표주기에 대한 공학적인 적용은 그 주기에 대응하는 파고와 함께 연계시켜 고려해서 사용해야 한다.

태풍에 따른 spectral shape parameter는 Table 5에 수록되어 있으며, spectral bandwidth parameter(Cartwright and Longuet-Higgins,

1956) ϵ 은 0.67-0.86, spectral narrowness parameter(Longuet-Higgins, 1975) ν 는 0.33-0.46, spectral peakedness parameter(Goda, 1970)

Q_p 는 1.40-2.95의 범위에 있는 것으로 나타났다.

Table 5. Mean (and standard deviation) of spectral shape parameter.

	어 청 도	가 덕 도	고 리
ϵ	0.714(0.028)	0.802(0.039)	0.750(0.045)
ν	0.391(0.043)	0.530(0.058)	0.459(0.037)
Q_p	0.392(0.387)	1.823(0.320)	1.845(0.449)

이 표에서 보는 바와 같이 어청도 해역에서 관측한 파랑의 spectral shape는 다른 지점의 것에 비해 전반적으로 폭이 좁고 첨예하고, 가덕도 해역에서 관측한 파랑의 spectral shape는 대체로 폭이 넓고 덜 첨예하다. 이와 같은 이유는 어청도 해역이 지형적인 영향으로 swell과 같은 것의 전파되지 않고 그 해역에서 생성된 바람에 의해서 파랑이 발생하고, 가덕도 해역은 그 해역에서 발생한 파랑은 물론 원해에서 발생한 파랑도 전파되므로 파랑의 주파수대가 어청도 해상의 것보다 넓기 때문이고, 또한 태풍의 진로 및 진행속도에 의한 영향도 있는 것으로 생각된다.

Table 6. Ratios of $H^{U_{1/3}}/\bar{H}^U$, $H^{U_{1/10}}/H^{U_{1/3}}$ and $H^{U_{1/3}}/\sqrt{m_0}$

	어 청 도			가 덕 도			고 리		
	$H^{U_{1/3}}/\bar{H}^U$	$H^{U_{1/10}}/H^{U_{1/3}}$	$H^{U_{1/3}}/\sqrt{m_0}$	$H^{U_{1/3}}/\bar{H}^U$	$H^{U_{1/10}}/H^{U_{1/3}}$	$H^{U_{1/3}}/\sqrt{m_0}$	$H^{U_{1/3}}/\bar{H}^U$	$H^{U_{1/10}}/H^{U_{1/3}}$	$H^{U_{1/3}}/\sqrt{m_0}$
mean	1.5657	1.2683	3.7959	1.5926	1.2465	3.7284	1.5739	1.2510	3.7430
theory	1.5970	1.2710	4.0040	1.5970	1.2710	4.0040	1.5970	1.2710	4.0040
standard deviation	0.0378	0.0359	0.1031	0.0471	0.0393	0.0960	0.0370	0.0257	0.0556

Goda(1974)와 Rye(1977)에 의하면 spectral bandwidth parameter는 spectral 형태와 무관하고 불안정하며, 단지 cut-off frequency의 위치에 따라 그 값이 변화하므로 실제로 이 parameter를 적용할 수 없다고 하였다. 그리고 Goda(1976)는 일본 연안에서 관측한 single-peaked spectra에서 구한 Q_p 값은 일반적으로 2-3의 범위에 있다고

하였다. Rye(1977)는 Q_p 만이 high-frequency cut-off에서 수렴하고 또한 매우 첨예한 스펙트럼(JONSWAP spectrum에서 $\gamma = 7.0$)과 완만한 스펙트럼(PM spectrum, $\gamma = 1.0$)을 가장 잘 구별할 수 있으므로 다른 parameter 보다는 Q_p parameter를 사용하는 것을 권장하였다.

4.2 대표파고 간의 비율과 파고 주기 분포

파고가 Rayleigh 분포를 이룬다는 가정하에 대표파고 간의 비율을 비교해 보기 위하여 각 관측점에서 상대수심(relative water depth: d/L_0)에 대한 zero-up crossing법으로 구한 $H^{U_{1/3}}/\bar{H}^U$, $H^{U_{1/10}}/H^{U_{1/3}}$ 및 $H^{U_{1/3}}/\sqrt{m_0}$ 의 관계를 도시하면 Fig.6과 같다. 여기서 L_0 는 심해에서의 파장으로 zero-up crossing법에 의한 주기($T^{U_{1/3}}$)를 사용하여 Airy wave 이론으로부터 구하였다. 그림에서 보는 바와 같이 모든 상대수심에 대하여 이 세 비율값이 모두 일정하게 나타났으며, 또한 각 관측 지점별 세 비율의 평균(mean)과 표준 편차(standard deviation)가 Table 6에 나타나 있다. 세 비율 모두 Rayleigh 분포(theory)로

부터 유도된 값보다 작게 나타났는데 이것은 Rayleigh 분포가 narrow band spectrum 이라는 가정에서 유도될때 spectral width parameter의 영향으로 과대 평가되었다(Forristall, 1978; Chuang and Kao, 1987). 그리고 그 비율은 어청도, 고리, 가덕도 순으로 Rayleigh 분포에 유도된 이론치에 가까웠다. 이 같은 이유는 Fig. 6에

서 보듯이 어청도에서 관측된 파랑은 심해파 ($\frac{d}{L_0} > \frac{1}{2}$)이므로 Rayleigh 분포의 기본가정에 근접하고 가덕도에서 관측된 파랑은 천해파 ($\frac{d}{L_0} < \frac{1}{2}$)이므로 파랑간의 비선형 (nonlinearity) 간섭효과가 크기 때문인 것으로 볼 수 있다.

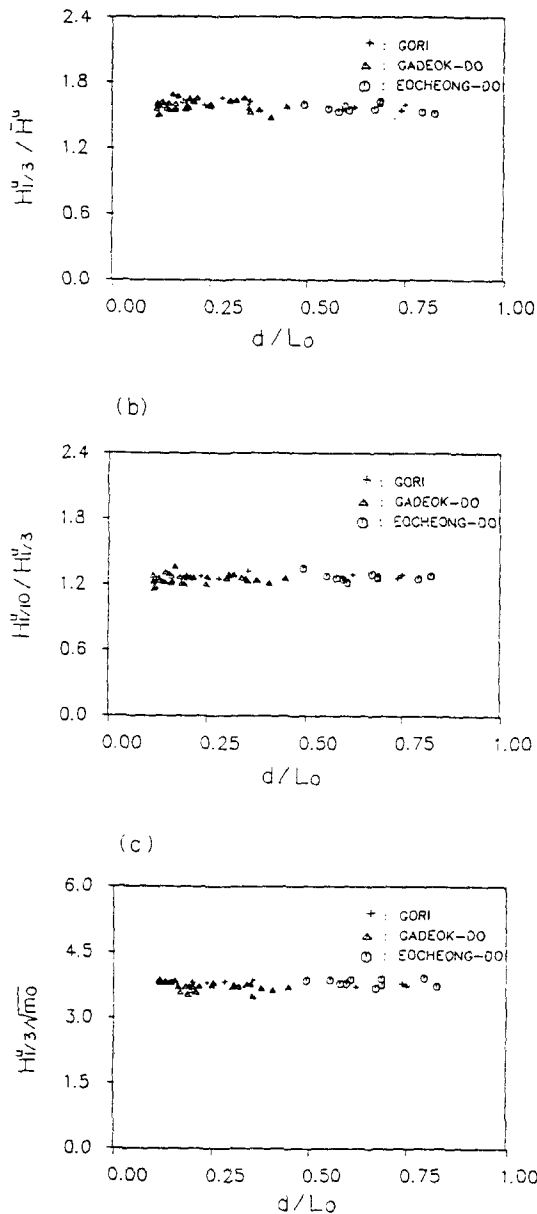


Fig. 6. Wave height ratio Vs. relative water depth (a) $H_{1/3}/H_0$ (b) $H_{1/10}/H_{1/3}$ (c) $H_{1/3}\sqrt{m_0}$.

그리고 파고의 분포함수에 대한 Chi-square 적합도 검정을 한 예가 Fig. 7에 나타나 있으며, 또한 그 결과는 Table 7과 같다. 이 표에서 보는 바와 같이 유의수준(significant level) 0.1에서 총 58 record 중 Rayleigh 분포는 86.2%(50개), Weibull 분포는 72.0%(42개), Gluhovski 분포는 75.9%(44개), Ibrageemov 분포는 82.7%(48개), Goda 분포는 86.2%(50개)가 채택되었으며, 5개의 모든 분포에 대해서는 62.1%(36개)가 유의수준 0.1의 적합도 판정에서 통과되었다. 또한 전 관측지점을 통하여 Rayleigh 분포와 Goda 분포가 관측치와 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 지점별로는 어청도와 고리지점의 파고분포가 이론 분포에 잘 맞는 것으로 나타났다. 가덕도 지점의 파고분포가 적합도 판정에서 낮은 채택률을 보이는 것은 관측지점이 천해에 해당하기 때문에 이에 따른 파랑의 비선형 상호작용의 영향이라고 사료된다. 파고와 주기의 상관계수는 어청도에서 0.50-0.70, 고리에서 0.50-0.74, 가덕도에서 0.51-0.82로 큰 상관성이 없는 것으로 나타났다.

5. 결론 및 제언

본 연구에서는 태풍 LEE, VERA, THELMA 시에 관측을 통하여 얻어진 현장 자료를 zero-up crossing법, zero-down crossing법, Tucker-Draper법, 그리고 스펙트럼법으로 분석하여 파랑의 특성을 고찰하였다. 이에 따라 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) spectrum, zero-up crossing, zero-down crossing, Tucker-Draper법으로 구한 유의파고는 거의 일치하며, 특히 zero-up crossing법으로 구한 유의파고는 spectrum으로부터 구한 것과 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다. 또한 spectrum법이 다른 방법으로 구한 유의파고보다 약간 크게 나타났으며, zero-up crossing법이 zero-down crossing법보다 약 3% 크게 나타났다.

2) 윗 방법으로부터 구한 주기들은 유의파고

Table 7. Results of Chi-square goodness of fit test for wave heights.

	자료수	Rayleigh	Weibull	Gluhovski	Ibragimov	Goda	전분포
이청도	13	85.6(11)	76.9(10)	92.3(12)	85.6(11)	85.6(11)	53.8(7)
가덕도	36	86.1(31)	69.4(25)	66.7(24)	80.6(29)	86.1(31)	61.1(22)
고 리	9	88.9(8)	77.8(7)	88.9(8)	88.9(8)	88.9(8)	77.8(7)
계	58	86.2(50)	72.4(42)	75.9(44)	82.7(48)	86.2(50)	62.1(36)

Unit: % () : number of data

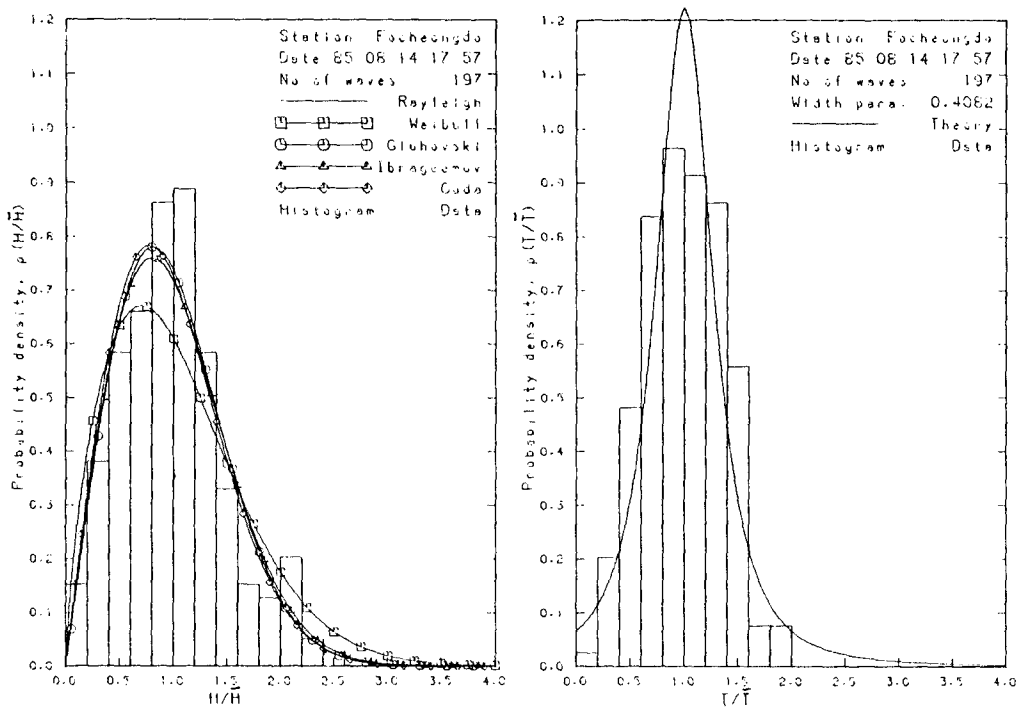


Fig. 7. Frequency distribution of wave height and wave period(Eocheongdo)

에 비해서 상관성이 매우 낮은 것으로 나타났다. 그러나 그 중 zero-up crossing법에 의한 주기, peak period와 가장 좋은 상관성을 보였다.

3) spectral shape parameter는 어청도 해역에서 관측한 파랑에 의한 것이 다른 지점에 비해 전반적으로 폭이 좁고 첨예하게 나타났으며, 가덕도 지점의 것은 위와 반대로 나타났다.

4) 대표파고 간의 관계 즉 $H^{1/3}/\bar{H}^1$, $H^{1/10}/\bar{H}^{1/3}$, $H^{1/3}/\sqrt{m_0}$ 의 값은 모든 지점에서 일정한 것으로 나타났으며, 이 값들은 Rayleigh 분포에서 유도된 이론치보다 작게 나타났다.

5) 파고의 분포는 5개 분포 모두 관측치와 대

체로 일치하고 있으며, 특히 Rayleigh 분포와 Goda 분포가 더욱 잘 맞는 것으로 Chi-square 적합도 판정에서 나타났다.

본 연구에서는 태풍에 의한 파랑 자료에 대한 통계적 특성을 파악하였으나, 금후에서는 평상시 및 계절풍 등 다른 기상요인에 의한 파랑 특성에 대해서도 연구할 필요성이 있으며, 또한 연안 구조물등은 대체로 천해역에 설치되고 있으므로 파랑이 천해역으로 전파되면서 파랑의 비선형 상호작용등에 의해 야기되는 non-Gaussian 현상 등에 대한 연구가 요망된다.

참 고 문 헌

- 수산청(1988) 해역별(동해, 남해) 심해파 추정 보고서, 서울, pp.50-76.
- Cartwright, D.E. and M.S. Longuet-Higgins(1956) *The statistical distribution of the maxima of a random function*, Proc. R. Soc. A., Vol.237, pp.212-228.
- Chuang, M.C. and C.C. Kao(1987) *The non-Gaussian characteristics of waves in various water depth*, Coastal Hydrodynamics, Proc. Conf. Spons. Waterways, Port, Coastal, and Ocean Div., ASCE.
- Draper, L.(1963) *Derivation of a design wave from instrumental records of sea waves*, Proc. Inst. Civ. Eng., Vol. 26, pp.291-304.
- Forristall, G.Z.(1978) *On the statistical distribution of wave heights in a storm*, J. Geophys. Res., Vol. 83, No.C5, pp.2353-2358.
- Goda, Y.(1970) *A synthesis of breaker indices*, Trans. Japan Soc. Civ. Eng. Vol. 2, Part 2.
- Goda, Y.(1974) *Estimation of wave statistics from spectral information*. Proc. Int. Symp., Ocean wave measurement and analysis, New Orleans.
- Goda, Y.(1975) *Irregular wave deformation in the surf zone*, Coastal Engng Japan, Vol. 18, pp.13-26.
- Goda, Y. (1976) *On wave groups*, Proc. Conf. Behaviour of Offshore Structures, (BOSS), Trondheim.
- Hameed, T.S.S. and M. Baba(1985) *Wave heights distribution in shallow water*, Ocean Engng, Vol. 12, No. 4, pp.309-319.
- Harish, C.M and M. Baba(1986) *On spectral and statistical characteristics of shallow water waves*, Ocean Engng, Vol. 13, No. 3, pp. 239-248.
- Harris, D.L(1972) *Characteristics of Wave Record: in the Coastal Zone, in Wave on Beaches*, pp.1-51, Academic Press, London.
- Hoffmann, D.(1974) *Analysis of measured and calculated spectra*, Proc. Int. Symp., Dynamics of marine vehicles and structures in waves, London.
- Kuo, C.T. and S.J. Kuo(1975) *Effect of breaking on statistical distribution of the wave heights*, Proc. Civ. Engng in the Oceans/ III, ASCE.
- Lee, T.T. and K.P. Black(1978) *Energy spectra of surf waves on a coral reef*, proc. 16th Coastal Engng Conf., ASCE, Hamburg, pp.588-608.
- Longuet-Higgins, M.S(1952) *On the statistical distribution of the heights of sea waves*, J. Mar. Res., Vol. 9, No. 3, pp.245-266.
- Longuet-Higgins, M.S.(1969) *On wave breaking and the equilibrium spectrum of wind-generated waves*, Proc. R. Soc. A., Vol. 310.
- Longuet-Higgins, M.S.(1975) *On the joint distribution of sea waves*, J. Geophys. Res., Vol. 80, No. 18, pp. 2688-2693.
- Rice, S.O.(1954) *Mathematical Analysis of Random Noise, Reprinted from: Selected Papers on Noise and Stochastic Processes*, Dover Publ., New York.
- Tucker, M.J.(1963) *Analysis of records of sea waves*, proc. Inst. Civ. Eng., Vol. 26, pp.305-316.
- Wilson, J.R. and W.F. Baird(1972) *A discussion on some measured wave data*, Proc. 13th Coastal Engng Conf., ASCE, Vancouver, pp.113-130.