태풍에 의한 파랑의 통계적 특성에 관한 연구

신재설, 오병철, 김상익

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 최소화하기 위해서도 매우 중요하다. 일반적으로 바다에서 파랑의 시.공간적 분포는 복잡하기 때문에 그 특성은 통계적기법 또는 에너지 스펙트럼 등에 의하여 가장 잘 나타내질 수 있다. 통계적 방법으로 나타낼 수 있는 파랑의 여러 특성중에서 특히 파고와 주기를 통계적으로 파악하는 것은 매우 중요하다. 파고에 대한 분포는 많은 연구가 (Goda, 1975; Kuo and Kuo, 1975; Forristall, 1978; Hameed and Baba, 1985; Harish and Baba; 1986 등)에 의하여 연구의 관심대상이 되어 왔다.

이와 같은 현상은 해상상태가 평온할 때 보다 큰 파랑이 내습할 때 더욱 밀접한 관계가 있으며, 우리나라 주변 해상에서 큰 파랑은 동계에 시베리아 고기압의 장출에 의한 북서 계절풍이 강하게 유입될 때와 하계에 필리핀 주변 해상에서 발생한 태풍이 북서진하다가 북동으로 진로를 바꾸어 우리나라 주변을 통과할 때 발생한다(강시환, 1988).

따라서 본 연구에서는 최근 우리나라에 내습한 태풍중 큰 영향을 끼친 태풍 LEE(8509), VERA(8613) THELMA(8705) 시에 관측한 자료를 바탕으로 파랑의 통계적 특성을 고찰하였다. 파랑의 통계분석은 관측한 시계열 자료

를 zero-up crossing법, zero-down crossing법 및 Tucker(1963)-Draper (1963)법으로 구한 파랑제원을 파랑 스펙트럼 법으로부터 구한 파랑제원과 비교 분석하였고, 또한 개별파(Individual Wave)에 대한 파고 주기의 통계적분포 특성을 파악하였으며, 특히 파고에 대하여는 (a) Rayleigh, (b) Weibull, (c) Gluhovski, (d) Ibrageemov, (e) Goda 분포에 적용한후 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 crossing 법, zero-down crossing 법을 이용하였다. zero-up crossing 법은 해수의 정수면을 기준으로하여 파형(wave trace)이 정수면을 상향으로 교차하는 점에서 다음 대응점 간의 시간을 주기라 하고, 그사이의 최고점과 최저점의 연직거리을 파고라고 정의하는 방법이다. zero-down crossing 법은 파형이 하향으로 교차하는 점들 간의 시간과 최대 연직거리을 각각 주기와 파고로 정의한다(Fig.1)

이 방법들로 얻어진 개별파의 파고와 주기(individual wave heights and periods) 중에서 $H^{u}_{1/10}$, $T^{u}_{1/10}$, $H^{u}_{1/3}$, $T^{u}_{1/3}$, $H^{D}_{1/10}$, $T^{D}_{1/10}$, $H^{D}_{1/3}$, $T^{D}_{1/3}$ 등과 같은 대표치들을 정의하여 일련의 불규칙한 파랑의 특성을 표시한다. 이중 하나만 예를 들어 설명하면 다음과 같다. $H^{u}_{1/3}$, $T^{u}_{1/3}$ 는 zero-up crossing 법으로 개별파를 산출한 파군중에서 파고가 큰쪽부터 세어 총파수의 1/3에 해당되는 파고 및 주기들을 평균하여 이와 동일한 파고와 주기를 갖는 파랑으로 유의파(significant wave) 라고도 한다.

이와 같은 유의파를 나타내는 방법이 zero-up, zero-down crossing 방법외에 Tucker(1963)와 Draper(1963)에 의한 법과 파랑 스펙트럼법이 있다.

Tucker-Draper법은 개개파랑의 진폭이 Cartwright와 Longuet-Higgins(1956) 가 제안한 분포에 따른다는 가정하에 공학적으로 알맞게 개발된 방법으로 구해진 유의파고는 너울(swell)의 경우보다 폭풍파(storm wave)에 잘 맞는다. 이 방법에 대하여 자세히 설명하면 다음과 같다. 기록지에서 중심선(정수면)으로부터 제일 큰 파봉의 높이(A)와 두번째 큰 파봉의 높이(B)을 재고, 같은 방법으로 제일 큰 파곡(C)과 두번째 큰 파곡(D)의 깊이를 잰다.

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

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

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \tag{3}$$

$$H^{TD} = 4.004\,\sigma \tag{4}$$

여기서, $H_1 = A + C$, $H_2 = B + D$

$\theta = \ln N_z$

N_z 는 Zero-up crossing 수 이고

σ 는 수표면의 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 파랑 스펙트럼의 개념이 도입되었다. 수표면이 통계적으로 stationarity, ergodicity, 그리고 gaussian process이고, 수표면(water-surface elevation)이 무수히 많은 단순파(sinusoidal wave)의 합으로 표시된다고 가정하면 다음과 같다.

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \left(\cos 2\pi f_n t + \varepsilon_n\right) \tag{5}$$

여기서 a_n, fn, 및 ε_n은 각각 성분파의 진폭, 주파수 및 위상을 나타내며, 특히 은 [0, 2π]에서 균등분포하는 것으로 간주된다. 식(5)로 부터 주파수 영역[f, f+df]의 파랑에너지 밀도를 E(f)라고 하면

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

이 됨을 알 수 있다.

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

$$m_0 = \int_0^\infty E(f)\,df = \bar{\eta}^2 = \sigma^2 \tag{7}$$

한편 스펙트럼의 n차 모멘트는 다음식으로 표시된다.

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

대표적인 파랑 스펙트럼으로는 충분히 발달된 파랑(fully arisen seas)에 대하여 적합한 PM spectrum(Pierson and Moskowitz, 1964), 제한fetch에 대하여 유도된 JONSWAP spectrum(Hasselman et al, 1973) 그리고 open ocean에 적합한 Bretschneider specturm(1959) 등이 대표적이다.

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

$$\epsilon^2 = 1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4} \tag{9}$$

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

$$\nu^2 = \frac{m_2 m_0}{m_1^2} - 1 \tag{10}$$

한편 Goda(1970)은 spectrum의 peakedness를 나타내는 parameter를 제안하였다.

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

또한 유의파고는 다음 식으로부터 구해지고,

$$H_S = 4\sqrt{m_0} \tag{12}$$

평균 주기(average wave period)는

$$T_{m01} = \frac{m_0}{m_1} \tag{13}$$

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

평균주기의 또 다른 표현은

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

이다(Rice,1954; Longuet-Higgins,1969; Goda,1974; Hoffmann,1974)

한편 파랑 스펙트럼에서 구해지는 주기로서 가장 많이 사용되는 peak period

(Tp)는

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

로부터 구해진다.

2-3 파고분포(distribution of wave height)

1) Rayleigh distribution

개별파의 파고분포에 있어서 수표면(surface elevation)이 narrow band인 정규분포를 하고, 파랑은 무수한 Sinusoidal wave의 중첩으로 되어 있다고 가정하면 파고에 대한 확률밀도 함수(probability density function)는 Rayleigh 분포로 나타낼 수 있다(Longuet-Higgins, 1952).

$$P(H)dH = \frac{H}{4m_0}\exp\left(-\frac{H^2}{8m_0}\right)dH \tag{16}$$

여기서 m 는 주파수 스펙트럼의 zero차 모멘트이다.

평균파고 $\overline{H}$는 (16)식을 이용하면

$$\overline{H} = \int_0^{\infty} H\,P(H)\,dH = (2\pi m_0)^{1/2} \tag{17}$$

로 되어 (16)식은 표준화한 파고 $X = H/\overline{H}$ 의 함수로서 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$P(x) = \frac{\pi}{2}x\exp\left(-\frac{\pi}{4}x^2\right) \tag{18}$$

Longuet-Higgins는 (16)식에 표시한 Rayleigh 분포함수를 출발점으로 하여 각종 대표파고 간의 관계를 다음과 같이 구하였다.

$$\begin{aligned} \overline{H} &= 2.507\sqrt{m_0} = 0.626\,H_{1/3} \\ H_{1/3} &= 4.004\sqrt{m_0} \\ H_{1/10} &= 5.090\sqrt{m_0} = 1.271\,H_{1/3} \end{aligned} \tag{19}$$

2) Weibull distribution

Weibull분포는 암초로 된 천해에서 파고의 분포를 설명하는데 적합하고 (Lee and Black, 1978), 확률 밀도함수는 다음과 같이 나타난다.

$$P(x) = \alpha\beta\,\overline{H}^{\beta}x^{\beta-1}\exp\left(-\alpha\,\overline{H}^{\beta}x^{\beta}\right) \tag{20}$$

$$\ln\left[-\ln \frac{n}{N+1}\right] = \ln\alpha + \beta \ln H_n \tag{21}$$

이분포의 특수한 경우로서 $\beta = 2$, $\alpha = 1/H_{rms}^2$이면 Rayleigh분포로 된다.

3) Gluhovski distribution

Gluhovski는 depth factor($\bar{H}/d$)를 고려하여 심해에서 surf zone 까지의 파고 분포를 다음과 같은 확률밀도 함수로 나타내었다.

$$P(x) = \frac{\pi}{2}\left(1+\frac{H^*}{\sqrt{2\pi}}\right)\frac{1}{1-H^*}\, x^{\frac{1+H^*}{1-H^*}} \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(1+\frac{H^*}{\sqrt{2\pi}}\right) x^{\frac{2}{1-H^*}}\right] \tag{22}$$

여기서 $H^* = \bar{H}/d$

심해조건에서 $H^* \to 0$ 이므로 식(22)는 Rayleigh 분포와 같아진다.

4) Ibrageemov distribution

Ibrageemov는 Gluhovski 함수와 현장 자료의 분석으로부터 쇄파대 (breaking zone)에서의 파고의 분포는 수심 뿐만 아니라 주기에 의해서도 영향을 받는다고 하여 다음과 같은 함수를 제안하였다.

$$P(x) = \frac{\pi}{2\xi}\, x^{\frac{2-\xi}{\xi}} \exp\left(-\frac{\pi}{4} x^{\frac{2}{\xi}}\right) \tag{23}$$

여기서 $\xi = 1 - 0.56 \exp\left(-\frac{4.6 d}{T^2}\right)$

심해조건에서 $d/T^2 \to \infty$ 가되어 $\xi = 1$ 이므로 식(23)은 Rayleigh분포와 같아진다.

5) Goda distribution

Goda(1975)는 쇄파되거나 쇄파된 파고의 분포를 truncated Rayleigh 분포로 표현했으며, 다음식을 사용하였다.

$$P(x) = \alpha \cdot 2\left(\frac{a\bar{H}}{H_0'}\right)^2 x \exp\left[-\left(\frac{a\bar{H}}{H_0'}\right)^2 x^2\right] \tag{24}$$

$$1/\alpha = 1 - \left[1 - \left(\frac{a\bar{H}}{H_0'}\right)^2 x_1 (x_1 - x_2)\right] \exp\left[-\left(\frac{a\bar{H}}{H_0'}\right)^2 x_1^2\right] \tag{25}$$

$$x_b = A \frac{L_0}{\bar{H}} \left[1 - \exp\left\{-1.5 - \frac{\pi d}{L_0}\left(1 + 15 m^{4/3}\right)\right\}\right] \tag{26}$$

x_1 에서 $A = 0.18$, x_2 에서 $A = 0.12$

$H_0' = K_r H_0$

$a = 1.416 / K_s$

여기서 H , Kr, Ks, m 는 각각 상당심해파고, 굴절계수, 천수계수 및 해저경사를 나타낸다. X_1과 X_2는 쇄파대(breaking zone)의 영역을 나타내며 식(26)으로부터 구해진다.

6) 주기의 분포

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

$$P(\tau) = \frac{\nu^2}{2[\nu^2 + (\tau - 1)^2]^{3/2}} \tag{27}$$

여기서 $\tau = T/\bar{T}$ 이다.