

碎波와 潮流의 影響을 考慮한 淺海域에서의  
Wave Spectrum에 대한 研究  
Breaking Directional Wave Spectrum in Water of Variable  
Depth in the Presence of Current

趙 容 峻\*  
Yong Jun Cho\*

**要 旨** : Miche의 碎波基準을 活用하여 碎波 發生시에도 適用할 수 있는 波浪模型을 제시하였고 이 模型을 근간으로 하여 淺海域에서의 方向性 波浪 spectrum에 쇄파로 인한 에너지 消散을 도입할 수 있는 기법을 개발하였다. 본 연구에서 제안된 기법의 타당성을 검증하기 위하여 淺海域에서 shear current, upwelling current와 조우하는 방향성 Wallops 파랑 spectrum에 적용하였다.

**Abstract** □ In this study, an approximate method for calculating the directional spectrum of waves encountering a current in shallow water is developed. The wave trains in the directional spectrum are assumed to be linear and Gaussian; development of the spectrum requires that the waves also be short crested. The Miche's breaking criterion is imposed to determine the upper limit of wave height and to establish an expression for the breaking wave elevation in terms of the ideal wave's elevation and the second time derivative of wave elevation. Two examples are given; one for a Wallops directional spectrum encountering a shear current and another with an upwelling current.

1. 緒 論

파랑은 防波堤 및 港灣施設 등과 같은 해안구조물 설계에 반드시 고려되어야 할 중요한 요소로서 그 특성상 파랑해석에는 통계적인 개념이 도입되어야 한다. 불규칙하게 보이는 현상을 간결하게 기술할 수 있는 여러 推計學的인 개념중 스펙트럼이 그 공학적 응용범위가 가장 크다 하겠다. 현재 여러가지 형태의 파랑스펙트럼이 제안되어 있으나 각 스펙트럼마다 적용범위에 제약이 따른다. 해저지형의 변화와 조류로 인한 spectrum 특성의 변화에 대한 연구는 Longuet-Higgins (1956, 1957) 의해 시작되었고 그후 Phillips(1966), Hasselman(1968) 등이 비균질 수체에서의 스펙트럼 특성 변화를 설명하기 위해 조류와의 상호작용, 에너지 소산, 성분파 간의 비공진 상호작용에 의한 고차 조화성분의 생성 등을 고려하여 Longuet-Higgins의 연구결과를 energy balance equa-

tion으로 일반화하였으며 Willebrand(1975)에 의해 비선형 불규칙 파랑으로 확장되었으나 극히 제한적인 경우에 대해서만 제시되었을 뿐 외해에서 생성된 파랑이 천해역으로 전이해 갈 경우 관측되는 쇄파현상을 고려한 스펙트럼은 아직 제안된 적이 없다. 천해역에서의 쇄파현상에 대해서는 Battjes와 Janssen(1978), Thornton과 Guza(1983) 등이 에너지 소산을 포함한 에너지 플럭스 평형방정식을 이용한 연구결과가 있으나 수치적으로 적분이 수행되어야 하며 파랑스펙트럼을 직접 제공하지는 못한다. 파랑스펙트럼에 쇄파로 인한 영향을 도입하기 위해 Hedges와 Burrows 그리고 Mason(1979) 등은 평형스펙트럼을 적용하여 스펙트럼의 크기를 제한하고자 하였으나 평형스펙트럼에 포함되어 있는 상수의 값을 규명하는 일은 상당히 어려운 일이며 또한 평형스펙트럼은 파랑스펙트럼의 침두주파수 보다 큰 고주파영역에만 적용되어야 하며 따라서 대부분의 파랑에너지가 분포되어

\*서울市立大學校 土木工學科 (Department of Civil Engineering, Seoul City University, Seoul, Korea)

있는 주파수영역에서의 쇄파현상을 설명할 수 없다. 인류의 활동이 淺海域 혹은 海岸에 인접한 지역에 집중되어 있는 사실을 고려할 때 천해역에서의 파랑 스펙트럼은 시급히 해결해야 할 과제이다. 따라서 본 연구에서는 해안에 인접한 천해역의 일반적인 특징인 有限水深, 쇄파발생시 波峯線을 따라 이동되는 파랑 에너지로 인해 생성되는 연안류 및 이안류를 포함한 지역을 선정하여 천수효과 및 조류와의 상호작용으로 발생이 예상되는 쇄파현상으로 인한 영향을 파랑스펙트럼에 도입하는 기법을 개발하고자 한다. 본 연구에서는 첫째, 조류와의 상호작용으로 인해 생기는 파랑스펙트럼에서의 변화양상을 예측하기 위해 먼저 고려하고자 하는 지점에 쇄파의 영향이 고려되지 않은 이상적인 파랑스펙트럼이 존재한다는 가정하에 이 이상적인 스펙트럼을 심해에서의 파랑스펙트럼으로부터 에너지 평형방정식 혹은 파랑작용 보존식을 사용하여 구하고 둘째, 쇄파로 인한 영향을 평가하기 위해 Miche의 쇄파에 대한 기준(Battjes, 1974)을 적용하여 쇄파가 발생하는 경우에도 적용이 가능한 해수면의 변위에 대한 모형을 정립하여 쇄파발생으로 인한 영향이 고려된 쇄파대파랑스펙트럼을 구하고자 한다.

2. 碎波模型

국지적인 연직방향 가속도가 중력가속도의 일정부분에 도달할 때 쇄파현상이 발생하는 것으로 알려져 있으며(Phillips, 1966 ; Stokes, 1880), 이때 일정 질량이 해수면으로부터 이탈하고, 해수면의 표고는 연직방향 가속도의 상대적 크기에 따라 감소한다.  $\zeta(t)$ 와  $\zeta_b(t)$ 가 각각 쇄파발생 전후의 해수면의 변위를 나타낸다면 Fig. 1에서의 A점과 같이  $\zeta(t)$ 가 0보다 크고 연직방향가속도  $\ddot{\zeta}(t)$ 가  $-Kg$ 보다 작다면 쇄파현상이 발생하고 ( $0.4 < K < 0.5$ , Ochi와 Tsai, 1983) 이때 해수면의 변위  $\zeta_b(t)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\zeta_b(t) = \zeta(t) - \frac{-Kg}{\ddot{\zeta}(t)} \quad (1)$$

만일 Fig. 1에서의 B점과 같이  $\zeta(t)$ 가 0보다 작고  $\ddot{\zeta}(t)$ 가  $-Kg$ 보다 작으면 해수면의 변위는 다음과 같이 주어진다.

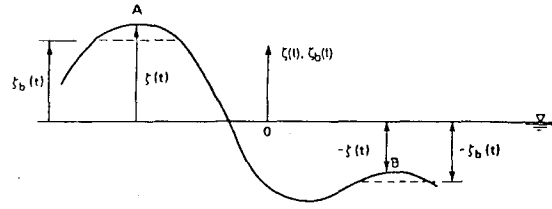


Fig. 1. Wave profile.

$$\zeta_b(t) = \zeta(t) - \frac{-\ddot{\zeta}(t)}{Kg} \quad (2)$$

또한  $\ddot{\zeta}(t)$ 가  $-Kg$ 보다 크면  $\zeta(t)$ 에는 아무런 변화가 없다는 사실을 토대로 쇄파 발생시에도 적용이 가능한 해수면의 변위  $\zeta_b(t)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\zeta_b = \zeta \left( \frac{-Kg}{\ddot{\zeta}} \right) H(-\ddot{\zeta} - Kg) H(\zeta) + \zeta \left( \frac{-\ddot{\zeta}}{Kg} \right) H(-\ddot{\zeta} - Kg) H(-\zeta) + \zeta H(\ddot{\zeta} + Kg) \quad (3)$$

여기서  $H(\cdot)$ 는 heavyside unit step function(Papoulis, 1984)을 의미하여  $\zeta_b(t)$ ,  $\zeta(t)$ 와  $\ddot{\zeta}(t)$ 에서의 인자  $t$ 는 편의상 생략했다. 선형 파랑의 경우  $K$ 는 다음과 같이 주어지며(Tung and Huang, 1987).

$$K = 0.44 \tanh(K_0 d) \quad (4)$$

여기서  $d$ 는 수심을 나타내며 특성파수  $K_0$ , 특성주파수  $\omega$ 는 다음과 같이 정의되며

$$K_0 = \omega^2 / g \quad (5)$$

$$\omega = - \frac{\int \omega^2 S(\omega) d\omega}{\int S(\omega) d\omega} \quad (6)$$

여기서  $S(\omega)$ 는 심해에서의 주파수 스펙트럼이다.

3. WAVE SPECTRUM

$\zeta_b$ 의 스펙트럼  $S_b(\omega)$ 는 쇄파모형에 나타난  $\zeta$ 와  $\ddot{\zeta}$ 의 확률밀도함수가 주어지면 직접 구할 수 있는데 본 연구에서는 stationary, zero mean, Gaussian 결합확률분포를 따른다는 가정을 도입하였다(Papoulis, 1984).  $\zeta_b$ 의 스펙트럼은 먼저 방정식 (3)을 이용하여 autocovariance function  $R_b(\tau)$ 를 정의하고  $R_b(\tau)$ 를

상관함수  $E[\zeta_1 \zeta_2]$ ,  $E[\zeta_1 \ddot{\zeta}_2]$ 와  $E[\zeta_1 \zeta_2]$ 의 함수로 취급하여 Taylor's series로 전개한 후 상관함수는  $-1$ 에서  $+1$  사이의 값을 갖는다는 사실을 이용하여 처음 두 항만을 취하여 얻은 근사적인  $R_b(\tau)$ 에 대해 최종적으로 Fourier transform을 취함으로써 얻을 수 있다 (Borgman, 1965 ; Cho *et al.*, 1993). 여기서  $E[\cdot]$ 는 기대값을 나타내며 첨자 1과 2는  $t_1=t$ 와  $t_2=t+\tau$ 에서의 양을 나타낸다.

$$R_b(\tau) = E[\zeta_b(t)\zeta_b(t+\tau)]$$

$$S_b(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int R_b(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$$

이상에서 언급한 방법을 이용해서  $S_b(\omega)$ 는 아래와 같이 주어지며

$$S_b(\omega) = F(\omega) S(\omega) \quad (7)$$

$$F(\omega) = A_1^2 \left[ \frac{\omega^2}{\omega_1^2} - 1 \right]^2 \quad (8)$$

$$\omega_1^2 = \left[ \frac{A_1}{A_2} \right] \left[ \frac{r_4}{r_2} \right] \quad (9)$$

$$A_1 = \beta N + Q(-\beta) > 0 \quad (10)$$

$$A_2 = \beta N - \beta Z(\beta) Q\left(-\frac{\beta\sqrt{(1-\varepsilon^2)}}{\varepsilon}\right) - \frac{\beta Q(\beta/\varepsilon)}{\sqrt{2\pi(1-\varepsilon^2)}} + \beta Z(\beta) \quad (11)$$

$$N = \int_{\beta}^{\infty} \frac{Z(\eta)}{\eta} Q\left(-\frac{\sqrt{(1-\varepsilon^2)}}{Z} \eta\right) d\eta \quad (12)$$

(7)식에서  $F(\omega)$ 는 스펙트럼에서 쇄파의 영향을 설명하는 일종의 여과함수로 생각할 수 있으며 식 (10), (11), (12)에서의 함수  $Z(\eta)$ 와  $Q(\xi)$ 는 다음과 같이 주어지며

$$Z(\eta) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)}} \exp\left(-\frac{\eta^2}{2}\right) \quad (13)$$

$$Q(\xi) = \int_{\xi}^{\infty} Z(\eta) d\eta \quad (14)$$

$Z(\eta)$ 는 평균값이 0이고 단위편차를 갖는 Gaussian 무작위 변량의 확률밀도함수이다. 또한  $\beta$ 는 다음과 같이 주어지며

$$\beta = \frac{Kg}{\sqrt{(r_4)}} \quad (15)$$

쇄파의 정도를 나타내고 [ $\beta > 1$ ], spectrum bandwidth parameter (Cartwright and Longuet-Higgins, 1956)  $\varepsilon$  [ $0 < \varepsilon < 1$ ]은 다음과 같이 주어지며

$$\varepsilon = 1 - \frac{(r_2)^2}{r r_4} \quad (16)$$

$r$ ,  $r^2$ 과  $r^4$ 는 다음과 같이 주어지는  $\zeta^2$ ,  $\zeta\ddot{\zeta}$ 과  $\ddot{\zeta}^2$ 의 기대치이다.

$$r = \int S(\omega) d\omega \quad (17)$$

$$r_2 = - \int \omega^2 S(\omega) d\omega \quad (18)$$

$$r_4 = \int \omega^4 S(\omega) d\omega \quad (19)$$

#### 4. WAVE-CURRENT-BOTTOM INTERACTION

직선모양의 해안선과 이 해안선에 나란한 등심선이 존재하는 해저지형 위를 심해에서 발달된 short-crested의 파랑이 전이해 갈때 흐름이 존재하는 영역과 조우한다. 두 가지 형태의 흐름이 고려됐는데 첫째는 연안류로써 유속성분  $V(x)$ 가 해안선과 나란한 경우이고 두번째는 이안류 형태로써 유속성분  $U(x)$ 가  $x$

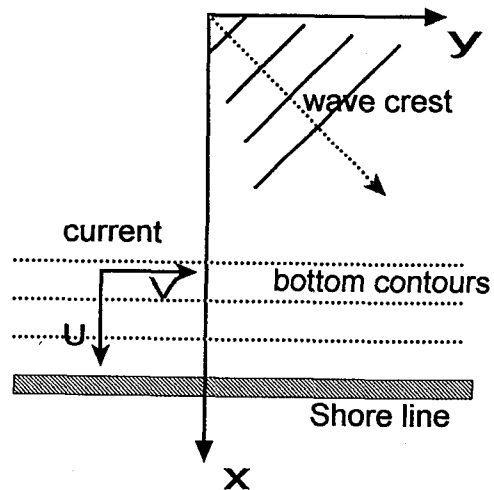


Fig. 2. Definition sketch of wave, current and bottom contour.

방향에 존재하는 경우이다(Fig. 2). 각각의 경우 흐름은 정상상태이고 수평면에 대해 완만하게 변화하고 수심방향에 대해 유속성분은 균일하다. 파랑은 각기 상이한 주파수  $\omega$ 와 파향  $\theta$ 를 갖는 성분파의 합으로 해석했고, 각 성분파에 대해 고정좌표계에서의 절대 주파수  $\omega$ 는 불변이며 이동좌표계에서의 상대주파수  $\omega_r$ 과는 아래와 같은 관계식을 이루며

$$\omega = \omega_r + U_H \cdot k \quad (20)$$

$$\omega_r^2 = gk \tanh kd \quad (21)$$

여기서  $U_H$ ,  $k$ 는 각각 유속 vector, 파수 vector이다. 또한  $k$ 의 비회전성으로부터 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$k \sin \theta = k_\infty \sin \theta_\infty \quad (22)$$

여기서 첨자  $\infty$ 는 흐름이 존재하지 않는 상태에서의 값을 의미한다. 쇄파를 고려하지 않고 에너지평형방정식 혹은 파랑작용보존식으로부터 흐름이 존재하는 임의 점에서의 방향스펙트럼  $S(\omega, \theta)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$S(\omega, \theta) = \frac{k(C_G)_\infty (1 - U_H \cdot k/\omega)}{k_\infty (C_{gr} + U_H \cdot k/\omega)} S_\infty(\omega, \theta_\infty) \quad (23)$$

여기서

$$(C_G)_\infty = \frac{\omega}{2k_\infty} \quad (24)$$

로 주어지는 심해에서의 군속도이며

$$C_{gr} = \frac{d\omega_r}{dk} = \frac{\omega_r}{k} n \quad (25)$$

는 이동좌표계에서의 군속도이고  $n$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$n = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right] \quad (26)$$

따라서 연안류  $U_H = (0, V(x))$ 의 경우

$$\omega = \omega_r + V k \sin \theta \quad (27)$$

$$S(\omega, \theta) = \frac{k}{2k_\infty} \frac{\omega - V k \sin \theta}{C_{gr} + V \sin \theta} S_\infty(\omega, \theta_\infty) \quad (28)$$

로 주어지며, 이안류  $U_H = (U(x), 0)$ 의 경우

$$\omega = \omega_r + U k \cos \theta \quad (29)$$

$$S(\omega, \theta) = \frac{k}{2k_\infty} \frac{\omega - U k \cos \theta}{C_{gr} + U \cos \theta} S_\infty(\omega, \theta_\infty) \quad (30)$$

로 주어진다. 쇄파로 인한 영향을 고려하기 위해  $S(\omega, \theta)$ 는 먼저 이동좌표계로 전환되고

$$S(\omega_r, \theta) = S(\omega, \theta) \frac{d\omega}{d\omega_r} \quad (31)$$

이렇게 구해진  $S(\omega_r, \theta)$ 는 식 (7)에서의  $S(\omega)$ 로 사용되어 쇄파의 영향이 고려된  $S_b(\omega_r, \theta)$ 를 구할 수 있고, 최종적으로 고정좌표계에서의  $S_b(\omega, \theta)$ 는 아래와 같이 구해진다.

$$S_b(\omega, \theta) = S_b(\omega_r, \theta) \frac{d\omega_r}{d\omega} \quad (32)$$

수치 결과를 얻기 위해서는 심해에서의 방향 spectrum이 명시되어야 한다. 본 연구에서는 방향 spectrum이 다음과 같은 형태를 갖는 것으로 가정한다.

$$S(\omega, \theta_\infty) = S_\infty(\omega) \phi(\theta_\infty) \quad (33)$$

여기서

$$\phi(\theta_\infty) = \frac{8}{3\pi} \cos^4 \theta_\infty \quad |\theta_\infty| \leq \frac{\pi}{2} \quad (34)$$

로 정의되는 directional energy spreading 함수이다. 심해에서의 주파수 스펙트럼  $S_\infty(\omega)$ 에 대해서는 Wallops 스펙트럼(Huang *et al.*, 1981)을 이용했다.

$$S_\infty(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^m \omega_0^{5-m}} \exp \left[ -\frac{m}{4} \left( \frac{\omega_0}{\omega} \right)^4 \right] \quad (35)$$

여기서  $m$ 은 고주파수 영역에서 spectrum의 기울기를 나타내며 아래와 같이 정의된다.

$$m = \left| \frac{\log(2\pi^2 \xi^2)}{\log 2} \right| \quad (36)$$

여기서

$$\xi = \frac{\sqrt{r}}{\lambda_r} \quad (37)$$

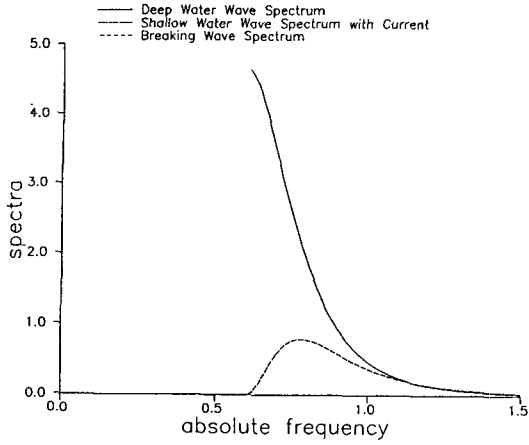


Fig. 3. Spectra  $S_{\omega}(\omega, \theta)$ ,  $S(\omega, \theta)$  and  $S_b(\omega, \theta)$  of waves at  $D=10m$  on current with  $v=2$  m/sec for  $\theta=-30^\circ$  and for  $\xi=0.015$  and  $\omega_0=0.6$  rad/sec.

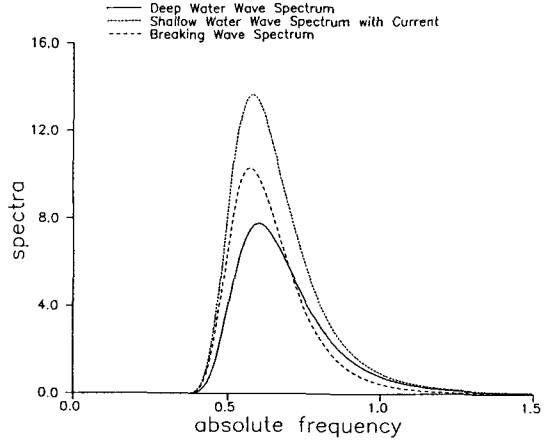


Fig. 5. Spectra  $S_{\omega}(\omega, \theta)$ ,  $S(\omega, \theta)$  and  $S_b(\omega, \theta)$  of waves at  $D=10m$  on current with  $v=2$  m/sec for  $\theta=-10^\circ$  and for  $\xi=0.015$  and  $\omega_0=0.6$  rad/sec.

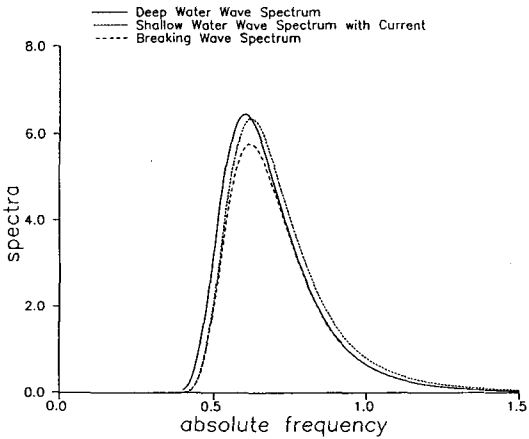


Fig. 4. Spectra  $S_{\omega}(\omega, \theta)$ ,  $S(\omega, \theta)$  and  $S_b(\omega, \theta)$  of waves at  $D=10m$  on current with  $v=2$  m/sec for  $\theta=-20^\circ$  and for  $\xi=0.015$  and  $\omega_0=0.6$  rad/sec.

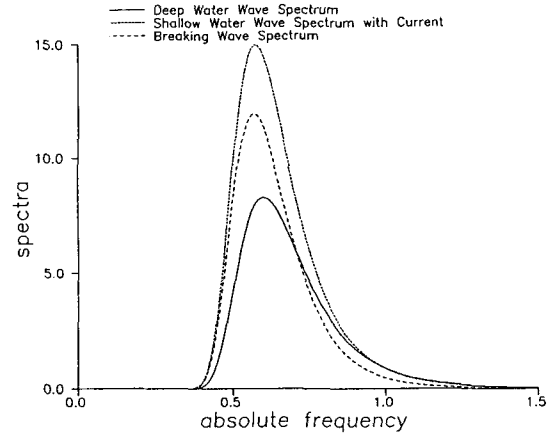


Fig. 6. Spectra  $S_{\omega}(\omega, \theta)$ ,  $S(\omega, \theta)$  and  $S_b(\omega, \theta)$  of waves at  $D=10m$  on current with  $v=2$  m/sec for  $\theta=0^\circ$  and for  $\xi=0.015$  and  $\omega_0=0.6$  rad/sec.

로 주어지는 유의파경사이며  $\lambda_0=2\pi/k$ 는 특성파장이며  $\alpha$ 는 아래와 같이 주어진다.

$$\alpha = \frac{m^{(m-1)/4}}{4^{(m-5)/4}} \frac{(2\pi\xi)^2}{\Gamma(m-1/4)} \quad (38)$$

여기서  $\Gamma(\cdot)$ 는 gamma 함수이다. 따라서 Wallop spectrum은 두개의 변량 즉, 유의파경사  $\xi$ 와 침두주파수  $\omega_0$ 에 의해 결정되는데 이하 모든 수치결과는  $\xi=0.015$ 와  $\omega_0=0.6$  rad/sec에 대해 얻은 값이다. 먼저 외해에서 생성된 불규칙 파랑이  $V=2$  m/sec의 연안

류와 조우하는 경우에 대해 고찰하고자 한다. 수심이 10m 되는 지점에서의  $S(\omega, \theta)$ 와  $S_b(\omega, \theta)$ 가 Fig. 3에서 Fig. 9에 도시되어 있고 쇄파대 스펙트럼  $S_b(\omega, \theta)$ 의 등고선이 Fig. 10에 도시되어 있다. 파랑에너지는  $\theta=0^\circ$  부근에서 최대치에 이른다. 또한  $\theta=-20^\circ, -10^\circ, 0^\circ, 10^\circ$ 의 경우 쇄파가 발생하나  $\theta$ 가 큰 경우에 있어서는 쇄파가 발생하지 않는다. Fig. 11은 나란한 등고선을 갖는 유한수심에서 연안류와 조우하는 파랑의 점성적 변화를 보여준다. 장파는 주로 하상의 영향을 받고, 단파는 주로 흐름에 의해 영향을 받는데

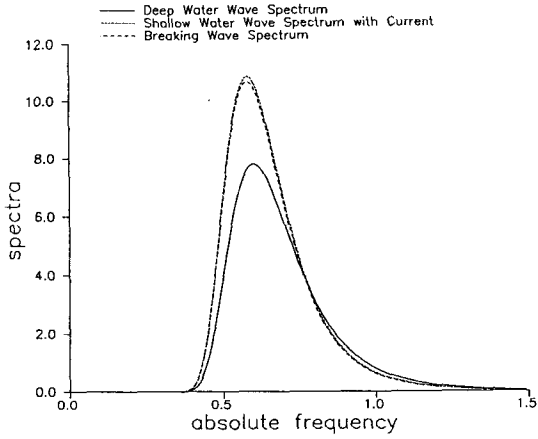


Fig. 7. Spectra  $S_{\infty}(\omega, \theta)$ ,  $S(\omega, \theta)$  and  $S_b(\omega, \theta)$  of waves at  $D=10m$  on current with  $v=2$  m/sec for  $\theta=10^\circ$  and for  $\xi=0.015$  and  $\omega_0=0.6$  rad/sec.

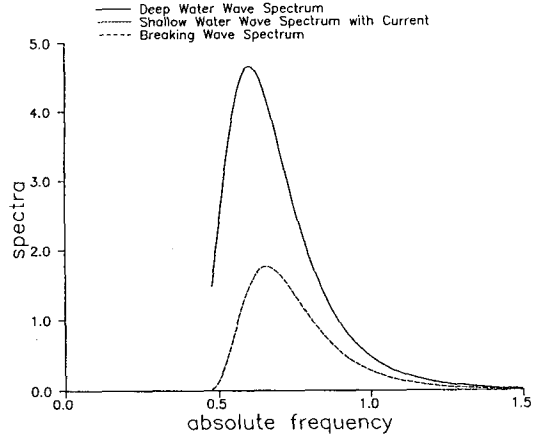


Fig. 9. Spectra  $S_{\infty}(\omega, \theta)$ ,  $S(\omega, \theta)$  and  $S_b(\omega, \theta)$  of waves at  $D=10m$  on current with  $v=2$  m/sec for  $\theta=30^\circ$  and for  $\xi=0.015$  and  $\omega_0=0.6$  rad/sec.

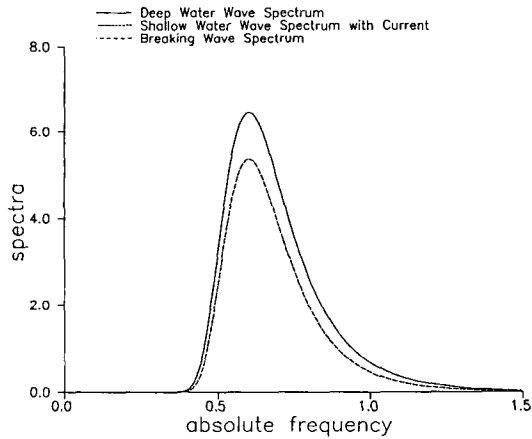


Fig. 8. Spectra  $S_{\infty}(\omega, \theta)$ ,  $S(\omega, \theta)$  and  $S_b(\omega, \theta)$  of waves at  $D=10m$  on current with  $v=2$  m/sec for  $\theta=20^\circ$  and for  $\xi=0.015$  and  $\omega_0=0.6$  rad/sec.

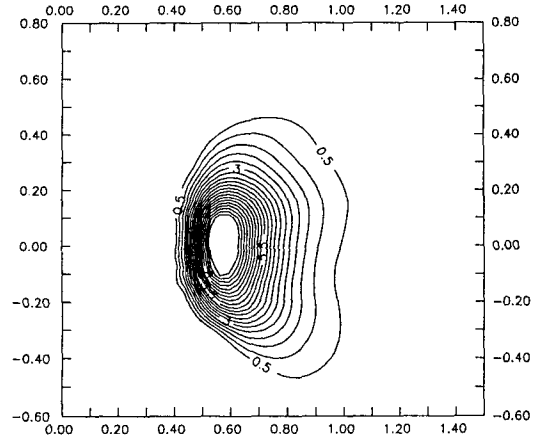


Fig. 10. Contour lines of  $S_{\infty}(\omega, \theta)$  of waves at  $D=10m$  on current with  $V=2$  m/sec for  $\xi=0.015$  and  $\omega_0=0.6$  rad/sec.

$\theta < 0^\circ$ 인 경우 파장에 관계없이 모든 파장은 해안쪽으로 향하게 되는데 반해  $\theta > 0^\circ$ 인 경우 흐름에 의해 변형된 단파들은 점차적으로 해안선과 나란하게 되고 장파들은 천수효과로 인해 해안선쪽으로 변형된다. 따라서 Fig. 3에서 Fig. 9까지 cut-off 주파수가 존재하고 이 주파수보다 작은 파장은 파랑이 존재하지 않는  $(\omega, \theta)$  영역에서 전이해 왔다고 해석된다. 따라서 단파는 심해에서의 shear current의 경우와 동일한 형태로 전이된다. 마지막으로, 외해에서 발생한 불규칙 파랑이  $U = -2$  m/sec로 주어지는 이안류형태의

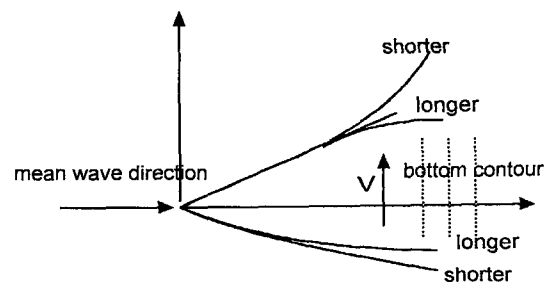


Fig. 11. Qualitative behavior of waves on positive shear current over bottom of parallel contours.

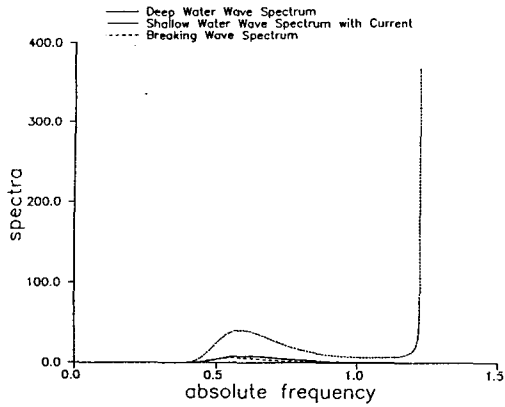


Fig. 12. Spectra  $S_x(\omega, \theta)$ ,  $S(\omega, \theta)$  and  $S_b(\omega, \theta)$  of waves at  $D=10\text{m}$  on current with  $U=-2$  m/sec for  $\theta=0^\circ$  and for  $\xi=0.015$  and  $\omega_0=0.6$  rad/sec.

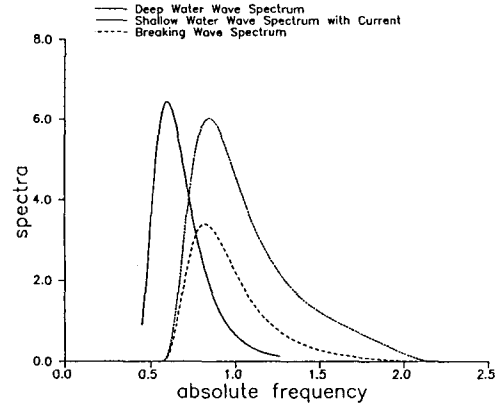


Fig. 14. Spectra  $S_x(\omega, \theta)$ ,  $S(\omega, \theta)$  and  $S_b(\omega, \theta)$  of waves at  $D=10\text{m}$  on current with  $U=-2$  m/sec for  $\theta=20^\circ$  and for  $\xi=0.015$  and  $\omega_0=0.6$  rad/sec.

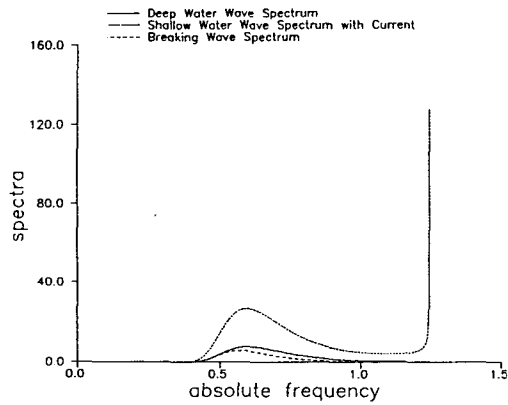


Fig. 13. Spectra  $S_x(\omega, \theta)$ ,  $S(\omega, \theta)$  and  $S_b(\omega, \theta)$  of waves at  $D=10\text{m}$  on current with  $U=-2$  m/sec for  $\theta=10^\circ$  and for  $\xi=0.015$  and  $\omega_0=0.6$  rad/sec.

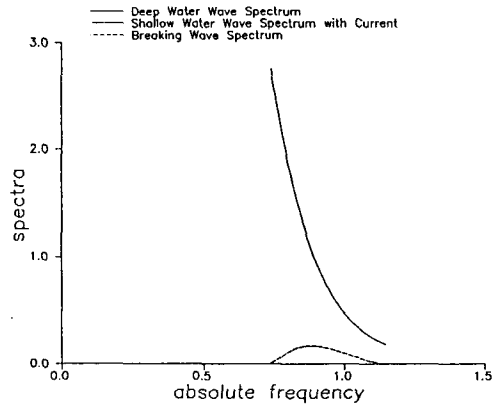


Fig. 15. Spectra  $S_x(\omega, \theta)$ ,  $S(\omega, \theta)$  and  $S_b(\omega, \theta)$  of waves at  $D=10\text{m}$  on current with  $U=-2$  m/sec for  $\theta=30^\circ$  and for  $\xi=0.015$  and  $\omega_0=0.6$  rad/sec.

흐름과 유한수심에서 조우하는 경우에 대해 적용하였다. 수심이 10m되는 지점에서의  $S(\omega, \theta)$ 와  $S_b(\omega, \theta)$ 가 고정좌표계상에서의 값으로 Fig. 12-15에 도시하였고,  $S_b(\omega, \theta)$ 의 등심선이 Fig. 16에 도시되었다.  $\theta=0^\circ$  부근에 에너지는 집중되어 있고 심해에서의 x방향 흐름이 존재하는 경우와 마찬가지로  $\theta=0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ 의 경우에 쇄파는 발생되고  $\theta=30^\circ$ 에 대해서 쇄파는 발생하지 않는다. 장파는 해저지형의 영향으로, 단파는 흐름의 영향으로 해안쪽으로 굴절되는 것을 볼 수 있으며  $\theta=0^\circ, 10^\circ$ 의 경우 각각  $\omega=1.225, 1.244$  rad/sec 부근에서 파랑에너지가 무한대로 증가하는 것을 볼 수 있으나 실제로는 이 경계치에 이르기 전에 파랑은 쇄파된다.

## 5. 結 論

파랑스펙트럼에 쇄파의 영향을 도입할 수 있는 기법이 제시됐고, 이 기법을 심해에서 발달된 방향성 불규칙 파랑이 이안류 및 연안류 형태의 흐름이 존재하는 천해역을 전파할 때 파고와 파향의 변화를 예측하기 위해 적용했으며, 예상대로 쇄파로 인해 파랑 에너지 스펙트럼이 상당량 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구결과는 해석적인 모형으로써 본 연구의 정량적 결과들이 해안구조물의 설계에 사용되기에 앞서 실험치 혹은 추후에 제안될 다른 해석적 모형과의 비교 검토가 선행되어야 할 것이다.

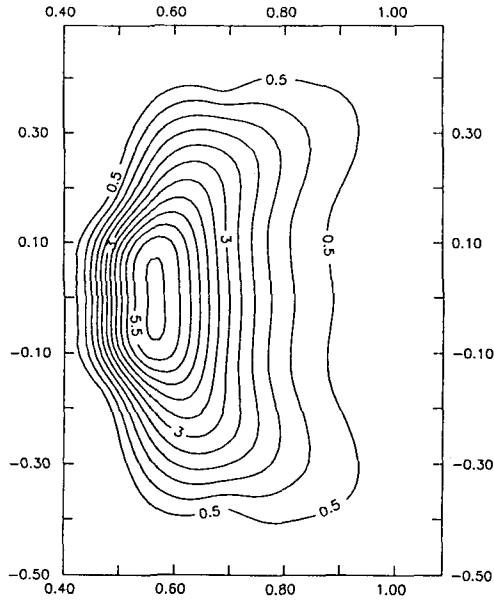


Fig. 16. Contour lines of  $S_w(\omega, \theta)$  of waves at  $D=10$  m on current with  $U=-2$  m/sec for  $\xi=0.015$  and  $\omega_0=0.6$  rad/sec.

謝 辭

본 연구는 1992년 한국과학재단의 일반목적기초 연구과제 학술연구조성비의 지원을 받아 수행하였음을 밝히고 상기재단에 심심한 사의를 표한다(과제번호 : 923-1300-002-1).

參考文獻

Abramowitz, M. and Stegun, I.A. 1968. Handbook of mathematical functions, Dover Publications, Inc., New York, N.Y., 228-936.  
 Battjes, J.A. 1974. Computation of set-up, longshore currents, run-up and overtopping due to wind-generated waves. Communications on Hydraulics No. 74-2, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.  
 Battjes, J.A. and Janssen, J.P.F.M. 1978. Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proceedings of the 16th International Conference of Coastal Engineering, American Society of Civil Engineers, New York, N.Y., 569-587.  
 Borgman, L.E. 1965. A statistical theory for hydrodynamic forces on objects, Technical Report HEL-9-6, Hydraulics Engineering Laboratory, University of California, Berkeley, Calif.  
 Cartwright, D.E. and Longuet-Higgins, M.S. 1956. The statistical distribution of the maxima of a random function, *Proceedings of the Royal Society of London, Ser A*, Vol. 237, 212-232.

Cho, Y.J. and Yoo, K.H. 1993. Effects of free surface fluctuation on response of offshore structures, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 5, No. 1, 1-10.  
 Hasselman, K. 1968. Weak-interaction theory of ocean waves, Basic development in fluid dynamics (edited by M. Holt), Vol. 2, 117-182, Academic Press, New York.  
 Hedges, T.S., Burrows, R. and Mason, W.G. 1979. Wave-current interaction and the effects on fluid loading, Report No. MCE/3/79, Department of Civil Engineering, University of Liverpool, England.  
 Huang, N.E., Chen, P.T., Tung, C.C., Smith, J. 1972. Interactions between steady non-uniform currents and gravity waves applications for current measurements, *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 2, No. 4, 420-431.  
 Huang, N.E., Long, S.R., Tung, C.C., Yuan, Y. and Bliven, L.F. 1981. A unified two-parameter wave spectral model for a general sea state, *J. Fluid Mech.*, Vol. 112, 203-224.  
 Longuet-Higgins, M.S. 1956. The refraction of sea waves in shallow water, *J. Fluid Mech.*, Vol. 1, 163-176.  
 Longuet-Higgins, M.S. 1957. On the transformation of a continuous spectrum by refraction, *Proc. Cambridge Phil. Soc.* 53, 226-229.  
 Longuet-Higgins, M.S. and Stewart, R.W. 1961. The changes in amplitude of short gravity waves on steady nonuniform currents, *J. Fluid Mech.*, Vol. 10, 529-549.  
 Ochi, M.K. and Tsai, C.H. 1983. Prediction of occurrences of breaking waves in deep water, *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 13, 2008-2019.  
 Papoulis, A. 1965. Probability, random variables, and stochastic processes, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, NY., 206-221, 239-258.  
 Phillips, O.M. 1966. The dynamics of the upper ocean, Cambridge University Press, London.  
 Stokes, G.G. 1880. Supplement to a paper on the theory of oscillatory waves, *Mathematical Physical Paper*, Vol. 1, 225-228.  
 Tayfun, M.A., Dalrymple, R.A. and Yang, C.Y. 1976. Random wave-current interactions in water of varying depth, *Ocean Engineering*, Vol. 3, No. 6, 403-420.  
 Thornton, E.B. and Guza, R.T. 1983. Transformation of wave height distribution, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 88, 5925-5938.  
 Tung, C.C. and Huang, N.E. 1987. Breaking wave spectrum in water of finite depth in the presence of currents, Technical Report CERC-87-19, Department of the Army, US Army Corps of Engineers, Washington, DC.  
 Tung, C.C., Huang, N.E., Yuan, Y. and Long, S.R. 1988. Probability function of breaking limited surface elevation, *Journal of Geophysical Research*.  
 Willebrand, J. 1975. Energy transport in a nonlinear and inhomogeneous random gravity wave field, *J. Fluid Mech.* 70(1): 113-126.