

## 合成流 剪斷力 計算을 위한 混合距離 모델 Mixing Length Model of Combined Flow Bed Friction

유 동 훈\*  
Dong Hoon Yoo\*

**要 旨** : 파랑과 해류의 합성류에 의한 해저면 마찰력을 계산하기 위한 모델을 프란틀의 혼합거리이론을 이용하여 개발하였다. 본 모델은 여러 수치적인 적분값들을 약산식으로 구할 수 있게 만들었으므로 모든 해들을 양해법으로 바로 얻을 수 있다. 계산 결과를 현장 관측자료와 비교, 검토하였으며, 그 결과는 대체적으로 만족할만한 일치율을 보였다.

**Abstract** □ A mathematical model for computing the bed friction of combined wave-current flow has been developed based on the Prandtl's mixing length theory. Using various approximate expressions, solutions are obtained explicitly. The computational results are compared and found in reasonable agreements with the data of field measurements.

### 1. 서 론

해양 및 해안지역에서 파랑과 해류는 가장 빈번히 발생하는 물리적 특성인자이며, 각각은 해저면에 전단력 또는 마찰력을 일으켜 여러 환경문제에 직접적인 영향을 미친다. 더욱이 두 중요 환경인자가 서로 합성되었을 때는 최대 전단력 뿐만 아니라 시간평균 전단력도 증가시켜 해저퇴적물의 세굴에 더욱 효과적인 작용을 하게된다. 따라서 연안구조물 기초부분 또는 해저에 부설된 파이프 저면 등에서의 세굴 문제에는 파랑과 해류와의 합성류에 대하여 세심한 주의를 기울여야 할 것이다. 이 밖에 파랑에 의하여 발생하는 연안류의 강도와 분포에도 합성류에 의한 해저면 마찰력이 매우 중요한 역할을 하고 있다.

합성류에 의한 해저면 마찰력 계산방법으로는 그 역학의 복잡성 만큼이나 다양하게 여러 종류의 해법이 개발되어 있는데, 크게 세 종류로 대별할 수 있다(Table 1). 첫 종류는 이차원 수식(quadratic law)에 근거하여 해류의 평균유속과 파랑의 해저면 유속을 단순합성하여 유속평 균을 구하는 것들인데 계산의 용이성으로 소류사 이동량 산정문제, 연안류 계산문제 등에 아직도 많이 이용되어 오고 있다. 그

러나 경계층의 두께를 고려치 않고 유속을 합성하였기 때문에 마찰계수 산정에 많은 의문점이 따르고 각각의 마찰계수를 대등한 관계로 보았을 때 계산해의 신뢰성이 많이 떨어져, 경우에 따라 10배 이상의 오차를 가져올 수 있다(Yoo and O'Connor, 1987).

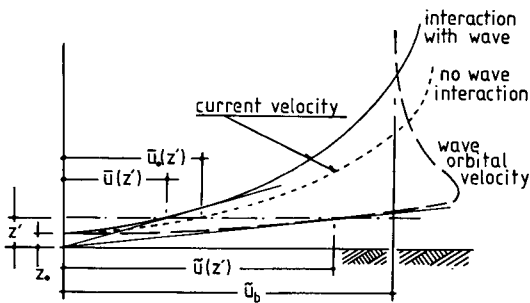
둘째 군에 속한 모델들은 Eddy viscosity(난류확산계수) 개념을 이용하여 층별로 다양하게 확산계수를 선정하는 데, 특히 합성류 확산계수의 크기 결정에 많은 이견을 보이고 있다(Table 1). 최근에는 난류 운동에너지를 수치해법으로 구하여 확산계수를 보다 정확히 계산하는 모델도 개발되었으나(Davies *et al.*, 1988), 수치해석상의 Damping effect 때문에 최종 유속분포 계산의 정확도는 크게 떨어질 것으로 판단된다. 또한 이 확산모델들의 결정적인 단점은 계산의 복잡성과 계산시간의 과다성이다. 특히 계산해를 구하려면 반복과정을 거쳐야 하기 때문에 컴퓨터이용은 필수적이다. 따라서 확산계수 모델 이론들은 공학적인 실제문제 이용에 많은 문제점을 안고 있다.

세째 군은 Prandtl의 혼합거리이론(mixing length theory)에 근거한 모델들로서 계산이 용이

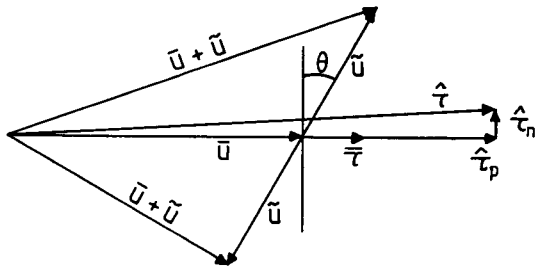
\*亞洲大學校 土木工學科(Department of Civil Engineering, Ajou University, Suwon 441-749, Korea)

**Table 1.** Various mathematical models of bottom friction driven by combined wave-current flow

Theoretical basis	Models	Formation of Remarks
Quadratic Law ( $\tau = \rho C  U U$ )	Jonsson (1966)	$\hat{C} = (\bar{C} + \delta \bar{C}) / (1 + \delta)$
	Longuet-Higgins (1970) Ebersole & Dalrymple (1980)	$\langle \hat{\tau} \rangle = \rho \hat{C} \hat{u}_b \bar{U}$ , $\hat{C} \approx \bar{C}$ $\langle \hat{\tau} \rangle = \rho \hat{C} \langle (\bar{U} + \bar{u})   (\bar{U} + \bar{u}) \rangle$
Eddy Viscosity Law ( $\tau = \rho \varepsilon \frac{\partial u}{\partial z}$ )	Lundgren (1972)	$\hat{\varepsilon} = \bar{\varepsilon} + \hat{\varepsilon}_w$ or $\hat{\varepsilon} = \sqrt{\bar{\varepsilon}^2 + \hat{\varepsilon}_w^2}$
	Grant & Madsen (1979)	$\hat{\varepsilon} = \hat{\varepsilon}_{wc}$
	Fredsøe (1984)	logarithmic profile
	Christoffersen & Jonsson (1985)	$\hat{\varepsilon} = f(\hat{\varepsilon}_{wc}, z)$
	Coffey & Nielsen (1986) Myrhaug & Slaattelid (1989) Davies, et al. (1988)	$\hat{\varepsilon} = f(\bar{\varepsilon}, \hat{\varepsilon}_w)$ 2-layers within wave b. layer $\hat{\varepsilon} = f(x, z, \partial \hat{u} / \partial z, t)$
Mixing Length Theory ( $\tau = \rho l^2 \left  \frac{\partial u}{\partial z} \right  \frac{\partial u}{\partial z}$ )	Bijker (1966)	$\langle \hat{\tau} \rangle = f(\mu) \bar{\tau}$ , $\mu = 0.18 \hat{u}_b / \bar{U} \bar{C}$
	Swart (1974)	$\mu = \hat{u}_b \bar{C} / \bar{U} \bar{C}$
	Bakker & Van Doorn (1978)	time variation in turbulence
	Yoo & O'Connor (1987) Yoo (1989)	$\mu = \hat{u}_b / \alpha \bar{U}$ , $\alpha = (\bar{D} / \hat{D})^{1/3}$ improvement of $f(\mu)$



**Fig. 1.** Vertical profiles of wave and current velocities near the sea bed, modified after Bijker (1966).



**Fig. 2.** Schematic diagram of wave-current interaction related with bed friction.

할 뿐만 아니라 경계층에서의 수리특성도 적절히 고려하였기 때문에 정확도도 높아, 이용에 큰 문제점이 없을 것으로 사료된다. 특히 모든 해는 양해법으로 구해지기 때문에 간단히 계산할 수 있는 이점이

있다. 본고는 개선된 혼합거리 모델의 기본원리 및 계산해법을 소개하며, 마지막으로 발표된 현장관측 자료에 비교 검토하기로 한다.

## 2. 기본원리

본 모델의 기본원리인 혼합거리이론의 근간은 난류유속성분  $u', v'$  이 유속의 연직 변화율과 혼합거리의 곱에 비례하며, 이 때 혼합거리는 해저면으로부터의 거리에 비례하고 비례상수는 어떤 조건에 관계없이 일정하다는 것이다. 똑같은 이론을 일방향 해류운동 뿐 아니라 파랑운동에도 적용하는 데, 합성류일 경우에는 경계층내의 어느 같은 지점에서 유속성분을 합성, 시간평균을 구하여 주기평균 전단력을 구한다. 유속을 합성하는 데, 해저면으로부터의 접선이 기울기가 되는 지점 ( $z' = ez_0$ )을 택하며, 두 유속을 합성할 때 증분된 난류운동에 의한 해류유속의 감소효과를 고려한다. 따라서 합성류 전단력의 각 성분은 Fig. 1을 참조하여

$$\langle \hat{\tau} \rangle_p = \left\langle \frac{\hat{u}_p(z')}{\hat{u}(z')} \rho l^2 \left( \frac{\partial \hat{u}}{\partial z} \right)_z^2 \right\rangle = \beta \bar{\tau} \quad (1)$$

$$\langle \hat{\tau} \rangle_n = \left\langle \frac{\hat{u}_n(z')}{\hat{u}(z')} \rho l^2 \left( \frac{\partial \hat{u}}{\partial z} \right)_z^2 \right\rangle = \gamma \bar{\tau} \quad (2)$$

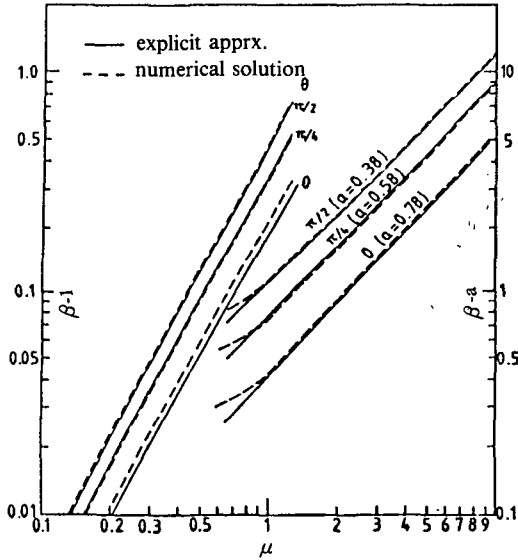


Fig. 3. Comparison of  $\beta$  values against  $\mu$  between numerical solution and explicit approximation for  $\theta = 0, \pi/4$  and  $\pi/2$ .

여기서  $\tau$ 는 해저면 전단력,  $u$ 는 유속,  $\rho$ 는 밀도,  $l$ 은 혼합거리,  $\bar{\tau}$ 는 해류만 작용했을 때의 해저면 전단력,  $\Lambda$ 는 해류와 파랑성분의 합성을 나타내고, 첨자  $p$ 는 해류와 나란한 방향,  $n$ 는 해류와 수직되는 방향을 나타내며  $\langle \rangle$ 는 주기평균을 나타낸다. 각 성분의 유속은

$$\hat{u}(z') = (\bar{u}^2 + \bar{u}^2 + 2\bar{u}\bar{u}\sin\theta)^{1/2} \quad (3)$$

$$\hat{u}_p(z') = (\bar{u} + \bar{u}\sin\theta)_z \quad (4)$$

$$\hat{u}_n(z') = (\bar{u}\cos\theta)_z \quad (5)$$

으로 나타내며 (Fig. 2), 여기서  $\theta$ 는 교호각, 점점  $z'$ 에서  $l = kz'$  ( $k$ 는 von Kármán Constant),  $\partial\hat{u}/\partial z = \hat{u}(z')/z'$ 이고 해류의 유속  $\bar{u}$ 가 해류만 존재할 때의 유속  $\bar{u}_0$ 로부터 감소되어 감속계수  $\alpha$ 를 사용하여  $\bar{u}(z') = \alpha\bar{u}_0(z')$ 로 가정할 수 있다. 따라서 식 (1)과 (2)에서의 비례상수  $\beta$ 와  $\gamma$ 는

$$\beta = \langle \alpha^2 (1 + \mu_a \sin\theta \sin\lambda) (1 + \mu_a^2 \sin\lambda + 2\mu_a \sin\theta \sin\lambda)^{1/2} \rangle \quad (6)$$

$$\gamma = \langle \alpha^2 \mu_a \cos\theta \sin\lambda (1 + \mu_a^2 \sin\lambda + 2\mu_a \sin\theta \sin\lambda)^{1/2} \rangle \quad (7)$$

여기서

$$\mu_a = \alpha^{-1} \mu \quad (8)$$

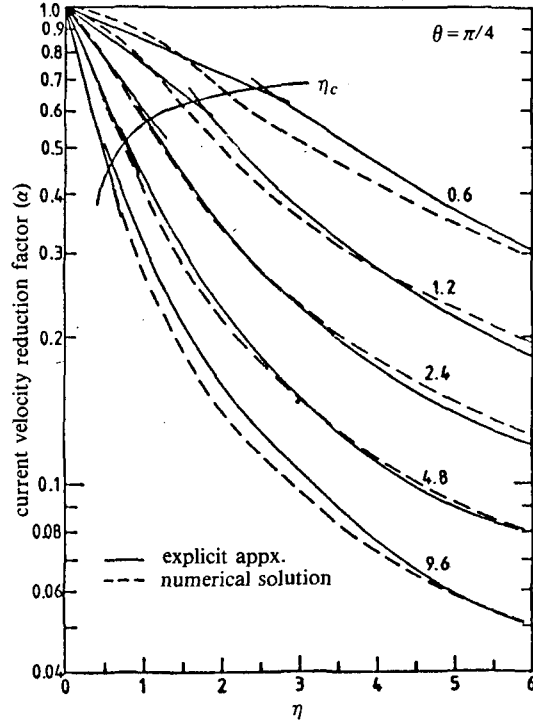


Fig. 4. Comparison of  $\alpha$  values against  $\eta$  between numerical solution and explicit approximation with various values of  $\zeta$  for  $\theta = \pi/4$ .

$$\mu = \hat{u}(z') / \bar{u}_0(z') \quad (9)$$

$\lambda$ 는 파랑의 위상함수이다. Bijker(1967)는 여러 교호각에 대하여 비례상수  $\beta$ 와  $\gamma$ 에 대한 약산식을 제시하였는데, 이를 보다 일반화시켜 표현하면

$$\beta = \alpha^2 (a + b\mu_a^c) \quad (10)$$

$$\gamma = \alpha^2 (d + f\mu_a^h) \quad (11)$$

이고,  $a, b, c, d, e, f, h$ 는 상수로서 Fig. 5에 제시되어 있다. Fig. 3에 도시된 바와 같이 상수의 제1셋트 (Fig. 5)는 유속비  $\mu$ 가 1보다 작은 범위에서 매우 양호한 근사치를 주며, 제2셋트는 유속비  $\mu$ 가 1보다 큰 범위에서 매우 양호한 근사치를 주어 두 경우 모두 오차는 5% 이내에 있다. 반면에 마지막 셋트는  $0.7 < \mu < 6.0$  범위내에서 그대로 양호한 근사치를 주나 이 범위 밖에서 계산오차는 매우 커지므로 사용에 주의를 요한다.

해류의 감속계수  $\alpha$ 는 해류만의 확산계수  $\bar{\epsilon}$ 와 합성류의 확산계수  $\hat{\epsilon}$ 와의 상대비로 구하는 데, 합성류 확산계수의 산정에 많은 문제점을 안고 있었다.

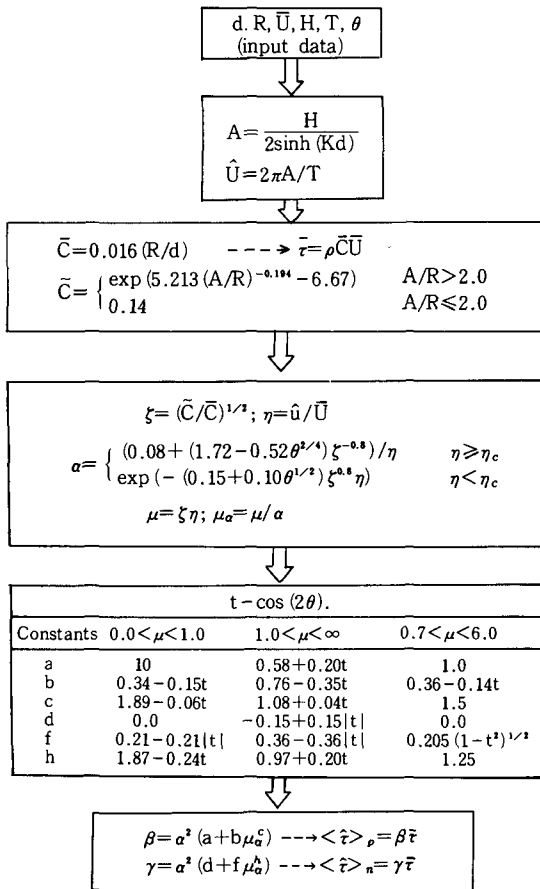


Fig. 5. Solution procedure of the mean bed friction parameters of wave-current flow.

대부분의 확산계수 모델들은 파랑 확산계수가 최대 마찰속도 (frictional velocity)  $\hat{u}_*$ 와 비례하는 것으로 가정하였는데, 이를 합성류에 적용했을 때는 최대값이 전 주기 동안 적용되어 과다평가되는 경향이 있었다. 이의 개선책으로 확산계수가 에너지손실속도(dissipation speed)  $u_+$ 에 비례한다고 가정하여 감속계수를 구하였다(Yoo and O'Connor, 1987; Yoo, 1989). 즉

$$\alpha = \frac{\bar{\epsilon}}{\hat{\epsilon}} = \frac{\bar{u}_+}{\hat{u}_+} = \left(\frac{\bar{D}}{\hat{D}}\right)^{1/3} \quad (12)$$

여기서  $\bar{D}$ 는 해류만의 마찰에너지 손실률,  $\hat{D}$ 는 합성류의 마찰에너지 손실률이며 손실속도  $u_+ = (D/\rho)^{1/3}$ 이다.

해류만의 마찰에너지 손실률은  $\bar{D} = \rho \bar{C} \bar{U}^3$  ( $\bar{C}$ 는 해류의 마찰계수,  $\bar{U}$ 는 수심평균유속)이며 합성류

의 마찰에너지 손실률은

$$\hat{D} = \beta \rho \bar{C} \bar{U}^3 + \delta \rho \bar{C} \hat{u}_*^3 \quad (13)$$

여기서  $\bar{C}$ 는 파랑의 마찰계수,  $\hat{u}_*$ 는 해저면에서의 최대 파랑유속이며,  $\delta$ 는 비례상수로서

$$\delta = \langle |\sin \lambda (\sin \lambda + \mu_a^{-1} \sin \theta)| (\mu_a^{-2} + \sin^2 \lambda + 2\mu_a^{-1} \sin \lambda \sin \theta)^{1/2} \rangle = \frac{4}{3\pi} + r\mu_a^2 \quad (14)$$

여기서  $r = 0.43 - 0.2 \cos 2\theta$ ,  $q = 0.1 \cos 2\theta - 1.9$ 이다 (O'Connor and Yoo, 1988). 식 (13)을 식 (12)에 대입하면

$$\alpha = (\beta + \delta \eta \mu^2)^{-1/3} \quad (15)$$

또는

$$a\alpha^5 + b\mu^c \alpha^{5-c} + r\eta \mu^{2+q} \alpha^{3-q} + \frac{4}{3\pi} \eta \mu^2 \alpha^3 - 1 = 0 \quad (16)$$

여기서  $\eta = \hat{u}_*/\bar{U}$ 이고  $\mu = \xi\eta$ ,  $\xi = (\bar{C}/\bar{C})^{1/2}$ 이다.

상기 식들로부터 감속계수  $\alpha$ 는  $\eta$ ,  $\theta$ 와  $\xi$ 의 함수임을 알 수 있다. Fig. 5에 제시된 바와 같이 상수 a, b, c, d, e, f, h의 정확한 값들을 취하여  $\alpha$ 의 값을 식 (16)으로부터 Newton-Raphson 법으로 구할 수 있다. 계산의 편리를 위하여 수치해석으로 얻은 값들을 재정리하여 양해법으로 구할 수 있도록 하였는데, 그 결과식은 다음과 같다.

$$\alpha = \begin{cases} [0.08 + (1.72 - 0.52\theta^{1/4})\xi^{-0.8}]\eta^{-1}, \eta \geq \eta_c \\ \exp[-(0.15 + 0.1\theta^{1/2})\xi^{0.8}\eta], \eta < \eta_c \end{cases} \quad (17)$$

여기서  $\eta_c = 4.1 \exp(-0.9 - 0.5 \ln \xi)$ 이며,  $\theta$ 는 라디안값이다.

교호각  $\theta = \pi/4$ 에 대하여 Fig. 4에 도시된 바와 같이  $\xi$ 와  $\eta$ 의 광범위한 범위에 대하여 식 (17)을 사용하여 얻은 근사치는 식 (16)을 수치해석으로 풀어 얻은 정확치와 근접한 값을 보임을 알 수 있다. 특히  $0.3 < \xi < 10.0$ ,  $0.06 < \eta < 5.0$  범위에서 매우 근접한 값을 주는데, 이 범위 밖에서는 오차가 상당히 클 수 있으므로 주의를 요한다. 따라서 이 범위 이하에서는 유속감속을 고려하지 않거나 ( $\alpha = 1$ ) 해류만 작용하는 것으로 가정하고, 이 범위 이상에서는 파랑만 작용하는 것으로 가정하여 계산하는 것

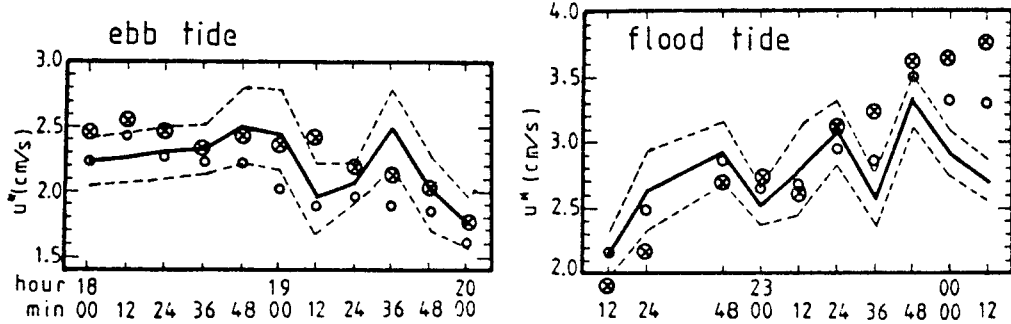


Fig. 6. Comparison of  $u^*$  between measurements and predictions: (—) measurements; (---) 95% confidence limits; (○ ○) predictions by Myrhaug and Slaattelid with  $R = 1.1$  cm for ebbtide and  $R = 7.5$  cm for flood tide; (⊗ ⊗) predictions by the present model with  $R = 15$ cm for ebb and flood tides.

이 좋다. 또한  $\mu < 0.7$ 인 경우에 감속계수  $\alpha$  가 식 (17)을 사용했을 때 1.0보다 작게 계산되는데, 이는 물리적으로 인정될 수 없는 값이므로, 이 때는  $\alpha = 1.0$ 으로 가정하거나 식 (16)을 수치해석으로 풀어 구하는 것이 바람직하다.

합성류의 최대 마찰력과 절대치의 평균값은 다음과 같이 구한다.

$$\hat{\tau}_{wc} = \sigma \bar{\tau} \quad (18)$$

$$\langle |\hat{\tau}| \rangle = \xi |\bar{\tau}| \quad (19)$$

여기서

$$\sigma = [(\bar{u}^2 + \hat{u}^2 + 2\bar{u}\hat{u}\sin\theta) / \bar{u}_0^2]_z \quad (20)$$

$$\xi = \langle |\bar{u}^2 + \hat{u}^2 + 2\bar{u}\hat{u}\sin\theta| / \bar{u}_0^2 \rangle_z \quad (21)$$

대체적으로  $|2\bar{u}\hat{u}\sin\theta| \leq |\bar{u}^2 + \hat{u}^2|$  이며  $\bar{u} = \alpha \bar{u}_0$  이고  $\hat{u} = \hat{u}\sin\lambda$  이므로, 비례상수  $\sigma$  와  $\xi$  는

$$\sigma = \alpha^2 + \mu^2 + 2\alpha\mu\sin\theta \quad (22)$$

$$\xi = \alpha^2 + \frac{1}{2}\mu^2 \quad (23)$$

으로 간단히 구해진다.

### 3. 계산 과정

수심 ( $d$ ), 저면조도계수 ( $R$ ), 해류의 유속 ( $U$ ), 파고 ( $H$ ), 파랑주기 ( $T$ ), 교호각 ( $\theta$ ) 등이 주어졌을 때의 계산방법이 Fig. 5에 도시되어 있다. 우선 Doppler Equation 과 Dispersion Relation 을 이용하여 해류상에서의 파랑의 파수벡터와 파장을 계

산한 후, 선형파랑이론으로 해저면에서의 최대 파랑 유속  $\hat{u}_0$ 와 최대 행정거리  $A$ 를 구한다. 난류도가 클 때 각각의 마찰계수는 간단한 지수함수로서 구할 수 있는데, 제시된 바와 같이 해류마찰계수는 수심에 대한 상대조도  $R/d$ 의 함수이며 파랑마찰계수는 최대 행정거리에 대한 상대조도  $R/A$ 의 함수이다. 이들 마찰계수와 관련지은 이차원식을 이용하면 해류에 의한 해저면 마찰력  $\bar{\tau}$ 와 파랑에 의한 최대 마찰력  $\hat{\tau}$ , 접점에서의 유속비  $\mu$  등을 바로 구할 수 있다.

접점에서의 해류속도 감소율  $\alpha$ 는 합성류의 에너지 손실률을 구해야만 계산될 수 있어 식 (16)을 이용하여 음해법으로만이 정확한 해를 구할 수 있으나, 계산효율을 증진시키기 위하여 식 (17)을 이용하여 근사치를 구하는 것이 바람직하다. 시간평균 전단력의 각 성분치—해류와의 평행성분치와 수직 성분치—는 해류전단력과 비례관계로 얻어지는데 (식 (1)과 (2) 참조), 비례상수  $\beta$ 와  $\gamma$ 는 접점에서의 유속비, 속도감소율, 교호각 등의 함수로서 Fig. 5에 제시된 수식들을 이용하여 구한다(식 (10)과 (11) 참조). 끝으로 경우에 따라 필요하다면 합성류의 마찰에너지 손실률은 식 (13), 최대 마찰력은 식 (22)와 (18), 절대치의 평균값은 식 (23)과 (19)로서 구할 수 있다.

### 4. 비교 고찰

본 모델은 이제까지 발표된 거의 모든 실험자료에 적용하여 매우 만족할만한 결과를 얻었으나(Yoo

and O'Connor, 1987) 임의각에 대한 실험자료는 없었다. 본 고는 최근에 발표된 현장관측자료와 비교, 검토하여 모델의 유용성을 다시 한번 살펴보고자 하며, 특히 임의각으로 합성된 경우의 현장자료에 대한 비교 검토의 의의는 더욱 높다 할 수 있겠다.

본 고에 이용된 관측자료는 미국 시애틀 근교 후안취카 협수로에서 관측된 자료로서 조석 평균수심은 18m 이고 해저면은 바위덩어리들로 이루어져 매우 거칠으나 고정되었다고 볼 수 있었다(Myrhaug and Slaattelid, 1989). 본 관측자료는 확산계수 모델의 일종인 Myrhaug and Slaattelid의 모델테스트에도 이용하였는데, Fig. 6에는 그 결과도 같이 비교, 검토하였다.

현장관측은 일조석 주기 동안 거의 매 12분 간격으로 해저면 가까이 다섯점에서의 유속을 관측하여 해저면 전단력을 유추하였으며, 높이 3.66m에서의 유속을 일방향 흐름의 유속으로 보았으며 파고는 관측하지 않고 대신에 해저면에서의 최대 파랑유속을 관측자료로부터 구하여 제시하였다. 본 관측자료에서 가장 문제시되는 것은 해저면의 상태에 대한 보다 구체적인 자료가 없어 Nikuradse 유효조도계수를 산정키 어렵다는 점이다. 또한 매 관측시각의 수심자료가 없는 데, Fig. 5의 계산방법에 제시된 바와 같이 일방향 흐름의 마찰계수는 조도계수 뿐만 아니라 수심의 함수이므로 이 또한 계산오차를 발생시킬 수 있는 요인이다. 본 모델의 검증에 있어 유효조도계수는 추측으로 몇 개의 값을 적용하여 최선의 값 15cm를 취하였으며, 수심은 평균수심인 18m를 그대로 전 관측시각에 적용하였다. 이에 반하여 Myrhaug and Slaattelid는 유효조도계수의 값을 낙조시 1.1cm, 창조시 7.5cm로 전혀 다르게 취하였으며, 수심과 일방향 흐름의 마찰계수는 고려하지 않았다.

Fig. 6에 제시된 바와 같이 창, 낙조 어느 때나 똑같은 조도계수치를 취하여 대체적으로 만족할만한 계산결과를 얻었다. 특히 낙조시의 계산치는 대부분 관측치의 95% 한계 신뢰선내에 들며, 창조시 약간의 오차를 보이거나 전체적인 경향은 비슷한 양상임을 알 수 있다. 만일 수심을 보다 정확한 값으로 취하면 더욱 양호한 계산결과를 얻을 것으로 기대된다.

본 모델은 결과적으로 Myrhaug와 Slaattelid의

모델과 비슷한 계산치를 주었으나 적용한 조도계수치가 상당히 다르므로 많은 의문점이 남는다. 즉 같은 조도계수치를 가정하면 서로 다른 계산결과를 주게 될 것이다. 우선 그들이 적용한 창조시 조도계수치가 낙조시 조도계수치보다 6배 이상 크다는 점에 주목하게 된다. 같은 해저면 상태에서도 흐름의 방향이 다르면 조도계수에 약간의 변화가 있을 수 있겠으나 6배 이상이나 달라질 수는 없을 것으로 판단된다. 또한 이제까지 알려진 바로 조도는 해저면 퇴적입자 평균직경의 1배 내지 4배의 크기로 알려져 있는데, 본 관측지점에서 관측된 퇴적석(Gravel)의 직경은 적어도 5cm 이상은 될 것으로 판단되므로 낙조시에 적용된 1.1cm는 실제보다 너무 작은 값일 것으로 추측된다.

## 5. 결 론

파랑과 해류의 합성류에 의한 해저면 마찰력을 간단히 계산하는 혼합거리 모델을 현장 관측자료에 적용하여 비교적 만족스런 결과를 얻었다. 특히 유효조도계수의 값을 일정하게 가정하고도 창, 낙조에 관계없이 어느 시각에서나 양호한 계산결과를 보여준 점은 관측자료의 미비에도 불구하고 본 모델의 신뢰성을 한층 높여준 관건이라 할 수 있다. 본 모델은 혼합거리이론에 근거를 둔 경계층 모델로서 계산이 용이하고 빠를 뿐만 아니라 계산오차도 작아, 합성류에 의한 소류사 이동현상 또는 파랑에 의한 연안류 계산 등에 유용히 쓰일 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- Bakker, W.T. and Van Doorn, Th., 1978. Near-bottom velocities in waves with a current, *Proc. 16th Conf. Coastal Eng., ASCE*, 2: 1394-1413.
- Bijker, E.W., 1966. The increase of bed shear in a current due to wave motion, *Proc. 10th Conf. Coastal Eng., ASCE*, 1: 746-765.
- Bijker, E.W., 1967. Some consideration about scales for coastal models with movable bed, Delft Hydraulics Lab., Publ. No. 50.
- Christoffersen, J.B. and Jonsson, I.G., 1985. Bed friction and dissipation in a combined current and wave-motion, *Ocean Eng.*, 12, 5: 387-423.
- Coffey, F.C. and Nielsen, P., 1986. The influence of waves on current profiles, *Proc. 20th Conf. Coastal Eng., ASCE*.

- Davies, A.G., Soulsby, R.L. and King, H.L., 1988. A numerical model of the combined wave and current bottom boundary layer, *J. Geophys. Res.*, **93**(c1): 491-508.
- Ebersole, B.A. and Dalrymple, R.A., 1980. Numerical modeling of nearshore circulation, *Proc. 17th Conf. Coastal Eng.*, ASCE, **4**: 2710-2725.
- Fredsoe, J., 1984. The turbulent boundary layer in wave-current motion, *J. Hydr. Eng.*, ASCE, **110**, **8**: 1103-1120.
- Grant, W.D. and Madsen, O.S., 1979. Combined wave and current interaction with a rough bottom, *J. Geophys. Res.*, **84**(c4): 1797-1808.
- Jonsson, I.G., 1966. The friction factor for a current superposed by waves, *Coastal Eng. Lab. and Hydr. Lab., Tech. Univ. Denmark*, **11**: 2-12.
- Lundgren, H., 1972. Turbulent currents in the presence of waves, *Proc. 13th Conf. Coastal Eng.*, ASCE, **1**: 623-636.
- Longuet-Higgins, M.S., 1970. Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, *J. Geophys. Res.*, **75**, 203-248.
- Myrhaug, D. and Slaattelid, O.H., 1989. Combined wave and current boundary layer model for fixed rough seabeds, *Ocean Eng.*, **16**, **2**: 119-142.
- O'Connor, B.A. and Yoo, D., 1988. Mean bed friction of combined wave-current flow, *Coastal Eng.*, **12**: 1-21.
- Swart, D.H., 1974. Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles, Delft Hydraulics Lab., Publ. No. 131.
- Yoo, D., 1986. Mathematical modelling of wave-current interacted flow in shallow waters, Ph.D. Thesis, University of Manchester.
- Yoo, D. and O'Connor, B.A., 1987. Bed friction model of wave-current interacted flow, *Proc. Spec. Conf. Coastal Hydrodynamics*, ASCE: 93-106.
- Yoo, D., 1989. Explicit modelling of bottom friction in combined wave-current flow, *Coastal Eng.*, (in press).