

일정경사면에서의 파에너지 바닥마찰손실계수 Frictional Wave Energy Dissipation Factor on Uniform Sloping Beach

유동훈* · 엄호식* · 장문엽*
Dong Hoon Yoo*, Ho Sik Eum* and Moon Yup Jang*

요 지 : 파에너지는 쇄파되기 이전까지 주로 해저면과의 마찰력에 의하여 감소한다. 파마찰력을 산정하기 위한 연구는 여러 연구자들에 의해 진행되어 왔으며 어느 특정지점에서의 파마찰력 또는 파마찰손실률은 선형파이론으로 주어지는 해저면 입자유속과 연관된 파마찰계수의 도입으로 상당히 정확하게 간단하게 산정할 수 있다. 그러나 장구간에 걸쳐 파마찰력에 의하여 점차적으로 감소되는 파고변이는 상당한 반복 과정을 거쳐야 산정할 수 있었다. 본 연구에서는 기존 경험식을 이용해 전난류, 완난류 경우에 대해 일정경사면에서 천수효과와 마찰손실에 의한 파고 변화를 비교적 간단한 방법으로 추정하는 방법을 제시하였다. 해변경사가 일정할 때 파고 변이율은 천수계수와 파고 마찰손실계수의 곱으로 간단히 구할 수 있다. 실제 해안과 비슷한 조건의 경우에 대하여 반복시산 과정으로 구한 수치와 간편 산정식으로 간단히 계산한 결과를 비교하여 제시하였다.

핵심용어 : 파마찰력, 전난류, 완난류, 천수계수, 파고 마찰손실계수

Abstract : Wave energy is dissipated mainly by friction on the seabed until the waves reach the surf zone. Many researchers have investigated the mechanism of wave friction and the bottom shear stress induced by wave motion at a certain point is now well estimated by introducing the wave friction factor related to the near bed velocity given by linear wave theory. The variation of wave energy or wave height over a long distance can be, however, estimated by an iteration process when the propagation of waves is strongly influenced by bed friction. In the present study simple semi-theoretical equation has been developed to compute the variation of wave height for the condition of wave propagation on a constant beach slope. The ratio of wave height is determined by the product of shoaling factor and wave height friction factor (frictional wave energy dissipation factor). The wave height estimated by the new equation is compared with the wave height estimated by the solution of numerical integration for the condition that the waves propagate on a constant slope.

Keywords : wave frictional force, rough turbulent flow, smooth turbulent flow, shoaling factor, wave height friction factor (frictional energy dissipation factor)

1. 서 론

파가 심해에서 천해로 이동하여 해안에 접근하여 해저면을 느끼기 시작하면서 천수, 굴절, 회절, 반사 등에 따라 급격한 변형을 겪게 되며 쇄파되기 이전까지 파에너지의 대부분은 해저면과의 마찰력에 의하여 감소한다. 따라서 파에 의한 마찰력 또는 파마찰계수와 파와 해류의 합성류에 의한 마찰력을 올바르게 산정하기 위한 연구는 주요 연구테마로서 여러 연구자들에 의해 진행되어 왔다.

파마찰계수를 정확히 산정하고자 하는 노력은 Kajiura(1968)의 이론전개와 Jonsson(1967)의 수조실험결과와의 계수조정으로 상당한 결실을 보아 왔으며, 이제까지 Jonsson 또는 Kajiura의 이론식을 큰 이의 없이 사용하여 왔다. 이들 이론

은 전난류 조건에 대하여 적합한데 완난류 조건을 포함한 광범위한 조건에 대하여는 Kamphuis(1975)의 실험자료를 이용하여 완난류 조건에서의 마찰계수를 추정할 수 있다. Kamphuis는 자연 조건을 유지하기 위하여 이동상 골재를 그대로 이용하였는데 사련의 발달로 등가조고의 추정이 불확실한 단점이 나타났다. 따라서 전난류 조건에 대하여는 등가조고 추정이 정확하다고 판단되는 Jonsson식이 우수하다고 추정된다.

한편 파마찰계수는 최대마찰력을 최대파속과 관계지어 정의되었으며, 일반적으로 전주기를 대표하는 파마찰계수와 거의 동일하다고 추정된다. 마찰력과 해저면파속의 위상차가 1/6일 때 이론적으로 동일하다. 따라서 파에너지 마찰손실률은 어느 정도 정확하게 추정될 수 있다. 그러나 경사가 거의 균일한 해변에서도 장구간에서의 파에너지 감소를 또는 파에너

*아주대학교 환경건설교통공학부(Corresponding author: Dong Hoon Yoo, Department of Civil Engineering, Ajou University, Suwon 443-749, Korea, dhyoo@ajou.ac.kr)

지 마찰감소률에 따른 파고 추정은 상당한 반복과정을 거쳐야 산정할 수 있다. 본 연구에서는 일정경사면에서 천수효과와 마찰손실에 의한 파고 변화를 비교적 간단한 방법으로 추정하는 방법을 기술하였다.

2. 파마찰계수

파마찰계수는 다음과 같이 정의한다.

$$\tau_x = \rho C_w u_{bx}^2 \tag{1}$$

여기서 τ_x 는 최대 파마찰력, ρ 는 해수의 밀도, C_w 는 파마찰계수, u_{bx} 는 해저면에서 파운동의 최대 입자유속이다. 한편 파에너지손실률은 대표 또는 유효 파마찰계수를 도입하였을 때 유속이 상현곡선을 갖는다고 가정하였을 때 다음과 같이 표기된다.

$$D = \frac{4}{3\pi} \rho C_e u_{bx}^3 \tag{2}$$

여기서 D 는 파에너지 손실률, C_e 는 유효 파마찰계수이다. 마찰력과 해저유속의 위상차가 $\pi/6$ 일 때 $C_e=C_w$ 이다. 위상차는 일반적으로 $\pi/8 \sim \pi/4$ 의 범위이며, 이에 따른 오차는 5% 내외이다. 따라서 C_e 는 C_w 와 동일하게 취급한다.

전난류 조건에 대한 Jonsson(1967)의 파마찰계수 산정식은 다음과 같으며,

$$\frac{k}{\sqrt{C_{wR}}} + \ln \frac{1}{\sqrt{C_{wR}}} = 1.549 + \ln A_r \tag{3}$$

상기식에 대한 Swart(1987)의 약산식은 다음과 같다.

$$C_{wR} = \exp[5.213 \varepsilon^{0.194} - 6.67] \tag{4}$$

여기서 C_{wR} 는 전난류 파마찰계수, k 는 van Kar-man 상수로서 0.4이며, $A_r = A_b/k_w$ 이고 k_w 는 등가조고, $\varepsilon = k_w/A_b = A_r^{-1}$ 이다. A_b 는 해저면에서 파운동의 최대행정거리로서 선형과 이론에 의하면 $A_b = a/\sinh kh$, a 는 파진폭, k 는 파수, h 는 수심이다.

유(1993)과 유 등(2000)은 Swart의 약산식 보다 더 단순하게 $A_r=20$ 을 경계로 두 구간으로 나누어 지수형 산정식을 제시하였는데 본고에서는 전난류 파마찰계수에 대하여 더욱 단순하게 하나의 지수식으로 다음과 같이 표기한다.

$$C_{wR} = 0.12 \sqrt{\varepsilon} \tag{5}$$

Fig. 1과 Table 1에 제시하였듯이 단일 형태의 지수식 (5)의 산정치는 Jonsson 이론식 수치나 Swart 약산식의 수치와 거의 근접한 수치를 제공한다. 단지 A_r 이 아주 작을 때 과소 산정하고 $A_r=20$ 을 전후하여 약간 과대 산정하는 단점이 있으나 A_r 이 아주 작을 때는 파운동의 해저면 입자유속이 선형

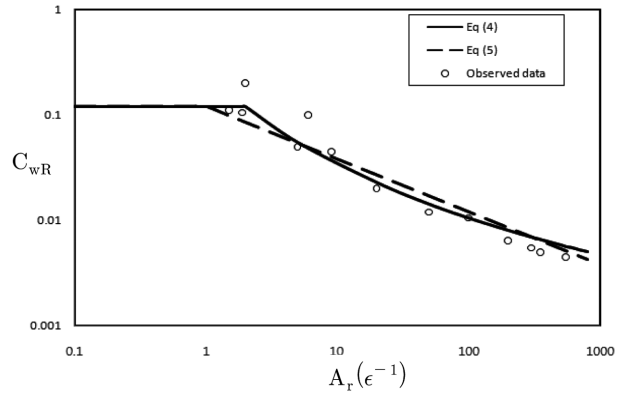


Fig. 1. C_{wR} vs. $A_r(\varepsilon^{-1})$.

Table 1. Comparison of wave friction factor in rough turbulent flow

A_r	C_w Wave Friction Factor of Rough Turbulent Flow		
	Jonsson eq. (3)	Swart eq. (4)	Power law (5)
2	0.120	0.121	0.085
10	0.034	0.036	0.038
20	0.023	0.023	0.027
50	0.014	0.015	0.017
100	0.011	0.011	0.012
1000	0.005	0.005	0.004

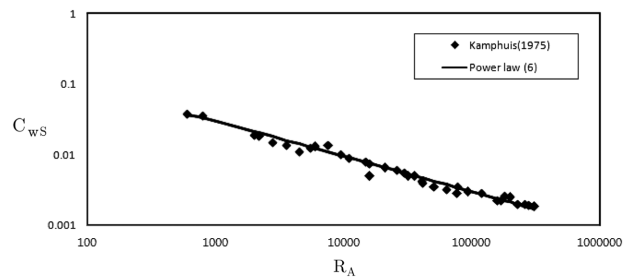


Fig. 2. C_{wS} v.s. R_A .

이론으로 주어진 수치 보다 훨씬 작아진다는 사실 때문에 결코 과소 산정한다고만 볼 수 없다. $20 < A_r$ 인 구간에서는 거의 유사한 경향을 보이고 있다.

한편 완난류 파마찰계수 산정식의 경우 레이놀즈수의 함수로 나타내었다. 완난류 조건에 대한 실험자료는 Kamphuis (1975)의 발표자료로부터 구해지는 완난류 조건에서도 지수형 산정식을 제시하면 다음과 같다.

$$C_{wS} = R_A^{-\frac{1}{2}} \tag{6}$$

여기서, $R_A = u_b A_b / \nu$

$$A_b = a / \sinh kh$$

$$u_b = \sigma A_b$$

$\sigma (=2\pi/T)$ 는 각주파수이다.

3. 파에너지 마찰손실계수

파에너지 마찰손실계수를 산정하기 위해서는 먼저 파에너지 손실률을 산정할 필요가 있다. 파에너지 손실률은 다음과

같이 산정된다(Jonsson, 1967, 유동훈, 1993).

$$D = \rho C_w \langle u_b^2 | u_b \rangle \quad (7)$$

여기서 $\langle \rangle = \frac{1}{2\pi} \int [d\theta, u_b = u_{bx} \sin\theta, (u_{bx} = a\sigma/\sinh kh), \langle \sin^3\theta \rangle = \frac{4}{3\pi}]$
 이므로

$$D = \frac{4}{3\pi} \rho C_w u_{bx}^3 = C_E E^{1.5} \quad (8)$$

또는 본고에서 처음 도입한 표기법으로

$$D = \zeta \sigma E \quad (9)$$

식 (8)에서 선형파인 경우 $E = \frac{1}{2} \rho g a^2$ 이고 $a^3 = \left(\frac{2}{\rho g}\right)^{1.5} E^{1.5}$, $\frac{4}{3\pi} \times 2^{1.5} =$ 이므로

$$C_E = \frac{1.2 C_w}{g \sqrt{\rho g}} \left(\frac{\sigma}{\sinh kh}\right)^3 \quad (10)$$

이며 식 (9)에서

$$\zeta = \frac{4}{3\pi} C_w \frac{X_H}{(\sinh kh)^3} \quad (11)$$

여기서 $X_H = \frac{\sigma^2 H}{g}$ 이다.

제시된 바와 같이 C_E 는 무차원수가 아니나 ζ 는 무차원수 이고 식 (8)은 1.5제곱으로 표기되기 때문에 다루기 어려우 나 식 (9)는 E의 선형비례로 표기되기 때문에 산정에 있어서 도 간결하고 편리하다.

ζ 는 Wave Power(σE)에 대한 손실계수로서 전난류 조건인 경우 식 (5)를 식 (11)에 대입하여

$$\zeta = \frac{0.07 X_{Hk}}{(\sinh kh)^{2.5}} \quad (12)$$

이고 완난류 조건인 경우 식 (6)을 대입하여

$$\zeta = \frac{0.84 X_v}{(\sinh kh)^2} \quad (13)$$

여기서 $X_{Hk} = \frac{\sigma^2 \sqrt{Hk_w}}{g}$, $X_v = \frac{\sigma^2 \sqrt{v/\sigma}}{g}$ 이다. 식 (12)는 전난류, 식 (13)은 완난류 조건에 대한 Wave Power 손실계수이다.

일정경사의 해빈조건에서 단순한 형태의 파에너지 손실을 산정식 (9)를 파에너지 보존식에 도입하여 일정경사 사빈인 경우 대체적으로 단순한 형태의 파에너지 마찰손실계수를 유도할 수 있다. 천수효과와 에너지손실만 작용할 때 정상상태에 도달한 파에너지보존식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial E c_g}{\partial x} + D = 0 \quad (14)$$

여기서 선형파인 경우 $E = \frac{1}{8} \rho g H^2$, $c_g = \frac{1}{2} (1 + G) \frac{\sigma}{k}$, $G = \frac{2kh}{\sinh 2kh}$

이다.

식 (14)은 천수효과와 마찰손실만을 고려한 식으로 x에 관해서 적분하면 다음과 같다.

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{c_{g1}}{c_{g2}} [1 - \delta_f] \quad (15)$$

여기서

$$\delta_f = \frac{\int_{x_1}^{x_2} D dx}{E_1 c_{g1}} \quad (16)$$

즉,

$$\frac{H_2}{H_1} = K_s K_f \quad (17)$$

로 표기할 때

$$K_s = \sqrt{\frac{c_{g1}}{c_{g2}}} \quad (18)$$

$$K_f = \sqrt{1 - \delta_f} \quad (19)$$

여기서 K_s 는 천수계수이며 K_f 는 파고 마찰손실계수이다.

전난류 조건인 경우 식 (12)를 식 (9)에 대입하여 에너지 손실률의 적분치를 구하면

$$\int_{x_1}^{x_2} D dx = S_R \int_{x_1}^{x_2} T_R dx \quad (20)$$

여기서

$$S_R = 0.07 X_{Hk} \sigma E_1 [(1 + G_1) \tanh k_1 h_1]^{1.25} \quad (21)$$

$$T_R = (\sinh kh)^{-2.5} [(1 + G_1) \tanh k_1 h_1]^{-1.25} \quad (22)$$

여기서 G_1 은 수심 h_1 에서의 G 로서 $G_1 = \frac{2k_1 h_1}{\sinh 2k_1 h_1}$ 이다.

상기식에서 계수 S_R 는 전구간에서 일정한 상수이나 계수 T_R 는 구간 내에서 상당한 변이폭을 보일 수 있다. 따라서 계수 T_R 의 적분을 위하여 단순화 과정이 요구된다. 계수 T_R 는 수심비 kh 의 함수이고 다음의 확산방정식으로부터

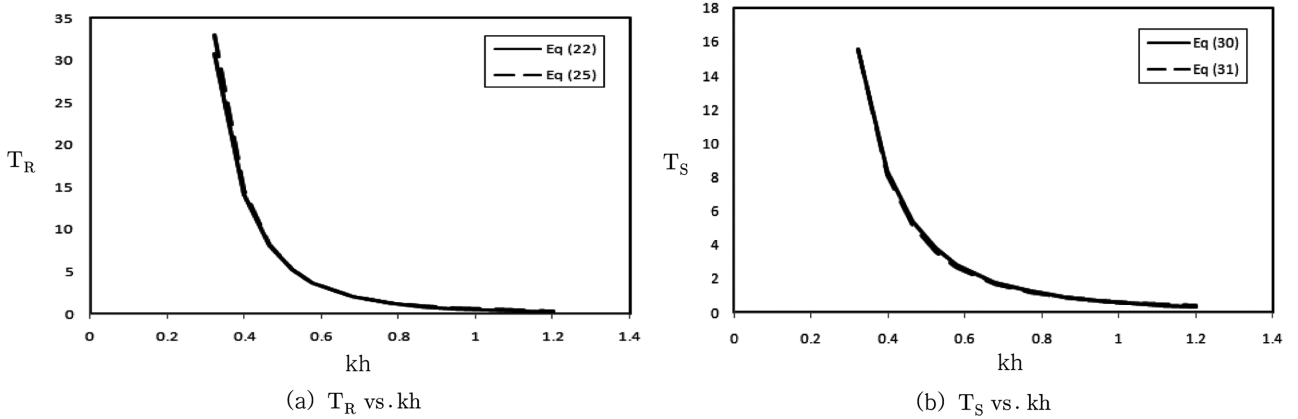
$$\sigma^2 = g k \tanh kh \quad (23)$$

$$kh = \begin{cases} \frac{\sqrt{Y}}{\left(1 - \frac{Y}{6}\right)} & (0 \leq Y \leq 1) \\ 0.9Y + 0.3 & (1 \leq Y \leq 3) \\ Y & (3 \leq Y \leq \infty) \end{cases} \quad (24)$$

결국 T_R 은 무차원수 $Y (= \sigma^2 h/g)$ 의 함수이다. 계수 T_R 를 무차원수 Y 의 함수로 지수형 약산식으로 표기하면 다음과 같다.

$$T_R = 0.33 Y^{-2} \quad (0 < Y \leq 1) \quad (25)$$

Fig. 3의 (a)는 식 (22)과 식 (25)를 비교한 그래프이다. 두

Fig. 3. T_R and T_S vs.kh.

수치는 거의 일치하고 있으며 최대오차는 3% 이내이다. 따라서 전난류인 경우 에너지손실의 적분치는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\int Ddx = 0.33S_R \int Y^2 dx \quad (26)$$

일정경사 (s)인 경우 $h=x/s$ 이며 식 (26)을 적분하여 $E_1 c_{g1}$ 으로 나누어 주면

$$\delta_f = \frac{0.04 \sqrt{H_1 k_w}}{s} T_G \left(\frac{1}{h_2} - \frac{1}{h_1} \right) \quad (27)$$

여기서 $T_G = [(1+G_1) \tanh k_1 h_1]^{1/4}$ 이며 식 (27)은 본 연구의 핵심연구 결과 중의 하나이다.

한편 완난류 조건인 경우 전난류 조건일 때와 같이 식 (13)을 식 (9)에 대입하여 에너지 손실률의 적분치를 구하면

$$\int_{x_1}^{x_2} Ddx = S_v \int_{x_1}^{x_2} T_S dx \quad (28)$$

여기서,

$$S_v = 0.84 X_v \sigma E_1 (1 + G_1) \tanh k_1 h_1 \quad (29)$$

$$T_S = (\sinh kh)^{-2} (\tanh kh)^{-1} \quad (30)$$

완난류 조건인 경우도 전난류 조건일 때와 마찬가지로 구간 내에서 상당한 변이폭을 보일 수 있는 계수 T_S 의 적분을 위하여 단순화 과정이 요구된다. 완난류 조건일 때와 같은 방법으로 확산방정식으로부터 T_S 를 무차원수 Y 의 함수로 지수형 약산식으로 표현하면 다음과 같다.

$$T_S = 0.39 Y^{-1.6} \quad (1 < Y \leq 1) \quad (31)$$

Fig. 3의 (b)는 식 (30)과 식 (31)을 비교한 그래프이고, (a)와 비슷하게 3% 이내의 오차로 정밀식과 근사하다.

완난류 조건인 경우도 전난류 조건인 경우와 같이 에너지 손실의 적분치를 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\int Ddx = 0.39 S_v \int Y^{-1.6} dx \quad (32)$$

식 (32)를 적분하여 $E_1 c_{g1}$ 으로 나누어 주면

$$\delta_f = \frac{1.092}{s} X_v^{0.4} \left(\frac{v}{\sigma} \right)^{0.3} \left(\frac{1}{h_2^{0.6}} - \frac{1}{h_1^{0.6}} \right) \quad (33)$$

식 (27)과 (33)은 본 연구의 주요 결과이며 이를 식 (19)에 대입하여 파고 마찰손실계수를 구하고 식 (17)로부터 천수 효과와 함께 발생하는 천해구간에서의 파고를 선정할 수 있다.

일정경사면($s=1:100$)을 갖는 조건에서 외해에서 입사한 파랑이 천수변형 및 바닥마찰에 의해 변형되어 나타나는 파고 값을 본 연구에서 개발한 간략식으로 계산한 결과를 Fig. 4(a)에 제시하였다. 일예로 심해파고 6 m, 주기 10초, 해빈경사 1/100을 갖는 해빈에서 등가조고 k_w 는 1, 10, 100 mm인 경우에 대하여 마찰손실 영향을 살펴보았다. 본 연구에서의 천해역의 정의는 통상적인 $kh \leq \pi/10$ 의 범위가 아닌 마찰손실이 발생하는 보다 광범위한 지역을 지칭한다.

바닥마찰에 의한 영향을 고려하지 않은 경우(K_s only $K_f=1$) 해안에서 200 m 떨어진 수심 2 m 천해역에서의 파고는 심해파고(H_o)의 110%(6.6 m)로 계산되었다. 반면에 바닥마찰을 고려한 경우($k_w=1, 10, 100$ mm) 천수효과만 고려한 경우와 비교하여 작은 파고분포를 보였다. $k_w=10$ mm인 경우 심해파고의 95%, $k_w=100$ mm인 경우 심해파고의 65%로 계산되었다. 또한 $k_w=1$ mm인 경우는 심해파고의 105%가 되는 것으로 계산되었다. 즉, k_w 가 작을 경우 바닥마찰의 영향이 크지 않다. 그러나 이때에도 마찰손실을 완전히 무시할 수는 없는 것으로 나타났다.

앞선 결과에서 바닥마찰이 등가조고에 의한 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 이에 등가조고를 일정하게 하고 심해파고와 주기만의 변화에 따른 결과를 살펴보았다(Fig. 4(b)). k_w 를 10 mm, 해빈경사 1/100로 하고 심해파고 값과 주기를 각각 (6 m, 10초), (8 m, 14초), (10 m, 14초)인 세 가지 경우에 대해 파고의 변화를 산정하였다. $k_w=10$ mm이고 파고 6 m, 8 m, 10 m인 경우 마찰손실을 고려하지 않았을 때는 수심 10 m의 천해지점에서의 파고는 심해파고의 103%이나 마찰

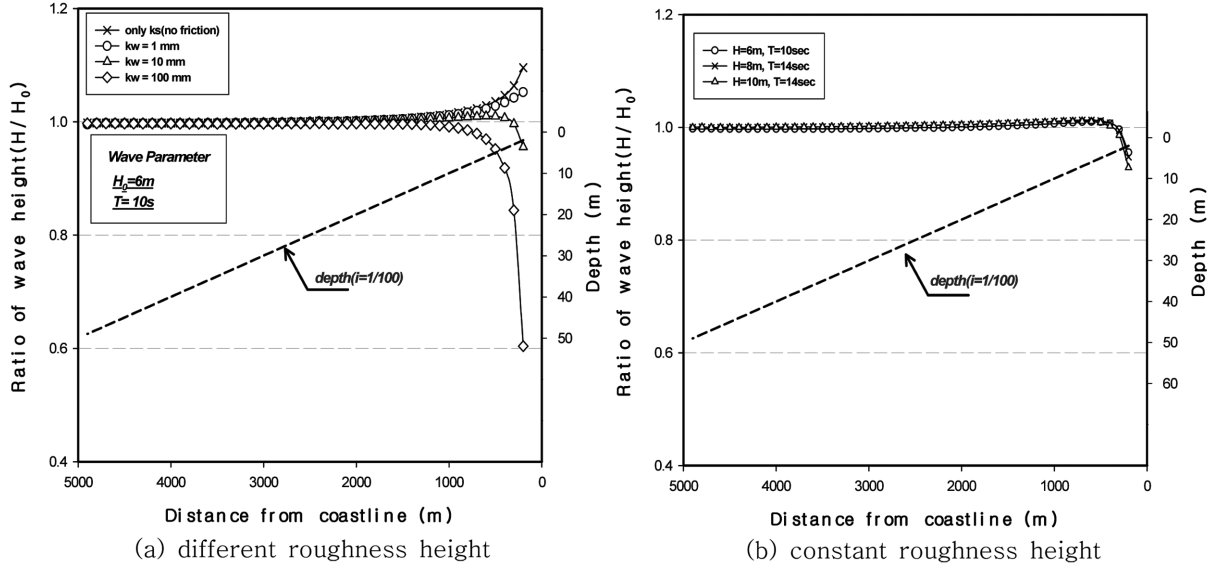


Fig. 4. Variation of wave height ratio along cross-shore.

손실을 고려하였을 때는 심해파고의 101% 정도로 산정되었다. 각각의 경우에 대해 크게 차이가 나지는 않지만 파고가 클수록 주기가 길수록 바닥마찰의 영향을 더 많이 받는 것으로 계산되었다.

4. 검 증

본 연구에서 개발한 간략식의 정확성을 검증하기 위해 천 수효과와 에너지손실만을 고려한 파에너지보존식을 차분법으로 반복 시산하여 해를 구한다. 즉 식 (14)를 차분식으로 해를 구하면 다음과 같다.

$$E_{i+1}c_{gi+1} = E_i c_{gi} - \Delta x D \quad (34)$$

여기서 첨자 i 는 i 번째 격자, $i+1$ 은 $i+1$ 번째 격자를 지칭한다. $D=C_E E_{i+1} \sqrt{E_i}$ (Method I-1) 또는 $\zeta \sigma E_i$ (Method I-2) 또는 $\zeta \sigma E_{i+1}$ (Method I-3)이고 ζ 는 식 (12), C_E 는 식 (10)과 식 (4)로 구한다. 차분간격 Δx 를 작게 할수록 정밀해에 근접한 수치를 구할 수 있을 것이다.

다음으로 두 지점의 전 구간을 하나의 구간으로 가정하고 마찰에너지손실을 산정시 체계수 C_E 또는 ζ 의 산정은 중간수심의 수치를 취하는 방법이다. 이 방법으로 관심지점의 파고 H_2 는 다음과 같이 간략히 산정된다.

$$H_2 = H_1 \sqrt{\frac{c_{g1}}{c_{g2} + \Delta x \bar{C}_E H_1}} \quad (35)$$

$$H_2 = H_1 \sqrt{\frac{c_{g1}}{c_{g2} + \Delta x \bar{\zeta} \sigma}} \quad (36)$$

그러나 식 (35)(Method II-1)의 \bar{C}_E 또는 식 (36)(Method II-3)의 $\bar{\zeta}$ 는 큰 구간의 대표치로서 중간수심에서 취하는 것이 타당한지는 의문이다.

마지막으로 본고에서 연구한 산정법(Method III)으로 식 (17), (18), (19), (27)을 사용하여 관심지점의 파고를 구한다. 식 (27)로서 두 지점간 수심 역수의 차로소 δ_f 를 바로 구하고 식 (19)로서 파에너지의 마찰손실계수 K_f 를 구한 후 K_s 와 K_f 의 곱으로 파고비 H_2/H_1 을 구한다.

심해파고 6 m, 주기 10초, 해변경사 1/100을 갖는 해변에서 등가조고 k_w 가 100 mm인 경우에 대하여 해안으로부터의 거리를 5000 m(수심 50 m, 파고 H_1)에서 1000 m(수심 10 m, 파고 H_2)지점까지 각 방법의 산정결과를 비교하여 Table 2에 제시하였다. 해안으로부터의 거리 5000 m(수심 50 m)까지 해저면 마찰손실은 무시하였고 에너지 보존식에 의해 $H_1=5.89$ m로 산정되었다. 5000 m 지점에서 1000 m 지점까지 차분법의 차분 간격은 100 m를 취하였다. 따라서 차분법으로는 총 40회의 반복과정이 필요하다.

Table 2에 요약하여 제시하였듯이 Method I-1이 가장 정확한 방법이라 할 수 있다. 파마찰계수는 Swart의 약산식 (4)

Table 2. Comparison of wave height for the wave energy dissipation rate

Method	Equations	H_2 (m)	error(%)
I-1	$H_{i+1} = H_i [c_{gi} / (c_{gi+1} + \Delta x c_{Ei} \sqrt{E_i})]^{1/2}$	5.32	기준치
I-2	$H_{i+1} = H_i [c_{gi} + \Delta x \zeta_i \sigma / c_{gi+1}]^{1/2}$	5.38	1.13
I-3	$H_{i+1} = H_i [c_{gi} / (c_{gi+1} + \Delta x \zeta_i \sigma)]^{1/2}$	5.38	1.13
II-1	$H_2 = H_1 [c_{g1} / (c_{g2} + \Delta x \bar{C}_E \sqrt{E_1})]^{1/2}$	5.71	7.33
II-3	$H_2 = H_1 [c_{g1} / (c_{g2} + \Delta x \bar{\zeta} \sigma)]^{1/2}$	5.70	7.14
	$H_2 = H_1 K_s K_f, K_s = \sqrt{c_{g1} / c_{g2}}$		
III	$K_f = \sqrt{1 - \delta_f}, \delta_f = \frac{0.04 \sqrt{H k_w} T_c}{s} \left(\frac{1}{h_2} - \frac{1}{h_1} \right)$	5.32	0.00

note : error = (각 방법의 산정결과 - I-1의 산정결과)/I-1의 산정결과 (기준치)

로 산정하는데 Table 1에 비교하여 제시하였듯이 Swart의 근사치는 Jossion식 (3)의 정밀치와 비교하여 아주 정확하다. 차분 간격 Δx 를 작게 취할수록 정밀도가 향상되나 $\Delta x=100$ m는 정밀도 유지에 충분히 작은 수치라고 판단된다. Method I-2는 에너지 손실률을 양해적으로, Method I-3은 음해적으로 산정한다. 한편 Method II-1은 \bar{C}_E 를, Method II-3은 $\bar{\zeta}$ 를 중간지점의 수심조건에서 구한다.

Table 2에 제시하였듯이 Method I-2나 Method I-3의 산정치는 I-1의 기준치와 비교하였을 때 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 즉 파마찰계수 C_W 의 지수형 산정식 (5)의 산정치는 Swart 약산식 (4)의 산정치와 거의 동일한 수치를 제공하고 있음을 알 수 있다. 한편 \bar{C}_E 나 $\bar{\zeta}$ 의 대표치를 중간지점의 수심에서 구한 Method II는 공히 파고를 과도하게 과대 산정하는 결과를 준다. 즉 마찰손실영향이 작게 나타난다. 이는 $\sinh kh$ 나 $\tanh kh$ 의 변화가 비선형적으로 변이하기 때문이다. 이에 반하여 본 연구에서 개발한 Method III는 비선형적인 변이 특성을 충분히 반영하여 적분하였기 때문에 산정치가 기준치에 비교하여 거의 일치하는 결과를 제공한다.

5. 결 론

일정경사면에서의 파에너지 마찰손실계수 산정을 위하여 전난류, 완난류 조건인 경우 각각 Jonsson의 파마찰계수 산정식과 Kamphuis의 발표자료와의 비교를 통해 새로운 간편 지수식을 제시하였다. 새로운 지수식을 파에너지 보존식에 대입하여 비교적 간단한 형태의 파고 또는 파에너지 마찰손실계수를 산정하는 식을 개발하였다.

본고에서 개발된 산정식은 일정경사면을 가지는 경우에 대

하여 적용이 가능하다. 본 연구에서 개발된 간편식의 산정치는 수십회의 반복과정으로 해를 구하는 차분식 기준치와 비교하였을 때 거의 일치하는 결과를 보여주고 있다. 현재 실무에서는 수치모델을 이용하여 천해설계파를 산출하고 있으나, 수치모델은 많은 비용과 시간이 필요한 단점이 있다. 정도 높은 천해설계파 산출을 위해서는 수치모델을 이용한 정밀한 계산이 필요하지만, 본고에서는 간략한 수 계산을 통하여 임의지점에서의 파고값을 신속하게 산출하는 기법을 개발하여 제시하였다. 또한, 기존에 개발된 수치모델에 본고에서 제시한 바닥마찰효과를 고려할 경우 기존의 모델보다 높은 정밀도를 갖는 수치모델의 개발이 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

- 유동훈 (1993). 전난류에서의 파마찰계수. 한국해양·해양공학회지, 5(2), 51-57.
- 유동훈, 정재희, 박성준 (2000). 합성류의 평균마찰력과 최대마찰력. 한국해양·해양공학회 발표논문집, 133-139.
- 유동훈 (2005). 연안항만공학. 도서출판 새론.
- Jonsson, I. G. (1967). Wave boundary layers and friction factors. Proc.10th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, Tokyo, 127-148.
- Kajiura, K. (1968). A model of the bottom boundary layer in water waves, Bulletin Earthquake Research Inst., 46, 75-123.
- Kamphuis, J. W. (1975). Friction factor under oscillatory waves. J. Waterway, Port and Ocean Div., ASCE, 101(2), 135-144.

원고접수일: 2009년 12월 18일

수정본채택: 2010년 2월 1일(1차), 2010년 3월 22일(2차)

게재확정일: 2010년 3월 23일