

## 합성류의 평균마찰력과 최대마찰력 Mean Friction and Maximum Friction of Combined Flow

유동훈<sup>1</sup>, 정재희<sup>1</sup>, 박성준<sup>1</sup>  
 Dong Hoon Yoo, Jae Hee Jung, Sung Jun Park

### 1. 서 론

일방향흐름의 해류나 천해파에 의한 파운동이나 해저면 가까이 경계층흐름은 주로 난류특성을 갖고 있으며, 난류특성은 완난류, 천이난류, 전난류 등 세가지 종류로 대별된다. 그 중 완난류와 전난류로 대별하여 합성류 조건은 두가지로 분류할 수 있다. 즉, 천해파와 해류가 합성될 때 해저면 가까이 난류특성 조건은 Table 1에 제시된 바와 같다. 유동훈과 이민호(1999)가 확인한 바와 같이 광폭수로에서의 일방향 흐름은 주로 완난류 조건일 가능성이 높다. 이러한 가능성을 전제로 본 연구에서는 두가지 조합조건을 상정하고 두 경우에 대한 파-해류 합성류 마찰력 산정방법을 개선하였다.

**Table 1.** Condition of turbulent combined flow in the near bottom.

해류 조건	천해파 조건	합성류 조건
완 난 류	전 난 류	전 난 류
전 난 류	전 난 류	전 난 류

### 2. 개수로 마찰계수

유속의 대수분포식에는 영점높이가 도입되며 Prandtl의 혼합거리 이론으로부터 다음과 같다.

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

여기서,  $k$ 는 von Karman 상수,  $z_0$ 는 원형관에서의 영점높이이고 유속의 대수분포식 (1)을 적분하여 유도된 마찰계수 산정식은 일반적인 경우 다음과 같다.

$$\frac{1}{\sqrt{C}} = \frac{\alpha}{k} \left( \ln \frac{H}{z_0} + \beta \right) \quad (2)$$

완난류 흐름에서의 영점높이 산정식은 다음과 같다.

$$z_{0,ms} = \zeta \frac{\nu}{u_*} = \zeta \frac{H}{R_H \sqrt{C}} \quad (3)$$

여기서,  $\zeta$ 는 비례상수로서 원형관로 흐름인 경우  $\zeta=0.11$ ,  $\nu$ 는 물의 점성계수,  $u_*$ 는 마찰 속도로서 등류인 경우  $\sqrt{gHi}$  또는  $\sqrt{CV}$ 이고,  $R_H$ 는 동수반경레이놀즈수이다. 식 (3)을 자유표면 흐름의 대표영점높이로 가정하고 식 (2)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 완난류 조건의 마찰계수 산정식이 구해진다.

$$\frac{1}{\sqrt{C}} = \frac{\alpha_{HS}}{k} (\ln R_H \sqrt{C} + \beta_{HS}) \quad (4)$$

유동훈과 이민호(1999)는 Bazin의 사각형 수로에서의 실험자료와 Varwick(1945)의 삼각형과 제

<sup>1</sup>아주대학교 환경도시공학부 (Department of Civil Eng., Ajou University, Suwon 442-749, Korea, dhyoo@madang.ajou.ac.kr)

형 수로에서의 실험자료를 분석하여 일방향 흐름 마찰계수 산정식과 영점높이를 추정하였다. 그의 자료 중 완난류로 추정되는 자료를 추출하여 추정한 결과 식 (4)의 기울기  $\alpha_{HS}$ 는 삼각형수로인 경우 0.78, 제형수로인 경우는 0.74이고, 절점계수  $\beta_{HS}$ 는 다음과 같이 조고의 함수로 추정되었다.

$$\beta_{HS} = \gamma_s - \delta_s R_w^2 \quad (5)$$

여기서  $R_w = \frac{1}{\nu} \sqrt{\frac{\sigma k_w}{\rho}}$ ,  $\sigma$ 는 표면장력,  $\rho$ 는 밀도이고 20℃인 경우  $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$ ,  $\nu = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $\sigma = 0.0736 \text{ N/m}$ 이며  $R_w \approx 270 \sqrt{k_w}$  ( $k_w$ : mm)이다.  $\gamma_s$ 와  $\delta_s$ 는 상수로서 삼각형 수로인 경우  $\gamma_s = 3.51$ ,  $\delta_s = 1.85 \times 10^{-5}$ , 제형수로인 경우  $\gamma_s = 3.24$ ,  $\delta_s = 1.14 \times 10^{-5}$ 이고 사각형 수로인 경우  $\gamma_s = 3.66$ ,  $\delta_s = 1.63 \times 10^{-5}$ 이다.

완난류 조건의 기본식 (4)와 같은 형태의 마찰계수 산정식은 양변에 마찰계수가 포함되어 있으므로 음해법으로 마찰계수를 산정하여야 한다. 그러나 이러한 경우에도 전처리과정을 거치어 양해법 산정식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{1}{\sqrt{C}} = \frac{\alpha_{HS}}{k} (\ln R_H^X + \gamma_{HS}) \quad (6)$$

여기서,  $X$ 는 동수반경레이놀즈수의 지수승으로서 수로의 형상에 따라 변이하는 계수이다.

Varwick의 실험자료를 분석하여 상기식 (6)의  $\gamma_{HS}$ 를 산정한 결과 삼각형 수로와 제형수로 공히  $R_H$ 수의 지수승  $X = 0.89$ 로 추정되었고, 절점계수  $\gamma_{HS}$ 는 다음과 같이 등가조고와 선형관계를 가지고 있음을 알 수 있다.

$$\gamma_{HS} = \gamma_t - \delta_t R_w^2 \quad (7)$$

한편, 각 형상의 수로에 대한  $\gamma_{HS}$ 을 취하고 식 (6)을 식 (2)에 대응하면 개수로 흐름에서 완난류 조건의 영점높이 산정식은 다음과 같다.

$$z_0 = e^{-B} h R_H^{-0.89} \quad (8)$$

여기서  $B$ 는 다음과 같다.

$$B = \gamma_{HS} - \beta \quad (9)$$

본 연구의 실험자료 분석에서 등가조고를 추정할 필요가 있었으며, 각기 가정된 수리조건으로 유도된 산정식으로부터 등가조고를 추정한다. 완난류 수리조건인 경우 등가조고를 구하는 식은 개수로 마찰계수 산정식 (6)에 수치분석한 절점계수의 값을 대입하여 정리하면 구할 수 있으며 다음과 같다.

$$k_w = \frac{\rho \nu^2}{\delta_t \sigma} \left[ 0.89 \ln(R_H) + \gamma_t - \frac{k}{\alpha_{HS}} \frac{1}{\sqrt{C}} \right] \quad (10)$$

여기서  $\gamma_t$ 와  $\delta_t$ 는 각 형상의 절점계수로서 삼각형수로인 경우  $\alpha_{HS} = 0.78$ ,  $\gamma_t = 1.55$ ,  $\delta_t = 1.54 \times 10^{-5}$ , 제형수로인 경우  $\alpha_{HS} = 0.74$ ,  $\gamma_t = 1.37$ ,  $\delta_t = 0.99 \times 10^{-5}$ 이며 사각형수로인 경우  $\alpha_{HS} = 0.71$ ,  $\gamma_t = 1.53$ ,  $\delta_t = 1.39 \times 10^{-5}$ 이다.

전난류 흐름에서는 Varwick의 실험자료 중 조고가 2mm인 자료에서 전난류가 발생하였음을 확인할 수 있으며, 전난류 흐름일 경우도 대수형 마찰계수 산정식을 유도할 수 있다. 전난류인 경우의 개수로 마찰계수 산정식은 다음과 같이 표기된다.

$$\frac{1}{\sqrt{C}} = \frac{\alpha_{HR}}{k} (\ln H_r + \beta_{HR}) \quad (11)$$

Varwick의 삼각형 수로 실험에서 조고가 2mm인 경우 전난류가 발생하였으며  $\alpha_{HR} = 1.1$ ,  $\beta_{HR} = 1.75$ 로 추정되었다. 또한, 제형 수로에서 전난류 자료를 분석한 결과  $k_w = 2 \text{ mm}$ 인 경우  $\alpha_{HR} = 1.4$ ,  $\beta_{HR} = 0.6$ 으로 추정되었다.  $k_w$ 의 기울기를 완난류와 동일하게 가정하면,  $\beta_{HR}$ 의 산정식은 다음과 같다.

$$\beta_{HR} = \gamma_R - \delta_R R_w^2 \quad (12)$$

여기서  $\gamma_R$ 와  $\delta_R$ 는 상수로서 삼각형수로인 경우  $\gamma_R=4.45$ ,  $\delta_R=1.85 \times 10^{-5}$ , 제형수로인 경우  $\gamma_R=2.26$ ,  $\delta_R=1.14 \times 10^{-5}$ , 사각형 수로인 경우  $\gamma_R=3.35$ ,  $\delta_R=1.50 \times 10^{-5}$ 이다.

전난류 흐름일 경우 영점높이 산정식은 다음과 같다.

$$z_0 = e^{-B} k_w \quad (13)$$

여기서  $e^{-B}$ 는 비례상수로서 원형관로에서  $e^{-B}=0.033$ 이며, 개수로인 경우 식 (11)을 식 (2)에 대응하면 다음과 같다.

$$B = \beta_{HR} - \beta \quad (14)$$

전난류 수리조건인 경우 등가조고를 구하는 식은 개수로 마찰계수 산정식 (11)에 수치분석한 절점계수의 값을 대입하여 구하면 다음과 같다.

$$k_w = \frac{\rho v^2}{\delta_R \sigma} \left[ \ln \frac{H}{k_w} + \gamma_R - \frac{k}{\alpha_{HR}} \frac{1}{\sqrt{C}} \right] \quad (15)$$

여기서  $\gamma_R$ 와  $\delta_R$ 은 각 형상의 절점계수로서 삼각형수로인 경우  $\alpha_{HR}=1.1$ ,  $\gamma_R=4.45$ ,  $\delta_R=1.85 \times 10^{-5}$ , 제형수로인 경우  $\alpha_{HR}=1.4$ ,  $\gamma_R=2.26$ ,  $\delta_R=1.14 \times 10^{-5}$ 이며 사각형수로인 경우  $\alpha_{HR}=1.25$ ,  $\gamma_R=3.35$ ,  $\delta_R=1.50 \times 10^{-5}$ 이다. 상기식 (15)를 사용하여 등가조고를 산정할 경우 반복시산과정이 필요하다.

### 3. Bijker-Yoo-O'Connor Model

이 모형에 의하여 파도와 해류가 합성할 때 발생하는 해저면마찰력은 일방향흐름의 마찰력에 증폭계수를 곱하여 구하여지며, 평균마찰력과 최대마찰력의 산정식은 각각 다음과 같다.

$$\langle \tau \rangle = \beta \tau_c \quad (16)$$

$$\tau_x = \xi \tau_c \quad (17)$$

여기서 일방향흐름에 의한 마찰력  $\tau_c = \rho C_c U^2$ 이며, 해류마찰계수  $C_c$ 는 절점계수 B가 조정된 식으로부터 산정된다.  $\langle \tau \rangle$ 는 주기평균 합성류 마찰력,  $\tau_x$ 는 최대 합성류 마찰력,  $\beta$ 와  $\xi$ 는 각각 해당 마찰력의 증폭계수이며 산정식은 각각 다음과 같다.

$$\beta = \alpha^2 (a + b \mu_a^c) \quad (18)$$

$$\xi = \alpha^2 + \mu_a^2 + 2 \alpha \mu_a \sin \theta \quad (19)$$

여기서 상수  $\mu_a = \mu / \alpha$ ,  $\mu = U_{BW} / u_{BC}$ ,  $U_{BW}$ 는 Bijker point에서의 최대파유속,  $u_{BC}$ 는 Bijker point에서의 해류유속,  $\alpha$ 는 해류의 감소율이다.

기존에는 해류와 파가 합성될 때 전난류라고 가정하였으나 완난류일 가능성도 있으며 서론에서 이미 언급한 바와 같이 완난류와 전난류의 다양한 조합을 고려하였다. 완난류인 경우에 영점높이는 수심(h)와 동수반경 레이놀즈수 ( $R_H$ )의 함수이다. BYO 모형의 합성류 마찰력 산정에 있어 해류를 기준으로 취하  
므로 일방향 흐름에서의 Bijker point를 기준으로 취한다. 즉,

$$z_B = z_{Bc} = e z_{oc} \quad (20)$$

식 (20)을 식 (1)에 적용하여 정리하면,

$$U_w = \frac{U_{*w}}{k} \ln \frac{z}{z_{ow}} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} U_w(z_{Bc}) &= \frac{U_{*w}}{k} \ln \frac{z_{Bc}}{z_{ow}} \\ &= \frac{U_{*w}}{k} \ln \frac{e z_{oc}}{z_{ow}} \\ &= \frac{U_{*w}}{k} \left( 1 + \ln \frac{z_{oc}}{z_{ow}} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

한편,  $z_{ow} = z_{oc}$  일 때

**Table 2.** Zero velocity points for surface waves and current flow

해류	파	영점 높이		$\mu / \mu_0$
		$z_{oc}$ (해류)	$z_{ow}$ (파)	
완난류	전난류	$e^{-B} h R_H^{-0.89}$	$e^{-A} k_w$	$1 + A - B + \ln\left(\frac{h}{k_w}\right) - 0.89 \ln R_H$
전난류	전난류	$e^{-B} k_w$	$e^{-A} k_w$	$1 + A - B$

$$U_w(z_{BC}) = \frac{U_{*w}}{k} \text{ 이므로, } \left(\frac{u_*^*}{k} \ln \frac{z_F}{z_0}\right)^2 = \left(\frac{u_*^*}{k} \ln \frac{z_F}{z_0} + u_b \cos \theta\right)^2 + (u_b \sin \theta)^2 \quad (25)$$

$$\mu = \mu_0 = \frac{\sqrt{C_w} U_b}{\sqrt{C_c} V} \text{ 이고, } z_{ow} \neq z_{oc}$$

일 때  $\mu = \left(1 + \ln \frac{z_{oc}}{z_{ow}}\right) \mu_0$  이 된다. 파와 해류의 합성시 두가지 조건을 정리하면 Table 2에 제시된 바와 같다.

Table 2에 도입된 경험계수 A는 파운동에 적용되는 수치이며 B는 해류에 적용되는 수치이다. 각 수치는 완난류 또는 전난류 등 난류조건에 따라 달라질 수 있다.

#### 4. Fredsoe-Yoo Model

선형파이론으로 구해지는 해지면 유속이 경계층에서의 실제 파유속과 상당히 다를 수 있다는 추론에 기초하여 유동훈(1993b)은 Fredsoe(1984)의 수치모형을 개선하였으며, 파마찰계수에 대한 관측자료와 비교하여 상당히 양호한 계산결과를 얻었다. 유동훈의 경계층 파속 또는 Fredsoe Point ( $z_F$ )에서의 파속 산정식은 다음과 같다.

$$u_b = \gamma U_p \quad (23)$$

$$\gamma = \exp\left[0.55 \min\left(2.0, \frac{k_s}{A_p}\right)\right] \sin^{3.5} \lambda \quad (24)$$

상기 경계층 파속 산정식을 사용했을 때 파마찰계수를 산정하기 위한 Fredsoe 이론은 상당한 수정을 거쳐야 했으나 파와 해류의 합성류에 의한 마찰계수를 산정하는 과정은 오히려 큰 수정없이 Fredsoe 이론과정을 거의 똑같이 따르면 된다. 파와 해류가 합성하였을 때 Fredsoe Point에서의 유속은 다음과 같이 산정된다.

여기서  $\theta$  는 파의 진행방향이 해류의 직각방향과 이루는 각도이며, 만일  $\theta$  를 파의 진행방향이 해류가 흐르는 방향과 이루는 각도를 취하면  $\cos \theta$  는  $\sin \theta$  로,  $\sin \theta$  는  $\cos \theta$  로 대체하여야 한다.

Fredsoe Point  $z_F = e^b z_0$ 이며,

$$b = k \frac{u_b}{u_*^*} \quad (26)$$

$u_*^*$ 는 임의로 결정된 합성류 마찰속도이며 (Fredsoe(1984) 참조),  $u_*^*$ 는 일방향 흐름만 작용할 때의 마찰속도이고,  $u^*$ 가 실질적인 마찰속도이다. Fredsoe Point에서의 파속  $u_b$ 는 식(23)으로부터 산정된다. 식(26)을 위상각에 관해서 미분하고 식 (25)를 이용하면 계수 b에 관하여 다음과 같은 산정식이 구하여진다.

$$\frac{db}{d\lambda} = q^{-1} [\delta(b^2 + r^2 + 2br \cos \theta)^{1/2} - p \tan^{-1} \lambda] \quad (27)$$

여기서

$$\delta = k A_p u_*^* / z_0 U_p, \quad r = k \gamma (U_p / u_*^*),$$

$$q = e^b (b-1) + 1, \quad p = b(e^b - b - 1)$$

이다. 원래의 Fredsoe 모형에서  $\gamma = \sin \lambda$  인데 새로이 수정된 모형에서는 식(24)로 산정된다.

**Table 3.** Computation results of BYO model against Bijker's experimental data.

NO.	h	V	H	$i_c$	$i_{wc}$	$k_B$ (Bijker)	$k_Y$ (ST)	$k_Y$ (RT)	$\tau_c$			$\langle \tau \rangle$		
									meas.	ST	RT	meas.	ST	RT
									$N/m^2$	$N/m^2$	$N/m^2$	$N/m^2$	$N/m^2$	$N/m^2$
121	0.20	0.10	0.036	0.39	0.64	24.0	18.61	23.17	0.077	0.077	0.077	0.126	0.126	0.125
122	0.21	0.19	0.036	1.45	1.90	33.0	22.71	24.63	0.299	0.299	0.298	0.391	0.399	0.395
124	0.35	0.21	0.068	1.00	1.58	42.0	24.39	28.01	0.343	0.343	0.342	0.542	0.538	0.537
124	0.33	0.30	0.066	2.04	2.73	40.0	24.74	26.69	0.660	0.660	0.662	0.884	0.852	0.903
126	0.19	0.21	0.022	2.24	2.66	38.0	24.63	25.81	0.418	0.418	0.419	0.496	0.491	0.475
101	0.19	0.22	0.026	2.56	2.96	44.0	25.38	26.35	0.477	0.477	0.479	0.552	0.591	0.564
101	0.20	0.21	0.026	2.91	3.24	67.0	28.84	30.28	0.571	0.571	0.569	0.636	0.769	0.695
102	0.21	0.24	0.028	2.57	3.02	37.0	25.21	26.23	0.529	0.529	0.531	0.622	0.633	0.618
103	0.32	0.21	0.034	0.89	1.06	28.0	20.71	23.94	0.279	0.279	0.278	0.333	0.296	0.330
104	0.32	0.25	0.038	1.34	1.56	28.0	22.45	24.95	0.421	0.421	0.420	0.490	0.456	0.497
105	0.36	0.24	0.047	0.84	1.06	18.0	18.10	21.45	0.297	0.297	0.297	0.374	0.297	0.348
106	0.36	0.27	0.011	1.17	1.40	20.0	20.35	23.13	0.413	0.413	0.414	0.494	0.417	0.477
114	0.31	0.25	0.060	1.95	2.41	62.0	27.48	29.97	0.593	0.593	0.592	0.733	0.904	0.862
115	0.35	0.14	0.066	0.36	0.64	29.0	19.30	24.62	0.124	0.124	0.123	0.220	0.194	0.212
116	0.35	0.27	0.066	1.60	2.18	42.0	24.96	27.60	0.549	0.549	0.551	0.749	0.755	0.781
average error (%)										0.01	0.02		-1.03	1.12
absolute a. error (%)										0.01	0.31		8.53	3.97

Notes)  $k_B$  : roughness height estimated by Bijker  
 $k_Y$  : roughness height estimated by the present authors

### 5. 모형의 검증

이상의 수정된 BYO 모형의 검증은 Bijker(1967)의 잘 제어된 실험자료에 적용하여 이루어졌다. Bijker의 실험자료는 BYO 모형을 단계별로 개선시키는 과정에서 여러번 이용한 바 있다 ( Yoo & O'Connor, 1987; O'Connor & Yoo, 1988; Yoo, 1989). Bijker의 실험은  $\theta=0$  과  $\theta=\pi/6$  등 두가지 경우에 대하여 실험하였는데  $\theta=0$  에 대하여는 고정상 조면의 수조에서의 실험이나  $\theta=\pi/6$  인 경우에는 모래를 사용한 수조바닥에 연흔이 생성되어 조고가 불분명하다. 본고에서는 등가조고가 확실하게 산정된  $\theta=0$  에 대하여 모형 검증을 실시한다.

Bijker(1967)는 파와 해류의 합성류에 의한 마찰력을 연구하고자 고정상 저면과 이동상 저면을 사용하여 수리실험을 수행하였다. 본 연구에서 수정 보완한 BYO모형을 검증하고자 고정상 저면에서 취득한 15개의 Bijker 실험자료를 이용하였다. Table 3에 제시된 바와 같이 수심, 유속, 파고 등을 다양하게 조합하여 실험하였으나 동일한 고정상 저면을 사용하였으므로 저면 등가조고

는 동일한 수치를 적용하게 된다. 그럼에도 불구하고 Bijker는 동일한 수로면에 대하여 18-67mm의 범위를 가진 매우 다양한 크기의 조고를 제시하고 있다. 이는 전적으로 Manning(Hagen)식의 결함 때문인 것으로 판단된다.

Bijker는 평균마찰력을 에너지 구배로부터 산정한 후 ( $\tau=\rho g h i$ ), Chezy의 평균유속공식 ( $V=\sqrt{\frac{g h i}{C}}$ )으로부터 마찰계수 C를 추정한다. 그런 다음 Strickler-Manning식 ( $C=0.016(h/k_w)^{-0.33}$ ) 으로부터 등가조고를 추정하였다. 이러한 방법으로 추정된 등가조고는 그 변이폭도 매우 클 뿐만 아니라 그 수치가 수심에 비하여 너무 과다하게 큰 것으로 판단된다.

본 연구에서는 새로운 마찰계수 산정식을 이용하여 등가조고를 추정하였다. 흐름의 난류상태를 명확히 파악할 수 없었기 때문에 개수로의 난류상태를 완난류 조건과 전난류 조건 모두 고려하여 각기 다른 관련식을 이용하여 등가조고를 추정하였다. 개수로 형태는 사각형수로로 가정하고 완난류 조건인 경우 식 (10)을 이용하였으며, 전난류 조건인 경우 식 (15)를 이용하였다. 두 경우 공히 추정된 등가조고는

**Table 4.** Computation results of FY model against Bijker's experimental data.

NO.	$h$	$V$	$H$	$i_c$	$i_{wc}$	$k_B$	$k_Y$	$\tau_c$		$\langle \tau \rangle$		$\tau_{max}$
						(Bijker)	(ST)	meas.	ST	meas.	ST	ST
	m	m/s	m	$10^{-4}$	$10^{-4}$	mm	mm	$N/m^2$	$N/m^2$	$N/m^2$	$N/m^2$	$N/m^2$
121	0.20	0.10	0.036	0.39	0.64	24.0	18.61	0.077	0.077	0.126	0.107	0.308
122	0.21	0.19	0.036	1.45	1.90	33.0	22.71	0.299	0.299	0.391	0.357	0.781
124	0.35	0.21	0.068	1.00	1.58	42.0	24.39	0.343	0.343	0.542	0.529	2.402
124	0.33	0.30	0.066	2.04	2.73	40.0	24.74	0.660	0.660	0.884	0.873	2.617
126	0.19	0.21	0.022	2.24	2.66	38.0	24.63	0.418	0.418	0.496	0.461	0.736
101	0.19	0.22	0.026	2.56	2.96	44.0	25.38	0.477	0.477	0.552	0.532	0.889
101	0.20	0.21	0.026	2.91	3.24	67.0	28.84	0.571	0.571	0.636	0.649	1.164
102	0.21	0.24	0.028	2.57	3.02	37.0	25.21	0.529	0.529	0.622	0.593	1.005
103	0.32	0.21	0.034	0.89	1.06	28.0	20.71	0.279	0.279	0.333	0.341	0.804
104	0.32	0.25	0.038	1.34	1.56	28.0	22.45	0.421	0.421	0.490	0.508	1.152
105	0.36	0.24	0.047	0.84	1.06	18.0	18.10	0.297	0.297	0.374	0.409	1.415
106	0.36	0.27	0.011	1.17	1.40	20.0	20.35	0.413	0.413	0.494	0.534	1.509
114	0.31	0.25	0.060	1.95	2.41	62.0	27.48	0.593	0.593	0.733	0.793	2.441
115	0.35	0.14	0.066	0.36	0.64	29.0	19.30	0.124	0.124	0.220	0.235	1.721
116	0.35	0.27	0.066	1.60	2.18	42.0	24.96	0.549	0.549	0.749	0.762	2.621
average error (%)												
absolute average error (%)												
												0.01
												-0.02
												0.01
												5.69

Notes)  $k_B$  : roughness height estimated by Bijker

$k_Y$  : roughness height estimated by the present authors

18.1-30.28mm의 변이폭을 갖고 있으며 완난류 조건을 택할 경우 평균등가조고는 21.3mm이고, 전난류 조건을 택할 경우 평균등가조고는 25.8mm이다.

개수로 흐름을 완난류 조건으로 가정하였을 경우 평균오차는 -1.03%이고, 오차 절대치의 평균은 8.53%이다. 반면에 전난류 조건으로 가정하였을 경우 평균오차는 1.12%이고, 오차 절대치의 평균은 3.97%이다. 즉 어느 경우를 가정하거나 평균오차는 2% 이하이다. 개수로 흐름을 전난류 조건으로 가정하였을 때 완난류 조건으로 가정하였을 때 보다 약간 우수한 산정결과를 보이고 있다. 그러나, 이러한 미소한 차이로서 개수로 흐름상태를 단정적으로 판별할 수는 없을 것으로 추정한다. 본 연구에서 천해파에 의한 경계층 흐름은 모두 전난류 상태로 가정하였으며, 이때의 등가조고는  $k_w/30$  즉 Table 2에 도입된 수치 A를 3.4로 가정하였다.

### 6. 결론 및 토의

대수분포식으로부터 유도된 마찰계수 산정식에서 절점계수의 조정으로 더욱 정확한 마찰계수 산정식을 개발할 수 있었다. 조정된 절점계수의

수치는 제형수로 실험자료로부터 추출된 수치이며 수로 단면의 형상이 다를 때 수치가 달라질 가능성이 높다. 이러한 문제점에 대하여 앞으로 더욱 집중적인 연구가 요망된다.

경계층 최상점에서의 실제 유속은 선형파이론으로 산정된 해지면 유속과 다르리라는 추론은 오래전부터 예상했던 사항이다. 앞으로 식 (22)로 산정된 경계층 유속을 관측자료와 직접 비교해봄으로써 직접적인 확인절차가 필요하리라 판단되며 이는 더욱 완벽한 모형개발에 일조를 기할 수 있을 것이다.

새로운 개수로 마찰계수 산정식을 도입하고, 영점높이도 새로이 추정된 Bijker-Yoo-O'Connor 모형이나 Fredsoe-Yoo모형의 계산결과는 평균마찰력 산정에 있어 Bijker실험자료와 비교하여 상당히 양호한 정확성을 보였다. 새로 도입된 개수로 마찰계수 산정식으로 추정된 등가조고는 Bijker가 Strickler-Manning식으로 추정된 수치보다 훨씬 더 현실적으로 적합한 수치인 것으로 판단된다.

## 7. 참고문헌

- 유동훈, 1989, 합성류 전단력 계산을 위한 혼합 거리모델, 한국해양해양공학회지, 1(1): 8-14.
- 유동훈, 1993a, 완난류 개수로 마찰계수, 제35회 수공학 연구발표회 논문집: 49-56.
- 유동훈, 1993b, 전난류에서의 파마찰계수, 한국 해양해양공학회지, 5(2): 51-57.
- 유동훈, 1994, 전난류에서 파랑과 해류의 마찰력, 한국해양해양공학회지, 6(3): 226-233.
- 유동훈, 이민호, 1999, 대수형 개수로 마찰계수 산정식, 대한토목학회 논문집, 19(11-2): 159-167.
- Bijker, E.W., 1967, Some consideration about scales for costal models with movable bed. Delft Hydraulics Lab., Publ., No. 50.
- O'Connor, B.A. and Yoo, D., 1988, Mean bed friction of combined wave-current flow, Coastal Eng., 12, pp.1-21.
- Varwick, F. (1945). "Zur Fliess formel fur offene Kunstliche Gerinne." These inedite, Dresden University.
- Yoo, D., 1989, Explicit modelling of bottom friction in combined wave-current flow, Coastal Eng., 13, pp. 325-340.
- Yoo, D. and O'Connor, 1987, Bed friction model of wave-current interacted flow. Proc.Spec.Conf.Coastal Hydrod., ASCE, pp. 93-106.