

천해파와 해류의 해저면 마찰력 Bottom Friction of Combined Wave-Current Flow

유동훈* · 김인호**

Dong Hoon Yoo* and In Ho Kim**

요 旨 : 전단류에서 파와 해류가 합성하였을 때 발생하는 해저면 마찰력을 계산하는 방법을 고찰하였다. 전단류에서 일방향 흐름에 의한 마찰력의 산정방법으로 절점조정법을 제시하였으며, Bijker의 관측자료와 비교하여 절점조정치를 산정하였다. 파와 해류의 합성류에 의한 마찰력 계산방법으로 수정된 Bijker 모형(BYO Model)과 수정된 Fredsoe 모형(FY Model)을 Bijker의 관측자료에 적용하였으며, BYO모형에서 최대마찰력을 산정하는데 있어 새로운 개선책을 제시하였다.

핵심용어 : 파마찰계수, 천해파, 해류, 합성류, 평균마찰력, 최대마찰력

Abstract □ The paper presents the method to estimate the bottom shear stress driven by waves and current on rough turbulent flow. Parameter adjusting technique is suggested for the computation of bed shear stress driven by uni-directional flow, and the value of parameter is determined by comparing the computational results against Bijker's laboratory data. For the computation of combined flow bottom shear stress, two methods are presented; one is the modified Bijker approach (BYO Model) and the other is the modified Fredsoe approach (FY Model), both of which are refined by the present writers. BYO model is again refined in the computation of maximum shear stress, and the final version is tested against Bijker's laboratory data.

Keywords : wave friction factor, shallow water waves, current flow, combined flow, mean bed shear stress, maximum bed shear stress

1. 서 론

파도는 해안에 접근하여 해저면을 느끼기 시작하면서 천수, 굴절, 회절, 반사 현상 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 연구 노력은 오랫동안 경주되어 왔으며 구조실험, 현장관측과 이론 연구 뿐만 아니라 수치모형개발에도 상당한 노력을 기울였는데, 본고는 특히 이론 연구에서의 문제점을 밝힘과 동시에 파마찰계수에 대한 기존실험자료를 재해석하여 새로운 경험식을 개발하였고 합성류 조건에서의 평균마찰력과 최

대마찰력 산정방법을 개선하였다. 또한 연흔의 발생여부에 따라 변하는 등가조고를 추정하여 합성류 마찰력을 산정하였으며, 기존 관측자료를 이용한 검증을 통해 확인 작업을 수행하였다. 파마찰계수를 정확히 산정하고자 하는 노력은 Kajiura(1968)의 이론전개와 Jonsson(1967)의 이론 및 Jonsson과 Carlsen(1975)의 구조실험결과와의 계수조정을 통하여 상당한 결실을 보아 왔으며, 이제까지 Jonsson 또는 Kajiura의 이론식을 큰 이의 없이 사용하여 왔다. 그러나 두 연구자의 이론전개에는 몇 가지 미고려사항들이 내포되어 있기 때문에 정확도에 의문점이 제기되어 왔다(Fredsoe, 1984). Kajiura의 이론에서는 경계층의 두께를 위상과 관계없이 일정하게 잡았으며, 전단력도 유속과 같이 상현곡선으로 가정하였다.

*아주대학교 토목설계공학과(Dept of Civil Engrg., Ajou Univ., Suwon, Kyonggi 442-749, Korea)

**동해대학교 토목공학과(Dept of Civil Engrg., Donghae Univ., Donghae, Kangwon 240-713, Korea)

이에 반하여 Jonsson은 유속의 연직분포를 대수분포라 가정하고 운동량방정식을 적분하여 마찰계수를 산정하였는데 위상차에 대한 고려가 충분치 않았다. Bakker와 Van Doorn(1978)의 이론도 이 분야에서 주목을 받아 왔는데 Prandtl의 혼합거리이론(Mixing Length Theory)을 사용하여 비선형 편미분방정식을 제시하였으며, 매우 복잡한 수치해석으로 이의 해를 구하였다. 한편 Kamphuis(1975)는 자연자갈을 사용하여 파마찰실험을 수행하였는데 실험중 발달된 사련의 영향으로 등가조고 추정이 불확실하였으며 이에 따라 Kamphuis 경험식의 신뢰성이 떨어지는 것으로 판단되었다. 따라서 Jonsson식을 기준으로 Kamphuis 실험조건의 등가조고를 추정하였다. 또한 Kamphuis 실험결과를 이용하여 각 조건에 따른 지수형 파마찰계수 산정식을 제시하였다. 특히 분포를 또는 발생을 개념을 도입하여 파의 일주기동안 완난류와 전난류가 동시에 발생할 것으로 판단하여 이들 식의 조합으로 구성된 경험식을 제시하였다.

파운동하에서 연흔은 쉽게 발달될 수 있기 때문에 이 동상 해저면에서 합성류에 의한 전마찰력(total friction)을 계산하는데 있어 연흔의 형상을 평가하는 것은 필수적이다. 연흔의 형상은 보통 해저면 토사입자의 크기와 표면마찰력(skin friction)으로 결정되며, 전마찰력을 구하기 위한 유효조고(effective roughness height)는 연흔의 높이와 형상으로서 구해질 수 있다. 본고에서는 평균마찰력 산정결과에 의하여 등가조고를 재산정하였으므로 연흔의 효과를 고려하지 않았다.

파랑과 해류의 합성에 의한 마찰력 계산방법으로 수정된 Bijker 모형(본 논문에서 BYO Model이라 칭함)과 수정된 Fredsoe 모형(본 논문에서 FY Model이라 칭함)은 광범위한 조건에서의 합성류 마찰력 계산에 상당한 신뢰성을 인정받고 있다(유, 1994). 그러나 두 방법 모두 모형 검증에 있어 마찰력에 대한 절대치의 비교를 시도하지 않았으며 단지 일방향 흐름 마찰력에 대한 합성류 마찰력의 비인 증폭계수에 대하여서만 비교하였다. 이는 일방향 흐름에 의한 마찰력 계산결과에 대한 검증의 결여 때문이었다.

FY 모형은 Fredsoe 이론에서 경계층 파유속이 Potential theory로 산정되는 해저면 유속과 상당한 차이를 보일 것이라는 추론에 근거하여 개선된 모형인데 본 연구에서 새로운 조건식을 추가하여 이러한 문제점을 개선하였다. Bijker(1967)는 이동상 해저면에서 전마찰력을 구하는 실험을 수행한 바 있으며, 본 연구에서는 그의 실

표 1. Condition of turbulent combined flow in the near bottom

NO	Current Condition	Wave Condition	Combined Flow Condition
1	STF	RTF	RTF
2	RTF	RTF	RTF
3	STF	STF	STF
4	RTF	STF	RTF

Note : STF ; Smooth Turbulent Flow
RTF ; Rough Turbulent Flow

험결과를 이용하여 BYO 모형과 FY 모형을 개선하고 개선된 두 모형을 검증하였다.

한편, 일방향흐름에 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 표 1에 제시된 바와 같다. 이러한 가능성을 전제로 본 연구에서는 네가지 조합조건을 상정하고 이중 1, 2의 두 경우에 대한 파-해류 합성류 마찰력 산정방법을 개선하였다.

2. 파마찰계수

Kajiura(1968), Jonsson(1967), Kamphuis(1975)의 파마찰계수 산정식들은 전난류 조건에서 다음과 같다.

Kajiura(1968)

$$\frac{k}{\sqrt{C_w}} + \ln \frac{1}{\sqrt{C_w}} = 1.151 + \ln A_r ;$$

$$C_w = \exp[5.7 A_r^{-0.195} - 6.75] \tag{1}$$

Jonsson(1967)

$$\frac{k}{\sqrt{C_w}} + \ln \frac{1}{\sqrt{C_w}} = 1.549 + \ln A_r ;$$

$$C_w = \exp[5.213 A_r^{-0.194} - 6.67] \tag{2}$$

Kamphuis(1975)

$$\frac{k}{\sqrt{C_w}} + \ln \frac{1}{\sqrt{C_w}} = 0.927 + \frac{4}{3} \ln A_r ;$$

$$C_w = \exp[6.0 A_r^{-0.23} - 6.96] \tag{3}$$

여기서 C_w 는 파마찰계수, k 는 van Karman 상수로서 0.4

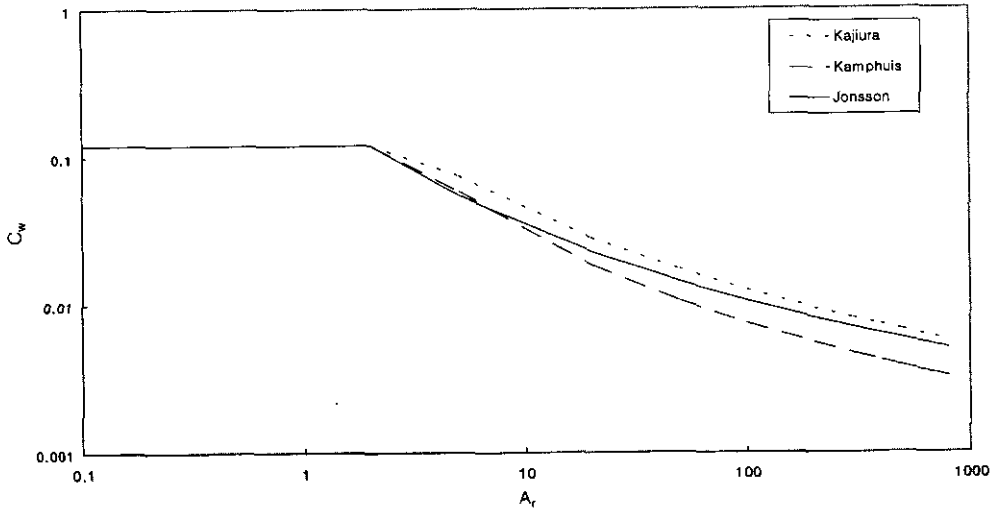


그림 1. 파마찰계수 산정식의 비교

이며, $A_r = A_b/k_w$ 이고 k_w 는 등가조고이다. A_b 는 해저면에서 파운동의 최대행정거리로서 선형파이론에 의하면 $A_b = a/\sinh Kh$, a 는 파진폭, K 는 파수, h 는 수심이다. 상기 산정식들의 첫 번째 식들은 준이론식들이고 두 번째 식들은 각각의 양해적 근사식들이다. 그러나 이들 산정식들은 그림 1에 제시되어 비교된 바와 같이 서로 상당한 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 Jonsson은 고정조고를 이용한 반면 Kamphuis는 자연자갈을 이용하여 실험을 수행하였기 때문에 사련이 발달되고 이에 따라 등가조고 산정에 문제가 있었기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 이유로 Kamphuis식 보다는 Jonsson식이 전난류조건에서 신뢰성이 높다고 생각되어 진다. 따라서 Jonsson의 전난류산정식을 이용하여 Kamphuis 실험자료의 등가조고를 추정하였다. Jonsson의 이론식을 이용할 경우 등가조고는 다음과 같이 산정된다.

$$k_w = A_b \exp \left[1.549 - \frac{0.4}{\sqrt{C_w}} - \ln \frac{1}{\sqrt{C_w}} \right] \quad (4)$$

또는 근사식을 이용할 경우,

$$k_w = A_b(0.192 \ln C_w + 1.279) \quad (5)$$

산정된 등가조고를 표 2에 제시하였으며, 사련의 발달에 따라 등가조고가 상당히 증가하였음을 알 수 있다. Kamphuis는 등가조고를 산정하는데 있어 ϕ_{90} 의 두 배의 값을 사용했는데 그럼에도 불구하고 Jonsson식으로 산정한 값과 상당한 차이를 보이고 있다. 이는 앞에

표 2. Jonsson식으로 산정된 Kamphuis 실험자료의 등가조고 추정치

NO	$2\phi_{90}$ (mm)	k_w (mm)	$\frac{A_b}{k_w}$	비고
1	40	91	1.1	$A_b = 0.1 \sim 4 \text{ m}$ $T = 1 \sim 15 \text{ (sec)}$
2	20	53	1.9	
3	10	37	2.9	
4	1.6	15	7.5	
5	0.8	6.3	18.4	
6	0.4	1.8	63.1	
7	0.16	1.2	162.5	
8	0.08	0.8	304.4	
9	0.04	0.5	703	
10	0.02	0.2	5942.3	

서 언급한 바와 같이 자연토사를 이용할 경우 사련이 발달되고 사련의 영향으로 조고가 과도히 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

본 연구에서는 파마찰계수를 보다 정확하고 간편하게 산정하기 위하여 Jonsson식을 재검토한 후 Kamphuis 실험자료를 이용하여 각 조건에 따른 지수형 파마찰계수 산정식을 제시하였다. 특히 분포를 또는 발생을 개념을 도입하여 파의 일주기동안 일정기간 완난류가 발생하고 나머지 기간동안 전난류가 발생할 것으로 판단하여 완난류 산정식과 전난류 산정식이 조합된 형태의 산정식을 개발하였다.

우선, 층류와 완난류 조건에서의 파마찰계수 산정식은 레이놀즈수의 지수형으로 다음과 같다.

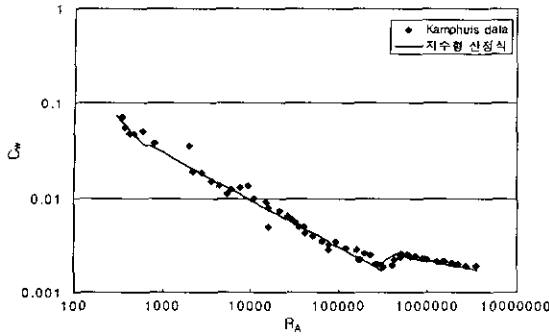


그림 2. 층류, 완난류 조건에서의 지수형 산정식 결과(Kamphuis 실험자료)

표 3. 층류 및 완난류 파마찰계수 관련상수

구 간	α	β
$R_A < 600$	22.0	-1.00
$600 < R_A < 310,000$	0.957	-0.50
$310,000 < R_A < 510,000$	8×10^{-7}	0.62
$510,000 < R_A$	0.026	-0.18

$$C_{ws} = aR_A^\beta \quad (6)$$

여기서, C_{ws} 는 완난류 파마찰계수, R_A 는 레이놀즈수이며 $R_A = A_b U_b / \nu$ 이고 U_b 는 해저면에서의 최대파속이며 ν 는 동점성계수이고 α 와 β 는 상수이다.

지수형 산정식 개발에 있어 R_A 의 범위에 따라 네 구간으로 나누었으며, 표 3에 관련상수 α 와 β 를 제시하였고, 그림 2에서 Kamphuis 실험자료와 지수형 근사식을 비교하였다.

완난류와 전난류가 동시에 발생하는 복합구간에서의 파마찰계수의 산정식은 아래와 같다.

$$C_{wR} = \alpha A_r^\beta A_s^\zeta \quad (7)$$

여기서, $A_r = A_b/k_w$ 이고, β 값을 -0.2로 고정할 경우 α 값은 0.65가 되며 ζ 값은 -0.33이 된다.

전난류 파마찰계수의 지수형 산정식 개발에는 Jonsson 식 (2)를 사용하였으며 다음과 같다.

$$C_{wR} = \alpha A_r^\beta \quad (8)$$

표 4에는 전난류 파마찰계수 산정식의 관련상수 α 와 β 를 제시하였다.

전난류 구간에서의 파마찰계수 산정치 비교는 아래의 표 5와 같다. 신뢰성이 높다고 판단되어지는 Jonsson의 준이론식과 지수형 근사식을 비교하여 보았을 경우 양

표 4. 전난류 파마찰계수의 관련상수

구 간	α	β
$A_r < 20$	0.18	-0.7
$20 < A_r$	0.11	-0.5

표 5. 전난류구간에서 파마찰계수 산정치 비교

A_r	C_w 전난류에서의 파마찰계수		
	Jonsson 이론식	Swart 근사식	지수형 근사식
2	0.120	0.121	0.111
10	0.034	0.036	0.036
20	0.023	0.023	0.022
50	0.014	0.015	0.014
100	0.011	0.011	0.010
1000	0.005	0.005	0.003

호한 정밀도를 가지는 것을 볼 수 있다. Swart(1974) 근사식은 식 (2)의 우측에 있다.

한편, 완난류와 전난류가 함께 발생할 경우에는 분포율 또는 발생을 개념을 도입한 일반적인 파마찰계수 산정식은 다음과 같다.

$$C_w = (1 - P_R)C_{ws} + P_R C_{wR} \quad (9)$$

여기서, C_{ws} 는 완난류에서의 파마찰계수, C_{wR} 은 전난류 파마찰계수, P_R 은 전난류 발생율이다.

파의 일주기동안 완난류와 전난류가 동시에 발생하는 조건은 아래에 제시된 조건에 따른다.

$$R_A < R_{AC} \quad (10)$$

여기서 $R_{AC} = 4,500 A_r$ 이며 완난류와 전난류가 동시에 발생하는 임계레이놀즈수이다. R_A 가 R_{AC} 보다 클 때는 전난류만 발생하며 이때는 식 (2) 또는 식 (8)로 파마찰계수를 산정한다.

전난류 발생율은 A_r 의 함수로 산정하였으며 다음과 같다.

$$P_R = \alpha A_r^\beta \quad (11)$$

관련상수 α 와 β 는 아래의 표 6과 같이 A_r 의 세 구

표 6. 분포율 산정식의 관련상수

구 간	α	β
$A_r < 7.5$	0.58	-1.66
$7.5 < A_r < 5942.3$	0.06	0.34
$5942.3 < A_r$	0.1	0

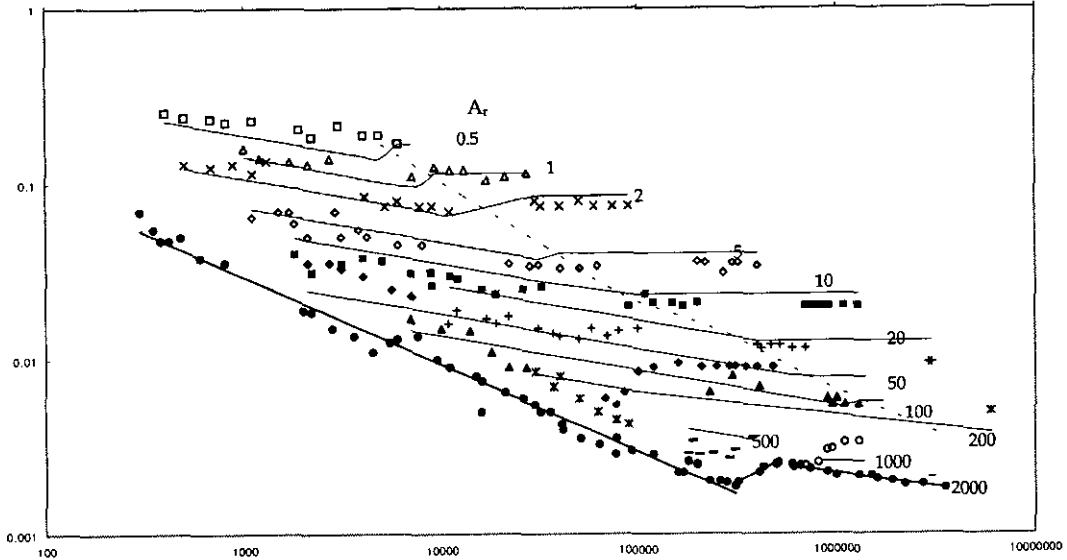


그림 3. 지수형 산정식의 결과(Kamphuis 실험자료)

간으로 나누어 제시하였다.

새로운 산정식은 그림 3에 제시된 바와 같이 Kamphuis 실험자료와 비교하였을 경우 만족할만한 결과를 보여주었다. 그림 3에 제시된 결과는 식 (6)과 표 3, 식 (7)과, 식 (8)과 표 4로 추정된 산정결과이다. 그림 3에서 복잡구간에 대하여는 식 (9)를 이용하여 추정된 결과를 제외하고 나머지 구간은 그림 2와 동일하다.

3. 개수로 마찰계수

개수로 마찰흐름을 완난류와 전난류로 구분하여 해석하며 본고에서는 유동훈과 이민호(1999)의 대수형 산정식을 이용하여 개수로 마찰계수를 산정하였다.

3.1 완난류

완난류 조건의 마찰계수 산정식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{\sqrt{C_c}} = \frac{\alpha_{HS}}{k} (\ln R_H \sqrt{C_c} + \beta_{HS}) \quad (12)$$

여기서, C_c 는 일방향흐름 마찰계수, k 는 von karman 상수이고 R_H 는 동수반경레이놀즈수로서 VH/ν 이며 H 는 동수반경이다.

유동훈과 이민호(1999)는 Bazin(1865)의 사각형 수로에서의 실험자료와 Warwick(1945)의 삼각형과 체형 수로에서의 실험자료를 분석하여 일방향 흐름 마찰계수 산

정식과 영점높이를 추정하였다. 그의 자료 중 완난류로 추정되는 자료를 추출하여 추정한 결과 식 (12)의 기울기 α_{HS} 는 삼각형수로인 경우 0.78, 체형 수로는 0.74이고, 절점계수 β_{HS} 는 다음과 같이 조고의 함수로 추정되었다.

$$\beta_{HS} = \gamma_s - \delta_s R_w^2 \quad (13)$$

여기서, $R_w = 1/\nu \sqrt{\sigma k_w / \rho}$, σ 는 표면장력, ρ 는 밀도이고 20°C인 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 $R_w \equiv 270 \sqrt{k_w}$ (k_w : mm)이다. γ_s 와 δ_s 는 상수로써 삼각형 수로인 경우 $\gamma_s = 3.66$, $\delta_s = 1.63 \times 10^{-5}$ 이다.

식 (13)를 전처리과정을 거쳐 구해진 양해법 산정식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{\sqrt{C}} = \frac{\alpha_{HS}}{k} (\ln R_H^X + \gamma_{HS}) \quad (14)$$

여기서, X 는 동수반경레이놀즈수의 지수승으로서 수로의 형상에 따라 변하는 계수이다.

Warwick의 실험자료를 분석하여 상기식 (14)의 γ_{HS} 를 산정한 결과 삼각형 수로와 체형수로 공히 R_H 수의 지수승 $X = 0.89$ 로 추정되었고, 절점계수 γ_{HS} 는 다음과 같이 등가조고와 선형관계를 가지고 있음을 알 수 있다.

$$\gamma_{HS} = \gamma_s - \delta_s R_w^2 \quad (15)$$

여기서 γ_s , δ_s 는 각 형상의 절점계수로서 $\gamma_s = 1.53$, δ_s

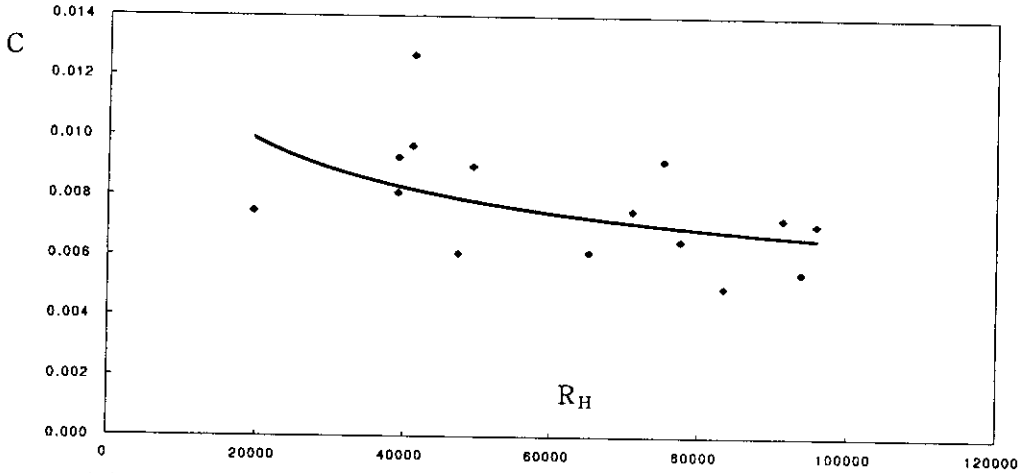


그림 4. Bijker 실험자료의 레이놀즈수대 마찰계수의 분포

$=1.39 \times 10^{-5}$ 이다.

본 연구에서는 Bijker(1967)의 실험자료를 이용하여 합성류 마찰력 산정모형을 검증하였기 때문에 Bijker의 실험자료를 검토할 필요가 있다. Bijker의 실험자료를 완난류 조건으로 분석했을 경우의 결과는 아래의 그림 4와 같다. 그림 4에 제시된 바와 같이 Bijker의 실험자료는 레이놀즈수에 대한 마찰계수의 변이가 크지 않으므로 완난류조건이 아닐 것으로 판단되어 진다.

3.2 전난류

전난류인 경우의 개수로 마찰계수 산정식은 다음과 같

이 표기된다.

$$\frac{1}{\sqrt{C}} = \frac{\alpha_{HR}}{k} (\ln H_r + \beta_{HR}) \tag{16}$$

여기서 H_r 은 H/k_w 로 표현되는 조고비이다.

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

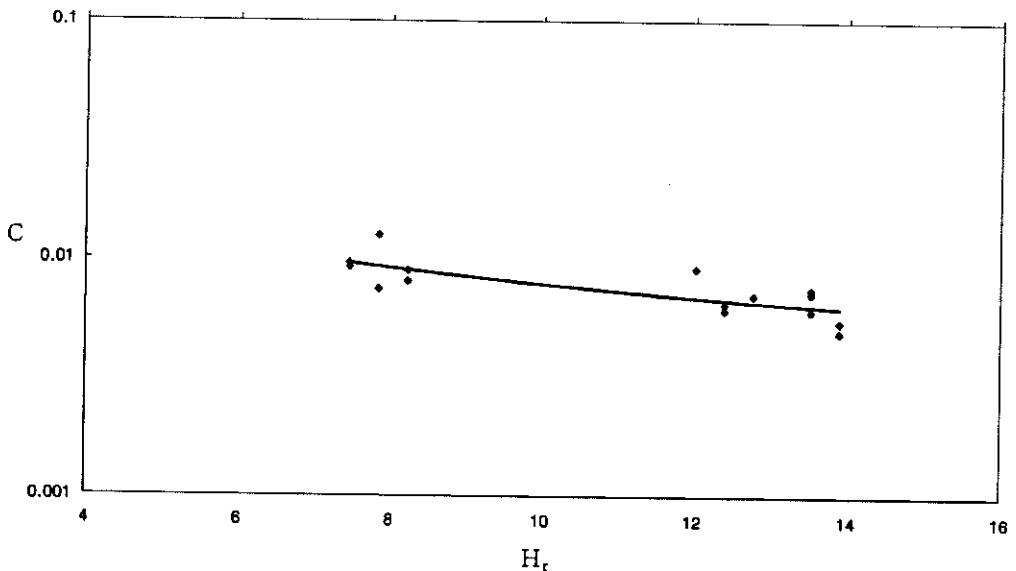


그림 5. 전난류 조건일 경우의 Bijker 실험자료

$$\beta_{HR} = \gamma_R - \delta_R R^2 \quad (17)$$

여기서 γ_R 과 δ_R 은 상수로써 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.

$$z_0 = e^{-\beta} k_w \quad (18)$$

여기서 $e^{-\beta}$ 는 비례상수로서 식 (17)을 식 (13)에 대입하면 다음과 같다.

$$B = \beta_{HR} - \beta \quad (19)$$

전난류 수리조건인 경우 등기조고는 앞절에서 언급한 바와 같이 Jonsson의 전난류산정식을 사용하여 추정하였다. 전난류시의 산정식의 계수는 $\alpha_{HR} = 1.59$, $\beta_{HR} = 0.55$ 이다.

Bijker 실험자료를 전난류 수리조건으로 가정하고 산정한 조고비 H_c 에 대한 마찰계수의 분포는 그림 5에 제시된 바와 같다. 완난류 조건의 결과와는 달리 전난류 조건으로 가정하였을 경우 실험자료가 보다 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 Bijker의 실험자료는 전난류 조건이라고 판단할 수 있다.

4. 합성류 조건에서의 평균마찰력과 최대마찰력

파와 해류의 합성류에 의한 마찰력을 산정하는 방법으로 10여 가지의 해석법이 개발되었는데 그중 BYO 모형과 FY 모형의 추가개선과 검증에 본 연구의 주안점을 두었다.

4.1 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.

$$\tau_m = \beta \tau_c \quad (20)$$

$$\tau_c = \xi \tau_e \quad (21)$$

여기서 일방향 흐름에 의한 마찰력 $\tau_e = \rho C_c U^2$ 이며, 해류마찰계수 C_c 는 절점계수 B 가 조정된 식으로부터 산정된다. U 는 해류유속, τ_m 은 주기평균 합성류 마찰력, τ_c

는 최대 합성류 마찰력, β 와 ξ 는 각각 해당 마찰력의 증폭계수이며 산정식은 각각 다음과 같다.

$$\beta = \alpha^2(a + b\mu_c^c) \quad (22)$$

$$\xi = \alpha_c^2 + \mu^2 + 2\alpha\mu\sin\theta \quad (23)$$

여기서 $\mu_a = \mu/\alpha$, $\mu = U_{BW}/u_{BC}$, U_{BW} 는 Bijker point에서의 최대파유속 유(1994), u_{BC} 는 Bijker point에서의 해류유속, α 는 해류유속의 평균 감소율이고, a , b , c 는 상수로서 표 7과 같다. θ 는 파와 해류의 교차각이며, 해류와 파의 방향이 직각이 경우 0° 이다. α_c 는 최대마찰력이 발생할 때의 유속감소율이다. 본 연구에서는 최대마찰력이 발생할 때의 유속감소율 α_c 에 대하여 주목하였다. 여기서, 해류 유속의 평균감소율 α 는 다음과 같다.

$$\alpha = \left(\frac{D_c}{\xi D_{w*} + D_{c*}} \right)^{1/3} \quad (24)$$

여기서, $\xi = 0.3 + 0.7 \sin\theta$ 이다. 또한 $D_{w*} = \delta\rho C_w U_b^3$, $D_{c*} = \beta D_c$, $D_c = \rho C_c U^3$ 이며 δ 와 β 는 각각 다음과 같다.

$$\delta = \frac{4}{3\pi} + r\mu^q \quad (25)$$

$$\beta = \alpha^2(a + b\mu_c^c) \quad (26)$$

여기서 r , q 는 표 7과 같다.

식 (25)와 식 (26)을 식 (24)에 대입하고 정리하면 식 (27)과 같다.

$$a\alpha^5 + b\mu^c \alpha^{5+c} + \xi r \eta \mu^{2+q} \alpha^{3+q} + 0.424 \xi \eta \mu^2 \alpha^3 - 1 = 0 \quad (27)$$

위의 식은 α 의 5차식이므로 음해법으로 풀어야 한다. 식 (27)을 μ , θ , η 의 함수로 취하는 양해적 근사식은 다음과 같다.

$$\alpha = \begin{cases} (0.08 + (1.9 - 0.6\theta^{0.25})\xi^{0.35})\mu^{-1} & \mu > \mu_c \\ \frac{\tanh[A(\ln(\mu_c/\mu)^{1.2} + C)]}{\mu} & \mu < \mu_c \end{cases} \quad (28)$$

표 7. 증폭계수 산정식의 관련상수

계수	$1.0 \leq \mu < \infty$	관련계수
a	$0.58 + 0.20t$	$t = \cos(2\theta)$
b	$0.76 - 0.35t$	
c	$1.08 + 0.04t$	
r	$0.43 - 0.20t$	
q	$-1.90 + 0.10t$	

여기서,

$$\zeta = \left(\frac{C_w}{C_c}\right)^{1/2}$$

$$\mu_c = \exp(1.7 + 0.35 \ln \zeta)$$

$$A = 0.65 - 0.18\theta^{0.25} - 0.06(1 - 0.6\theta^{0.25})\zeta^{0.5}$$

$$C = 0.4 - 0.14\zeta^{0.25}$$

$$\eta = \frac{U_b}{U}$$

또한 최대마찰력이 발생할 때의 유속감소율도 Yoo (1989)는 평균마찰력 산정시와 동일하게 취하였는데 본 고에서는 합성류의 최대 마찰력을 고려하여 α_x 는 다음과 같다.

$$\alpha_x = \left(\frac{D_c}{\xi D_{w*} + D_{c*x}}\right)^{1/3} \quad (29)$$

여기서, $\xi = 0.3 + 0.7\sin\theta$ 이며 $D_{w*x} = \delta_x \rho C_w U_b^3$, $D_{c*x} = D_{c*} = \beta D_c = \beta_x D_c$ 이고 δ_x 와 β_x 는 다음과 같다.

$$\delta_x = (1 + \mu_x^{-1} \sin\theta)^2 \quad (30)$$

$$\beta_x = \alpha_x^2 (a + b\mu_x) \quad (31)$$

여기서, $\mu_x = \mu/\alpha_x$ 이다. 식 (30)과 식 (31)을 식 (29)에 대입하고 정리하면 다음과 같다.

$$(a + \xi\eta\sin^2\theta)\alpha_x^5 + 2\xi\mu\eta\sin\theta\alpha_x^4 + b\mu^2\alpha_x^{5-c} + \xi\mu^2\eta\alpha_x^3 - 1 = 0 \quad (32)$$

상기식 (32)으로 구해지는 α_x 의 변이는 그림 6에 제시된 바와 같다. 식 (27) 또는 (28)로 구해지는 α 의 분포경향과 거의 유사한데 단지 수치가 좀더 작아지는 경향이 있다.

또한, 식 (32)를 양해법으로 구하는 근사식은 다음과 같다.

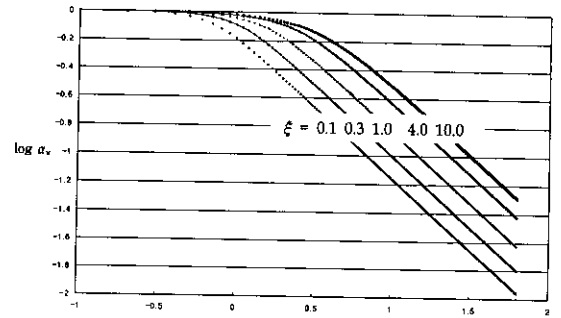
$$\alpha_x = \begin{cases} (-0.1 + (1.7 - 0.6\theta^{0.25})\eta^{0.3})\mu^{-1} & \mu > \mu_c \\ \tanh[A(\ln(\mu_c/\mu)^{1.4} + C)] & \mu < \mu_c \end{cases} \quad (33)$$

여기서,

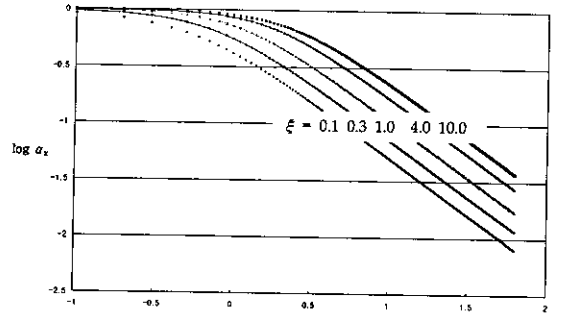
$$\mu_c = \exp(1.52 + 0.48 \ln \zeta)$$

$$A = 0.65 - 0.22\theta^{0.25} - 0.06(1 - 0.6\theta^{0.25})\zeta^{0.5}$$

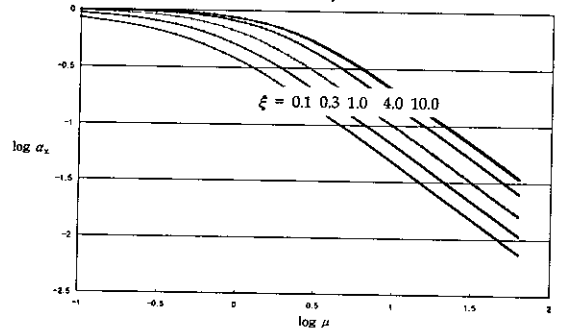
$$C = 0.4 - 0.14\zeta^{0.25}$$



(a) $\theta = 0$ 일 때



(b) $\theta = \frac{\pi}{4}$ 일 때



(c) $\theta = \frac{\pi}{2}$ 일 때

그림 6. 감속율 α_x 의 변이

4.2 Fredsoe-Yoo Model

선형파이론으로 구해지는 해라면 유속이 경계층에서의 실제 파속과 상당히 다를 수 있다는 추론에 기초하여 유동훈(1993b, 1994)은 Jonsson(1967)의 이론과 Fredsoe(1984)의 수치모형을 개선하였으며, 파마찰계수에 대한 관측자료와 비교하여 상당히 양호한 계산결과를 얻었다. 유동훈의 경계층 파속 또는 Fredsoe point(ZF)에서의 파속 산정식은 다음과 같다.

$$u_b = \gamma U_p \quad (34)$$

$$\gamma = \exp\left(0.55 \frac{k_s}{A_p}\right) \sin^{3.5} \lambda \quad (35)$$

상기식에서 u_b 는 경계층 최상점에서의 파속, U_p 는 선형파이론으로 산정되는 해저면 최대파속, λ 는 파운동의 위상각이다. 조고에 대한 최대 행정거리비 A_p/k_s 가 약 2.0 이상일 때 파 마찰계수가 급격히 감소하는 양상을 보이는데 이러한 경향은 합성류 마찰력 산정시 문제점으로 나타난다. 이를 개선코자 식 (35)를 다음과 같이 수정하였다.

$$\gamma = \exp\left[0.55 \min\left(2.0, \frac{k_s}{A_p}\right)\right] \sin^{3.5} \lambda \quad (36)$$

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 이론전개과정을 거의 똑같이 따르면 된다. 파와 해류가 합성하였을 때 Fredsoe Point에서의 유속은 다음과 같이 산정된다.

$$\left(\frac{u^*}{k} \ln \frac{z_F}{z_0}\right)^2 = \left(\frac{u_0^*}{k} \ln \frac{z_F}{z_0} + u_b \cos \theta\right)^2 + (u_b \sin \theta)^2 \quad (37)$$

여기서 θ 는 파의 진행방향이 해류의 직각방향과 이루는 각도이며, 만일 θ 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,

$$b = k \frac{u_b}{u_a^*} \quad (38)$$

u_a^* 는 임의로 결정된 합성류 마찰속도이며(Fredsoe (1984) 참조), u_0^* 는 일방향 흐름만 작용할 때의 마찰속도이고, u^* 가 실질적인 마찰속도이다. Fredsoe Point에서의 파속 u_b 는 식 (34)로부터 산정된다. 식 (36)을 위상각에 관해서 미분하고 식 (37)을 이용하면 계수 b 에 관하여 다음과 같은 산정식이 구하여진다.

$$\frac{db}{d\lambda} = q^{-1} [\delta b^2 + r^2 + 2br \cos \theta]^{1/2} - p \tan^{-1} \lambda \quad (39)$$

여기서 $\delta = kA_p u_0^* / z_0 U_p$, $r = k\chi(U_p / u_0^*)$, $q = e^b(b-1) + 1$, $p = b(e^b - b - 1)$ 이다. 원래의 Fredsoe 모형에서 $\gamma = \sin \lambda$ 인데 새로이 수정된 모형에서는 식 (36)으로 산정된다. 그러나 λ 가 작을 때 식 (38)의 해는 원래의 Fredsoe 모형결과와 동일하며 다음과 같다.

$$b = \sqrt{\frac{A}{3} \delta \lambda} \quad (40)$$

식 (40)을 초기치로 가정하고 Runge-Kutta 방법으로 식 (39)의 해를 구하며, 시시각각 변이하는 마찰속도는 다음 식으로 산정한다.

$$u^* = u_0^* \sqrt{1 + \frac{r^2}{b^2} + \frac{2r \cos \theta}{b}} \quad (41)$$

식 (41)의 평균치로 주기 평균마찰력을 산정하고, 일주기당 최대치를 택하여 합성류의 최대마찰력을 산정한다.

5. BYO 모형의 개선 및 검증

개수로 흐름을 전난류 조건으로 가정하면 BYO모델의 평균오차는 1.12%, 오차 절대치의 평균은 3.97%이고, FY모델의 경우는 평균오차 0.04%, 오차 절대치의 평균 6.46%로 나타났다. 즉 어느 경우를 가정하거나 평균오차는 2% 이하이지만, 두 모델이 약간은 상이한 계산결과를 보인다. 본 연구에서 천해파에 의한 경계층 흐름은 모두 전난류 상태로 가정하였으며, 이때의 등가조고는 $k_w/30$ 로 가정하였다. 또한 최대 마찰력 산정시 두 모델은 상이한 결과를 보여주는데 BYO모델이 FY모델보다 상당히 크게 산정하는 결과를 보여주었다. FY모델은 난류확산의 지체를 고려하였으므로 BYO보다 최대 마찰력 산정시 비교적 정확한 값이라고 추정된다. 한편 해류의 경계층 두께는 수심 h 와 밀접한 관계가 있고 파랑의 경계층 두께는 해저면에서 파운동의 최대행정거리 A_p 와 밀접한 관계가 있을 것으로 판단하고 h/A_p 를 BYO 모형의 최대마찰력 산정에 도입하여 난류확산 지체효과를 반영하였다. 새로이 도출된 최대마찰력 발생시의 해류 감소율 α 를 사용하여 계산된 ζ 값은 보다 더욱 FY모델과 유사한 결과를 보여주었다.

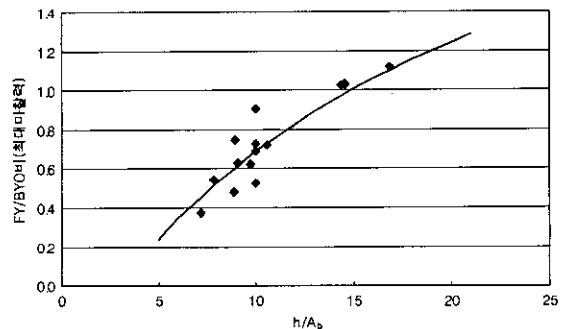


그림 7. BYO와 FY의 최대마찰력 비

표 7. Bijker's 실험 데이터와 BYO, FY 해석결과 비교

NO.	h m	V m/s	H m	i _c 10 ⁻⁴	i _{wc} 10 ⁻⁴	k _B (Bijker) mm	k _Y (RT) mm	τ _c			τ _m		
								meas. N/m ²	BYO N/m ²	FY N/m ²	meas. N/m ²	BYO N/m ²	FY N/m ²
121	0.20	0.10	0.036	0.39	0.64	24.0	23.2	0.077	0.077	0.077	0.126	0.129	0.106
122	0.21	0.19	0.036	1.45	1.90	33.0	24.6	0.299	0.298	0.298	0.391	0.406	0.354
124	0.35	0.21	0.068	1.00	1.58	42.0	28.0	0.343	0.342	0.342	0.542	0.545	0.525
124	0.33	0.30	0.066	2.04	2.73	40.0	26.7	0.660	0.662	0.662	0.884	0.918	0.873
126	0.19	0.21	0.022	2.24	2.66	38.0	25.8	0.418	0.419	0.419	0.496	0.485	0.456
101	0.19	0.22	0.026	2.56	2.96	44.0	26.4	0.477	0.479	0.479	0.552	0.576	0.526
101	0.20	0.21	0.026	2.91	3.24	67.0	30.3	0.571	0.569	0.569	0.636	0.705	0.633
102	0.21	0.24	0.028	2.57	3.02	37.0	26.2	0.529	0.531	0.531	0.622	0.631	0.587
103	0.32	0.21	0.034	0.89	1.06	28.0	23.9	0.279	0.278	0.278	0.333	0.340	0.345
104	0.32	0.25	0.038	1.34	1.56	28.0	24.9	0.421	0.420	0.420	0.490	0.509	0.511
105	0.36	0.24	0.047	0.84	1.06	18.0	21.5	0.297	0.297	0.297	0.374	0.358	0.425
106	0.36	0.27	0.011	1.17	1.40	20.0	23.1	0.413	0.414	0.414	0.494	0.490	0.546
114	0.31	0.25	0.060	1.95	2.41	62.0	30.0	0.593	0.592	0.592	0.733	0.870	0.773
115	0.35	0.14	0.066	0.36	0.64	29.0	24.6	0.124	0.123	0.123	0.220	0.218	0.241
116	0.35	0.27	0.066	1.60	2.18	42.0	27.6	0.549	0.551	0.551	0.749	0.793	0.759
average error (%)								0.02	0.02		1.12	0.04	
absolute a. error (%)								0.31	0.31		3.97	6.46	

Notes) k_B : Bijker가 추정한 등가조고
 k_Y : 저자가 추정한 등가조고
 τ_{c meas} = ρghi_c, τ_{wc meas} = ρghi_{wc}

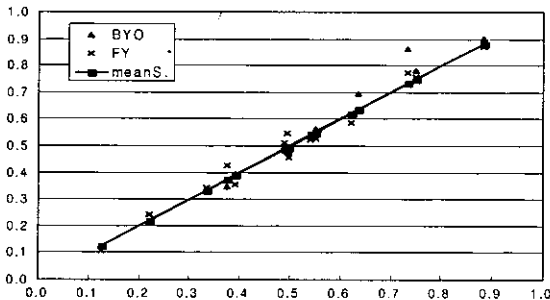


그림 8. Bijker 실험결과에 대하여 BYO와 FY 계산결과와의 비교(평균마찰력)

그림 7은 BYO와 FY로 산정되어진 최대마찰력을 비교한 것이다. 그림과 같이 두 모델의 최대마찰력은 h/A_b와 관계가 있음을 알 수 있다. 난류확산의 지체를 고려하는 조정계수 ω는 다음과 같다.

$$\omega = 2.5 \tanh(0.2(\frac{h}{A_b})^{0.5} - 0.35) \quad (42)$$

즉, 개선된 BYO 모형(BYOII)에서의 최대마찰력 산정식은 식 (21)과 식 (42)를 곱하여 다음과 같다.

$$\tau_s = \zeta \omega \tau_c \quad (43)$$

표 7은 Bijker의 실험 데이터와 BYO, FY의 평균마찰력 산정결과를 비교한 것이다.

6. 결 론

Bijker의 실험자료의 분석을 통해 수리조건이 전난류 조건임을 판명하였으며 이를 적용한 모델의 검증에서도 정확한 결과를 도출할 수 있었다. 파마찰계수의 산정은 일주기동안 완난류, 전난류가 동시에 발생할 것으로 판단하여 제시한 경험식과 보다 간편한 형태의 지수형 산정식은 실험결과와 비교하여 볼 때 정확성이 높은 것으로 판단되었다.

최대마찰력은 실험결과가 없으므로 각 모델의 산정값들을 비교하여 개선책을 마련하였다. 최대마찰력 산정시 BYO I, BYO II, FY 모델의 결과간에 차이가 나타났는데 전체적으로 BYO I의 결과가 FY모델보다 최대마찰력을 과대산정하는 것으로 나타났다. 이는 평균 유속감소를 α를 이용하기 때문인 것으로 판단하여

표 8. BYO, FY의 최대마찰력 산정결과 비교

NO.	h m	V mm m/s	H m	k _B (Bijker) mm	k _V (RT) mm	τ _{max}		
						BYO N/m ²	BYO N/m ²	FY N/m ²
121	0.20	0.10	0.036	24.0	23.1	1.013	0.452	0.373
122	0.21	0.19	0.036	33.0	24.6	1.416	0.704	0.754
124	0.35	0.21	0.068	42.0	28.0	3.777	2.489	2.335
124	0.33	0.30	0.066	40.0	26.7	3.522	2.139	2.614
126	0.19	0.21	0.022	38.0	25.8	0.974	0.723	0.700
101	0.19	0.22	0.026	44.0	26.4	1.329	0.826	0.837
101	0.20	0.21	0.026	67.0	30.3	1.921	1.335	1.030
102	0.21	0.24	0.028	37.0	26.2	1.384	0.949	0.959
103	0.32	0.21	0.034	28.0	23.9	0.769	0.816	0.842
104	0.32	0.25	0.038	28.0	24.9	1.152	1.131	1.180
105	0.36	0.24	0.047	18.0	21.5	0.765	0.709	1.625
106	0.36	0.27	0.011	20.0	23.1	1.003	1.013	1.649
114	0.31	0.25	0.060	62.0	30.0	4.624	2.801	2.222
115	0.35	0.14	0.066	29.0	24.6	2.073	1.400	1.853
116	0.35	0.27	0.066	42.0	27.6	3.561	2.429	2.590

Notes) BYO I : 해류유속감소율 α를 사용할 경우
 BYO II : 최대마찰력 발생시 해류 유속감소율 α_s와 조정식을 사용할 경우

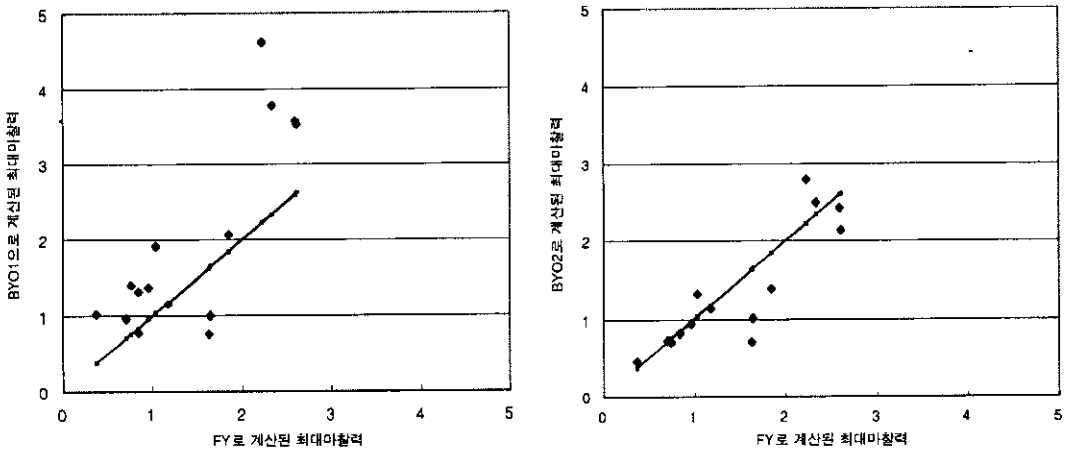


그림 9. BYO I, BYO II 및 FY에 의한 최대마찰력 계산결과 비교

최대마찰력 발생시의 유속감소율 α_s을 도입하고 수심과 해저면에서 파운동의 최대행정거리의 비로 조정하여 계산한 BYO II모델은 FY모델과 유사한 결과를 보여주었다.

참고문헌

유동훈, 1993a. 완난류 개수로 마찰계수, 제35회 수공학 연 구발표회 논문집, 49-56.
 유동훈, 1993b. 전난류에서의 파마찰계수, 한국해양공학 회지, 5(2): 51-57.
 유동훈, 1994. 전난류에서 파랑과 해류의 마찰력, 한국해양 공학회지, 6(3): 226-233.
 유동훈, 이민호, 1999. 대수형 개수로 마찰계수 산정식, 대 한토목학회 논문집, 19(II-2): 159-167.
 Bazin, H.E., 1865. Recherches experimentales sur lecoulement de leau dans les canaux decouverts., Memoires presentes par divers savants al Academic des Sciences, Paris,

Vol. 19.

- Varwick, F., 1945. Zur Fließformel für offene Kunstliche Gerinne., These inedite, Dresden University.
- Bijker, E.W., 1967. Some consideration about scales for costal models with movable bed, Delft Hydraulics Lab., Publ., No. 50.
- Swart, D.H., 1974. Offshore sediment tranport and equilibrium beach profiles, Delft Hydraulics Lab., Publ, No. 131.
- Bakker, W.T. and Van Doorn Th., 1978. Near-bottom velocities in waves with a current. *ASCE Proc. 16th Conf. Coastal Engineering*, 2, pp. 1394-1413
- Fredsoe, J., 1984. The turbulent boundary layer in wave-current motion, *J. Hydraulic Eng., ASCE*, 110(8), pp. 1103-1120.
- Jonsson, I.G., 1967. Wave boundary layers and friction factors, *Proc. 10th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE*, Tokyo, pp. 127-148.
- Jonsson, I.G. and Carlsen, N.G., 1975. Experimental and theoretical investigations in an oscillatory turbulent boundary layer, *J. Hydraulic Res.*, 14(1), pp. 45-60.
- Kajiura, K., 1968. A model of the bottom boundary layer in water waves, *Bulletin Earthquake Research Inst.*, 46, pp. 75-123.
- Kamphuis, J.W., 1975. Friction factor under oscillatory waves, *J. Waterway, Port and Ocean Div., ASCE*, 101, WW 2, pp. 135-144.