

## 천해파와 해류에 의한 해저면 마찰력 Bottom Friction of Surface Waves and Current Flow

유동훈\* · 김지웅\*

Dong Hoon Yoo\* and Jiwoong Kim\*

**요 旨** : 일방향흐름에 의한 해류의 마찰력 계산을 위하여 Prandtl의 혼합길이 이론을 수심 전구간에 적용하고 난류의 세기와 수리조건에 따라 완난류와 전난류로 분류하여 마찰계수를 산정하는 개수로 마찰계수 산정방법을 제시하였다. 파랑과 해류의 합성류에 의한 해저마찰력을 계산하기 위하여 두 유속의 연직분포를 고려한 BYO 모형을 이러한 흐름특성을 반영하여 개선하였다. BYO 모형은 모든 유속의 연직분포가 해저면으로부터의 직선과 접선으로 만나는 점(Bijker point)을 도출하여 파운동 유속과 해류유속의 합성을 이 점에서 시행하여 일주기의 평균값을 구하는 모형이다. 일방향흐름의 해류나 천해파에 의한 파운동이나 해저면 가까이 정체층흐름은 완난류, 천이난류, 전난류 등 세가지 종류로 대별된다. 그 중 완난류와 전난류로 대별하여 두 경우에 대한 합성류 마찰력 산정방법을 제시하였다.

**핵심용어** : 혼합길이, BYO모형, Bijker point, 난류, 합성류 마찰력

**Abstract** □ The friction factor equation of open channel flow is developed by using Prandtl's mixing length theory and considering the flow characteristics of smooth or rough turbulent flow. BYO model considers vertical velocity profile for the computation of bottom friction of surface waves and current flow. The model computes the mean bottom friction of combined wave-current flow by the vectorial summation of wave velocity and current velocity at Bijker point. The near bottom flow is discriminated by three flow regimes; smooth, transitional and rough turbulent flow. The model, BYO, has been further refined considering the combination of smooth turbulent flow and rough turbulent flow.

**Keywords** : mixing length, BYO model, Bijker point, turbulent flow, combined flow bottom friction

### 1. 서 론

해안선에서 파랑과 해류는 빈번히 교차하게 되며 특히 해안선의 변형에 직접적으로 심대한 영향을 미치는 해안류는 대부분 파랑에 의하여 생성 발달된다. 또한 해안선의 변형, 항로 및 항내의 매물, 연안구조물 주위에서의 침식 등은 파랑과 해류의 합성류에 의한 해저마찰력으로부터 직접적인 영향을 받아 나타나는 현상이며, 쇄파에 의한 연안류의 분포에 미치는 요인중 합성류에 의한 해저 마찰력은 가장 영향도가 높은 인자라 할 수 있다. 따라서 파랑과 해류의 합성에 의한 해저마찰력에 대한 정확한 계산은 거의 모든 해안환경수리 문제 및 해저구조물

의 안정성해석에 있어 필히 고려되어야 할 사항이다.

파랑과 해류의 합성에 의한 마찰력 계산방법으로 수정된 Bijker 모형(본 논문에서 BYO 모형이라 칭함)은 광범위한 조건에서의 합성류 마찰력계산에 상당한 신뢰성을 인정받고 있다. BYO 모형은 Prandtl의 혼합거리이론에 기초를 두어 합성류에 의한 해저면 마찰력을 계산하는데 있어 두 유속의 연직분포를 고려한다. Prandtl의 이론 역시 경험으로부터 연유한 해석방법이기는 하지만, 이 이론은 어떤 난류운동을 해석하던지 일반성을 잃지 않는다. 이는 Boussinesq의 난류확산개념(eddy viscosity concept) 보다 한 단계 발전된 개념이며, 이 이론에서 도출되는 von Karman 상수는 어느 조건에서도 변하지 않는 상수이다. 이에 반

\*아주대학교 환경도시공학부 (Department of Civil Engineering, Ajou University, Suwon 442-749, Korea, dhyoo@madang.ajou.ac.kr)

하여 난류확산계수는 흐름의 조건에 따라 많은 변이를 나타낸다. 혼합거리이론에서 유속의 난류성분은 혼합거리와 유속의 연직변화율과의 곱에 비례한다고 가정하며, 이때 혼합거리는 해저면으로부터의 거리에 비례한다. 기본적으로 BYO 모형은 혼합거리이론을 이용하여 모든 유속의 연직분포가 해저면으로부터의 직선과 접선으로 만나는 점(Bijker point)을 도출하여 파운동 유속과 해류유속의 합성을 이 점에서 시행하여 일주기의 평균값을 구한다. 이때 증폭된 난류의 정도에 따라 해저면 가까이에서 유속이 감소하는데 이는 확산계수의 비로서 감속율을 구하며, 계산효율을 증진시키기 위하여 합성유속의 주기평균치는 약산식으로 제시하였다.

BYO 모형은 파도와 해류의 흐름조건이 혼합거리이론으로 해석할 수 없거나 이상의 가정에 문제점을 야기시킬 때 정확한 해를 제시할 수 없을 가능성이 있다. 그러한 가능성은 특히 사면이 존재하여 와류가 크게 발달할 때 나타날 수 있다. 즉 사면이 존재할 때는 혼합거리를 정확히 측정할 수 없으며 유속의 연직변화율이 같은 점에서의 난류크기와 직접 관계가 없을 가능성도 많다. 이러한 경우 어떤 이론도 정확한 해석이 불가능할 것으로 판단되며 BYO 모형도 예외는 아닐 것이다. 그러나 이와 같이 해저면의 상태가 매우 복잡한 경우일 지라도 BYO 모형은 어느 정도 해의 근사치를 제공할 수 있을 것으로 사료되는데, 이는 사면 주위에서 발달하는 아무리 큰 와류라도 해저면에 근접한 곳에서의 난류정도에 좌우될 것으로 판단되기 때문이다. BYO 모형에서 유·이(1992)는 감속계수의 산정시 파랑의 진행방향과 해류가 이루는 각도의 영향을 고려하였다.

파와 해류의 합성류에 의한 해저마찰력을 계산하는 방법으로 이제까지 여러 방법들이 제안되어 왔으나, 각 방법의 기본개념에는 큰 차이점이 없다 하겠다. 그러나 주로 경계층 내에서 파속과 해류속의 합성과 파마찰계수에만 주 관심을 가져왔으며, 일방향흐름에 의한 마찰력 계산에 대한 검증에는 미흡하였다. 개수로 마찰력 또는 평균유속 산정식으로 Manning식, Bazin식 등이 오랫동안 사용되어 왔으나, 이들 경험식들은 차원이 일치하지 않을 뿐만 아니라 광범위한 수리조건에서의 적용 가능

성에도 상당한 의문점을 갖고 있다. Keulegan은 Prandtl의 혼합길이 이론을 수심 전구간에 적용하여 개수로 마찰계수 산정방법을 제시하였다. 매그러운 벽면 개수로에 대하여 Tracy and Lester(1961)는 질점 수정법을, Kazemipour and Apelt(1979)는 형상계수(shape factor) 도입법을, 유(1993a)는 마찰반경(frictional radius) 도입법을 제시하였으며, 유·이(1997), 유·이(1999)는 거칠은 벽면 개수로에서의 마찰계수 산정에 질점과 기울기를 조정하는 방법을 적용하여 일반성을 확보하고자 시도하였다.

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. 유·이(1997), 유·이(1999) 등이 확인한 바와 같이 광폭수로에서의 일방향 흐름은 주로 완난류 조건일 가능성이 높다. 이러한 가능성을 전제로 본 연구에서는 두가지 조합조건을 상정하고 두 경우에 대한 합성류 마찰력 산정방법을 논의하고자 한다.

## 2. 일방향 흐름의 마찰력

일방향 흐름에 대한 관심은 인류문명의 역사만큼이나 오래되었으며, 본격적인 연구도 100년 이상의 오래된 연구역사를 갖고 있다. 그럼에도 불구하고 이에 대한 우리의 이해는 아직 매우 미흡한 것으로 판단된다. 개수로 마찰흐름에 대한 조직적인 실험연구는 Bazin(1865)이 최초로 시도하였던 것으로 알려져 있으며, 이후 Manning(1889)은 상당히 많은 양의 Bazin 실험자료와 그 밖의 여러 관측결과를 이용하여 독특한 형태의 경험식을 제시하였으며, Bazin(1897)도 새로운 형태의 경험식을 개발하였다. 그밖에 여러 연구자들이 개수로 평균유속산정식을 개발하였다. 한편 최근 유·이(1997), 유·이(1999) 등은 개수로 흐름을 새로운 관점에서 파악한 후 질점과 기울기가 조정되는 새로운 형태의 대수분포식을 개발하였다. 본 연구에서는 유·이(1999)의 대수

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

Condition of current flow	Condition of shallow waves	Condition of combined flow
Smooth turbulent flow	Rough turbulent flow	Rough turbulent flow
Rough turbulent flow	Rough turbulent flow	Rough turbulent flow

분포식을 재 검토하여 합성류 마찰력을 산정하고자 한다. 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 원형관로인 경우 다음과 같다.

$$\frac{1}{\sqrt{C}} = \frac{1}{k} \left( \ln \frac{r}{z_0} - 1.5 \right) \quad (2)$$

여기서  $r$ 은 원형관의 반경으로서 동수반경  $H=r/2$ 이며, 동수반경에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{\sqrt{C}} = \frac{1}{k} \left( \ln \frac{H}{z_0} - 0.8 \right) \quad (3)$$

Keulegan은 수로폭이 넓은  $H=h$ 인 수로에서 유속의 대수분포식에 영점높이를 도입한 후 이를 영점높이부터 수면까지 적용하고 단위폭당 유량을 산정하여 다음 식을 유도하였다.

$$\frac{1}{\sqrt{C}} = \frac{1}{k} \left( \ln \frac{H}{z_0} - 1.0 \right) \quad (4)$$

이와 같은 대수분포식 마찰계수 산정식에서 수로의 형태에 따라 절점계수의 수치가 달라진다. 기울기와 절점계수를 각각  $\alpha$ 와  $\beta$ 로 표기하면 대수분포형 마찰계수 산정식의 일반형은 다음과 같다.

$$\frac{1}{\sqrt{C}} = \frac{\alpha}{k} \left( \ln \frac{H}{z_0} + \beta \right) \quad (5)$$

### 3. 완난류 산정식

완난류 흐름에서의 영점높이 산정식은 다음과 같다.

$$z_{0HS} = \zeta \frac{V}{u_*} = \zeta \frac{H}{R_H \sqrt{C}} \quad (6)$$

여기서,  $\zeta$ 는 비례상수로서 원형관로 흐름인 경우  $\zeta=0.11$ ,  $\nu$ 는 물의 점성계수,  $u_*$ 는 마찰속도로서 등류인 경우  $\sqrt{gHi}$  또는  $\sqrt{C}V$ 이고,  $\theta$ 는 에너지선의 경사이며  $R_H$ 는 동수반경레이놀즈수이다. 식 (6)을 자유표면 흐름의 대

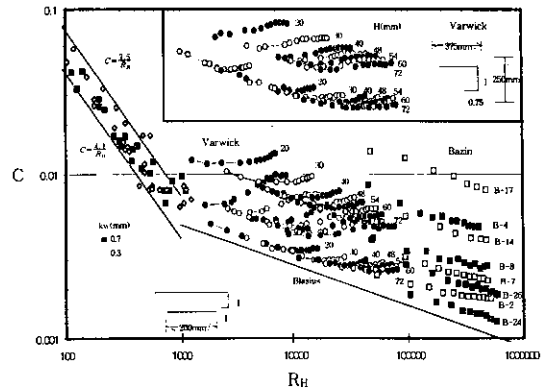


Fig. 1. Distribution of friction factor of open channel flow against Reynolds number.

표영점높이로 가정하고 식 (5)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 완난류 조건의 마찰계수 산정식이 구해진다.

$$\frac{1}{\sqrt{C}} = \frac{\alpha_{HS}}{k} (\ln R_H \sqrt{C} + \beta_{HS}) \quad (7)$$

유·이(1999)는 Bazin의 사각형 수로에서의 실험자료와 Varwick(1945)의 삼각형과 제형 수로에서의 실험자료를 분석하여 일방향 흐름 마찰계수 산정식과 영점높이를 추정하였다. 그의 자료 중 완난류로 추정되는 자료를 추출하여 추정한 결과 식 (7)의 기울기  $\alpha_{HS}$ 는 삼각형수로인 경우 0.78, 제형수로인 경우는 0.74이고, 절점계수  $\beta_{HS}$ 는 다음과 같이 조고의 함수로 추정되었다.

$$\beta_{HS} = \gamma_s - \delta_s R_w^2 \quad (8)$$

여기서  $R_w = (1/\nu) \sqrt{\sigma(k_w/\rho)}$ ,  $\sigma$ 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  $R_w = 270 \sqrt{k_w}$  ( $k_w$ : mm),  $k_w$ 는 등가조고이다.  $\gamma_s$ 와  $\delta_s$ 는 상수로서 삼각형수로인 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 사각형수로인 경우  $\gamma_s=3.66$ ,  $\delta_s=1.63 \times 10^{-5}$ 이다.

Fig. 2는 완난류 조건에서 Varwick의 삼각형수로와 제형수로 실험자료를 분석하여 도기한 결과이다.

완난류 조건의 기본식 (7)과 같은 형태의 마찰계수 산정식은 양변에 마찰계수가 포함되어 있으므로 양해법으로 마찰계수를 산정하여야 한다. 등류이고 수로기울기가 주어진 경우에는  $R_H \sqrt{C} = R_F \sqrt{i}$  로서 양해법으로 바로 산정될 수 있다. 여기서  $R_F = H \sqrt{gH}/\nu$  이다. 등류가 아니거나 수로기울기가 주어지지 않았을 경우에는 양변에

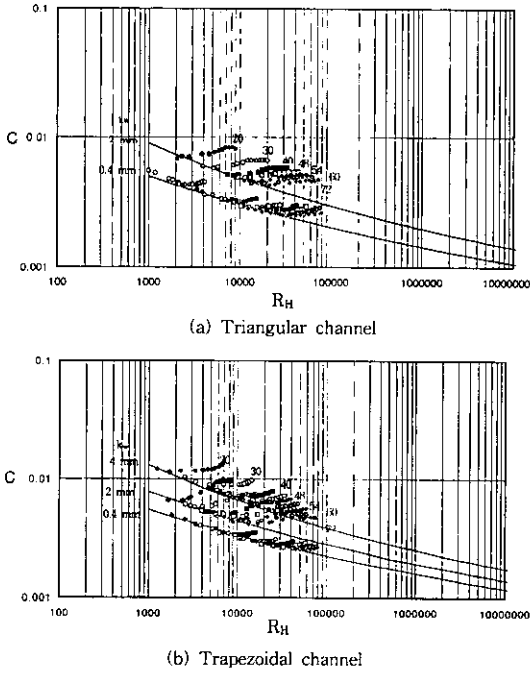


Fig. 2. Comparison between logarithmic equation and laboratory experiments of Varwick (1945) for smooth turbulent flow.

마찰계수가 포함된 음해법 산정식을 반복하여야만 해를 구할 수 있다. 그러나 이러한 경우에도 다음과 같은 전처리과정을 거치어 양해법 산정식을 구할 수 있다. 완난류 원형관로에서 영점높이 산정식은 식 (6)인데 이의 양해법 산정식은 다음과 같다(유·강, 1995).

$$z_{0HS} = 0.683HR_H^{-0.87} \quad (9)$$

상기 식 (9)를 식 (5)에 대입하면 다음과 같은 기본식을 유도할 수 있다.

$$\frac{1}{\sqrt{C}} = \frac{\alpha_{HS}}{k} (\ln R_H^X + \gamma_{HS}) \quad (10)$$

여기서, X는 동수반경레이놀즈수의 지수승으로서 수로의 형상에 따라 변이하는 계수이다. 식 (9)를 적용하였을 경우 X=0.87이고  $\gamma_{HS} = -0.42$ 이다. 그러나 개수로인 경우 지수 X와  $\gamma_{HS}$ 의 수치 모두 상당한 변이를 갖는다. 한편 Barr(1975)의 추정수치는 X=0.89이었다.

Varwick의 실험자료를 분석하여 상기식 (10)의  $\gamma_{HS}$ 를 산정한 결과 삼각형 수로와 제형수로 공히  $R_H$  수의 지수승 X=0.89로 추정되었고, 절점계수  $\gamma_{HS}$ 는 다음과 같

이 등가조고와 선형관계를 가지고 있음을 알 수 있다.

$$\gamma_{HS} = \gamma_i - \delta_i R_w^2 \quad (11)$$

한편, 각 형상의 수로에 대한  $\gamma_{HS}$ 를 취하고 식 (10)을 식 (5)에 대응하면 개수로 흐름에서 완난류 조건의 영점높이 산정식은 다음과 같다.

$$z_0 = e^{-B} h R_H^{-0.89} \quad (12)$$

여기서 B는 다음과 같다.

$$B = \gamma_{HS} - \beta \quad (13)$$

본 연구의 실험자료 분석에서 등가조고를 추정할 필요가 있었으며, 각기 가정된 수리조건으로 유도된 산정식으로부터 등가조고를 추정한다. 완난류 수리조건인 경우 등가조고를 구하는 식은 개수로 마찰계수 산정식 (10)에 수치분석한 절점계수의 값을 대입하여 정리하면 구할 수 있으며 다음과 같다.

$$k_w = \frac{\rho v_*^2}{\delta_r \sigma} \left[ 0.89 \ln(R_H) + \gamma_i - \frac{k}{\alpha_{HS} \sqrt{C}} \right] \quad (14)$$

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

#### 4. 전난류 산정식

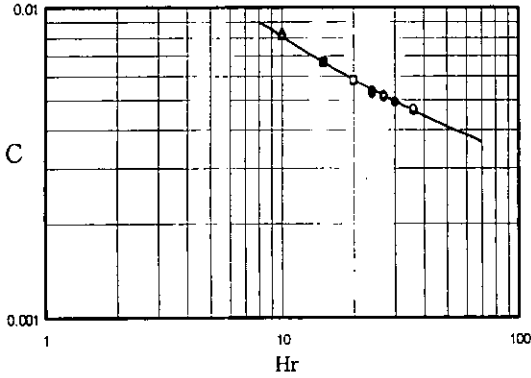
Varwick의 실험자료 중 조고가 2 mm인 자료에서 전난류가 발생하였음을 확인할 수 있으며, 전난류 흐름일 경우도 대수형 마찰계수 산정식을 유도할 수 있다. 전난류인 경우의 개수로 마찰계수 산정식은 다음과 같이 표기된다.

$$\frac{1}{\sqrt{C}} = \frac{\alpha_{HR}}{k} (\ln H_r + \beta_{HR}) \quad (15)$$

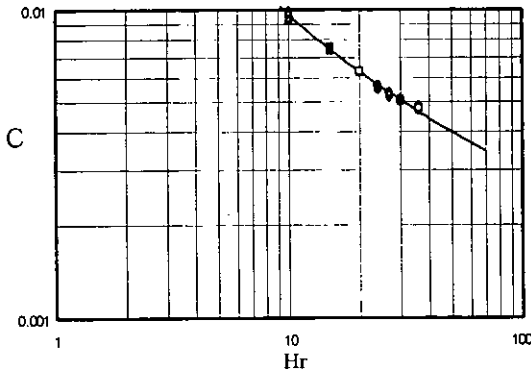
여기서  $H_r = H/k_w$ 이다. Varwick의 삼각형 수로 실험에서 조고가 2 mm인 경우 전난류가 발생하였으며  $\alpha_{HR} = 1.1$ ,  $\beta_{HR} = 1.75$ 로 추정되었다. 또한, 제형 수로에서 전난류 자료를 분석한 결과  $k_w = 2$  mm인 경우  $\alpha_{HR} = 1.4$ ,  $\beta_{HR} = 0.6$ 으로 추정되었다.  $k_w$ 의 기울기를 완난류와 동일하게 가정하면,  $\beta_{HR}$ 의 산정식은 다음과 같다.

$$\beta_{HR} = \gamma_R - \delta_R R_w^2 \quad (16)$$

여기서  $\gamma_R$ 와  $\delta_R$ 는 상수로써 삼각형수로인 경우  $\gamma_R = 4.45$ ,



(a) Triangular channel ( $k_w$  ; 2mm)



(b) Trapezoidal channel ( $k_w$  ; 2mm)

Fig. 3. Comparison between logarithmic equation and laboratory experiments of Varwick (1945) for rough turbulent flow.

$\delta_R = 1.85 \times 10^{-5}$ , 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.

$$z_0 = e^{-\beta} k_w \tag{17}$$

여기서  $e^{-\beta}$ 는 비례상수로서 원형관로에서  $e^{-\beta} = 0.033$ 이며, 개수로인 경우 식 (15)를 식 (5)에 대응하면 다음과 같다.

$$B = \beta_{HR} - \beta \tag{18}$$

전난류 수리조건인 경우 등가조고를 구하는 식은 개수로 마찰계수 산정식 (15)에 수치분석한 절점계수의 값을 대입하여 구하면 다음과 같다.

$$k_w = \frac{\rho v^2}{\delta_R \sigma} \left[ \ln \frac{H}{k_w} + \gamma_R - \frac{k}{\alpha_{HR} \sqrt{C}} \right] \tag{19}$$

여기서  $\gamma_R$ 와  $\delta_R$ 는 각 형상의 절점계수로서 삼각형수로

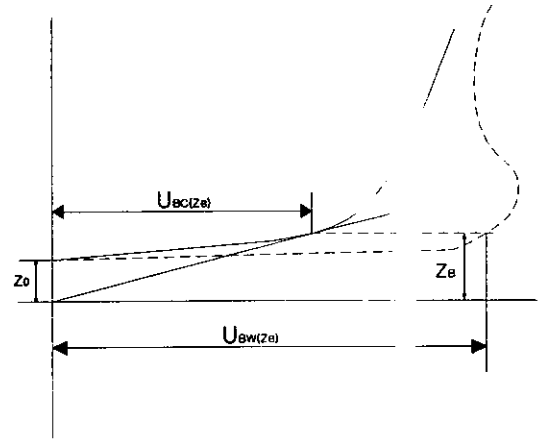


Fig. 4. Comparison between logarithmic velocity distribution of uniform flow and orbital velocity distribution of waves.

인 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 (19)를 사용하여 등가조고를 산정할 경우 반복시산과정이 필요하다.

### 5. 합성류 마찰력(BYO Model)

Bijker(1966, 1967)는 파와 해류에 의한 합성류 마찰력을 계산하기 위하여 대수분포식과 점선으로 만나는 점, 즉 Bijker point에서 파의 유속과 해류의 유속을 합성하는 방법을 개발하였다. Bijker point에서의 해류유속과 파유속의 분포를 나타내면 Fig. 4와 같다. 이후 합성시 난류 확산의 증폭에 따라 해류유속이 감속하는 영향을 고려하고 계산과정에 대두되는 여러 해를 양해법으로 구하는 방안을 강구하는 일련의 논문이 발표된 바 있으며(O'connor and Yoo, 1986; 유, 1994), 평균마찰력 이외에 최대마찰력과 절대치의 평균을 구하는 산정식들도 개발된 바 있다(Yoo, 1989). 이를 BYO 모형이라 일컫는다. 이 모형에 의하여 파도와 해류가 합성할 때 발생하는 해저면마찰력은 일방향 흐름의 마찰력에 증폭계수를 곱하여 구하여지며, 평균 마찰력과 최대마찰력의 산정식은 각각 다음과 같다.

$$\langle \tau \rangle = \beta \tau_c \tag{20}$$

$$\tau_c = \xi \tau_c \tag{21}$$

여기서 일방향흐름에 의한 마찰력  $\tau_c = \rho C_e U^2$ 이며, 해류 마찰계수  $C_e$ 는 절점계수  $B$ 가 조정된 식으로부터 산정

된다. <math>\langle D \rangle</math>는 주기평균 합성류 마찰력, <math>\tau\_c</math>는 최대 합성류 마찰력, <math>\beta</math>와 <math>\xi</math>는 각각 해당 마찰력의 증폭계수이며 산정식은 각각 다음과 같다.

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

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

여기서 상수 <math>\mu\_c = \mu/\alpha</math>, <math>\mu = U\_{Bw}/u\_{Bc}</math>, <math>U\_{Bw}</math>는 Bijker point에서의 최대파유속, <math>u\_{Bc}</math>는 Bijker point에서의 해류유속, <math>\alpha</math>는 해류의 감소율이다.

각 식에 사용되는 해류의 감소율 <math>\alpha</math>는 난류확산계수의 비로서 구하며 합성각 <math>\theta</math>의 영향을 고려하면 다음과 같다.

$$\alpha = (D_c/(D_c^* + \xi D_w^*))^{1/3} \quad (24)$$

즉,

$$\alpha^5 + b\mu\alpha^{5-c} + \xi r\eta\mu^{2+q}\alpha^{3-q} + 0.424\xi\eta\mu^2\alpha^3 - 1 = 0 \quad (25)$$

여기서 <math>D\_c</math>는 해류마찰 에너지손실률, <math>D\_w</math>는 파마찰에너지손실률, <math>\xi = 0.3 + 0.7 \sin\theta</math>, <math>\mu = [1 + \ln(z\_{oc}/z\_{ow})]\mu\_0</math>, <math>\mu\_0 = \xi\eta</math>, <math>\xi = (C\_w/C\_c)^{1/2}</math>, <math>\eta = U\_b/U</math>, <math>C\_w</math>는 파마찰계수, <math>C\_c</math>는 해류마찰계수, <math>U\_b</math>는 해저면에서의 최대파속, <math>U</math>는 해류의 평균유속, 상수들 <math>a, b, r, q</math>는 주기평균치들로서 회귀분석으로부터 약산식으로 구해진다(Yoo, 1989). 파마찰계수 <math>C\_w</math>는 Swart(1974)의 약산식을 약간 수정하여 다음과 같이 산정된다.

$$C_w = \exp\left[5.216 \min\left(0.5, \frac{k_w}{A_p}\right) - 6.67\right] \quad (26)$$

상기식에서 <math>A\_p</math>는 파유동의 해저면 최대행정거리이다.

여러번의 시행착오를 거쳐서 감소율 <math>\alpha</math>를 <math>\eta, \theta, \xi</math>의 함수로 취하는 약산식을 개발하였다(유·이, 1992). 그러나 이 약산식은 경계점 부근에서 불연속성을 나타내고 있으므로 경계점 부근에서 계산의 불안정성을 가져올 수 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 <math>\alpha</math>를 <math>\mu</math>

<math>\theta, \xi</math>의 함수로 취하고 다음과 같은 약산식을 제시하였다.

$$\alpha = (0.08 + (1.9 - 0.6 \theta^{0.25})\xi^{0.35})\mu^{-1} \quad \mu > \mu_c \quad (27)$$

$$\alpha = \tanh\left[A \left(\ln\left(\frac{\mu_c}{\mu}\right)\right)^{1.2} + C\right] \quad \mu > \mu_c \quad (28)$$

여기서 <math>\theta</math>는 해류의 직각방향과 파의 진행방향과 이루는 각도이며,

$$\mu_c = \exp(1.7 + 0.35 \ln \xi) \quad (29)$$

$$A = 0.65 - 0.18\theta^{0.25} - 0.06(1 - 0.6\theta^{0.25})\xi^{0.5} \quad (30)$$

$$C = 0.4 - 0.14 \xi^{0.25} \quad (31)$$

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

$$z_B = z_{Bc} = ez_{oc} \quad (32)$$

식 (32)를 식 (1)에 적용하여 정리하면,

$$U_w = \frac{U_{*w}}{k} \ln \frac{z}{z_{ow}} \quad (33)$$

$$U_w(z_{Bc}) = \frac{U_{*w}}{k} \ln \frac{z_{Bc}}{z_{ow}} = \frac{U_{*w}}{k} \ln \frac{ez_{oc}}{z_{ow}} = \frac{U_{*w}}{k} \left(1 + \ln \frac{z_{oc}}{z_{ow}}\right) \quad (34)$$

한편, <math>z\_{ow} = z\_{oc}</math>일 때 <math>U\_w(z\_{Bc}) = U\_{\*w}/k</math>이므로, <math>\mu = \mu\_0 = (\sqrt{C\_w}U\_b/\sqrt{C\_c}V)</math>이고, <math>z\_{ow} \neq z\_{oc}</math>일 때 <math>\mu = [1 + \ln(z\_{oc}/z\_{ow})]\mu\_0</math>이 된다. 파와 해류의 합성시 두가지 조건을 정리하면 Table 2에 제시된 바와 같다.

Table 2에 도입된 경험계수 <math>A</math>는 파운동에 적용되는 수치이며 <math>B</math>는 해류에 적용되는 수치이다. 각 수치는 완난류 또는 전난류 등 난류조건에 따라 달라질 수 있다.

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

Current flow	Surface waves	Zero velocity points		$\mu/\mu_0$
		$z_{oc}$ (current flow)	$z_{ow}$ (waves)	
Smooth turbulent flow	Rough turbulent flow	$e^{-B} h R_H^{-0.89}$	$e^{-A} k_w$	$1 + A - B + \ln\left(\frac{h}{k_w}\right) - 0.89 \ln R_H$
Rough turbulent flow	Rough turbulent flow	$e^{-B} k_w$	$e^{-A} k_w$	$1 + A - B$

6. 모형의 검증

유 · 이(1991), 유 · 이(1999) 등은 개수로 흐름을 절점과 기울기가 조정되는 새로운 형태의 대수분포식 (5)를 제시하였다. 절점과 기울기의 조정값을 Bazin(1865)의 사각형 수로와 Varwick(1945)의 삼각형과 제형수로에서 관측된 실험자료를 분석하여 완난류 산정식 (10)과 전난류 산정식 (15) 및 등가조고 추정식 (14)와 (19)를 제시하였다. 이와 같이 일방향 흐름의 완난류, 전난류 산정식을 연안수리조건에 적용하기 위하여 3차원 해저면의 실험자료인 Bijker 자료를 이용하여 일방향 대수분포식의 절점과 기울기를 다시 산정하였다. Bijker (1967)의 실험자료들은 폭이 20m 이상이고 최대수심이 0.36m인 광폭수조에서 취득한 자료들로서 Bijker 실험조건은 쇄파대 연안류 발생조건과 유사하다. 그러므로 Bijker(1967)의 잘 제어된 실험자료에 적용하여 산정된 절점과 기울기를 적용한 대수분포식은 연안수리조건에 적용할 수 있을 것이라 판단된다.

Bijker의 실험자료는 BYO 모형을 단계별로 개선시키는 과정에서 여러번 이용한 바 있다(Yoo and O'Connor, 1987; O'Connor and 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. 유 · 이(1992)는 연흔의 형상을 고려하여  $\theta=\pi/6$ 경우의 실험자료에 대한 검증 실시하였는데 전반적으로 계산결과는 관측결과보다 작게 산정되었으며, 이는 계산에서 고려하지 않은 토사 이동에 의한 에너지손실 때문인 것으로 판단하였다. 본고에서는 평균입경 약 25 mm의 자갈을 포설하여 등가조고를 확실하게 산정할 수 있는  $\theta=0$ 에 대하여 모형 검증을 실시하였다.

Bijker는 쇄파대 연안류 발생조건과 유사한 수조조건을 만든 다음 마찰력 산정 실험을 실시하였다. 각 조건에 따라 해류만 흐를 때의 수면기울기  $i_c$ 와 파도와 해류가 동시에 작용할 때의 수면기울기  $i_{wc}$ 를 관측하였다. 이들 관측된 기울기로부터 일방향 흐름의 마찰력  $\tau_c$ 와 합성류 흐름의 평균마찰력  $\langle \tau \rangle$ 는 각기 다음과 같이 계산된다.

$$\tau_c = \rho g h i_c \tag{35}$$

$$\langle \tau \rangle = \rho g h i_{wc} \tag{36}$$

이제까지의 검증에서 실험자료와의 비교는 식 (20)으로

Table 3. The computation result of BYO model with using Bijker's experimental data.

NO.	h	V	H	i <sub>c</sub>	i <sub>wc</sub>	k <sub>B</sub> (Bijker)	k <sub>Y</sub> (ST)	k <sub>Y</sub> (RT)	τ <sub>c</sub>			⟨τ⟩		
									meas.	ST	RT	meas.	ST	RT
	m	m/s	m	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	mm	mm	mm	(N/m <sup>2</sup> )	(N/m <sup>2</sup> )	(N/m <sup>2</sup> )	(N/m <sup>2</sup> )	(N/m <sup>2</sup> )	(N/m <sup>2</sup> )
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 average error (%)									0.01	0.31		8.53	3.97	

Notes) k<sub>B</sub>: roughness height estimated by Bijker  
 k<sub>Y</sub>: roughness height estimated by the present authors

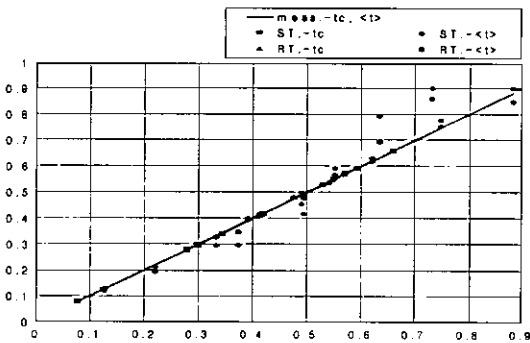


Fig. 5. Computation results of BYO model against Bijker's experimental data.

제시된 증폭계수  $\beta$ 의 산정치와 실험자료에서 기울기의 비  $in_{tc}$ , 즉 관측된 증폭계수에 대하여만 실시하였으며, 마찰력  $\langle \tau \rangle$ 와  $\tau_c$  자체에 대하여는 비교하지 않았다. 이는 일방향 흐름에 의한 마찰력  $\tau_c$ 의 계산결과가 만족스럽지 못한데 큰 이유가 있었으며 본고에서 살펴본 바와 같이 절점계수 B의 조정으로  $\tau_c$ 의 계산에 정확을 기하며, 다음 단계로 합성류 마찰력  $\langle \tau \rangle$ 의 수치를 비교하고자 한다. 또한 합성조건에서는 완난류와 전난류 두 조건 모두를 고려하여 검증하였다.

Bijker(1967)는 파와 해류의 합성류에 의한 마찰력을 연구하고자 고정상 저면과 이동상 저면을 사용하여 수리실험을 수행하였다. 본 연구에서 수정 보완한 BYO 모형을 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 등가조고는 동일한 수치를 적용하게 된다. 그럼에도 불구하고 Bijker는 동일한 수로면에 대하여 18-67 mm의 범위를 가진 매우 다양한 크기의 조고를 제시하고 있다. 이는 전적으로 Manning(Hagen)식의 결합 때문인 것으로 판단된다. Bijker는 평균마찰력을 에너지 경사로부터 산정한 후( $\tau = \rho g h i$ ), Chezy의 평균유속공식  $V = \sqrt{ghi/C}$ 으로부터 마찰계수  $C$ 를 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 (14)를 이용하였으며, 전난류 조건인 경우 식 (19)를 이용하였다. 두 경우 공히 추정된 등가조고는 18.1-30.28 mm의 변이폭을 갖고 있으며 완난류 조건을 택할 경우 평균등가조고는 21.27 mm이고, 전난류 조건을 택할 경우 평균등가조고는 25.79 mm이다. 이상의 추정된 등가조고는 포설된 자갈의 평균입경과 유사한 수치이다.

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 때가 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  $A$ 를 3.4로 가정하였다.

## 5. 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 해저면 유속과 다르리라는 추론은 오래전부터 예상했던 사항이다. 앞으로 식 (34)로 산정된 경계층 유속을 관측자료와 직접 비교해 봄으로써 직접적인 확인 절차가 필요하리라 판단되며 이는 더욱 완벽한 모형개발에 일조를 기할 수 있을 것이다.

새로운 개수로 마찰계수 산정식을 도입하고, 영점높이도 새로이 추정된 Bijker-Yoo-O'Connor 모형의 계산결과를 평균마찰력 산정에 있어 Bijker실험자료와 비교하여 상당히 양호한 정확성을 보였다. 새로 도입된 개수



로 마찰계수 산정식으로 추정된 등가조고는 Bijker가 Strickler-Manning식으로 추정된 수치보다 훨씬 더 현실적으로 적합한 수치인 것으로 판단된다. 그러나 개수로 흐름 상태가 완난류인지 전난류인지는 명확한 판별을 가질 수 없었다.

### 참고문헌

- 유동훈, 1989. 합성류 전단력 계산을 위한 혼합거리 모델, 한국해양·해양공학회지, 1(1): 8-14.
- 유동훈, 1993a. 완난류 개수로 마찰계수, 제35회 수공학 연구발표회 논문집: 49-56.
- 유동훈, 1993b. 전난류에서의 파마찰계수, 한국해양·해양공학회지, 5(2): 51-57.
- 유동훈, 1994. 전난류에서 파랑과 해류의 마찰력, 한국해양·해양공학회지, 6(3): 226-233.
- 유동훈, 이동수, 1992. 이동상 해저면에서의 마찰력, 한국해양·해양공학회지, 4(2): 63-71.
- 유동훈, 이민호, 1999. 대수형 개수로 마찰계수 산정식, 대한토목학회 논문집, 19(II-2): 159-167.
- 유동훈, 이종원, 1997. 사각형 개수로의 완난류 마찰계수, 대한토목학회 논문집, 17(II-2): 441-452.
- Bazin, H.E., 1865. Recherches experimentales sur lecoulement de leau dans les canaux decouverts, Memories presentes par divers savants al Academie des Sciences, Paris, 19.
- Bazin, H.E., 1897. A new formula for the calculation of discharge in open channels, *Memore No. 41*, Annales des ponts et chaussées, 14(7), pp. 20-70.
- Bijker, E.W., 1966. The increase of bed shear in a current due to wave motion, *Proc. 10th Costal Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 746-765.
- Bijker, E.W., 1967. Some consideration about scales for costal models with movable bed, *Publ. No. 50*, Delft Hydraulics Lab.
- Kazemipour, A.K. and Apelt, C.J., 1979. Shape effects on resistance to uniform flow in open channels, *J. Hydr. Res.*, IAHR, 17(2), pp. 129-147.
- Manning, R., 1889. On the flow of water in open channels and pipes, *Trans. Ins. of Civil Engineers of Irland*, 20, pp. 161-195.
- O'Connor, B.A. and Yoo, D., 1988. Mean bed friction of combined wave-current flow, *Coastal Engrg.*, 12, pp. 1-21.
- Swart, D.H., 1974. Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles, *Publ. No. 131*, Delft Hydraulics Lab.
- Tracy, H.J. and Lester, C.M., 1961. Resistance coefficient and velocity distribution; smooth rectangular channel, U.S. Geological Survey, Water-Supply Paper 1592-A.
- Varwick, F., 1945. Zur Fließformel für offene Kunstliche Gerinne, These inedite, Dresden Univ.
- Yoo, D., 1989. Explicit modelling of bottom friction in combined wave-current flow, *Coastal Engrg.*, 13, pp. 325-340.
- Yoo, D. and O'Connor, B.A., 1987. Bed friction model of wave-current interacted flow, *Proc. Spec. Conf. Coastal Hydrod.*, ASCE, pp. 93-106.

Received May 4, 2000

Accepted August 22, 2000