

연직 유공벽의 수두손실 결정을 위한 수치해석 Numerical Analysis on the Determination of Head Loss by Perforated Vertical Walls

전인식* · 이성엽* · 박경수** · 안동근**

Insik Chun*, Seongyeop Lee*, Kyungsoo Park** and Dongkeun An**

요 지 : 흐름이 연직유공벽을 통과할 때 발생하는 수두손실을 수치해석과 수리실험을 통하여 고찰하였다. 수치해석에 대해서는 유공벽 전후의 검사체적에 연속방정식, 모멘텀 방정식, 그리고 에너지 방정식을 적용하였으며 주어진 하류 쪽 수심과 유속에 대하여 상류 쪽 수심 및 유공벽 수두손실을 계산할 수 있는 무차원 관계식을 유도하였다. 수리실험은 단일유공판과 삼중유공판에 대하여 각각 수행하였다. 단일유공판에 대한 계산결과와 실험결과를 비교하여 유공부 오리피스에서 연직 선형 제트류의 수축계수가 개구율뿐만 아니라 하류 쪽 Froude 수에도 의존함을 밝혔으며, 실험결과에 근거하여 수두손실을 계산하기 위한 실험식을 제시하였다. 단일유공판의 실험식을 삼중유공판에 대하여 하류에서 상류 쪽으로 축차적으로 적용한 결과, 예측치와 실험결과가 대체적으로 잘 일치함을 확인하였다.

핵심용어 : 연직유공벽, 수두손실, Froude 수, 선형 제트류, 개구율, 오리피스, 수축계수

Abstract : A numerical analysis and hydraulic experiments were undertaken to investigate the head loss occurring when a flow passes through vertical perforated walls. The numerical analysis applied continuity, momentum and energy equations to the control volumes that were set near the perforated wall. Non-dimensional equations were then derived to calculate both upstream depth and head loss for the given values of downstream depth and velocity. The hydraulic experiments were performed with several single and triple perforated plates varying their opening ratios and intervals. The numerical results with the single plates were compared with the experimental results, and it was shown that the contraction coefficient of the vertical line jet formed after the perforated plates relies on downstream Froude number as well as opening ratio. Based on the experimental results, empirical formulas were formulated. Finally, the formulas were applied to the triple plates sequentially from downstream side to upstream side, and it was found that in general the predicted values nicely agreed with the experimental results.

Keywords : vertical perforated wall, head loss, Froude number, line jet, opening ratio, orifice, contraction coefficient

1. 서 론

연직유공벽은 임의 폭의 연직 슬릿과 두께가 폭에 비해 매우 작은 불투과벽이 교차되어 있는 투과성 구조물을 의미하며 주로 개수로 또는 펌프 유입구에서 흐름에 포함되어 있는 부유물질을 제거하기 위하여 사용되어 왔

다. 최근에는 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 유공벽을 다중 직렬 설치하여 소파기능과 통수기능을 동시에 발휘할 수 있는 방파제로도 사용하고 있다(Rusten and Greiner, 1998; 박 등, 2004). 이와 같은 방파체의 통수기능은 조류 및 해류의 소통을 가능케 하며 항내 수질을 개선함으로써 항만의 친수성을 제고하는 중요한 역할을 담당한다. 향후 이

*건국대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Konkuk University, 1 Hwayang-dong, Kwangjin-ku, Seoul, Korea 143-701. ischun@konkuk.ac.kr)

**POSCO건설 기술연구소(Civil & Environmental Tech. Research Team, Research & Engineering Div., POSCO Engineering & Construction Co., Ltd.)



Fig. 1. Breakwater with perforated vertical wall.

와 같은 투과성 방파제의 건설이 국내·외적으로 계속 증가할 것으로 예상된다.

기존의 흐름에 투과성 유공벽을 도입하면 흐름의 유공부 통과 시 발생하는 마찰 및 와류에 의하여 수두손실에 따른 수위차가 발생하게 된다. 실제 국내의 서·남해안에서 1m/s 이상의 최강유속을 갖는 지점들이 다수 존재하며 조류 통과 시 일시적이거나 투과성 구조물 전후에 수위차가 발생할 수 있다. 이와 같은 수두손실 및 수위차는 항내·외 해수유동에 영향을 미치며 또한 유공벽 자체에 힘을 가하기 때문에 유공벽 설계 시 면밀히 검토할 필요가 있다.

임의 제원을 갖는 연직유공벽의 통수능력을 결정하기 위해서는 유공벽에 발생하는 수두손실을 결정하는 것이 매우 중요하다. 그러나, 투과성 유공벽의 통수성 및 수두손실에 대한 체계적인 연구는 국내·외적으로 매우 희소하다. 1980년대 이전에 개수로에 설치된 스크린에서의 수두손실을 계산하기 위한 이론 및 실험적 연구들이 드물게 수행된 바 있다(Kirschmer, 1925; Laws and Livesey, 1978; Stefan and Fu, 1978). 가장 가까이는 Yeh and Shrestha (1989)가 스크린 전후에 모멘텀 방정식과 에너지 방정식을 적용하여 수두손실을 계산하기 위한 이론식을 제안하였으며 실험결과와 비교하였다. 그러나, 이 연구들에서 취급한 스크린은 기본적으로 양식시설에서 어류의 이동을 통제하기 위한 구조물로서 직경이 비교적 작은 와이어 또는 강봉으로 구성되어 있다. 그 외에 Yamell(1934)과 Al-Nassri (1994) 등이 강에 설치된 교각의 단면형상과 배후에 형성되는 backwater의 관계를 규명하기 위하여 실험적 연구들을 수행한 바 있으나 본 유공벽과 같이 두께가 비교적 얇은 형태의 구조물에 대한 통수성 및 수두손실에 대한 연구결과는 수행된 적이 없었다.

본 연구에서는 직사각형 단면을 갖는 연직 유공벽의 수두손실을 결정하기 위한 수치해석기법을 전개하였다. 여러 다른 제원을 갖는 유공벽에 대하여 수리실험을 수행하였으며 수치해석결과와 비교하였다.

2. 수두손실에 대한 수치해석

2.1 수리특성

연직 유공벽의 대칭구간 일부를 Fig. 2에 도시하였다. 그림에서 b 는 유공벽 볼투과 부분의 폭(흐름 직각방향)을, s 는 흐름방향의 두께를 의미한다. 그림에서 점 ①과 점 ③은 유공벽의 상, 하류부에 각각 위치하며 점 ②는 유공부에, 그리고 점 ④는 vena contracta에 위치한다. h_1 , h_c , h_3 는 점 ①, ④와 점 ③에서의 수심을 w , w_2 와 w_c 는 대칭구간 흐름의 폭을 의미하며 U 는 수심평균유속을 의미한다. 검사체적 표면은 쇄선으로 표시하였다.

흐름이 유공부를 통과하면서 유속은 점 ④에서 최대가 되며 그 하류에서는 와류형성에 따른 에너지 손실이 발생한다. 유공벽을 통과하면서 발생하는 수심변화를 파악하기 위해서는 다음과 같은 비에너지의 변화에 대한 고찰이 필요하다. 점 ①에서의 단위 폭 당 유량 q_1 과 점 ②에서의 단위 폭 당 q_2 에 대한 비에너지 곡선은 Fig. 3과 같다.

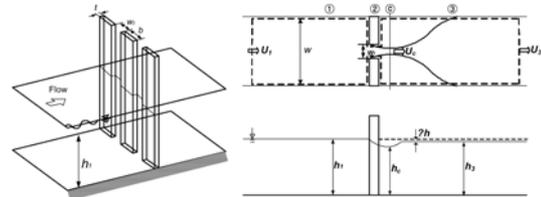


Fig. 2. Array of vertical perforated walls and dimensions.

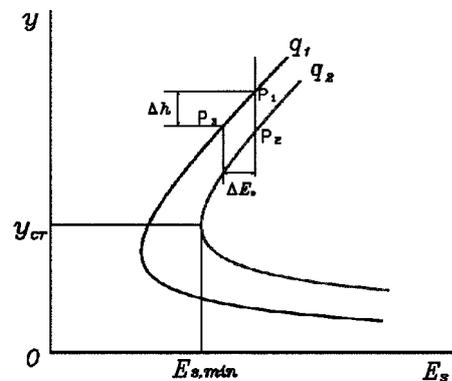


Fig. 3. Non-choke condition.

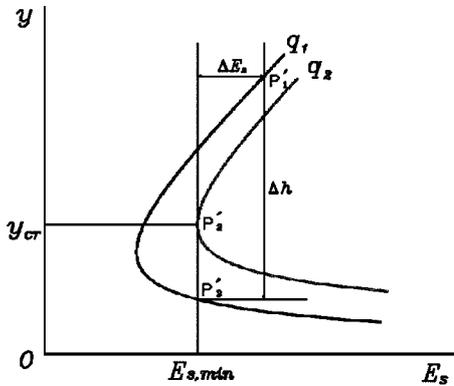


Fig. 4. Choke condition.

점 ①에서의 흐름을 상류(subcritical flow)라고 가정할 때, 점 ②에서 비에너지는 점 P₁에서 점 P₂로 이동하며 유공부 통과 후 비에너지 곡선은 점 ③에서 다시 곡선 q₁으로 회귀하여 점 P₃에 이르게 된다. 점 ①과 ③사이의 에너지 손실은 ΔE_s와 같으며 수심의 차는 Δh = h₁ - h₃가 된다. 그러나, ΔE_s가 과대하여 가용한 비에너지가 q₂의 최소 비에너지 E_{s,min}보다도 작게 되면 소위 병목현상(choke)이 발생하며 상류 수심 h₁이 증가 된다(Henderson, 1966). 병목현상이 발생할 경우, 상류에서의 유량이 일정하다고 가정하면, Fig. 4에서 알 수 있듯이 점 ①에서의 비에너지는 P₁에서 P₁'로 이동하게 되며 유공부 통과 시 q₂에서의 한계수심을 지나 점 P₃'에 이르게 된다. 따라서, 점 ③에서의 흐름은 사류형태가 되며 하류 쪽 흐름이 상류일 경우 도수가 발생하게 된다. 이 경우에도 h₃은 h₁보다 작게 된다. 만약, 점 ①에서의 흐름이 사류라면 수심 변화는 반대로 나타난다.

병목현상의 발생은 유공부에서의 에너지 손실이 클수록 잘 발생하며, 병목현상이 발생하기 위한 임계조건을 다음과 같이 구할 수 있다. 점 ②와 ③ 사이에 연속방정식과 모멘텀 방정식을 적용하면 각각

$$wh_3U_3 = w_2h_2U_2 \tag{1}$$

$$\frac{1}{2}\rho g(w_2h_2^2 - wh_3^2) = \rho(wh_3U_3^2 - w_2h_2U_2^2) \tag{2}$$

와 같다. 점 ②에서의 한계류 조건 h₂ = h_{cr} = (q₂²/g)^{1/3}을 식 (1), (2)에 대입하고 U₂를 소거하면 다음 식을 얻을 수 있다. 여기서, q₂ = U₂h₂이다.

$$\beta = \frac{w_2}{w} = Fr_3 \left(\frac{3Fr_3}{1 + 2Fr_3^2} \right)^3 \tag{3}$$

여기서, Fr₃ = U₃/√gh₃는 점 ③에서의 Froude수이다. 주어진 h₃, U₃에 대하여 개구율이 상기 식 (3)의 β보다 작으면 병목현상이 발생한다.

2.2 수두손실의 결정

Fig. 2의 각 지점간의 유량은 연속방정식에 의하여

$$U_1w_1h_1 = U_2w_2h_2 = U_cw_ch_c = U_3wh_3 \tag{4}$$

가 된다. 여기서, w_c는 수축계수(contraction coefficient) C_c를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$w_c = C_cw_2 = C_c\beta w \tag{5}$$

한편, C_c는 일반적인 오리피스 유출계수 C_d를 사용하여

$$C_c = C_d/C_v = (0.6 + 0.4\beta^3)/C_v \tag{6}$$

와 같이 개구율 β의 함수형태로 나타낼 수 있다(Mei, 1983). 여기서, C_v는 vena contracta 이전에 발생하는 수두손실을 반영하는 속도계수로서 일반적으로 0.95 이상의 값을 갖는다. 사실 상, 유공벽의 두께, 모서리의 형상 등도 C_d 또는 C_c에 영향을 미치나 그 효과가 미미하다고 보고 본 연구에서는 무시하였다.

점 ①과 ③사이의 수심 차 Δh = h₁ - h₃는 다음과 같은 근사적인 방법을 통하여 구할 수 있다. 점 ②에서의 수심이 h_c로 폭 w에 걸쳐 균일하다고 가정하면, 점 ②와 ③사이의 모멘텀 방정식은

$$\frac{1}{2}\rho(wh_c^2 - wh_3^2) = \rho(wh_3U_3^2 - w_ch_cU_c^2) \tag{7}$$

이다. 식 (4)와 식 (7)을 조합하면 다음과 같은 무차원 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{2}[(h_c/h_3)^2 - 1] = Fr_3^2 \left[1 - \frac{1}{C_c\beta(h_c/h_3)} \right] \tag{8}$$

결국, h_c/h₃는 Froude 수 Fr₃와 개구율 β의 함수이다.

점 ①과 ②사이의 에너지 손실을 무시하고 Bernoulli 방정식을 적용하면,

$$\frac{1}{2}(U_c^2 - U_1^2) + g(h_c - h_1) = 0 \tag{9}$$

이며 식 (4)를 이용하여 U₁과 U_c를 소거하면, h₃/h₁과 β, h_c/h₃, Fr₃ 간의 무차원 관계식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{C_c \beta h_c / h_3} \right)^2 - (h_3 / h_1) \right] + \frac{h_c / h_3}{Fr_3^2} - \frac{1}{Fr_3^2 (h_3 / h_1)} = 0 \quad (10)$$

식 (10)에서 h_3/h_1 은 결국 β 와 Fr_3 의 함수임을 알 수 있다. 주어진 h_3, U_3, β 에 대해서 식 (8)을 이용하여 h_c/h_3 을 구하고 이를 다시 식 (10)에 대입하여 수심 비 h_3/h_1 을 구하면 된다. 수심 차 $\Delta h = h_1 - h_3$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta h / h_3 = \frac{1}{(h_3 / h_1)} - 1 \quad (11)$$

점 ①과 ③사이에서 발생하는 수두손실 h_L 은 다음의 에너지 방정식을 이용하여 구할 수 있다.

$$h_1 + \frac{U_1^2}{2g} = h_3 + \frac{U_3^2}{2g} + h_L \quad (12)$$

이 식을 무차원화하면

$$\frac{h_L}{h_3} = \left(\frac{h_1}{h_3} - 1 \right) + \frac{1}{2} Fr_3^2 \left[\left(\frac{h_3}{h_1} \right)^2 - 1 \right] \quad (13)$$

와 같다. h_3/h_1 이 Fr_3 와 β 의 함수이므로 결국 h_L/h_3 도 이들의 함수이다.

한편, Kirschmer(1925)는 개수로에 설치된 스크린에 의하여 발생하는 수두손실을 계산하기 위한 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$h_L = K_s \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right)^{4/3} \frac{U_1^2}{2g} \quad (14)$$

여기서, K_s 는 일종의 실험계수이며 단면이 직사각형인 스크린 망(mesh)은 $K_s = 2.42$ 의 값을 갖는다. 이 식에서 U_1 을 연속방정식을 이용하여 U_3 로 변환한 다음 무차원화하면,

$$\frac{h_L}{h_3} = \frac{1}{2} K_s \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right)^{4/3} \left(\frac{h_3}{h_1} \right)^2 Fr_3^2 \quad (15)$$

와 같다. 주어진 h_3 와 U_3 에 대하여 이 식과 식 (13)을 연립하

여 풀면 $\Delta h/h_3$ 및 h_L/h_3 을 구할 수 있다.

Yeh and Shrestha(1989)는 점 ①, ③ 사이에 에너지방정식과 운동방정식을 적용하여 손실수두를 결정하기 위한 다음 식을 제안하였다.

$$h_L = k \frac{q^2}{2gh_1^2} \quad (16)$$

여기서, q = 단위 폭 당 유량

$$k = \frac{Z^3 + (1-4\gamma)Z^2 + 3Z - 1}{Z^2(Z+1)}$$

$$Z = \frac{h_3}{h_1}$$

$$\gamma = \frac{1}{2} + \frac{1}{C} \left(1 - \frac{1}{2C} \right)$$

$$C = C_c \beta$$

식 (16)에 $q = U_3 h_3$ 을 대입하고 무차원화하면,

$$\frac{h_L}{h_3} = \frac{1}{2} k \left(\frac{h_3}{h_1} \right)^2 Fr_3^2 \quad (17)$$

와 같다. 이 식과 식 (13)을 연립하여 풀면, $\Delta h/h_3$ 및 h_L/h_3 을 구할 수 있다.

한편, 유공부의 불투과 벽에 가해지는 힘 F_D 는 점 ①과 ③ 사이에 모멘텀 방정식을 적용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{1}{2} \rho g w (h_1^2 - h_3^2) - F_D = \rho w (U_3^2 h_3 - U_1^2 h_1) \quad (18)$$

와 같다. 식 (18)을 무차원식으로 나타내면,

$$\frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho g w h_3} = \frac{1}{\alpha Fr_3^2} \left\{ \frac{\Delta h}{h_3} \left(2 + \frac{\Delta h}{h_3} \right) \right\} - \frac{2}{\alpha} \left(\frac{\frac{\Delta h}{h_3}}{1 + \frac{\Delta h}{h_3}} \right) \quad (19)$$

와 같다. 먼저 $\Delta h/h_3$ 을 구하고 이를 식 (19)에 대입함으로써 F_D 를 구할 수 있다. 여기서, $\alpha = b/w$ 이며, b 는 유공벽에서 불투

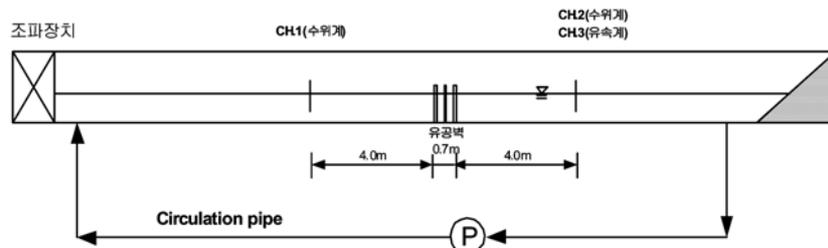


Fig. 5. Wave-current flume.

과 부분의 폭을 의미한다(Fig. 2참조).

3. 수리실험

통수성 실험을 위해서 한국해양연구원의 파랑·흐름 복합수조(52.5 mL×1.0 mW×1.25 mH)를 이용하였다. 본 수조는 Fig. 5와 같이 회류장치가 부착되어 있어 일방향성 흐름을 발생시킬 수 있다.

수리실험은 Fig. 6과 Table 1에서 보이는 바와 같이 총 4 종류(P1, P2, P3, P4)의 유공판을 각각 단일 설치한 경우와 유공판을 P124와 같이 삼중 조합한 경우에 대해서 수행하였다. P124에서 유공판 간의 간격은 Table 2와 같이 정하였다.

모든 실험에서 수심은 0.52 m로 유지하였으며 유속은 하류에서 $Fr_3 < 0.2$ 의 상류(subcritical flow)가 발생하도록 시행착오를 거쳐 5~25 cm/s로 정하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 각각 단일유공판과 삼중유공판의 실험장면이다.

계측은 Fig. 5가 보이는 바와 같이 구조물 상류와 하류에 용량식 수위계를, 그리고 하류에 초음파식 유속계를 각각 설치하였다. 유속과 수위는 회류장치의 가동 이후 흐름이 안정된 후 계측을 시작하였다. 유속은 유속계를 동일위치에서 4 또는 5점 연속 이동시키면서 계측하였고, 수위와 유속은 각각 10 Hz로 120초 동안 독취하였다. 수위

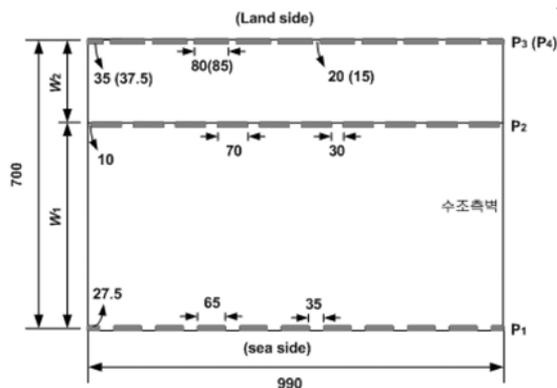


Fig. 6. Plane layout of perforated plates (unit : mm).

Table 1. Dimensions of perforated plates

Dimensions	wall 1 (P1)	wall 2 (P2)	wall 3 (P3)	wall 4 (P4)
width of nonporous part b (mm)	65	70	80	20
gap w_2 (mm)	35	30	20	15
thickness t (mm)	5	5	5	5
pore ratio ($\beta = w_2/w$)	0.35	0.30	0.20	0.15

Table 2. Separations of perforated plates (P124)

Case	Width	
	W_1 (cm)	W_2 (cm)
B1	35	35
B4	65	5



Fig. 7. Experiment with single perforated plate.

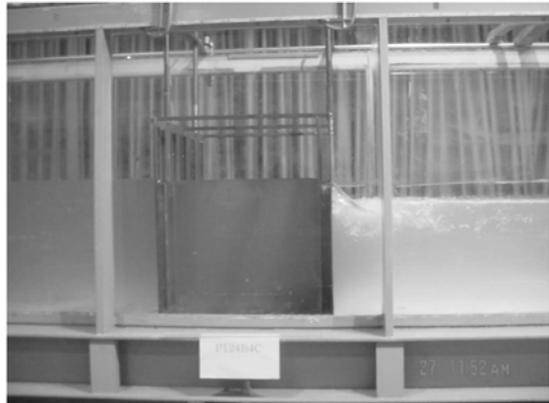


Fig. 8. Experiment with triple perforated plates.

는 시간평균 값을 산출하였으며, 유속에 대해서는 연직 위치별 유속을 시간평균 한 뒤 연직 적분하여 수심평균 유속을 산출하였다.

4. 결과 및 분석

4.1 단일유공판

단일유공판의 수리실험 결과(h_1, h_3, U_3)와 식 (8), (10), (13)에 의한 수두손실 h_L/h_3 을 계산하여($C_v = 1.0$ 으로 가정) 그 결과를 Table 3에 제시하였다.

Fig. 9~Fig. 12는 본 수치해석기법(Theory로 표기), 그리고 Kirschmer(1925)의 식 (14)와 Yeh and Shrestha (1989)의 식 (16)을 각각 적용하여 수두손실을 구하고 Table 3의 실험결과와 비교한 것이다. Fr_3 가 비교적 작을 때는 이들 결과들이 잘 일치하나 Fr_3 가 증가할수록, 그리고 β 가 감소할수록 결과들 사이의 차이가 증가함을 볼 수 있다. 모든 β 값에서 Kirschmer의 값은 실험치보다 작게, 그리고 Yeh and Shrestha의 값은 실험치와 매우 근사하나 약간 크게 나타나 있다. 본 수치해석결과는 실험치 및 타 결과들에 비하여 현저히 큰 값을 보이고 있다.

실험결과에 근거하여 h_L/h_3 에 대한 회귀분석결과를 Fig. 13~Fig. 14에 도시하였다. Fig. 13은 3변수 회귀분석을 한 반면, Fig. 14는 회귀분석식의 기저함수를 Fr_3^2 로 취한 것이다. 후자의 회귀분석식은 속도제곱의 함수형태이기 때문에 일반적인 속도자승항으로 표현되는 수두손실에 잘 부합된다. 각각의 실험식은 다음과 같다.

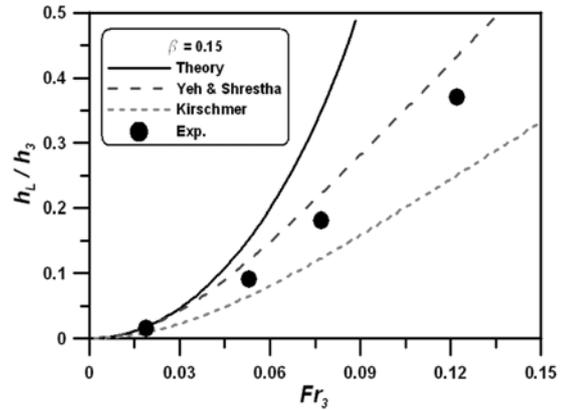


Fig. 9. h_L/h_3 와 Fr_3 의 관계($\beta = 0.15$).

정확식:

$$\frac{h_L}{h_3} = 0.55 Fr_3^{1.634} \beta^{-1.607} \quad (20)$$

근사식(기저함수 Fr_3^2):

$$\frac{h_L}{h_3} = (106.84 e^{-10.49\beta} + 3.63) Fr_3^2 \quad (21)$$

Fig. 9~Fig. 12에서의 수치해석결과와 실험결과 간 차이를 완화시키기 위하여 다음과 같은 일차적인 시도를 하였다. 점 ©에서 vena contracta 에서의 수면은 다소 저

Table 3. Experimental results (single plates)

유공판	h_1 (m)	h_3 (m)	U_3 (m/s)	Fr_3	h_L/h_3
P1 ($\beta = 0.35$)	0.521	0.518	0.0504	0.022	0.006
	0.522	0.515	0.0968	0.043	0.014
	0.525	0.508	0.1582	0.071	0.033
	0.527	0.501	0.2015	0.091	0.052
	0.532	0.493	0.2539	0.116	0.079
P2 ($\beta = 0.30$)	0.519	0.516	0.0497	0.022	0.006
	0.52	0.508	0.1057	0.047	0.024
	0.524	0.498	0.1594	0.072	0.052
	0.532	0.483	0.2254	0.104	0.101
	0.539	0.469	0.2904	0.135	0.149
P3 ($\beta = 0.20$)	0.523	0.517	0.0488	0.022	0.012
	0.529	0.506	0.1001	0.045	0.045
	0.539	0.488	0.1545	0.071	0.105
	0.560	0.443	0.2672	0.128	0.264
	0.572	0.418	0.3284	0.162	0.368
P4 ($\beta = 0.15$)	0.523	0.515	0.0420	0.019	0.016
	0.534	0.489	0.1158	0.053	0.092
	0.547	0.463	0.1639	0.077	0.181
	0.570	0.416	0.2466	0.122	0.370

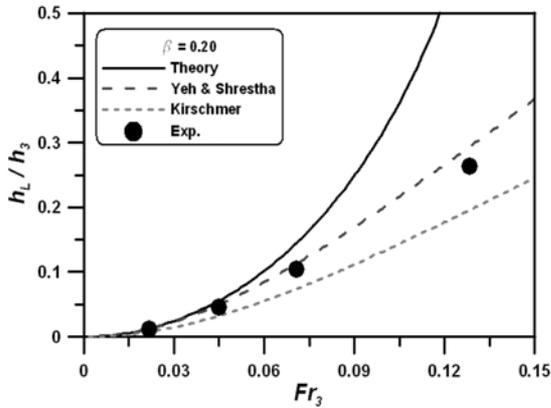


Fig. 10. h_L/h_3 와 Fr_3 의 관계($\beta=0.20$).

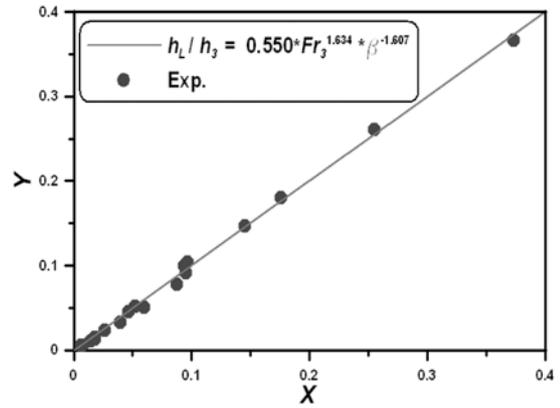


Fig. 13. 회귀분석결과 (정확식).

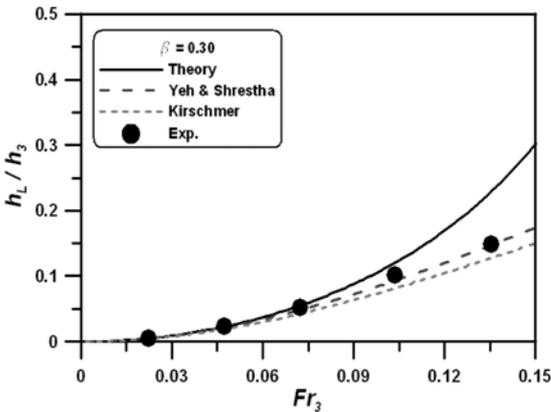


Fig. 11. h_L/h_3 와 Fr_3 의 관계($\beta=0.30$).

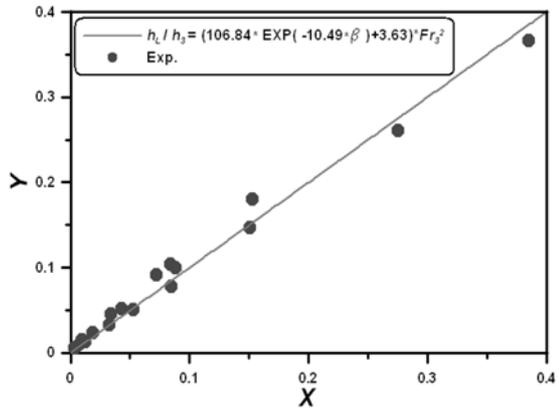


Fig. 14. 회귀분석결과 (근사식).

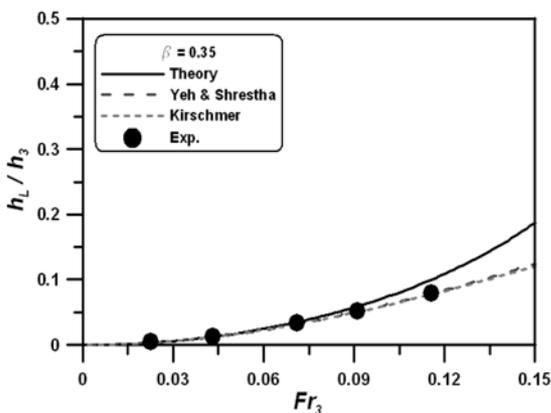


Fig. 12. h_L/h_3 와 Fr_3 의 관계($\beta=0.35$).

하되나 그 외는 수심 h_3 와 거의 같다고 가정하고 점 ㉔와 점 ㉓ 사이에 모델된 방정식을 적용하면

$$\frac{1}{2}\rho g \{ (w-w_c)h_3^2 + w_c h_c^2 - w h_3^2 \} = \rho (w h_3 u_3^2 - w_c h_c u_c^2) \quad (22)$$

와 같으며, 이 식을 무차원 관계식으로 나타내면,

$$\frac{1}{2} \left[\left(\frac{h_c}{h_3} \right)^2 - 1 \right] = Fr_3^2 \left[\frac{1}{C_c \beta} - \frac{1}{h_c/h_3} \right] \quad (23)$$

와 같다. 일반적인 문헌들에서 수축계수 C_c 는 삼차원적 원형 오리피스 흐름에 대한 값들이 제시되어 있다. 그러나, 본 연구에서 대상으로 하고 있는 연직 유공판 통과 제트류는 일종의 선형 제트류(line jet 또는 slot jet)로서 원형 제트류의 경우보다는 vena contracta에서의 축소정도가 다소 작다고 볼 수 있다. 따라서, 일차적인 시도로서 선형 제트류에서의 C_c 는 식 (6)의 제곱근의 형태로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_c = [(0.6 + 0.4\beta^3)/C_v]^{0.5} \quad (24)$$

한편, 미소하나마 점 ①과 ③ 사이에 발생하는 수두손실을 고려한 에너지 방정식은 속도계수 C_v 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있으며,

$$\frac{1}{2} \left[\left(\frac{u_c}{C_v} \right)^2 - u_1^2 \right] + g(h_c - h_1) = 0 \quad (25)$$

이 식을 무차원 관계식으로 정리하면,

$$\frac{1}{2} \left[\frac{1}{C_v^2} \left(\frac{1}{C_c \beta} \right)^2 \left(\frac{h_3}{h_c} \right)^2 - \left(\frac{h_3}{h_1} \right)^2 \right] + \frac{1}{Fr_3^2 (h_3/h_c)} - \frac{1}{Fr_3^2 (h_3/h_1)} = 0 \quad (26)$$

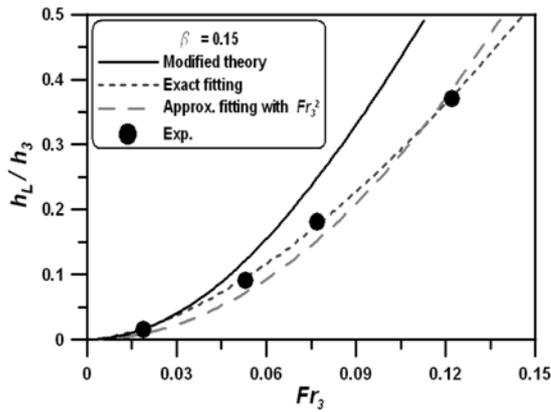


Fig. 15. Head loss by modified theory and regressive formulas ($\beta = 0.15$).

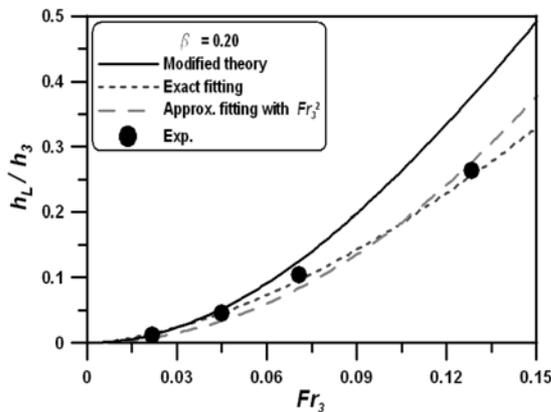


Fig. 16. Head loss by modified theory and regressive formulas ($\beta = 0.20$).

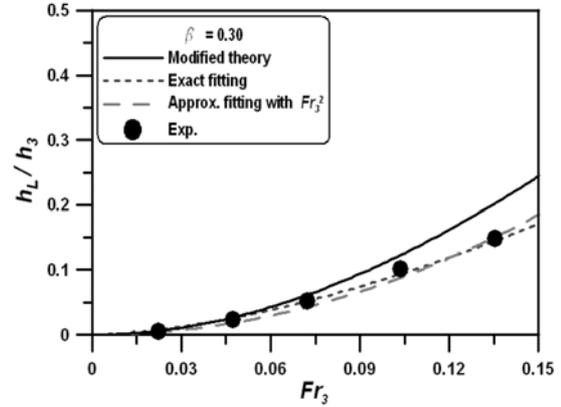


Fig. 17. Head loss by modified theory and regressive formulas ($\beta = 0.30$).

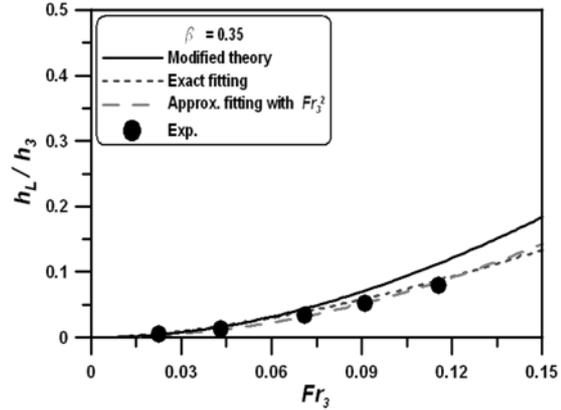


Fig. 18. Head loss by modified theory and regressive formulas ($\beta = 0.35$).

와 같다.

식 (13), (23), (26)을 이용하여 수두손실(C_v 는 0.97을 사용)을 구하고 회귀분석 식 (20)과 (21)에 의한 결과와 함께 Fig. 15~Fig. 18에 도시하였다(Modified theory로 표시). Fig. 9~Fig. 12의 이론적 결과보다는 Fr_3 의 증가에 따른 손실수두의 상승폭이 대폭 완화되었으나 여전히 Fr_3 가 클수록 실험치와의 차이가 크게 발생한다. 한편, 회귀분석식들의 결과는 전반적으로 실험치와 잘 일치함을 알 수 있다.

이론적인 예측치가 실험치에서 크게 벗어나는 것은 식 (24)에서 C_c 값을 Fr_3 의 값에 상관없이 일률적으로 조정하면서 비롯된 것으로 보인다. 일반적인 문헌들에서는 대부분 접근 유속에 관계없이 오리피스스의 단면적 비 및 형상에 따라 단일 C_c 값들이 제공되어 있다. 그러나, vena contracta에

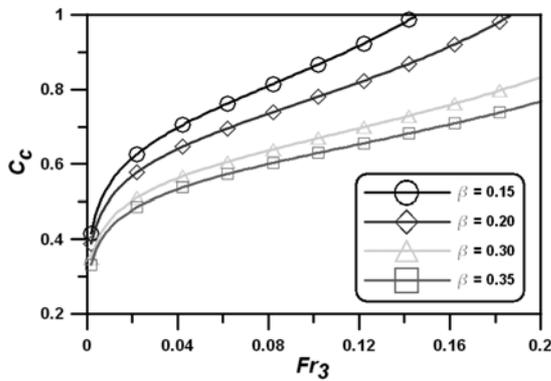


Fig. 19. Variations of C_c versus Fr_3 and β .

서의 유선 축소가 상류에서의 수렴 유선의 관성에 의하여 발생함을 상기하면 접근유속에 따라서 수축계수가 충분히 바뀔 수 있다.

실험식 (20)을 이용하여 주어진 Fr_3 과 β 에 대하여 h_L/h_3 의 값을 구하고 이 값을 식 (8), (10), (13)에 대입하여 역으로 C_c 를 구해보았다. Fig. 19는 계산된 C_c - Fr_3 - β 의 관계를 보여준다. C_c 는 고정된 값이 아니라 이와 같이 Fr_3 의 값에 따라서 큰 변화를 보인다. 즉, Fr_3 이 증가하면 또는 접근 유속이 증가하면 C_c 값이 증가하며, 개구율이 작을수록 증가폭이 커진다. 또한, 식 (6)과는 달리 개구율의 증가에 따라 수축계수가 오히려 감소한다. 이와 같은 결과들은 예상과 매우 다른 현상들로서 유공판의 연속 배치에 따른 인접 체트류간의 상호 간섭, 유공벽 직 하류에서의 폭포 현상(Fig. 7과 Fig. 8참조) 등을 포함하는 삼차원 효과로 인하여 발생한 것으로 보인다. 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4.2 삼중유공판

삼중유공판은 단일유공판과는 달리 유공판 간의 간섭 효과가 있다. 특히, 유공판들이 매우 근접해 있을 경우에

는 vena contracta의 형성이 영향을 받게 되며 결과적으로 수두손실이 달라질 수 있다. 유공판간의 간격 W_1 , W_2 를 고려하면 삼중유공판의 수두손실을 다음과 같은 함수관계로 나타낼 수 있다.

$$\frac{h_L}{h_3} = f(U_3, h_3, g, W_1, W_2, \beta_1, \beta_2, \beta_3) \quad (27)$$

여기서, h_3 와 U_3 는 각각 삼중유공판 하류부의 수심과 수심평균 유속을 의미한다. 이 식을 무차원화하면,

$$\frac{h_L}{h_3} = f\left(Fr_3, \frac{W_1}{h_3}, \frac{W_2}{W_1}, \beta_1, \beta_2, \beta_3\right) \quad (28)$$

와 같다. 단일유공판과는 달리 유공판 설치간격들에 관련된 무차원변수들이 수두손실에 영향을 미침을 알 수 있다. 그러나, 설치간격들이 상대적으로 클 때에는 유공판간의 간섭효과를 무시하고 단일유공판의 수두손실을 축차적으로 적용하여 삼중유공판 전체의 수두손실을 계산할 수도 있다.

삼중유공판 P124(유공판 P1, P2, P4의 결합)에 대한 실험결과(h_1 , h_3 , U_3)와 그리고 식 (13)에 의하여 h_L/h_3 를 계산하여 Table 4에 제시하였다. 단일유공판(Table 3)의 경우와 마찬가지로 Fr_3 가 증가하면서 h_L/h_3 가 증가함을 볼 수 있다. 더욱이, 같은 Fr_3 에서 단일유공판의 경우보다 현저히 큰 h_L/h_3 를 보인다.

삼중유공벽의 최상류 수심 h_1 과 전체 수두손실 h_L 은 단일유공벽의 실험식 (20)과 (21)를 적용하여 근사적으로 구할 수 있다. 즉, Table 4의 h_3 와 U_3 를 실험식에 입력하여 유공판 3(최하류 유공판)의 수두손실을 구하고 이를 식 (13)에 입력하여 유공판 3의 상류 수심을 구한다. 이 방식을 유공판 3에서 유공판 1까지 반복적으로 적용하면 된다. 이와 같이 h_1 을 구하고 나서 최종적으로 이를 식 (13)에 대입하면 h_L 을 구할 수 있다.

Table 4의 각 조건에 대하여 h_1/h_3 와 h_L/h_3 를 각각 구

Table 4. Experimental results (triple plates)

case	h_1 (m)	h_3 (m)	U_3 (m/s)	Fr_3	W_1/h_3	W_2/W_1	h_1/h_3	h_L/h_3
P124B1	0.522	0.515	0.0389	0.017	0.680	1	1.014	0.014
	0.528	0.502	0.0679	0.031	0.697	1	1.052	0.052
	0.537	0.481	0.1037	0.048	0.728	1	1.116	0.116
	0.554	0.448	0.1569	0.075	0.781	1	1.237	0.236
	0.597	0.363	0.2970	0.157	0.964	1	1.645	0.637
P124B4	0.519	0.511	0.0353	0.016	0.685	0.0769	1.016	0.016
	0.535	0.485	0.0921	0.042	0.722	0.0769	1.103	0.103
	0.556	0.434	0.1605	0.078	0.806	0.0769	1.281	0.280

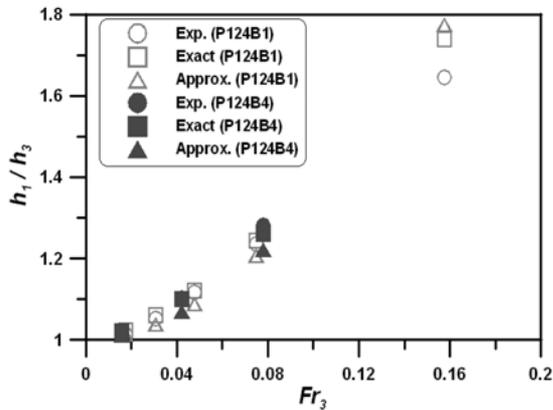


Fig. 20. Depth ratio by the experiment and regressive formulas for triple plates.

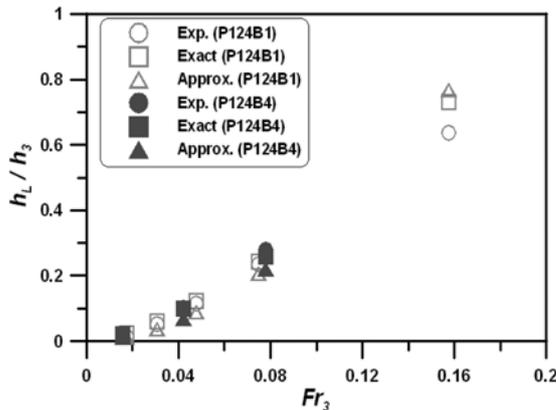


Fig. 21. Head loss by the experiment and regressive formulas for triple plates.

하였으며 유공판 간격조건인 B1과 B2를 구분하여 Fig. 20과 Fig. 21에 도시하였다. Fr_3 가 개략적으로 0.08이하일 때는 계산치와 실험치의 일치정도가 비교적 양호하나 전반적으로 Fr_3 가 증가하면서 계산치가 실험치를 상회하는 것으로 나타나 있다. 유속이 증가하면서 유공판 사이의 상호간섭의 발생정도가 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 동일한 Fr_3 에서 유공판 간격에 따른 결과차이는 매우 미미한 것으로 나타나 있다.

5. 결 론

흐름이 연직유공벽을 통과할 때 발생하는 수두손실을 수치해석과 수리실험을 통하여 고찰하였다. 수치해석에 대해서는 유공벽 전·후에 연속방정식, 모멘텀 방정식, 그리

고 에너지 방정식을 적용하여 하류 쪽 수심과 유속이 주어지면 상류 쪽 수심 및 유공벽 수두손실을 계산할 수 있는 무차원 관계식을 유도하였다. 수리실험은 단일유공벽과 삼중유공벽의 각각에 대해서 수행하였으며 그 결과를 수치해석기법의 검증 및 개선에 이용하였다. 세부결론은 다음과 같다.

- 수두손실은 세 무차원 변수, 즉 유공벽의 개구율 β , 유공부 오리피스 수축계수 C_c , 그리고 하류 쪽 수심과 유속에 근거한 Froude 수 Fr_3 에 의존하는 것으로 나타났다.
- 수치해석결과와 실험결과를 비교한 결과, 수축계수 C_c 는 β 뿐만 아니라 Fr_3 에도 의존하며 Fr_3 의 증가에 따라 같이 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 예상과는 달리 β 의 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 이는 병렬 제트류의 상호간섭 및 유공벽 직 하류에서의 폭포 효과 등에 기인된 것으로 판단되나 이에 대해서는 추가적인 연구가 요구된다.
- 실험결과를 회귀분석하여 수두손실을 계산하기 위한 실험식을 제시하였다. 실험식은 삼변수 정확식과 그리고 Fr_3^2 을 기저함수로 하는 근사식의 두가지로 제시하였다. 후자는 수두손실을 유속의 자승항으로 표현하는 일반적인 관행을 따른 것이다.
- 실험식을 삼중유공판의 각 유공판의 하류에서 상류 쪽으로 축차적으로 적용하여 최상류 수심과 유공판 전체의 수두손실을 계산하고 그 결과를 실험결과와 비교하였다. 비교적 작은 Fr_3 의 범위 내에서는 이들의 일치정도가 비교적 양호하나 Fr_3 가 증가하면서 계산치가 실험치를 다소 상회하는 것으로 나타났다. 이는 인접 유공판들 간의 상호간섭에 기인된 것으로 보이나 동일한 Fr_3 에서 유공판들 사이 간격의 차이가 수두손실에 미치는 효과는 매우 미미한 것으로 나타났다.

참고문헌

박구용, 고광오, 손상영, 전찬후(2004). 투수식 소파관을 적용한 돌제 및 파제제 부두 설계 II - 부산항 국제여객 및 해경부두 대안설계(수치 & 수리모형실험 중심으로), 대한토목학회지 52(7), pp. 52-59.

Al-Nassri, S. (1994). Effect of bridge pier shape and contraction coefficient on backwater profile, Hydraulic Engineering 1994, ASCE, pp. 563-568.

Henderson, F.M. (1966). Open channel flow, Macmillan Publishing Co., Inc., pp. 27-49.

Kirschmer, O. (1925). Untersuchungen ueber den Gefaellever-

- Iust an Rechen, Dissertation, Hydraulisches Inst. d. Techn. Hochschule Muenchen, Mitteilungen Heft 1 (in German).
- Laws, E.M. and Livesey, J.L. (1978). Flow through screens, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 10, pp. 247–266.
- Mei, C.C. (1983). *The applied dynamics of ocean surface waves*, John Wiley & Sons, pp. 262–268.
- Rusten, A. and Greiner, T. (1998). Combination breakwater and pier, Naval Station Everett, Ports '98, ASCE, pp. 1277–1286.
- Stefan, H. and Fu, A. (1978). Headloss characteristics of six profile-wire screen panels, Report No. 175, St. Anthony Falls Hydr. Lab., Univ. of Minnesota, Minneapolis, Minn.
- Yarnell, D.L. (1934). Bridge piers as channel obstructions, U.S. Department of Agriculture, Technical Bulletin, pp. 442–451.
- Yeh, H.H. and Shrestha, M. (1989). Free-surface flow through screen, *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(10), pp. 1371–1385.
-

Received January 16, 2007

Accepted May 12, 2007