大 韓 土 木 學 會 論 文 集
第28卷 第5B號・2008年 9月
pp. 449 ~ 458

폭이 넓은 개수로에서의 예연횡월류위어 유량계수 산정

Evaluation of Discharge Coefficients for Sharp Crested Side Weir in Wide Channel

이동섭* · 김창완**
Rhee, Dong Sop · Kim, Chang Wan

Abstract

This study is investigating experimentally the effect of upstream Froude number, weir height, weir length, and main channel width on the discharge coefficient of rectangular sharp crested side-weirs under subcritical flow conditions in a relatively wide rectangular open channel based on the De Marchi discharge coefficient C_M. The effects of four main influential parameters found by dimensional analysis, Fr_1, h/y_1, L/B, and L/y_1 are examined by the flume tests. New estimated equations for the discharge coefficients of sharp-crested side-weir are suggested based on the experimental results. The effect of Fr_1 for the discharge coefficient of sharp crested side weir is decreased in wide open channel and the relative importance of other influential parameters like h/y_1, L/B, and L/y_1 are increased. Also, the experimental results are compared with the results of other studies to extend the applicability of pre-suggested formulas for sharp-crested side-weir discharge coefficient.

Keywords : *sharp crested side-weir, discharge coefficient, dimensional analysis*

요 지

본 연구의 목적은 De Marchi 유량계수 C_M의 개념을 이용하여 상대적으로 폭이 넓은 개수로에서 실험적으로 상류 조건의 직사각형 예연횡월류위어 유량계수에 대한 상류 프루드수, 위어 높이, 위어 길이, 본수로 폭의 영향을 확인하는 것이다. 수로 실험과 차원해석을 통하여 도출된 네 가지 중요 영향 변수, Fr_1, h/y_1, L/B, L/y_1의 영향을 관찰하고, 실험 결과를 바탕으로 새로운 예연횡월류위어 유량계수 산정식을 제안하였다. 분석 결과 폭이 넓은 개수로에서 예연횡월류위어 유량계수에 대한 Fr_1의 영향은 감소하는 것을 확인하였으며, h/y_1, L/B, L/y_1의 중요도가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 기존 연구자들의 실험 자료와 본 연구의 실험 자료를 비교 분석하여 기존 예연횡월류위어 유량계수 산정식의 적용성을 개선하였다.

핵심용어 : 예연횡월류위어, 유량계수, 차원해석

1. 서 론

횡월류위어는 제방이나 수로의 양안에 설치되어 유량을 전환시키거나, 일정 이상의 초과 유량을 월류시켜 배제하는 용도로 사용되는 수리구조물이다. 이러한 횡월류위어는 주로 관개용 수로 및 방수로나 저류지 등 홍수 피해 경감 시설의 유입구에 주로 사용된다. 횡월류위어에서의 월류량은 본류의 수위에 따라 변하며 본류의 수위가 위어 마루고 이상으로 증가하면 월류하기 시작한다. 횡월류위어의 목적은 본류 유량의 일정 부분을 다른 수리 구조물로 전환시키는 것이므로, 횡월류위어의 월류량을 정확히 예측하는 것은 홍수 피해 저감 시설의 홍수 방어 능력을 정확하게 평가하기 위해서 매우 중요하다.

횡월류위어 월류 흐름은 횡월류위어의 제원이 다양하고, 횡월류위어가 설치된 본류의 횡단면이 위어의 설치 지점에 따라 변하기 때문에 이로 인하여 횡월류위어 주변부 흐름의 수리학적인 특성이 변하므로 가장 복잡한 흐름 형태 중의 하나로 알려져 있다. 이러한 횡월류위어 흐름을 해석하는 것은 매우 어려운 것으로 생각되어 왔다. 따라서 지금까지의 연구는 대체로 횡월류위어의 유량계수에 관한 경험식을 개발하는데 집중되었다. De Marchi는 횡월류위어 흐름을 해석하기 위하여 횡월류위어에 대한 공간변화류 방정식을 풀고, 비에너지를 일정하다고 가정하여 변화류 함수(varied flow function)에 근거한 횡월류위어 월류부에서의 본류의 수표면 변화에 대한 해석해를 개발하였으며, 이를 이용하여 유량계수를 산정하였다(Henderson, 1966). De Marchi는 유량계수를 산정하기 위하여 횡월류위어의 길이 방향을 따라 위어의 유량계수가 변하지 않고 일정하다고 가정하였고, 기존 횡월류위어 유량계수 산정식들은 이러한 De Marchi의 가정에 근거하고 있다.

*정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 하천해안연구실 연구원 (E-mail : dsrhee@kict.re.kr)
**정회원 · 한국건설기술연구원 하천해안연구실 책임연구원 (E-mail : cwkim@kict.re.kr)

횡월류위어는 크게 예연횡월류위어(sharp crested side weir)와 광정횡월류위어(broad crested side weir)로 구분할 수 있는데, 그 중에서 예연횡월류위어는 본류의 흐름 조건이 상류인 경우와 사류인 경우에 모두 적용하는 것이 가능하며, 각 흐름 조건에 대하여 고유의 수리적 특성이 변화한다. 하지만 수공학적인 관점에서 볼 때, 예연횡월류위어를 상류 흐름 조건에 적용하는 것이 보다 실용적이며, 또한 본 연구의 경우 폭이 넓은 개수로를 대상으로 연구를 수행하였기 때문에 사류 조건을 구현하지 않고 상류 흐름 조건만을 고려하였다.

지금까지 본류의 흐름 조건이 상류인 예연횡월류위어에 대해서는 많은 연구가 이루어져 왔다. 각 연구자들은 예연횡월류위어의 흐름 특성을 연구하기 위하여 De Marchi 가정을 채택하였으며, 이에 근거하여 직사각형 개수로에서의 예연횡월류위어 월류 흐름에 대한 다양한 유량계수 산정식을 제시하였다(Subramanya와 Awasthy, 1972; Ranga Raju 등, 1979; James와 Mitri, 1982; Hager, 1987; Cheong, 1991; Singh 등, 1994; Jalili와 Borghei, 1996; Borghei 등, 1999).

초기에 이루어진 연구에서도, 이미 차원해석에 의해서 횡월류위어 유량계수가 상류 프루드수(upstream Froude number) Fr_1, 위어의 높이(weir height)와 상류단 수심(upstream-end flow depth)의 비 h/y_1과 위어의 길이(weir length)와 본류 폭(main channel width)의 비 L/B의 영향을 받는 것으로 알려졌지만(Subramanya와 Awasthy, 1972), 예연횡월류위어 유량계수 산정식을 단지 상류 프루드수 Fr_1만을 고려하여 제시하였다(Subramanya와 Awasthy, 1972; Ranga Raju 등, 1979; James와 Mitri, 1982; Hager, 1987; Cheong, 1991). 하지만 Singh 등(1994)은 이러한 차원해석에 기초하여 상류 흐름 조건에서 예연횡월류위어의 유량계수에 대한 상류 프루드수와 위어의 높이에 의한 영향을 조사하였으며, Borghei 등(1999)은 h/y_1에 더하여 L/B와 본수로의 경사 S_0의 유량계수에 대한 영향을 연구하였다(그림 1 참조). L/B의 영향을 고려하는 것이 점차 중요해지고 있지만, 기존 연구자들에 의해서 사용된 실험 수로는 대체로 실험에 사용된 횡월류위어의 길이(L)에 비해서 상대적으로 폭이 좁았으며, 따라서 지금까지 수행된 실험들은 상대적으로 큰 L/B조건 하에서 수행되었다. 그러나 자연 하천은 일반적으로 횡월류위어 유입구보다 하폭이 매우 넓기 때문에 설치된 횡월류위어의 실제 흐름 특성은 기존 연구자들의 실험 범위에서 확인된 결과와 상당히 다를 것으로 예상된다.

따라서 본 연구에서는 기존 연구자들에 비하여 상대적으로 폭이 넓은 실험 수로를 사용하여 상류 흐름 조건에서 상류 프루드수, 위어 높이, 위어 길이, 본류 폭에 의한 예연횡월류위어 유량계수에 대한 영향을 확인하고자 한다. 또한 측정된 실험 자료를 이용하여 기존에 개발된 횡월류위어 유량계수식을 개선하며, 측정 자료에 근거하여 보다 보완된 새로운 유량계수 산정식을 제안하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 De Marchi 유량계수

횡월류위어에서의 횡월류흐름에 대한 공간변화류 방정식은

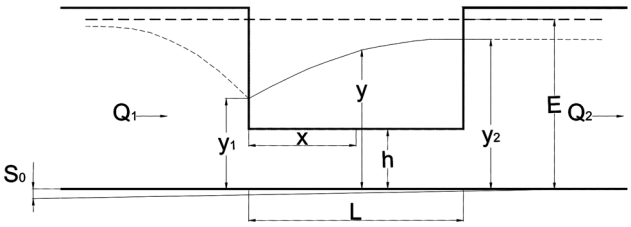


그림 1. 예연횡월류위어 개념도 및 설계인자

다음과 같다.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f - \frac{Q}{gA^2}\frac{dQ}{dx}}{1 - \frac{Q^2 B}{gA^3}} \tag{1}$$

여기에서 y는 본류의 수심이며, x는 횡월류위어 상류단으로부터의 종방향 거리, S_0는 본류 바닥 경사, S_f는 에너지 경사, Q는 본류의 유량, A는 본류의 단면적, B는 본류 폭, g는 중력가속도이다. 일반적으로 수로에 설치된 횡월류위어의 길이는 보통 길지 않기 때문에, $S_0 - S_f = 0$으로 가정할 수 있다. 즉, 비에너지 E가 횡월류위어 전 구간에 대하여 일정하다고 가정할 수 있다는 것을 의미한다. 이에 따라 위어의 길이 방향을 따라 변하지 않는 일정한 크기의 위어 유량계수 C_M을 가정하고(C_M을 흔히 De Marchi 유량계수라 부른다), 본류를 1차원 직사각형 수로로 가정하여, De Marchi는 식(5)와 같은 해석해를 구하였다.

횡월류위어의 총 월류량을 Q_w, 위어의 단위길이 당 월류량을 q_w라 하면,

$$q_w = -\frac{dQ}{dx} = \frac{dQ_w}{dx} = \frac{2}{3} C_M \sqrt{2g}(y-h)^{1.5} \tag{2}$$

$$Q_w = Q_1 - Q_2 = \frac{2}{3} C_M \sqrt{2g} \int_0^L (y-h)^{1.5} dx \tag{3}$$

이며(그림 1, 3 참조), 여기에서 C_M은 종방향 거리 x에 대하여 독립이며, h는 위어의 높이이다. 비에너지 공식으로부터 횡월류구간에서 본류의 모든 단면에 대하여 본류 유량 Q는 다음과 같이 주어진다.

$$Q = By\sqrt{2g(E-y)} \tag{4}$$

식(2)와 식(3)을 식(1)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 된다(Henderson, 1966; Subramanya와 Awasthy, 1972).

$$\frac{dy}{dx} = \frac{4C_M \sqrt{(E-y)(y-h)^3}}{3B(3y-2E)} \tag{5}$$

$$x = \frac{3B}{2C_M}\Phi + \text{constant} \tag{6}$$

여기에서 Φ는 De Marchi가 제안한 변화류 함수(varied flow function)로 다음과 같으며,

$$\Phi = \frac{2E-3h}{E-h}\sqrt{\frac{E-y}{y-h}} - 3\sin^{-1}\sqrt{\frac{E-y}{y-h}} \tag{7}$$

길이가 L인 횡월류위어의 상류단과 하류단을 각각 1과 2로 표현하면, 횡월류위어 유량계수 C_M은 다음과 같이 결정된다.

$$C_M = \frac{3B}{2L}(\Phi_2 - \Phi_1) \tag{8}$$

표 1. 기존 예연횡월류위어 유량계수 산정식

제안자	유량계수 산정식
Frazer(1957)	$0.55-0.155Fr_1^2-\frac{0.017E}{L}$
Subramanya와 Awasthy(1972)	$0.864\sqrt{\frac{1-Fr_1^2}{2+Fr_1^2}}$
Ranga Raju 등(1979)	$0.81-0.60Fr_1$
James와 Mitri(1982)	$0.45-0.06(Fr_1-0.6)$
Hager(1987)	$0.485\sqrt{\frac{2+Fr_1^2}{2+3Fr_1^3}}$
Cheong(1991)	$0.45-0.22Fr_1^2$
Singh 등(1994)	$0.33-0.18Fr_1+0.49\left(\frac{h}{y_1}\right)$
Jalili와 Borghei(1996)	$0.71-0.41Fr_1-0.22\left(\frac{h}{y_1}\right)$
Borghei 등(1999)	$0.7-0.48Fr_1-0.3\frac{h}{y_1}+0.06\frac{L}{B}$

De Marchi 이후 제시된 대부분의 횡월류위어 유량계수 산정식들은 이러한 De Marchi의 이론적 접근과 가정에 기초하고 있으나, 일부 연구자들은 실험을 통해 이러한 De Marchi의 해석해가 $Fr_1>0.5$가 되면 더 이상 실제 현상에 잘 부합하지 않는다고 주장하기도 하였다(Hager와 Volkart, 1986).

2.2 기존 예연횡월류위어 유량계수 산정식

차원 해석에 의해서 횡월류위어 유량계수 C_M은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C_M = f\left(Fr_1, \frac{h}{y_1}, \frac{L}{B}, \frac{L}{y_1}\right) \tag{9}$$

식(9)에 제시된 각 변수들의 정량적 변화는 실험을 통하여 계측할 수 있으며, 이러한 변수들을 이용하여 각 연구자들은 표 1과 같은 형태의 유량계수 산정식을 제시하였다.

표 1에서 볼 수 있듯이 모든 연구자들이 상류 프루드수 Fr_1을 가장 중요한 변수로 고려하였으나, 초기에 이루어진 연구의 경우 $h/y_1, L/B, L/y_1$ 과 같은 다른 변수들이 유량계수에 미치는 현저한 영향이 없거나 무시할 수 있다고 가정하여, 유량계수 C_M을 단지 상류 프루드수 Fr_1의 함수로만 표현하였다. 그러나 Singh 등(1994)은 h/y_1을 또 다른 중요 무차원 변수로 고려하여야 한다고 판단하였다. Ramamurthy와 Carballada(1980)와 Borghei 등(1999)도 역시 h/y_1을 중요 변수로 고려하였으나 분석 결과 그 경향이 Singh 등의 결과와는 다르게 나타났다. Ramamurthy와 Carballada는 L/B가 역시 또 다른 중요 변수로서 역할을 한다는 것을 발견하였으며, 이러한 결과를 바탕으로 Borghei 등은 그들이 제안한 유량계수 산정식에 L/B를 도입하였고, 새로 도입한 L/B에 의해서 유량계수 산정식의 예측 정확도가 개선되었다고 언급하였다.

Swamee 등(1994)은 기본적으로 De Marchi와 유사한 접근 방법을 사용하였으나, 비에너지 E가 일정하다는 가정으로부터 비에너지 방정식으로부터 얻어진 식(4)를 대신하여 직사각형 수로에 대한 매닝 공식을 이용하여 다음과 같은 식을 유도하였다.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - \frac{Q^2 n^2}{B^2 y^{10/3}}\left(\frac{1+2y}{B}\right)^{4/3} + \frac{2\sqrt{2}}{3}C_e(y-h)^{2/3}\frac{Q}{B^2 y^2\sqrt{g}}}{1-\left(\frac{Q^2}{gB^2y^3}\right)} \tag{10}$$

여기에서 n은 매닝조도계수이며, C_e는 Swamee의 횡월류위어 유량계수로, Swamee(1988)의 연구 결과를 기초로 하여 다음과 같은 형태를 취한다.

$$C_e = k_0\left[\left(\frac{k_1}{k_2+\eta_h}\right)^{k3} + \left(\frac{\eta_h}{\eta_h+1}\right)^{k_4}\right]^{-k_5} \tag{11}$$

여기에서 $\eta_h = (y-h)/h$ 이며, k_0~k_5는 실험을 통해 결정되는 계수이다. 이를 바탕으로 Swamee 등(1994)은 직사각형 수로에 설치된 예연횡월류위어에 대해서 다음과 같은 유량계수 산정식을 제시하였다.

$$C_e = 0.447\left[\left(\frac{44.7h}{49h+y_1}\right)^{6.67} + \left(\frac{y_1-h}{y_1}\right)^{6.67}\right]^{-0.15} \tag{12}$$

De Marchi의 이론에 기초한, 표 1에 제시된 다른 연구자들의 산정식과는 달리, 식(12)는 유량계수 산정 시 상류 프루드수를 주요 변수로 고려하지 않았으며, 횡월류위어의 높이 h와 위어 상류단 수심 y_1만을 중요 영향 변수(주요 무차원변수 h/y_1)로 고려하였다. Swamee 등이 제시한 유량계수 C_e도 식(3)에서 C_M과 동일한 의미를 가진다.

3. 실험 시설 및 자료 분석

수리 실험은 한국건설기술연구원 하천수리실험동 내에 설치된 횡월류위어 실험 수로에서 이루어졌으며, 실험수로의 길이는 20 m, 폭은 2.0 m, 높이는 1.2 m이다. 수로의 옆면과 바닥은 모두 철판을 이용하여 제작되었으며, 수로의 중간부에 예연횡월류위어를 설치하였다. 유량계수를 산정하기 위하여 실험을 통하여 월류량과 수위를 측정하였다. 본류 유량과 횡월류위어 월류량은 KS 규격을 따라 제작된 유량 공급 장치와 월류량 측정 위어를 수로의 상류단과 보조수로 하류단에 설치하여 측정하였다(그림 2 참조). 수위 측정 구간은 실험 수로 상류단으로부터 3.5 m 떨어진 지점에서 시작하며, 측정 구간의 길이는 횡월류위어의 제원에 따라 0.5 m 에서 1.5 m까지 변화하였다. 측정 구간의 수위는 0.1 mm의 정밀도를 가지는 초음파 수위계(독일 Pil)를 횡방향으로 설치하여, 본류를 따라 종방향으로 측정하였다. 다양한 실험 조건에 대하여 총 233번의 실험 측정을 수행하였다(표 2).

각각의 실험 조건에 대하여 본류의 중앙을 따라 일정한 간격으로 15 또는 25개의 수위를 측정하였으며, 측정된 수위 자료는 다음과 같이 횡월류위어 구간에서의 평균 수심을 계산하기 위하여 사용되었다.

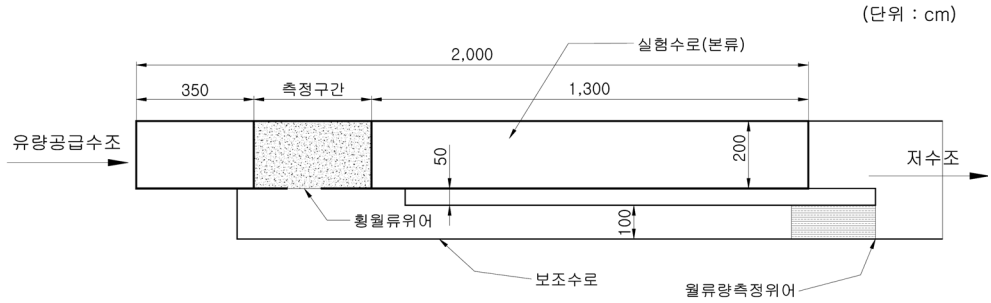


그림 2. 실험 수로 제원 및 개념도

표 2. 실험 조건

실험 인자	실험 조건
유량(m^3/s), Q_1	0.025~0.35
실험 수로 경사(m/m), S_0	0.005
상류 프루드수, Fr_1	0.01~0.45
위어 높이(cm), h	15, 20, 25, 30
위어 길이(cm), L	25, 50, 75, 100, 125
실험 수로 폭(m), B	2.0

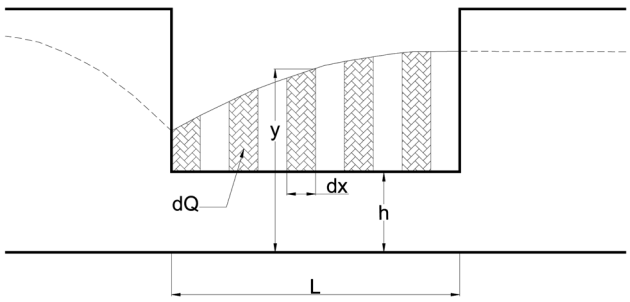


그림 3. 횡월류위어 유량계수 산정 개념도

$$\overline{y-h}=\left[\frac{1}{L}\sum_{1}^{m-1}\left(\frac{y_i+y_{i+1}}{2}-h\right)^{3/2}dx\right]^{2/3} \tag{13}$$

여기에서 m은 횡월류위어 구간에서 일정한 간격으로 측정한 본류 수위의 개수를 의미하며, dx는 측정된 수위 y_i와 y_{i+1}사이의 간격이다(그림 3). 본 연구에서는 식 (13)에 기초하여 다음과 같이 실험적으로 측정자료로부터 예연횡월류위어의 유량계수를 산정하였다.

$$Q_w=\sum_{1}^{m-1}(q_w)_i=\frac{2}{3}C_M\sqrt{2g}\sum_{1}^{m-1}\left(\left(\frac{y_i+y_{i+1}}{2}-h\right)^{3/2}dx\right)$$
$$=\frac{2}{3}C_M L\sqrt{2g}(\overline{y-h})^{3/2} \tag{14}$$

$$C_M=\frac{3}{2}\frac{Q_w}{L\sqrt{2g}(\overline{y-h})^{3/2}} \tag{15}$$

De Marchi 유량계수의 가정을 따라, 여기에서 C_M은 횡월류위어의 길이방향을 따라 변하지 않고 일정하다.

4. 실험 결과 분석 및 검토

4.1 기존 연구자 실험 자료 검토

수행된 각 실험으로부터 측정된 자료로부터 모든 실험 조건에 대하여 예연횡월류위어 유량계수 C_M을 식(15)를 이용하여 계산하였다. 계산된 유량계수는, 상류 프루드수 Fr_1은 횡월류유량계수를 연구한 모든 연구자들이 고려한 중요 변수이므로 상류 프루드수와의 상관관계를 확인하기 위하여, 그림 4에 상류 프루드수에 대하여 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 현 실험 조건 하에서는 계산된 유량계수와 상류 프루드수 사이에서 특별한 경향이 확인되지 않는 것으로 나타났다. 실험 범위가 $Fr_1<0.45$로 제한된 결과일 수도 있지만, 본류 수로의 폭이 커질수록 횡월류위어의 월류량에 대한 본류 흐름의 영향이 상대적으로 감소한다는 것을 의미하는 것으로 생각된다. 또한 상류 프루드수를 기준으로 하였을 때 실험 결과가 위어 상류단 월류 수심 y_1-h를 기준으로 크게 두 개의 그룹으로 구분 지을 수 있다는 사실이 확인되었는데, 이러한 결과는 횡월류위어 유량계수가 상류프루드수 Fr_1 외에도 다른 무차원 변수들의 영향을 받는다는 사실을 반증하는 작은 실마리로 생각된다.

기존 연구자들이 횡월류위어의 유량계수에 가장 큰 영향을 미치는 인자로 Fr_1을 고려한 것은 횡월류위어의 유량계수에 가장 큰 영향을 미치는 것이 본류의 흐름 조건이라고 판단한 것으로 추정할 수 있는데, 그림 4에 나타난 것처럼 Fr_1에 대한 경향성이 뚜렷하게 나타나지 않은 이유는 현 실험 수로 규모에서는 본류의 흐름 조건보다는 실험수로의 규모, 횡월류위어의 상대적 제원 등이 횡월류위어의 유량계수에 더 큰 영향을 주는 결과로 생각할 수 있다. 이는 그림 5와 6에서도 어느 정도 확인되는데, 기존 연구자들의 실험 결과를 보면, 전체적으로 Fr_1에 대해서 일정한 경향성이 나타나는 것처럼 보이지만, 실제 각 실험 자료 군을 비교해보면 각 연구자에 따라 그 경향이 서로 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서 이는 유사한 본류 흐름 조건을 구현하더라도 본류의 물리적 규모나 횡월류위어의 제원에 따라서 유량계수의 특성이 다소 변할 수 있다는 것을 보여주는 것으로 생각된다.

그림 5는 기존 연구자들에 의한 실험 결과를 비교한 것으로, Subramanya와 Awasthy(1972), Ranga Raju 등(1979), Cheong(1991), Singh 등(1994), Borghei 등(1999)의 실험 결과를 상류 프루드수에 대하여 함께 표시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 각 연구자들의 실험 결과는 서로 다른 경향을 나타나는데 단지 상류 프루드수 Fr_1만을 기준으로 공식들을 적용할 경우 각 공식 개발의 기반이 된 개별 실험 자료가 서로 다르므로 경향이 다른 타 연구자의 실험 자료에 적용하는 것은 힘들 것으로 예상된다. 본 연구의 실험 자료도 다른 연구자들의 실험 결과와 그 경향이 대체로 다르나,

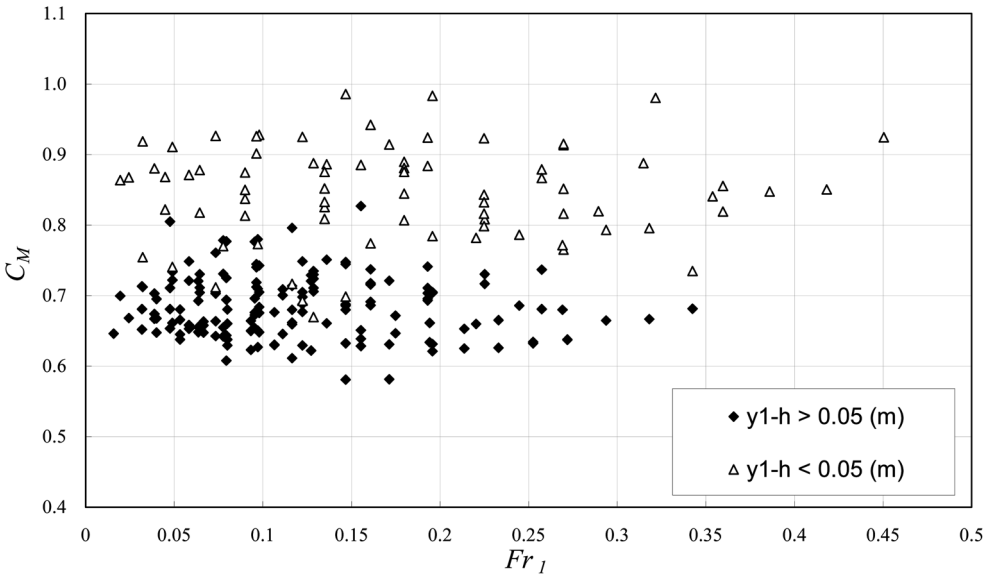


그림 4. 상류 프루드수 Fr_1 변화에 따른 유량계수의 변화

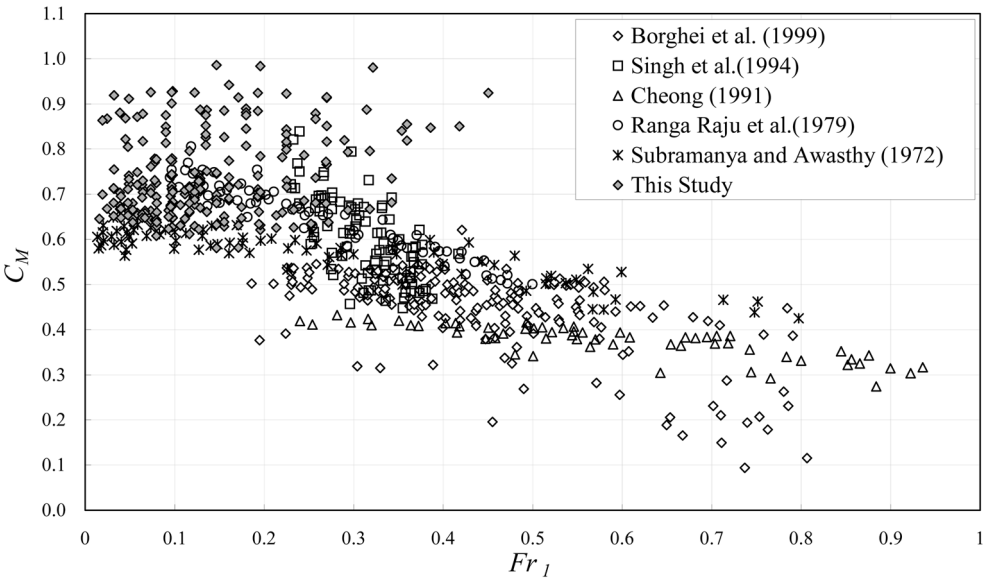


그림 5. 상류 프루드수 Fr_1에 따른 유량계수 실험 자료 비교

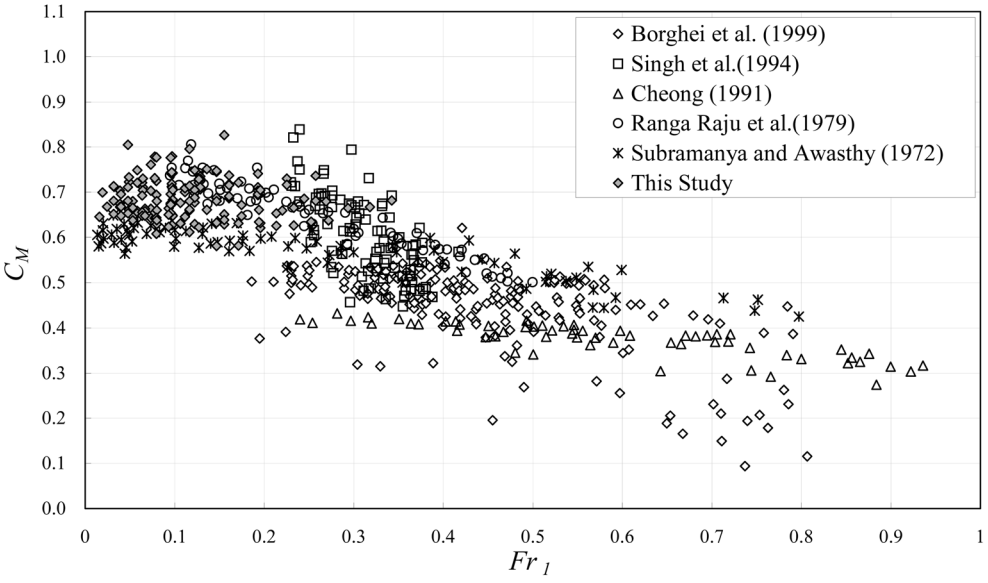


그림 6. 상류 프루드수 Fr_1에 따른 유량계수 실험 자료 비교(y_1–h > 0.05 m)

표 3. 기존 연구자 실험 수로 제원

연구자	수로 폭(B) (m)	위어높이(h) (cm)	위어길이(L) (cm)
Subramanya와 Awasthy(1972)	0.25, 0.61	-	-
Ranga Raju 등(1979)	0.4, 0.6, 1.0	5~25	20, 25
Hager(1987)	-	0, 20	-
Singh 등(1994)	0.25	6, 8, 10, 12	10~20
Borghei 등(1999)	0.3	1, 10, 19	20,30,45,70

그림 6에서 볼 수 있듯이, 본 실험 자료 중 상류 월류 수심 y_1-h가 0.05 m 보다 큰 경우에는 다른 연구자들의 실험 자료와 어느 정도 부합하는 것을 확인할 수 있다. 기존 연구자들의 경우 본 연구에서 사용된 실험 수로보다 상대적으로 좁은(y_1/B가 상대적으로 큰) 수로를 사용하였는데(표 3), $y_1-h > 0.05$ m 인 경우 본 연구에서도 y_1/B의 크기가 상대적으로 증가하기 때문에 기존 연구자들의 실험 결과와 일정 정도 부합하는 결과를 보이는 것으로 생각된다. 따라서 횡월류위어 유량계수를 상류 프루드수 만으로 예측할 경우 본 연구와 같이 상대적으로 폭이 넓은 본류 수로에서 수행한 예연횡월류위어 실험 결과를 같이 고려하는 것이 더 좋을 것으로 판단하였다. 기존 연구자들의 실험 자료에 본 연구의 실험 자료를 추가하고 기존 연구자들이 제시한 각 산정식의 형태를 기본으로 통상최소자승법(ordinary least squares)을 이용한 선형회귀분석을 통하여 다음과 같이 산정식을 도출하였으며, 그 결과를 비교하여 그림 7에 나타내었다.

$$C_M = -0.60Fr_1 + 0.77 \qquad R^2 = 0.57 \qquad (16)$$

$$C_M = -0.73Fr_1^2 + 0.68 \qquad R^2 = 0.52 \qquad (17)$$

$$C_M = 0.92\sqrt{\frac{1-Fr_1^2}{2+Fr_1^2}} \qquad R^2 = 0.46 \qquad (18)$$

$$C_M = 0.60\sqrt{\frac{2+Fr_1^2}{2+3Fr_1^3}} \qquad R^2 = 0.14 \qquad (19)$$

$$C_M = -0.04Fr_1^2 - 0.56Fr_1 + 0.76 \qquad R^2 = 0.57 \qquad (20)$$

결정계수의 크기를 비교할 때 식(16)과 (20)이 가장 적합한 것으로 나타났으나, 수집된 실험 자료들 사이의 경향 차이가 매우 커서 도출된 각 산정식에 대한 결정계수의 값이 모두 0.57 이하인 것으로 나타났다. 따라서 만약 상류 프루드수 만을 기준으로 하여 유량계수의 값을 간략히 평가하고자 하는 경우 식(16)과 (20)을 사용할 수 있는데, 적용 간편성을 고려할 때 식(16)이 보다 적합할 것으로 생각된다. 또한 식(16)의 사용은, 본 연구의 실험 조건 상, $(y_1-h)/B \geq 0.025$ 인 경우에 적합한 것으로 보인다. 하지만 이후 분석에서 수로의 폭의 충분히 클 경우 횡월류위어의 유량계수, 즉, 횡월류위어의 월류량은 본류의 흐름 조건보다는 대체로 위어 월류부에서의 수심과 위어와 위어 월류부의 물리적 제원에 의한 영향이 지배적인 것으로 나타나므로, 예연횡월류위어의 설계를 위해 사용할 경우 식(16)의 적용성은 다소 떨어질 것으로 예상된다. 그러므로 예연횡월류위어의 유량계수를 정밀하게 평가하기 위해서는 상류 프루드수 만을 사용하기 보다는 유량계수 산정 시 다른 주요 무차원 변수 h/y_1, L/B, L/y_1 을 고려하여야 할 것으로 판단된다.

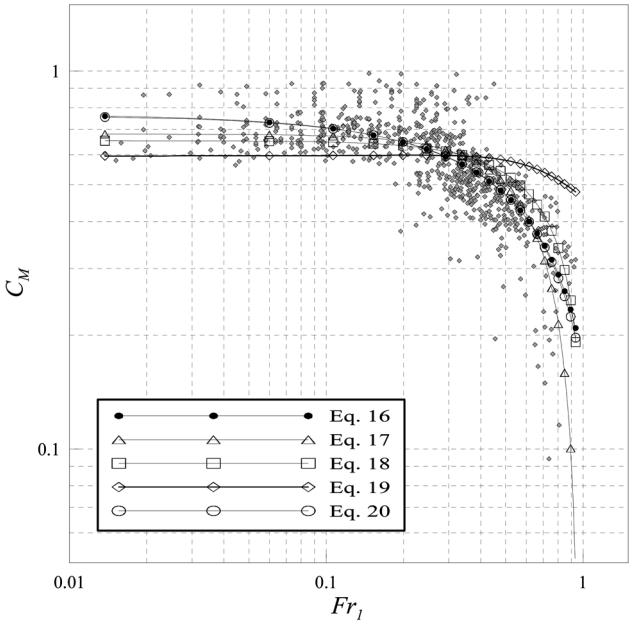


그림 7. 유량계수 실험 자료와 식(16)~(20) 비교

4.2 주요 무차원 변수를 고려한 유량계수 산정식 추정

4.1절에서 언급하였듯이 본 연구의 실험 자료에서는 상류 프루드수 Fr_1의 영향이 결정적이지 않은 것으로 나타났다. 또한 다른 실험 자료와의 비교에 의해서도 상류 프루드수 만으로 유량계수를 산정할 경우 예측 정확도가 떨어질 것으로 예상된다. 따라서 차원 해석에 의해서 구한 다른 무차원 변수 $h/y_1, L/B, L/y_1$ 의 영향에 의한 예연횡월류위어 유량계수의 변화를 검토하였다.

Singh 등(1994), Ramamurthy와 Carballada(1980), Borghei 등(1999)에 의해서 무차원 변수 $h/y_1, L/B$ 는 이미 주요 영향 변수로 결정되어 있기 때문에, 먼저 상류 프루드수 Fr_1, h/y_1, L/B를 주요 영향 변수로 고려하였으며, 차원 해석에 의해서 도출해낸 무차원 변수인 L/y_1을 주요 영향 변수로 도입하였다. 먼저, 그림 4에서 볼 수 있듯이 본 연구의 실험 결과에서는 유량계수 상류 프루드수에 대한 의존성이 명

표 4. 그룹별 다중회귀분석 결과

	p	회귀방정식	R_p^2 (%)
Group A	3	$\hat{C}_M = f(Fr_1, h/y_1, L/B)$	16.58
		$\hat{C}_M = f(Fr_1, h/y_1, L/y_1)$	12.23
		$\hat{C}_M = f(Fr_1, L/B, L/y_1)$	24.10
		$\hat{C}_M = f(h/y_1, L/B, L/y_1)$	24.17
	4	$\hat{C}_M = f(Fr_1, h/y_1, L/B, L/y_1)$	24.91
Group B	3	$\hat{C}_M = f(Fr_1, h/y_1, L/B)$	25.09
		$\hat{C}_M = f(Fr_1, h/y_1, L/y_1)$	27.44
		$\hat{C}_M = f(Fr_1, L/B, L/y_1)$	14.08
		$\hat{C}_M = f(h/y_1, L/B, L/y_1)$	30.68
	4	$\hat{C}_M = f(Fr_1, h/y_1, L/B, L/y_1)$	36.78

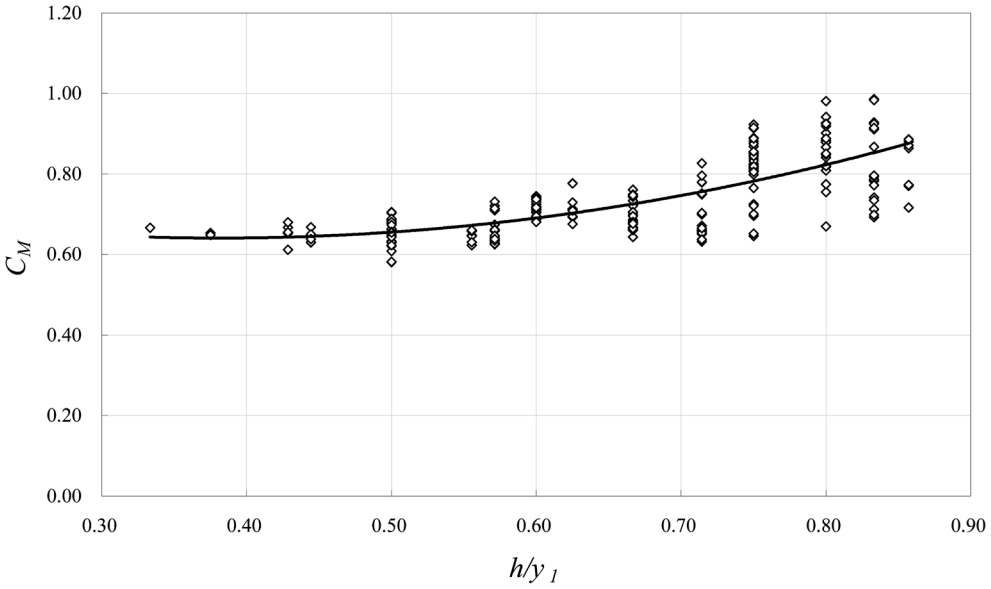


그림 8. h/y_1에 따른 유량계수의 변화

확히 나타나지 않고 있지만, Swamee 등(1994)을 제외한 기존 연구자들 모두 제안한 산정식에서 상류 프루드수 Fr_1을 중요 영향 변수로 고려하였기 때문에, 상류 프루드수의 영향을 파악하기 위하여 실험 자료를 두 개의 그룹으로 나누어 검토하였다. 그림 4에서 제시된 것처럼, 상류 월류 수심 y_1–h이 0.05 m 보다 작은 경우를 그룹 A, 큰 경우를 그룹 B로 구분하여 다중선형회귀분석을 시행하였다. 최적회귀방정식을 선택하기 위하여 모든 가능한 회귀(all possible regressions) 분석 방법을 사용하였으며, 표 4에 일부 결과를 수록하였다(여기에서, p는 회귀분석에 사용된 설명 변수의 개수, R_p^2은 결정계수).

표 5. 회귀방정식별 결정계수(전체 실험 자료)

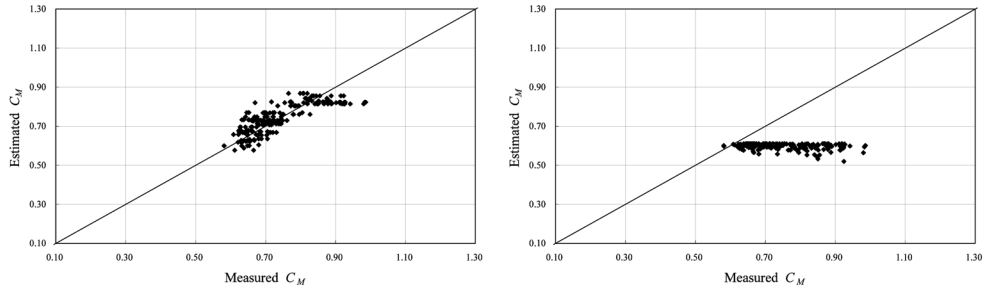
p	회귀방정식	R_p^2 (%)
1	$\hat{C}_M = f(Fr_1)$	6.086
	$\hat{C}_M = f(h/y_1)$	53.470
	$\hat{C}_M = f(L/B)$	0.005
	$\hat{C}_M = f(L/y_1)$	3.542
2	$\hat{C}_M = f(Fr_1, h/y_1)$	53.627
	$\hat{C}_M = f(Fr_1, L/B)$	6.804
	$\hat{C}_M = f(Fr_1, L/y_1)$	7.024
	$\hat{C}_M = f(h/y_1, L/B)$	53.474
	$\hat{C}_M = f(h/y_1, L/y_1)$	54.555
	$\hat{C}_M = f(L/B, L/y_1)$	32.932
3	$\hat{C}_M = f(Fr_1, h/y_1, L/B)$	53.636
	$\hat{C}_M = f(Fr_1, h/y_1, L/y_1)$	54.555
	$\hat{C}_M = f(Fr_1, L/B, L/y_1)$	34.565
	$\hat{C}_M = f(h/y_1, L/B, L/y_1)$	64.497
4	$\hat{C}_M = f(Fr_1, h/y_1, L/B, L/y_1)$	64.503

상류 프루드수를 기준으로 두개의 그룹으로 나누어 분석을 수행할 경우, 유량계수에 대한 상류 프루드수의 영향이 나타나기는 하지만, 오히려 그룹 A의 경우 L/B, 그룹 B의 경우 h/y_1의 영향력이 두드러지는 것으로 나타났다. 또한 전체 실험 자료를 이용하여 분석할 경우에 비하여 주요 회귀방정식의 설명력이 현저히 저하하는 것으로 나타났다(표 5 참조).

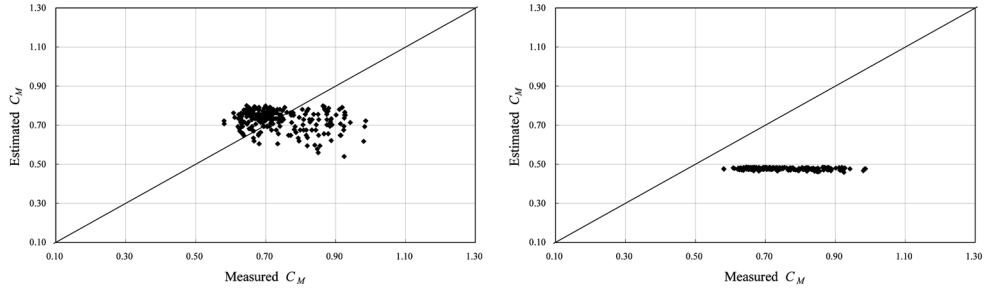
따라서 그룹 분석 결과로부터 상류 프루드수 Fr_1에 비하여 주요 무차원 변수 h/y_1, L/B, L/y_1의 중요도가 상대적으로 더 높을 수 있는 것으로 나타났기 때문에, 최적회귀방정식을 찾기 위하여 전체 실험 자료에 대하여 동일한 분석 방법을 적용하였다. 상관분석 결과 유량계수 C_M과 h/y_1사이에 가장 큰 상관관계가 있는 것으로 나타났다(그림 8 참조). 그러나 그림에서 볼 수 있듯이 C_M과 h/y_1의 상관관계가 제일 크기는 하지만, 동일한 h/y_1에 대하여 C_M이 변하는 것을 볼 수 있다. 이는 월류량이 커질수록, 즉 위어길이 L이 커질수록, 산정된 유량계수의 값이 대체로 작아지기 때문이다. 따라서 차원해석에 의해서 결정된 무차원변수 중 h/y_1의 설명력이 제일 높기는 하지만 L/B, L/y_1을 고려하여 유량계수를 산정해야 된다는 것을 의미하는 것으로 생각할 수 있다.

표 6. 유량계수 산정식별 유량계수 비교(RMSE)

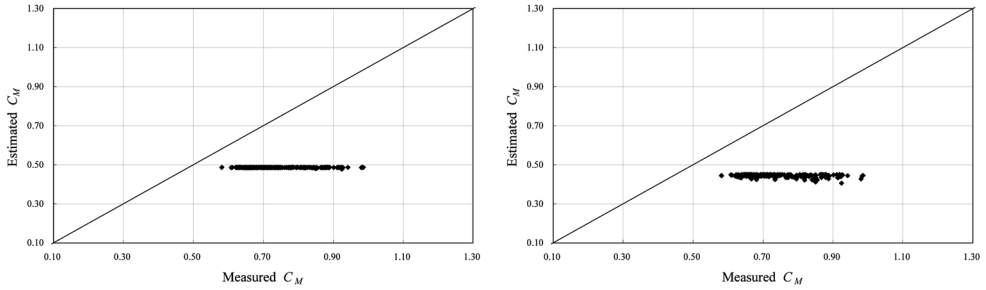
제안자	RMSE
식(22)	0.0552
Subramanya와 Awasthy(1972)	0.1692
Ranga Raju 등(1979)	0.1166
James와 Mitri(1982)	0.2760
Hager(1987)	0.2678
Cheong(1991)	0.3080
Singh 등(1994)	0.1278
Swamee 등(1994)	0.2505
Jalili와 Borghei(1996)	0.2626
Borghei 등(1999)	0.3187



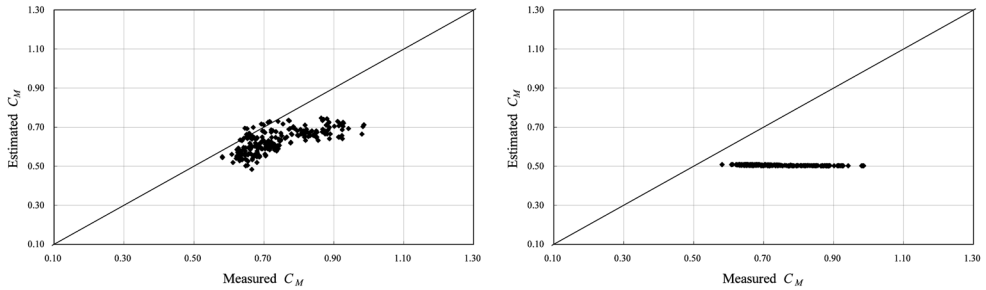
(a) 본 연구(식(22))　　(b) Subramanya와 Awasthy(1972)



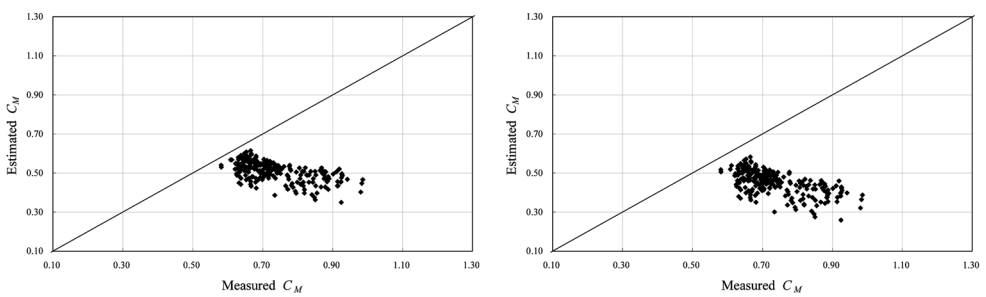
(c) Rangraju 등(1979)　　(d) James와 Mitri(1982)



(e) (Hager(1987)　　(f) Cheong(1991)



(g) Singh 등(1994)　　(h) Swamee 등(1994)



(i) Jalili와 Borghei (1996)　　(j) Borghei 등(1999)

그림 9. 산정 유량계수 및 예측 유량계수 비교

또한 표 5에서 알 수 있듯이, 표본결정계수를 판단기준으로 할 때, p=2일 때까지 결정계수의 값에 큰 변화가 없다가 p=3에서 결정계수의 값이 최대에 가까워진다. p=3인 경우, 최적회귀방정식은 상류 프루드수를 고려하지 않은 나머지 주요 무차원 변수들로 구성된,

$$C_M = e + b(h/y_1) + c(L/B) + d(L/y_1) \tag{21}$$

이 되는 것으로 나타났다. p=4인 경우 결정계수의 값이

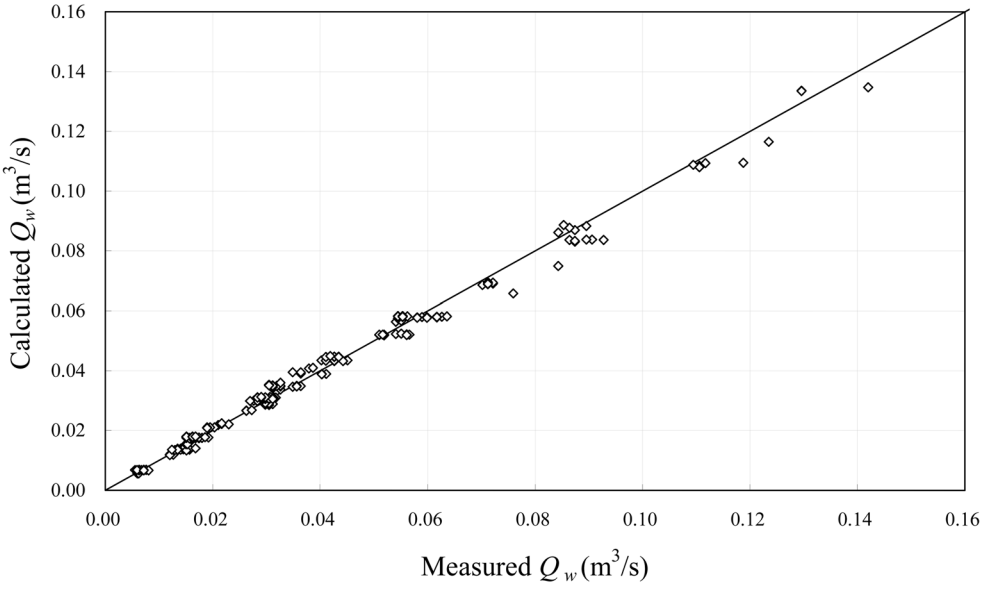


그림 10. 측정 월류량 및 산정 월류량 비교(식 (22))

64.497(%)에서 64.503(%)로 거의 변화가 없으므로, 실질적으로 변수 추가에 따른 상류프루드수 Fr_1의 기여도는 미미하다고 판단되며, h/y_1이 가장 중요한 영향 변수로서의 역할을 수행하고, L/B와 L/y_1은 유량계수 C_M에 대하여 이차적인 영향을 주는 것으로 생각된다. 그러므로 최적회귀방정식으로 $C_M=e+aFr_1+b(h/y_1)+c(L/B)+d(L/y_1)$은 부적합할 것으로 보이며(여기에서, a, b, c, d, e는 상수), 다중회귀분석에 의하여 최적회귀방정식은 다음과 같이 결정된다.

$$C_M = 0.4657 + 0.4511(h/y_1) - 0.6477(L/B) + 0.0751(L/y_1) \qquad (22)$$

따라서 위의 결과로 판단하면, 횡월류위어의 설치 조건이 실제 하도 조건에 가까워질 경우 본류 흐름 조건의 영향 보다는 횡월류위어의 제원 및 위어 설치 지점의 물리적 제원에 의한 영향이 더 커질 것으로 예상할 수 있다. 그러므로 본류의 흐름 조건이 상류일 때, 횡월류위어의 길이에 비해 본류의 폭이 점차 증가할수록 횡월류위어의 월류량은 본류의 흐름 조건보다는 횡월류위어 설치 지점의 물리적 조건에 의하여 결정되게 되며, 위어의 제원만으로 월류량을 예측할 수 있는 일반 예연 위어의 거동과 점차 유사해질 것으로 예상할 수 있다.

그림 9에 실험으로 측정한 유량계수와 각 연구자에 의해서 제안된 유량계수 산정식에 의하여 계산된 유량계수를 비교한 결과를 나타내었고, 표 6에 각 유량계수 산정식별로 유량계수 사이의 RMSE를 계산하여 수록하였다. 그림과 표에서 알 수 있듯이 기존 유량계수 산정식에 계산된 유량계수는 실제 측정된 유량계수와 비교할 때 상당한 편차를 나타내는 것을 알 수 있다. 이러한 편차는 일차적으로 각 연구자들이 적용한 실험 조건이 본 연구의 실험 조건과 상이하기 때문이지만, 본 연구에서 적용된 실험 조건과 같이 상대적으로 폭이 넓은 실험 수로를 사용할 경우, 상류 프루드수에 가중을 두어 유량계수를 산정하는 것에 한계가 있다는 것을 일정 정도 반영하는 결과라고 생각된다.

그림 10에 식(22)를 이용하여 계산한 월류량과 측정 월류량을 비교하여 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 계산된 월류량과 측정 월류량이 비교적 서로 잘 부합하는 것을 볼 수 있다(평균오차 5.7%). 따라서 본 연구에서 제시된 식(22)가 상류조건에서의 예연횡월류위어에 대하여 De Marchi 유량계수 C_M에 대한 산정식으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 상대적으로 폭이 넓은 직사각형 개수로에 예연횡월류위어를 설치하고 횡월류위어 유량계수에 대한 주요 무차원 변수의 영향을 확인하기 위하여 수리 실험을 수행하였다. 측정된 실험 자료를 바탕으로 기존 연구자들의 실험 자료와 비교 분석하고 예연횡월류위어 유량계수에 대한 기존 산정식의 적용성을 개선하였으며, 각 무차원 변수의 영향을 분석하여 예연횡월류위어 유량계수에 대한 새로운 산정식을 제안하였다.

예연횡월류위어 유량계수는 주요 영향 변수 Fr_1, h/y_1, L/B, L/y_1의 영향을 받아서 변화하는 것을 확인하였으며, 표 5에 수록하였듯이 네 가지 주요 영향 변수를 모두 고려하였을 때가 가장 정확한 예측 결과를 얻을 수 있는 것으로 나타났지만, 회귀분석 결과 상류 프루드수 Fr_1의 기여도는 상대적으로 미미한 것으로 나타났다. 그러므로 본 연구에서는 분석된 결과를 바탕으로 상류 조건에서의 예연횡월류위어에 대한 De Marchi 유량계수 C_M에 대하여 식(22)를 예측 산정식으로 새로이 제시하였으며, 기존 산정식에 비해서 상류 프루드수 Fr_1의 중요도는 상대적으로 감소하였다. 그러나 본 연구의 실험 조건 상 식(22)의 적용 범위가 본류의 흐름 조건이 Fr_1<0.45인 경우로 제한될 것으로 생각되며, 이후 횡월류위어의 제원 등 실험 조건을 보완하여 지속적인 연구를 진행한다면 식(22)의 적용성을 확대할 수 있을 것으로 사료된다.

또한 기존 산정식을 바탕으로 개선된 식(16)의 경우 설계 조건 중 상류 프루드수만이 유일하게 알려져 있거나, 예연횡월류위어 설계 시 횡월류위어의 유량배제 효과를 간략히 평

가하고자하는 경우 그 적용범위가 넓어(Fr_1<1.0) 활용할 수 있을 것으로 생각되지만, 예측 정밀도가 떨어지므로 실제 설계 시에 그 적용성이 떨어질 것으로 예상된다. 따라서 예연횡월류위어 설계 시 대부분의 경우 다른 주요 영향 무차원변수(h/y_1, L/B, L/y_1)를 고려하여 예연횡월류위어의 월류량을 평가하는 것이 더 타당하리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설기술혁신사업 (03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구단의 연구성과입니다. 또한 실험 측정과 분석에 도움을 주신 (주)웹솔루스 이동기 대리, 자료 분석 및 연구 방법에 대해 귀중한 조언을 해주신 서울대학교 김상욱 박사와 수자원의 지속적 확보기술개발사업단 강재원 박사께 감사를 드립니다.

참고문헌

Borghei, S.M., Jalili, M.R., and Ghodsin. M. (1999) Discharge coefficient for Shape-crested side weir in subcritical flow. *Journal of hydraulic engineering, ASCE*, Vol. 125, No. 10. pp. 1051-1056.

Cheong, H.F. (1991) Discharge coefficient of lateral diversion from traperzoidal channel. *Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE*, Vol. 117, No. 4. pp. 461-475.

Frazer, W. (1957) The behaviour of side weirs in prismatic rectangular channels. *Proc. Institution of Civil Engineers*, London, England, Vol. 6, pp. 305-327.

Hager, W.H. (1987) Lateral outflow over side weirs. *Journal of hydraulic engineering, ASCE*, Vol. 113, No. 4. pp. 491-688.

Hager, W.H. and Volkart, P.U. (1986). Distribution channels. *Journal of hydraulic engineering, ASCE*, Vol. 112, No. 10. pp. 935-953.

Henderson, F.M. (1966) *Open channel flow.* Macmillan Publishing Co., New York, N.Y.

Jalili, M.R. and Borghei, S.M. (1996) Discussion of 'Discharge coefficient of rectangular side weir', by Singh, D. Manivannan and T. Satyanarayana. *Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE*, Vol. 122, No. 2. pp. 132.

James, W. and Mitri, H. (1982) Modeling side-weir diversion structures for stormwater management. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 9, pp. 197-205.

Ramamurthy, A.S. and Carballada, L (1980) Lateral weir flow model. *Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE*, Vol. 106, No. 1, pp. 9-25.

Ranga Raju, K.G., Prasad, B., and Gupta, S.K. (1979) Side weir in rectangular channel. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 105, No. 5, pp. 547-554.

Singh, R., Manivannan, D., and Satyanarayana, T. (1994) Discharge coefficient of rectangular side weirs. *Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE*, Vol. 120, No. 4. pp. 814-819.

Subramanya, K. and Awasthy, S.C. (1972) Spatially varied flow over side-weirs. *Journal of the hydraulic division, ASCE*, Vol. 98, No. 1. pp. 1-10.

Swamee, P.K. (1988) Generalized rectangular weir equations. *Journal of hydraulic engineering, ASCE*, Vol. 114, No. 8. pp. 945-949.

Swamee, P.K., Pathank, S.K., Mohan, M., Agrawal, S.K., and Ail, M.S. (1994) Subcritical flow over rectangular side weir. *Journal of hydraulic engineering, ASCE*, Vol. 120. No. 1. pp. 212-217.

(접수일: 2007.4.9/심사일: 2007.6.8/심사완료일: 2008.7.29)