

횡월류위어의 형상에 따른 유량계수 추정

An Estimation of Discharge Coefficients with the Variations of Side Weir Shape

송재우* / 박성식** / 김지호***

Song, Jai Woo / Park, Sung Sik / Kim, Ji Ho

Abstract

To estimate more accurately the outflow over a sharp crested side weir, it is necessary to analyze the flow characteristics over side weir and to estimate the discharge coefficient in the weir equation. The purpose of this study is to estimate the discharge coefficients of sharp crested rectangular and triangular side weirs by means of hydraulic model experiments with the variations of upstream Froude number in the main channel and length and apex angle. Experimental results show that the discharge coefficients depend on the shape and geometric conditions of side weir as well as the upstream Froude number in the main channel. Through the multiple regression analysis, formulas of discharge coefficient for rectangular and triangular types are proposed and its applicability is confirmed by comparing estimated and measured discharges over side weirs.

keywords : side weir, discharge coefficient, discharge over side weir, triangular side weir, multiple regression analysis

요 지

횡월류위어의 월류량을 산정하기 위해서는 횡월류위어의 흐름특성을 분석하고 유량계수를 산정하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 수리실험을 통하여 직사각형, 삼각형 횡월류위어에 대하여 분류의 Froude 수, 횡월류위어의 폭, 위어정각 등의 형상변화에 따른 유량계수를 산정하였다. 횡월류위어의 유량계수는 횡월류위어의 형상 및 기하학적 조건과 분류의 Froude 수에 따라 변하는 것으로 나타났다. 다중 회귀분석을 통하여 직사각형과 삼각형 횡월류위어의 유량계수식을 제시하였으며, 측정된 월류량과의 비교 분석을 통해 적용성을 확인하였다.

핵심용어 : 횡월류위어, 유량계수, 횡월류량, 삼각형 횡월류위어, 다중 회귀분석

1. 서 론

횡월류위어(side weir 또는 lateral weir)는 인공수로 또는 자연하천에서 흐름방향에 평행하게 수로측면에

설치된 수공구조물로 분류의 수심이 횡월류위어 월류부의 높이보다 높을 경우 위어를 통하여 물을 월류시켜 에너지 소산, 수위의 안정, 일정 유량의 취수 및 분배, 초과 홍수량 전환 등의 목적으로 이용된다. 또한 횡

* 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수
Professor, Dept. of Civil Engrg., Hongik Univ., Seoul 121-791, Korea (e-mail: jwsong@hongik.ac.kr)
** 홍익대학교 방재연구소 연구원
Researcher, Disaster Prevention Institute, Hongik Univ., Seoul 121-791, Korea (e-mail: sspark72@empal.com)
*** 서일대학 토목과 겸임교수
Adjunct Professor, Dept. of Civil Engrg., Seoil College, Seoul 131-208, Korea (e-mail: kjh68@orgio.net)

월류위어는 댐의 여수로, 하도의(off-line) 저류지, 관개 배수를 위한 수로, 하수도 설비 등에서 폭넓게 사용되고 있다. 국내의 경우 일부 하천 제방과 최근 완공된 청계천 복원사업에서 본류와 우수박스 사이의 옹벽에 홍수시 유수의 원활한 소통을 위해 횡월류위어 형태의 수문이 설치되어 있으며, 제해영향평가의 홍수 저감대책 중 하도의 방식 저류지에 홍수량의 일부를 전환시킬 목적으로 횡월류위어가 사용되고 있다. 이러한 횡월류위어의 월류량을 산정하기 위해서는 횡월류위어의 흐름특성을 파악하고 신뢰할 만한 유량계수를 산정해야 하나, 횡월류위어에서 발생하는 복잡한 흐름특성과 수리현상 때문에 일반적인 위어나 암거 등 다른 수공구조물에 비해 연구가 미진한 상태이다.

횡월류위어의 흐름에 관한 최초의 실험은 Coleman and Smith(1923)에 의하여 수행되었다. 횡월류위어의 이론적 연구는 De Marchi(1934)에 의해 최초로 이루어졌으며, 횡월류위어부에서 흐름의 에너지가 일정하다는 가정 하에 월류량을 구하는 식과 유량계수식을 제시하였다. De Marchi(1934)의 이론적 연구를 바탕으로 지금까지 횡월류위어의 다양한 폭과 높이 등 기하학적 특성과 본류수로의 유량 및 Froude 수 등 흐름조건을 고려하여 횡월류위어의 수리학적 거동과 유량계수 산정에 관한 연구가 이루어져왔다(Subramanya and Awasthy, 1972; Ranga Raju et al., 1979; Hager, 1987; Cheong, 1991; Singh et al., 1994; Jalili and Borghei, 1996; Borghei et al., 1999). 이러한 많은 연구들은 대부분 비에너지와 운동량 법칙을 포함한 이론적 분석과 수리실험을 바탕으로 유량계수 산정식을 제시하였지만, 공식간에 횡월류량에 영향을 미치는 인자들의 실험조건이 다르기 때문에 편차가 매우 큰 것으로 나타났다(Swamee et al., 1994).

국내의 경우 최근 횡월류위어에 대한 연구가 진행되고 있으나 매우 미흡한 실정이다. 박태선(2002)은 구형수로내의 횡월류 흐름을 2차원 천수방정식을 이용한 수치모의를 통하여 횡월류위어 주변의 수심 및 유속변화, 월류량에 영향을 미치는 인자들을 검토하였다. 여창건 등(2003)은 위어폭을 수로폭의 4배까지 넓혀 실험을 수행하고 기존 연구자들의 유량계수식을 비교 검토하였으며, 김지호 등(2004)은 수리실험을 통하여 하도의 저류지 횡월류위어의 적정폭을 산정하고 유량계수 산정식을 제시한바 있다.

지금까지의 국내의 연구는 대부분 직사각형 횡월류위어에 제한되어 수행되었으며, 삼각형 횡월류위어와 같이 형상변화를 고려한 흐름특성 및 유량계수 산정에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. Kumar and

Pathak(1987)은 삼각형 예연 및 광정 횡월류위어의 유량계수 산정식을 제시하였으며, Cosar and Agaccioglu(2004)는 만곡부에 설치된 삼각형 횡월류위어의 유량계수 산정식을 제시한 바 있다.

본 연구에서는 수리실험을 통하여 직사각형과 삼각형 횡월류위어에 대하여 본류의 흐름조건, 횡월류위어의 폭, 위어정각(頂角) 등의 형상변화에 따른 유량계수를 산정하였다. 그리고 다중회귀분석을 통하여 직사각형과 삼각형 횡월류위어의 유량계수 산정식을 제시하였으며, 측정된 횡월류량과의 비교 분석을 통해 적용성을 확인하였다.

2. 기본 이론

2.1 횡월류위어의 기본 개념

Fig. 1은 횡월류위어 흐름의 개념도이다.

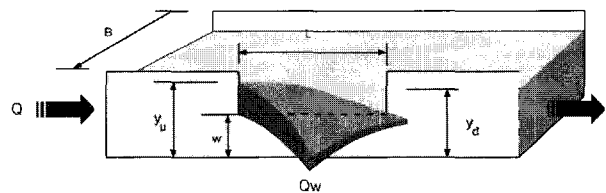


Fig. 1. Definition Sketch of Flow over Rectangular Side Weir

Fig. 1에서 B 는 본류하폭, L 은 위어폭, w 는 위어높이, Q 는 본류유량, Q_w 는 횡월류량, y_u 는 위어 상류수심이고, y_d 는 위어 하류수심이다.

본류의 하상경사와 단면이 일정한 직사각형 또는 원형수로이며, 직사각형 예연위어인 1차원 흐름에 대하여 본류 수로로부터 유출이 발생하는 경우 점면류의 수면곡선식은 다음과 같다(Chow, 1959).

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_o - S_f - \left(\frac{\alpha Q}{gA^2}\right)\left(\frac{dQ}{dx}\right)}{1 - \left(\frac{\alpha Q^2 B}{gA^3}\right)} \quad (1)$$

여기서, x 는 흐름방향, y 는 본류의 수심, S_o 는 본류의 하상경사, S_f 는 본류의 에너지경사, A 는 본류의 흐름 단면적, α 는 에너지 보정계수, g 는 중력가속도이다.

횡월류위어 구간은 수로연장에 비해 상대적으로 짧기 때문에 횡월류 구간에서는 $S_o - S_f = 0$ (즉, 위어를 따라 비에너지 일정), $\alpha = 1$ 이라고 가정하면 단위폭당 월류량 q 는 본류에서의 유량 감소량과 같으므로 위어

의 일반식은 다음과 같다.

$$q = -\left(\frac{dQ}{dx}\right) = \left(\frac{dQ_w}{dx}\right) = \frac{2}{3} C_M \sqrt{2g} (y-w)^{3/2} \quad (2)$$

그리고 비에너지 식으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$Q = By \sqrt{2g(E-y)} \quad (3)$$

여기서, C_M 은 De Marchi의 유량계수이고, E 는 비에너지이다. De Marchi(1934)는 Eqs. (2) and (3)을 Eq. (1)에 대입하고 그 결과를 적분한 후 C_M 에 대해 정리하여 Eq. (4)와 같은 유량계수식을 제시하였다.

$$C_M = \frac{3B}{2L} \Phi + const. \quad (4)$$

여기서, Φ 는 변화류 함수(varied flow function)이며, Eq. (5)와 같다.

$$\Phi = \frac{2E-3w}{E-w} \sqrt{\frac{E-y}{y-w}} - 3 \sin^{-1} \sqrt{\frac{E-y}{y-w}} \quad (5)$$

삼각형 횡월류위의 단위폭당 월류량은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Kumar and Pathak, 1987).

$$q = -\left(\frac{dQ}{dx}\right) = \left(\frac{dQ_{TRI}}{dx}\right) = \frac{4}{15} C_{TRI} \sqrt{2g} (y-w)^{3/2} \quad (6)$$

여기서, Q_{TRI} 와 C_{TRI} 는 각각 삼각형 횡월류위의 월류량과 유량계수이다.

삼각형 횡월류위의 월류폭은 삼각형 횡월류위의 각에 따라 달라지며 횡월류위부 본류의 수면변화를 고려한다면 Eq. (7)과 같이 나타낼 수 있으며, 삼각형 횡월류위의 총월류량은 Eq. (8)과 같다.

$$L' = 2(Y-w) \tan \frac{\theta}{2} \quad (7)$$

$$Q_{TRI} = \frac{8}{15} C_{TRI} \sqrt{2g} \tan \frac{\theta}{2} (Y-w)^{5/2} \quad (8)$$

여기서, L' 는 삼각형 횡월류위의 월류폭, θ 는 삼각형 횡월류위의 각, Y 는 횡월류위부 본류의 평균수심이다.

2.2 횡월류위의 유량계수에 영향을 미치는 인자

C_M 은 횡월류위의 월류량 산정에 큰 영향을 미치며, 본류의 흐름조건과 횡월류위의 기하학적 인자들에 큰 영향을 받는다. 차원해석을 통해 C_M 에 영향을 미치는 인자는 다음과 같이 나타낼 수 있다(El-Khashab, 1975).

$$C_M = f(Fr_u, L/B, L/y_u, w/y_u) \quad (9)$$

여기서, Fr_u 는 횡월류위 상류부의 Froude 수이다.

Kumar and Pathak(1987)은 삼각형 횡월류위의 무차원 변수를 다음과 같이 나타내었다.

$$C_{TRI} = f(Fr_u, \theta, w/Y) \quad (10)$$

2.3 횡월류위의 유량계수 산정공식

De Marchi(1934)에 의하여 이론적으로 제안되었던 유량계수식은 여러 연구자들이 실험을 통하여 산정공식을 제시하였다. Table 1은 본류 흐름조건이 상류이고 예연 직사각형 횡월류위인 경우에 대한 유량계수 제안식과 실험조건을 나타내고 있다. 대부분의 연구자들이 C_M 을 Fr_u 만의 함수로 나타내고 있으며(Subramanya and Awasthy, 1972; Ranga Raju et al., 1979; Hager, 1987; Cheong, 1991), Singh et al.(1994)은 Fr_u 와 w/y_u 를 고려한 유량계수식을 제시하였으며, Borghei et al.(1999)은 Fr_u , w/y_u 와 L/B 항을 고려한 유량계수식을 제시하였다. Kumar and Pathak(1987)는 위어정각이 60, 90, 120°인 예연 삼각형 횡월류위에 대해 C_{TRI} 를 Table 2와 같이 나타내었다.

3. 수리실험

3.1 수리실험장치

수리실험은 Fig. 2와 같은 길이 20m, 폭 0.8m, 높이 0.9m이고 벽면이 아크릴로 된 직사각형 가변 경사 개수로 실험장치를 이용하였다. 횡월류위를 설치하기 위해 본류 수로폭이 0.6m, 횡월류량을 차집하기 위한 차집수로폭이 0.2m가 되도록 아크릴로 수로를 분리하였다. 횡월류위는 흐름의 안정을 위하여 수조로부터 4.8m 하류에 폭과 높이 및 형상을 조절할 수 있도록 제작하였다. 고수조에는 유량을 조절하기 위한 삼각위가 설치되어 있으며, 하류단에는 수심조절을 위한 수문

Table 1. Proposed Formulas for Discharge Coefficient and Range of Test Variables of Rectangular Side Weir

Researcher	Year	Discharge Coefficient	B (m)	L (m)	w (m)	Q (ℓ/sec)	S _o (%)	Fr _u
Subramanya and Awasthy	1972	$C_M = 0.864 \sqrt{\frac{1 - Fr_u^2}{2 + Fr_u^2}}$	-	0.1 0.15	0~ 0.51	-	-	0.02~ 0.8
Ranga Raju et al.	1979	$C_M = 0.81 - 0.60 Fr_u$	0.4 0.6 1.0	0.2 0.5	0.05~ 0.25	-	-	0.1~ 0.5
Hager	1987	$C_M = 0.485 \sqrt{\frac{2 + Fr_u^2}{2 + 3 Fr_u^2}}$	0.3	1	0~0.2	-	-0.5~ 2	0.3~ 0.8
Cheong	1991	$C_M = 0.45 - 0.22 Fr_u^2$	0.34 0.67	0.277 ~0.97	-	3.345~ 75.09	-	0.24~ 0.988
Singh et al.	1994	$C_M = 0.33 - 0.18 Fr_u + 0.49 \left(\frac{w}{y_u}\right)$	0.25	0.1~ 0.2	0.06~ 0.12	10~ 14	-	0.22~ 0.42
Borghei et al.	1999	$C_M = 0.7 - 0.48 Fr_u - 0.3 \left(\frac{w}{y_u}\right) + 0.06 \left(\frac{L}{B}\right)$	0.3	0.2~ 0.75	0.01~ 0.19	35~ 100	-0.5~ 1.0	0.1~ 0.9

Table 2. Proposed Formulas for Discharge Coefficient and Range of Test Variables of Triangular Side Weir

Researcher	Year	Discharge Coefficient	B (m)	θ (°)	w (m)	Q (ℓ/sec)	S _o (%)	Fr _u
Kumar and Pathak	1987	$C_{TRI} = 0.668 - 0.381 Fr_u$; θ = 60° $C_{TRI} = 0.619 - 0.203 Fr_u$; θ = 90° $C_{TRI} = 0.642 - 0.042 Fr_u$; θ = 120°	0.5	60 90 120	0.0608 ~ 0.2422	19.5~ 118.1	0.3	0.09~ 0.694

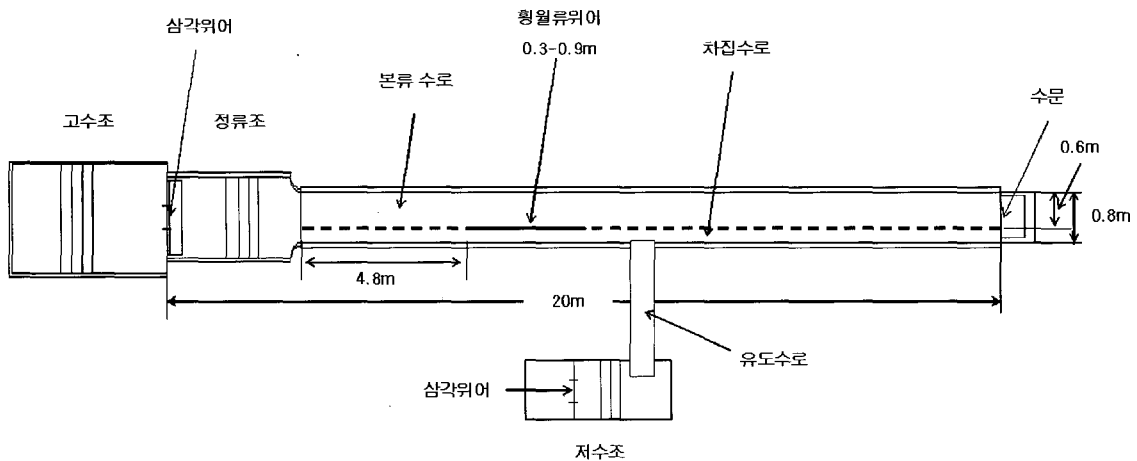


Fig. 2. Schematic View of Experimental Setup

이 설치되어 있다. 횡월류위어의 횡월류량을 측정하기 위하여 차집수로로 횡월류되는 유량이 유도수로를 통해 유입되는 저수조에 삼각위어를 설치하였다.

3.2 실험 방법 및 조건

횡월류위어의 형상에 따른 유량계수를 산정하기 위하여 직사각형과 삼각형 횡월류위어를 이용하였다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 직사각형 횡월류위어의 형상은 하상으로부터 위어 정점부까지의 높이, w와 위어 정점

부로부터 최상단 월류높이, w'을 각각 0.085m와 0.15m로 고정시키고, 위어폭은 0.3, 0.6, 0.9m로 분류폭과의 비 L/B = 0.5, 1.0, 1.5가 되도록 변화시켰다. 삼각형 횡월류위어의 형상은 직사각형 횡월류위어의 형상변화와 동일하게 w와 w'을 각각 0.085m와 0.15m로 고정시키고, 최상단 월류폭, L'은 0.3, 0.6, 0.9m로 변화시킨 후 삼각형 형상을 제작하였다. 이때 삼각형 횡월류위어 정점각 θ에 대한 경사 tanθ/2 = 1, 2, 3이며, 이때 θ는

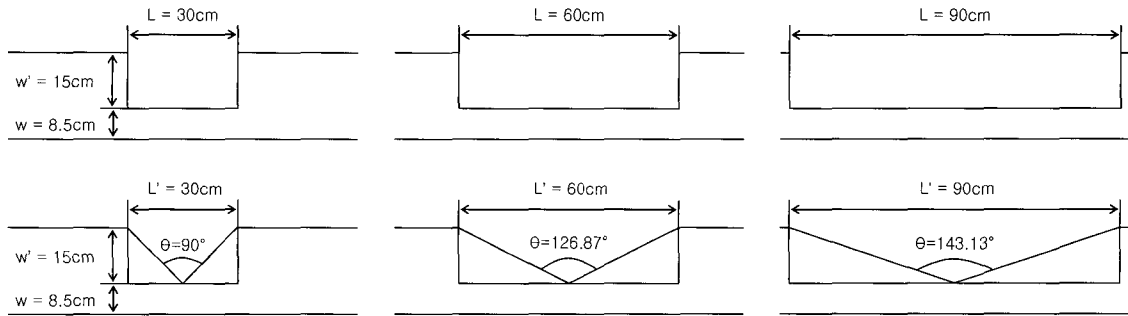


Fig. 3. Geometric Conditions due to the Shape of Side Weirs

Table 3. Range of Test Variables due to the Shape of Side Weirs

Weir Type	Weir Shape	w (m)	L (m)	θ (°)	B (m)	S_o (%)	Q (ℓ /sec)	w/y_u	Fr_u
Sharp Crested	Rectangular	0.085	0.3	-	0.6	0.1, 0.5	33.6-58.8	0.54-0.88	0.39-0.69
	Triangular		-						

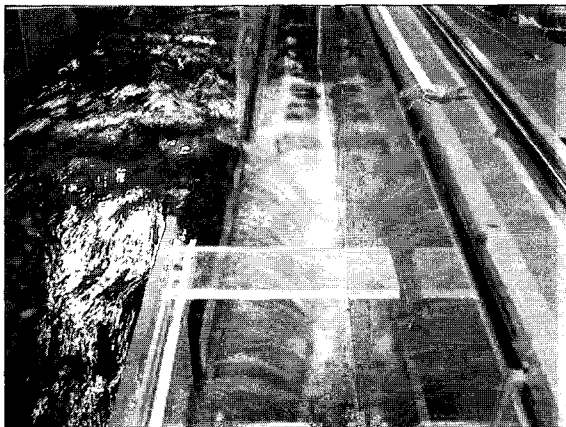


Fig. 4. Experimental View of Rectangular Side Weir ($L/B = 1.0$, $Fr_u = 0.64$)

각각 90, 126.87, 143.13° 이다.

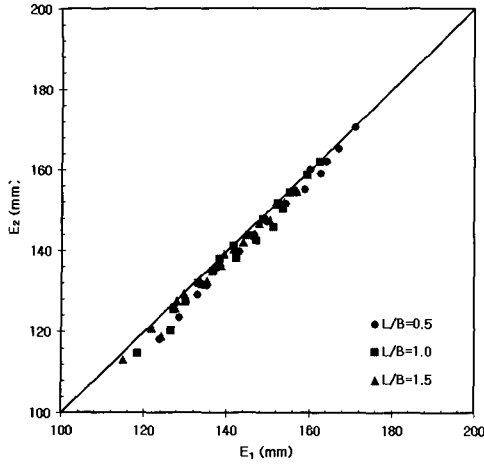
분류 유량 조건은 33.6~58.8 ℓ /sec였으며, 횡월류위의 월류량에 큰 영향을 미치는 상류부 Fr_u 는 동일한 상류 흐름조건에 대해 횡월류위어 형상에 따른 유량계수를 산정하고 비교 분석하기 위하여 횡월류위어 시작점에서 분류폭의 4배인 2.4m 상류지점에서 수심과 유속을 측정하여 계산하였다. 이때 수심측정은 포인트게이지를 이용하였으며, 유속은 1차원 프로펠라 유속계 (KENEK, VOT2-200-20N)를 이용하여 측정하였다. 그리고 동일한 유량일 경우 Fr_u 를 변화시키기 위해 하상 경사를 0.1와 0.5%로 변화시켰다. 횡월류량 계산시 수면형의 변화를 고려하기 위해 위어형상과 폭에 따라 위

어 시작점에서 0.1~0.15m 간격으로 수심을 측정하였으며, 삼각형 횡월류위어는 횡월류 시작점과 종료점에서의 수심과 길이도 측정하였다. 횡월류위의 횡월류량은 차집수로로 횡월류되는 유량이 유도수로를 통해 유입되는 저수조에 설치된 삼각위어로 측정하였다. 횡월류위어 형상 및 분류 흐름 조건은 Table 3과 같으며, 폭이 0.6m인 직사각형 횡월류위의 실험 전경은 Fig. 4에 나타내었다.

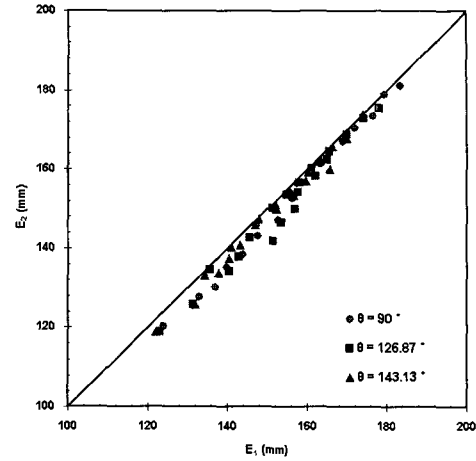
4. 실험결과 및 분석

4.1 일정 에너지의 가정

De Marchi(1934)는 횡월류위어부에서 비에너지가 일정하다는 가정하에 유량계수식을 제시하였다. De Marchi 공식을 이용하기 위하여 본 실험결과에 대해 일정 에너지 가정을 검토하였다. Fig. 5는 횡월류위어 양단사이의 분류에서 측정된 비에너지 차를 나타내고 있으며, E_1 과 E_2 는 각각 횡월류위어 상류부와 하류부 끝단 분류에서의 비에너지이다. 본 실험조건에서 평균 비에너지 차는 직사각형과 삼각형 횡월류위어에서 각각 1.48, 1.88%로 2% 이하였다. El-Khashab and Smith (1976)는 상류인 경우 평균 비에너지 차를 5%로 예측하였으며, Ranga Raju et al.(1979)은 평균 2%의 값을 산정하였다. Borghei et al.(1999)의 연구에서는 평균 3.7% 비에너지가 감소하는 것으로 나타났으며, 따라서



(a) Rectangular Side Weir



(b) Triangular Side Weir

Fig. 5. Specific Energy at Two Ends of Side Weir

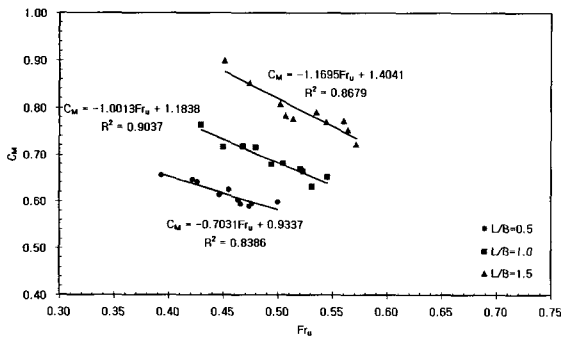
본 연구 결과에서도 일정 에너지의 가정이 타당한 것으로 나타났다.

4.2 횡월류위어 형상에 따른 유량계수 변화

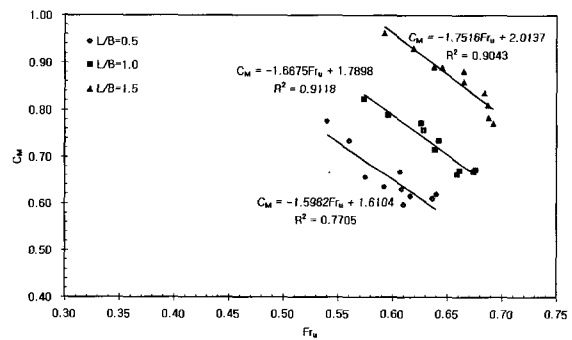
횡월류위어의 유량계수는 본류의 흐름조건과 위어의 기하학적 인자에 따라 변화한다. 본 연구에서 C_M 과 C_{TRU} 는 실험을 통해 측정된 총월류량을 위어폭으로 나

누어 단위폭당 월류량 q 를 구하고 측정된 수면형의 변화를 고려하여 Eqs. (2) and (6)으로 계산하였다.

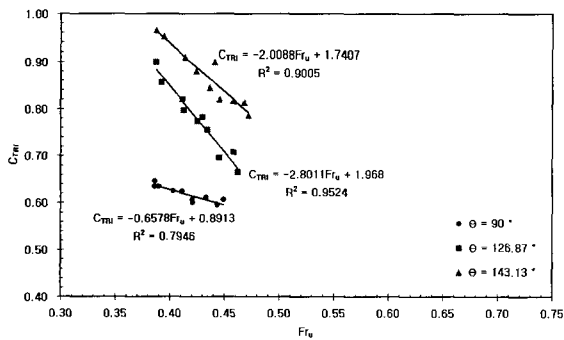
Fig. 6은 횡월류위어의 형상과 S_o 별 Fr_u 변화에 따른 유량계수의 변화를 나타내고 있다. 직사각형 횡월류위어에 대한 기존의 연구결과와 마찬가지로 Fig. 6에서 보는 바와 같이 모든 횡월류위어 형상에서 Fr_u 가 증가함에 따라 유량계수는 감소하는 것을 확인할 수 있으



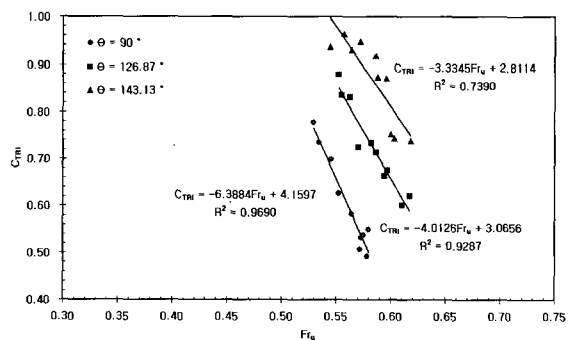
(a) Rectangular Side Weir, When $S_o=0.1\%$



(b) Rectangular Side Weir, When $S_o=0.5\%$

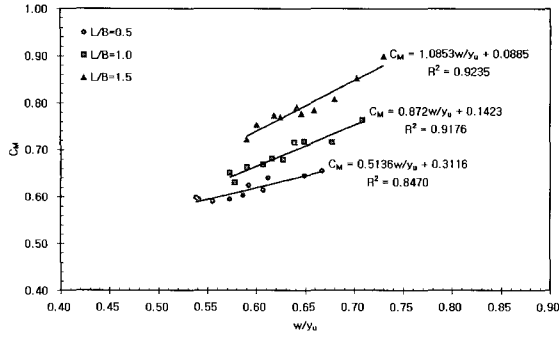


(c) Triangular Side Weir, When $S_o=0.1\%$

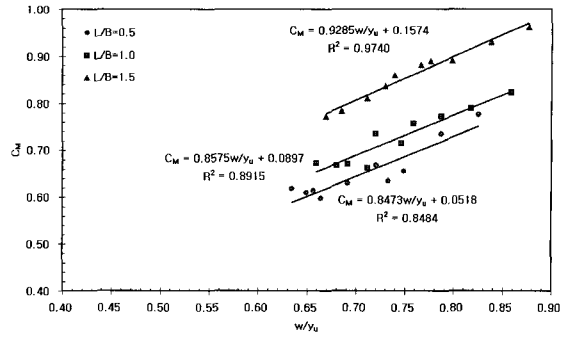


(d) Triangular Side Weir, When $S_o=0.5\%$

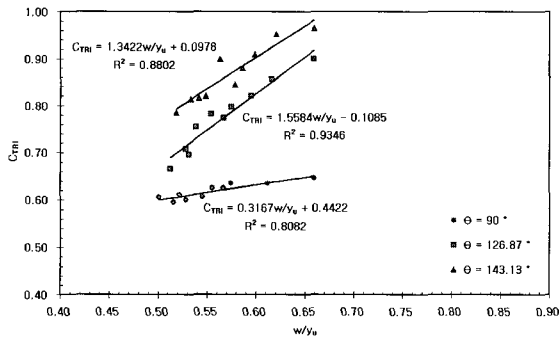
Fig. 6. Variation of Discharge Coefficient with Fr_u



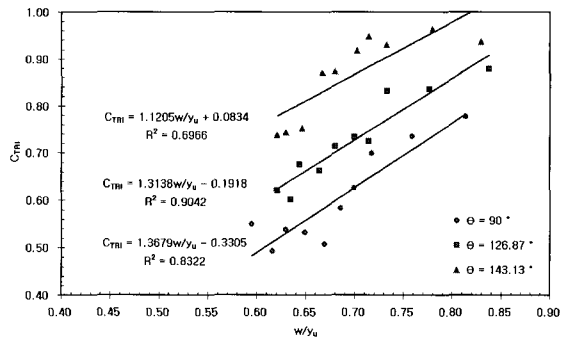
(a) Rectangular Side Weir, When $S_o=0.1\%$



(b) Rectangular Side Weir, When $S_o=0.5\%$



(c) Triangular Side Weir, When $S_o=0.1\%$



(d) Triangular Side Weir, When $S_o=0.5\%$

Fig. 7. Variation of Discharge Coefficient with w/y_u

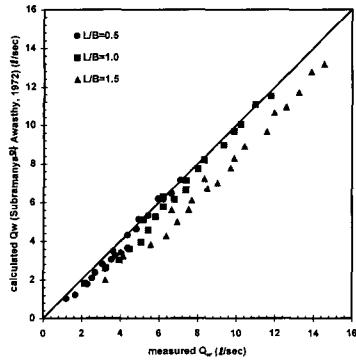
며, L/B 가 동일한 경우 S_o 가 증가함에 따라 유량계수의 감소는 더욱 크게 나타났다. 직사각형 횡월류위어는 S_o 와 Fr_u 가 동일한 경우 L/B 가 증가할수록 C_M 은 더 크게 나타났다. 삼각형 횡월류위어는 θ 가 증가할수록 동일한 S_o 와 Fr_u 에 대해 C_{TRI} 는 증가하는 것으로 나타났다.

횡월류위어의 형상과 S_o 별 w/y_u 변화에 따른 유량계수의 변화는 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 모든 횡월류위어 형상에서 w/y_u 가 증가함에 따라 유량계수가 증가하는 것으로 나타났다. 직사각형 횡월류위어는 S_o 와 w/y_u 가 동일한 경우 L/B 가 증가할수록 C_M 은 더 크게 나타났으며, 삼각형 횡월류위어는 θ 가 증가할수록 C_{TRI} 는 증가하는 것으로 나타났다. Singh et al.(1994)의 연구 결과에서도 w/y_u 가 증가함에 따라 유량계수가 증가하는 것으로 나타났으나, Jalili and Borghei(1996), Borghei et al.(1999)의 연구 결과에서는 반대로 w/y_u 가 증가함에 따라 유량계수가 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과의 차이는 본 연구와 Singh et al.(1994)의 연구에서 실험조건은 각각 $Fr_u = 0.39 \sim 0.69$, $Fr_u = 0.22 \sim 0.42$ 였지만 Jalili and Borghei (1996), Borghei et al.(1999)의 연구에서는 $Fr_u = 0.1 \sim 0.9$ 로 실험조건의 차이 때문으로 판단된다. Jalili and

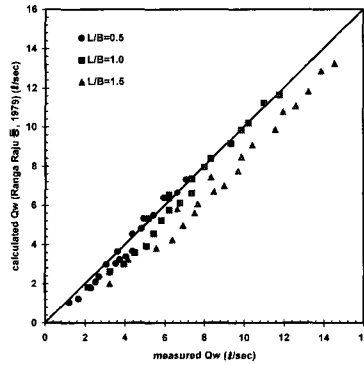
Borghei(1996), Borghei et al.(1999)의 연구 결과를 살펴보면 $Fr_u = 0.22 \sim 0.69$ 사이에서 w/y_u 가 증가함에 따라 유량계수가 뚜렷하게 감소하는 경향은 나타나지 않으며, Fr_u 가 0.1이하와 0.7이상일 때 일부 실험값을 이용했기 때문에 나타난 결과의 차이로 판단된다.

4.3 기존 횡월류위어의 유량계수 산정식 검토

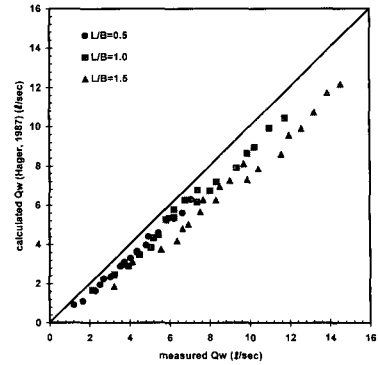
Fig. 8은 직사각형 횡월류위어의 측정유량과 기존 연구자들이 제시한 유량계수 식에 의한 계산유량을 비교하여 나타내고 있다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 위어폭별로 측정유량과 계산유량은 큰 편차를 나타내었으며, 6.7~46.1%의 편차를 보였다. 또한 L/B 가 증가할수록 편차는 더 크게 나타났다. 그리고 기존 공식들의 계산 횡월류량도 큰 편차가 나타났으며, 이는 본 실험조건에 이용된 횡월류위어의 L 과 w 등 기하학적 인자들과 Fr_u 등 흐름조건이 기존 제안식의 실험조건이 다르기 때문으로 판단된다. 이러한 결과는 Swamee et al.(1994)의 연구에서도 확인할 수 있다. 기존 식 중에서는 $L/B=1.0$ 일 때를 제외하고 Fr_u 와 w/y_u 을 고려한 Singh et al.(1994)의 제안식이 비교적 본 실험결과와 편차가 가장 적게 나타났으며, $L/B=0.5, 1.0, 1.5$ 일 때 편차는 각각 4.4, 10.9, 4.7%였다.



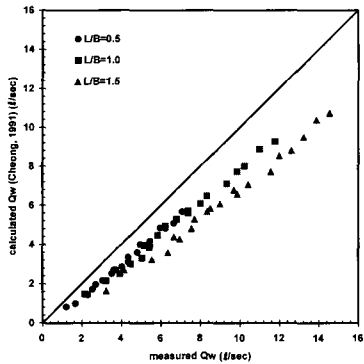
(a) Subramanya and Awasthy(1972)



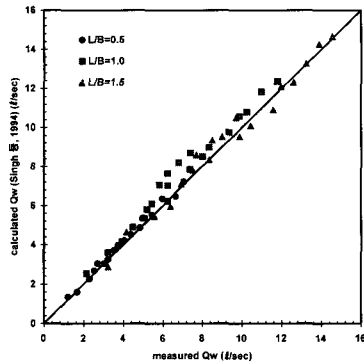
(b) Ranga Raju(1979)



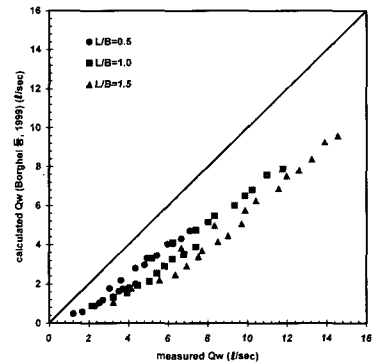
(c) Hager(1987)



(d) Cheong(1991)



(e) Singh et al.(1994)



(f) Borghei et al.(1999)

Fig. 8. Comparison of Measured Outflow Discharge over Rectangular Side Weir with those of Different Discharge Coefficient Formulas

Fig. 9는 $\theta=90^\circ$ 인 삼각형 횡월류위어의 측정된 횡월류량과 Kumar and Pathak(1987)의 제안식을 이용하여 계산된 횡월류량을 비교하여 나타내고 있다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 횡월류량이 작을 때에는 비교적 비슷하게 나타났으나 횡월류량이 증가할수록 실측치가 계산치보다 점차 크게 나타났으며, 편차는 14.2%였다.

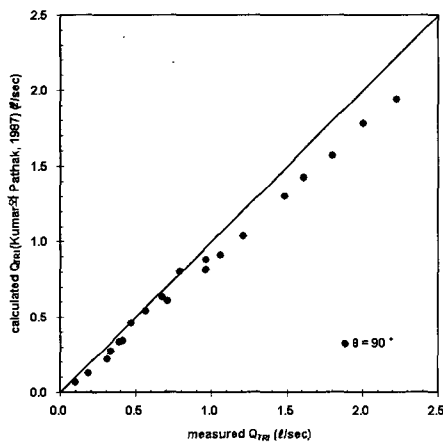


Fig. 9. Comparison of Measured Outflow Discharge over Triangular Side Weir with that of Different Discharge Coefficient Formula

4.4 직사각형과 삼각형 횡월류위어의 유량계수 산정식 제시

4.4.1 차원해석

횡월류위어의 유량계수에 영향을 미치는 인자는 본류의 흐름특성과 본류 및 횡월류위어의 수리기하학적 특성으로 분류할 수 있다. 본류의 중요한 흐름특성 인자는 위어 상류부 본류의 수심과 평균유속 등이며, 본류의 기하학적 인자는 폭과 경사 등이다. 직사각형 횡월류위어에서 중요한 기하학적 특성인자는 위어폭과 높이이며, 삼각형 횡월류위어의 경우는 위어정각과 높이 등이다. 직사각형과 삼각형 횡월류위어의 유량계수와 영향인자와의 관계를 표현하면 각각 Eqs. (11) and (12)와 같다.

$$C_M = f(y_u, V_u, B, S_o, L, w) \quad (11)$$

$$C_{TRI} = f(y_u, V_u, B, S_o, \theta, w) \quad (12)$$

차원해석을 통하여 중요한 물리적인 의미를 갖는 무

차원항으로 나타내면 Eqs. (13) and (14)와 같다.

$$C_M = f\left(Fr_u, \frac{w}{y_u}, \frac{L}{B}, \frac{L}{y_u}, S_o\right) \quad (13)$$

$$C_{TRI} = f\left(Fr_u, \frac{w}{y_u}, \theta, S_o\right) \quad (14)$$

Subramanya and Awasthy(1972)와 Singh et al. (1994) 등은 L/y_u 가 C_M 에 미치는 영향은 다른 인자에 비해 미소하다고 밝힌바 있기 때문에 L/y_u 를 제외하면 Eq. (14)는 Eq. (15)로 정리할 수 있다.

$$C_M = f\left(Fr_u, \frac{w}{y_u}, \frac{L}{B}, S_o\right) \quad (15)$$

본 연구에서 수리실험을 통해 분석한 유량계수와 각 독립변수와의 관계는 4.2절에서 진술한 바와 같다. Fig. 6(a) and 6(b)에 나타낸 바와 같이 L/B 와 S_o 가 동일할 때 C_M 은 Fr_u 가 증가함에 따라 감소하며, L/B 가 동일한 경우 S_o 가 증가함에 따라 C_M 의 감소는 더욱 크게 나타났다. S_o 와 Fr_u 가 동일한 경우 L/B 가 증가할수록 C_M 은 더 크게 나타났으며, Fig. 7(a) and 7(b)에 나타낸 바와 같이 L/B 와 S_o 가 동일할 때 w/y_u 가 증가함에 따라 C_M 은 증가하는 것으로 나타났다. C_{TRI} 는 Fig. 6(c)

and 6(d)에 나타낸 바와 같이 θ 와 S_o 가 동일할 때 Fr_u 가 증가함에 따라 감소하며, S_o 와 Fr_u 가 동일한 경우 θ 가 증가할수록 더 크게 나타났다. Fig. 7(c) and 7(d)에 나타낸 바와 같이 θ 와 S_o 가 동일할 때 w/y_u 가 증가함에 따라 C_{TRI} 는 증가하는 것으로 나타났다.

4.4.2 다중회귀분석

지금까지 유량계수와 영향인자와의 관계식의 함수형태가 결정되어 있지 않기 때문에 선형함수, 멱함수, 대수함수, 지수함수 형태로 가정하여 다중회귀분석을 실시하였다. 각 회귀식의 회귀상수를 구하기 위해 최소승법을 사용하였으며, 직사각형과 삼각형 횡월류어의 다중회귀분석 결과는 Tables 4 and 5에 나타내었다. 결정계수와 잔차의 합을 분석한 결과 직사각형 횡월류어는 선형함수, 지수함수, 멱함수, 대수함수의 순으로, 삼각형 횡월류어는 선형함수, 지수함수, 대수함수, 멱함수 순으로 적합성이 좋은 것으로 나타났으며, 두 형상 모두 유량계수는 선형함수형태가 가장 적합성이 좋은 것으로 나타났다.

4.4.3 유량계수식의 채택 및 검토

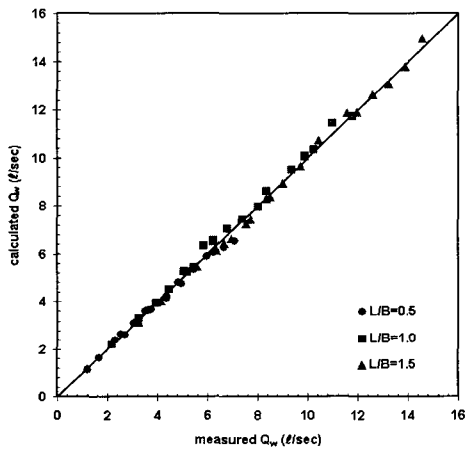
상관분석 결과 C_M 은 Fr_u , L/B , w/y_u 의 순으로 상관관계가 높았으며, S_o 의 영향은 크지 않았다. C_{TRI} 는 Fr_u , θ , w/y_u , S_o 의 순으로 상관관계가 높았으며, S_o 의 영향은 크지 않았다. Table 4에 나타낸 바와 같이

Table 4. Formulas of Multiple Regression Analysis for Discharge Coefficient of Rectangular Side Weir

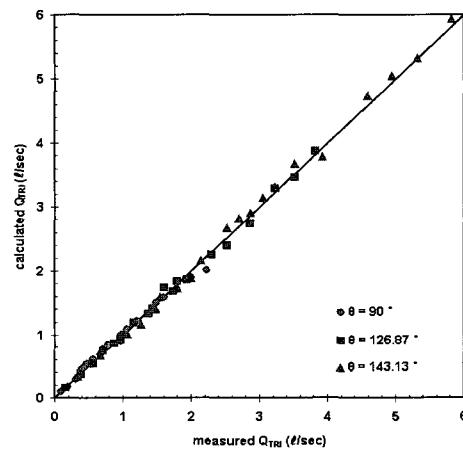
Multiple Regression Formula	Determination Coefficient (R^2)	Sum of Square of Residuals
$C_M = 0.206 - 0.246Fr_u + 0.711\left(\frac{w}{y_u}\right) + 0.171\left(\frac{L}{B}\right)$	0.947	0.029
$C_M = 0.576 - 0.756Fr_u + 0.394\left(\frac{w}{y_u}\right) + 0.221\left(\frac{L}{B}\right) + 0.275S_o$	0.952	0.027
$C_M = 0.851 Fr_u^{-0.180} \left(\frac{w}{y_u}\right)^{0.655} \left(\frac{L}{B}\right)^{0.204}$	0.919	0.036
$C_M = 0.853 Fr_u^{-0.175} \left(\frac{w}{y_u}\right)^{0.659} \left(\frac{L}{B}\right)^{0.203} S_o^{-0.001}$	0.919	0.036
$C_M = 0.850 - 0.133 \ln Fr_u + 0.488 \ln \left(\frac{w}{y_u}\right) + 0.147 \ln \left(\frac{L}{B}\right)$	0.900	0.056
$C_M = 0.827 - 0.179 \ln Fr_u + 0.450 \ln \left(\frac{w}{y_u}\right) + 0.155 \ln \left(\frac{L}{B}\right) + 0.011 \ln S_o$	0.900	0.055
$C_M = 0.356 \exp \left(-0.329 Fr_u + 0.952 \left(\frac{w}{y_u}\right) + 0.236 \left(\frac{L}{B}\right) \right)$	0.942	0.042
$C_M = 0.503 \exp \left(-0.803 Fr_u + 0.657 \left(\frac{w}{y_u}\right) + 0.282 \left(\frac{L}{B}\right) + 0.256 S_o \right)$	0.944	0.040

Table 5. Formulas of Multiple Regression Analysis for Discharge Coefficient of Triangular Side Weir

Multiple Regression Formula	Determination Coefficient (R^2)	Sum of Square of Residuals
$C_{TRI} = 0.380 - 0.870 Fr_u + 0.855 \left(\frac{w}{y_u}\right) + 0.130 \left(\tan \frac{\theta}{2}\right)$	0.922	0.044
$C_{TRI} = 0.365 - 0.838 Fr_u + 0.867 \left(\frac{w}{y_u}\right) + 0.130 \left(\tan \frac{\theta}{2}\right) - 0.016 S_o$	0.922	0.044
$C_{TRI} = 0.558 Fr_u^{-0.587} \left(\frac{w}{y_u}\right)^{0.714} \left(\tan \frac{\theta}{2}\right)^{0.324}$	0.902	0.078
$C_{TRI} = 0.726 Fr_u^{-0.156} \left(\frac{w}{y_u}\right)^{0.957} \left(\tan \frac{\theta}{2}\right)^{0.301} S_o^{-0.113}$	0.905	0.076
$C_{TRI} = 0.557 - 0.427 \ln Fr_u + 0.539 \ln \left(\frac{w}{y_u}\right) + 0.234 \ln \left(\tan \frac{\theta}{2}\right)$	0.907	0.093
$C_{TRI} = 0.657 - 0.262 \ln Fr_u + 0.632 \ln \left(\frac{w}{y_u}\right) + 0.225 \ln \left(\tan \frac{\theta}{2}\right) - 0.043 \ln S_o$	0.908	0.092
$C_{TRI} = 0.455 \exp \left(-1.198 Fr_u + 1.137 \left(\frac{w}{y_u}\right) + 0.180 \left(\tan \frac{\theta}{2}\right) \right)$	0.909	0.105
$C_{TRI} = 0.328 \exp \left(-0.627 Fr_u + 1.367 \left(\frac{w}{y_u}\right) + 0.172 \left(\tan \frac{\theta}{2}\right) - 0.292 S_o \right)$	0.910	0.102



(a) Rectangular Side Weir



(b) Triangular Side Weir

Fig. 10. Comparison of Measured and Calculated Outflow Discharge over Side Weir

직사각형 횡류유위어의 유량계수식은 Fr_u , w/y_u , L/B , S_o 를 고려하여 선형 다중 회귀식의 형태로 나타냈을 때, 결정계수가 가장 높고 잔차의 합이 가장 작은 것으로 나타났다. 그러나 S_o 의 영향은 상대적으로 크지 않기 때문에 이를 제거한 선형 다중 회귀식을 채택하였다. 또한 C_{TRI} 역시 Table 5에 나타난 바와 같이 S_o 의 영향은 크지 않았으며, Fr_u , w/y_u 와 위어정각 θ 를 고려한 선형 다중 회귀식의 형태가 결정계수가 높고 잔차의 합이 작은 것으로 나타나 채택하였다. 채택된 직사각형과 삼각형 유량계수식은 각각 Eqs. (16)

and (17)에 제시하였다. Borghei et al.(1999)의 연구결과에서도 S_o 의 영향은 크지 않기 때문에 이를 제외하였으며, Borghei et al.(1999)의 식과의 차이는 다른 실험조건에 대한 자료를 이용하였고 독립변수 중 w/y_u 의 상관관계가 4.2절에 전술한 바와 같이 다르게 나타났기 때문으로 판단된다.

$$C_M = 0.206 - 0.246 Fr_u + 0.711 \left(\frac{w}{y_u}\right) + 0.171 \left(\frac{L}{B}\right) \quad (16)$$

$(R^2 = 0.947)$

$$C_{TRI} = 0.380 - 0.870Fr_u + 0.855\left(\frac{w}{y_u}\right) + 0.130\left(\tan\frac{\theta}{2}\right)$$

$$(R^2 = 0.922) \quad (17)$$

Fig. 10은 채택된 Eqs. (16) and (17)을 이용하여 계산된 유량계수와 측정된 수면형의 변화를 고려하여 계산된 횡월류량을 측정된 횡월류량과 비교하여 나타내고 있으며, 직사각형과 삼각형 횡월류위의 평균오차는 각각 2.6%와 4.1%였다. 따라서 본 연구에서 제시한 유량계수식은 적용성이 있는 것으로 판단된다. 본 연구에서 회귀분석에 이용된 자료의 한계는 Table 3에 나타내었으며, 제시한 Eq. (16)은 $Fr_u=0.39-0.69$, $w/y_u=0.54-0.88$, $L/B=0.5-1.5$ 의 실험범위에서 개발된 식이며, Eq. (17)의 적용범위는 실험조건인 $Fr_u=0.39-0.62$, $w/y_u=0.50-0.84$, $\theta=90-143.13^\circ$ 이다.

5. 결론

본 연구에서 수리실험을 통하여 직사각형과 삼각형 횡월류위에 대하여 본류의 흐름조건, 횡월류위의 폭, 위어정각 등의 형상변화에 따른 유량계수를 산정하고 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 횡월류위 양단사이의 본류에서 비에너지 차를 산정하여 De Marchi의 일정 에너지 가정을 검토한 결과 평균 비에너지 차는 직사각형과 삼각형 횡월류위에서 각각 1.48, 1.88%로 2% 이하로 비에너지가 감소하였으며, 따라서 본 연구 결과에서도 일정 에너지의 가정은 타당한 것으로 나타났다.
- 2) 횡월류위의 형상별 Fr_u 와 w/y_u 변화에 따른 유량계수의 변화를 분석한 결과 모든 횡월류위 형상에서 Fr_u 가 증가함에 따라 그리고 w/y_u 가 감소함에 따라 C_M 은 감소하였다.
- 3) 유량계수의 영향을 미치는 인자들을 고려하여 다양한 함수형태에 대한 다중 회귀분석을 통하여 직사각형과 삼각형 횡월류위의 유량계수식을 제시하였다. 회귀상수를 구하기 위해 최소자승법을 이용하였으며, 직사각형 횡월류위의 유량계수식은 Fr_u , w/y_u , L/B , 삼각형 횡월류위의 유량계수는 Fr_u , w/y_u , θ 를 고려한 선형 다중회귀식을 채택하였다. 제시된 유량계수식을 이용하여 계산된 횡월류량과 측정된 횡월류량을 비교 분석한 결과, 직사각형과 삼각형 횡월류위의 평균오차는 각각 2.6%와 4.1%였다.

본 연구에서 제시된 유량계수식이 실제 횡월류위어 설계시 적용되기 위해서는 보다 다양한 조건의 실험을 통해 지속적인 보완이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2004학년도 홍익대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- 박태선 (2002). "구형 수로내 횡월류 흐름의 특성." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제35권, 제3호, pp. 251-259.
- 여창건, 김지호, 이호열, 송재우 (2004). "횡월류위의 유량계수에 관한 실험적 연구." 2004년도 한국수자원학회 학술발표회 초록집, 한국수자원학회, p. 98.
- 김지호, 이호열, 김윤태, 송재우 (2004). "Off-line 저류지 횡월류위의 적정유량계수 제안." 2004년도 대한토목학회 정기 학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 946-951.
- Borghesi, S.M., Jalili, M.R., and Ghodsian, M. (1999). "Discharge coefficient for sharp-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 trapezoidal channel." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 4, pp. 461-475.
- Chow, V.T. (1959). *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill, New York.
- Coleman, G.S. and Smith, D. (1923). *The discharging capacity of side weirs*. Selected Engineering Paper No. 6, Institute of Civil Engineers, London.
- Cosar, A., and Agaccioglu, H. (2004). "Discharge coefficient of a triangular side-weir located on a curved channel." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 5, pp. 410-423.
- De Marchi, G. (1934). "Essay on the performance of lateral weirs." *L' Energia Elettrica*, Vol. 11, No. 11, pp. 849-860.
- El-Khashab, A., (1975). *Hydraulics of flow over side weirs*. Ph.D. dissertation, University of Southampton, Southampton, U.K.

- El-Khashab, A., and Smith, K.V.H. (1976). "Experimental investigation of flow over side weirs." *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 102, No. 9, pp. 1255-1268.
- Hager W.H. (1987). "Lateral outflow over side weirs." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 113, No. 4, pp. 491-504.
- Jalili, M.R., and Borghei, S.M. (1996). "Discussion of 'Discharge coefficient of rectangular side weirs,' by Singh, R., Manivannan, D., and Satyanarayana, T." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, Vol. 122, No. 2, p. 132.
- Kumar, C.A., and Pathak, S.H. (1987). "Triangular side weirs." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, Vol. 113, No. 1, pp. 98-105.
- Ranga Raju, K.G., Prasad, B., and Gupta, S.K. (1979). "Side weir in rectangular channel." *Journal of 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 Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 98, No. 1, pp. 1-10.
- Swamee, P.K., Pathak, S.K., Mohan, M., Agrawal, S.K., and Ali, M.S. (1994). "Subcritical flow over rectangular side weir." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, Vol. 120, No. 1, pp. 212-217.

(논문번호:05-142/접수:2005.11.7/심사완료:2006.12.18)