

실내실험을 통한 개량형 공압식 가동보의 월류흐름 특성 분석

Analysis of Flow Characteristics of the Improved-Pneumatic-Movable Weir through the Laboratory Experiments

이 경 수* / 장 창 래** / 이 남 주*** / 안 상 진****

Lee, Kyung Su / Jang, Chang-Lae / Lee, Namjoo / Ahn, Sang Jin

Abstract

This study investigates the discharge coefficient of Improved-Pneumatic-Movable (IPM) weir through the weir, a kind of movable weirs, to estimate much more accurate rating curves using laboratory flume experiments. The discharge coefficient (C_d) is from 0.613 to 0.634 by the stand-up angle of the weir. The upstream Froude Number (F_{r1}), relative crest length(ξ), Headwater Ratio (H_1/W), the Overflow depth ratio of weir crest (y_c/y_1) was changed by the upstream. And the downstream Froude number (F_{r2}), the Overflow depth ratio of weir crest and Downstream Water depth (y_c/y_2) was changed by the downstream. The ratio of Downstream and Up and Downstream water Depth ($\Delta y/y_2$) was found to be changed by both of the up and downstream flow. They considered the major influence variables and derived the Discharge coefficient Formula at this study. The Discharge coefficient of the Improved-Pneumatic-Movable (IPM) weir was settled by the height of the Movable weir, that is to say, it was settled by the flow conditions of upstream approach flow head and physical data according to the standing angle.

keywords : Improved-Pneumatic-Movable weir, discharge coefficient, relative crest length, rating curve

요 지

본 연구에서는 실내실험을 통하여 국내 중·소하천에 가장 많이 설치되고 있는 개량형 공압식 가동보를 대상으로 다양한 유량 변화에 대한 흐름특성을 분석하고, 유량계수산정식을 도출하였다. 실험결과, 가동보 기립각도에 따라 월류유량계수 (C_d)의 값은 0.613~0.634로 산정되었으며, 상류 Froude number (F_{r1}), 상대위어길이(ξ), 전수두비(H_1/W), 상류수심과 위어마루를 월류하는 수심의 비(y_c/y_1)는 상류의 영향을 받으며 하류 Froude number (F_{r2}), 하류수심과 위어마루를 월류하는 수심의 비(y_c/y_2)는 하류의 영향을 받아 변화하였다. 상·하류수위차와 하류수심의 비($\Delta y/y_2$)는 상·하류의 영향을 모두 받아 변화되는 특성을 보여주었다. 주요 영향변수를 고려하여 다중회귀분석에 의한 유량계수산정식을 도출한 결과, 개량형 공압식 가동보의 월류유량계수는 상류흐름 조건이 상류일 때, 가동보의 높이 즉, 기립각도에 따른 물리적 제원과 상류 접근흐름수두의 조건에 의하여 결정되는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 개량형 공압식 가동보, 유량계수, 상대마루길이, 수위-유량 곡선

* (재)국제도시물정보과학연구원 연구원 (e-mail: 39lks@hanmail.net)

Member, Researcher, International Center for Urban Water Hydroinformatics Research&Innovation (ICUH), Incheon 406-840, Korea

** 교신저자, 한국교통대학교 토목공학과 부교수 (e-mail: cljang@ut.ac.kr, Tel: 82-43-841-5183)

Corresponding Author, Member, Associate Prof. Dept. of Civil Eng., Korea National University of Transportation, Chungju 380-702, Korea

*** 경성대학교 토목공학과 교수 (e-mail: njlee-ksu@hanmail.net)

Member, Prof. Dept. of Civil Eng., Kyungsung University, Busan 608-736, Korea

**** (재)국제도시물정보과학연구원 원장 (e-mail: hydrosys@chungbuk.ac.kr)

Director of a Research Center, ICUH, Incheon 406-840, Korea

1. 서 론

하천에서 보는 일반적으로 수위를 조절하거나 용수 공급 등 물을 이용할 목적으로 하천을 횡단하여 설치한다. 보는 높이가 고정된 고정보와 조절되는 가동보가 있다. 기존에 설치되어 있는 고정보는 콘크리트 형태로 보 하단에 흐름의 정체를 유발시켜 수질을 악화시키고 어류의 이동을 단절시키는 등 환경 문제를 일으키고, 보 상류에 토사의 퇴적에 의한 수위 상승으로 내수침수를 일으키는 등 치수적으로 문제를 일으키고 있다. 최근에는 하천환경에 대한 관심이 늘어나면서 고정보의 문제점을 보완하기 위하여 다양한 방식의 가동보가 개발되고 있다. 그 중 국내 중·소하천에 설치되고 있는 가동보의 주요 방식은 크게 개량형 공압식 가동보, 고무보, 유압식 가동보, 유선형자동보로 분류된다. 그러나 이러한 가동보에 대한 흐름특성 및 정확한 유량을 추정하기 위한 유량계수 산정에 대한 연구가 거의 진행되고 있지 않으며, 실제 현장에서 적용 가능한 가동보의 설계 및 월류량을 추정하는데 많은 한계가 있다.

Govinda Rao and Muralidhar (1961)는 대칭인 제방형 위어에서 상하부 측면의 기울기가 1:1보다 작은 제형위어를 포함한 실험결과와 상대마루길이 및 상하부 측면 기울기 등의 영향을 고려하여 유량계수식을 제안하였다. Gebhardt et al. (2012)은 기존의 보에 비해 수리학적으로 최적화된 형상으로 인해 상·하류수위차를 줄일 수 있다고 알려진 Jambor weir에 대한 sill의 높이, 월류구간과 하류 조건 및 유량사이의 관계를 실험적 연구를 실시하였으며, Froude number와 sill의 높이를 통하여 배수효과를 추정할 수 있는 관계식을 개발하였다. 또한, Azimi and Rajaratnam (2013)은 Jambor weir의 침수흐름조건에서 유량계수를 예측하기 위한 공식을 제안하였다. Kabiri-samani and Javaheri (2012)는 Piano Key weir의 형상에 대한 효과를 분석하기 위하여 수리실험을 실시하였으며, 자유 및 잠김 흐름에 대한 유량계수식을 제시하였다. 또한 최대 유량 효율을 발생할 수 있는 매개변수의 최적값을 분석하였다.

위어는 대표적인 흐름조절 구조물로서, 위어의 기하 제원과 상류 수위를 알면 유량을 알 수 있기 때문에 19세기부터 현장에서 흐름 조절은 물론 실험실에서 유량 측정용으로 널리 사용되어 왔다. 위어는 끝이 날카로운 예연 위어와 바닥이 높고 넓은 광정 위어로 크게 나눌 수 있다. 위어의 유량과 수위와의 관계는 기본적으로 에너지 방정식에서 얻어지며, 여기서 경험적 계수를 고려하여 확정된다. 위어에서의 유량은 하폭, 위어의 개방도, 상·하류수위

의 영향을 받는다. 위어의 개방도와 상·하류수위에 대한 연구는 활발하나 위어의 물리적 제원에 의한 영향과 상류 접근흐름수두에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 유량과 수심, 개방도, 상·하류수위차, 위어의 물리적 제원, 상류 접근흐름수두 등 무차원 변수들과 유량계수와 상·하류수위차의 상관관계 분석을 통하여 적합한 관계식을 산정하기 위하여 국내 중·소하천에 가장 많이 설치되어 있는 개량형 공압식 가동보(Improved-Pneumatic-Movable weir; IPM weir)를 선정하였다. 개량형 공압식 가동보는 기존의 가동보에 비하여 다음과 같은 특징을 가지고 있다. 첫째, 철판패널이 에어백을 보호하고 있어 내구성이 좋다. 둘째, 홍수 시 초음파 수위감지계를 통해 자동 전도되어 수위상승 영향이 없으며, 각도에 의한 수위 조절이 가능하다. 셋째, 중간 구조물(pier)없이 통수단면적 확보가 가능하며, 퇴적된 토사를 배출가능하다. 넷째, 저층수 배출장치를 통해 저층수를 배출함으로써 수질 악화 방지효과가 있다. 본 연구에서는 가동보의 월류 흐름특성을 연구한 것으로, 저층수 배출장치의 영향은 고려하지 않았다.

2. 상사법칙 및 유량계수 산정식

2.1 상사법칙

다양한 실험조건에 대한 수위-유량관계곡선식을 개발하고 수리학적 특성을 분석하기 위하여, Froude 상사법칙에 따라 흐름에 영향을 주는 주요 매개변수에 흐름특성을 분석하였다. Froude 상사법칙은 하천의 흐름과 같이 하천, 개수로 흐름, 댐의 여수로 등 중력이 주로 지배하는 경우 적용한다. Froude 법칙에서 역학적 상사법칙은 원형과 모형의 Froude number가 같아야하며, 다음 Eq. (1)과 같이 성립한다.

$$\frac{V}{\sqrt{gL}} = \frac{\text{관성력(inertia force)}}{\text{중력(gravity force)}} = 1, \text{ 즉 (Froude number)r=1} \quad (1)$$

여기서, g 는 중력(m/s^2), V 는 유속(m/s), L 은 길이(m)다. 이때, $g = 1$ 이다.

2.2 차원해석

직사각형 위어의 일반적인 유량공식은 다음 Eq. (2)와 같다.

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} y_c^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

여기서, Q 는 유량(m^3/s), C_d 는 유량계수, y_c 는 위어의 월류높이(m), 즉, 위어 마루를 월류하는 수심이다. 개량형 공압식 가동보의 기하학적 매개변수에서 W 는 위어높이(m), L 는 위어길이(m), α 는 보의 기립각도($^\circ$), H_1 는 상류수두(m)이며, ξ 는 상대마루길이(relative crest length, $\xi = (H_1 - W)/(H_1 - W + L)$), 유체매개변수에서 ρ 는 밀도(kg/m^3), σ 는 표면장력(N/m), μ 는 동점성계수(m^2/s)이다(Figs. 1 and 2). 유량계수(C_d)는 보의 월류량 산정에 큰 영향을 미치며, 월류흐름에 대한 개량형 공압식 가동보의 유량은 다음 Eq. (3)으로 표현할 수 있다(Kabiri-samani and Javaheri, 2012). 본 연구에서는 상·하류수심에 대한 영향인자를 고려하기 위해 차원해석을 적용하였으며, 차원해석은 Buckingham의 π 정리에 의하여 수행하였다.

$$Q = f(W, H_1, L, \xi, y_1, y_c, y_2, \Delta y, \rho, \sigma, \mu) \quad (3)$$

여기서, f 는 함수기호이며, y_1 과 y_2 는 각각 상·하류 수심(m), Δy 는 상·하류 수심의 차이를 나타낸다. 차원해석을 통해 C_d 에 영향을 미치는 인자는 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_d = f\left(\frac{L}{W}, \frac{H_1}{W}, \frac{\Delta y}{y_2}, \frac{y_c}{y_1}, \frac{y_c}{y_2}, \xi, y_c F_{r1}, W_e, R_e\right) \quad (4)$$

$W_e = (\rho H/\sigma)^{0.5} Q/[(H+P)W]$ 와 $R_e = \rho QH/[(H+P)W\mu]$ 는 각각 Weber number와 Reynolds number이다. 모든 실험은 $H > 30 \text{ mm}$ 으로, 표면장력의 효과가 작은 경우 W_e 는 분석에서 제외된다(Novak and Cabelka, 1981). 또한, 흐름이 난류 때문에, 점성효과는 중력효과와 비교하여 작다(Henderson, 1966). 따라서 R_e 는 생략되며 Eq. (4)는 Eq. (5)와 같이 나타 낼 수 있다.

$$C_d = f\left(\frac{L}{W}, \frac{H_1}{W}, \frac{\Delta y}{y_2}, \frac{y_c}{y_1}, \frac{y_c}{y_2}, \xi, y_c F_{r1}\right) \quad (5)$$

2.3 유량계수 산정식

유량계수 C_d 는 Henderson (1966)의 경험계수식을 이용하였다.

$$C_d = 0.611 + 0.08 \frac{H}{W} \quad (6)$$

여기서, H 는 유효수심(상류수면고와 위어 끝의 차, m)이다. 유량계수 C_d 는 엄밀하게는 $H/W < 5$ 에서 타당하며, 개략적으로 10 이내에서 쓸 수 있다. 그러나 $H/W < 15$ 에서는 위어는 사실상 바닥이 조금 튀어나온 턱(sill)이 되며, 이 경우 H 를 한계 수심으로 보고 유량을 산정할 수 있다.

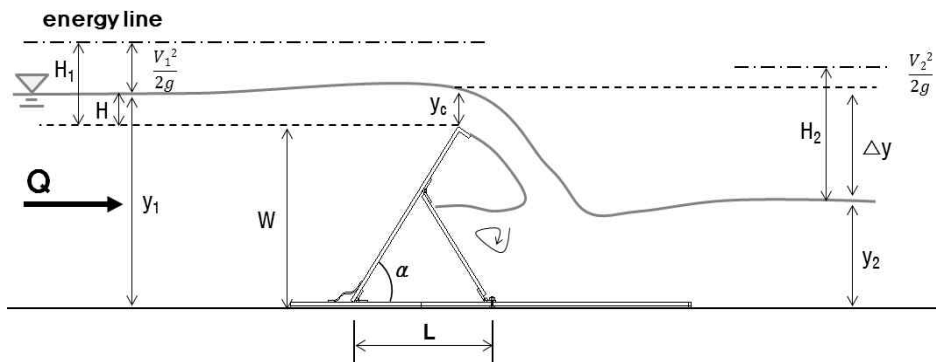
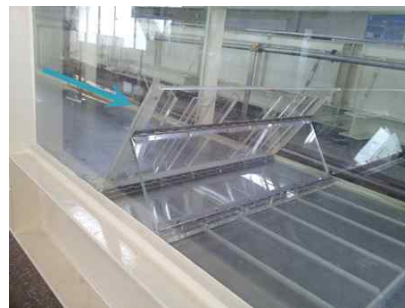


Fig. 1. Scheme of Improved-Pneumatic-Movable Weir for Experiments



(a) Front view



(b) Side view

Fig. 2. Installation View

본 연구에서는 $H/W < 5$ 조건에 만족하므로, Henderson (1966)의 유량계수식을 이용하였다.

3. 모형실험

본 연구에서 사용된 수리모형 실험장치의 제원은 Fig. 3에서 보여주는 것처럼 길이가 10m, 폭 0.6 m, 높이 0.5 m인 가변형 경사 수로를 이용하였으며, 하류단 수소에서 펌프를 이용하여 상류단 고수조로 물을 공급하는 순환형 시스템을 갖추고 있다. 개수로 장치는 벽면이 강화유리로 되어 실험이 진행되는 동안 흐름을 육안으로 관찰 할 수 있다. 또한, 수로하단으로부터 상단방향으로 2.3m지점에 전동유압식 Jack screw 1기가 설치되어 있다. 하류단 수위조건은 등류수심을 유지하였다. 수로경사는 Woo et al. (1994)에서 분석된 국내 중·소하천의 하상경사와 국내 하천정비기본계획 등 관련자료 조사를 통하여 가장 대표적인 하상경사인 1/1000, 1/750과 1/500로 3가지 조건을 선정하였으며, 가동보 기립각도를 4가지(30, 40, 50, 60°)로 구분하여 실험하였다. 가동보 모형은 고강도 아크릴로 제작하였으며 정수압에 견딜 수 있도록 설계 하였다. 바닥 부분은 볼트와 너트로 연결할 수 있도록 하여 각도조절에 따른 고정이가 가능하다. 또한 실험을 수행하는 중에 가동보의 기립각도의 변화에 의하여 수리학적 특성이 영향을 받지 않고 계측이 가능한 지점에 설치해야 한다. 따라서 상류에서 유입되는 유량이 완전 정류상태를 유지하고, 보에 의하여 발생하는 배수(backwater)의 영향이 상류 또는 정류수조에 미치는 범위와 하류단에서 수면형 유지를 위

하여 설치한 sluice gate에 의하여 배수 혹은 dropdown의 영향을 미치지 않는 지점을 파악하여 하류에서 1/3지점으로 하였다. 유량의 변화에 따라 상류 2m, 하류 1m 간격으로 point gage를 이용하여 수위를 측정하였다. 또한 실험의 정확성 및 신뢰성을 확보하기 위하여 각 실험을 3회 이상 반복하여 오차범위를 최소화 하였다. 본 연구에서 사용된 개량형 공압식 가동보 모형의 조건 및 제원은 Table 1과 같다.

3. 결과 및 분석

3.1 H-Q 측정결과

본 연구에서는 개량형 공압식 가동보의 월류량을 추정하기 위하여 실내실험을 통하여 수위-유량을 측정하였다. 유량은 0.8~11.7 l/s의 넓은 범위에서 실시하였으며, ± 0.1 mm의 정밀도를 가지는 point gauge를 이용하여 위어를 월류하는 위어 마루에서의 수심을 측정하였다. 흐름은 정류상태를 유지하기 위하여 고수조에 정류판을 설치하였으며, 5분 동안 흐름을 안정적으로 공급할 수 있는 상태에서 실험을 실시하였다. Fig. 4는 실험 전경이며, Fig. 5은 각 경사에 따른 수위-유량곡선을 보여주고 있다. Table 2는 수로경사와 기립각도에 따른 수위-유량 곡선식을 나타내고 있다.

3.2 월류흐름 특성 분석

본 연구에서 개량형 공압식 가동보의 유량계수에 영향을 미치는 무차원 변수를 분석하기 위해 실내실험을 실시

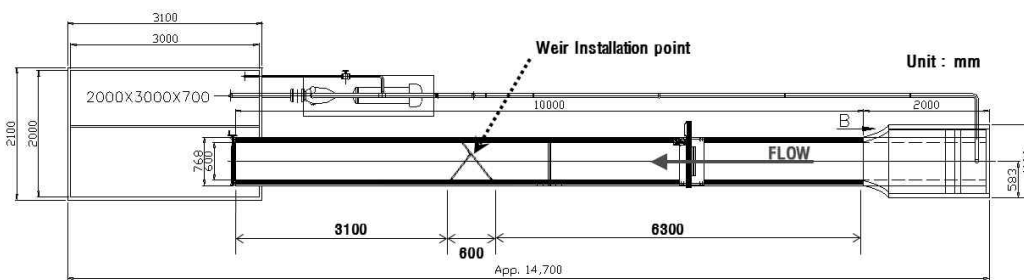
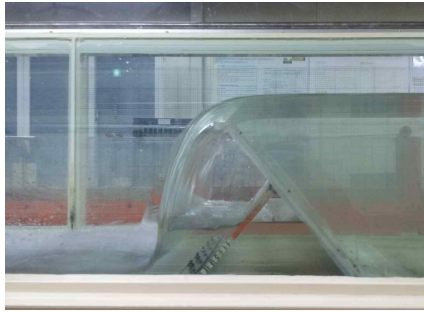


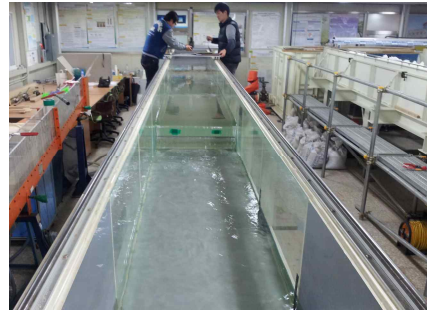
Fig. 3. Plan of Experimental Equipment

Table 1. Condition and Data Of Experimental Model

α (°)	W (m)	L (m)	L/W
30	0.161	0.348	2.16
40	0.207	0.308	1.49
50	0.250	0.263	1.05
60	0.276	0.199	0.72

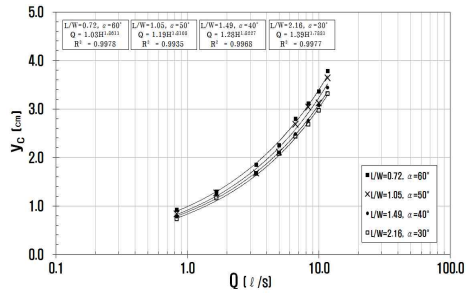


(a) side view

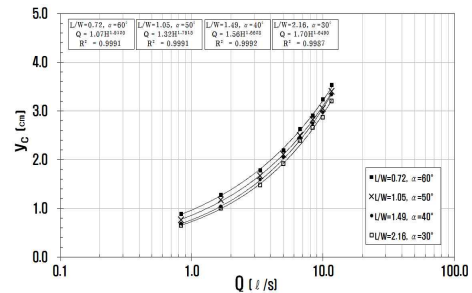


(b) front view

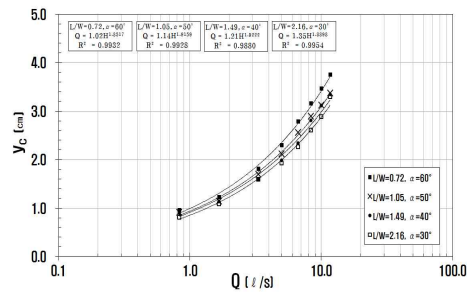
Fig. 4. Flows in the Experimental Flume



(a) Slope=1/500



(b) Slope=1/750



(c) Slope=1/1000

Fig. 5. Rating Curve at the Each Slope of the Weir

Table 2. Measurement Results at the Rating Curve

Division		L/W	Rating curve	R^2
Slope	α ($^\circ$)			
1/500	60	0.72	$Q = 1.03H^{1.8611}$	0.9978
	50	1.05	$Q = 1.19H^{1.8103}$	0.9935
	40	1.49	$Q = 1.28H^{1.8227}$	0.9968
	30	2.16	$Q = 1.39H^{1.7831}$	0.9977
1/750	60	0.72	$Q = 1.07H^{1.9120}$	0.9991
	50	1.05	$Q = 1.32H^{1.7915}$	0.9991
	40	1.49	$Q = 1.56H^{1.6628}$	0.9992
	30	2.16	$Q = 1.70H^{1.6490}$	0.9987
1/1000	60	0.72	$Q = 1.02H^{1.8517}$	0.9932
	50	1.05	$Q = 1.14H^{1.9159}$	0.9928
	40	1.49	$Q = 1.21H^{1.9222}$	0.9880
	30	2.16	$Q = 1.35H^{1.8898}$	0.9954

하였다. 또한, 보의 기립각도 또는 위어높이와 위어길이의 비(L/W)에 따라 분석하였다. 수행된 각 실험과 측정된 자료로부터 모든 실험 조건에 대하여 개량형 공압식 가동 보의 L/W 의 변화에 따른 월류유량계수(C_d)를 Eq. (6)을 이용하여 계산하였다. 계산된 유량계수는 상류 Froude number(Fr_1)와 C_d 를 연구한 모든 연구자들이 고려한 중요 변수이므로 상류 Froude number와의 상관관계를 확인하였다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 Fr_1 이 증가함에 따라 월류 유량계수가 선형적으로 증가함을 보였지만, 현 실험조건 하에서는 계산된 C_d 와 상류 Fr_1 사이에서 특별한 경향이 확인되지 않는 것으로 나타났다. 흐름범위는 $0.004 \leq Fr_1 \leq 0.09$ 에서 자유흐름 형태로 나타났다. 또한, 수중월류형태 일 때의 흐름의 범위는 월류수면에 부압되어 정확한 유량 측정이 불가능한 불완전월류 형태이므로, 정량적으로 유량측정을 할 수 없는 상태를 의미한다. 따라서 본 연구에서는 한계류가 형성되는 자유흐름 조건에서 실험을 수행하였으며, Kabiri-Samani and Javaheri (2012), Borghei et al. (1999), Govinda Rao and Muralidhar (1961), Gebhardt et al. (2012), Azimi and Rajaratnam (2013) 등 여러 연구자들에 의해서 주요 영향 변수로 결정되었고, 차원해석에 의해서 구한 다른 변수 L/W , H_1/W , $\Delta y/y_2$, y_d/y_2 , y_d/y_1 , ξ 를 주요 영향변수로 고려하여 C_d 의 변화를 검토하였다.

Fig. 7은 상대마루길이(ξ)에 따른 C_d 의 변화를 보여주

고 있으며, 상대마루길이가 증가함에 따라 C_d 가 선형적으로 증가함을 보였다. 흐름범위는 $0.03 \leq \xi \leq 0.19$ 와 $0.613 \leq C_d \leq 0.634$ 에서 자유흐름 형태로 나타났다. 또한, L/W 의 변화는 C_d 의 변화에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8은 전수두비(H_1/W)에 대한 C_d 의 변화를 보여주고 있다. H_1/W 는 위어의 높이에 대한 접근흐름수두의 영향을 반영하고, 일정한 접근흐름수두에 대한 위어 높이 편차의 영향을 나타낸다. 가장 작은 전수두비인 $H_1/W \leq 0.03$ 의 경우 보의 마루와 접촉되어 있으며, $0.03 < H_1/W \leq 0.30$ 의 범위에서 자유흐름 형태가 된다. 동일한 W 에서 H_1 을 감소시키면 C_d 를 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 또한, L/W 가 증가함에 따라서 C_d 가 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 9는 상·하류 수위차를 나타내는 $\Delta y/y_2$ 에 따른 C_d 의 변화를 보여주고 있으며, L/W 가 증가함에 따라 C_d 가 증가하는 경향을 보였다. 또한, $\Delta y/y_2$ 가 감소할수록 C_d 는 증가하여 반비례함을 알 수 있다. 흐름범위는 $0.55 \leq \Delta y/y_2 \leq 2.59$ 에서 자유흐름 형태를 나타냈다.

Fig. 10은 하류수심과 위어마루를 월류하는 수심의 비(y_d/y_2)에 따른 C_d 의 변화를 보여주고 있다. L/W 가 증가함에 따라 C_d 가 증가하는 경향을 보이며, y_d/y_2 가 증가할수록 C_d 는 증가하였다. 흐름범위는 $0.08 \leq y_d/y_2 \leq 0.32$ 에서 자유흐름 형태를 나타냈다. Fig. 11은 상류수심과 위어마루를 월류하는 수심의 비(y_d/y_1)에 따른 C_d 의 변화를

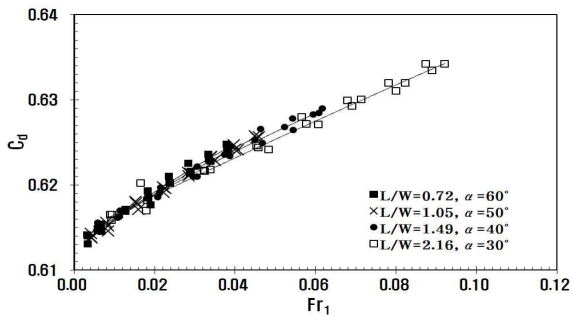


Fig. 6. C_d - Fr_1 Curve

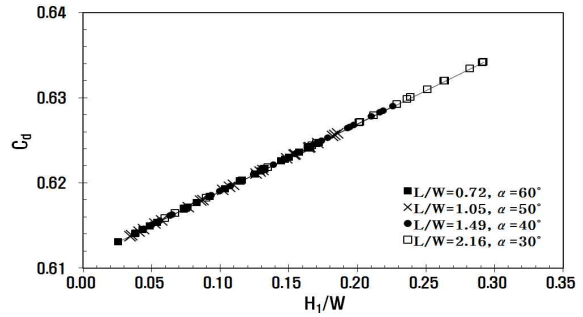


Fig. 8. C_d - H_1/W Curve

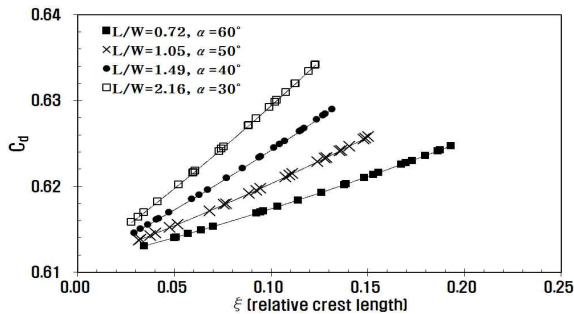


Fig. 7. C_d - ξ (relative crest length) Curve

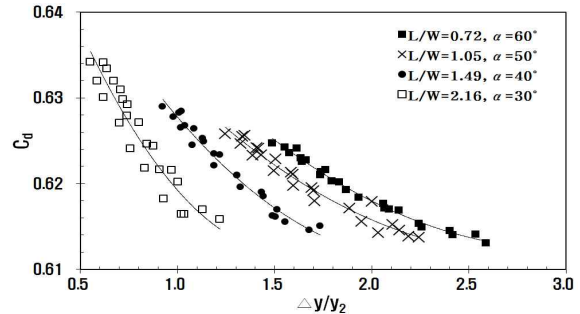


Fig. 9. C_d - $\Delta y/y_2$ Curve

보여주고 있다. L/W 가 증가함에 따라 C_d 가 증가하는 경향을 보이며, y_c/y_1 가 증가할수록 C_d 는 증가하였다. 흐름 범위는 $0.03 \leq y_c/y_1 \leq 0.16$ 에서 자유흐름 형태를 나타냈다. Fig. 12는 하류 Froude number (Fr_2)에 따른 C_d 의 변화를 보여주고 있다. L/W 가 증가함에 따라 C_d 가 증가하는 경향을 보이며, Fr_2 가 증가할수록 C_d 는 증가하였다. 흐름 범위는 $0.04 \leq Fr_2 \leq 0.27$ 에서 자유흐름 형태를 나타냈다.

Fig. 13은 하류 Froude number (Fr_2)에 따른 상·하류 수위차와 하류수심의 비($\Delta y/y_2$)에 대한 변화를 보여주고 있다. L/W 가 증가함에 따라 $\Delta y/y_2$ 는 감소하는 경향을 보였으며, Fr_2 가 증가할수록 $\Delta y/y_2$ 는 감소하였다. 흐름 범위는 $0.55 \leq \Delta y/y_2 \leq 2.59$, $0.04 \leq Fr_2 \leq 0.28$ 에서 자유흐름 형태를 나타냈다.

Fig. 14는 상류 Froude number(Fr_1)에 따른 상·하류

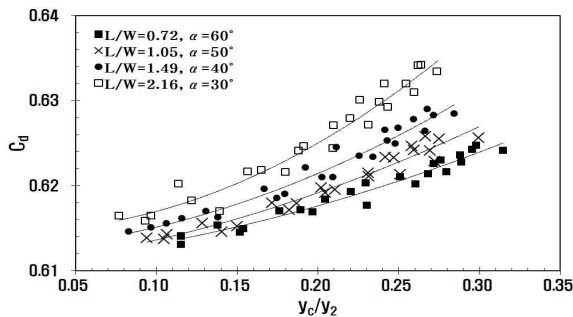


Fig. 10. $C_d - y_c/y_2$ Curve

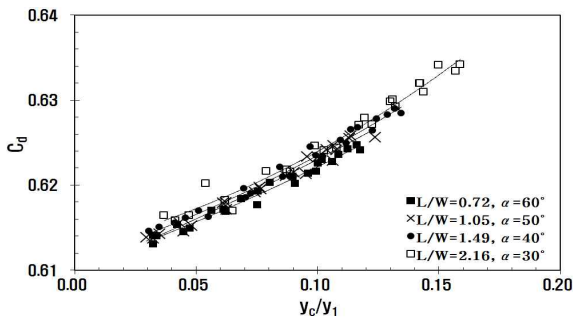


Fig. 11. $C_d - y_c/y_1$ curve

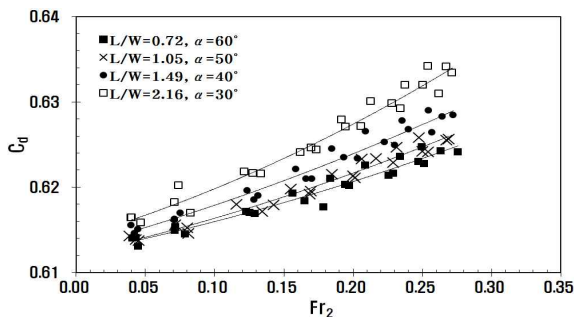


Fig. 12. $C_d - Fr_2$ curve

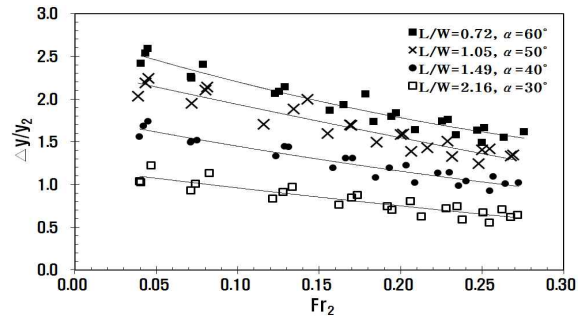


Fig. 13. $\Delta y/y_2 - Fr_2$ curve

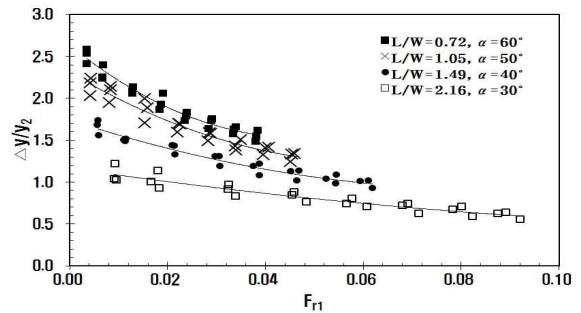


Fig. 14. $\Delta y/y_2 - Fr_1$ curve

수위차와 하류수심의 비($\Delta y/y_2$)의 변화를 보여주고 있다. L/W 가 증가함에 따라 $\Delta y/y_2$ 는 감소하는 경향을 보였으며, Fr_1 가 증가할수록 $\Delta y/y_2$ 는 감소하는 것으로 나타났다. 흐름 범위는 $0.55 \leq \Delta y/y_2 \leq 2.59$, $0.003 \leq Fr_1 \leq 0.09$ 에서 자유흐름 형태를 나타냈다. 따라서 Fr_2 와 Fr_1 가 증가할수록 상·하류 수위차는 줄어드는 것을 확인하였다.

3.3 유량계수식 제시

본 연구에서는 개랑형 공압식 가동보의 월류 흐름특성을 분석하기 위해 실내실험을 실시하였다. 비선형 다중회귀 분석으로 월류 유량계수 산정식을 제시하기 위하여 차원해석에서 선정된 주요 영향변수를 통하여 흐름특성 분석을 실시하였으며, 가동보의 기립각도에 따른 변화와 상류흐름과 관계된 Fr_1 , ξ , H_1/W , $\Delta y/y_2$, y_c/y_1 변수들이 유량계수에 미치는 영향력이 두드러지는 것으로 판단하였다. 따라서 이 변수들을 독립변수로 고려하였다.

기존의 대부분 연구자들은 단순회귀 분석에 의해 유량계수산정방법을 제안하였다. 단순 회귀분석을 통한 유량계수식은 각도별 유량계수를 산정하여 사용할 수 있으나, 각도의 변화에 따른 유량계수를 산정할 경우에는 각도 사이에 값을 보간하여 사용해야 한다. 본 연구에서는 이러한 제한성을 보완하고 다양한 현장여건 및 설계조건에 대해 정량적인 유량계수를 산정하기 위해 다중 회귀분석에

의한 유량계수식을 제시하였다. 즉, 가동보의 기립각도 변화에 따른 월류 유량계수를 직접적으로 산정하여 이용할 수 있다.

Table 3에서 나타낸 결과 값을 토대로 유의확률(p -value)과 표준화 계수를 분석하였다. 여기서, p -value는 본 연구에서 주요 영향변수로 선정한 무차원 변수들은 월류유량계수(C_d)에 “영향을 미치지 않을 것이다”라는 귀무가설이 맞을 경우, 표본에서 얻은 표본평균보다 대립가설 쪽의 값이 나올 확률이 얼마나 되는지를 나타낸 확률값이다. 즉, 독립변수의 꼬리면적으로 $p < 0.001$, $p < 0.01$, $p < 0.05$ 일 때 각각 대립가설의 채택확률이 99.9%, 99%, 95%를 나타낸다. 표준화 계수는 종속변수와 독립변수들의 점수체계를 동등화하기 위해 표준화된 변수들을 가지고 실시하는 회귀분석의 선형계수이다. 즉, 종속변수에 작용하는 독립변수에 대한 영향력을 비교할 수 있는 계수이다.

Table 3의 step 1에서 회귀방정식 결과를 보면, 독립변수 ξ , F_{r1} , H_1/W 에서 p -value는 0으로 나타났으며, 대립가설의 채택확률이 100%로 나타나 신뢰도가 높음을 알 수 있다. 그러나 $\Delta y/y_2$, y_c/y_1 에서는 p -value값이 각각 0.91, 0.131로 나타나 유의수준에서 벗어남을 알 수 있다. step 2에서는 유의수준에서 벗어나는 독립변수인 $\Delta y/y_2$, y_c/y_1 중 후진차분법에 의하여 $\Delta y/y_2$ 를 제거한 뒤 p -value를

분석한 결과 y_c/y_1 에서 p -value가 0.121로 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 따라서 step 3에서는 독립변수 ξ , F_{r1} , H_1/W 를 채택하여 회귀분석을 실시하였으며, 높은 신뢰도를 나타내어 ξ , F_{r1} , H_1/W 를 최적회귀방정식을 선택하기 위한 주요 영향 변수로 채택하였다. 따라서 주요영향 변수를 고려한 다중회귀분석에 의한 최적회귀방정식은 다음 Eq. (7)과 같이 결정된다.

$$C_d = 0.611 + 0.002\xi - 0.001F_{r1} + 0.078H_1/W \quad (7)$$

따라서 위의 결과로 판단하면 개량형 공압식 가동보는 상류흐름 조건의 영향과 가동보의 제원 및 L/W 에 의한 물리적 제원에 의한 영향이 더 커질 것으로 예상할 수 있다. 그러므로 상류흐름 조건이 상류일 때, 가동보의 높이 즉, 기립각도에 따른 물리적 제원과 상류 접근흐름수두의 조건에 의하여 결정되게 된다.

5. 결 론

본 연구에서는 실내실험을 통하여 개량형 공압식 가동보를 대상으로 다양한 유량 변화에 대하여 수로경사와 개량형 공압식 가동보의 기립각도를 조절함으로써 월류흐름 특성을 분석 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

Table 3. Result of Multiple Regression Analysis

Step	Regression equation	Non-standardized	Standardization	p -value
1	Constant	0.611	-	0.000
	$C_d = f(\xi)$	0.002	0.024	0.000
	$C_d = f(\Delta y/y_2)$	0.000	0.000	0.910
	$C_d = f(F_{r1})$	-0.002	-0.006	0.000
	$C_d = f(H_1/W)$	0.078	0.980	0.000
	$C_d = f(y_c/y_1)$	0.000	0.001	0.131
2	Constant	0.611	-	0.000
	$C_d = f(\xi)$	0.002	0.025	0.000
	$C_d = f(F_{r1})$	-0.002	-0.006	0.000
	$C_d = f(H_1/W)$	0.078	0.980	0.000
	$C_d = f(y_c/y_1)$	0.000	0.001	0.121
3	Constant	0.611	-	0.000
	$C_d = f(\xi)$	0.002	0.028	0.000
	$C_d = f(F_{r1})$	-0.001	-0.005	0.000
	$C_d = f(H_1/W)$	0.078	0.977	0.000

$p < 0.001$: 채택확률 99.9%, $p < 0.01$: 채택확률 99%, $p < 0.05$: 채택확률 95%

- 1) 개랑형 공압식 가동보의 월류유량계수(C_d)에 대한 주요 무차원 변수의 영향을 확인한 결과, 상류의 영향을 받는 인자가 증가하면 비례 관계로 증가하는 경향을 보였다. 그러나, 하류수심과 상·하류수위차 이 비($\Delta y/y_2$)가 증가하면 반비례 관계로 감소하였으며, 상·하류 Froude number인 F_{r1} 과 F_{r2} 가 증가하면서 $\Delta y/y_2$ 도 감소하였다.
- 2) 상류 Froude number(F_{r1})와 월류유량계수(C_d)와의 상관관계를 분석한 결과, F_{r1} 가 증가함에 따라 C_d 는 증가하지만, 기립각도에 따라서는 특별한 경향이 확인되지 않는 것으로 나타났다. 따라서 기존의 연구자들의 결과에 비해서 F_{r1} 의 중요도는 상대적으로 감소하였다. 또한, F_{r1} , 상대위어길이(ξ), 전수두비(H_1/W), 상류수심과 위어마루를 월류하는 수심의 비(y_0/y_1)는 상류의 영향을 받으며 하류 Froude number(F_{r2})와 하류수심과 위어마루를 월류하는 수심의 비(y_0/y_2)는 하류의 영향을 받아 변화하였다. 상·하류 수위차와 하류수심의 비($\Delta y/y_2$)는 상·하류 영향을 모두 받는 특성을 보여주었다.
- 3) 주요 영향변수를 고려하여 다중회귀분석에 의한 유량계수산정식을 도출하였으며, 개랑형 공압식 가동보의 월류 유량계수는 상류흐름 조건이 상류일 때, 가동보의 높이, 즉, 기립각도에 따른 물리적 제원과 상류 접근흐름수두의 조건에 의하여 결정되는 것으로 나타났다.

본 연구의 결과는 $F_{r1} < 0.09$ 로 제한된 결과일 수 있지만, 이후 개랑형 공압식 가동보의 제원 등 실험조건을 보완하여 지속적인 연구를 진행한다면 계산된 유량계수 산정식의 적용성을 확대할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(12기술혁신C02)에 의해 수행되었습니다.

References

- Azimi, A.H., and Rajaratnam, N. (2013). "Backwater effects of Jambor weir sill." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 51, No. 3, pp. 336-338.
- Borghei, S.M., Jalili, M.R., and Ghodsian, M. (1999). "Discharge Coefficient for Shape-Crested Side Weir in Subcritical Flow." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 10, pp. 1051-1056.
- Gebhardt, M., Pfrommer, U., Belzner, M., and Eisenhauer, N. (2012). "Backwater effects of Jambor weir sill." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 50, No. 3, pp. 344-349.
- Govinda Rao, N.S., and Muralidhar, D. (1961). "A new discharge formula for water-weirs (bye washes)." *Irrigation and Power*, Vol. 18, No. 10, pp. 908-917.
- Henderson, F.M. (1966). *Open Channel Flow*. The Macmillan Company, New York, 1966.
- Kabiri-Samani, A., and Javaheri, A. (2012). "Discharge coefficients for free and submerged flow over Piano Key weirs." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 50, No. 1, pp. 114-120.
- Novak, P., and Cabelka, J. (1981). *Models in hydraulic engineering*. Physical principles and design applications. Pitman Advanced Publishing Program, London, United Kingdom.
- Woo, H.S., Yu, K.K., and Park, J.K. (1994). "A Preliminary Study of the Hydraulic-Geometrical Relations of Bed Slope in Some Selected Alluvial Rivers." *Journal of Korean Geographical Society*, Vol. 29, No. 3, pp. 253-265.

paper number : 14-057

Received : 3 July 2014

Revised : 15 September 2014 / 30 September 2014

Accepted : 30 September 2014