



Analysis of submerged flow characteristics of the improved-pneumatic-movable weir through the laboratory experiments

Lee, Kyung Su^a · Jang, Chang-Lae^{b*} · Lee, Namjoo^c

^aNational Disaster Management Institute, Ulsan 44538, Korea

^bDept. of Civil Eng., Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea

^cDept. of Civil Eng., Kyungshung University, Busan 48434, Korea

Paper number: 16-031

Received: 18 March 2016; Revised: 7 June 2016 / 15 June 2016; Accepted: 15 June 2016

Abstract

This Study calculated the Submerged Flow Characteristics and Discharge coefficient by the rising angular change of the Improved-Pneumatic-Movable. According to the result, the smaller the ratio of weir height and weir length (L/W) or the weir standing angle, the bigger of the downstream head (H_2). The change of discharge reduction factor (Q_s/Q_1), by the hight from weir crest to downstream surface and the ratio form weir crest to upstream water height (h_t/H), was decreased when the h_t/H closed to number 1. Although the weir water depth of the down-stream was shallower level than the up-stream, the velocity was faster then before. And the more the flow, the less the gab between the upper and lower reaches level. And when the same flow condition, the downstream head (H_2) was increased when the L/W was bigger. The Submerged Flow Discharge coefficient of Improved-Pneumatic-Movable weir was made by the upstream approach flow head and the upper-lower stream flow condition, not by the physical data of Movable weir.

Keywords: Discharge Coefficient, Discharge Reduction Factor, Improved-Pneumatic-Movable Weir, Submerged Flow

개량형 공압식 가동보의 잠김흐름 특성 분석을 위한 실험연구

이경수^a · 장창래^{b*} · 이남주^c

^a국민안전처 국립재난안전연구원, ^b한국교통대학교 토목공학과, ^c경성대학교 토목공학과

요 지

본 연구에서는 개량형 공압식 가동보를 대상으로 가동보의 기립 각도변화에 따른 잠김흐름 특성을 분석하고 유량계수를 산정하였다. 실험결과, 위어마루에서 하류수면까지의 높이와 위어마루에서 상류 수면고 높이의 비(h_t/H)에 대한 유량감소계수(Q_s/Q_1)의 변화는 h_t/H 가 1에 가까울 수록 감소하였다. 따라서 보 하류에서의 수심은 상류보다 작지만 보를 통과하는 흐름으로 인해 하류 유속이 빠르게 나타났으며, 유량이 증가할수록 상·하류 수위차는 감소하는 것으로 나타났다. 또한 같은 유량조건인 경우 하류수두는 L/W 가 클수록 크게 증가하였다. 개량형 공압식 가동보의 잠김흐름 유량계수는 가동보의 물리적 제원보다는 상류 접근흐름수두와 상·하류 흐름조건에 의하여 결정되었다.

핵심용어: 개량형 공압식 가동보, 유량계수, 잠김일류흐름, 유량감소계수

1. 서 론

하천에서 수리구조물에 의하여 홍수피해 방지를 위해서는

흐름에 대한 정확한 수리학적 분석과 예측이 중요하다. 중·소 하천에서는 교량이나 보와 같은 하천을 횡단하는 수리구조물이 많이 건설되어 있으며, 하천에 설치되어 있는 수리구조물 중에서 가동보는 보의 높이를 조절하여 수위조절과 용수공급, 하천의 연속성 등 하천 환경을 개선하기 위하여 설치한다. 그러나 가동보가 설치된 하천의 흐름은 매우 복잡한 양상을

*Corresponding Author. Tel: +82-43-841-5183
E-mail: cljang@ut.ac.kr (C. -L. Jang)

나타내며, 수위, 유속, 유량 등 흐름 전반에 걸쳐 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 영향은 하천의 흐름특성을 지배하기 때문에 보다 정확한 수리학적 해석이 필요하다. 특히, 우리나라 강우 특성상 홍수기에는 보의 높이보다 수위가 높아지게 되어 잠김흐름(Submerged flow)이 발생할 수도 있으며, 운영상 가동보를 도복시키는 경우가 있다. 가동보의 유량계수 산정에 관한 연구는 대부분 월류수맥(nappe)의 위·아래면에 대기압이 작용되는 완전월류흐름(Free flow)에 대한 것이 대부분이며, 잠김흐름이 발생하는 경우에 유량계수 산정에는 어려움이 있다. 잠김흐름에 대한 정확한 유량의 산정은 중소하천에서 홍수기에 하천유량을 산정하고, 하천을 유지관리하기 위하여 매우 중요하다. 따라서 잠김흐름은 침두 홍수량에 도달했을 경우 홍수조절효과에 영향을 미칠 수 있기 때문에 이를 충분히 고려한 연구가 필요하다.

가동보의 잠김흐름 특성 분석을 위하여 많은 연구가 진행되어 왔다. Kirkpatrick (1957)은 Ogee crest 위어에 수직 lift gate를 대상으로 하류수위(tailwater)가 위어마루를 초과 할 때까지 잠김흐름이 발생하지 않으며, 하류수위의 증가로 점점 상류수심에 도달하는 것을 발견했다. Villemonte (1947)는 예언위어(Sharp-crested linear weir)의 유량감소계수(flow reduction factor, Q_s/Q_1)를 기초로 잠김흐름 특성을 분석하였다. Kabiri-samani and Javaheri (2012)는 Piano Key 위어의 형상에 대한 흐름특성을 분석하기 위하여 수리실험을 실시

하였으며, 자유 및 잠김흐름에 대한 유량계수식을 제시하였다. Tullis et al. (2007), Taylor (1968)와 Falvey (2003)는 Villemonte (1947)의 잠김흐름에 대한 유량감소계수(Q_s/Q_1)를 Labyrinth 위어에 적용하여 수두-유량관계를 제시하였다. 현재까지 예언위어, Labyrinth 위어, Piano Key 위어, Ogee crest 위어 등의 위어의 형상을 동역학 적으로 설계한 고정보의 잠김흐름에 대한 연구는 있으나, 국내하천에 설치되어 있는 가동보의 잠김흐름 특성 분석 및 유량계수 산정에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 실내실험을 이용하여 국내 중·소하천에 가장 많이 설치되어 있는 개량형 공압식 가동보(Improved-Pneumatic-Movable weir, IPM weir)를 이용하여 각도변화에 따른 다양한 잠김흐름을 재현하면서 가동보의 유량계수를 산정하고 흐름특성을 분석하였다.

2. 차원해석 및 유량계수 산정식

2.1 차원해석

다양한 실험조건에 대해 잠김흐름 특성을 분석하기 위하여 Lee et al. (2014)와 같이 Froude 상사법칙에 따라 흐름에 영향을 주는 주요 매개변수를 고려하였다. 직사각형 위어의 일반적인 유량공식은 다음 Eq. (1)과 같다.

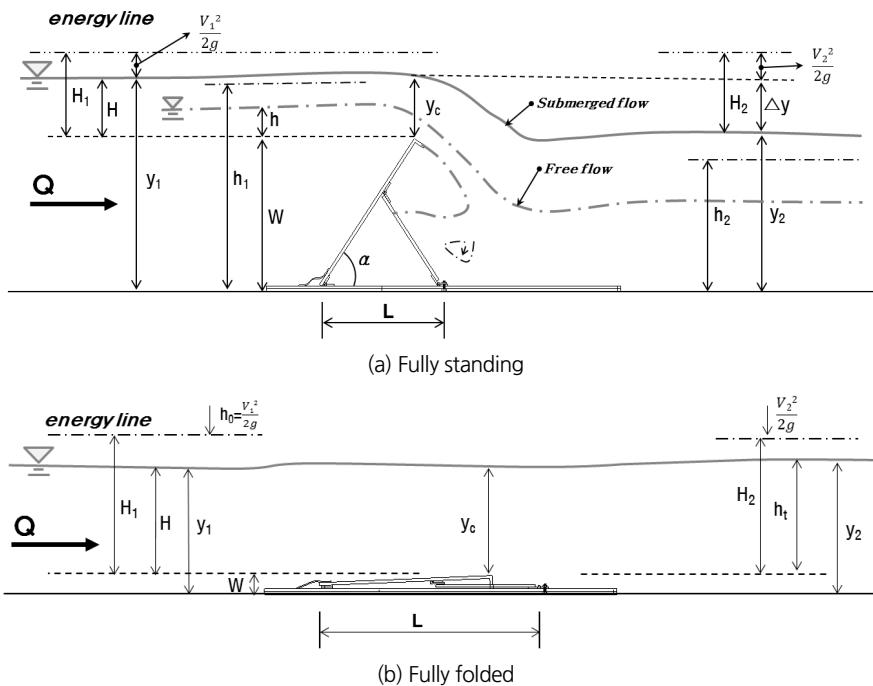


Fig. 1. Scheme of Improved-Pneumatic-Movable weir for experiments

$$Q = \frac{2}{3} C_d b \sqrt{2g} y_c^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

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 위어 길이(m)이다. α 는 보의 기립각도($^\circ$), H_1 는 상류수두(m)이다. ξ 는 상대마루길이(relative crest length) $\xi = (H_1 - W) / (H_1 - W + L)$, 유체매개변수에서 ρ 는 밀도(kg/m^3)이다. σ 는 표면장력(N/m), μ 는 동점성계수(m^2/s)이다(Fig. 1). 본 연구에서는 상·하류수심에 대한 영향인자를 고려하기 위해 Lee et al. (2014)과 같이 차원해석을 적용하였으며, 차원해석은 Buckingham의 π 정리에 의하여 수행하였다. 월류량 산정에 큰 영향을 미치는 가동보의 유량계수(C_d)는 다음 Eq. (2)로 표현할 수 있다.

$$C_d = f\left(\frac{L}{W}, \frac{H_1}{W}, \frac{\Delta y}{y_2}, \frac{y_c}{y_1}, \frac{y_c}{y_2}, \xi, y_c, Fr_1\right) \quad (2)$$

여기서, f 는 함수기호이며, y_1 과 y_2 는 각각 상·하류 수심(m)이다. Δy 는 상·하류 수심의 차이를 나타낸다. 하류수위(tail water)가 위어마루높이를 초과하면, 잠김흐름이 발생하여 주어진 유량에서 상류수두(upstream head)가 증가한다. Fteley and Stearns (1883), Francis (1884), Bazin (1894), Cox (1928)와 Villemonte (1947)를 포함한 다양한 연구자들이, 잠김비(h_t/H)의 함수로서 위어에 대한 유량감소계수(flow reduction factor, Q_s/Q_1)를 기초로 잠김흐름 특성을 연구하였다. Fig. 2에서 보여주는 것처럼 Villemonte (1947)와 Tullis et al. (2007)는 잠김흐름을 규명하기 위하여 중첩원리(Superposition principle)를 적용하였다. 잠김흐름 유량(Q_s , m^3/s)은 선형결합으로 상류 타관두(H , driving head)와 관련된 유량(Q_1 , m^3/s)과 하류 타관두(h_t)와 관련된 유량(Q_2 , m^3/s)의 차이와 동일하

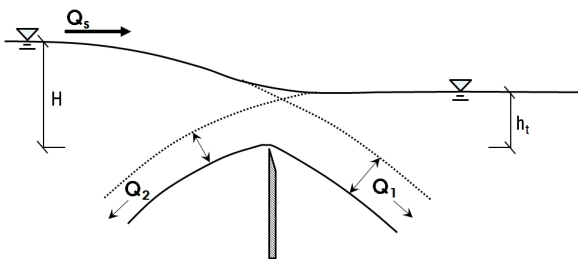


Fig. 2. Submerged weir flow superposition assumption(Villemonte 1947; Tullis et al., 2007)

고, 양방향 흐름에 대해서 유량계수가 일정하다고 가정한 것이다. Villemonte (1947)는 Eq. (5)와 같이 예언위어의 잠김흐름에 대한 유량감소계수를 계산하기 위한 경험식을 제시하였으며, 본 연구에서는 개량형 공압식 가동보를 대상으로 유량감소계수를 계산하였다.

$$Q_s = Q_1 - Q_2 \quad (3)$$

$$\frac{Q_s}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad (4)$$

$$\frac{Q_s}{Q_1} = \left(1 - \frac{y_2^{3/2}}{y_1^{3/2}}\right)^{0.385} \quad (5)$$

여기서, y_1 는 상류수심(m), y_2 는 하류수심(m)이고, 지수 0.385는 다양한 잠김흐름 실험 결과에 의해 결정되었다(Villemonte, 1947).

2.2 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 한계수심으로 보고 유량을 산정할 수 있다. 본 연구에서는 $H/W < 5$ 조건에 만족하므로, Henderson (1966)의 유량계수식을 이용하였다.

3. 실험조건 및 방법

본 연구에서 사용된 수리모형 실험장치의 제원은 Lee et al. (2014)이 개량형 공압식 가동보의 자유흐름 특성 분석을 위하여 이용한 길이 10 m, 폭 0.6 m, 높이 0.5 m인 가변형 경사수로를 이용하였다. 실험장치의 제원은 Lee et al. (2014)에 의해 자세히 설명되어 있다. 수로경사는 Woo et al. (1994)에서 분석된 국내 중·소하천의 하상경사와 국내 하천정비기본계획

Table 1. Experimental Condition

$\alpha(^{\circ})$	$W(m)$	$L(m)$	L/W
8	0.041	0.382	9.40
15	0.088	0.377	4.32
20	0.113	0.371	3.29
30	0.161	0.348	2.16

등 관련자료 조사를 통하여 가장 대표적인 하상경사인 1/500, 1/750, 1/1000과 1/2000로 4가지 조건을 선정하였으며, 가동보 기립각도를 4가지(완전도복인 8, 15, 20, 30°)로 구분하여 실험하였다. Lee et al. (2014)에서와 같이 보에 의하여 발생하는 배수(backwater)의 영향과 하류단에서 수면형 유지 등을 고려하여 잠김흐름 특성 분석을 위한 가동보의 기립각도를 결정하였으며, 가동보의 설치지점은 하류에서 1/3지점으로 하였다. 본 연구에서 사용된 개량형 공압식 가동보 모형의 조건 및 제원은 Table 1과 같다.

실험 방법은 보의 기립각도 또는 위어높이와 위어길이의 비(L/W)에 따라 분석하였다. 유량은 하류단 수조에서 상류단 고수조로 연결된 유량공급배관의 밸브 조절을 통해 0.001~0.012 m³/s의 범위에서 실시하였다. 또한 유량의 변화에 따라 상류 2 m, 하류 1 m 간격으로 ±0.1 mm의 정밀도를 가지는 point gauge를 이용하여 수위를 측정하였다. 하류단 수위는 수로의 하류단에서 수면형 유지를 위하여 설치한 sluice gate를 이용하여 등류수심 조건을 유지하였다. 흐름은 정류상태를 유지하기 위하여 고수조에 정류판을 설치하였으며, 5분 동안 흐름을 안정적으로 공급할 수 있는 상태에서 실험을 실시하였다. 실험의 정확성 및 신뢰성을 확보하기 위하여 각 실험을 3회 이상 반복하여 오차범위를 최소화 하였다.

4. 결과 및 분석

4.1 흐름 특성 분석

본 연구에서 개량형 공압식 가동보의 유량계수에 영향을 미치는 무차원 변수를 분석하기 위해 실내실험을 실시하였다. Eq. (1)을 이용하여 계산된 유량과 Eq. (7)에 의해 접근흐름을 고려한 측정된 유량 비교를 통하여 측정된 유량계수에 대한 정확도를 검증하였다. 여기서, y_c 는 위어 마루를 통과하는 월류수심(m)이며, point gauge로 측정하였다. V_1 은 상류 유속(m/s)이며, 위어로부터 상류 2 m지점에서 유속을 측정하였다. b 는 위어의 폭(m)이다. 유량계수(C_d)는 Eq. (6)을 이용하여 계산하였다. Fig. 3에서 보여주는 것처럼 계산된 유량계수

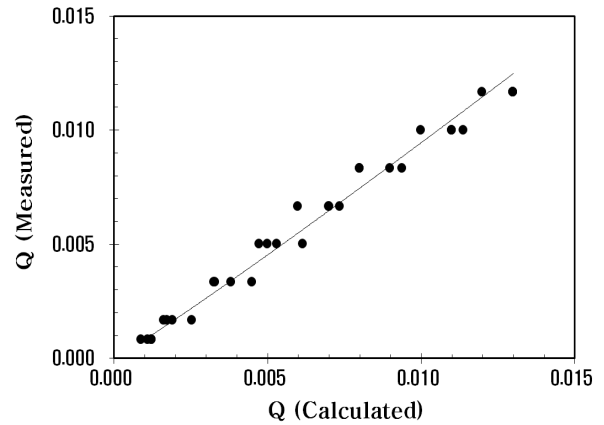


Fig. 3. Comparison of Measured and Calculated Discharge

와 측정된 유량계수는 잘 일치하였다.

$$\begin{aligned}
 Q &= \int_A dQ = C_d b \sqrt{2g} \int_0^{H_1} \left(y_1 + \alpha \frac{V_1^2}{2g} \right)^{\frac{1}{2}} dy_1 \\
 &= \frac{2}{3} C_d b \sqrt{2g} \left[\left(y_1 + \frac{\alpha V_1^2}{2g} \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\alpha \frac{V_1^2}{2g} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (7)
 \end{aligned}$$

잠김흐름에 대한 실험은 다양한 유량 및 가동보의 기립각도의 변화에 대해 수행하였다. Fig. 4는 전수두비(H_1/W)에 대한 위어를 통과하는 유량계수(C_d)의 변화를 보여주고 있다. H_1/W 는 위어의 높이에 의한 접근흐름수두의 영향을 4반영하고, 일정한 접근흐름수두에 대한 위어 높이 편차를 나타낸다(Lee et al., 2014). 가장 작은 전수두비 $H_1/W \leq 0.05$ 의 경우, 월류수맥(nappe)은 자유가 되며 위어마루에서 분리된다. $0.05 \leq H_1/W \leq 1.35$ 가 되면, 완전히 잠김흐름 형태가 된다. 또한 Machiels et al. (2011a)의 연구에서도 $H_1/W \leq 0.05$ 에서 월류수맥이 형성되어 자유흐름 형태를 나타냈다. 동일한 W 에서 상류수두(H_1)가 증가하면 C_d 가 증가하였다. 즉, 접근유속이 증가할수록 C_d 는 증가하는 것으로 나타났다. L/W 가 증가함에 따라 C_d 는 증가하였으며, 가동보가 완전 도복이 될수록 C_d 는 증가하였다. 이러한 결과는 Ouamane and Lemperiere (2006), Kabiri-samani and Javaheri (2012)와 Lee et al. (2014)의 결과에서도 동일하게 나타났다.

Fig. 5는 상류 Froude number (Fr_1)와 C_d 의 상관관계를 보여주고 있다. Fr_1 이 증가함에 따라 C_d 가 선형적으로 증가함을 보였다. 흐름범위는 $0.009 \leq Fr_1 \leq 0.455, 0.615 \leq C_d \leq 0.715$ 으로 나타났다. Fig. 6은 상대마루길이(ξ)에 따른 C_d 의 변화를 보여주고 있으며, ξ 가 증가함에 따라 C_d 가 선형적으로 증

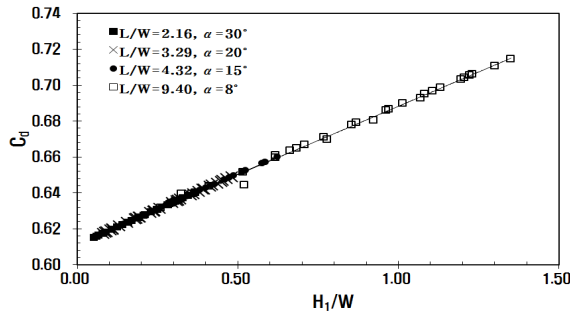


Fig. 4. C_d - H_1/W Curve

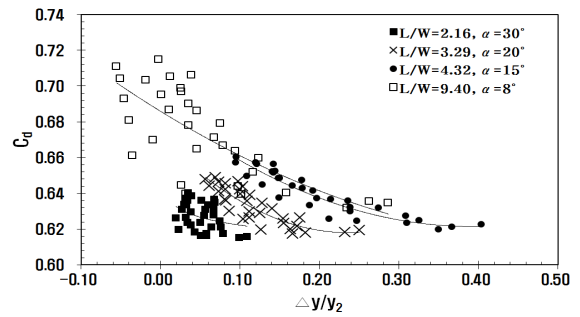


Fig. 7. C_d - $\Delta y/y_2$ Curve

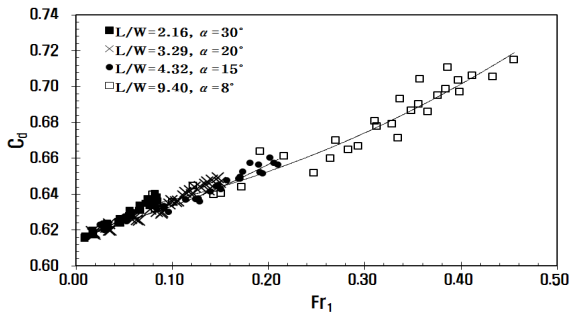


Fig. 5. C_d - Fr_1 Curve

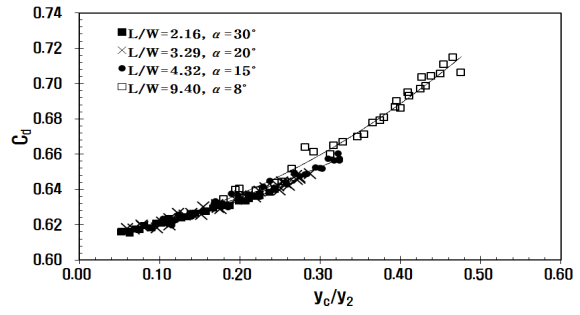


Fig. 8. C_d - y_c/y_2 Curve

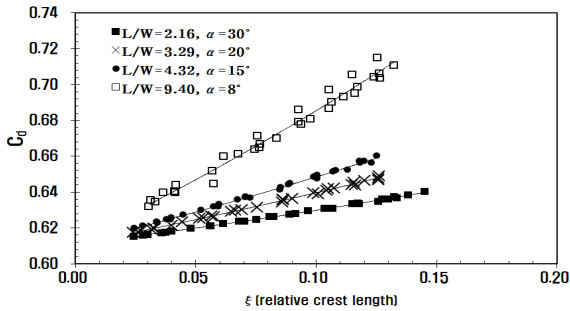


Fig. 6. C_d - ξ Curve

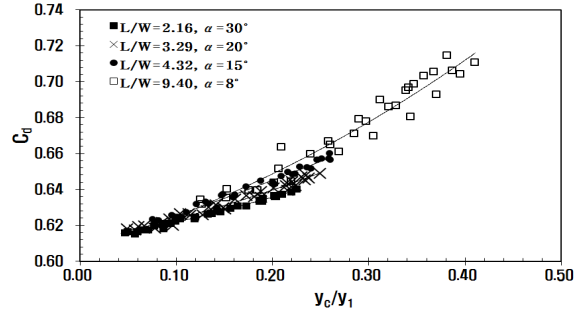


Fig. 9. C_d - y_c/y_1 Curve

가함을 보였다. 흐름범위는 $0.024 \leq \xi \leq 0.145$ 와 $0.615 \leq C_d \leq 0.715$ 로 나타났으며, L/W 의 변화는 C_d 의 변화에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7은 상·하류 수위차를 나타내는 $\Delta y/y_2$ 에 따른 C_d 의 변화를 보여주고 있다. 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 $-0.06 \leq \Delta y/y_2 \leq 0.4$ 에서 잠김흐름 형태를 나타냈다.

Fig. 8은 하류수심과 위어마루를 월류하는 수심의 비 (y_c/y_2)에 따른 C_d 의 변화를 보여주고 있다. 가동보가 완전도복 조건이 아닌 $L/W=2.16, 3.29, 4.32$ 에서는 L/W 에 대한 C_d 의 변화가 크지 않고 흐름이 $C_d \leq 0.66$ 범위에서 나타났다. 반

면에 완전도복 조건인 $L/W=9.40$ 에서 C_d 는 최대 0.715까지 상승하는 것으로 나타났다. 흐름범위는 $0.053 \leq y_c/y_2 \leq 0.476$ 에서 잠김흐름 형태를 나타냈다. Fig. 9는 상류수심과 위어마루를 월류하는 수심의 비 (y_c/y_1)에 따른 C_d 의 변화를 보여주고 있다. L/W 가 증가함에 따라 C_d 가 증가하는 경향을 보이며, y_c/y_1 가 증가할수록 C_d 는 증가하였다. 흐름범위는 $0.049 \leq y_c/y_1 \leq 0.411$ 에서 잠김흐름 형태를 나타냈다. Fig. 10은 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. 흐름범위는 $0.011 \leq Fr_2 \leq 0.679$ 에서 잠김흐름 형태를 나타냈다. Fig. 11은 상류

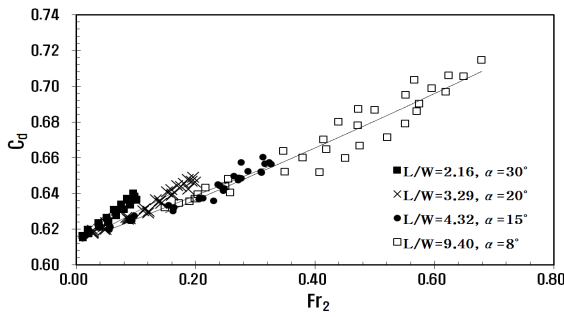


Fig. 10. C_d - Fr_2 Curve

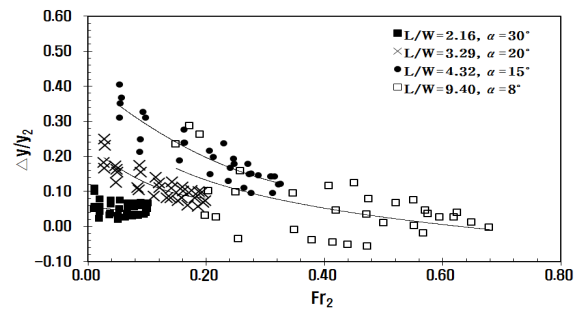


Fig. 12. $\Delta y/y_2$ - Fr_2 Curve

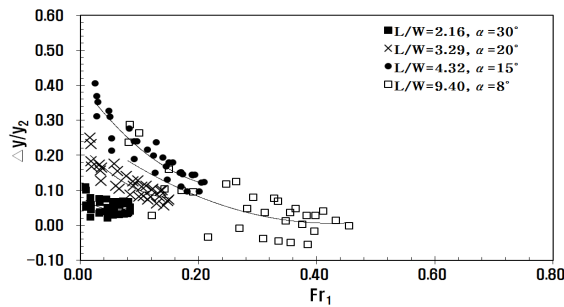


Fig. 11. $\Delta y/y_2$ - Fr_1 Curve

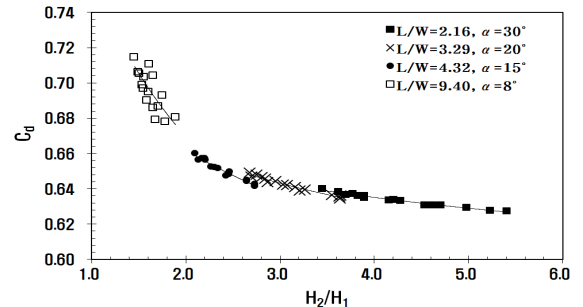


Fig. 13. C_d - H_2/H_1 Curve

Froude number (Fr_1)에 따른 상·하류 수위차와 하류수심의 비($\Delta y/y_2$)의 변화를 보여주고 있다. 가동보가 완전도복 조건이 아닌 $L/W=2.16, 3.29, 4.32$ 에서는 L/W 가 증가함에 따라 $\Delta y/y_2$ 는 증가하는 경향을 보였으며, 완전도복 조건인 $L/W=9.40$ 에서는 $L/W=4.32$ 조건보다 $\Delta y/y_2$ 는 감소하였다. 이것은 가동보가 완전 도복으로 수로의 연속성이 확보되면서 상·하류 수위차가 줄어들고, 유량조건에 따라 유속의 증가가 비례하기 때문으로 판단된다. 또한 Fr_1 가 증가할수록 $\Delta y/y_2$ 는 감소하였으며, 흐름범위는 $-0.06 \leq \Delta y/y_2 \leq 0.40, 0.009 \leq Fr_1 \leq 0.455$ 에서 잠김흐름 형태를 나타냈다. Fig. 12는 하류 Froude number (Fr_2)에 따른 상·하류 수위차와 하류수심의 비($\Delta y/y_2$)에 대한 변화를 보여주고 있다. 가동보가 완전도복 조건이 아닌 $L/W=2.16, 3.29, 4.32$ 에서는 L/W 가 증가함에 따라 $\Delta y/y_2$ 는 증가하는 경향을 보였다. 완전도복 조건인 $L/W=9.40$ 에서는 수로의 연속성이 확보되면서 $L/W=4.32$ 조건보다 $\Delta y/y_2$ 는 감소하였다. 흐름범위는 $-0.06 \leq \Delta y/y_2 \leq 0.40, 0.011 \leq Fr_2 \leq 0.679$ 에서 잠김흐름 형태를 나타냈다. 따라서 Fr_2 와 Fr_1 가 증가할수록 상·하류 수위차는 줄어드는 것을 확인하였다.

Fig. 13은 잠김흐름 일 때의 하류수두와 상류수두의 비 (H_2/H_1)에 따른 C_d 의 변화를 보여주고 있다. L/W 가 증가함

에 따라 C_d 가 증가하며, H_2/H_1 가 증가할수록 C_d 는 감소하였다. 따라서 가동보가 완전도복 조건이 아닌 $L/W=2.16, 3.29, 4.32$ 인 경우 보다는 완전도복 조건인 $L/W=9.40$ 에서 상·하류 수두차가 감소하며, 속도수두와 위치수두가 점점 일치한다. Δy 가 줄어들면서 일정한 수면형을 유지하고 C_d 는 증가한다. 또한, 잠김흐름에서 L/W 가 작을수록 하류수두(H_2)가 큰 것으로 나타났다. 이것은 보 하류에서의 수심은 상류보다 작지만, 보를 통과하는 흐름으로 인해 하류유속이 더 빠른 것을 의미한다.

Fig. 14는 위어마루에서 하류수면까지의 높이와 위어마루에서 상류수면까지의 높이의 비(h_i/H)에 대한 유량감소계수 (Q_s/Q_1)의 변화를 보여주고 있다. 또한 Villemonte (1947)와 Tullis et al. (2007)의 결과와 비교하였다. Q_s/Q_1 는 Villemonte (1947), Tullis (2007)와 Felvey (2003)에 의해서 잠김흐름 특성에 대한 주요 영향변수로 분석하였다. 본 연구에서 h_i/H 는 0.83이하인 조건에서 실험을 수행하였으며 h_i/H 가 1에 가까울수록 유량감소계수가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한 동일한 h_i/H 에서 Villemonte (1947)와 Tullis et al. (2007)의 결과와 매우 잘 일치하는 경향을 보여주고 있다. 즉, 유량이 증가할수록 상·하류 수위차는 줄어드는 것을 의미한다.

Fig. 15는 잠김흐름일 때 하류수두 대 자유흐름일 때 상류

수두(H_2/h_1)에 대한 잠김흐름일 때 상류수두대 자유흐름일 때 상류수두(H_1/h_1)의 변화를 보여주고 있다. Tullis et al. (2007)는 Labyrinth 위어와 예언위어의 잠김흐름 특성을 규명하기 위하여 $H_1/h_1 = f(H_2/h_1)$ 의 관계를 분석하였다. 여기서, 유량은 자유흐름 상태에 대해 결정된 상류수위 측정과 상류수두를 계산하여 h_1 을 결정하였으며, 잠김흐름조건 일 때 상류 및 하류수두인 H_1 과 H_2 에 대하여 측정하였다. 같은 유량조건인 경우 하류수두는 L/W 가 클수록 크게 증가하였다. 가동보가 완전도복 조건이 아닌 $L/W=2.16, 3.29, 4.32$ 인 경우는 상류수두가 증가하지만, 위어 높이(W)에 의한 낙차로 인하여 하류수두는 크게 증가하지 않는 것으로 나타났다. 반면 완전도복 조건인 $L/W=9.40$ 에서 상·하류 수두차가 감소한다. 즉, $H_1/H_2 = 1$ 이다. Tullis et al. (2007)는 실험결과를 불연속함수를 이용하여 $H_1/h_1 = f(H_2/h_1)$ 관계식을 제시하였다. 본 연구에서는 개량형 공압식 가동보(IPM weir)에 대한 $H_1/h_1 = f(H_2/h_1)$ 관계식을 제시하였다. 잠김흐름 조건에 대해 Fig. 15의 자료는 개량형 공압식 가동보의 상류수두와 수심을 결정하기 위해 하류수심과 유량을 측정해야 한다. 여기서, Eq. (8)과 Eq. (9)를 통해 H_1 를 계산하고, Eq. (1)에서 Q 의 함수로 h 를 결정할 수 있다(Tullis et al., 2007).

Fully Folded Condition

$$\frac{H_1}{h_1} = -0.0635 \left(\frac{H_2}{h_1} \right)^2 + 1.4982 \left(\frac{H_2}{h_1} \right) - 0.0637, \quad (8)$$

$$1.848 \leq \left(\frac{H_2}{h_1} \right) \leq 3.584$$

Fully Standing Condition

$$\frac{H_1}{h_1} = 11.788 \left(\frac{H_2}{h_1} \right)^2 - 27.672 \left(\frac{H_2}{h_1} \right) + 18.504, \quad (9)$$

$$1.111 \leq \left(\frac{H_2}{h_1} \right) \leq 1.446$$

4.2 유량계수식 제시

본 연구에서는 잠김흐름에 대한 유량계수 산정은 Lee et al. (2014)이 단순 회귀분석의 한계점 보완과 다양한 현장여건 및 설계조건에 대해 정량적인 잠김흐름 유량계수 산정을 위하여 채택한 다중회귀 분석을 이용하였다. 다중회귀 분석은 범용적으로 널리 사용되고 있는 통계패키지 R을 이용하였다. 유량계수 산정식을 제시하기 위하여 차원해석에서 선정된 주요 영향변수를 통하여 흐름특성 분석을 실시하였으며, 가동보의 기립각도에 따른 변화와 상·하류흐름과 관계된 $H_1/W, \xi, F_{r1}, F_{r2}, \Delta y/y_2, y_c/y_2, y_c/y_1$ 등의 변수들을 독립변수로 고려하였다.

Table 2에서 나타낸 결과 값을 토대로 유의확률(p-value)과 표준화 계수를 분석하였다. 분석결과, 독립변수 H_1/W 는 p-value는 0으로 나타났으며, 대립가설의 채택확률이 100%로 나타나 신뢰도가 높음을 알 수 있다. 또한 F_{r1} 은 p-value가 0.008로 대립가설의 채택확률이 99%로 나타났으며, y_c/y_2 와

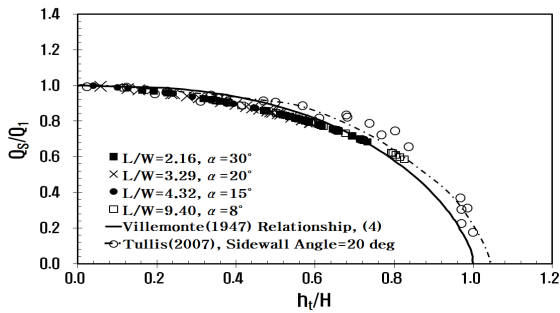


Fig. 14. $Q_s/Q_1 - h_1/H$ Curve

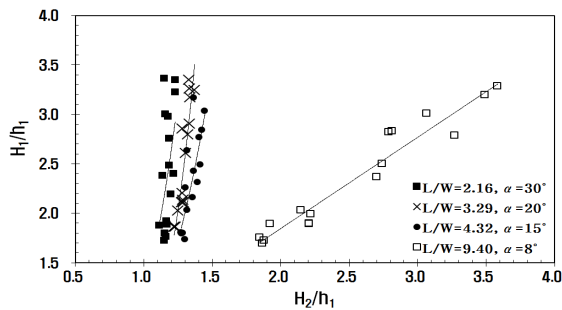


Fig. 15. $H_1/h_1 - H_2/h_1$ Curve

Table 2. Result of Multiple Regression Analysis for Discharge coefficient

Regression equation	Non-standardized	Standardization	p-value
Constant	0.612	-	0.000
$C_d = f(H_1/W)$	0.064	0.808	0.000
$C_d = f(\xi)$	0.007	0.010	0.471
$C_d = f(F_{r1})$	0.046	0.211	0.008
$C_d = f(F_{r2})$	0.018	0.122	0.149
$C_d = f(\Delta y/y_2)$	0.008	0.030	0.055
$C_d = f(y_c/y_2)$	-0.097	-0.413	0.011
$C_d = f(y_c/y_1)$	0.081	0.286	0.048

p<0.001: adopt 99.9%, p<0.01: adopt 99%, p<0.05: adopt 95%

y_c/y_1 는 각각 0.011과 0.048로 대립가설의 채택확률이 95% 이상인 것으로 나타났다. 그러나 ξ , F_{r2} , $\Delta y_c/y_2$ 에서 p-value 값은 각각 0.471, 0.149, 0.055로 나타나 유의수준에서 벗어남을 알 수 있다. 따라서 주요영향변수를 고려한 다중회귀분석에 의한 최적회귀방정식은 다음 Eq. (10)과 같이 결정된다.

$$C_d = 0.612 + 0.064H_1/W + 0.046Fr_1 - 0.097y_c/y_2 + 0.081y_c/y_1 \quad (10)$$

개량형 공압식 가동보의 잠김흐름 특성은 상류 접근흐름 수두의 영향을 받으며, Lee et al. (2014)에서 완전월류흐름 조건과 달리, 상·하류 수심에 의한 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 개량형 공압식 가동보의 잠김흐름 특성은 가동보의 기립각도와 높이가 작아지면서 상·하류 흐름조건에 의하여 결정된다.

5. 결론

본 연구에서는 실내실험을 통하여 개량형 공압식 가동보를 대상으로 보의 기립각도변화에 따른 잠김흐름 특성을 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 잠김흐름 유량계수(C_d)에 대한 주요 무차원 변수의 영향을 분석한 결과, 상류 흐름의 영향을 받는 인자인 F_{r1} , 상대 위어길이(ξ), 전수두비(H_1/W), 상류수심과 위어마루를 월류하는 수심의 비(y_c/y_1)가 증가하면 비례 관계로 증가하였다. 그러나 하류 흐름의 영향을 받는 인자인 하류수심과 상·하류 수위차이 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. 잠김흐름 특성은 위어마루에서 하류수면까지의 높이와 위어마루에서 상류수면까지의 높이의 비(h_t/H)에 대한 유량감소계수(Q_s/Q_1)의 변화에서 h_t/H 가 1에 가까울수록 Q_s/Q_1 가 감소하였다.
3. 보 하류에서의 수심은 상류보다 작지만 보를 통과하는 흐름으로 인해 하류 유속이 빠르게 나타났으며, 유량이 증가할수록 상·하류 수위차는 감소하는 것으로 나타났다. 또한 같은 유량조건인 경우 하류수두는 L/W 가 클수록 크게 증가하였다.
4. 주요 영향변수를 고려하여 다중회귀분석에 의한 유량계

수산정식을 도출하였으며, 개량형 공압식 가동보의 잠김흐름에 대한 유량계수는 $Fr_1 \leq 0.455$ 인 상류흐름 조건이 상류일 때, 완전월류흐름 특성과 달리 가동보의 물리적 제원보다는 상류 접근흐름수두와 상·하류 흐름조건에 의하여 결정되는 것으로 나타났다.

본 연구는 $h_t/H \leq 0.83$ 인 조건에서 잠김흐름 특성을 분석한 것으로 향후 유량범위에 대한 실험조건을 다양하게 한다면 상·하류 수위조건과 가동보의 기립각도에 의한 영향 등 보다 구체적인 잠김흐름 특성을 제시할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

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

References

- Bazin, H. (1894). "Experiences nouvelles sur l'écoulement en déversoir." Vol. VII, Annales des Points et Chaussées, Memoires et Documents.
- Cox, G. N. (1928). "The submerged weir as a measuring device." Bulletin engineering experiment station series no. 67, Univ. of Wisconsin, Madison, Wis.
- Fteley, A., and Stearns, F.P. (1883). "Description of some experiments on flow of water made during the construction of works for conveying water of Sudbury River to Boston." Trans. Am. Soc. Civ. Eng., 12, 101-108.
- Francis, J.B. (1884). "Experiments on the flow of water over submerged weirs." Trans. Am. Soc. Civ. Eng., Vol. 13, No. 303-312.
- Falvey, H.T. (2003). "Hydraulic Design of Labyrinth Weirs." American Society of Civil Engineers Press.
- Henderson, F.M. (1966). "Open Channel Flow." The Macmillan Company, New York, 1966.
- Kirkpatrick, K.W. (1957). "Discharge coefficients for spillways at TVA dams." Trans. Am. Soc. Civ. Eng., Vol. 122, No. 190-210.
- Kabiri-Samani, A.R., 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.
- Lee, K.S., Jang, C.-L., Lee, N.J., and Ahn, S.J. (2014). "Analysis of Flow Characteristics of the Improved-Pneumatic-Movable Weir through the Laboratory Experiments.", *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 11, pp.

1007-1015.

- Machiels, O., Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B.J., and Pirot-ton, M. (2011a). "Experimental observation of flow characteristics over a Piano Key Weir." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 49, No. 3, pp. 359-366.
- Machiels, O., Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B.J., and Pirot-ton, M. (2011b). "Piano Key weir preliminary design method: Application to a new project." *Labyrinth and Piano Key Weirs*, CRC Press/Balkema, pp. 199-206.
- Novak, P., and Cabelka, J. (1981). *Models in hydraulic engineering. Physical principles and design applications*. Pitman Advanced Publishing Program, London, United Kingdom.
- Ouamane, A., and Lemperiere, F. (2006). "Design of a new economic shape of weir." *Proc. Int. Symp. Dams in the Societies of the 21st Century Barcelona*, pp. 463-470.
- Taylor, G. (1968). "The performance of labyrinth weirs." Ph.D. thesis, Univ. of Nottingham, Nottingham, U.K.
- Tullis, B.P., Young, J.C., and Chandler, M.A. (2007). "Head-Discharge Relationships for Submerged Labyrinth Weirs." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 133, No. 3, pp. 248-254.
- Villemonte, J.R. (1947). "Submerged weir discharge studies." *Eng. News-Rec*, Vol. 139, No. 26, pp. 54-56.
- 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.