

실내실험을 통한 개량형 공압식 가동보의 잠김흐름 특성

Submerged Flow Characteristics of the Improved-Pneumatic-Movable weir through the Laboratory Experiments

이경수*, 장창래**, 이남주***

Kyung-Su Lee, Chang-Lae Jang, Namjoo Lee

요 지

본 연구에서는 개량형 공압식 가동보를 대상으로 가동보의 기립 각도변화에 따른 잠김흐름에 대한 가동보의 유량계수를 산정하고 흐름특성을 분석하였다. 실험결과, 보의 기립각도의 변화에 대한 위어높이와 위어길이의 비(L/W)가 작을수록 하류수두(H_2)가 큰 것으로 나타났다. 위어마루에서 하류수면까지의 높이와 위어마루에서 상류 수면고 높이의 비(h_t/H)에 대한 유량비(Q_s/Q_1) 변화는 h_t/H 가 1에 가까울수록 감소하였다. 또한 동일한 h_t/H 에서 Villemonte(1947)와 Tullis(2007)의 결과와 매우 잘 일치하는 경향을 보여주었다. 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.

핵심용어 : 개량형 공압식 가동보, 유량계수, 잠김흐름, 유량감소계수

1. 서 론

가동보는 보의 높이를 조절하여 하천의 수위조절과 용수공급, 하천의 연속성 등 하천환경 및 치수를 목적으로 설치한다. 가동보가 설치된 하천의 흐름은 매우 복잡한 양상을 나타내며, 수위, 유속, 유량 등 흐름 전반에 걸쳐 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 영향은 하천의 흐름특성을 지배하기 때문에 이에 대한 보다 정확한 수리학적 해석이 필요하다. 특히, 우리나라 강우 특성상 홍수 기에는 보의 높이보다 수위가 높아지게 되어 잠김흐름(Submerged flow)이 발생할 수도 있으며, 운영상 가동보를 도복시키는 경우가 있다. 하지만 가동보의 유량계수 산정에 관한 연구는 대부분 월류수맥(nappe)의 위·아래면에 대기압이 작용되는 완전월류흐름에 대한 것이 대부분이며, 잠김흐름이 발생하는 경우에 유량계수 산정에는 어려움이 있다. 또한 가동보에 의한 상·하류 흐름의 변화 등에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 그러나 불완전월류에 대한 정확한 유량 산정은 중소하천에서 평·갈수시에 하천유량을 산정하고, 하천을 유지관리하기 위하여 매우 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 중소하천에 가장 많이 설치되고 있는 개량형 공압식 가동보를 대상으로 보의 기립 각도변화에 따른 다양한 잠김흐름을 재현하면서 가동보의 유량계수를 산정하고 흐름특성을 분석하였다.

2. 상사법칙 및 유량계수 산정식

2.1 상사법칙

* 정회원 · 국민안전처 국립재난안전연구원 시설연구사 · E-mail : 39lks@korea.kr

** 정회원 · 한국교통대학교 토목공학과 부교수 · E-mail : cjang@ut.ac.kr

*** 정회원 · 경성대학교 토목공학과 교수 · E-mail : njlee-ksu@hanmail.net

다양한 실험조건에 대한 수위-유량관계곡선식을 개발하고 수리학적 특성을 분석하기 위하여, Froude 상사법칙에 따라 흐름에 영향을 주는 주요 매개변수에 따른 흐름특성을 분석하였다. Froude 상사법칙은 하천의 흐름과 같이 하천, 개수로 흐름, 댐의 여수로 등 중력이 주로 지배하는 경우에 적용한다. Froude 법칙에서 역학적 상사법칙은 원형과 모형의 Froude number가 같아야 하며, 다음 식(1)과 같이 성립한다. 여기서, g 는 중력(m/s^2), V 는 유속(m/s), L 은 길이(m)다. 이때, $g=1$ 이다. 또한 직사각형 위어의 일반적인 유량공식은 다음 식(2)와 같다.

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

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

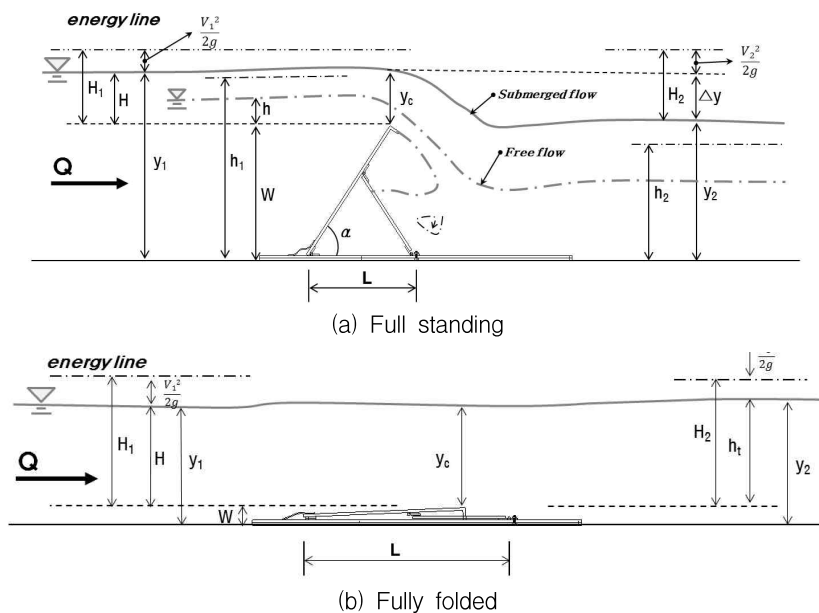


Fig. 1. Scheme of Improved-Pneumatic-Movable weir for experiments

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)이다(Fig. 1). 하류수위(tail water)가 위어마루높이를 초과하면, 위어의 침수가 발생하여 주어진 유량에서 상류수두(upstream head)가 증가한다. Villemonte(1947)를 포함한 다양한 연구자들은 잠김비(h_t/H)의 함수로서 위어에 대한 유량감소계수(flow reduction factor; Q_s/Q_1)를 기초로 잠긴흐름에 대한 관계를 연구하였다. Q_s 와 Q_1 는 상류수심(H)과 동일한 타관두(driving head)와 연관된 침수 및 잠긴 흐름비율이다. Villemonte(1947)는 식(3)과 같이 유량감소계수를 계산하기 위한 경험식을 제시하였다.

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

여기서, y_1 는 상류수심(m), y_2 는 하류수심(m)이고, 지수 0.385는 다양한 침수실험 결과에 따라

결정되었다(Villemonte, 1947).

2.3 유량계수 산정식

유량계수 C_d 는 Henderson(1966)의 경험계수식을 이용하였다.

$$C_d = 0.611 + 0.08 \frac{H}{W} \quad (4)$$

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

3. 모형실험

본 연구에서 사용된 수리모형 실험장치의 제원은 Fig. 2에서 보여주는 것처럼 길이가 10 m, 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 2.3 m지점에 전동유압식 Jack screw 1기가 설치되어 있다. 하류단 수위조건은 등류수심을 유지하였다. 수로경사는 1/2000, 1/1000, 1/750과 1/500로 4가지 조건을 선정하였으며, 가동보 기립각도를 4가지(완전도복인 8, 15, 20, 30°)로 구분하여 실험하였다. 가동보 모형은 고강도 아크릴로 제작하였으며 정수압에 견딜 수 있도록 설계 하였다. 바닥부분은 볼트와 너트로 연결할 수 있도록 하여 각도조절에 따른 고정이 가능하다. 가동보 설치지점은 하류에서 1/3지점으로 하였으며, 유량의 변화에 따라 상류 2 m, 하류 1 m 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.

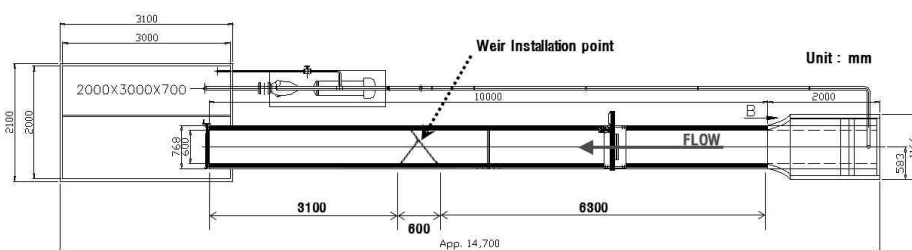


Fig. 2. Plan of experimental equipment

Table 1. Condition and data of experimental model

α (°)	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

4. 결과 및 분석

본 연구에서 개량형 공압식 가동보의 잠김흐름 특성을 분석하기 위해 실내실험을 실시하였다. 또한, 보의 기립각도 또는 위어높이와 위어길이의 비(L/W)에 따라 분석하였다. 유량은 0.8~11.7

l/s 의 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. 3은 하류수두와 상류수심의 비(H_2/H_1)에 따른 C_d 의 변화를 보여주고 있다. L/W 가 증가함에 따라 C_d 가 증가하는 경향을 보이며, 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·하류수두차가 감소하며, 속도수두와 위치수두가 점점 일치한다. Δy 가 줄어들면서 일정한 수면형을 유지하고 C_d 는 증가한다. 또한 잠김흐름에서는 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. 4는 위어마루에서 하류수면까지의 높이와 위어마루에서 상류수면까지의 높이의 비(h_t/H)에 대한 유량감소계수(Q_s/Q_1)의 변화를 보여주고 있다. 또한 Villemonte(1947)와 Tullis(2007)의 결과와 비교하였다. Q_s/Q_1 는 Villemonte(1947), Tullis(2007)와 Felvey(2003)에 의해서 잠김흐름 특성에 대한 주요 영향변수로 분석하였다. 흐름은 h_t/H 가 1에 가까울수록 유량감소계수가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한 동일한 h_t/H 에서 Villemonte(1947)와 Tullis(2007)의 결과와 매우 잘 일치하는 경향을 보여주고 있다. 즉, 유량이 증가할수록 상·하류 수위차는 줄어드는 것을 의미한다.

Fig. 5는 하류수두대 상류수두(H_2/h_2)에 대한 상류수두대 상류수두(H_1/h_1)의 변화를 보여주고 있다. Tullis(2007)는 Labyrinth weir와 Sharp-crested linear weir의 잠김흐름 특성을 규명하기 위하여 $H_1/h_1 = f(H_2/h_2)$ 의 관계를 분석하였다. 여기서, 유량은 자유흐름 상태에 대해 결정된 상류수위 측정과 상·하류수두를 계산하여 h_1 와 h_2 를 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.

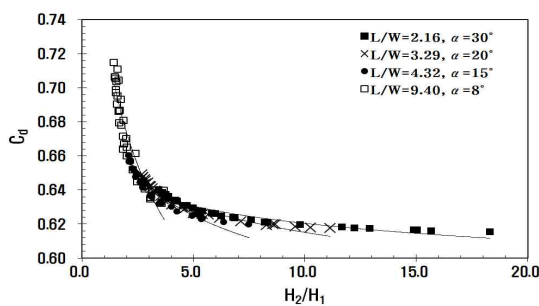


Fig. 3 C_d-H_2/H_1 Curve

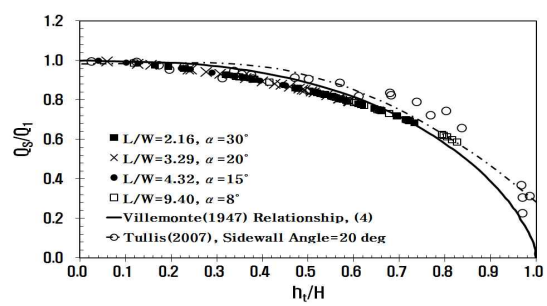


Fig. 4 $Q_s/Q_1-h_t/H$ Curve

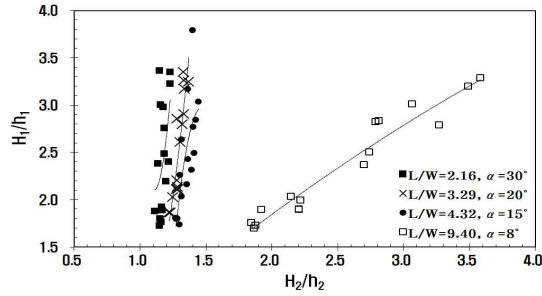


Fig. 5 $H_1/h_1-H_2/h_2$ Curve

5. 결론

잠김흐름 특성은 L/W 가 작을수록 하류수두(H_2)가 큰 것으로 나타났다. 위어마루에서 하류수면까지의 높이와 위어마루에서 상류수면까지의 높이의 비(h_t/H)에 대한 유량비(Q_s/Q_1)의 변화에서는 h_t/H 가 1에 가까울수록 Q_s/Q_1 가 감소하였다. 또한 동일한 h_t/H 에서 Villemonte(1947)와 Tullis(2007)의 결과와 매우 잘 일치하는 경향을 보여주었다. 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.

감사의 글

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

참고문헌

- Falvey, H.T.(2003). "Hydraulic design of labyrinth weirs.", American Society of Civil Engineers(ASCE) Press.
- Henderson, F. M.(1966). "Open Channel Flow. " The Macmillan Company, New York, 1966.
- 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.