

보 유출형태에 따른 하류부 도수 및 비에너지 손실에 관한 비교 연구

박효선* · 윤근호** · 구본진* · 최계운+

* 인천대학교 건설환경공학과

** 신영E&I

A Comparative Study on Hydraulic Jump and Specific Energy Losses at Downstream According to the Weir Discharge Types

Hyo-Seon Park* · Geun-Ho Yoon** · Bon-Jin Koo* · Gye-Woon Choi*⁺

* Department of Civil and Environmental Engineering, University of Incheon

** Shinyoung E&I

요 약

기존까지 건설된 보는 대부분 보의 상단으로 월류하는 월류형 보가 주종을 이루고 있다. 월류형 보의 경우 수자원의 관리의 효과와 지금까지의 많은 연구로 인한 설계, 시공 및 유지관리 방법 등이 용이하다는 장점이 있다. 하지만 월류형 보의 특성상 보 상단부를 통해 물이 월류되는 방식이기 때문에 상류부로부터 유입된 유사가 보 하류로 배출되지 못하고, 하상이 높아지면서 저수용량이 감소되어 점차 보의 기능을 상실하게 된다. 이와 같은 토사 퇴적 및 보의 유지관리 문제를 해결하기 위해 수문을 가진 하단방류형 보가 건설되기 시작하였다. 하지만 최근 건설된 하단방류형 보의 설계상의 문제점으로 인하여 보 하류부의 하상이 세굴되고, 세굴된 하상 때문에 구조적인 문제점이 발생되고 있다.

본 연구에서는 보의 효과적인 설계 및 운영방법을 위해 월류형 보와 하단방류형 보의 흐름의 특성, 하류부 수위 변화에 따른 도수길이분석, 보 형태에 따라 단위거리당 발생하는 비에너지 손실량을 비교 및 분석하였다. 실험분석 결과 하단방류형 보와 월류형보의 상류 조건을 동일하게 유지 시 하단방류형 보에서 도수의 길이가 Fr 값(Froude number) 3.5에서 최대 2배 길게 나타났으며, 하류 수위가 증가 할수록 도수의 길이는 점차 감소하게 되었다. 단위 거리당 발생하는 비에너지 손실량 비교 분석 결과 단위 거리당 에너지 손실량이 하단방류형 보에 비해 월류형 보가 약 2배 높게 나타나는 것으로 판단되었다. 따라서 하단방류형 시설의 경우 수공 구조물의 안전을 위해 별도의 에너지 감세시설을 별도로 검토하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

핵심용어 : 월류형 보, 하단방류형 보, 도수현상, 비에너지

Abstract

The weirs built so far are mainly overflow type weirs overflowing to the upstream. Main advantages of overflow type weirs are, effective water resources management and easy design, construction and maintenance due to many accumulated studies. However, due to the special feature of the overflow type weir where water overflows through the upstream of the weir, the silt coming from the upstream is not discharged to the downstream of the weir. This increases the river bed and reduces the reservoir capacity, and as a result, the weir loses its function. A underflow type weir with a water gate has been implemented in order to solve such sediment deposit and weir maintenance problems. However due to the design problem of recently constructed underflow type weirs, the river bed of the downstream of a weir has been scoured. And this leads to a structural problem. In this study, the flow characteristics of overflow type weirs and underflow type weir, hydraulic jump length analysis depending on change of water depth and the amount of specific energy loss generated per unit length depending on a weir type have been compared and analyzed, for the effective design and management of the weirs.

The experiment results show that, when identical upstream conditions of underflow type weir and an overflow type weir were maintained, the hydraulic jump length was up to twice longer with Fr(Froude number) 3.5 of the hydraulic jump length at the underflow type weir, and the hydraulic jump length gradually decreased as the downstream water depth increased. The comparative analysis result of the amount of specific energy loss generated per unit length showed that the amount of energy loss per unit length was twice higher for an overflow type weir than a underflow type weir. Therefore, in case of a underflow type facility, an additional energy reduction facility is determined to be necessary for safety of water construction structures.

Keywords : overflow type weir, underflow type weir, hydraulic jump phenomenon, specific energy

+ Corresponding author email : gyewoon@incheon.ac.kr

1. 서론

자연현상 또는 인위적인 작용에 의하여 물과 토사가 이동하는 통로를 하천이라 한다. 자연 상태에서의 하천은 유역 내 지형조건에 따라 직선구간과 사행구간이 혼재되기도 하고, 서로 다른 유로가 만나 또 하나의 유로를 형성하기도 한다. 이러한 하천의 하도 내에 필요에 의해 인위적으로 구조물을 설치하기도 한다(Kim, 2005). 이러한 하천구조물은 이수, 치수 및 환경보전의 기능을 발휘시키기 위해 건설된다. 이 중 보는 하천에서 가장 많이 설치되어 있는 하천구조물 중 하나로 각종 용수의 취수, 주운 등을 위하여 수위를 높이고, 조수의 역류를 방지하기 위해 설치하는 제방의 기능을 갖지 않는 시설이다(river design Criteria, 2004), (Yeo et al., 2005). 기존 하천에 설치되어 있는 보는 대부분이 고정보로써 흐름의 정체를 유발시켜 토사 퇴적 및 수질악화를 가져오며 하천환경을 파괴하는 원인이 되기도 한다(Kim, 2006). 따라서 최근에 들어서는 기존의 이수목적만을 위한 고정정보다는 수위조절이 가능한 가동보를 많이 설치하고 있다(Kim et al., 2007). 가동보는 홍수 발생 시 자동적으로 가동되어 홍수소통을 원활하게 할 뿐만 아니라 토사가 다량 함유되어 있는 홍수류가 보에 의하여 일시적으로 저류되지 않고 바로 하류로 유하하기 때문에 보 상류 측에 토사퇴적의 문제점을 해결할 수 있다(Jang, 2011). 단순한 이수목적만을 위한 고정보는 홍수방지의 역할을 하지 못하고, 보 설치에 따른 상하류 단절로 환경 및 생태문제를 유발시키기 때문에 가동보를 설치함으로써 수문개방을 통해 퇴적되는 토사를 배출시키며, 저류용량 감소도 해결하고 있다. 또한 하천의 연속성을 복원하여 하천 생태계 복원뿐만 아니라 하천의 경관을 개선하는 효과를 줄 수 있는 장점 때문에 4대강 살리기 사업을 통해서 대규모 가동보가 많이 적용되고 있으며 이는 하천의 수변공간 창출 및 경관 개선을 시키고 있다(Han, 2012). 그러나 가동보인 하단방류형의 경우 고정보인 월류형에 비하여 유지관리가 용이하나, 보 하류부 흐름의 변화가 월류형 보와 다르게 발생되어 하상의 세굴 등의 문제가 나타나 수공구조물 파괴 등의 현상이 발생하는 것으로 알려져 있다. 하단방류형 보의 경우 수문을 상승시켜 형성되는 통수공간으로 유량 및 유사를 방류하는 방식이다. 기존의 월류형과는 하류부의 흐름특성이 상이하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 보의 방류형식에 따른 보의 하류부 흐름 변화에 대한 비교 실험을 통하여 보 직하류부의 사류구간 및 도수현상을 흐름을 분석하고자 한다.

2. 실험장치 구성 및 실험 방법

2.1 실험장치 구성

도수현상을 분석하기 위하여 수리실험을 실시하였다. 수리실험에 사용된 실험 장치는 수로와 유량공급부로 구분할 수 있다. Fig. 1은 본 실험을 위한 수리실험 장치의 구성을 나타낸다.

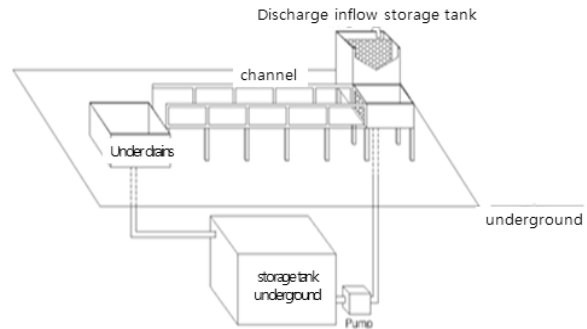


Fig. 1. Structural Diagram of Experiment

유량공급부로는 지하저류조, 펌프가 있으며 실험장치 수로는 유량조절조와 모형수로, 하류집수정으로 구성되어 있다. 지하저류조는 용량을 60 m³로 설치하여 물을 저장 가능하도록 하고 있다.

2.1.1 수로 및 보의 구성

수리실험에 사용된 수로는 총 연장 11 m, 폭 0.7 m, 높이 0.8 m의 직선수로로 수로 벽면은 흐름을 관찰할 수 있도록 강화유리로 제작하였다. Fig. 2는 수리 실험장 개수로의 전경을 나타낸다.

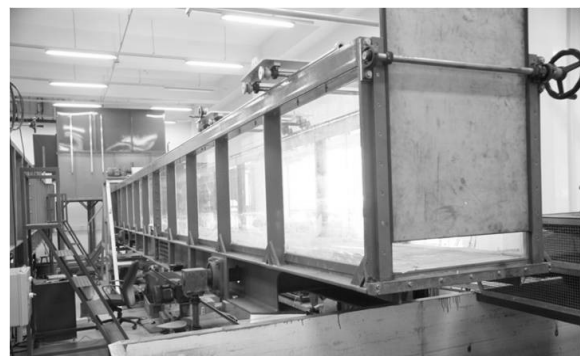
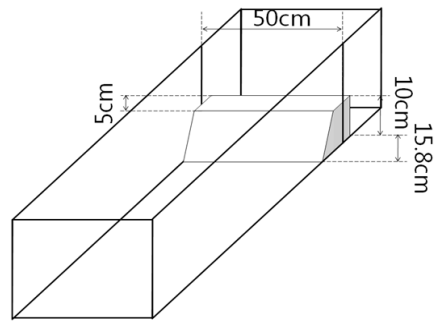
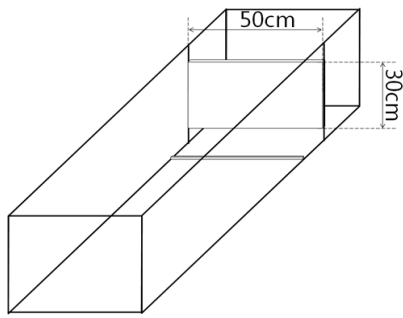


Fig. 2. Photo of Open Channel

실험 장치로 이용된 개수로는 최대 0.06 m³/s의 유량이 유하 가능하며, 유입 및 배수를 원활하게 하기 위하여 마찰손실이 최대한 작게 발생되도록 수로를 설치하였다.



(a) Photo of Underflow Type Weir Installation



(b) Photo of Overflow Type Weir Installation

Fig. 3. Photo of Underflow and Overflow Type Weir Installation

Fig. 3은 하단방류형 보와 월류형 보가 설치된 모습이다. 유량조절조에서 물을 방류한 후 정류의 흐름이 되는 지점에 보를 설치하였다.

하단방류형 보의 경우 개도 높이 변화에 따른 실험이 가능하도록 실험 장치를 구성하였다. 수로 좌우 벽면에 폭 1 cm, 깊이 0.5 cm의 홈을 만들어 보 높이를 연동할 수 있도록 하였고, 수로 바닥은 월류형 고정보 흐름에서 보 하단으로 누수가 되지 않도록 하기 위하여 수로 벽면과 동일하게 폭 1 cm, 깊이 0.5 cm의 홈을 파 놓았다.



(a) 2 Dimensional Hydrometer

월류형 보는 높이 10 cm, 상단폭 5 cm, 하단폭 11 cm, 월류 사면 1:0.7 경사를 갖는 구조로 제작하였으며, 하단방류형 가동보는 높이 30 cm, 두께 1.5 cm의 직사각형 구조로 제작하였다.

Fig. 4는 실험에 사용한 2차원 유속계와 수위측정을 위해 사용된 포인트 게이지의 사진이다.



(b) Photo of Point Gauge

유속계는 X, Y방향의 2차원 유속을 사용하였으며 측정범위는 0~±200 cm/s이며, 측정오차는 유속범위에 따라 ±1~±4 cm/s이다. 측정간격은 연속측정 및 5, 10, 20, 40, 60초 간격의 평균유속으로 측정할 수 있으며, 측정된 데이터를 저장하여 사용할 수 있다.

본 실험에서는 시간간격을 20초로 설정하고 평균유속을 사용하였다. 유속측정은 실험장치의 특성상 유량공급 및 형성되는 수위가 낮은 관계로 1점법을 적용하였으며 식 (1)과 같다.

$$\bar{V} = V_{0.6} \quad (1)$$

Fig. 4. Photo of Measuring Equipment

여기에서, \bar{V} 는 평균유속, $V_{0.6}$ 은 수위의 60% 지점에서
 서의 유속이다.

포인트 게이지의 측정범위는 0~410 mm으로 측정단
 위는 0.1 mm이다. 유속계 및 포인트 게이지 모두 수로
 상단에 설치된 계측기 이송활차를 이용하여 측정하였
 으며, 동일지점에서 측정할 수 있도록 계측기 이송활
 차 레일에 측정 지점을 표시하여 측정이 가능하도록 하
 였다.

2.1.2 유량 공급

Fig. 5는 지하저류조로부터 실험수로로 유량이 공급되
 는 순환체계를 나타낸다.

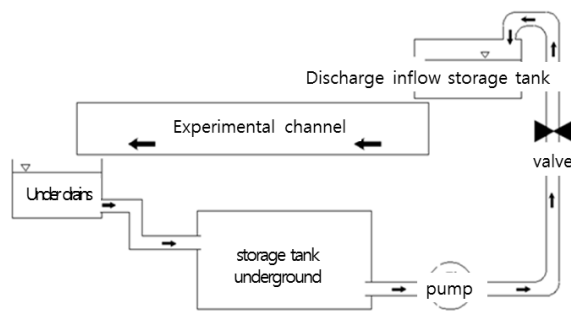
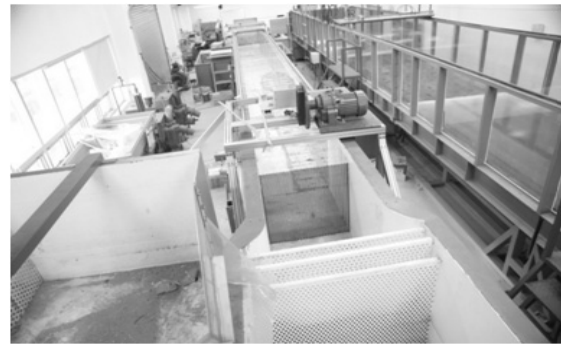


Fig. 5. Mode Chart for Water Circulation System of Water Supply

유량유입수로로 공급된 물은 수조 내에 정류벽을 통
 과시켜서 정류흐름으로 만든다. 수위-유량 곡선에 따라
 설정된 실험 유량을 삼각위어를 이용하여 모형 수로로
 유입 시키고, 모형수로를 통과한 유량은 침수정에 저장
 된 후 지하저수조로 다시 회수하도록 되어있다.

유량조절조 내에 3개의 정류벽과 유입구에 1개의 정
 류벽을 추가로 설치하여 안정적인 흐름을 공급하도록
 하였다. Fig. 6은 유량조절조 내에 설치된 정류벽을 나타
 낸 그림이다.

유량유입수조에는 유량을 측정하기 위한 삼각위어가
 설치되어 있다. 개수로의 유량을 검증하기 위하여 유량
 변화에 따른 개수로의 수위 및 유속을 측정하고 유량조
 절조 내에 설치된 삼각위어를 통과하는 월류 수위를 측
 정하여 유량검증을 실시하였다. 위어의 월류 높이에 따
 른 유량을 측정하여 수위-유량곡선을 작성하였다. 유량
 조절조의 삼각위어의 월류 높이에 따른 유량은 Table 1
 과 같으며, Fig. 7은 본 연구에 사용된 모형수로의 수위-
 유량곡선을 나타낸다.



(a) Rectification Wall Installation at the Entrance of Channel



(b) Rectification Wall Installation in the Channel of Controlling Discharge

Fig. 6. Installation of Rectifying Wall for Hydraulic Experiment

Table 1. Turbulent Water Depth and Measured Discharge of Triangular Weir

Turbulent Water Depth of Triangular Weir (mm)	Water Depth of Channel (cm)	Velocity of Channel (m/s)	Discharge (m ³ /s)	Discharge Coefficient
126	0.064	0.294	0.010	1.398
146	0.077	0.328	0.013	1.505
171	0.091	0.393	0.018	1.578
189	0.103	0.424	0.022	1.659
200	0.111	0.47	0.026	1.600
214	0.120	0.456	0.028	1.807
223	0.125	0.487	0.031	1.800
241	0.138	0.569	0.040	1.694
258	0.154	0.659	0.051	1.555
267	0.158	0.729	0.058	1.492
271	0.163	0.711	0.059	1.539
Average Discharge Coefficient				1.602

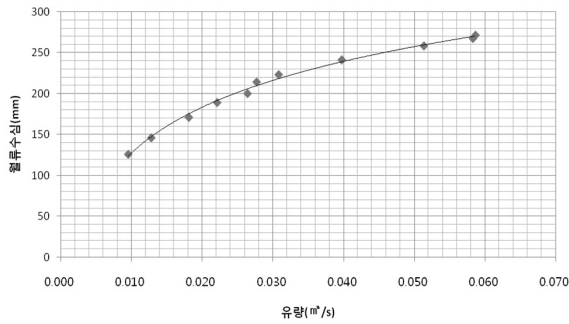


Fig. 7. Water Depth-Discharge Curve Used in the Hydraulic Experiment

위어 월류 수위와 공급유량과의 관계를 도출하기 위하여 임의의 유량을 작은 값에부터 조절하여 공급함으로써 위어 높이에 대한 유량 값을 다르게 적용하여 실시하였으며, 일정한 유량공급이 이루어질 수 있도록 충분한 시간 간격을 두고 3~4회에 걸친 수위 값을 산정함으로써 결정하였다. 이러한 유량에 대하여 한계단면의 수위와 유속을 1 m 간격으로 측정하였고, 모형수로의 폭과 수위 값을 측정하여 단면적을 산정하였다. 이렇게 산정된 흐름 단면적과 유속을 곱하여 유량을 산정하고, 위어 월류 수위와 유량과의 관계식을 도출하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 측정위치 및 방법

본 실험에서의 측정위치는 Fig. 8과 같이 보를 중심으로 10 cm 간격으로 총 22점을 측정하였으며, 수로 단면에 측정지점을 표시하여 정확한 지점에 대한 측정이 될 수 있도록 하였다.

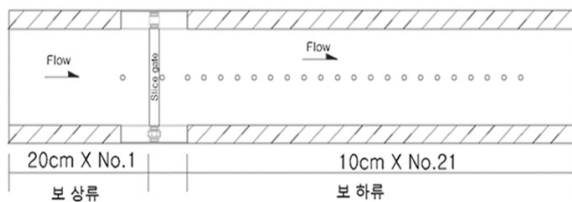


Fig. 8. Measured Points of Experiment in the Channel

보 상류에서는 수리학적 특성이 크게 변동하지 않기 때문에 보 설치 위치를 기준으로 하여 상류의 세 단면을 측정하였다. 보의 하류부 흐름은 상류에서의 흐름과는 다르게 부등류의 흐름이 나타나면서 도수현상을 동반하기 때문에 수리학적 거동을 자세히 측정하기 위하여 보 하류로 20 cm 떨어진 단면부터 10 cm 간격으로 21개 지점을 지정하여 수위와 유속을 측정하였다. 보의

상하류의 모든 지점은 총 72지점으로 유속측정은 수면에서 60% 지점을 측정하는 1점법으로 모든 지점에 대해 측정을 실시하였다. 각 단면에서의 측정은 유속의 경우 10초 동안의 유속평균값을 측정하였으며, 수위의 경우 수압계와 포인트 게이지를 사용하여 측정하였다.

Fig. 9는 하단방류형 보와 월류형 보 설치 시 흐름의 모식도이며, 흐름의 특성 별로 구간을 나누어 분석하였다.

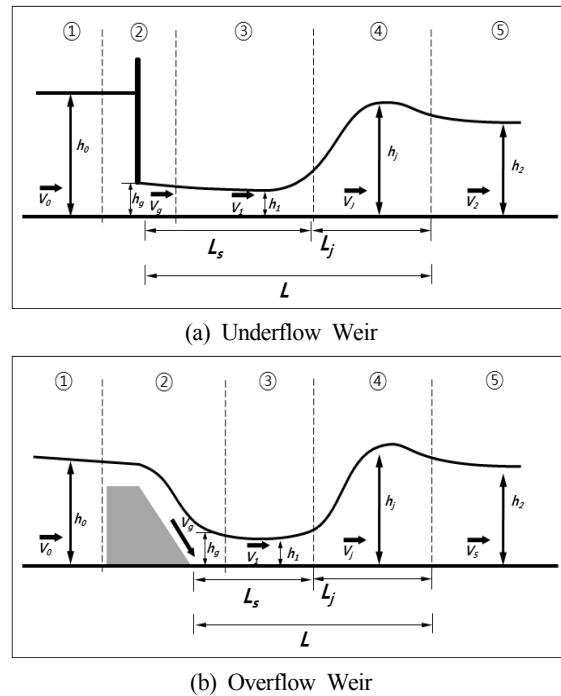


Fig. 9. Mode Chart of Analyzed Points in Upstream and Downstream Flow of Weir

본 실험에서 측정된 주요 단면은 아래와 같이 총 5개의 구간이다.

① 구간은 보 상류구간, ② 구간은 물이 보를 통과하는 구간, ③ 구간은 보를 통수 후 방류될 때 형성되는 사류구간으로 흐름분석을 위해 Froude 수를 결정하는 구간, ④ 구간은 방류된 유량 흐름에서 도수가 나타나는 구간, ⑤ 구간은 방류된 흐름이 도수를 거치면서 안정화된 흐름이 나타나는 구간이다.

Fig. 9에서의 각 부호들은, h_0 은 보 상류의 수위를 나타내고 v_0 은 보 상류에서 수문을 통과하기 전의 유속을 나타낸다. h_g 는 보 구간의 수위, v_g 는 보에서의 유출유속, h_1 는 사류구간의 흐름에서 수축으로 인한 가장 낮은 수위를 말하며 이때의 유속이 v_1 으로 가장 큰 유속을 나타낸다. h_j 는 도수 발생구간의 수위, v_j 는 도수 발생구간의 유속, h_2 는 도수현상 이후로 유속과 수위가 안정화된 수위를 말하며 이때의 유속은 v_2 이다. L_s 는 보를

통과한 흐름의 상류상태를 나타내는 구간의 길이를 말하며, L_j 는 도수 구간의 길이, L 은 보 직하류부터 도수 현상 이후까지의 흐름이며, 수리학적으로 안정화된 흐름 일 때의 거리이다.

2.2.2 수리실험 조건

보 설치에 따른 흐름분석을 하기 위해 월류형 보와 하단방류형 보를 설치하고, 상류부의 단위유량과 하류부 관리수위에 변화를 주며 실험하였다. 단위유량의 조건은 0.036, 0.044, 0.052 $m^3/s/m$ 로 실험을 실시하였고, 하류 경계조건은 월류형 보 높이의 0~20 % 높이를 가진 단을 설치하여 하류 높이에 변화를 주었다. 각 조건에 따라 선정된 측정지점에서 수위와 유속을 측정 하였다. Table 2는 보의 형식과 하류부 관리수위에 따른 보 하류부 흐름분석을 위한 실험조건을 나타낸다.

Table 2. Analysis for Underflow Weir with Respect to the Gate Operation

Unit Discharge ($m^3/s/m$)	Boundary Condition of Underflow (Ratio about Weir Height)	
	Overflow Weir	Underflow Weir
0.036	0%	0%
	10%	10%
	20%	20%
	0%	0%
0.044	10%	10%
	20%	20%
	0%	0%
0.052	10%	10%
	20%	20%
	0%	0%

두 가지 형식 보의 상류수위를 동일하게 설정하여 측정하기 위해 고정보 실험에서 나타난 수위를 하단방류형 가동보에도 동일하게 적용하기 위해 하단방류형 보의 수문의 높이를 조절하여 동일한 상류수위를 확보 할 수 있도록 하였다. 각 유량에 따른 상류 수위를 동일하게 확보하기 위한 하단방류형 보의 개도 높이는 Table 3 과 같다.

Table 3. Upstream Weir Depth and Gate's Height of Underflow Weir with Respect to Discharge

Discharge ($m^3/s/m$)	Upstream Water Depth at Weir (mm)	Gate Height of Underflow Weir (mm)
0.036	190	26
0.044	197	27
0.052	204	28

본 실험이 일정구역에 국한하지 않고, 실험조건과 동일한 모든 보에 대해서 적용하기 위하여 수리실험을 통해 도출된 결과의 분석에서는 단위유량을 사용하였다.

3. 실험결과

3.1 유입유량 및 보 조건에 따른 흐름분석

월류형 및 하단방류형 보의 설치에 따른 보 하류부에서 발생하는 수위, 유속, Fr 값을 비교분석 하였으며, 유량을 변경할 때마다 흐름의 변화가 안정화되는 시간을 기다린 후 측정을 하였다. Table 4는 월류형 보를 설치 하였을 때 발생하는 각 구간의 수위, 유속, Fr 값을 나타 낸 것이다.

Table 4. The Distance of Hydraulic Jump Overflow Type Weir and Inflow Discharge

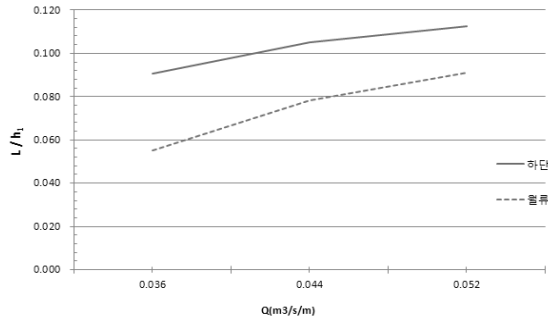
Downstream Boundary Condition (%)	Inflow Discharge ($m^3/s/m$)	Water Level		Velocity		Fr	
		h_0 (m)	h_1 (m)	v_0 (m/s)	v_1 (m/s)	Fr0	Fr1
0	0.036	0.19	0.02	0.191	1.659	0.14	3.60
	0.044	0.20	0.02	0.223	1.913	0.16	4.03
	0.052	0.21	0.03	0.254	2.277	0.18	4.49
10	0.036	0.19	0.02	0.191	1.543	0.14	3.23
	0.044	0.20	0.03	0.223	1.671	0.16	3.29
	0.052	0.20	0.03	0.259	1.835	0.18	3.48
20	0.036	0.19	0.07	0.176	0.498	0.13	0.62
	0.044	0.20	0.08	0.211	0.487	0.15	0.50
	0.052	0.20	0.06	0.227	0.612	0.15	0.67

Table 5는 하단방류형 보를 설치하였을 때 발생하는 각 구간의 수위, 유속, Fr 값을 나타낸 것이다.

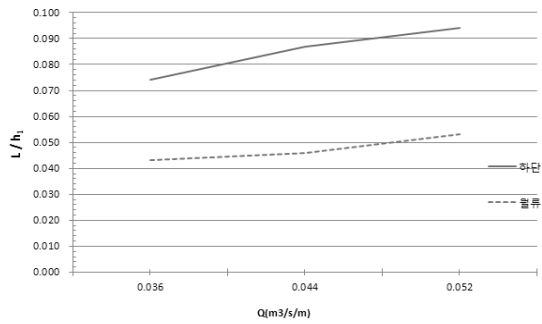
Table 5. The Distance of Hydraulic Jump with Respect to Underflow Type Weir and Inflow Discharge

Downstream Boundary Condition (%)	Inflow Discharge ($m^3/s/m$)	Water Level		Velocity		Fr	
		h_0 (m)	h_1 (m)	v_0 (m/s)	v_1 (m/s)	Fr0	Fr1
0	0.036	0.19	0.02	0.191	1.420	0.14	2.85
	0.044	0.21	0.03	0.223	1.653	0.16	3.24
	0.052	0.22	0.03	0.255	1.882	0.18	3.62
10	0.036	0.19	0.02	0.191	1.470	0.14	3.01
	0.044	0.20	0.03	0.223	1.590	0.16	3.13
	0.052	0.21	0.03	0.255	1.875	0.18	3.61
20	0.036	0.19	0.05	0.178	0.720	0.13	1.03
	0.044	0.21	0.04	0.211	1.100	0.16	1.76
	0.052	0.22	0.04	0.234	1.521	0.18	2.60

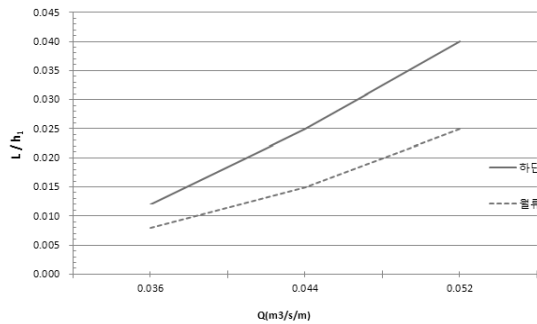
다음의 Fig. 10 및 Table 6은 단위유량($m^3/s/m$)과 하류 경계조건에 따른 도수 발생거리를 나타낸 그림과 표이다. 도수의 발생 크기는 도수 발생거리(L)를 상류구간의 수위(h_1)으로 나누어(L/h_1) 도수의 발생 크기를 일반화 시켰다.



(a) Downstream Boundary Condition 0%



(b) Downstream Boundary Condition 10%



(c) Downstream Boundary Condition 20%

Fig. 10. The Distance of Hydraulic Jump with Respect to Weir Type and Inflow Discharge

Fig. 10 및 Table 6에서와 같이 보 상류조건과 하류조건이 동일하게 유지되더라도 월류형 보보다 하단방류형 보에서 더 큰 도수가 발생하는 것으로 나타났다. 하류경계조건이 없을 경우 L/h_1 의 값은 유량 $0.036 m^3/s/m$ 에서 월류형 보는 0.055 , 하단방류형 보는 0.091 로 나타

Table 6. The Distance of Hydraulic Jump with Respect to Weir Type and Inflow Discharge

Downstream Boundary Condition	Inflow Discharge ($m^3/s/m$)	Length of Hydraulic Jump/ Water Depth at Jet Point (L/h_1)		Difference of Hydraulic Jump(%)
		Underflow Weir	Overflow Weir	
0%	0.036	0.091	0.055	39.26
	0.044	0.105	0.078	25.90
	0.052	0.112	0.091	18.98
10%	0.036	0.074	0.043	41.95
	0.044	0.087	0.046	46.79
	0.052	0.094	0.053	44.33
20%	0.036	0.012	0.008	42.86
	0.044	0.025	0.011	46.43
	0.052	0.040	0.016	47.92

Table 7. The Distance of Hydraulic Jump with Respect to Fr at Weir Outlet

Weir Type	Downstream Boundary Condition	Inflow Discharge ($m^3/s/m$)	Fr1	(L/h_1)
	(%)			
Overflow Type Weir	0	0.036	3.60	0.055
		0.044	4.03	0.078
		0.052	4.49	0.091
	10	0.036	3.23	0.043
		0.044	3.29	0.046
		0.052	3.48	0.053
	20	0.036	0.62	0.008
		0.044	0.50	0.011
		0.052	0.67	0.016
Underflow Type Weir	0	0.036	2.85	0.091
		0.044	3.24	0.105
		0.052	3.62	0.112
	10	0.036	3.01	0.074
		0.044	3.13	0.087
		0.052	3.61	0.094
	20	0.036	1.03	0.012
		0.044	1.76	0.025
		0.052	2.15	0.040

났으며, 유량 $0.044 m^3/s/m$ 에서 월류형 보는 0.0782 , 하단방류형 보는 0.105 로 났다. 또한, 유량 $0.052 m^3/s/m$ 에서 월류형 보는 0.091 , 하단방류형 보에 의해 더 큰 도수가 발생하는 것으로 나타났다. 하류수위가 증가할수록 하단방류형 보에서 L/h_1 의 값이 월류형 보에 비해 최소 18.98% 에서 최대 47.92% 까지 증가하였다.

Table 7 및 Fig. 11은 보 끝 부분에서 발생하는 Fr 값에 따른 도수의 발생 길이를 나타낸 것이다.

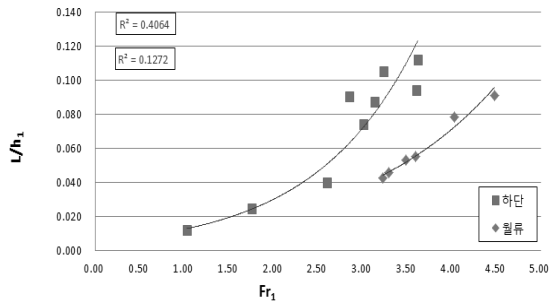


Fig. 11. The Change of Hydraulic Jump with Respect to Fr at Outlet

Fig. 11과 같이 월류형 보와 하단방류형 보 모두 유출부의 Fr 값이 커질수록 도수가 발생하는 거리는 증가하는 것을 알 수 있다. 월류형 보의 경우 하단방류형 보보다 도수의 길이가 짧게 나타나는 것을 알 수 있으며, 하단방류형 보가 월류형 보보다 약 2배 이상 차이가 발생한다. 월류형 보의 경우 하류 경계조건 20%일 때 도수 현상 발생하지 않으므로 그래프에서 제외하였다.

월류형 보에 비해 하단방류형 보에서 도수의 길이가 더 길게 발생하는 이유는 월류형 보의 경우는 흐름의 특성상 흐름 방향에 전환이 생기며, 흐름방향이 전환되면서 바닥에서 에너지 감세 발생되기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 보 형태에 따른 단위 거리당 에너지 손실

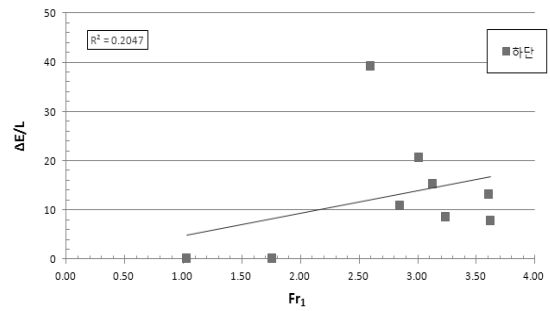
보 형식에 따른 단위 거리당 발생하는 에너지 손실을 분석하였고, 실험에 의한 도수 발생 전후의 에너지 손실량은 식(2)와 같다.

$$\Delta E = E_1 - E_2 \quad (2)$$

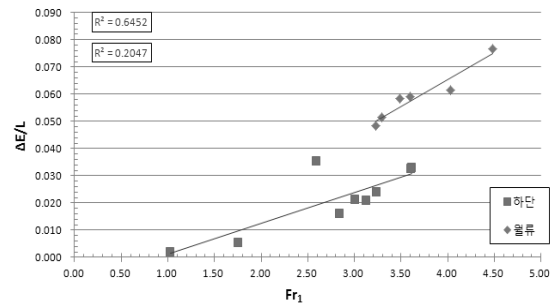
에너지 손실량(ΔE)은 도수 전의 에너지(E_1)와 도수 후의 에너지(E_2)의 차이이며, 공식에 의한 도수 발생 전후의 에너지 손실량은 식 (3)과 같다.

$$\Delta E = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_1h_2} \quad (3)$$

여기서 h_1 은 사류 구간의 수위이며, h_2 는 안정화 구간의 수위이다. 다음은 에너지 손실량(ΔE)에 도수발생 길이로 나누어 단위 거리당 에너지 손실량($\Delta E/L$)을 측정하였다. Fig. 12는 보 형식에 따른 거리 당 에너지 손실량을 나타낸 그림이다.



(a) Loss of Specific Energy with Respect to the Calculated Length in Experiment



(b) Loss of Specific Energy with Respect to the Calculated Length through Formula

Fig. 12. The Specific Energy Loss for the Weir Type Per Unit Distance

거리에 따른 비에너지 손실 분석 결과 유출부의 Fr 값이 증가할수록 단위 거리당 발생하는 에너지 손실의 양은 증가하는 것으로 나타나며, 단위 거리당 에너지 손실량은 월류형 보가 하단방류형 보보다 크게 나타나는 것으로 판단되었다. 월류형 보의 경우 하류 경계조건 20%일 때 도수현상 발생하지 않으므로 그래프에서 제외하였다. 다음 Table 8은 보 형식에 따른 거리 당 비에너지 손실 값을 정리한 것이다.

월류형 보에서 하류 경계조건이 없을 경우 단위유량이 0.036, 0.044, 0.052 $m^3/s/m$ 으로 증가 할수록 단위 거리 당 비에너지 손실은 0.059, 0.071, 0.077로 증가되는 것을 알 수 있다. 다른 하류경계조건 또는 다른 형식의 보에서도 유입유량이 증가할수록 단위 거리 당 비에너지 손실이 증가하는 것으로 나타난다. 월류형 보의 경우 단위유량이 증가함에 따라 단위 거리당 비에너지 손실량은 점차적으로 증가하나 하단방류형 보의 경우 유량 증가에 따른 거리당 비에너지 손실량 변화가 월류형 보에 비해 작다.

Table 8. The Relationship of Specific Energy Losses Between Weir Length And Type

Weir Type	Downstream Boundary Condition	Inflow Discharge ($m^3/s/m$)	Fr	$E_1 - E_2$	$\frac{E_1 - E_2}{L}$
Overflow Type Weir	Freedom Discharge	0.036	3.60	0.071	0.059
		0.044	4.03	0.111	0.061
		0.052	4.49	0.184	0.077
	10%	0.036	3.23	0.048	0.048
		0.044	3.29	0.062	0.051
		0.052	3.48	0.088	0.058
	20%	0.036	0.62	0.018	0.035
		0.044	0.50	0.058	0.058
		0.052	0.67	0.061	0.044
Underflow Type Weir	Freedom Discharge	0.036	2.85	0.037	0.016
		0.044	3.24	0.067	0.024
		0.052	3.62	0.102	0.033
	10%	0.036	3.01	0.038	0.021
		0.044	3.13	0.048	0.021
		0.052	3.61	0.085	0.033
	20%	0.036	1.03	0.001	0.002
		0.044	1.76	0.005	0.005
		0.052	2.15	0.049	0.035

4. 결론

본 논문에서는 기존의 월류형 보의 단점을 보완하기 위해 설계된 하단방류형 보의 문제점 및 설계 방안을 수리학적 연구를 통해 제시하고자 하였으며, 하단방류형 보와 월류형 보의 상류부 조건과 하류부 관리수위에 따른 흐름분석을 실시하여 다음과 같은 결론을 도출 하였다.

보의 방류형식 중에서 하단방류형 보는 월류형 보에 비하여 도수의 길이가 더 크게 나타나며, Fr 값 3.5에서 하단방류형 보의 경우 월류형 보에 비하여 도수의 길이가 2배 이상 큰 것으로 파악되었다. 본 논문에서는 하단방류형 보의 도수길이를 Fr 값에 따라 그래프로 제시하였다.

방류형식에 따른 단위 거리당 비에너지 손실을 분석한 결과 유량이 증가함에 따라 단위 거리당 비에너지 손실량은 증가하는 것으로 나타났으며, 월류형 보의 경우 단위 거리당 비에너지 손실량은 하단방류형 보에 비해 1.5~2배 크게 나타났다. 손실량이 크게 발생하는 이유는 월류형보의 경우는 흐름의 특성상 물의 흐름 방향

에 전환이 생겨 보 직하류부 하상에서 에너지 감세 발생되지만, 하단방류형 보의 경우 방류되는 방향과 흐름의 방향이 동일하여 도수의 길이가 길게 나타나는 것으로 판단된다.

따라서 수공 구조물의 안전을 위해서 하단방류형 보의 경우는 흐름 에너지를 감세할 수 있는 기능의 시설물을 별도로 검토하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원(12기술혁신C01)에 의해 수행되었습니다.

References

Han, HJ (2012). *The analysis of flow characteristics at the downstream depending upon the operating conditions for a moveable weir*, University of Incheon. [Korean Literature]

Jang, DW (2011). *Analysis on the influence depending upon gate operation at the Gumi weir in Nak-Dong river*, University of Incheon. [Korean Literature]

Kim, WJ, Mon, SH, Kim, YG, Min, BM (2007). A study on the bed change prediction depending on movable weir establishment, *Korean Society of Civil Engineers*, pp. 59-78. [Korean Literature]

Kim, GH (2005). *An experimental study on the stream flow by submerged structures condition*, University of Incheon. [Korean Literature]

Kim, JG (2006). *The variation of flow characteristics by installing improved movable weir in a river*, University of Incheon. [Korean Literature]

Yeo, HG, Kang, JG, Cheong, SH (2005). An experimental study about property of hydraulic jump on downstream of round-crested weir, *Korean Society of Civil Engineers*, pp. 2536-2539. [Korean Literature]

- 논문접수일 : 2012년 12월 07일
- 심사의뢰일 : 2012년 12월 08일
- 심사완료일 : 2013년 02월 26일