인양식 수문의 개폐조건에 따른 하류부 흐름특성의 실험적 연구

An Experimental Study of Flow Characteristics at the Downstream Depending on Gate Operation of a Sluice Gate

한형준* · 김영규** · 최계운*** · 이삼희****

Han, Hyeong Jun · Kim, Young Kyu · Choi, Gye Woon · Lee, Sam Hee

Abstract

The weir is one of the hydraulic structure which is supposed to be used to store water quantity against drought. To solve the disturbance of flood control caused by soil sediment and environment problems from the severance of moving sediment, movable weir is currently set up so as to solve that serious problem. There have been many studies focusing on the weir in specific target area. however, it is not applicable for all kinds of moveable weir. Therefore, In this study, experiments for moveable weir typed sluice gate are performed and hydraulics characteristics are measured depending on gate operation. According to comparison results between apron length calculated by Bligh's equation and hydraulic jump length by experiments, hydraulic jump length is bigger than apron length by Bligh's equation where oscillation jump happens. Therefore, it is necessary to set the energy dissipator up for improving stability of hydraulic structure.

Key words : Sluice Gate, Bligh's Equation, Hydraulic Jump, Energy Dissipator

요 지

보는 수로나 하천의 수위 조절과 이수 기능을 담당하기 위해 설치되는 하천 구조물로서 갈수기를 대비한 농업 및 생활용수 확보나 주운을 위한 수심확보의 목적으로 많이 활용되고 있다. 기존의 가동보에 대한 연구는 특정지역을 대상지역으로 하여 보 상류와 하류의 흐름을 분석하였으나, 모든 수문형식의 가동보에 대하여 적용하기 위한 흐름분석은 미비한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 현장에서 설치되는 가동보에 적용될 수 있는 흐름 특성 분석을 위해 하단방류형 가동보를 설치한 수리실험을 실시하였으며, 실험결과로 도출된 도수거리와 Bligh공식의 하상보호공 공식을 비교해본 결과, Froude 수가 2.5이상인 진동도수 흐름에선 측정된 도수거리가 계산한 하상보호공 길이보다 커지는 것으로 분석되어 수공구조물의 안전성을 높이기 위해서는 보 하류부에 흐름에너지 감세 시설물을 설치하는 것이 반드시 필요한 것으로 확인되었다.

핵심용어 : 수문, 블라이 공식, 도수현상, 감세공

1. 서 론

보는 농수로나 하천에 수위를 조절하기 위해 설치하는 하천 구조물이다. 이로써 필요로 하는 농업 및 생활용수 확보나 주운을 위한 수심확보의 목적으로 많이 활용된다.

최근 고정보를 설치할 경우 이수 효과는 있으나 유수가 담수됨에 따라 우려되는 수질 악화 및 유사 이송의 차폐로 인한 환경문제, 저수용량 감소, 치수 문제, 보 하류 국지세굴 문제 등이 대두 되고 있다. 이에 따라 대안으로 가동보 형식

이 고정보와 병용으로 적용되고 있다.

가동보는 높이변화가 가능한 월류형 가동보 방식이 있으며, 수문형식으로 보를 개폐하여 유량을 하단으로 방류하는 하단방류형식의 가동보가 있다. 월류형 가동보는 기존의 고정보와 동일하게 월류를 통하여 하류로 유량이 내려가는 방식이어서 고정보와 같은 흐름양상을 보인다, 하지만 하단방류형 가동보는 가동보 하단을 열어 방류하게 되면서 흐름형태가 개수로 흐름이 아닌 오리피스 흐름을 나타낸다. 오리피스 흐름은 개수로 흐름과 달리 압력수두가 발생하면서 유속이 빠르게 형

*교신저자. 정회원. 한국건설기술연구원 수자원·환경 연구본부 연구원(Tel: +82-31-910-0242, Fax: +82-31-910-0251, E-mail: srad335@kict.re.kr)

Corresponding Author. Member. Researcher, Water Resources & Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology

**도화엔지니어링 수자원부 과장

Manager, Department of Water Resource, Dohwa Engineering

***정회원. 인천대학교 건설환경공학과 교수

Member. Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Incheon

****정회원. 한국건설기술연구원 수자원·환경 연구본부 선임연구위원

Member. Senior Research Fellow, Water Resources & Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology

성되어 큰 소류력을 발생시켜 하상에 국지세굴의 원인이 된다. 또한 고정보에서 월류되는 흐름의 경우 높이차이로 인해 속도수두가 크게 발생하지만 물받이공에서 낙차수 에너지를 감쇄시킴에 따라 흐름의 안정이 빨리 나타나는 반면, 오리피스 흐름의 경우 흐름이 안정되는데 높이차이가 아닌 하류 수위에 따라 큰 영향을 받는다. 우리나라에서 보에 대한 수리 해석은 고정보를 대상으로 주로 이루어져 왔으며 여러 형태의 고정보가 설계에 적용되고 있다. 그러나 가동보는 운영조건에 따라 경우의 수가 많고, 더군다나 수리실험에 대한 연구는 미비한 실정이다.

국내에서의 보에 관한 연구는 2000년대에 들어서서 다음과 같이 활발하게 이루어지고 있다.

김기형(2004)은 수공구조물의 상태를 변경하는 경우 실제하천과 동일한 자연형태 단면을 지닌 수리모형을 이용하여 하도 내에서 변화되는 흐름특성을 분석하였다.

임장혁 등(2009)은 수리모형실험을 이용하여 경사위어의 수리특성을 분석하였으며, 설계조건을 다양하게 고려할 수 있도록 다중회귀분석을 통해 유량계수식을 제시하였다. 여흥구 등(2005)은 수리실험을 통하여 보에서의 임계수심 및 이에 따른 유량의 변화를 파악하고 기존 문헌과 비교 분석을 실시하였다. 즉, 하천에 설치되는 보와 수문에 대한 수리실험을 통하여 보의 높이에 비해 수위가 높은 경우 수위-유량관계를 이론식과 기존 위어공식에 대해 각각 비교하여 그에 대한 차이를 검토하였다. 또한 하류수위에 대한 상류수위변동지점을 측정하여 하류수위의 영향을 받는 임계수심을 제안한 Knapp(1960) 식과 비교 하였다.

최계운 등(2006)은 수리모형실험을 통하여 가동보 중 저층수 유입구가 있는 가동보를 선정하여 보의 설치에 따른 수위 상승효과를 분석하였다. 또한, 가동보 각도 변화에 대한 상류측 수위변동 및 갈수 시 저층수의 효율적 배수를 위해 저층수 유입구에 따른 수위변화 등에 대해서도 연구하였다. 김재구(2006)는 보 설치에 따른 흐름변화를 보 설치각도와 유량 변화에 따라 분석하였고, 물의 깊이에 따라 세분화하여 수심에 따른 유속을 분석하였다. 보에서 상류 쪽으로 떨어진 거리에 따라 유속변화를 조사하여 보 상류의 토사 및 오염물질 퇴적현상의 저감 효과에 대한 연구를 수행하였다.

김준호(2007)는 중소하천에서 설치되는 가동보의 효과를 수치모형을 이용한 다음과 같은 내용에 대해 검증을 실시하였다. 홍수 시 가동보의 수문을 개방하여 하천수의 소통을 증가시켜 홍수 피해를 최소화 할 수 있는 방안과 유속의 증가로 보 상류부의 퇴적물질을 저감하는 방안의 적절성에 관한 연구를 수행하였다.

박종표 등(2008)은 HEC-RAS모형을 통한 부정류 해석을 수행하여 도시 내 인공호수를 대상으로 100년 빈도 홍수 시 월류부 가동보 설치에 따른 접속하천의 홍수조절 효과를 분석하였다.

강준구 등(2010)은 수리실험을 통하여 WTF(Wave Type Flow)가 발생하는 수리조건과 WTF(Wave Type Flow)의 규모를 파악하고, 계단형 하류흐름조건에 따른 유속분포를 분석하였다.

이런 가운데, 현재 가동보에 대한 연구에 있어 가동보 운영에 따른 특성연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 대상구역에 한정적이지 않고, 수문형 가동보에 적용가능하도록 분석인자를 일반화하여 가동보의 수문 운영조건이 변하는 경우에 보 하류의 흐름에 대한 분석을 수행하였다.

2. 실험장치 구성 및 실험 방법

2.1 수리실험 장치 구성 및 측정

인양식 수문에서 개폐조건에 따라 발생하는 도수현상을 측정 및 분석하기 위하여 수리실험을 실시하였다. 수리실험에 사용한 실험장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 수로와 유량공급부로 구분할 수 있다.

유량공급부로는 지하저류조, 펌프가 있으며 실험장치 수로는 유량조절조와 모형수로, 하류집수정으로 구성되어있다. 지하저류조는 용량을 $60 \text{ m}^3 (4 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 2.5 \text{ m})$ 로 설치하여 물을 저장 가능하도록 설치되어 있다.

실험장치로 이용된 개수로는 최대 $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 유량이 유하가 가능하도록 설치하였고, 유입 및 배수를 원활하게 하기 위하여 마찰손실의 영향이 적도록 관로를 설치하였다.

수로바닥에는 구멍을 뚫어 액주계를 연결한 수압관을 설치하여 보 설치로 인하여 발생하는 흐름의 변화 및 수로 바닥에 작용하는 압력수두를 측정하기 위하여 수문 설치 지점에서 약 20 cm 떨어진 지점부터 수로 중앙 및 양측으로 8 cm 간격으로 3열로 설치하였다. 설치 간격은 흐름 중 방향으로

Fig. 1. Water Circulation System

Fig. 2. Installation of Sluice Gate

10 cm 간격으로 설치하였으며 총 설치된 수압관의 개수는 63 개이다. 가동보의 설치 위치는 직선수로 시점에서 수로 흐름 이 충분한 정류상태가 될 수 있는 지점에 설치하였다.

2.2 수리실험 방법

2.2.1 측정위치 및 방법

가동보를 기준으로 하여 보 상류에서는 수리학적 특성이 크게 변동하지 않기 때문에 상류의 안정화된 지점의 한 단면 만을 측정하였다. 가동보를 통과하여 보 하류방향으로 유하하 는 흐름은 상류에서의 흐름과는 다르게 크게 요동하면서 도 수현상을 동반한다. 이러한 수리학적 거동을 자세히 측정하기 위하여 보 하류로 20 cm 떨어진 단면부터 10 cm 간격으로 21개 단면 총 63지점을 설치하여 각 단면별로 세 지점에서 수위 및 유속을 측정하였다. 보의 상하류의 모든 지점은 총 70지점이며 유속측정은 수면에서 60% 지점을 측정하는 1점 법으로 모든 지점에 대하여 측정하였다. 수심은 포인트게이지 와 수압계를 사용하여 측정하였다. Fig. 3과 4는 실험에 사 용된 유속계 및 수위계를 나타낸다.

수로 상단에는 유속 및 수위의 측정을 용이하게 하기 위하 여 1.8 m×1.0 m 크기의 계측기기 이송활차용 레일을 설치하 였으며, 유속계 및 포인트 게이지를 부착하여 측정지점으로의 이동 및 수심 및 유속을 측정을 할 수 있도록 하였다. 부착 한 유속계는 2차원 전자식 유속계인 일본 KENEK사에서 제 작한 VP1200을 사용하였다. VP1200은 X, Y방향의 2축 4 방향 유속을 측정할 수 있으며, 측정범위는 0~±200 cm/s, 측 정 오차는 유속범위에 따라 ±1~±4 cm/s이다. 측정 간격은 연 속측정 및 5, 10 20, 40, 60초 간격의 평균유속으로 측정할 수 있으며 측정된 데이터를 저장하여 사용할 수 있다. 본 실험

Fig. 3. Current Meter (VP-1200A)

Fig. 4. Point Gage

Fig. 5. Measuring Points

Fig. 6. Measurement Section for Analysis

험에서는 20초의 시간간격을 설정하여서 평균 유속을 측정하 였다.

수심 측정을 위해 사용된 포인트 게이지의 측정범위는 0~410 mm으로 측정단위는 1.0 mm이다. 수심 측정은 포인트 게이지를 이용하여, 수로 바닥의 높이와 수면의 높이의 차를 측정하였다.

본 실험에서는 Fig. 5와 같은 측정지점을 기준으로 수행되 었다. 본 연구를 위한 실험수로는 총연장 11 m, 폭 0.5 m, 높이 0.8 m인 좁은 폭 개수로로서 안정된 수위를 유지하기 위해, 충분한 통수시간 유지 후, 수위가 안정되었다고 판단된 시점에 수위를 측정하여 안정화 흐름을 확인하였다. 또한, 측 선 마다 3개의 측정지점을 수로 폭 가운데에 선정하여 측정 수심 및 유속 계측 시 표면장력과 벽면의 영향을 최소화하였 다. 높이 수심 및 유속 측정 지점은 수로단면에 미리 측정점 을 표시하여 정확한 지점에 대한 측정이 될 수 있도록 하였고, 수심과 유속 측정지점은 동일하다.

Fig. 6은 수문형태의 가동보 설치시의 흐름의 모식도를 나 타내며 본 연구에서 측정한 단면을 나타낸다. 주요 흐름 변 화가 큰 지점을 대상으로 분석하기위하여 단면을 분류하였다.

본 실험에서 측정한 주요 단면은 ① 수문형태의 가동보 상 류지점, ② 가동보 직하류지점, ③ 사류에서 상류로 전이가 시작되는 지점, ④ 도수가 끝나고 흐름이 안정화되기 시작하 는 지점 의 총 4개 지점이다.

① 단면은 가동보의 개도높이 변화에 따라 발생하는 수위 상승 및 하강을 검토하여 상류지역의 영향을 분석하였다. ② 단면은 흐름에대한 최대유속 및 수위를 측정하였다. ③ 및 ④ 단면의 경우 도수 발생 전 후의 에너지 변화를 비교·분 석하였다.

2.2.2 수리실험 조건

가동보 하류부의 수문개도 높이에 따른 보 하류부의 흐름

Fig. 7. Downstream Flow of the Sluice Gate

Table 1. Experiment Conditions

유량조건 Q (m ³ /s)	단위 유량 q (m ³ /s)	수문개도 높이 h_d (mm)
0.018	0.036	26
		29
		32
		35
0.022	0.044	36
		39
		42
		45
0.026	0.052	42
		45
		48
		51

변화를 확인하기 위해 세 가지 유량조건을 설정하였다. 이 유량별로 개수로 실험장 내에서 도수를 발생시키는 최소한의 개도높이를 설정한 후 3 mm씩 높여가며 수리실험을 수행하였다.

Fig. 7은 수문 개폐에 따른 하류부 흐름 변화 모습을 나타낸다. 수문 하류부는 난류가 심한 구간이므로 측선마다 3개의 지점에서 수심과 유속을 측정하여 평균값을 분석에 사용하였다. Table 1은 본 연구를 위한 수리실험 조건을 나타낸다.

수리실험을 통해 도출한 결과와 분석에서는 실험대상이 특정구역에 국한적이지 않고 실험조건과 동일한 모든 가동보에 대해서 적용이 가능한 단위유량으로 서술하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 보 상하류간 수심차에 따른 하류부 흐름변화

가동보의 상류와 하류간의 수심 변화는 보를 통과하는 흐름의 형태에 큰 영향을 미친다. 상류와 하류간의 수심 차이가 클수록 상하류 간의 수리학적 특성인 수심과 유속에서 변화 폭이 크다. 본 절에서는 보 상하류간 수심차와 수문개도 높이의 비에 따라 변하는 하류부 흐름의 변화에 대해 실험하였다.

Fig. 8은 수문의 개도높이가 높을수록 보 상류에서 저류량은 낮아져 보 상하류 수심 차이는 작아지는 것을 모든 실험

Fig. 8. Water Depth(ΔH) Changes Depending on Gate Operation

Fig. 9. Dimensionless Velocity Profile Depending on Gate Operation

유량에서 확인할 수 있다.

Fig. 9는 수문개방 높이와 상하류간 수심차의 비에 따른, 보 상류에서의 접근 유속과 보 직하류부에서 유출되는 jet류 유속의 비의 관계를 나타낸다. 각 유량별 수문개도에 따른 상하류간 수심차의 비가 증가함에 따라서 상하류 유속비가 비례해서 증가한다. 또한 수문의 전도 높이가 높아질수록 보 상하류간 수심차이는 작아지므로 두 인자간의 비는 더 낮아졌다. 따라서 두 수심간의 비($\Delta H/h_d$)가 증가함에 따라서 상하류부 접근유속에 대한 보 직하류부의 유출 유속의 비(V_d/V_1)가 커지는 경향을 나타낸다.

$\Delta H/h_d$ 가 0.87~3.01의 범위를 나타낼 때, 무차원유속비 V_d/V_1 는 3.59~6.94를 보이며 결정계수(R^2)는 0.898로 높은 상관관계를 나타내며 비선형 비례 관계를 보인다. 두 인자간의 상관관계식은 다음과 같이 도출되었다.

$$V_d/V_1 = -0.206\left(\frac{\Delta H}{h_d}\right)^2 + 2.408\left(\frac{\Delta H}{h_d}\right) + 1.527$$

3.2 Froude 수 변화에 따른 하류부 흐름 변화

가동보를 통과하는 흐름은 통수단면적의 급축소로 인하여 빠른 유속을 나타내는데, 사류상태를 보이다가 직하류부터 거리가 멀어짐에 따라 도수현상을 일으킨 후 수심과 유속이 일정하게 안정화되는 흐름을 보인다.

Froude 수 4.5이하에서는 약도수(weak jump)와 진동도수(oscillation jump)를 나타내는데, 진동도수의 경우 불안정한

도수로써 수로바닥에서 jet류가 형성되어 jump의 소단에서 침식현상이 크게 일어나기 때문에 설계 시 가장 고려해야 할 흐름이다.

따라서 본 연구에서는 보 직하류 부분에서 Froude 수가 4.5이하인 1.72~3.36의 범위에서 변화함에 따른 하류부 도수 거리, 도수 높이, 도수 전후 에너지 손실의 흐름 특성을 검토하였다.

Fig. 10에서 볼 수 있듯이, 보 직하류로부터 도수현상이 끝나는 지점까지 거리는 유량과는 큰 관계를 나타내지 않으며, 수문개도 높이와 수문을 통과하는 흐름에서의 유속에 관계된 Froude 수와 밀접한 관계를 가지고 있다. 보 직하류부를 통과하는 흐름의 Froude 수 범위 1.72~3.36에서 안정화된 길이(L_2)는 0.5 m~2.2 m를 나타낸다. 이 거리의 산정은 측정된 단면에서 수심 및 유속이 일정한 범위로 유지되며 흐름의 안정화를 보이는 지점까지 거리를 말한다. 흐름이 안정화 되는 지점까지의 거리는 실험수로 내에 수문이 설치되기 전의 수심 및 유속의 측정값을 기준으로 산정하였다.

Froude 수가 커짐에 따라 도수거리가 증가하는 것이라 판단할 수 있고, 두 인자간에는 비선형 비례관계의 상관성을 보였다.

Fig. 11에서 볼 수 있듯이, 도수높이는 Froude 수 변화뿐 아니라 유량 크기에도 관계하는 것을 확인할 수 있다.

보 직하류부를 통과하는 흐름의 Froude 수 범위 1.72~3.36에서 도수높이(Y)는 0.47 mm~69.9 mm를 나타낸다. 도수

Fig. 10. Relationship between Froude No. and Hydraulic Jump Length

Fig. 11. Relationship between Froude No. and Height of Jump

높이는 도수 시작 전 수심과 도수가 끝난 후 안정화된 흐름이 나타날 때 수심간의 차이를 나타낸다.

단위유량이 증가함에 따라 Froude 수 변화에 따른 도수높이의 상관관계 그래프의 기울기는 증가하는 것으로 나타났고, 도수높이는 증가하는 비선형 비례관계를 나타냈다.

Fig. 12에서 보이는 바와 같이, 도수 전과 도수 후 에너지 손실은 도수 전 비에너지를 E_1 이라 하고 도수 후 비에너지를 E_2 라 하면 E_1-E_2 로 표현할 수 있다. 이는 유량에 대한 영향보다는 보 직하류부에서의 Froude 수에 의해 더 큰 영향을 받는다. Froude 수가 증가함에 따라서 도수로 인한 에너지 손실은 증가하는 것으로 판단할 수 있고, $Fr < 2$ 인 도수에서는 에너지 손실이 상당히 작게 나타났다.

Fig. 13에서 볼 수 있듯이, 도수 효율은 유량에 따른 영향은 거의 없고, 보 직하류부에서 Froude 수에 따라 큰 영향을 받는 것을 확인할 수 있다.

Froude 수가 1.72~3.36의 범위를 보일 때, 도수효율 E_2/E_1 은 0.64~0.98의 범위를 나타내며 Froude 수가 증가함에 따라서 도수 효율(E_2/E_1)은 감소하는 것으로 판단할 수 있다. 두 인자간의 상관관계는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{E_2}{E_1} = 0.105Fr^2 - 0.717Fr + 1.889$$

이때, $Fr < 2$ 인 도수에서 도수효율은 1에 가까운 상당히 높은 것을 알 수 있으며 이는 도수에 따른 에너지 손실이 심히 작기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 12. Relationship between Froude No. and Energy Loss

Fig. 13. Relationship between Froude No. and Efficiency of Hydraulic Jump

3.3 Bligh 공식과 실험결과의 비교

하천에서 홍수가 발생하면 가동보를 통해 유하하는 유량은 보 직하류부의 하상바닥에 세굴현상을 일으키며 수공구조물인 가동보의 안정성에 악영향을 미친다. 이러한 하상바닥의 세굴현상으로부터 가동보를 보호하기 위해 가동보 직하류부에 물받이공 및 바닥보호공을 설치한다.

하천설계기준에서는 물받이공 및 바닥보호공은 대상구역의 설계홍수위와 하상입경 등에 따라서 길이가 산정되며 Bligh 공식 및 국립건설시험소 공식을 사용한다고 규정하고 있다.

본 연구에서는 Bligh공식과 수리실험을 통하여 도출한 보 하류부의 도수거리를 비교하였다.

도수길이는 보 직하류부터 가동보 하류 유속 및 수심의 측정결과 수심과 유속이 일정한 범위 내에서 수렴하기 시작하는 지점까지 길이로 판단하여 Bligh공식에 따른 하상보호공 길이와 비교하였다.

하상보호공의 설치범위는 하상유지시설에 의한 영향이 없어진다고 추정되는 범위까지를 원칙으로 한다고 하천설계기준(2009)에 명시 되어있고 식은 다음과 같다.

$$L_2 = 0.66C \cdot f \cdot (H_a \cdot q)^{1/2} - L_1$$

여기서 C 는 블라이 계수, f 는 안전율(가동보:1.5, 고정보:1.0), H_a 는 하류측 물받이 상판에서 보마루까지의 높이(m), q 는 단위폭당 유량($m^3/s/m$), L_1 는 하류측 물받이 길이(m)이다.

Bligh 공식은 단위유량, 월류높이, 하상유사입경을 인자로 하는 공식이지만, 본 실험에서는 유사에 대한 실험은 수행하지 않은 관계로 우리나라 모래하천에 가장 대표적으로 분포하는 굵은모래를 가정하여 실험결과와 비교하였다.

Fig. 14(a)는 단위유량이 $0.036 m^3/s/m$ 일 때 Bligh공식과 실험결과의 비교를 나타낸다.

수문 하류부의 Froude 수가 1.72일 때 Bligh공식으로 산정된 바닥보호공 거리는 0.47 m로 계산되고, 실험을 통한 결과값은 0.5 m를 나타내어 Bligh공식보다 1.06배 큰 값을 나타낸다. Froude 수가 2.05일 때 Bligh공식으로 산정된 바닥보호공 거리는 0.5 m로 계산되었으며 실험을 통한 결과값은 0.6 m를 나타내어 Bligh공식보다 1.2배의 큰 값을 나타내지만, 소형 개수로 실험임을 감안할때 실험에 따른 도수길이와 Bligh공식은 비슷한 결과를 나타낸다.

하지만, Froude 수가 3.0 이상이 될 때는 Bligh공식에서 산정된 바닥보호공 길이가 실험을 통한 결과보다 현저히 짧게 나타난다.

Fig. 14(b)는 단위유량이 $0.044 m^3/s/m$ 일 때 Bligh공식과 실험결과의 비교를 보여준다.

두 값을 비교한 결과, Froude 수가 1.75일 때와 2.05일 때는 Bligh공식으로 산정된 바닥보호공 거리가 각각 0.51 m, 0.55 m로 산정되었고 실험을 통한 결과 값은 0.6 m, 0.8 m를 나타내며 비슷한 결과를 보였다. 하지만, Froude 수가 2.98과 3.09일 때는 Bligh공식에서 산정된 바닥보호공 길이보다 실험을 통한 결과는 약 2.5~2.8배 큰 값을 보였다.

Fig. 14(c)는 단위유량이 $0.052 m^3/s/m$ 일 때 Bligh공식과

Fig. 14. Comparison between Bligh's Eq. and Experiment Result

실험결과의 비교를 보여준다.

Bligh공식과 실험 결과를 비교해본 결과 수문 하단부의 Froude 수가 1.88, 2.14일 때는 Bligh공식으로 산정된 거리가 0.57 m, 0.59 m이었으며, 실험을 통한 결과값은 0.5 m, 0.7 m로 유사한 값을 나타냈다. 하지만, Froude 수가 2.85, 3.14일 때는 Bligh공식으로 산정된 바닥보호공의 거리와 실험을 통해서 산정된 거리는 약 2.0~3.0배의 차이를 보였다.

Fig. 15는 모든 유량조건에 따른 Bligh공식 산정값과 실험을 통한 안정화 구간 거리 비교를 나타낸다. 수문 하류부에 도수가 일어나는 조건에서 Froude 수의 범위가 1.7~2.5인 약 도수의 경우 Bligh 공식으로 산정된 거리는 실험으로 도출한 거리와 비슷한 값을 나타내며 실제 적용 가능할 것으로 판단되었다.

하지만, Froude 수가 2.5를 넘는 진동도수(oscillation jump)의 경우 실험값에 비해 Bligh공식으로 산정한 하상보호공 길이가 너무 과소하게 나타나 실제 수문 직하류부에 적용하기가 어려울 것으로 판단되었다.

Bligh공식은 단위유량, 하상토 입경, 보 높이, 즉 보 상하

Fig. 15. Summary of the Comparison between Bligh's Eq. and Experiment Result

류간 수심차에 관계된 공식으로 보 직하류부에서 발생하는 사류 및 도수현상 등 하상바닥에 큰 영향을 미치는 인자를 고려하지 않았다고 판단된다. 또한, 기존에 Bligh공식을 통해 산정된 하상보호공의 길이는 문제점을 가지고 있을 수 있다고 판단된다. 따라서 수공구조물의 안전성을 높이기 위해서는 기존에 Bligh 공식에 의해 하상보호공의 길이를 산정한 보 및 수문 하류부에 댐에서 사용되는 감세공이나 수욕지(water cushion)등 에너지 감세 시설물을 설치할 필요가 필요하다고 확인되었다.

4. 결 론

본 연구에서 하천 횡단구조물인 가동보가 설치될 경우 보의 운영에 따른 보 상류와 하류의 수심변화 및 도수현상을 분석하였다. 여기서는 보에 설치되는 하상보호공 길이와 기존의 하천설계기준에서 명시하고 있는 Bligh공식과 결과를 비교하여 수공구조물의 안정성을 판단하는 목적으로 수리실험을 실시하였다. 실험내용은 수문개도높이에 따라 변화하는 보 하류부 흐름특성이며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 가동보 설치에 따라 빨라진 유속이 안정화 되는데 소요되는 거리를 하상보호공 길이로 판단하여 Bligh공식과 비교한 결과, Froude 수 범위가 1.7~2.5인 약도수에서는 Bligh공식이 적용 가능하나, Froude 수가 2.5이상인 진동도수에서는 적용이 어려워 감세시설물의 설치가 필요한 것으로 판단되었다.

2) 보 상하류간 수심차(ΔH)와 가동보 개방높이(h_d)의 비의 변화에 따른 상하류간 유속비(V_d/V_1)에 관한 상관관계 공식을 다음과 같이 제안하였다.

$$V_d/V_1 = -0.206\left(\frac{\Delta H}{h_d}\right)^2 + 2.408\left(\frac{\Delta H}{h_d}\right) + 1.527$$

3) 보 직하류부의 Fr 수 변화에 따른 도수 효율(E_2/E_1)변화에 관한 상관관계 공식을 다음과 같이 제안 하였다.

$$\frac{E_2}{E_1} = 0.105Fr^2 - 0.717Fr + 1.889$$

4) 도수에 따른 에너지 손실은 보 하류 Fr 수 1.5~2.0에서 도수효율(E_2/E_1)이 1에 가깝게 나타나 에너지 손실이 거의 없는 것으로 나타났다.

가동보에 따른 하천의 흐름은 가동보의 형태, 가동보 운영 조건, 유량조건 보 상하류간 수위차등에 의하여 결정된다고 판단된다. 본 실험은 수문의 운영높이에 따른 보 하류부의 흐름변화에 대하여 소규모 실내수로에서 고정상 실험만을 수행하였기 때문에 수문 하류부의 흐름특성을 반영하는데 현장 제한상황으로 인해 정량적인 분석에는 한계성을 가지고 있다.

따라서, 도수길이 감소 및 에너지 감세 등에 따른 연구를 위해서는 다양한 인자들을 가지고 이동상과 병행하여 진행한다면 더욱 폭 넓은 연구 결과를 도출할 수 있을 것으로 여겨진다.

감사의 글

본 연구에서 연구비 일부는 인천대학교 2011년도 자체연구비로 지원 받았으며 이에 감사의 뜻을 전한다.

References

- Choi, G.W., Kim, Y.K., Cho, S.W., and Kim, J.Y. (2006) Variation of Water Elevation by Setting Angle of Movable Weir with Bottom Flow Gate KSCE Conference & Civil Expo 2006, pp. 2661-2664.
- Kang, J.G., Yeo, H.G., Lee, K.C., and Choi, N.J. (2010) Experimental Study on Flow Characteristic and Wave Type Flow at Downstream of Stepped Weir, Journal of Korea Water Resource Association, Vol. 43, No. 1, pp. 41-49.
- Kim, J.G (2006) The Variation of Flow Characteristics by Installing Improved Moveable Weir in a River, Master's dissertation, University of Incheon, Incheon, Republic of Korea.
- Kim, J.H. (2007) The Study on The Bed Chang Simulation depend

- on Moveable Weir Establishment, Kunsan National University, Kunsan, Republic of Korea.
- Kim, K.H. (2005) An Experimental Study on the Stream Flow by Submerged Structures Condition, Ph.D. dissertation, University of Incheon, Incheon, Republic of Korea.
- Lim, J.H., Jin, S.W., and Song, J.W. (2009) Study on Estimation for Discharge Coefficient of Diagonal Weir, *Journal of Korea Water Resource Association*, Vol. 42, No. 5, pp. 375-383.
- Park, J.P., Kim, T.W., Hwang, T.H., and Park, H.K. (2008) Study on Flood Control Effect with Movable Weir, *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, pp. 1259-1263.
- Yeo, H.G., Kang, J.G., Cheong, S.H., and Yoon, B.M. (2005) Experimental Study on Establishment of Downstream Critical Depth in Round-Crested Weir, *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, pp. 1113-1117.

© Received May 7, 2013

© Revised May 9, 2013

© Accepted October 10, 2013