

보 하류부 임계수심 설정에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Establishment of Downstream Critical Depth in Round-Crested Weir.

여홍구*, 강준구**, 정상화***, 윤병모****

Hong Gu Yeo, Joon Gu Kang, Sang Hwa Cheong, Byeong Mo Yoon

요 지

보 상류의 유속 및 수심과 같은 흐름 조건은 보, 하천 형상, 그리고 하류 흐름 특성에 의해 좌우된다. 본 연구에서는 하류 조건에 따라 보 상류의 흐름 특성에 미치는 영향을 검토하였다. 이를 위해 구형단면의 수로에 하천설계지침(2002)에 따라 보를 제작하여 설치하였으며 보에서의 임계수심 및 이에 따른 유량의 변화를 파악하였으며 실험결과를 기존 문헌과 비교·분석하였다. 또한 자유 월류로 빠른 유속을 지닌 흐름이 수로의 마찰저항과 하류 배수효과에 의해 에너지 소멸로 나타나는 도수현상을 관측하여 발생특성을 파악하였다. 도수의 발생조건은 Posey와 Hsing(1938)에 제시한 결과와 유사한 결과를 보였으며 하류영향에 따른 도수 발생 위치는 하류단 수위와 일정한 관계를 갖고 있으나 유량과는 선형적인 관계를 보이지 않는 것을 알 수 있었다. 또한 임계수심 설정에 대해 Knapp(1960)이 제시한 산정식과 비교한 결과 유량이 작은 경우 거의 일치하는 결과를 보였으나 유량이 증가할수록 오차가 커졌다. 임계수심 전·후의 유량계수를 살펴본 결과 하류 조건에 의해 임계수심을 넘으면 유량계수가 자유 월류 시보다 약 2% ~ 6.5%의 감소를 나타냈으며 공급유량이 0.05 m³/s 일 경우 유량계수의 차이가 가장 큰 것을 알 수 있다.

핵심용어 : 보(round-crested weir), 도수, 임계수심, 유량계수

1. 서론

보는 수로나 하천의 수위를 조절하여 각종 용수의 취수, 주운, 경관 등을 도모하거나 조수의 역류를 방지하기 위해 하천의 횡단방향으로 설치하여 제방의 기능을 갖지 않는 시설로 국내에서는 낙차공과 함께 하천에서 자주 시공되는 하천 구조물이다. 보에서의 수리특성은 보의 apron(물받이) 길이 및 하상보호공 등 구조적 안전성을 확보하기 위한 중요한 자료로 활용된다. 일반적으로 보의 수리특성은 자유 월류라는 측면에서 댐의 여수로와 유사하지만 하류 수위가 높아져 수중보와 같이 잠수 흐름이 되면 보의 수리 특성은 여수로와 다르게 된다.

본 연구에서는 수리실험을 통해 보에서 하류의 영향이 자유 월류 유량에 영향을 주는 임계수심을 측정하고 Knapp(1960)이 제시한 결과와 비교·검토하였다. 또한 임계수심 전·후의 유량계수변화를 유량별로 살펴 보았다. 도수는 월류하는 물의 에너지를 소멸시켜 하천 구조물 하류측의 구조적 안전성을 확보하는데 중요한 역할을 하는데 본 실험에서는 자유 월류 조건에서 하류단 수위에 따른 도수의 발생위치와 도수 높이를 유량별로 측정하여 하류의 영향에 따른 도수의 특성을 살펴보았다.

* 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원E-mail : yeo917@kict.re.kr

** 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원E-mail : jgkang02@kict.re.kr

*** 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원E-mail : kikirah@kict.re.kr

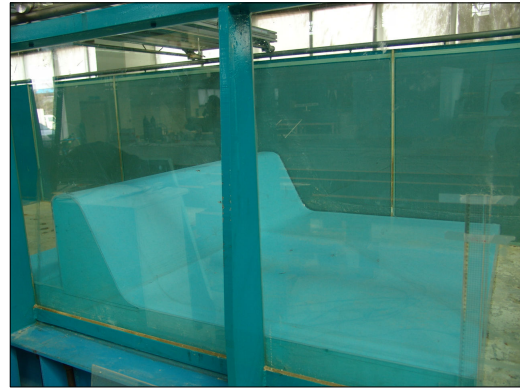
**** 비회원·한국건설기술연구원 수자원연구부 선임기술원E-mail : bmyoon@kict.re.kr

2. 실험조건

본 실험은 한국건설기술연구원에서 보유하고 있는 가변 경사식 개수로 실험장치를 이용하여 수행하였다. 개수로 실험장치의 체원은 길이 14 m, 높이 1.2 m, 폭 1.5 m이며 수로바닥은 철판이나 추후 압력측정을 위한 공간을 만들기 위해 아크릴과 목재로 10 cm를 바닥에서 높였으며 좌우 측벽은 강화 유리로 제작하여 도수발생에 따른 거리 및 도수 높이를 육안으로 관찰할 수 있도록 하였다(그림 1참조). 유속측정은 Sontek의 3차원 ADV를 이용하여 측정하였으며 측정속도는 전 수심에 걸쳐 50 Hz이고 측정시간은 100초로 하여 총 5,000개의 자료를 이용하여 유속을 분석하였다. 실험 구간은 보를 중심으로 상류단과 하류단으로 구분하였으며 상류단은 보로부터 15 cm, 35 cm, 그리고 50 cm 떨어진 지점에 측선을 설정하여 횡방향으로 3개 지점에서 측정하였다. 하류단은 도수발생 지점의 상류에서 하나의 측선을 설정하여 횡방향으로는 상류단과 동일한 방법으로 측정하였다. 수직방향 유속은 수심에 따라 측정지점을 달리하여 측정하였다. 실험유량은 0.05 m³/s에서 유량공급수조에서 최대 공급유량인 0.2 m³/s까지 0.05 m³/s씩 공급하였다.



Micro ADV 설치



벽면 투명 강화 유리 설치

그림 1. 실험 수로 사진

3. 실험결과

3.1. 도수

3.1.1. 도수의 발생

수평바닥인 구형단면 수로에서 보의 마루를 통과한 흐름은 사류가 되어 빠른 유속을 보이나 하류로 진행할수록 수로와의 마찰저항에 의해 흐름의 에너지는 소멸되어 그 결과 흐름이 진행됨에 따라 연속법칙에 따라 유속은 감소되고 수심은 증가하게 된다. 이러한 흐름 중 Froude 수(Fr), 도수발생 전·후의 수심(y_1 , y_2)의 관계가 다음 식을 만족시킬 경우 도수가 발생한다(Posey와 Hsing, 1938).

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2}(\sqrt{1+8Fr^2}-1)$$

그림 2는 Posey와 Hsing이 제안한 식과 본 실험에서 측정된 도수 발생 지점에서 측정된 결과를 비교하여 나타내었다. 그림을 살펴보면 0.1 m³/s인 경우 제안식과 유사한 경향을 보이고 있으나 0.2 m³/s인 경우에는 제안식과는 약간의 오차를 보이고 있다. 이는 유량이 증가할수록 도수 후의 수면형상이 복잡해져 정확한 목측으로 도수 높이를 측정하는데 어려움이 있었으며 이러한 원인으로 정확도가 떨어진 것으로 판단된다.

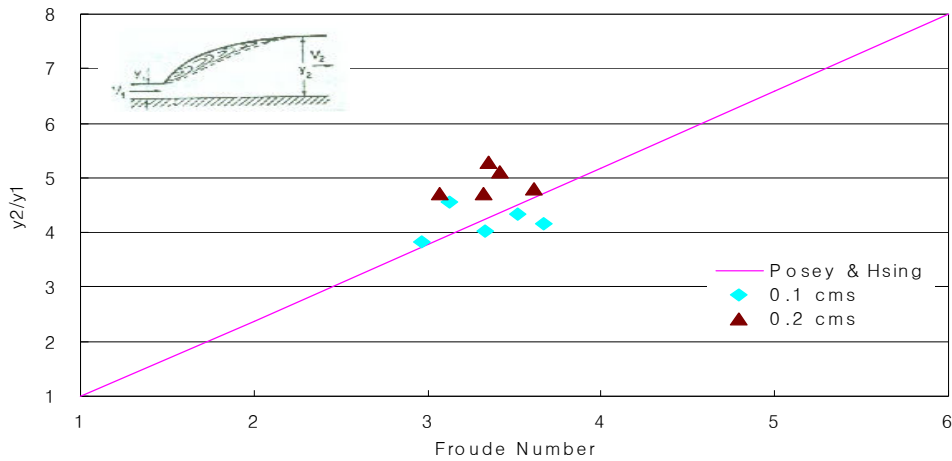


그림 2. 도수발생 조건의 비교

3.1.2. 하류 영향에 따른 도수 발생 특성

도수발생거리(L_j)와 하류단 수위(H_d)를 보 높이(L_w)로 각각 무차원화하여 관계를 도시한 그림이다. 하류단 수위가 증가할수록 도수발생위치는 보에서 하류방향으로 이동하는 것을 알 수 있다. 이는 수위가 증가할수록 배수영향을 받아 에너지 소산으로 인한 도수가 더 빨리 일어나게 되기 때문이다. 또한 각기 다른 유량조건에서도 도수발생거리와 하류단 수위와의 관계는 유사한 경향을 나타냈다. 그러나 유량을 0.05 m³/s에서 0.1 m³/s로 유량을 증가시키는 경우 하류단 수위를 크게 증가시켜도 도수발생위치는 비슷하였다. 따라서 도수발생은 하류단 수위와 일정한 관계를 갖고 있으나 유량과는 선형적인 관계를 보이지 않는 것을 알 수 있다.

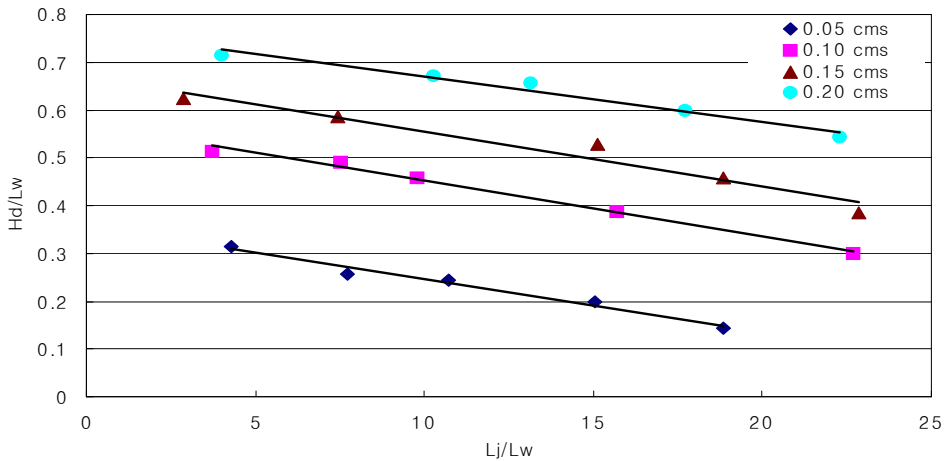


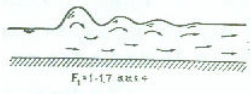
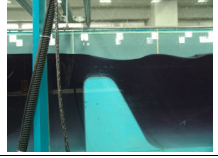


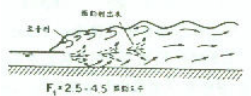



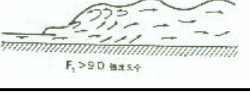
그림 3. 하류단 수위에 따른 유량별 도수 발생 위치

3.1.3. 도수 형상

USB(1955)의 연구에 의하면 도수의 형상을 Froude 수에 따라 표 1과 같이 분리하였다. 본 실험에서는 다양한 Froude 수에 따른 실험을 수행하지 못하였으나 Froude 수의 범위가 1에서 4정도의 범위에서 나타나는 도수의 형상을 디지털카메라로 촬영하였으며 결과는 표 1에 나타내었다. 수리실험을 통해 Froude 수와 도수의 형상과의 관계를 관측한 결과 USB(1955)에서 제시한 Froude 수의 범위에 따라 정확하게 나뉘지 않았

지만, 도수의 형상에 따라 Froude 수를 대략적으로 예측하는데 한 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

표 1. Froude 수에 따른 도수의 형상

Froude 수에 따른 형상	현상	수리실험을 통한 수면형
 <p>$F_1=1.7$ 弱急流</p>	과상도수(undular jump) 과상의 수면이 형성됨	
 <p>$F_1=1.7-2.5$ 弱急流</p>	약류도수(weak jump) 도수표면에 작은 로울러가 생기나 하류측 수면은 매끄럽게 유지	
 <p>$F_1=2.5-4.5$ 弱急流</p>	진동도수(oscillating jump) 바닥으로부터 수면까지 일정치 않은 주기로 도수중으로 들어가는 진동성 흐름 존재	
 <p>$F_1=4.5-9.0$ 弱急流</p>	안정도수(steady jump) 표면 로울러 하류단과 고속흐름으로부터 분리되려는 점과는 실용상 동일한 연직면 내에 존재	
 <p>$F_1 > 9.0$ 弱急流</p>	강류도수(strong jump) 고속류가 도수의 앞면에 와를 발생시킴	

3.2. 임계수심

그림 4는 다음과 같이 Knap(1960)이 제시한 임계수심(H_1) 산정식과 실험에서 측정된 임계수심을 비교한 그림이다. 그림을 살펴보면 유량이 작은 경우($0.05 \text{ m}^3/\text{s}$, $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$)에서는 산정식과 거의 일치하지만 유량이 클 경우 오차가 커진 것을 알 수 있다.

$$\frac{H_1}{y_c} = 3.286 - 1.905 \frac{H_0}{y_c} \quad (\text{Knap, 1960})$$

보에서 상류부 유효수심(H_0)과 보의 유량(Q)과의 관계는 보의 유효 폭과 접근 흐름의 총 수두(H_0)를 이용하여 광정위어와 비슷하게 다음과 같이 표시된다.

$$Q = C' b \sqrt{2gH_0}^{3/2}$$

접근 유속의 수두가 상류부 유효 수심에 비해 충분히 작으면 총 수두는 상류 유효수심으로 볼 수 있다. 보의 유효 폭은 보 위의 흐름 장애물이나 양 측벽의 영향을 고려하여 결정되나 보 위에 흐름 장애물이 없고 측벽이 부드럽게 처리된 경우 실제 길이로 볼 수 있다. 따라서 위 두 식으로부터 유량계수 C' 를 구하는 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C' = \frac{\sqrt{2}}{2(H_0/y_c)^{1.5}}$$

그림 5는 공급유량별 임계수심 후의 유량계수를 임계수심 전의 유량계수로 나누어 이를 %비율로 나타낸 것이다. 결과를 살펴보면 임계수심을 넘은 후 유량계수가 감소하는 것을 알 수 있다. 즉, 하류의 영향으로 인해 월류유량이 감소하는 것을 나타내며 통수능이 감소하는 것이다. 이로 인해 태풍이나 국지적 홍수로 인해 하류의 수위가 상승할 경우 보 주위에서 피해가 증가하는 한 원인이 된다.

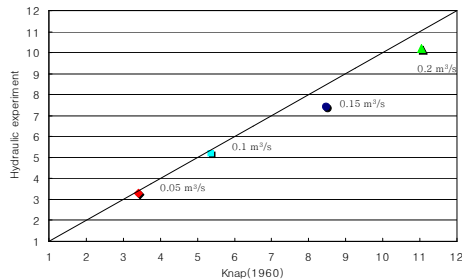


그림 4. 임계수심에 대한 계산값과 실험값의 비교

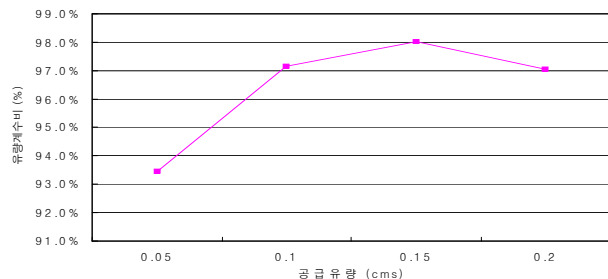


그림 5. 공급유량에 따른 유량계수비

4. 결론

우리나라 하천에서 자주 볼 수 있는 보에 대한 수리실험을 수행하였다. 수리실험은 임계수심에 따른 보에서 보여지는 수리특성에 대해 중점적으로 수행하였으며 실험결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 보를 월류한 유량이 수로의 마찰저항에 의해 발생하는 도수는 Posey와 Hsing(1938)이 제시한 산정식과 유사한 결과를 나타내었으며 이를 통해 도수 발생을 예측하는데 사용할 수 있을 것이다.
- (2) 하류 수위조건에 따라 도수의 발생위치가 변하며 하류 수위와는 일정한 관계를 보이거나 유량과는 선형적 관계를 나타내지 않는다. 따라서 에너지 감쇄를 위해 도수를 적용할 경우 다양한 유량조건에 따른 수리실험을 진행할 필요가 있다.
- (3) Froude 수에 따른 도수의 형상을 기존 문헌과 비교한 결과 정확하게 일치하지는 않으나 대략적인 예측수단으로 사용하기에는 적절한 것으로 판단된다.
- (4) 임계수심 이전보다 약 2% ~ 6.5% 정도 임계수심을 지나게 되면 유량계수가 작아지며 이로 인해 월류유량이 감소한다.

참고문헌

1. 우효섭 (2001), 하천수리학, 청문각
2. 한국수자원학회 (2002), 하천설계기준
3. V. T. Chow (1956), OPEN-CHANNEL HYDRAULICS, McGRAW-Hill, New York.
4. C. J. Posey and P. S. Hsing., "Hydraulic jump in trapezoidal channels", Engineering News-Record, Vol. 121, No. 26, pp. 815-817, 1938
5. Knapp, F. H., "Ausfluss, Ueberfall und Durchfluss im Wasserbau", Verlag G. Braun, Karlsruhe, Gerneny, 1960.