

보 하류부 난류유속강도에 대한 실험적 연구

Experimental Study on Downstream Turbulent Velocity Intensity in Round-Crested Weir

여홍구*, 강준구**, 정상화***

Hong Gu Yeo, Joon Gu Kang, Sang Hwa Jung

요 지

보는 낙차공과 함께 하천에서 자주 시공되는 하천 구조물로 매년 태풍이나 홍수로 큰 피해를 나타내는 대표적인 시설물 중 하나이다. 구미의 경우에는 보 하류부에 정수지(stilling basin)등을 설치하여 에너지를 적절히 소산시켜 하류로 흘러보내는 공법을 사용하고 있으나 우리나라와 기후조건이 유사한 일본에서는 보 하류부에 물받이 및 하상보호공을 설치하는 방법으로 보 설계를 하고 있어 하상보호공에 대한 설계개념에 차이가 있다. 현재 국내의 보 설계는 Bligh공식에 따라 물받이 및 하상보호공을 결정하였으나 지반의 침투영향을 고려하여 도출된 공식이므로 수리적 특성을 고려하지 못하는 한계성을 가지고 있다. 따라서 보에서 수리특성을 고려한 물받이 및 하상보호공 설계를 위한 수리실험을 통해 설계지침을 보완할 필요가 있다.

본 연구에서는 수리조건에 따른 하상보호공 길이를 제안하는데 목적이 있으며 이를 위해 난류유속강도를 주요영향 요소로 선정하여 도수 및 도수 후 구간에 대해 난류강도 변화를 분석하였다.

핵심용어 : 보(round-crested weir), 도수, 유속분포, 난류유속강도(turbulent velocity intensity), 설계공식

1. 서 론

우리나라는 하천의 하상계수가 매우 크며 강우량도 6월에서 9월에 집중되어 있어 하천 수공구조물 설계에 어려운 점이 있다. 특히 하천에서 자주 접하게 되는 보의 경우 집중호우기간에 큰 피해를 입게 되며 최악의 경우 보가 파괴되는 일도 발생한다. 이러한 보의 파괴원인은 물받이 길이의 미비 및 부족, 하상 세굴 그리고 제방 접안부에서의 파괴 등 다양하다. 그러나 최근에는 물받이와 바닥보호공 접속지점에서의 세굴로 인한 파괴가 증가하고 있다. 이는 물받이 길이 및 바닥보호공 길이와 재료의 선정이 적절하지 않은 것에 기인된다. 여홍구 등(2005a, b)은 보 하류부에서 도수 발생 길이, 하류단 수심의 영향, 임계수심의 설정 및 유량계수의 변화 그리고 자유수면 형상 등에 대한 실험을 수행하였으며, 다양한 실험 결과를 통해 여홍구 등(2005c)은 물받이 및 바닥보호공 길이에 대한 새로운 설계개념을 제안하였다. 하지만 도수발생구간까지로 제안된 물받이길이는 수리조건에 의해 제시될 수 있으나 바닥보호공 길이는 개념적인 제시로 한정되었다.

본 연구에서는 바닥보호공 길이를 제안하기 위해 난류유속강도에 특성을 분석하였으며 추후 본 실험에서 획득한 난류유속강도에 대한 실험자료는 바닥보호공의 사석 재료 결정에서 기초자료로 활용될 것이다.

* 한국건설기술연구원 연구원·031-910-0569(E-mail : yeo917@kict.re.kr)

** 한국건설기술연구원 수석연구원·031-910-0549(E-mail : jgkang02@kict.re.kr)

*** 한국건설기술연구원 선임연구원·031-910-0590(E-mail : kikumorah@kict.re.kr)

2. 난류유속강도

도수에서의 운동량 방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_0^h \rho u^{-2} dz - \int_0^{h_1} \rho u^{-2} dz + \int_0^h \overline{\rho u'^2} dz = (\rho g/2)[h_1^2 - h_2^2] - \int_0^X \mu \left[\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right]_{z=0} dx \quad (1)$$

여기서 z 는 연직방향 좌표이며, $\bar{u} + u'$ 은 평균유속과 레이놀즈 표기법에 따른 순간항의 편차의 합과 일치하며 $h=h(x)$ 는 국부수심을 나타내고 μ 는 동점성계수이며 $\partial \bar{u} / \partial z$ 는 연직방향으로 평균속도경사이다. 식(1)는 다음과 같은 가정하에서 성립되어 진다.

- 난류는 도수 끝단에서 무시된다
- 정수압은 모든 도수에 대해서 존재한다
- 점성과 난류 응력항은 자유수면 $h(x)$ 에 대해서 무시된다

도수 끝단을 지나 난류강도 $\overline{u'^2}$ 의 감소에 대해서 Kalis(1961)은 다음과 같은 공식을 도출하였다.

$$K_V^{-1} = \frac{V_2}{(\overline{u'^2})^{1/2}} = \frac{0.35(x + L_j^*)}{h_2^* - h_1} + 10.7 \frac{h_1}{h_2^*} \quad (2)$$

여기서 흐름방향 좌표 x 의 원점은 도수 끝단과 일치한다. $L_j^* \cong 1.35L_r^*$ 이고 $L_r^* = 4.5h_2^*$ 이면 다음과 같이 근사될 수 있다.

$$K_V^{-1} = \frac{V_2}{(\overline{u'^2})^{1/2}} = 0.35x/h_2^* + 2.1 + 7.6F_1^{-1} \quad (3)$$

최대 순간속도는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u_m = \bar{u} + 3(\overline{u'^2})^{1/2} \quad (4)$$

여기서 \bar{u} 는 평균 단면 유속이다. $\bar{u} \cong V_2$ 라고 하면 다음 식과 같이 된다.

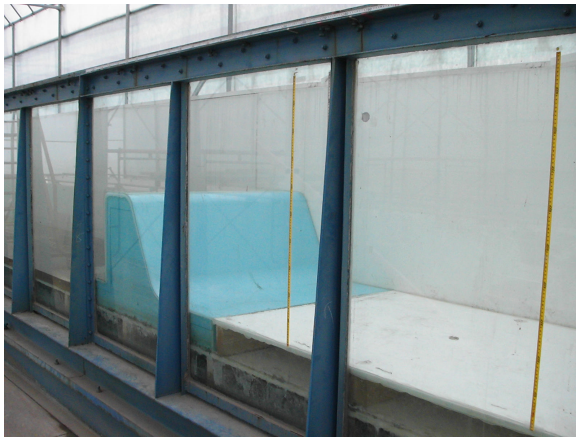
$$\frac{u_m}{V_2} = 1 + 3 \frac{(\overline{u'^2})^{1/2}}{V_2} \quad (5)$$

Dmitriev와 Khlapak(1989)는 난류 바닥 유속장을 바닥에서 6 mm 떨어진 곳에서 단성분 스트레인게이지 변환기를 이용하여 측정하였다. 그들은 길이 좌표인 $X = x/L_r^*$ 에 대한 길이방향 성분 u'_b/V_2 에 대해서 모든 F_1 값에 대한 곡선은 대략적으로 $X = 0.8$ 인 지점에서 최대값을 가지게 될 때까지 증가하고 도수 끝단 아래($X > 1.3$)에서 뚜렷하게 감소한다고 하였다. 그리고 최대 바닥 유속 변동은 거의 $F_1 = 3$ 에서 $u'_b/V_2 = 1$ 에서부터 $F_1 = 9$ 에서 $u'_b/V_2 = 4$ 까지 F_1 과 선형적으로 증가되며 X 의 함수로서 유속의 횡방향 성분 V'_b/V_2 는 도수 끝단에서 최대값보다 작고 F_1 과 같이 증가하며 바닥 유속 변동의 연직성분 w'_b/V_2 는 V'_b/V_2 와 유사한 경향을 나타낸다고 하였다. 또한 상대적인 유입 수심 h_1/b 은 공간적인 도수의 거동에 영향을 준다고 하였다.

3. 수리모형실험

3.1 실험 조건

수리실험은 구형단면 수로에 보를 설치하고 $0.01 \sim 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 유량조건과 $5 \text{ cm} \sim 50 \text{ cm}$ 하류단 조건에 대해 도수를 발생시키고 도수 상-하류에서 Micro 16MHz ADV (SONTEK)를 사용하여 유속을 측정하였다. 또한 도수발생 길이 내에서의 유속 분포 특성을 파악하여 에너지 소산에 대해 검토하며 흐름방향으로 일정 간격 지점에서 연직방향으로 유속을 측정하여 보 하류부 유속 분포 변화에 대해 파악하였으며 난류 유속 강도를 측정하였다.



(a) 보 수리모형

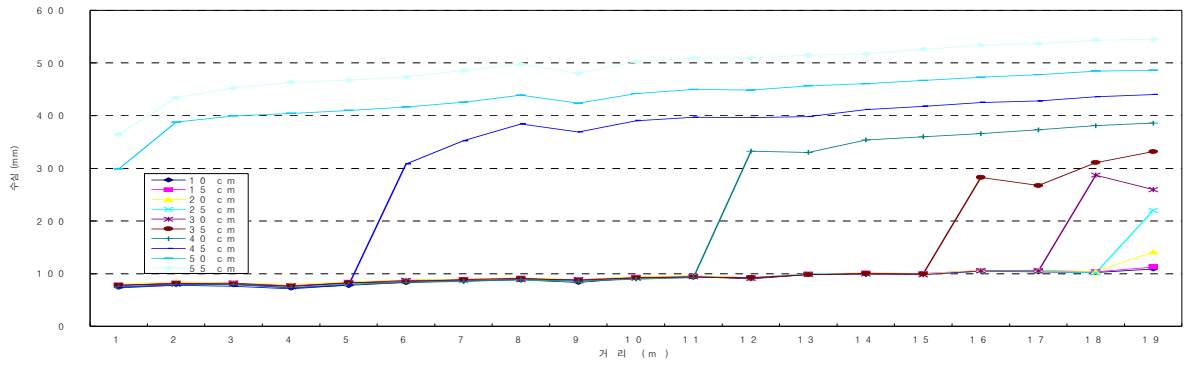


(b) 초음파 수위측정 기기

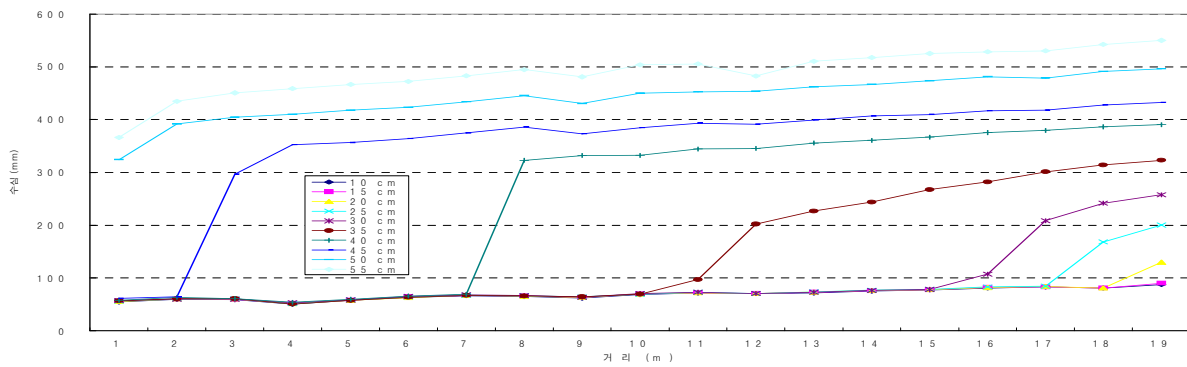
그림 1. 수리모형

3.2 실험 결과

그림 2는 유량별 하류단 수위에 따른 보 하류부 수위변화를 측정한 결과를 나타낸 그림이다. 그림에서 수위의 변화가 급격하게 발생하는 부분이 도수가 발생한 지점을 나타낸다. 또한 도수 발생 길이는 보에 가까이 도수가 발생할수록 길어지는 것을 알 수 있다. 이는 도수가 하류단으로 이동할수록 수로 마찰에 의한 에너지 감소로 유속이 줄어들기 때문인 것으로 판단된다. 그림 3은 도수 길이로 거리를 무차원화($X = x/L_r$)하고 최대 유속을 하류단 유속으로 무차원화($U_m = u_m/V_2$)하여 나타낸 그림이다. 그림을 살펴보면 무차원화된 거리(X)가 $3 \sim 5$ 범위에서 최대유속이 하류단 평균유속의 1.18배 이내로 감소하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 하천에서 평균유속은 단면 최대유속의 0.85배로 알려져 있다. 따라서 단면의 최대유속이 평균유속보다 1.18배 이하로 떨어질 경우 하천의 흐름과 유사한 것으로 판단할 수 있다. 그러므로 바닥보호공의 범위를 유수의 영향이 없어지는 지점까지로 정의한다면 실험결과 도수 길이의 약 $3 \sim 5$ 배 길이로 추정할 수 있다. 그림 4는 무차원화된 거리에 따른 하류단 유속으로 무차원화 시킨 난류유속강도($TI = \sqrt{u'^2}/V_2$)의 변화 범위를 나타낸 그림이다. 그림 4를 살펴보면 무차원화된 거리가 $1.5 \sim 3$ 의 범위에 있을 때 도수에 의한 흐름의 영향이 거의 소멸되는 것을 알 수 있다. 따라서 물받이 길이를 도수 발생 후 에너지 소산으로 흐름의 불안정성이 크게 완화된 지점까지라고 생각할 때 실험결과를 통해 도수 길이의 약 $1.5 \sim 3$ 배 길이로 추정할 수 있다. 따라서 실험결과를 토대로 차원해석을 실시하여 물받이 길이 및 바닥보호공 길이를 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

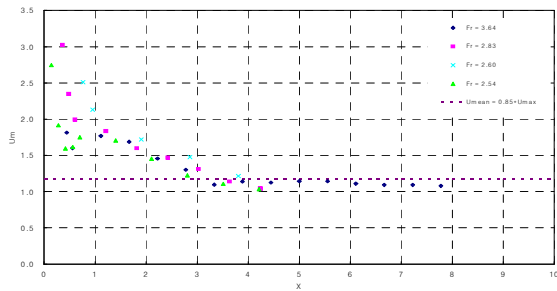


(a) 0.3 m³/s

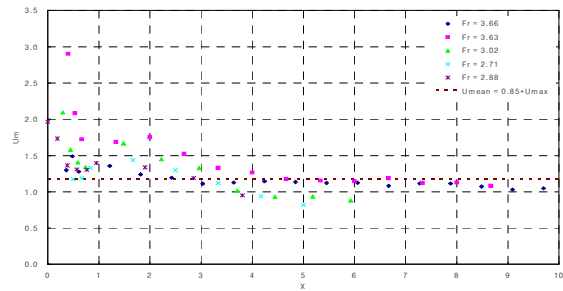


(b) 0.25 m³/s

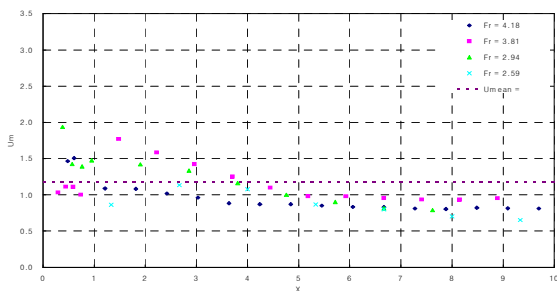
그림 2. 유량별 수위 변화



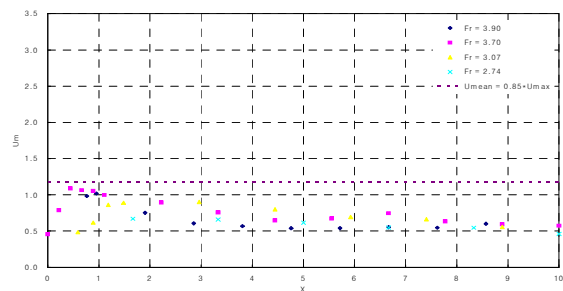
(a) 0.3 m³/s



(b) 0.25 m³/s

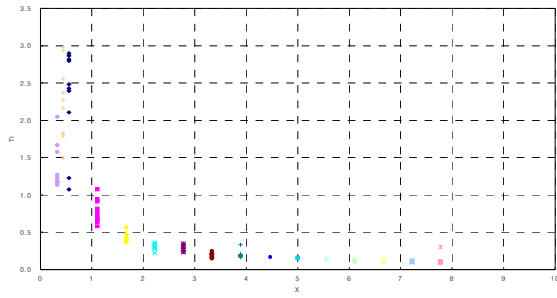


(c) 0.2 m³/s

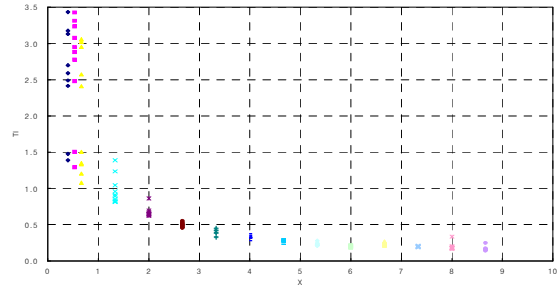


(d) 0.1 m³/s

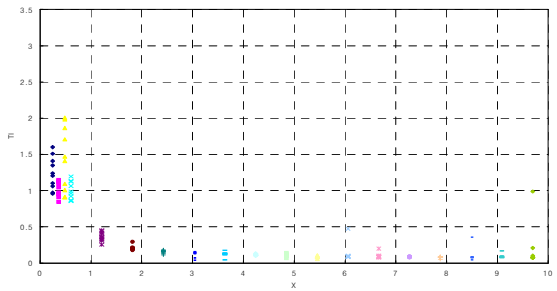
그림 3. X에 따른 U_m 의 변화



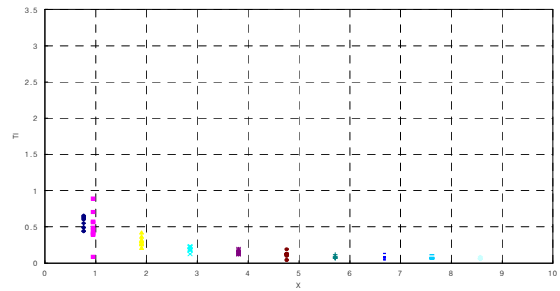
(a) 0.3 m³/s, 하류단 수위 = 45 cm



(b) 0.25 m³/s, 하류단 수위 = 40 cm



(c) 0.2 m³/s, 하류단 수위 = 35 cm



(d) 0.1 m³/s, 하류단 수위 = 30 cm

그림 4. X에 따른 TI의 변화

4. 결론

보에서 물받이 길이, 바닥보호공 길이와 재료를 설계하기 위해서는 반드시 도수 특성에 대한 이해가 필요하다. 본 연구에서는 다양한 공급유량과 하류단 수위 조건을 통해 보 하류부에서 발생하는 도수에 대하여 검토하였으며 결과는 다음과 같다.

- (1) 물받이 길이를 도수 발생 후 에너지 소산으로 흐름의 불안정성이 크게 완화된 지점까지라고 생각할 때 실험결과를 통해 도수 길이의 약 1.5 ~ 3배 길이로 추정할 수 있다.
- (2) 바닥보호공의 범위를 유수의 영향이 없어지는 지점까지로 정의한다면 실험결과 도수 길이의 약 3 ~ 5배 길이로 추정할 수 있다.
- (3) 본 실험에서 공급유량은 0.1 ~ 0.3 m³/s로 변화시키면서 경향성을 살펴본 결과 0.1 m³/s에서는 다른 유량조건과 경향성이 약간 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서 축척 효과(scale effect)의 영향을 받지 않는 공급 유량조건에 대해서 검토할 필요가 있다.

참 고 문 헌

1. 여홍구, 강준구, 정상화, 윤병모 (2005a). “보 하류부 임계수심 설정에 관한 실험적 연구”, 한국수자원학회 학술발표회 CD, 한국수자원학회.
2. 여홍구, 강준구, 정상화 (2005b). “보 하류부 도수 특성에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회 학술발표회, 대한토목학회, pp. 2525 - 2528.
3. 한국건설기술연구원 (2005c). 다기능 하천설계기준 실험검증사업.
4. Dmitriev, A.F. and Khlapuk, N.N. (1989). "Dissipation of Increased Turbulence of a Flow in a Bottom Hydraulic Jump", *Hydraulic Construction*, 23(7), pp. 390 - 395.
5. Kalis, J. (1961). "Diminution de la turbulence derriere le ressaut", *IX IAHR congress Dubrovnik*, pp. 43 - 49.