

보 하류부 세굴 분석을 통한 물받이공 길이 설계 공식 검토

Verification on the Design Formulas of Apron Length by Scour Analysis at Weir Downstream

고동우¹ · 이창훈² · 강준구^{3*}

¹경북대학교 건설방재공학부 겸임교수, ²(주)자연과 기술 선임연구원, ³한국건설기술연구원 하천연구센터 연구위원

Dongwoo Ko¹, Changhun Lee² and Joongu Kang^{3*}

¹Adjunct Professor, School of Constructional Disaster Prevention, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

²Senior Researcher, Nature & Tech Inc., Yecheon 36849, Korea

³Research Fellow, River Experiment Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea

Received 13 February 2020, revised 13 March 2020, accepted 24 March 2020, published online 30 June 2020

ABSTRACT: This hydraulic study analyzed the scour effect at fixed downstream weirs based on the changes in the upstream bed slope. The study was performed using six different bed slopes, that is, 0%, 2%, 3%, 4%, 7%, and 10% at 0.117 m³/s in all cases. The scour depth, scour length, and scour volume were measured using a broadband laser scanner to quantitatively analyze the scour at the downstream weir. This study also examined the adequacy of the designed apron length by comparatively analyzing the results of the scour experiments and the apron length calculated using conventional design standard formulas. The analysis of the local scour effect at the downstream weir showed that scour length and scour depth increased as the bed slope became steeper. A comparison between the results of the scour experiment and that of the conventional design formulas showed that both formulas of the National Construction Research Institute and the Bligh were distributed within the allowable values when there was no upstream bed slope. However, as the bed slope upstream of the weir gradually increased, the scour lengths of the apron deviated slightly from the values obtained from the conventional design formulas.

KEYWORDS: Apron, Bed slope, Hydraulic experiment, River, Scour characteristic, Weir

요 약: 본 연구는 상류 하상경사 변화에 따른 고정보 하류 세굴 영향을 분석하기 위한 수리실험이다. 하상경사 0%, 2%, 3%, 4%, 7%, 10%에 대한 수리실험을 수행하였으며, 모든 조건에 대해 0.117 m³/s의 유량을 동일하게 적용하였다. 보 하류 세굴 특성을 정량적으로 분석하기 위해 광대역 레이저 스캐너를 이용하여 세굴심, 세굴길이, 세굴 부피 등을 측정하였다. 또한 세굴실험 결과와 기존 보 하류 물받이 길이 설계기준 공식에 따른 계산결과를 비교하여 물받이 길이 설계의 적정성에 대한 검토를 수행하였다. 보 하류부 국부세굴 영향을 분석한 결과 하상경사가 커질수록 세굴길이 및 세굴심이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 실험치와 물받이 설계 공식을 비교한 결과, 상류 측 하상경사가 없는 경우 국립건설시험소 공식 및 블라이 공식 모두 허용치 내에 분포하는 것을 확인할 수 있었지만 보 상류 하상경사가 점차적으로 커질수록 실험치와 기존 설계 공식을 통해 얻은 값들을 비교했을 때 약간의 차이를 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

핵심어: 물받이공, 하상경사, 수리실험, 하천, 세굴 특성, 보

*Corresponding author: jkang02@kict.re.kr, ORCID 0000-0001-8410-0399

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

우리나라의 소하천은 집수면적 (catchment area)이 작고 유로연장이 짧으며 상·하류간의 표고차가 커서 급류 하천인 경우가 많기 때문에 홍수시 유속이 매우 빠르며, 계곡을 따라 굴곡이 심해 수충작용 (water hammer) 및 소류력에 의한 호안파괴, 하상세굴 등의 피해가 많이 발생하고 있다.

보 및 낙차공은 홍수 발생 시 구조물 파괴와 동시에 연결부인 제방의 붕괴로 인한 2차 피해를 야기할 수 있다고 보고되고 있다. 따라서 이러한 수공구조물 주변에서 발생하는 피해 원인을 규명하고 구조물의 안전성을 확보할 수 있는 방안을 찾는 것이 중요하며, 소하천 내 흐름 분석을 통한 기존 구조물 설계기준의 미비점을 보완하는 것도 필요하다.

하천구조물 주변 세굴과 관련된 국외 연구동향을 살펴보면, Hoffmans (1998)는 Fahlbusch (1994)의 제안식을 보완하여 하상입경 (d_{90})에 연관된 무차원 세굴변수인 c_{20} 로 표현하여 유체 내 유사의 이동에 대해 전단 응력과 항력, 양력의 평형과 유사의 저항에 대해 이론적으로 접근한 식을 제안하였다. 이 외에도 Blaisdell and Anderson (1988, 1991)은 파이프 방류구 하류에서의 세굴특성에 관한 조사와 실험을 통하여 최대 세굴 깊이와 밀도 프루드 수 (Densimetric Froude Number)의 상관성을 규명하였으며, Bormann and Julien (1991)은 경사형 낙차공 하류부에서 발생하는 세굴심 평가식을 제안하였다. 국내에서는 Yoon et al. (1995)은 단락부 하류부에서의 둔덕의 유무에 따른 세굴 특성을 실험을 통하여 분석하였다. 또한, Yeo et al. (2005)은 하류 조건에 따라 보 상류의 흐름특성에 미치는 영향을 수리 모형실험을 통하여 분석하였으며, Kim et al. (2010)은 낙차공 물받이부에서의 세굴현상과 사석보호공 설치 후 발생하는 침하량에 대한 수리모형실험을 수행하여 사석보호공의 무차원 침하량 산정식을 제안하였다. 최근 Ryu and Lee (2019)는 수공구조물 주변에서 발생하는 폭기 흐름의 기포분율을 측정하는 실험 연구를 통한 그림자기법을 이용한 기포분율을 측정하고 이를 통해 폭기 정도를 정량화하였다.

현재 국내에서 발생하는 소하천 구조물 피해는 상류부 급경사구간의 강한 흐름에 따른 보 하류 물받이에서 많은 피해가 발생하고 있다. 특히 물받이 길이의 부족

으로 인해서 발생하는 경우가 많으며, 보 하류 물받이 길이 설계는 그 판단의 범위가 넓고 같은 조건에서도 큰 오차가 생길 수 있다. 이는 소하천 보 하류 물받이 (apron) 길이 설계 시 블라이 (Bligh) 공식 (Eq. 1) 또는 과거 건설부 국립건설시험소 (National Construction Research Institute, NCRI) (Eq. 2)에서 제안된 공식을 기반으로 물받이 길이를 산정하기 때문에 급경사 하천에서 중요한 인자인 하상경사에 대해서는 전혀 고려하지 않고 있다.

$$L_b = 0.6 \cdot C \cdot \sqrt{H} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$L_n = 4.05 \cdot H^{0.316} \cdot q^{0.514} \cdot D_{50}^{-0.325} \quad (\text{Eq. 2})$$

블라이 공식은 하상토의 상태에 따른 블라이 계수와 보 하류 물받이 상판에서 보 마루까지 높이를 인자로 사용하고 있으며 건설부 국립건설시험소 공식은 보 마루 표고부터 물받이 상단 표고까지 높이, 단위폭당 유량, 하상토사의 중앙 입경을 인자를 사용하고 있다. 따라서 보 하류 물받이 길이 설계 시 하상경사에 따른 수리흐름 특성을 반영하지 못하는 한계성이 있다. 또한 보 구조물 상·하류에서의 세굴, 물받이 및 바닥보호공의 규모 결정 등과 관련하여 보 운영에 따른 치수적 안정성 문제가 보고되고 있다.

본 연구에서는 보 하류 물받이 피해 개선을 위해 하상경사 변화에 따른 보 하류 물받이에서의 세굴 영향을 분석하기 위한 것으로써 수리실험을 통한 물받이 세굴 길이 측정결과와 기존 보 하류 물받이 길이 설계기준 공식에 따른 계산결과를 비교·분석하여 물받이 길이 설계의 적정성에 대한 검토를 수행하고자 한다.

2. 수리실험

2.1 실험현장 및 수로

한국건설기술연구원 하천연구센터 (River experiment center, REC)는 하천환경과 홍수대응기술 개발을 위해 실규모 하천 실험을 수행하는 기관으로 센터의 총 면적은 193,051 m²이며 최대 10 m³/s의 유량을 방류 가능한 3개의 대형수로를 보유하고 있다. 실험수로는 폭 1.0 m, 높이 1.2 m, 길이 30.0 m, 무경사 개수로이며 유출수조, 유입수조, 펌프, 하류부 수위조절장치 등으



Fig. 1. View of River Experiment Center (REC) and experiment site.

로 구성되어 있다. 또한 유출수조에는 부유물들이 펌프에 유입되지 않도록 수로 끝단에 스크린을 설치하였고, 수로 중앙의 10 m 구간은 벽체가 강화유리로 설치되어 세굴 양상 관측이 용이하다 (Fig. 1).

2.2 실험조건

수리실험에 사용된 보 모형은 폭 1.0 m, 높이 0.3 m이며, 순환수로 내 고정된 뒤 보 상류부 하상경사 조건에 따라 총 6 Cases (하상경사 0%, 2%, 3%, 4%, 7%, 10%)의 실험을 수행하였다 (Fig. 2). 하상재료는 평균 입경 25 mm인 쇄석자갈을 이용하여 보 모형 하류측으로 길이 4.0 m, 폭 1.0 m, 0.4 m의 두께로 고르게 포설하였다. 실험유량의 초기 공급에 의해 발생할 수 있는 하상 세굴에 대비하여 소량의 실험유량을 공급해 실험수로 하류단부터 물 채우기를 실시하였다. 실험의 하상 구간이 충분히 잠긴 이후 하류단으로 흘러나가는 조건 (outflow)에서 등류 상태 (uniform flow)로 유지한 후 실험을 진행하였으며, 실험은 흐름이 시작되는 시점부터 수로 전 구간에 하상이 안정화될 수 있도록 3시간 이상 진행한 후 종료하였다 (Fig. 3).

하상경사에 따른 보 하류 세굴 특성을 정량적으로 분석하기 위해 실험유량은 $0.117 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 모든 실험조건에 동일하게 적용되었으며, 보를 통과하는 고속 사류 (supercritical flow)로 인한 국부세굴의 영향을 분석을 위해 광대역 레이저 스캐너 (RIEGL LMS-Z390)를 이용하여 세굴심, 세굴길이, 세굴 부피 등을 측정하였다 (Fig. 4).

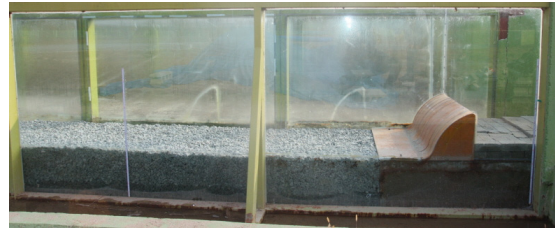


Fig. 2. Installation of weir model in channel.



Fig. 3. Overflow at weir in channel.



Fig. 4. 3D scanning for measuring scour depth, length, and volume.

3. 실험결과

3.1 하상경사에 따른 보 하류 세굴특성

총 6개의 실험조건에 대한 보 하류부 국부세굴 경향을 분석하였다. 보에서 월류로 인한 하류부의 최대 세굴심은 하상경사 변화에 따라 각각 0.097 m, 0.105 m,

Table 1. Scour experiment results at the weir downstream

Bed slope (%)	Max. depth of scour (m)	Length of scour (m)	Volume of scour (m ³)
0	0.097	2.004	0.084
2	0.105	2.371	0.107
3	0.111	2.379	0.114
4	0.116	2.407	0.144
7	0.130	2.499	0.216
10	0.164	2.521	0.218

0.111 m, 0.116 m, 0.130 m, 0.164 m로 측정되었다. 또한 세굴길이는 물받이 하류 방향으로 각각 2.004 m, 2.371 m, 2.379 m, 2.407 m, 2.499 m, 2.521 m로 측정되었다 (Table 1).

하상경사 변화에 따른 보 상류부 측정지점 (W0, W1, W2, W3, W4, W5) 별 평균유속을 측정하여 수리적 특성을 분석한 결과, 전체적으로 보 상류부 하상경사가 커질수록 평균유속 값이 서서히 증가하는 양상을 보였다. 이는 월류 유량(overflow discharge)의 증가와 함께 흐름의 운동량도 증가함에 따라 나타나는 현상으로 월류 수두(overflow head)와 함께 보 마루의 곡률부를 통과하는 흐름의 원심력 또한 증가하면서 보 마루(weir crest)에 작용하는 압력의 강하(drop)를 유발하여 유속을 가속시키는 원인이 된다. 보에서 상류측으로 1 m 떨어진 W1 지점에서는 보를 통과할 시 보 마루에서의 단면축소 현상으로 인해 전체적으로 유속이 급격하게 감소하는 현상을 볼 수 있다. 각 실험 조건에 따른 유속의 발달 과정을 살펴보면 S00, S02 및 S03의 경우 상류측에서의 흐름이 보를 통해 제어되면서 보를 통과할 때 최대유속을 나타내고 있다. S04, S07 및 S10의 경우 상류측 경사면의 끝이 보 마루보다 높기 때문에 상류측 경사면의 끝에서 한계수심(critical depth)이 발생하는 것으로 보이며, 특히 S10 조건의 경우 보 마루보다 높은 상류측 경사면에서 발생하는 유속이 하류측으로 가속화되는 흐름을 보이면서 보를 통해 더 이상 흐름이 제어되지 않는 것으로 판단된다 (Figs. 5 and 6).

결론적으로 하상경사가 커질수록 세굴길이 및 세굴심이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 하상경사 변화에 따라 수류의 총에너지 경사가 급하게 변화하게 되고 그에 따른 보 하류부의 소류력 증가가 주요 원인인 것으로 판단된다. 세굴로 인한 하상변동을 살펴보면, 물받이에서의 수심 및 유량의 변동이 강한 지점을 중심으로 하상변화가 크게 작용하는 경향을 보였으며, 보

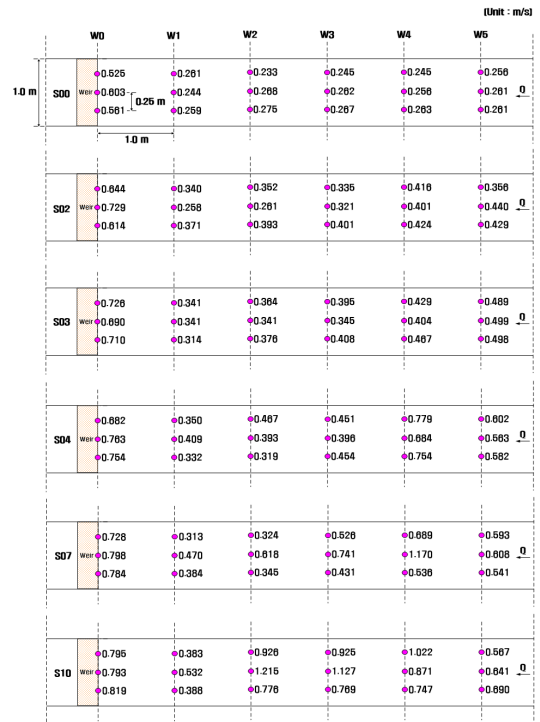


Fig. 5. Velocity measurement points and values at each point according to the bed slope conditions.

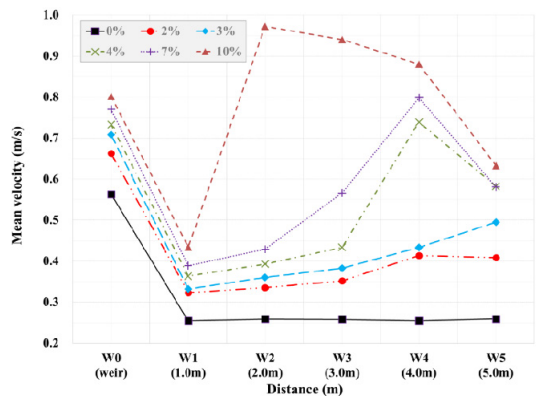


Fig. 6. Comparison of mean velocity according to the bed slope conditions.

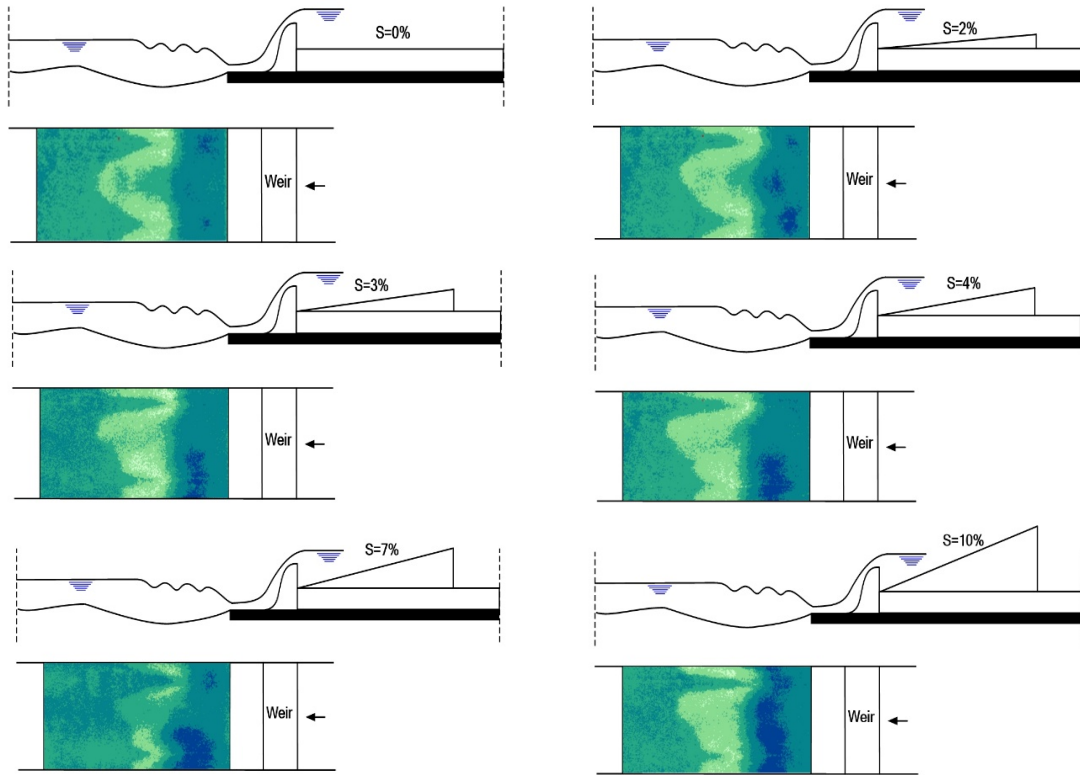


Fig. 7. Scour effect according to the bed slope through 3D scanner.

하류측으로 멀어질수록 하상변동의 크기가 작아지는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 7은 3D 스캐너를 통해 분석한 보 하류부 세굴 영향을 도시화한 것이다.

3.2 기존 보 하류 물받이 설계 공식과 실험 결과 값 비교

보 하류 물받이공 설치는 하천설계기준에서 제안하고 있는 블라이 공식 및 국립건설시험소의 공식을 사용하거나 실험을 통한 경험식을 통해 결정하고 있으며, 본 실험결과와 비교·검토하여 기존 공식의 적정성을

평가하고자 한다. 블라이 공식은 하상재료에 따라 블라이 계수(C) 값이 다르게 정의되어 있으며, 본 연구에서는 소하천에 주로 분포하는 하상재료인 호박돌과 자갈을 대상으로 C 값의 범위를 설정하였다 (호박돌 및 자갈: C = 4 - 6).

Table 2는 보 하류부 세굴실험 결과와 기존 설계 공식을 비교한 결과이며, 실험결과 값은 보 하류부에 연결된 고정하상(0.3 m)과 물받이 세굴길이를 더한 값이다. 그 결과, 상류측 하상경사가 0%인 경우는 국립건설 시험소 공식 및 블라이 공식 모두 허용치 내에 분포하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 상류측 하상경사가 점

Table 2. Comparison of conventional design standard formulas & the experimental results

Bed slope (%)	NCRI (m)	Bligh (m) (C = 4)	Bligh (m) (C = 6)	Experimental value (m)
0	2.59	1.97	2.46	2.304
2	2.59	1.97	2.46	2.671
3	2.59	1.97	2.46	2.679
4	2.59	1.97	2.46	2.707
7	2.59	1.97	2.46	2.799
10	2.59	1.97	2.46	2.821

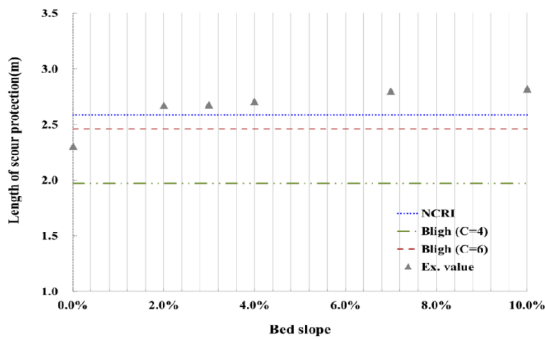


Fig. 8. Comparison of small river design standard formulas and the experimental results.

차적으로 증가함에 따라 물받이 구간의 세굴길이가 기존 설계 공식을 통해 얻은 값들과 약간의 차이를 나타내는 것을 확인할 수 있었고, 전반적으로 기존 공식들은 하상경사가 커질수록 과소 산정되는 경향이 나타났다 (Fig. 8). 이는 하천설계기준에서 제시하는 블라이 공식과 국립건설시험소 공식들은 다양한 설계인자를 활용하여 제안된 공식이 아니며 보의 높이, 유량, 하상 입자 분포에 기반을 두어 제안된 공식이기 때문에 국내 소하천과 같은 급경사 하천에서 적용하기에는 한계가 있다는 것을 의미한다. 따라서 보 하류 하상보호 구조물을 설계할 시 기존의 설계 인자뿐만 아니라 하천의 하상경사 등 다양한 설계인자를 고려하여 국내 소하천 환경에 적합한 공식이 필요한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 경사가 가파른 소하천 구간에 보를 설치할 경우, 보 상류측 하상경사 변화에 따른 보 하류 세굴 영향을 수리실험을 통하여 분석하였다. 또한, 실험결과와 기존 보 하류 물받이 길이 설계기준 공식에 따른 계산결과를 비교·분석하여 물받이 길이 설계의 적정성에 대한 검토를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 보 하류부 국부세굴 영향을 분석한 결과, 하상경사가 급해질수록 세굴길이 및 세굴심이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 하상경사 변화에 따른 보 하류부의 소류력 증가로 인해 침식현상이 활발하게 이루어진 것으로 판단된다. 또한 보 하류측으로 멀어질수록 하상변동에 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있었다.

2) 하상경사 변화에 따른 수리적 특성을 분석한 결과, 보 상류부 하상경사가 커질수록 평균유속 값이 서서히 증가하는 양상을 보였다. 이는 월류 유량의 증가와 함께 흐름의 운동량도 증가함에 따라 나타나는 현상으로 월류수두와 함께 보 마루의 곡률부를 통과하는 흐름의 원심력 또한 증가하면서 보 마루에 작용하는 압력의 강화를 유발하여 유속을 가속시키는 원인이 된다.

3) 보 하류부 세굴실험 결과와 기존 물받이 설계 공식을 비교한 결과, 상류측 하상경사가 없을 시에는 국립건설시험소 공식 및 블라이 공식 모두 허용치 내에 분포하는 것을 확인할 수 있었지만, 보 상류측 하상경사가 점차적으로 증가함에 따라 물받이 구간의 세굴길이가 기존 설계 공식을 통해 얻은 값들과 약간의 차이를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 결론적으로 경사가 가파른 소하천 구간에서 보 하류 물받이를 설계할 시에는 기존의 설계 인자뿐만 아니라 하천의 하상경사 등 다양한 설계인자를 고려하여 국내 소하천 환경에 적합한 공식이 필요한 것으로 판단된다.

본 연구에 사용된 실험수로는 가변식 경사수로 (flexible slope-channel)가 아닌 무경사 수로였기 때문에 보 하류 방향으로 경사가 없었다는 점과 단일 보 형상 조건만으로 실험이 진행되어 보 하류부 세굴 영향을 평가함에 있어서 일반화될 수 없다는 실험적 한계가 있다고 생각한다. 향후 이러한 부분을 보완하여 실험을 지속적으로 수행하고 보와 같은 수공구조물 주변 유체의 수리학적 거동을 재현하고 분석해야 한다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원 (20AWMP-B121100-05)에 의해 수행되었습니다.

References

- Blaisdell, F.W. and Anderson, C.L. 1988. A comprehensive generalized study of scour at cantilevered pipe outlet. *Journal of Hydraulic Research* 26(4): 357-376.
- Blaisdell, F.W. and Anderson, C.L. 1991. Pipe plunge pool energy dissipator. *Journal of Hydraulic Engineering* 117(3): 303-323.

- Bormann, N.E. and Julien, P.Y. 1991. Scour downstream of grade-control structures. *Journal of Hydraulic Engineering* 117(5): 579-594.
- Fahlbusch, F.E. 1994. Scour in rock river beds downstream of large dams. *International Journal on Hydropower & Dams* 1(4): 30-32.
- Hoffmans, G.J.C.M. 1998. Jet scour in equilibrium phase. *Journal of Hydraulic Engineering* 124(4): 430-437.
- Kim, C.S., Kang, J.G., Yeo, H.K., and Yeo, W.K. 2010. An experimental study for the empirical equation to quantify the subsidence of riprap scour protection at downstream of vertical drop structures. *Journal of Korea Water Resources Association* 43(5): 433-443. (in Korean)
- Ryu, Y.U. and Lee, N.J. 2019. Measurements of void fraction of aerated flows over hydraulic structures. *Ecology and Resilient Infrastructure* 6(3): 137-144. (in Korean)
- Yeo, H.G., Kang, J.G., Cheong, S.W., and Yoon, B.M. 2005. Experimental Study on Establishment of Downstream Critical Depth in Round-Crested Weir. *Korea Water Resources Association*: 1113-1117. (in Korean)
- Yoon, S.E., Lee, J.T., Son, K.I., and Kim, J.H. 1995. Experimental study on downstream local scour of free-falling jet. *Journal of Korea Water Resources Association* 28(4): 147-154. (in Korean)