

2차 정수지의 수리특성 및 바닥 유속 저감효과 분석

정석일 · 이지훈* · 윤재선* · 이승오†

홍익대학교 토목공학과 · *한국농어촌공사 농어촌연구원
(2018. 9. 3. 접수 / 2018. 10. 17. 수정 / 2018. 10. 25. 채택)

Analysis of Hydraulic Characteristics and Reduction of Bottom Velocity of Second Stilling Basin

Seokil Jeong · Ji Hun Lee* · Jae-Seon Yoon* · Seung Oh Lee†

Department of Civil Engineering, Hongik University

*Korea Rural Research Institute

(Received September 3, 2018 / Revised October 17, 2018 / Accepted October 25, 2018)

Abstract : Scour in the downstream of hydraulic structures such as apron induces to collapse due to abruptly increasing rainfall and discharge in streams and reaches. This is because the forcible jet from overflowing is not sufficiently dissipated by existing energy dissipators, and it continues to sweep the bed materials during flood events. In this study, a second stilling basin was proposed as a countermeasure and the energy dissipation efficiency of this structure was analyzed using 3D-dimensional numerical analysis. First, results from previous research and hydraulic tests were used to verify the accuracy of the numerical model. It showed that the second stilling basin played a definite role in reducing the bottom velocity, comparing with diminishing the energy dissipation when numerical tests were conducted under scaled field conditions in Korea. This means that the second stilling basin can be a countermeasure against scour in downstream. If more efficiency analysis of the second stilling basin would be performed in terms of energy dissipator for various types of hydraulic jump, it would be an alternative solution to scouring issues.

Key Words : second stilling basin, numerical simulation, bottom velocity, hydraulic structures

1. 서론

하도 내 설치되는 감세공은 여수로의 말단부 혹은 각종 급경사 수로의 방류부에서 생기는 고속 흐름이 가지는 막대한 에너지로 인한 하상 혹은 수로 바닥의 세굴을 방지하기 위해 설치되는 구조물이다¹⁾. 댐설계 기준¹⁾에서 제시하고 있는 감세공에 대한 규정은 다른 수공구조물에 비하여 상대적으로 정량적으로 제시되어 않아서, 설계자에 의해 규모 및 제원이 다양하게 결정될 수 있다. 또한 최근 들어 이상기후로 인하여 집중호우가 증가하면서, 감세공에 설계 유량 이상의 홍수량이 발생하는 경우가 많아져, 감세공 하류의 하상침식 등 다양한 피해가 증가하고 있는 추세이다. 특히 물반이공 하류의 세굴 현상이 심각한 상황으로 인식되고 있는 상황이다. 이에 강력한 수류를 제어하고자 하는 많은 연구들이 수행되어 왔다. 국외 연구로는 Bormann and

Julien²⁾은 이론적 고찰을 통해 낙차공을 월류하면서 발생하는 제트류(jet flow)의 전파 길이 및 이로 인한 세굴공의 최대 깊이를 산정하였고, Salah and Abdelhaem³⁾은 일련의 반원형 감세블록을 사용하여 국부세굴을 최소화하고, Fayoum 위어 하류부에서의 세굴 예측을 실험을 통해 수행하였다. 최병규 등⁴⁾은 부땀을 이용한 여수로 도수식 감세공의 설계를 수행하였고, 윤세의 등⁵⁾은 특별한 에너지 감세를 위한 수공구조물이 설치되지 않은 중소규모 단락부 하류부에서 자유낙하하는 수막으로 인해 발생하는 비점착성 하상재료의 세굴특성을 모의하였다. 이민호와 최홍식⁶⁾은 바닥보호공과 호안의 사석은 일정한 형태를 가진 블록으로 규칙배열에 따른 결속(interlocking)과 형상의 정도가 안정성에 큰 영향을 줄 것으로 판단하여, 비중이 작은 석고(SG=2.3)를 사용한 모형 블록을 이용하여 형상과 결속에 따른 안정성을 분석하였다. 그러나 현재까지 대부분의 연구들은

† Corresponding Author : Seung Oh Lee, Tel : +82-2-325-2332, E-mail : seungoh.lee@hongik.ac.kr
Department of Civil Engineering, Hongik University, 94 Wausan-ro, Mapo-gu, Seoul, 04066, Korea

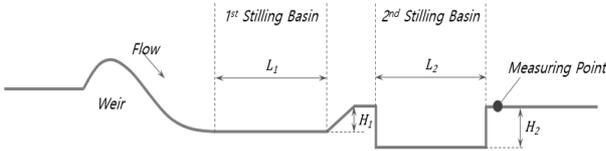


Fig. 1. Conceptual diagram of second stilling basin.

하류부 세굴이나 도수의 수리학적 변화만을 확인한 것이며, 강력한 수류의 감세 방법에 대한 연구는 상대적으로 많지 않다. 특히 현재 심화되고 있는 수공구조물 하류의 세굴에 대한 구조적인 대책들에 대한 연구는 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 미공병단(USACE, U.S. Army Corps of Engineers)⁷⁾에서 감세시설로 권장하는 2차 정수지(Second stilling basin, Fig. 1 참조)의 국내 적용성 및 에너지 감세 효율 확인을 위하여, 국내 중소 저수지를 대상으로 한 3차원 수치해석을 수행하여 에너지 감세 효과, 수리특성 변화 등을 확인하였으며, 2차 정수지가 수공구조물 하류 하상에 미치는 영향을 앞서 연구되었던 사석 크기 결정 공식들로 확인하였다. 이러한 과정을 통해 2차 정수지가 주는 영향을 주의 깊게 분석하여, 현재 발생하고 있는 횡단 수공구조물 하류 세굴 문제 해결에 도움이 되고자 하였다.

2. 수치해석 모델

2.1 기본방정식

본 연구에서는 2차 정수지에 대한 수치해석을 위해 3차원 상용 프로그램인 FLOW-3D를 사용하였다. FLOW-3D는 미국 Flow-Science에서 개발하였으며, 자유 수면을 갖는 3차원 흐름 수치해석에 사용되는 모델로, 지배방정식인 연속방정식 및 운동량 방정식은 다음과 같다.

- 연속방정식

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = RSOR \quad (2)$$

여기서, ρ 는 유체 밀도(kg/m^3), u, v, w 는 각방향의 유속(m/s), A_x, A_y, A_z 는 각 방향의 요소면적(m^2), RSOR는 질량 생성/소멸 항을 의미한다.

- x, y, z 방향의 운동량 방정식(Momentum Equation)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + G_x + f_x \quad (3-1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3-2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + G_z + f_z \quad (3-3)$$

여기서, f 는 점성력(N), G 는 체적력(N)을 나타낸다. 자유수면은 VOF (Volume of Fluid)법을 사용하여 모의가 된다. VOF는 수표면의 위치를 특정하는 방식으로 계산 격자 내를 이동하는 명확한 계면을 추적하는 알고리즘 등으로 구성된다. 또한 기하형상은 장애물에 의해 차단된 각 요소의 표면적 점유율 및 볼륨 점유율을 계산하여 격자에 정의하는 기법인 FAVOR (Fractional Area Volume Obstacle Representation)을 사용한다.

2.2 모델 검증

2.2.1 수치모델의 수리특성 검증

FLOW-3D는 국내외적으로 여수로 또는 다양한 형태의 위어에 대한 수치해석에 많이 사용되었으며, 실험과 비교를 통해 많은 부분에서 검증된 수치해석 프로그램이다. 본 연구는 여수로를 통해 발생하는 경력한 제트흐름 및 도수(hydraulic jump)와 이러한 흐름이 정수지에서 감세되는 것에 대한 수치모델의 정확성이 필요하다. Babaali et al.⁸⁾는 감세공에서 발생하는 압력의 크기에 대해 실험과 FLOW-3D 수치해석 결과를 비교하여, 상당한 일치도가 나타남을 확인하였다. Naseri et al.⁹⁾은 무차원 변수를 이용하여 여수로의 증압과 측면에서 발생하는 압력의 변화를 실험 결과와 비교하였고, 두 값의 오차가 크지 않다는 것을 보여 주었다. Bayon et al.¹⁰⁾은 도수가 발생하는 조건을 FLOW-3D로 수치해석하고, 도수 시간에 따른 무차원 수리특성 값을 실험 자료와 비교한 결과, 큰 오차가 발생하지 않는다는 것을 확인하였다. 그러나 앞선 연구들은 FLOW-3D의 수리특성에 대한 검증만을 수행하였을 뿐, 정수지의 주역할인 에너지 감세 효과에 대한 정량적인 분석은 제시하지 않았다. 이에 본 연구에서는 정수지에 대한 수치모형 실험과 FLOW-3D 결과를 비교하여, 수리특성 및 에너지 감세효과에 대한 FLOW-3D의 정확도 검토를 수행하였다. 수치모의 시 격자는 Fig. 2와 같이 구성하였고, 각 방향을 동일 크기의 격자로 사용된 격자 수는 2,200,000개이다. 격자의 크기는 민감도 분석을 수행하여 결정하였는데(Fig. 3), Bayon et al.¹¹⁾의 연구를

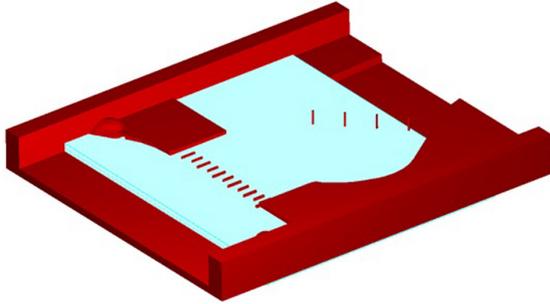


Fig. 2. FLOW-3D mesh.

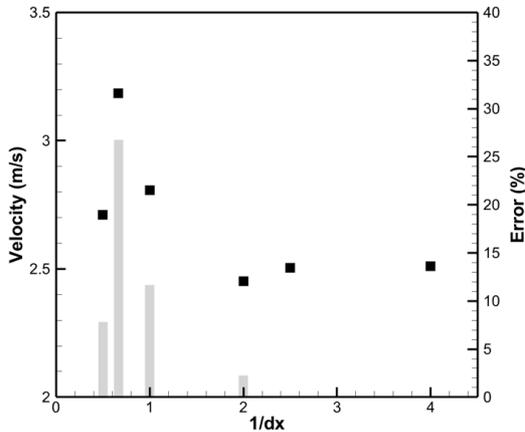


Fig. 3. FLOW-3D mesh sensitive analysis.

참고하여 격자크기(dx)의 역수에 따른 유속을 검토하였다.

여기서 오차는 가장작은 격자를 기준(1/dx = 4)으로 계산된 값이다. 위의 결과를 참고하고, 수치해석의 효율성을 고려하여 1/dx = 2일 때의 격자 크기를 이용하였다. 난류모형은 도수 등의 복잡한 흐름 모의에 적합하다고 판단되는 RNG(Renormalized Group)를 사용하였다. 수치해석은 예상되는 초기값을 상류와 하류에 부여하여, 빠르게 안정화 되었으며, 감세지 하류의 수리특성을 시간에 따라 분석하여, 10초동안의 수위 및 유속의 변화량이 1.0% 이하를 정상류(steady flow)로 간주하고, 이 시점까지 수치해석을 수행하였다.

2.2.2 수리실험을 통한 수치모델의 에너지 감세 효과 검증

본 연구의 기본대상 수리모델로 정수지형 USBR-IV (댐설계기준, 2011) 형식의 정수지를 선택하였다. 이 형식은 Chute Block과 End-Sill이 정수지 내에서 와(eddy)를 발생시켜 에너지를 감세시키는 구조물로, Froude 수가 2.5 ~ 4.5사이에 주로 적용되기 때문에, 국내 중소형 저수지에 많이 선택되고 있는 형태이다. 검증실험은 축소모형을 사용하였으며, 유속과 수위를 측정하여 에너지 감세율을 측정하였다. 에너지 감세율은 전수두(total head)의 감소

비율로 나타낼 수 있다. 전수두는 속도, 위치, 압력수두로 구성되지만, 본 연구는 개수로 흐름으로 압력수두는 무시될 수 있다. 식 (4)는 전수두 계산식을 보여준다.

$$\text{전수두(Total Head)} = \frac{V^2}{2g} + H \tag{4}$$

여기서, V는 평균유속(m/s)이며, g는 중력가속도(m/s²), H는 수위(m)이다. 감세율은 계산된 전수두를 이용하여, ‘(상류부전수두-지점별전수두) / 상류부 전수두’로 계산될 수 있다. 상류부의 전수두는 급경사부의 유속 및 수위를 측정하여 계산하였으며, 하류부의 전수두는 정수지가 끝나는 지점에서의 수심평균유속(depth averaged velocity)과 수위를 이용하여 계산하였다. 정수지 말단부를 측정지점으로 결정한 이유는 정수지의 역할은 고에너지의 방류수를 도수 및 난류 등을 이용하여 저에너지로 전환시키는 것이며, 이를 확인하기 위한 최적의 지점은 정수지가 끝나는 지점이라고 판단했기 때문이다. Fig. 2는 수리실험 장면이다. 유속과 수위는 위의 하류부에서만 측정되었으며, 식(4)를 이용하여 에너지 감세율을 계산하였다. 계산결과 약 20.9%의 감세효과가 있는 것으로 확인되었다.

선택된 수치모델이 이러한 에너지 감세를 정확하게 재현하는지 확인하기 위하여, 실험과 동일한 조건으로 수치해석을 수행하였다. Fig. 5는 수치해석 결과를 실험 결과와 비교한 것이다.

수치해석 결과는 실험과 유속은 약 11.2%, 수위는 약 6.9%의 오차가 발생하였으며, 에너지 감세율은 7.7%의 오차가 발생하였다. 수리실험 결과가 충분하지 않기 때문에, FLOW-3D가 도수의 유속 및 형상을 정확하게 재현할 수 있는지 여부가 명확하지는 않지만, 주어진 정보로 판단할 때, FLOW-3D가 여수로 말단부에 위치한

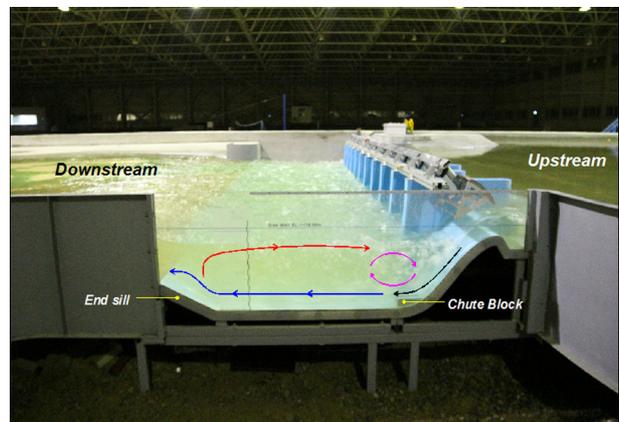


Fig. 4. Experimental scene.

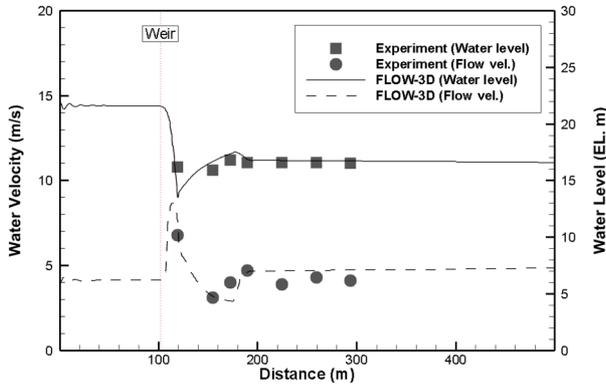


Fig. 5. FLOW-3D and experimental results.

정수지의 에너지 감쇄능력을 일정수준 이상 재현할 수 있다고 생각하여, 본 연구 대상인 2차 정수지 수치해석을 수행하였다.

3. 2차 정수지 수치해석

기존에 설치된 정수지에 추가하여 하류단에 설치되는 2차 정수지 제원과 유량 변화에 따른 수리특성을 검토하였다. 또한, 기존 1차 정수지만 설치되었을 경우와의 비교를 위해 Table 1에 제시한 바와 같이 다양한 조건에서 수치해석을 수행하였다. 해당 조건은 국내 60개 중소저수지에서 실제로 발생하였던 방류량 자료를 기준으로 제시하였으므로, 월류수의 수충력, 도수 등의 수리특성이 실제 홍수시 발생하는 것과 유사할 것으로 판단된다. 결과에 대한 측정 지점은 2차 정수지를 지난 지점으로 결정하였는데, 2차 정수지의 효율을 파악하기 위해서는 2차 정수지 끝단 지점이 가장 적합하다고 판단했기 때문이다. 2차 정수지의 효율성 분석을 위해 1차 정수지만 있는 경우(case R)를 추가하였다(Table 2).

Table 2. The simulation case and results for second stilling basin

Case	L_2/L_1	H_2/H_1	Ratio	
			Bottom Vel.	Energy Dissipation
R	Only 1st stilling basin		1.000	1.000
I-1	1.0	0.5	0.352	1.031
I-2	1.0	1.0	0.485	1.038
I-3	1.0	2.0	0.204	1.024
II-1	0.5	0.5	0.532	1.063
II-2	0.5	1.0	0.566	1.062
II-3	0.5	2.0	0.542	1.065
III-1	0.25	0.5	0.664	1.060
III-2	0.25	1.0	0.640	1.060
III-3	0.25	2.0	0.741	1.058
Averaged			0.525	1.051

2차 정수지의 제원은 1차정수지를 기준으로 길이는 1.0, 0.5, 0.25로, 깊이는 1.0, 2.0 및 0.5로 결정하였다. 1차 정수지 이상의 길이를 갖는 2차정수지는 없을 것이라는 가정을 하였고, 깊이는 1차정수지를 기준으로 얇은 경우와 깊은 경우에 대해 고려하였다. 1차 정수지만 있을 경우인 Case R과 2차 정수지를 변화시킨 나머지 경우와 비교한 결과 2차 정수지로 인한 에너지 감쇄효과는 그다지 크지 않은 것으로 확인되었다. 이는 국내 중소 저수지를 대상으로 한 본 연구의 대상이 홍수시에 1차 정수지에서 충분한 감쇄가 이뤄지기 때문이라 생각한다. 따라서 2차 정수지에서는 1차 정수지 대비 약 5% 정도의 감쇄효과만 있는 것으로 나타났다. 또한 2차 정수지 위를 흐르는 수류의 특성과도 관련 있다고 판단된다. Fig. 6은 2차 정수지 주변부의 흐름 특성에 대한 개념도로 2차 정수지에서 에너지 감쇄가 크게 발생하지 않는 이유를 설명할 수 있다. 실제 수심은 D_r 이지만, 주 흐름이 통과하는 유효 수심(Effective depth)은 D_e 로 2차 정수지가 없을 경우와 크게 차이가 발생하지 않으며, 이에 따라 2차 정수지 종료 지점에서의 수리특성 변화도 크지 않게 나타난 것이다. 결국 에너지 감쇄 측면에서 1차 정수지에 비해 2차 정수지는 상대적으로 효과가 없다고 판단된다.

다만, 2차 정수지를 지난 지점에서의 바닥유속은 2차 정수지의 제원에 따라 크게 다르게 나타났다. L_2/L_1 이 가장 큰 경우에서 바닥 유속 감소폭이 가장 크게 타났으며, 길이비가 작아질수록 감소폭은 작아졌다. 수심에 대해서도 다른 변수들에 비해 변화폭이 크게 타났는데, 대체적으로 정수지 깊이가 깊어질수록 바닥 유속이 감소하는 것으로 확인되었다. 평균유속의 차이는 크지 않았으나, 바닥유속의 차이가 상대적으로 크게 나타난 이유는 Fig. 6에서 제시된 바와 같이, 2차 정수지 말단 부근에서 상승하는 흐름의 영향 때문인 것으로 판단된다. 이러한 상승 흐름의 강도는 2차 정수지의 제원에 따라 달라졌으며, 이에 따라 2차 정수지가 현재 국내에서 발생하고 있는 하천 횡단구조물 하류 하상의

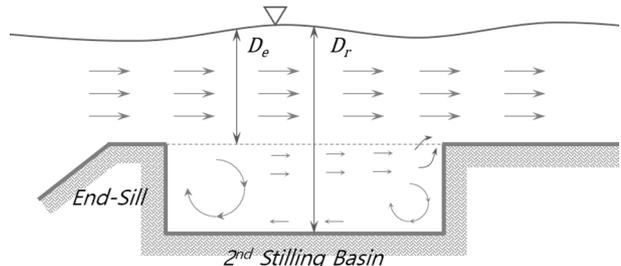


Fig. 6. Conceptual diagram for x-z velocity distribution in the 2nd stilling basin.

세굴에 대한 대안이 될 수 있다고 판단하여, 세굴에 직접적인 영향을 주는 바닥보호공에 대한 정량적인 분석을 수행하였다.

4. 2차정수지에 대한 바닥보호공 사석 결정

하천 횡단구조물 하류에 설치되는 바닥보호공은 세굴을 방지하고 하상을 유지시켜 수공구조물 본체 및 물받이를 보호하는 것이 주요한 기능이다. 현재 국내의 경우 일반적으로 하천에 시공되는 바닥보호공은 돌망태(gabion mattress)나 사석(riprap) 등을 이용한다. 바닥보호공에 사용되는 재료는 유속에 따라 재료의 입경과 중량 등을 고려하여 사용하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 앞 절에서 도출된 결과를 바탕으로 2차 정수지가 바닥보호공 사석 결정에 주는 영향을 분석하였다. 분석은 Table 3에 제시된 식을 이용하여 수행되었다. 본 연구에서는 앞 절에서 도출된 결과를 바탕으로 2차 정수지가 바닥보호공 사석 결정에 주는 영향을 분석하였다. 분석은 Table 3에 제시된 식을 이용하여 수행되었다.

Fortier and Scobey (1926)는 실험수로에서 평균유속의 최대 허용값에 대한 현장조사를 수행하여, 인공수로의 허용유속을 표로 정리하였다. Fortier and Scobey (1926)는 수로를 구성하는 재료에 따른 평균유속을 제시한 것으로, 적용이 제한적이며, 검증할만한 이론적인 연구는 없다(Yang, 2003). Mavis and Laushey (1948)은 하상유속을 이용하여, 입자의 한계유속을 제시하려 하였으나, 측정의 어려움 때문에, 수심의 70% 유속 및 외삽을 이용한 공식을 제안하였다(Mavis and Laushey, 1949). 반면 Yang (1973)은 평균유속 및 입자의 침강속도를 이용한 공식을 제안하였다. 본 연구는 바닥보호공

의 크기를 결정하는 것이나, 단일 유사를 이용한 선행 실험 연구들의 결과들도 참고하였다. 이는 단일 유사의 거동과 사석의 거동이 크게 다르지 않다고 판단하였기 때문이다. 유사가 아닌 보호공으로써 사석 크기에 대한 연구는 1970년대 중반부터 수행되었다. Maynard et al. (1989)는 평균 유속을 이용하여 바닥에 포설되는 사석의 직경을 결정하는 공식을 제시하였으며, Maynard et al. (1989)의 식을 바탕으로 USACE (1994)에서는 Froude 수가 포함된 사석 크기 결정식을 제시하였다. May and Escarameia (1992)는 평균 유속을 이용한 기존의 공식들에 대한 한계점을 제시하였으며, 수심의 1/10 지점에서의 유속을 이용한 사석 크기 결정 공식을 제시하였다. 위의 식들을 이용하여 2차 정수지를 지난 흐름(Fig. 1의 측정)에 대한 최소 사석 입경을 정리하였다.

Fig. 7은 Table 3에 제시된 하상 입자의 한계조건 공식에 본 연구결과를 적용한 것이다. X축의 변수인 $(L_2H_2)/(L_1H_1)$ 는 1차 정수지에 대한 2차 정수지의 체원비를 나타낸다. 이는 수치모의 결과를 통해서 확인한 바

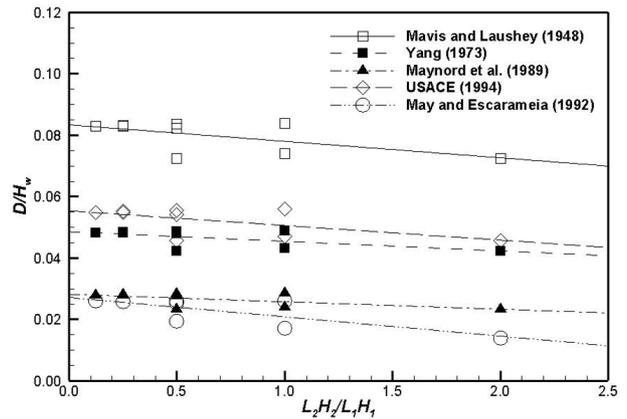


Fig. 7. Riprap size after the second stilling basin.

Table 3. Formulae for riprap size at the downstream of hydraulic structures

Author	Contents		Remarks
Fortier and Scobey ¹²⁾	Tabulated		Sed. [†]
Mavis and Laushey ¹³⁾	$D = \left(\frac{u_b}{K}\right)^2$	u_b : 70% of averaged vel.	Sed.
Yang ¹⁴⁾	$\frac{V_c}{\omega} = 2.05 \quad (Re^* \geq 70)$	V_c : depth average critical vel. Re^* : particle Reynolds number ω : particle fall velocity	Sed.
Maynard et al. ¹⁵⁾	$\frac{D}{h} = 0.30 \left[\left(\frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \right)^{0.5} \frac{V}{\sqrt{gh}} \right]^{2.5}$	-	Rip. [*]
USACE ¹⁶⁾	$\frac{D}{h} = 0.315 Fr^{2.5}$	Fr : Froude number	Rip.
May and Escarameia ¹⁷⁾	$D = C \frac{U_b^2}{2g(s-1)}$	U_b : vel. at 0.1h $C = 12.3 TI - 0.87 (0.1 < TI < 0.3)$	Rip.

Sed.[†]: Non-cohesive and single Sediment
Rip.^{*}: Riprap

와 같이 2차 정수지의 길이와 높이가 증가할수록 하상 유속이 선형적으로 감소하므로, 이를 무차원 독립변수로 선택하였다. Y축의 변수는 차원해석 및 Buckingham- π 방법의 결과로 사석의 크기와 위어의 높이의 비로 나타난 무차원 종속변수로, 위어 상류에서의 접근유속이 무시될 경우 수체의 총 수두(total head)에 대한 사석의 무게를 표현한 변수이다. 수로를 따라 흐르는 수류를 고려할 때, 단일 사석이 받는 힘은 항력일 수 있지만, 다수의 사석이 바닥보호공으로써 포설된 경우 저항력은 중력이 지배적이 되기 때문에, 이러한 무차원 비는 본 연구에 적합하다고 판단된다. 사석의 크기는 연구마다 사석입경에 대한 정의가 다르지만(d_{30} 또는 d_{50}), 동일한 모양과 크기의 구형이라고 가정한 상태에서 계산되었다. 분석결과 전체적으로 2차 정수지의 길이가 길어지고, 높이가 깊어질수록 2차 정수지 하류에 설치되는 하상 보호공의 사석 크기는 작아지는 것으로 나타났다. 특히 May and Escarameia (1948)의 경우 2차 정수지 제원에 따라 최대 약 40%의 사석크기 차이가 발생하였고, 반면에 Mavis and Laushey (1948)의 경우 최대 약 15%의 차이만을 보였다. 특히 Mavis and Laushey(1948)의 경우 나머지 다른 공식들로 계산된 사석의 크기에 비하여 편차가 크게 발생하였는데, 이는 Mavis and Laushey(1948)의 실험이 3.0 ft(≈ 0.305 m)로 제한된 수로에서 수행되었기 때문에, 매우 제한적인 경우에만 적용이 가능하기 때문인 것으로 판단된다(본 연구에서는 Mavis and Laushey (1948)식 계산을 위해 수심이 3.0 ft가 되는 Froude 상사비를 적용한 data를 이용함). 따라서 2차 정수지의 설치유무 및 제원에 따라 바닥 보호공의 크기 및 제원이 영향을 받음을 확인하였고, 이에 대한 정량적 결과 분석이 향후 추가한다면 설계 시 가이드라인으로 활용이 가능하다고 판단한다.

5. 결론

본 연구에서는 최근 하천횡단구조물 하류부에서 발생하는 안전성 문제에 대한 대책의 일환으로 2차 정수지를 제시하였으며, 수치해석을 통해 수리특성 및 에너지 감세 효과를 분석하였다. 국내 중소저수지를 대상으로 한 연구 대상의 제원 및 경계조건을 결정하여, 현장에서 발생가능한 수리현상을 표현하려 하였다. 분석결과 2차 정수지는 1차 정수지에 비해 약 5%의 에너지 감세효과가 있는 것으로 나타났다. 이는 2차 정수지 위를 통과하는 빠른 흐름이 2차 정수지 형태와 무관하게 유효수심을 유지하며 흘러가므로, 기존의 1차 정수지가 충분한 감세효과를 수행하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 바닥 유속은 2차 정수지 형태에 따라

차이가 상대적으로 크게 발생하였으며, 이에 2차 정수지 이후에 설치될 하상보호공의 사석 크기 결정을 수행함으로써 2차 정수지 제원에 대한 세굴 안전성을 검토하였다. 국내 중소하천의 홍수시를 대상으로 수행된 수치해석 결과는 선행연구에 따라 편차가 있었지만 대체적으로 2차 정수지의 길이가 길어질수록, 높이가 깊어질수록 하상에 대한 세굴 안전성은 높아지는 것으로 나타났다. 특히 May and Escarameia(1948)의 공식을 적용하였을 때, 최대 약 40%의 세굴 안전성이 높아지는 것으로 확인되어, 2차 정수지가 하상 세굴 방지에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 많은 연구들이 감세시설의 에너지 감세 효과에 대해서 이야기 하고 있지만, 본 연구에서 제시된 2차 감세공(정수지)은 주어진 조건에서 에너지감세보다는 하상에 주는 수류의 영향 감소가 주된 역할인 것으로 나타났는데, 이러한 결과를 일반화하기 위해서는 단순한 유선 분석이 아닌 하상 경계부(boundary)로부터 발달하는 유속장 및 난류특성 등이 명확히 규명될 필요성이 있다고 판단된다. 향후 네스팅 기법(nesting method) 등을 이용하여, 매우 조밀한 격자에서 연구를 수행하고, PIV¹⁸⁾(Particle Image Velocimetry) 등 최신의 기법을 활용한 수리실험¹⁹⁾을 통해 이를 검증해야 할 것이다. 또한 본 연구는 정수지의 형태로 USBR-IV로 한정되었기 때문에, 다양한 형태의 저수지에 적용하기에는 부족하다. 이에 USBR-IV 형태 이외의 정수지의 형태 및 다양한 도수조건(본 연구에서는 forced 도수)에 대한 연구를 지속적으로 수행하여, 2차 정수지에 대한 다각적인 분석을 수행한다면, 국내 중소하천의 수공구조물 하류에서 발생하는 안전성 문제에 대한 대책이 될 수 있을 것이라 판단한다.

감사의 글: 본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진 사업 연구개발사업의 연구비지원(18CTAP-C133019-02)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- 1) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Dam design criteria, 2011.
- 2) N. E. Bormann and P. Y. Julien, "Scour Downstream of Grade-control Structures", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 117, No. 5, pp. 579-594, 1991.
- 3) A. Salah, "Effect of Semi-circular Baffle Blocks on Local Scour Downstream Clear-overfall Weirs", Ain Shams Engineering Journal, Vol. 4, No. 4, pp. 675-684, 2013.
- 4) B. K. Choi, T. H. Kang and I. S. Kim, "Design of the

- Hydraulic Jump Type Stilling Basin using Sub-dam at Spillway”, KSCE 2016 Convention, pp.299-302, 2006.
- 5) S. E. Yoon, J. T. Lee, K. I. Son and J. H. Kim, “Examination on the Experimental Prediction of Scour Depths Caused by Jets”, Journal of Korea Water Resources Association. Vol.30, No. 6, pp.437-446, 1995.
 - 6) M. H. Lee and H. S. Choi, “Evaluation on Hydraulic Stability Formulae of Riprap”, KSCE 2008 Convention, pp.2944-2947, 2008.
 - 7) J. P. Davis, “Hydraulic design of navigation locks (No. WES/MP/HL-89-5)”, Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg Ms Hydraulics Lab, 1989.
 - 8) H. Babaali, A. Shamsai and H. Vosoughifar, “Computational Modeling of the Hydraulic Jump in the Stilling Basin with Convergence walls using CFD Codes”, Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 40, No. 2, pp. 381-395, 2015.
 - 9) F. Naseri, H. Sarkardeh and E. Jabbari, “Effect of Inlet Flow Condition on Hydrodynamic Parameters of Stilling Basins”, Acta Mechanica, Vol. 229, No. 3, pp. 1415-1428, 2018.
 - 10) A. Bayon, D. Valero, R. García-Bartual and P. A. López-Jiménez, “Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the Numerical Modeling of a Low Reynolds Number Hydraulic Jump”, Environmental Modelling & Software, Vol. 80, pp. 322-335, 2016.
 - 11) A. Bayon, D. Valero, R. García-Bartual and P. A. López-Jiménez, “Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the Numerical Modeling of a Low Reynolds Number Hydraulic Jump”, Environmental Modelling & Software, Vol. 80, pp. 322-335, 2016.
 - 12) S. Fortier and F. C. Scobey, “Permissible Canal Velocities”, Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol. 89, No. 1, pp. 940-956, 1926.
 - 13) F. T. Mavis and L. M. Laushey, “A Reappraisal of the Beginning of Bed Movement-competent Velocity”, Proc. of the Int. Assoc. for Hydraulic Research. Stockholm, pp. 213-218, 1948.
 - 14) C. T. Yang, “Incipient Motion and Sediment Transport”, Journal of the Hydraulics Division, Vol. 99, No. 10, pp. 1679-1704, 1973.
 - 15) S. T. Maynard, J. F. Ruff and S. R. Abt, “Riprap Design”, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 115, No. 7, pp. 937-949, 1989.
 - 16) U. S. Army Corps of Engineers, “Hydraulic Design of Flood Control Channels”, EM 1110-2-1601, 1994.
 - 17) R. W. P. May and M. Escarameia “Channel Protection: Turbulence Downstream of Structures”, 1992.
 - 18) J. W. Ko, J. Y. Kim, T. B. Seo, K. B. Lim and D. H. Rie, “A Study on the Characteristics of Smoke Control using PIV in Tunnel Fires”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 21, No. 5, pp. 6-11, 2006.
 - 19) S. I. Jeong and S. O. Lee, “Experimental Analysis for Characteristics of Bank-Scour around Barrier”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 32, No. 4, pp. 34-39, 2017.