

바닥보호공 설계를 위한 수치모의

Numerical Simulation for Bed Protection Design

하성원*, 김태원**

Sung Won Ha, Tae Won Kim

요 지

보본체와 물받이공을 보호하는 바닥보호공(bed protection)은 굴요성 구조(flexible structure)인 돌망태, 블록공, 사석 등으로 설치되어야 하며, 일반적으로 경제성과 시공성이 우수한 사석(riprap)이 많이 이용된다. 이때 사석의 안정성 확보를 위한 설계기준으로 국내의 경우 포설길이에 대해서만 제시하고 있으나, 외국의 경우 수심, 유속 등의 값을 기초로 사석의 크기, 포설두께, 포설길이를 산정할 수 있도록 상세하게 제시하고 있다. 이와 같은 실정으로 국내 하천 실무자들이 바닥보호공을 설계 할 때 하천설계기준을 바탕으로 블라이 공식 또는 국립건설시험소 공식을 적용하여 사석의 포설길이는 산정하지만 사석의 크기, 중량 등의 제원들은 외국 설계기준을 차용하여 산정하거나 생략하는 경우도 있다. 따라서 하천설계기준의 보완 및 최근 국내 주요하천에서 발생하는 바닥보호공 유실, 침하 등의 문제를 해결하기 위한 연구가 필요하다. 본 연구는 전산유체동역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 모형인 FLOW-3D 모형을 이용하여, 바닥보호공 주변 흐름에 대한 수치모의를 수행하였다. 이때 난류 모형은 LES (Large Eddy Simulation) 모형을 적용하였으며, 바닥보호공에 작용하는 비교적 작은 척도의 와(vortex)를 해상할 수 있도록 조밀한 격자를 부여하였다. 초기 수치모형 결과의 적정성은 수리실험 결과와 비교하여 판단하였으며, 수리실험을 잘 재현해내는 격자, 매개변수 등을 적용하여 보의 하류 수위 변화에 따른 유속, 난류강도 등에 대한 분석을 수행하였다. 본 연구 결과는 바닥보호공 설계를 위한 기초자료로 활용될 수 있으며, 향후 수리실험과 병행하여 국내 실정에 맞는 설계식 개발에 대한 연구가 필요한 것으로 보인다.

핵심용어 : 보, 바닥보호공, 사석, FLOW-3D, 난류 모형

1. 서론

국내 하천에 설치된 횡단구조물은 2009년을 기준으로 약 20,753개로 알려져 있으며 수위 유지, 하상고 유지 등의 목적을 가지고 설치된다. 그러나 낙차를 가진 빠른 유속의 흐름을 형성시켜, 하류 하상에서 국소 세굴을 발생시킨다. 이를 방지하기 위해 횡단구조물 하류에 굴요성 구조인 돌망태, 블록공, 사석 등으로 이루어진 바닥보호공이 설치되나 유실, 침하 등의 문제가 빈번히 발생되고 있어 문제를 해결하기 위한 연구가 필요하다. 기존에 수행된 연구로는 여홍구 등(2006)에서 보 하류부 도수 및 도수 후 구간에 대해 난류강도 변화를 분석하였으며, 최홍식과 박광호 (2011)에서 사석의 안정성을 지배하는 변수를 채택 및 회귀분석을 통해 사석의 안정성 실험식을 개발하였다. 이에 본 연구는 흐름방향 유속 및 난류강도뿐만 아니라 수심방향 유속 및 난류강도를 추가 분석하여, 사석과 같은 피복 대책에서 일어날 수 있는 파괴 기구인 전단 파괴, 흡출 파괴 등을 유발하는 외력조건을 정량화하여 설계식 개발을 위한 기초 자료로 사용하는데 목적을 가지고 있다.

2. 바닥보호공 설계 방법

* 정희원 · (주)지티이 과장 · E-mail : nfrance@naver.com
** 정희원 · (주)지티이 대표이사 · E-mail : kimtw00@hanmail.net

국내 하천설계기준(한국수자원학회, 2009)에서 바닥보호공 설계는 식 (1)과 같이 블라이 공식을 사용하여 포설길이를 산정하여 적용하도록 하고 있다.

$$L_2 = 0.66 Cf (H_q q)^{1/2} - L_1 \quad (1)$$

여기서, f는 안전율(가동보=1.5, 고정보=1.0)이다. 블라이 공식은 보본체의 안전 확보를 위해 1890년대 건설된 기존 17개 댐의 설치사례로부터 결정된 경험식으로, 침투에 대한 안전을 고려한 것이다. 따라서 바닥보호공에서 발생하는 흐름특성을 고려한 설계식 개발이 요구된다.

3. 수치모의 방법

본 연구는 FLOW-3D 모형을 이용하였으며, 모형의 주요 지배방정식은 유체 해석을 위한 연속 방정식, 운동량 방정식(3차원 Navier-Stokes 방정식), 에너지 방정식이 사용되고, 자유표면 해석을 위한 VOF 방정식과 FAVOR 방법이 사용된다.

3.1 난류 모형

물받이공에서 도수(hydraulic jump)가 발생되어 복잡한 흐름이 형성되고, 바닥보호공 주변에서 변동 성분에 의한 난류를 해석하기 위해 LES 모형을 적용하였다. LES 모형의 기초 방정식은 Navier-Stokes 방정식에 필터를 가해 거시화한 것으로, 이른바 필터된(filtered) Navier-Stokes 방정식이 사용된다. 필터 폭은 격자 폭 정도로 택해지기 때문에 직접 계산된 와를 격자 척도(grid scale) 또는 해상 가능한 척도(resolvable scale)의 와라고 한다. 반면에 필터 폭 이하의 와는 부격자 척도(subgrid scale)의 와라고 하며, 이는 모형화(modeling)를 통해 흐름장에 미치는 영향을 고려하게 된다. FLOW-3D 모형에서는 부격자 척도 와점성 모형으로 Smagorinsky (1963)가 제시한 Smagorinsky 모형이 적용되었으며, 식 (2)와 같다. 이때 모형에서 사용자에 의해 입력되어야 하는 Smagorinsky 상수는 0.1(일반적으로 0.1~0.2를 사용)을 적용하였다.

$$\nu_T = (cL)^2 \sqrt{2e_{ij}e_{ij}} \quad (2)$$

여기서, ν_T 는 부격자 척도 와점성 계수, c는 Smagorinsky 상수, L은 필터 폭, e_{ij} 는 격자 척도의 변형 속도 텐서의 크기이다.

3.2 모의 조건

본 연구 결과의 적정성을 평가하기 위해 한국건설기술연구원(2014)에서 수행된 수리실험과 HILL 근사 Riemann 해법에 의한 결과를 비교 대상으로 선정하였다. 수리실험에 사용된 수로는 길이 20 m, 폭 0.8 m, 높이 0.8 m의 크기를 갖는 가변 경사형 수로이며, 수로 중앙부에는 0.236 m 높이의 보본체 및 물받이공이 설치되어있다(그림 1). 이때 구조물의 재료로서 수로의 바닥은 철제, 벽면은 강화유리, 보본체 및 물받이공은 아크릴로 제작되었다. 따라서 조도계수(roughness coefficient)는 0.010을 적용하였으며, 이는 Chow(1959)가 제시한 다양한 종류의 수로에 대한 조도계수 중 Glass의 Normal 값을 나타낸다. 이때 FLOW-3D 모형은 조고(roughness height)가 사용되므로 Christensen(1984)이 제시한 식 (3)을 사용하여 환산된 조고 0.0003 m를 적용하였다.

$$n = \frac{k_s^{1/6}}{8.25 \sqrt{g}} = 0.039 k_s^{1/6} \quad (3)$$

여기서, n 은 조도계수, g 는 중력가속도, k_s 는 조고를 나타낸다.

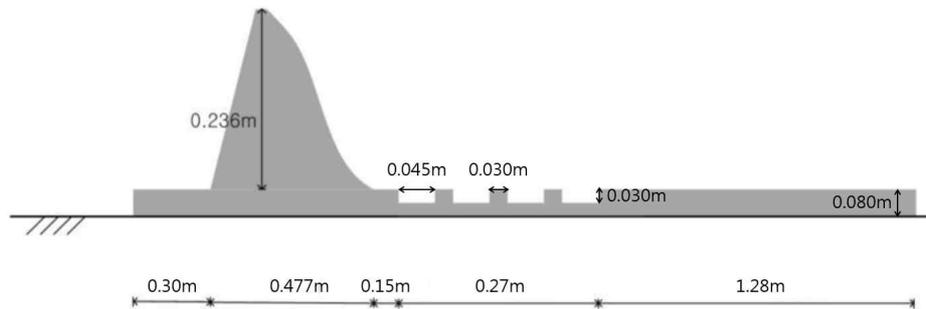


그림 1. 수리실험에 적용된 보본체 및 물받이공 모형(한국건설기술연구원, 2014)

수치 모의에 적용된 계산 영역은 보본체 마루부(weir crest)를 기준으로 상류(upstream) 방향으로 1.1 m, 하류 방향으로 4.5 m 구간이다. 격자는 총 1,532,520개가 사용되었으며, x축으로 0.005 ~ 0.010 m 간격, z축으로 0.005 m 간격을 부여하였다. 특히 본 연구의 관심 대상인 바닥보호공 주변에 조밀한 격자를 부여하여 비교적 작은 척도의 와를 해상할 수 있도록 하였다. 경계조건은 먼저 수리실험과 비교하기 위해 Case 0을 수리실험 조건과 동일하게 적용하였으며, 나머지 Case 1에서 Case 8까지는 상류 유량 및 수위를 일정하게 유지하면서 하류 수위를 점차 상승시켜 바닥 보호공 주변에서 변화되는 유속, 난류강도 등을 분석하였다(표 1).

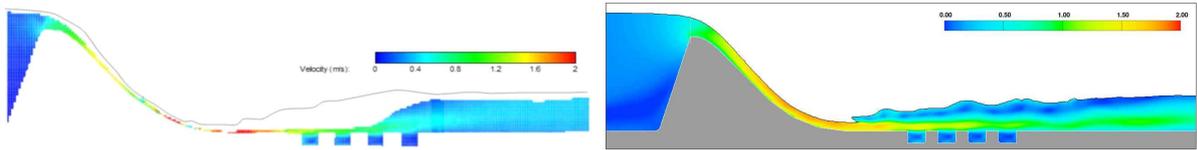
표 1. 수치모의에 적용된 경계조건

구 분	상류 경계조건 수위(EL. m)	하류 경계조건 수위(EL. m)	구 분	상류 경계조건 수위(EL. m)	하류 경계조건 수위(EL. m)
Case 0	0.374	0.174	Case 5	0.374	0.274
Case 1		0.194	Case 6		0.294
Case 2		0.214	Case 7		0.314
Case 3		0.234	Case 8		0.334
Case 4		0.254	-	-	-

4. 수치모의 결과

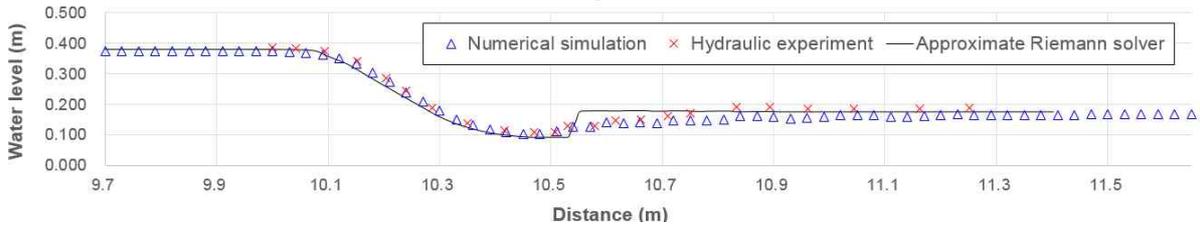
4.1 수리실험과의 비교

물받이공에서 도수가 발생하는 조건으로 수리실험 결과와 비교하였다(그림 2). 먼저 수위의 경우 Weir 상·하류 23개 지점에서 비교한 결과, 수리실험 대비 1.3~16.0 %의 오차를 보였다. 이때 대부분의 오차는 도수 영역에서 발생되었다. 수면형의 경우 도수 위치는 비교적 잘 재현한 것으로 보여지며, Weir에서 낙하되는 흐름의 Froude 수 3.8에 해당하는 진동도수(oscillating jump)의 흐름특성인 표면파도 관찰되었다. 유속의 경우 췌기형 웅덩이 감세공 직상류에서 발생한 약 1.50 m/s의 유속이 직하류에서 수리실험(PIV로 측정하여 도수에 의해 기포가 발생하는 영역의 유속은 측정 불가)은 약 0.50 m/s, 수치모의는 약 1.00 m/s로 감소되었다. 이는 수리실험의 에너지 손실이 대부분 도수 부분에서 발생한 것을 의미한다.



(a) 수리실험(한국건설기술연구원, 2014)

(b) 수치모의



(c) 수위 비교 그래프

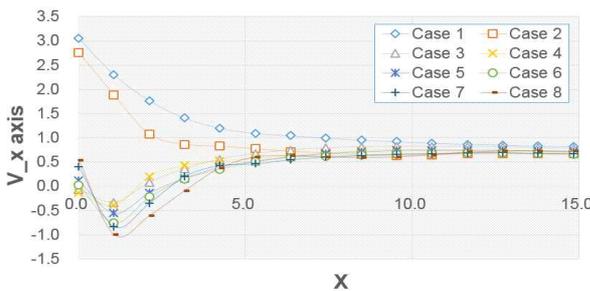
그림 2. 수리실험 및 수치모의 결과의 비교

4.2 하류 수위 변화에 따른 수치모의

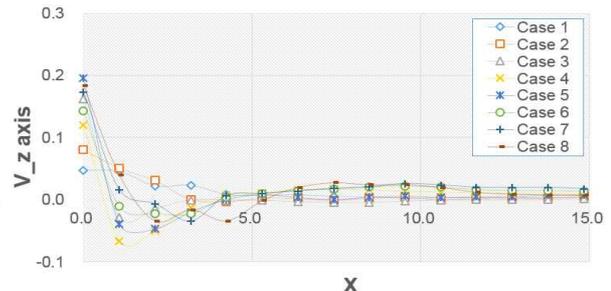
썰기형 웅덩이 감세공의 종점을 기준으로 하류 3.5 m 구간을 Weir 높이 0.236 m로 무차원화 시킨 X 에 대해 무차원화된 유속 특성(V) 및 난류강도 특성(TI)을 그림 3과 같이 표현하였다. 이때 흐름특성은 100초(1초 간격) 동안 x 방향 순간유속(u), z 방향 순간유속(w)을 하상으로부터 0.01 m (중력 방향) 떨어진 지점에서 0.25 m 간격(흐름 방향)으로 측정하여, 식 (4)를 사용하여 산정하였다.

$$V = \bar{u}/V_2, \quad TI = \left[\frac{1}{T} \int_0^T u'^2 dt \right]^{1/2} / V_2 \quad (4)$$

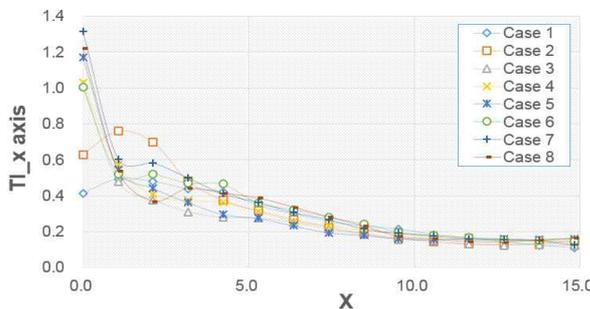
여기서, $u' = u - \bar{u}$ 이고, u 는 순간유속, \bar{u} 는 시간평균유속, V_2 는 하류 단면평균유속이다.



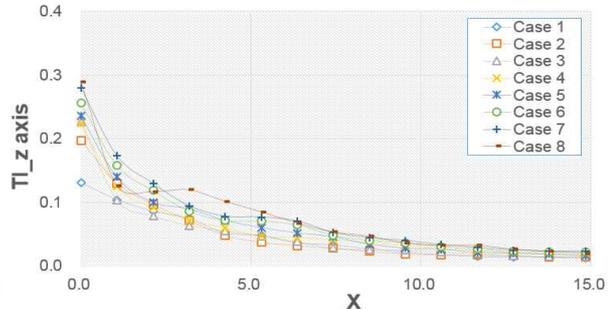
(a) x방향 유속 특성



(b) z방향 유속 특성



(c) x방향 난류강도 특성



(d) z방향 난류강도 특성

그림 3. 바닥보호공 설계 인자 검토

흐름방향(x방향) 유속 특성의 경우, Case 1과 Case 2는 $X=0$ 하상 인근에서 상대적으로 빠른 유속(하류 단면평균유속의 약 3배)이 분포하였다. 반면 Case 3~8은 쉐기형 웅덩이 감세공에서 유선이 수면으로 상승하면서, $X=0$ 에서 $X=5$ 까지의 영역에서 시계 방향의 회전류가 발생되었으며, 하상 인근에서 (-)의 유속이 하류 단면평균유속보다 느리게 분포하였다. 흐름방향(x방향) 난류강도 특성의 경우, 유속의 변동량이 지배적이기 때문에 Case 3~8과 같이 회전류가 발생하였을 때 난류강도가 비교적 크게 분포하였다. 수심방향(z방향) 난류강도 특성의 경우, 하류 수위가 증가할수록 난류강도 특성이 증가하여 비례하는 경향을 보여주었다. 전체적으로 Weir의 높이 10배 지점($X=10$)부터 비교적 안정화된 흐름이 형성되는 것으로 판단되며, 이는 Weir 높이 10배 지점까지 횡단구조물 설치로 인한 흐름이 교란된 것을 의미하여, 하상에 구조적인 대책이 필요할 것으로 사료된다.

5. 결론

수치모의를 통해 바닥보호공 주변에서 흐름특성을 검토하였다. 하류 수위가 낮을수록 바닥보호공에서 강한 유속이 분포되어 전단과괴를, 하류 수위가 높을수록 강한 난류강도가 분포되어 유사 이탈로 인한 흡출과괴를 유발할 것으로 예측된다. 본 수치모의는 사석의 한계조건(critical condition)을 평가하는 것이 불가능하므로, 향후 수리실험과 병행하여 바닥보호공이 유실을 정도에 따라 발생하는 흐름특성(유속, 난류강도 등)을 정량화하여 바닥보호공 설계식이 개발되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(과제번호 98448)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 여흥구, 강준구, 정상화 (2006). “보 하류부 난류유속강도에 대한 실험적 연구.” **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 1318-1322.
2. 최홍식, 박광호 (2011). “사석의 수리적 안정성 실험식 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제44권, 제6호, pp. 449-459.
3. 한국건설기술연구원 (2014). 입자영상유속계(PIV)를 이용한 하천구조물 주변 유동해석 기법 개발, KICT 2014-221, pp. 78-114.
4. 한국수자원학회 (2009). 하천설계기준.
5. Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill Book Co., New York, p. 110.
6. Christensen, B. A. (1984). “Analysis of Partially Filled Circular Storm Sewers”, *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 8.
7. Smagorinsky, J. (1963). “General circulation experiments with the primitive equations”, *Monthly Weather Review*, Washington, D. C., Vol. 91, No. 3, pp. 99-164.