

수치모의를 이용한 경사형보 설치각도 변화에 따른 흐름특성 및 하도변화 분석

Analysis of Flow Characteristics and Bed changes with Oblique Weir Installation Angle Using Numerical Simulation

김기정*, 장창래**, 이원호***

Gi Jung Kim, Chang-Lae Jang, Wonho Lee

요 지

본 연구에서는 2차원 수치모형을 통해 보의 설치 각도 변화에 대한 보 상하류에서 흐름특성 변화와 하도 변화를 정량적으로 분석하였다. 수치모의 결과, 흐름은 경사형보를 월류하면서 경사진 방향으로 굴절되었으며, 보의 설치 각도가 증가할수록 흐름의 굴절 각도가 증가하는 경향을 보였다. 또한 보의 설치 각도가 증가할수록 무차원유속은 감소하였다. 보의 보 상류에서는 보의 의해 형성된 배수의 영향이 끝나는 지점에서 유사가 퇴적되어 델타가 발달하였다. 델타는 흐름방향을 따라 하류로 이동하였다. 이동속도는 보에 가까워질수록 감소하며, 크기는 증가하였다. 보 하류에서는 무차원 보의 길이가 증가함에 따라, 무차원 사주의 파장이 감소하고, 무차원 사주의 파고는 증가하였다.

핵심용어 : 경사형보, 수치모의, 사주의 파장, 사주의 파고

1. 서론

보는 수로나 하천의 수위를 조절하여 수운, 취수, 경관 등을 도모하거나 하구 조수의 침입을 막는 구조물로서, 국내에 자주 사용되는 하천 구조물이다 (우효섭, 2011). 하천을 횡단하는 수리구조물은 사행도가 작고 직선 구간에서 수리구조물의 상류와 하류에서 국소 세굴이 발생하지 않도록 흐름에 직각으로 설치하여야 한다. 그러나 하도의 지형적인 특성과 설치 목적에 따라 흐름에 직각으로 설치되지 않은 곳이 있으며, 이로 인하여 하류에 흐름이 집중되거나 분산되어 수리구조물 하류에서 하상이 세굴 되고, 하도 지형이 변화되었다 (Jang, 2017). 그럼에도 불구하고, 하천횡단 수리구조물의 설치각도에 따른 흐름 및 지형변화에 대한 연구가 거의 이루어지지 않고 있다.

Borghai et al. (2003)은 흐름의 방향에 횡방향으로 경사지게 설치된 직사각형예연 위어(Oblique rectangular sharp-crest weir)를 대상으로 흐름에 대한 설치각도의 변화에 대해 유량계수가 영향을 받는다는 것을 입증하고, 이에 대한 유량계수 공식을 제안하였다. Kabiri-samani and Javaheri (2012)는 보 형상에 대한 흐름특성을 분석하기 위하여 수리실험을 실시하였으며, 완전월류 흐름과 수중위어 흐름에 대한 유량계수 산정식을 제시하였다. 수로의 특성 및 수리구조물에 의한 지형변화에 관한 연구중에서 장창래와 정관수 (2006)는 2차원 수치모형을 이용하여 사행하천에서 사주의 이동한계각, 사행각도와 사주의 이동속도 등을 Kinoshita and Miwa (1974)의 실내실험과 비교하였다. 그러나 이러한 연구들은 보의 설치각도 변화에 대한 흐름의 변화와 보 하류에 미치는 영향을 연구하는데 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 실내실험 결과와 비교를 통해 2차원 수치모형의 적용성을 검토하였으며, 보의 설치각도 변화에 따른 보 상하류에서 흐름특성 변화와 사주의 거동을 정량적으로 분석하였다.

* 정회원 · 한국교통대학교 토목공학전공 박사과정 · E-mail : kimgjung@ut.ac.kr

** 정회원 · 한국교통대학교 토목공학전공 교수 · E-mail : cjiang@ut.ac.kr

*** 정회원 · 한국교통대학교 토목공학전공 교수 · E-mail : whlee@ut.ac.kr

2. 수치모형의 특징 및 계산조건

2.1 수치모형의 특징

본 연구에서 사용한 2차원 수치모형인 Nays2DH는 2차원 부정류의 흐름과 하상변동을 예측하기 위한 해석프로그램이다. 복잡한 형상의 하천을 해석하기 위하여 직교좌표계를 변환한 경계적합좌표계를 사용하였다. 층류와 난류를 포함한 부정류 계산을 모의 할 수 있으며, 유사이동으로 인한 하천의 하상변화를 재현할 수 있다. 일반적으로 흐름에 대한 계산은 이류항을 포함한 운동방정식이 적용된 유한차분법이 사용되며, 풍상차분법(Upwind difference method)나 CIP(Cubic Interpolated Pseudoparticle)을 선택하여 사용할 수 있다. 하상에서의 소류사 이송공식은 M.P.M.(Meyer-Peter and Muller, 1948)공식과 Ashida and Michiue (1972)공식을 선택하여 사용할 수 있다.

2.2 수치모의 조건

수치모형의 적용성을 검증하기 위하여 실내실험을 수행하였으며, 그 결과와 수치모의 결과를 비교하였다. 길이가 10 m이고, 폭이 0.6 m인 가변형 경사 수로의 높이는 0.015 m인 보(위어)를 상류 유입구에서 하류로 4 m 지점에 설치하였다. 유량(Q)은 0.0045 m³/s로 설정하였다. 수로의 경사는 1/200로 설정하였다. 하상토는 평균입경(d_m)은 0.8 mm인 균일사를 0.1 m 두께로 포설하였다. 자세한 수리학적 조건은 표 1에 설명되어 있다.

본 수치모의를 수행하기 위해 계산 격자는 흐름방향으로 103개를 설정하고 흐름의 횡방향으로 11개를 설정하였으며, 계산격자의 세장비(종방향 : 횡방향 비)는 1:2로 설정하였다. 계산간격은 0.01초로 설정하였으며, 총 모의시간은 480분으로 설정하였다 (그림 1). 하상에서 소류사량은 Ashida and Michiue (1972)의 공식으로 계산하였다.

$$q_b = 17\tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_*}\right) \sqrt{s_g g d^3} \quad (1)$$

여기서 q_b 는 소류사량(m²/s), s_g 는 수중에서 하상재료의 비중, g 는 중력가속도(m/s²), d 는 하상토의 평균입경(mm), τ_* 는 무차원 소류력, τ_{*c} 는 무차원 한계 소류력, u_* 는 마찰속도(m/s), u_{*c} 는 한계 마찰속도(m/s)이다.

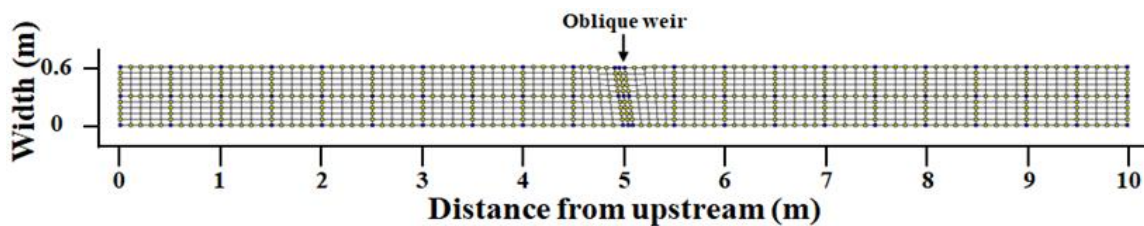


그림 1. 수치모의 계산격자

표 1. 실험 및 수치모의를 위한 수리학적 조건

Run	유량 (m^3/s)	하폭 (m)	보 설치각도 ($^\circ$)	하상경사	조도계수	하상투입경 (mm)
Run-2	0.0045	0.6	15	1/200	0.0126	0.8
Run-3	0.0045	0.6	30	1/200	0.0126	0.8
Run-4	0.0045	0.6	45	1/200	0.0126	0.8

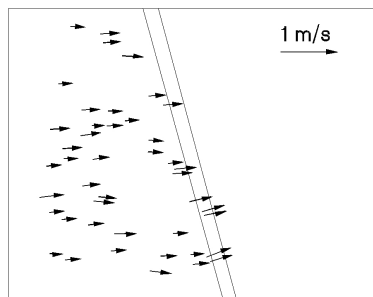
3. 모형의 적용성 검토 및 흐름특성 분석

실험 및 수치모의를 비교한 결과, 상류 계측이 시작되는 지점에서부터 보가 설치된 위치까지 수심이 증가하다가 보를 통과하면서부터 수심이 급격하게 감소하였다. 보 직하류에서 수면이 불연속적으로 튀는 도수가 발생하였으며, 수심이 작아졌다. 하류로 가면서 수면이 잔잔해지고 수심이 상승하였다. 수치모의 결과는 이러한 실내실험 결과를 잘 모의하였다. 특히, 실내실험 결과와 수치모의 결과의 절대오차율(AER)은 3.66 %며, 절대평균오차(MAE)는 0.002 m이었다. 평균제곱근오차(RMSE)는 0.002 m이었다 (표 2).

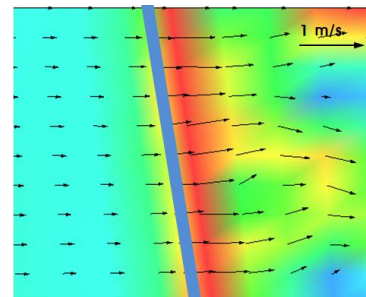
표 2. 수치모의 분석결과

	Run-2	Run-3	Run-4	평균
AER (%)	3.12	5.31	2.56	3.66
MAE (m)	0.002	0.002	0.001	0.002
RMSE (m)	0.003	0.003	0.001	0.002

수치모의 결과, 흐름은 경사형 보를 월류하면서 경사진 방향으로 굴절된다. 보 직하류에서는 경사형 보와 측벽이 만나는 곳에서 흐름이 집중된다. 이때, 경사 각도가 클수록 측방향으로 굴절되는 각도는 크게 되며, 수로 측벽에 수층부가 형성된다 (그림 2). 보의 설치각도가 증가할수록 흐름의 굴절각도가 증가하는 경향을 보였다 (그림 3). 흐름의 굴절각도에 대한 실험 및 수치모의 결과의 절대 오차율(AER)은 0.070%이었다. 평균절대오차(MAE)는 0.693° 였으며, 평균제곱근오차(RMSE)는 0.757° 이었다.



(a) Run-2 유속벡터 (실험)



(b) Run-2 유속벡터 (수치모의)

그림 2. 유속벡터에 대한 실험 및 수치모의 결과

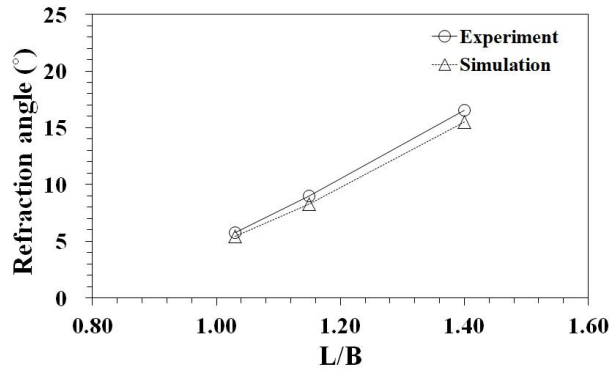


그림 3. 유속벡터의 굴절각도에 대한 실험 및 수치모의 결과

4. 보 설치각도변화에 의한 하상변화

수치모의 결과, 보 상류에서는 보에 의해 형성된 배수에 의해 유사가 퇴적되어 델타가 형성되었다. 델타는 흐름방향으로 이동하며 보에 가까워질수록 이동속도가 점차 줄어드는 경향을 보였다 (그림 4).

보 하류에서는 흐름이 집중되어 보 직하류 하상은 세굴 되었으며, 경사형 보에 의해 흐름이 좌안에 집중되면서, 보 직하류 좌안에 수층부가 형성되고 하상이 저하되었다. 수로의 우안에서는 상대적으로 유속이 느리고, 하상고가 상승하였으며, 교호사주가 발달하였다. 시간이 증가하면서 교호사주의 크기는 점차 증가하였으며 하상고가 상승하며, 사주가 발달하였다 (그림 4). Run-2에서 보 직하류에 형성된 사주의 길이는 감소하였다. 이는 보의 길이가 증가함에 따라 보에 의하여 굴절되는 흐름의 각이 크므로, 흐름이 집중되어 사주의 길이가 짧아지는 것으로 판단된다. Run-2 에 비해 수층부가 깊게 세굴 되었으며, 수층부 반대편에서 하상고가 상승하였다. 경사형 보에 의하여 좌안에서 발생한 수층부로 인해 반대지점인 우안에서는 유사가 퇴적되어 하상고가 상승하면서 교호사주가 발달하였다. 또한 교호사주는 고정사주의 형태를 가지게 되었다. 경사형 보의 설치각도가 증가함에 따라 수층부에서 발생하는 세굴심은 깊어지며 수층부 반대편의 하상고는 높아졌다.

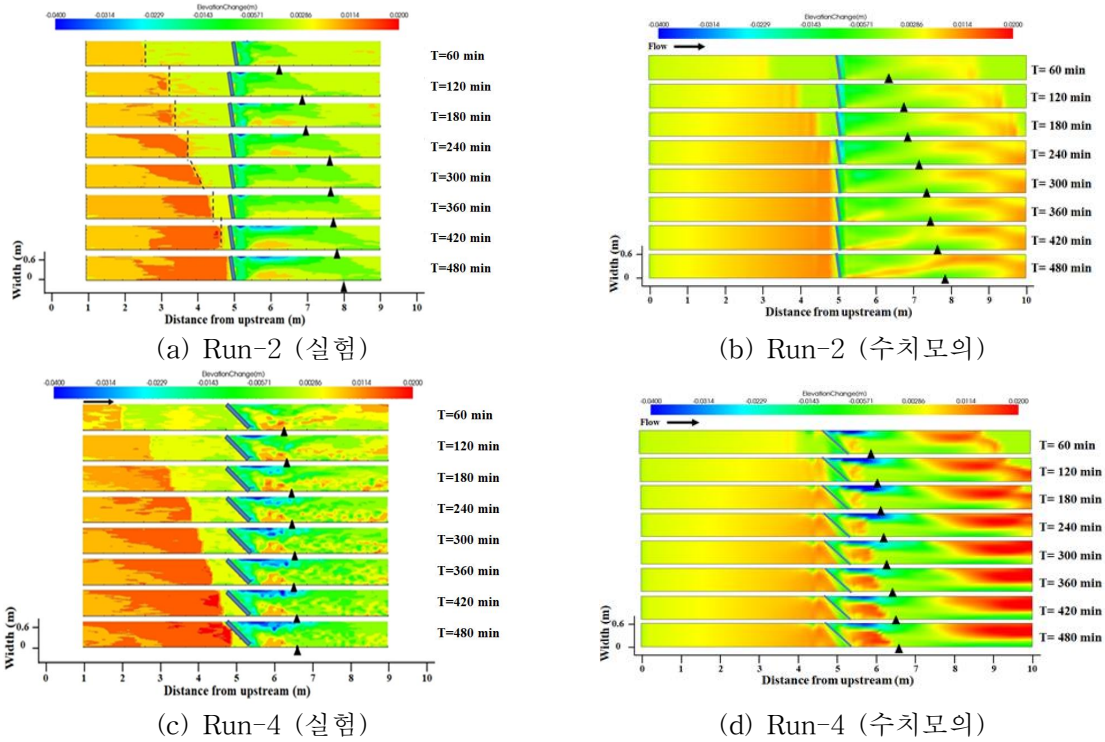


그림 4. 실내실험과 수치모의 결과의 하상변화 비교

경사형 보의 길이(L)에 대한 수로 폭(B)의 비로 정의 되는 무차원 보의 길이 변화에 대한 무차원 사주의 파장 관계를 파악하는 것은 보의 설치 각도에 대한 하류 하천 변화를 분석하는데 중요하다. 그림 5는 무차원 보의 길이(L_*)에 대한 무차원 사주(H_{D*})의 파고의 비를 보여주고 있다. 경사형 보의 설치각도가 증가하는 것을 의미하는 무차원 보의 길이가 증가함에 따라, 무차원 사주의 파장이 감소하였다. 이러한 원인은 무차원 보의 길이가 증가함에 따라 보에 의하여 굴절되는 흐름의 각이 증가하고, 흐름이 측벽에 집중되어 사주의 길이가 짧아지고, 사주의 파고가 증가하기 때문으로 판단된다.

무차원 사주의 파고는 사주의 파고(H_b)에 대한 수심(D)의 비로 정의되며, 사주의 크기를 파악하는데 중요한 매개변수이다. 사주의 파고는 하나의 사주 단위체에서 가장 깊은 하상고와 가장 높은 하상고의 차로 정의된다. 그림 6은 무차원 사주의 길이(L_*)에 대한 무차원 파장(L_{B*})의 변화를 보여주고 있다. 이것은 보의 설치 각도가 감소함에 따라 보의 파고는 감소하고, 파장은 증가하는 것을 의미한다. 즉, 보의 설치 각도가 감소할수록 경사형 위어 하류에서 국부적인 교란이 감소하는 것을 나타낸다.

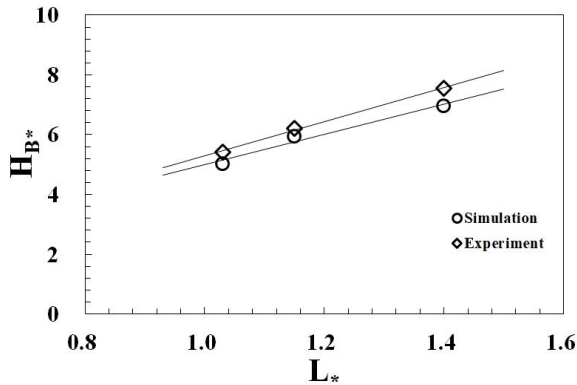


그림 5. 무차원 보의 길이에 대한 무차원 파고의 변화

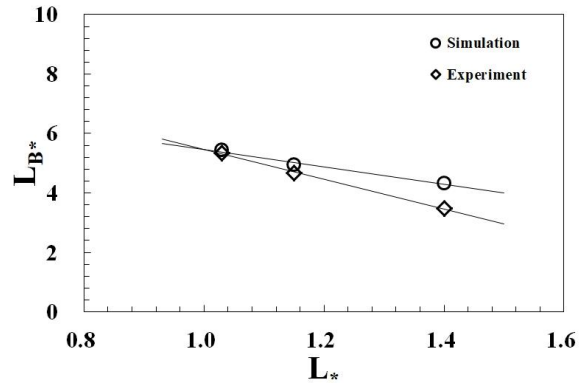


그림 6. 무차원 사주의 길이에 대한 무차원 파장의 변화

5. 결론

본 연구에서는 수치모형을 보의 설치각도 변화에 대한 보 상하류의 흐름특성과 하도변화를 정량적으로 분석하였다. 무차원 보의 길이가 증가할수록 흐름의 굴절각도가 증가하며, 무차원유속이 감소하였다. 보 상류에서는 보에 의하여 형성된 배수가 끝나는 지점에서 유사가 퇴적되어 델타가 발달하였으며, 하류로 이동하였다. 델타의 이동속도는 보에 가까워질수록 감소하며, 크기는 증가하였다. 또한 무차원 위어의 길이가 증가함에 따라, 무차원 사주의 파고는 증가하였으며, 무차원 사주의 파장은 감소하였다. 본 연구 결과는 보에 의해 변화된 흐름에 의한 하도 지형변화를 예측하는데 활용될 것으로 판단된다.

감사의글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원 (12기술혁신C02)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. 우효섭 (2011). “하천수리학.” 청문각.
2. 장창래, 정관수 (2006). “사행하천에서 사주의 이동특성에 관한 수치실험.”, 대한토목학회, 대한토목학회논문집, 제26권, 제2B호, pp.25-34.
3. Borghei S.M., Vatannia Z., Ghodsian M and Jalili M.R. (2003). Oblique rectangular sharp-crested weir. Proceeding of the Institution of Civil Engineers(ICE). 156(WM2):185-191
4. Jang, C-L, Kim Gi Jung, (2017) Experimental Analysis of Flow Characteristics and Bed Changes Over Oblique Weirs. Ecology and Resilient Infrastructure 4(4): 245-254
5. Kabiri-Samani, A., and Javaheri, A. (2012). “Discharge coefficients for free and submerged flow over Piano Key weirs.”, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 50, No. 1, pp.114-120.