

하도구조물에 의한 하도의 변화 및 적응과정 분석

Analysis of geomorphic changes and adjustment processes of alluvial rivers by low head weir

장창래*, 김기정**
Chang-Lae Jang, Gi Jung Kim

요 지

본 연구에서는 실내실험을 통하여 보의 경사변화에 따른 흐름특성과 보 상류에서 유사의 퇴적과정을 정량적으로 분석하고, 보 하류에서 세굴 및 지형변화 과정을 분석하였다. 보의 설치각도가 커질수록 보에 의한 굴절되는 유선의 각도가 증가하며, 하류에서 수층부가 형성되고 사수역의 크기가 증가한다. 즉, 보의 길이 대 수로 폭의 비로 정의되는 무차원 수로폭이 증가할수록 무차원 유효길이는 감소하였다. 보 상류에서는 보에 의하여 형성된 배수의 영향이 끝나는 지점에서 delta가 형성되며, 보 하류에서는 흐름이 집중되어 보 직하류 하상은 세굴되고 반대쪽에서는 이동성이 없는 교호사주가 형성되었다. 또한 중부에서는 깊게 세굴되었으며, 보의 설치 각도가 커질수록 수층부가 집중되면서 깊게 세굴되고, 세굴범위는 좁게 나타났다. 무차원 하상고가 증가할수록 유속과 delta의 이동속도의 비인 무차원 속도는 감소하며, 무차원 보의 길이가 증가함에 따라, 무차원 사주의 파장이 감소하였다. 무차원 보의 길이가 증가함에 따라 보에 의하여 굴절되는 흐름의 각이 크므로, 흐름이 집중되어 하상이 깊게 세굴되고 무차원 사주의 파고가 증가하였다.

핵심용어 : 경사형 보, 사주, 실내실험, 유효길이

1. 서론

중소하천에 하도를 안정시키거나 수자원을 이용하고 수면공간을 활용하기 위하여 하천을 횡단하는 수리구조물을 설치하였다. 그러나 이는 상류와 하류에 급격한 수위차를 발생시키고, 상류와 하류의 종방향 연속성을 차단하고, 흐름을 변화시킨다. 수리구조물 상류에는 유속이 감소되고 흐름이 정체되어 수질이 악화되거나 유사가 퇴적되어 수위가 상승하며, 이로 인하여 내수침수가 발생한다. 또한 수리구조물 하류에서 유속은 국부적으로 증가하여 하상이 세굴 되고, 제방을 침식시켜서 지형 변화를 일으키고 수리구조물의 안전에 위협을 준다. 보는 흐름에 직각으로 설치되어야 하지만, 현장의 여건과 목적에 의하여 흐름에 비스듬하게 설치되는 보가 있다. 보가 흐름 방향에 비스듬하게 설치되면, 흐름의 방향이 바뀌게 되며 보 하류에서 흐름이 집중되어 국부적으로 하상이 저하되고 지형이 변화되어 하류하천에 교란이 발생하게 된다. 하천을 홍수에 안전하고 생태환경적으로 건전하게 관리하거나 설계하기 위해서는 이에 대한 역학적 거동을 정량적으로 파악하는 것이 중요하다. 그러나 경사형 보에 대한 수리학적 거동과 수리구조물 상류에서 발생하는 유사의 퇴적과 하류에서 나타나는 지형변화에 대한 정량적인 연구가 거의 이루어지고 있지 않다.

Lauchlan (2004)는 보를 구성하는 상류의 경사면이 유속과 유사이송에 미치는 영향을 실내실험을 통하여 분석하였다. Borghei (2003)는 경사형 보의 유량계수 값을 실험을 통하여 제시하였으며, Kabiri-Samani (2010)는 보의 설치각도의 변화에 따른 유효길이의 변화와 수리학적 특성을 분석하였다.

* 정희원 · 한국교통대학교 토목공학과 부교수 · E-mail : cjang@ut.ac.kr

** 정희원 · 한국교통대학교 토목공학과 박사과정 · E-mail : kingjiung@ut.ac.kr

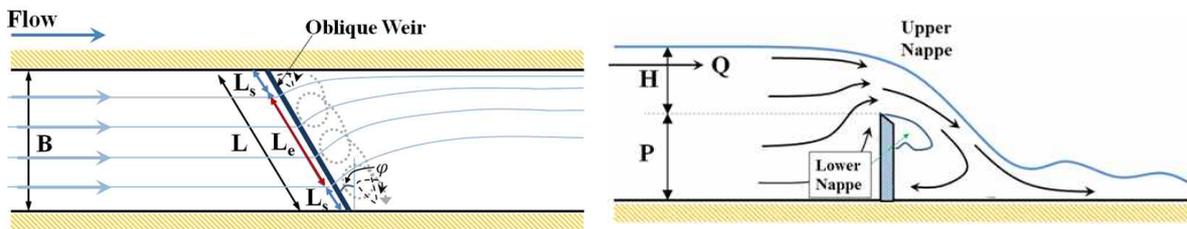
그러나 이들 연구는 흐름에 대한 수리학적 특성을 분석하는데 제한이 있으며, 보 상류에서 유사의 퇴적과 보 하류에서 지형변화에 대한 연구가 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 실내실험을 통하여 보의 경사변화에 따른 흐름특성과 보 상류에서 유사의 퇴적과정을 정량적으로 분석하고, 보 하류에서 세굴 및 지형변화 과정을 분석하였다.

2. 경사형 보에서의 흐름

경사형 보에서 흐름은 보의 설치각의 직각으로 굴절되어 월류하며, 보 하류에서 흐름이 집중된다. 이는 하류에서 수층부를 형성하게 되며, 그로 인해 발생하는 난류에 의해 사수역(Zone of flow separation, L_s)이 형성된다(그림 1(a)). 보의 유효길이(effective weir crest length, L_e)는 보의 전체 길이(L)에서 사수역이 발생하는 길이를 제외한 구간이며, 경사형 보를 월류하는 흐름의 통수능을 나타내는 중요한 매개변수이다. 일반적으로 보의 무차원 길이는 다음과 같이 정의할 수 있다(Kabiri-Samani, 2010).

$$L = f \left(F, \frac{H}{P}, \frac{L}{B} \right) \quad (1)$$

여기서, H 는 위어 마루에서 수면까지의 높이이며, P 는 수로에 설치된 보의 높이이다(그림 1(b)). B 는 수로폭을 나타낸다.



(a) 평면도

(b) 완전 월류흐름

그림 1. 경사형보를 월류하는 흐름에 대한 모식도

3. 실내실험 조건

실내실험은 길이는 10.0 m 이고, 폭이 0.6 m 이며, 깊이가 0.5 m 인 가변형 경사수로에서 수행하였다(그림 2). 경사형 위어는 상부 폭이 0.0012 m 이고 높이가 0.13 m 인 강화형 압축 목판으로 제작하여 설치하였다. 하도의 변화를 파악하기 위하여 하상토의 평균 입경이 0.8 mm 인 표준사를 0.12 m 두께로 포설하였다. 유량은 순환형 펌프를 설치하여 수로 하류의 저류조에서 수로 상류에 설치된 정류지로 공급하였다. 실험을 위하여 유량은 유사 이동하여 하도 지형이 발생할 수 있도록 0.0045 m³/sec 설정하였다. 수로의 하상경사는 공급되는 유량에 의하여 유사 이동할 수 있는 충분한 소류력이 발생할 수 있도록 1/200 으로 설정하였다. 유속은 부유 입자를 물위에 띄우고 카메라의 노출속도를 조절하여 촬영하고 분석하였으며, 하상고는 일정한 시간간격으로 흐름을 정지시킨 후에 Laser profiler로 측정하였다.

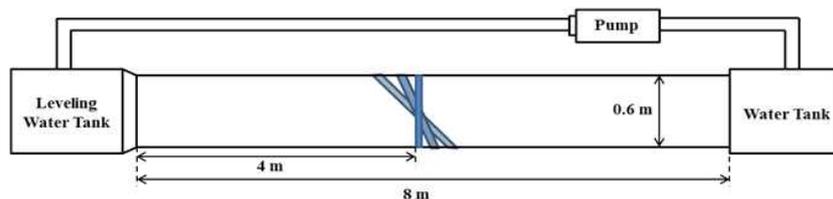


그림 2. 실험수로의 모식도

보 설치각도는 0°, 15°, 30°, 45°의 4가지로 설정하였으며, 유량은 0.0045 m³/s로 설정하였다. 조도계수는 Manning - Strickler 공식에 의하여 0.013으로 산정하였다. 자세한 실험 조건은 표 1과 같다.

표 1. 실험조건

Case	유량 (m ³ /s)	보 설치각도	보의 길이 (L)(m)	수로경사	모래입경 (mm)	조도계수
Run-1	0.0045	0°	0.60	1/200	0.8	0.013
Run-2	0.0045	15°	0.62	1/200	0.8	0.013
Run-3	0.0045	30°	0.69	1/200	0.8	0.013
Run-4	0.0045	45°	0.84	1/200	0.8	0.013

4. 실험결과

4.1 흐름특성분석

보 상류에서는 유속이 감소하고 보를 월류할 때는 한계류를 형성하였다. 보의 설치 각도가 증가함에 따라 경사형 보의 유효길이는 감소하였다. 이는 보의 경사각이 클수록 측방향으로 유선이 굴절되는 각도가 증가하며, 경사형 보와 수층부 사이에 회전류가 발생하는 구역이 증가하기 때문이다. 보의 길이 대 수로 폭의 비(L/B)로 정의되는 무차원 수로폭이 증가할수록 무차원 유효길이(Le/L)는 감소한다. 이는 보의 설치각도가 증가할수록 보의 유효길이는 감소하며, 보 직하류에서 발생하는 와류의 크기가 증가하는 것을 의미한다 (그림 3).

표 2. 흐름특성 분석 결과

Case	실험조건			평균유속 (보/상류) (m/s)	평균수심 (보/상류) (cm)	Fr (보/상류)	유효길이 (Le)(m)
	보의 설치각도	유량 (m ³ /s)	L/B				
Run-1	0°	0.0045	1.00	0.41 / 0.21	1.48 / 4.82	1.03 / 0.31	0.60
Run-2	15°	0.0045	1.03	0.42 / 0.25	1.51 / 4.81	1.08 / 0.37	0.37
Run-3	30°	0.0045	1.15	0.43 / 0.25	1.49 / 4.79	1.10 / 0.37	0.29
Run-4	45°	0.0045	1.40	0.42 / 0.25	1.50 / 4.77	1.09 / 0.36	0.18

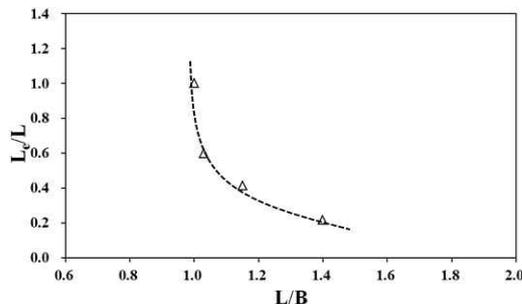


그림 3. 무차원 보의 길이에 대한 무차원 유효길이의 변화

4.2 보 상류와 하류에서의 지형변화

그림 4는 각 실험 조건별 시간에 따른 하도의 변화를 보여주고 있다. 보 상류에서는 보에 의하여 형성된

배수의 영향이 끝나는 지점에서 delta가 형성된다. 시간이 증가함에 따라 일정한 형상을 유지한 상태로, 하류로 이동한다 (그림 4). 보 하류에서는 흐름이 집중되어 보 직하류 하상은 세굴되었다. 보의 설치각도가 0°인 Run-1의 보 하류 하상은 불규칙하게 변화되었다(그림 4(a)). 그러나 보의 설치각도가 커지기 시작하는 Run-2에서부터는 흐름이 좌안에 집중되면서, 보 직하류 좌안에서 수층부가 형성되고 하상이 저하되었다. 보의 우안에서는 하상고가 상승하였으며, 교호사주가 형성되었다(그림 4(b)). 교호사주는 보 직하류에 고정되었으며, 이동성이 없이 정지된 강제사주이다. 시간이 증가하면서 교호사주의 길이는 증가하고 480분이 지난 후에 평형상태에 도달하였다. Run-3은 Run-2와 비슷한 경향을 보여주고 있다. 그러나 Run-4에서는 보 직하류에서 형성된 사주의 길이는 감소하고 수층부에서는 깊게 세굴되었으며, 보의 설치 각도가 커질수록 수층부가 집중되면서 깊게 세굴되고, 세굴범위는 좁게 나타났다.

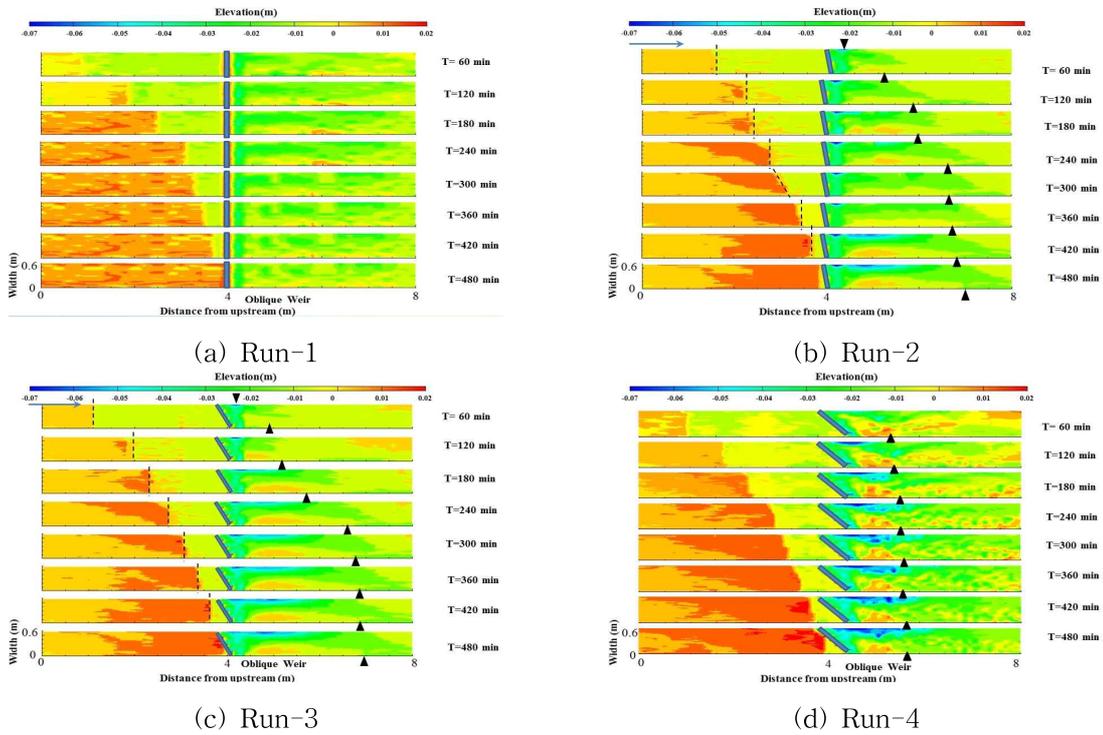


그림 4. 각 실험 조건별 시간에 따른 하도변화

무차원 하상고(d)가 증가할수록 유속과 delta의 이동속도의 비인 무차원 속도는 감소하며 (그림 5), 이는 보에 접근할수록 수심은 깊어지고 delta의 이동속도는 감소하였으며, delta 높이는 증가하는 것을 의미한다. 그림 6은 각 실험 조건별로 무차원 보의 길이에 대한 무차원 사주의 길이 비를 보여주고 있다. 경사형 보의 설치 각도가 증가하는 것을 의미하는 무차원 보의 길이가 증가함에 따라, 무차원 사주의 파장이 감소하였다. 이것은 무차원 보의 길이가 증가함에 따라 보에 의하여 굴절되는 흐름의 각이 크므로, 흐름이 집중되어 사주의 길이가 짧아지기 때문이다. 무차원 사주의 파고는 사주의 파고(HB)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. 무차원 보의 길이가 증가함에 따라 보에 의하여 굴절되는 흐름의 각이 크므로, 흐름이 집중되어 하상이 깊게 세굴되고 무차원 사주의 파고가 증가하였다(그림 7).

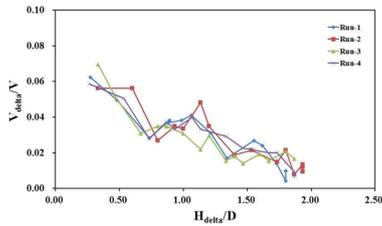


그림 5. 무차원 Delta의 이동속도(V_{δ}/V)와 무차원높이(H_{δ}/D)의 관계

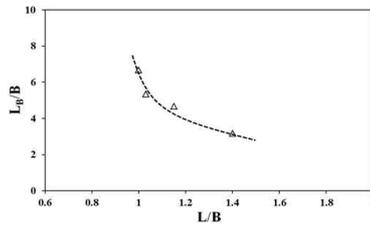


그림 6. 각 실험조건별 무차원 보의 길이(L/B)에 대한 무차원 사주의 파장의 비(L_p/B)

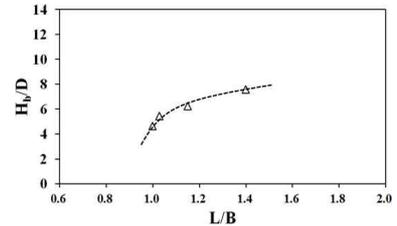


그림 7. 각 실험조건별 무차원 보의 길이(L/B)에 대한 무차원 파고(L_p/D)의 변화

5. 결론

본 연구에서는 실내실험을 통하여 보의 경사변화에 따른 흐름특성과 보 상류에서 유사의 퇴적과정을 정량적으로 분석하고, 보 하류에서 세굴 및 지형변화 과정을 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 보의 설치각도가 커질수록 보에 의한 굴절되는 유선의 각도가 증가하며, 하류에서 수층부가 형성되고 사수역의 크기가 증가한다. 즉, 보의 길이 대 수로 폭의 비(L/B)로 정의되는 무차원 수로폭이 증가할수록 무차원 유효길이(L_e/L)는 감소한다.
- 2) 보 상류에서는 보에 의하여 형성된 배수의 영향이 끝나는 지점에서 delta가 형성되며, 보 하류에서는 흐름이 집중되어 보 직하류 하상은 세굴되고 반대쪽에서는 이동성이 없는 교호사주가 형성되었다. 또한 중부에서는 깊게 세굴되었으며, 보의 설치 각도가 커질수록 수층부가 집중되면서 깊게 세굴되고, 세굴범위는 좁게 나타났다.
- 3) 무차원 하상고(H_{δ}/d)가 증가할수록 유속과 delta의 이동속도의 비인 무차원 속도는 감소하며, 무차원 보의 길이가 증가함에 따라, 무차원 사주의 파장이 감소하였다. 이것은 무차원 보의 길이가 증가함에 따라 보에 의하여 굴절되는 흐름의 각이 크므로, 흐름이 집중되어 사주의 길이가 짧아지기 때문이다.
- 4) 무차원 보의 길이가 증가함에 따라 보에 의하여 굴절되는 흐름의 각이 크므로, 흐름이 집중되어 하상이 깊게 세굴되고 무차원 사주의 파고가 증가하였다.

향후에 보에 의한 하도의 교란과정을 파악하기 위하여 보 상하류에서 3차원 흐름 구조와 하도의 지형변화에 하상도의 입도분급 과정을 정량적으로 분석해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원 (12기술혁신C02)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 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
2. Kabiri-Samani A.R. Ansari A. and Borghei S.M. (2010), Hydraulic behaviour of flow over an oblique weir, Journal of Hydraulic Research, 48(5), pp. 669-673
3. Lauchlan, C. (2004). Experimental investigation of bed-load and suspended-load transport over weirs. J. Hydraulic Res. 42(5), 549 - 555.