

낙차공에 의한 하도의 평면변화 수치모의 연구

Numerical simulation of morphological change of the rivers with vertical drop down

김기정*, 장창래**, 김창성***

Gi Jung Kim, Chang-Lae Jang, Chang Sung Kim

요 지

본 연구에서는 수심적분 2차원 수치모형인 Nays2D를 이용하여 수공구조물(낙차공)이 사주의 거동과 하천의 평면변화에 미치는 영향을 분석하였다. 길이 20m, 저수로 폭이 0.48m, 좌우안 홍수터 폭이 0.26m인 복단면 하도에서 낙차공에 의한 사주의 변화를 파악하기 위한 실험결과와 수치모의 결과를 비교하여 그 적용성을 검증하였다. 최심 하상고의 변화와 교호사주의 발생을 모의하였으며, 실험결과와 잘 일치하였다. 하폭이 상대적으로 넓고 수심이 얇은 복렬사주가 발생하는 조건에서 사주의 거동을 파악하기 위한 수치실험을 수행하였으며, 상류에서 발생한 사주의 형상이 낙차공 하류의 하도변화에 영향을 미치는 것을 파악하였다. 낙차공 상류와 하류에서 교호사주가 발달하였으며, 낙차공 상류에서 발달한 사주의 형상을 반영하여 낙차공 하류에서 교호사주가 형성되었다. 사주의 파장은 낙차공 상류의 파장보다 낙차공 하류에서 짧고, 사주의 파고는 낙차공 하류에서 파고보다 상대적으로 높다. 또한 사주의 이동속도는 낙차공 상류보다 하류에서 빠른 특성을 보여주고 있으며, 낙차공에 의하여 흐름이 강하게 교란되면서 하류에서 사주가 형성되는 영향을 주기 때문에 판단된다.

핵심용어 : 사주, 낙차공, Nays2D, 하상변화, 흐름특성

1. 서론

낙차공(drop structures)은 급경사 하천에서 하상을 안정시키기 위해 하상을 수평으로 굴착하고 그 단면에 수직으로 구조물을 세운 것으로, 하상 유지공의 한 종류이며 국내에서는 보 다음으로 많이 건설된 하천횡단구조물이다(우효섭, 2001). 자연상태의 충적하천의 하상은 시간적으로 끊임없이 변하고 있으며 낙차구조물 등의 횡단구조물은 하천의 흐름변화를 야기하며 동시에 하상변동에 많은 영향을 미치게 된다. 하천에서 사주(bar)는 가장 중요한 하도의 특성 중의 하나이며, 충적하천에서 하도의 발달을 조절할 수 있는 기본적인 특성이다(장창래, 2012). 특히, 하상경사가 상대적으로 급하고 규모가 작은 중소하천에서 사주의 거동을 고려하여 낙차공에 의한 하도 변화를 정량적으로 분석하는 것이 필요하다. 그러나 보나 낙차공에 의하여 사주의 거동과 하도의 지형변화에 대한 정량적인 연구가 부족하다. 여흥구 등(2008)은 계단형 낙차공에서 하류 흐름변화에 대한 실험연구를 통하여 하류 수위 변화에 따라 계단형 낙차공의 하류부에서 흐름특성에 대하여 연구하였다. 박무중 등(2013)은 경사형 낙차공의 만곡부 흐름특성분석에서 경사형 낙차공의 흐름특성을 수리모형실험을 통해 파악하고 1차원 수치모의 결과와 비교하였다. 장창래(2013)는 하안침식을 고려한 복렬사주의 동적 거동 특성을 실내실험과 2중 Fourier해석을 통하여 분석하였으며, 하폭 대수심비가 증가할수록 사주의 이동속도가 감소하고, 사주의 파장이 증가함을 연구하였다. 그러나

* 정회원 · 한국교통대학교 토목공학과 석사과정 · E-mail : rlaejdri@naver.com

** 정회원 · 한국교통대학교 토목공학과 부교수 · E-mail : cljang@ut.ac.kr

*** 정회원 · 한국교통대학교 선임연구원 · E-mail : cscskim@nate.com

이들 연구는 낙차공에 의한 하류부의 국부세굴이나 흐름특성만을 고려하여 하도의 하상변화 과정을 파악하는데 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 2차원 수치모형을 적용하여, 낙차공에 의한 사주의 거동과 하도의 변화 과정을 파악하였다. 2차원 수치모의를 위하여 Nays2D 모형을 적용하였고, 기존의 연구결과(Ikeda and McEwan, 2009)와의 비교를 통해 수치모형의 적용성을 검토하였으며, 수치모의 실험을 통하여 낙차공의 상류와 하류에서의 사주의 거동과 그 특성을 분석하였다.

2. 수치모형의 특성

본 연구에서는 Nays2D 모형을 적용하였으며, 일반좌표계에서 2차원 천수방정식을 적용하였으며, Navier-Stokes 방정식을 시간 적분한 Reynolds 방정식을 다시 수심방향으로 적분하였으며, 이에 대한 연속방정식과 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{hu^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{hu^\eta}{J} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u^\xi}{\partial t} + u^\xi \frac{\partial u^\xi}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial u^\xi}{\partial \eta} + \alpha_1 u^\xi u^\xi + \alpha_2 u^\xi u^\eta + \alpha_3 u^\eta u^\eta = \quad (2)$$

$$-g \left[(\xi_x^2 + \xi_y^2) \frac{\partial H}{\partial \xi} + (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right]$$

$$- \left(C_f + \frac{1}{2} C_D a_s h \right) \frac{u^\xi}{hJ} \sqrt{(\eta_y u^\xi - \xi_y u^\eta)^2 + (-\eta_x u^\xi + \xi_x u^\eta)^2} + D^\xi$$

$$\frac{\partial u^\eta}{\partial t} + u^\xi \frac{\partial u^\eta}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} + \alpha_4 u^\xi u^\xi + \alpha_5 u^\xi u^\eta + \alpha_6 u^\eta u^\eta = \quad (3)$$

$$-g \left[(\eta_x \xi_x + \eta_y \xi_y) \frac{\partial H}{\partial \xi} + (\eta_x^2 + \eta_y^2) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right]$$

$$- \left(C_f + \frac{1}{2} C_D a_s h \right) \frac{u^\eta}{hJ} \sqrt{(\eta_y u^\xi - \xi_y u^\eta)^2 + (-\eta_x u^\xi + \xi_x u^\eta)^2} + D^\eta$$

여기서, h 는 수심을 나타내고, t 는 시간, u^ξ 는 ξ 방향의 유속, u^η 는 η 방향의 유속, J 는 Jacobian 계수이다. η 는 일반좌표계의 공간 좌표 성분, u^ξ 와 u^η 는 ξ 와 η 방향의 유속, H 는 수위(= $h + z_b$), z_b 는 하상고, C_d 는 하상마찰계수(= $gn/h^{1/3}$), n 은 Manning의 조도계수(= $\frac{d^{1/6}}{8.9\sqrt{g}}$), J 는 Jacobian 계수를 나타낸다(Jang and Shimizu, 2005). 하도의 변화를 모의하기 위해서는 유사량 계산이 필요하며, 유사의 연속방정식을 적용하여 하상고의 변화를 계산한다. 본 연구에서는 소류사량의 거동만 고려하였으며, Ashida and Michiue(1972)공식을 적용하였다.

$$q_b = 17\tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_*} \right) \sqrt{s_g g d^3} \quad (4)$$

여기서, q_b 는 소류사량(m^2/s)이고, τ_* 는 무차원 소류력, τ_{*c} 는 무차원 한계 소류력이며, s_g 는 수중에서 하상재료 비중(=1.65), g 는 중력가속도(m/s^2), d 는 하상토의 평균 입경(m)이다.

3. 수치모의 조건

교호사주가 발생할 조건을 찾기 위해 기존의 수치모의결과(Ikeda and McEwan, 2009)를 토대로 가상의 개수로를 만들었으며, 수로의 크기는 저수로폭(B) 0.48m, 길이(L) 20m, 수로의 경사(i)는 1/60 이다. 수리조건은 조도계수(n)는 0.01, 유량(Q)은 $0.002m^3/s$, 평균입경(d_m) 0.2mm의 균일사를 사용하였다. 이는 무차원 소류력(τ_*)이 0.412, $Bi^{0.2}/h$ 가 26.582이 계산되는 수리조건으로, Kuroki and Kishi(1984)가 제안한 영역구분에서 교호사주가 발생할 조건으로 설정하였다. 또한 낙차구조물은 실험수로내의 중앙(5.3m)지점에 위치하였고, 낙차는 1.3cm로 설치하였다. 수치모의를 위한 계산 격자망 구성에 있어 격자의 가로와 세로비가 1:1~1:10의 종횡비에서 안정적인 해를 찾을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 종횡비 1:4.7의 종횡비인 $30(J) \times 150(I)$ 의 계산 격자망을 구성하였다 (Fig. 1). 이류항을 계산하기 위하여 CIP(Cubic Interpolated Pseudoparticle)법을 적용하였으며, 확산에서는 중앙차분법을 적용하였다(Jang and Shimizu, 2005). 경계조건으로는 상류단의 흐름과 하류단의 흐름을 같게 설정해 주는 주기경계조건을 사용하였으며 총 모의시간은 2시간 30분, Δt 0.01초로 하였으며, 흐름이 안정화가 된 후 하상변동모의를 시작하기 위하여 60초 이후부터 하상변동모의를 수행하였다.

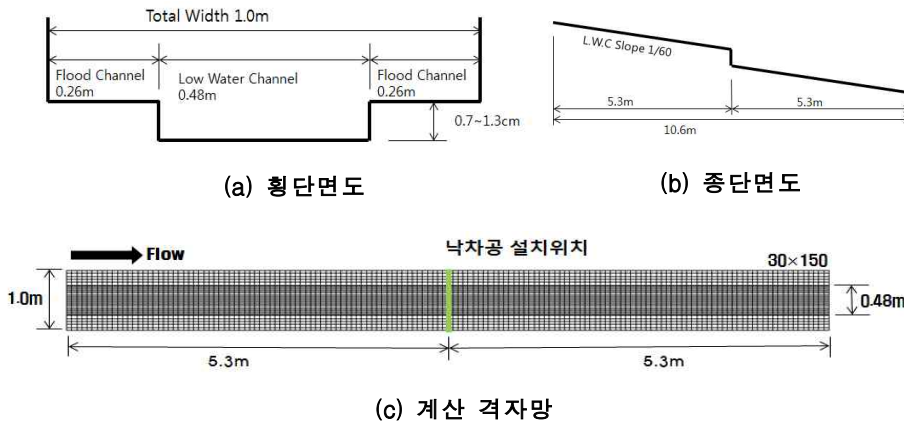


Fig. 1. 종횡단도와 계산 격자망

4. 수치모의 결과

본 연구에서 복단면 직선하도에서 낙차공에 의한 하도변화를 분석하기 위하여 Ikeda and McEwan(2009)의 실험결과와 본 연구의 수치모의 결과를 비교하였다(Fig 2 와 3). 하도의 평면변화에 대하여 분석한 결과 낙차공 상류와 하류에서 교호사주가 잘 발달하였으며 실험 결과와 수치모의 결과가 잘 일치하였다. 낙차공 하류에서 교호사주 파장의 길이는 낙차공 상류보다 길게 발달하였다. 실험결과는 낙차공 상류에서 교호사주의 반파장 길이는 2.0 m 이고, 수치모의 결과는 1.5 m 이고, 낙차공 하류에서 실험은 3.0 m이고, 수치모의는 3.2 m로 길게 모의되었으나 (Fig. 2), 낙차공에 의한 사주의 거동 특성을 잘 모의하고 있다.

Fig. 3은 종방향 하상고의 변화와 수위의 변화를 비교한 결과를 보여주고 있다. 저수로 우안에서 낙차공 직하류의 하상고는 일치하였으나, 3.5 m 지점에서 수치모의 결과는 실험결과보다 크게 모의하고 있다. 그러나 좌안과 하도의 중앙에서는 잘 일치하였다. 낙차공 직하류에서 수위는 실내실험보다 대체적으로 높게 모의 되었으며 이러한 원인은 2차원 수심적분 모형이 3차원 흐름구조를 모의하는데 한계가 있기 때문으로 판단된다(Fig. 3).

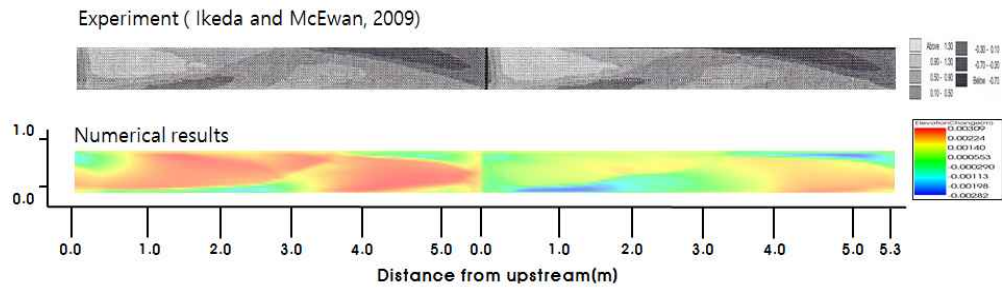


Fig. 2. 종방향 하상고의 변화 비교

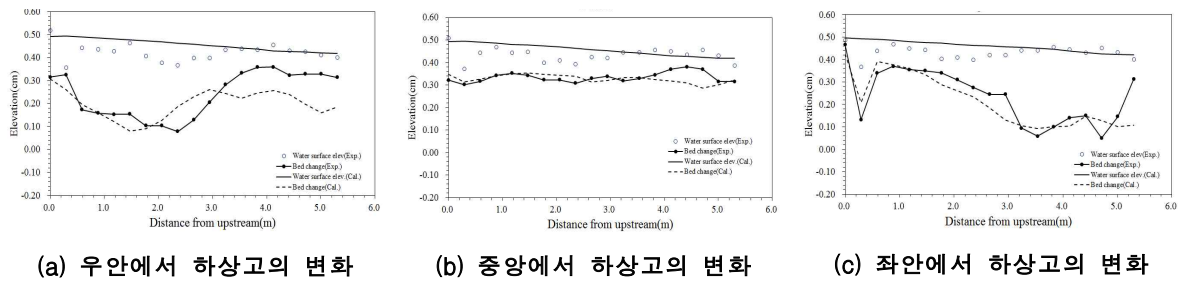


Fig. 3. 종방향 하상고의 변화 비교

Fig. 4는 낙차공 상류와 하류에서 교호사주의 시간적 변화 과정을 보여주고 있다. 초기에 낙차공 상류에는 퇴적이 발생하고 하류에서는 세굴이 발생하였다. 시간이 증가함에 따라, 낙차공 상류와 하류에서 복렬사주가 발달하며, 낙차공 하류에서 하상이 세굴되었다. 시간이 증가함에 따라, 교호사주로 발달하며, 사주의 파장은 증가하였다. 낙차공 직하류에서 세굴이 발생하며, 상류에서 발달한 사주의 형상을 반영하여 하류에서 교호사주가 형성되었다. 수리구조물(낙차공, 보) 하류의 지형 변화 혹은 하도의 교란은 상류에 발달한 지형에 의하여 크게 영향을 받는 특성을 보여주고 있다. Fig. 5는 낙차공을 기준으로 상류와 하류사이의 하도변화를 비교분석하기 위하여 시간에 따른 파장, 파고, 파속의 변화를 분석하였다. 사주의 파장은 낙차공 상류의 파장보다 낙차공 하류에서 짧게 나타났다 (Fig. 5(a)). 이러한 원은 낙차공에 의하여 흐름이 강하게 교란되면서 하류에서 사주가 형성되는 영향을 주기 때문으로 판단된다. 낙차공 상류에서 사주의 파고가 낙차공 하류에서 파고보다 상대적으로 큰 특성을 보여주고 있다 (Fig. 5(b)). 사주의 이동속도는 낙차공 상류보다 하류에서 빠른 특성을 보여주고 있다 (Fig. 5(c)).

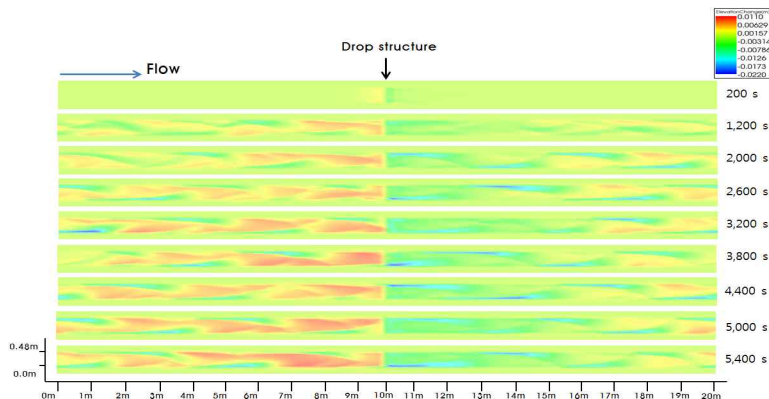
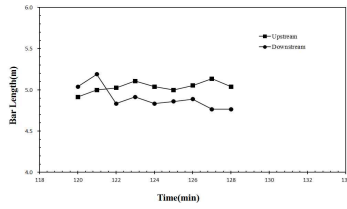
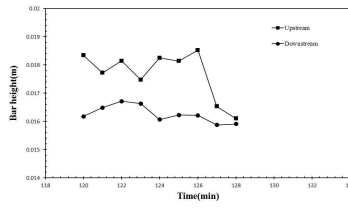


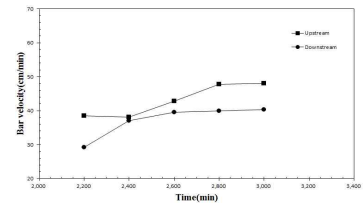
Fig. 4. 낙차공에 의한 하도의 변화와 사주의 거동



(a) 사주의 파장



(b) 사주의 파고



(c) 사주의 이동속도

Fig. 5. 시간에 따른 사주의 거동 특성

5. 결론

본 연구에서 낙차공이 있는 개수로 흐름내의 낙차공 상하류의 사주패턴 및 시간에 따른 사주의 거동 특성에 대해서 분석하였다. 먼저 복단면 하도에서 낙차공에 의한 사주의 변화를 파악하기 위한 기존의 실험결과와 수치모의 연구결과를 비교하였으며, 두 결과가 잘 일치하였다. 수치모의 결과 낙차공 상류와 하류에서 교호사주가 발달하였으며, 낙차공 상류에서 발달한 사주의 형상을 반영하여 낙차공 하류에서 교호사주가 형성되었다. 사주의 파장은 낙차공 상류의 파장보다 낙차공 하류에서 짧고, 사주의 파고는 낙차공 하류에서 파고보다 상대적으로 높다. 또한 사주의 이동속도는 낙차공 상류보다 하류에서 빠른 특성을 보여주고 있으며, 낙차공에 의하여 흐름이 강하게 교란되면서 하류에서 사주가 형성되는 영향을 주기 때문으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(12기술혁신 C02)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 박무중, 우재영, 이정호, 송영석(2013), "수리모형실험을 이용한 경사형 낙차공의 만곡부 흐름특성분석" 한국방재학회논문집, 한국방재학회, 제13권, 제3호, pp. 167-175.
2. 여홍구, 강준구, 최남정, 김성중(2008), "계단형 낙차공 하류 흐름변화에 대한 실험연구" 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, pp.1889-1893.
3. 우효섭(2001), 하천수리학, 청문각
4. 장창래(2012), 사주발생제어 및 저수로 안정화 기술개발 연구보고서, 국토해양부, 첨단기술 기반 하천운영 및 관리 선진화 연구단 기술보고서
5. 장창래(2013), "하안침식을 고려한 복렬사주의 동적 거동 특성 분석", 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제46권, 제1호, pp. 25-34.
6. Ashida, K. and Michiue, M.(1972), "Study on hydraulic resistance and bed-load transport rate in alluvial streams." Proc. JSCE, pp. 59-69 (in Japanese)
7. Ikeda, S. (1984). "Prediction of Alternate Bar Wavelength and Height." J. Hydraul. Eng., ASCE, 110(4), pp. 371-386.
8. Ikeda, S., and McEwan, I.K. (eds.)(2009) Flow and Sediment Transport in Compound Channels, IAHR Monograph Series, pp. 167-304.
9. Jang, C.-L., and Shimizu, Y.(2005) " Numerical simulation of relatively wide, shallow channels with erodible banks." J. Hydraul. Eng., , ASCE, 131(7),pp. 565-575.
10. Kuroki, M. and Kishi, T.(1984), "Regime criteria on bars and barraids in alluvial straight channels" proc.JSCE, 342, pp87-96 (in Japanese).