

식생의 성장과 소멸을 고려한 교호사주의 거동 수치모의

Numerical investigation of the behavior of alternate bars considering vegetation growth and removal

장창래*
Chang-Lae Jang

요 지

본 연구에서는 2차원 수치모형을 이용하여 하도식생의 성장과 소멸 고려한 교호사주의 거동을 분석하였다. 식생의 성장과 소멸은 식생의 밀도에 영향을 준다. 식생이 성장하면 식생밀도가 증가하고 식생이 소멸하면 식생의 밀도 감소한다. 식생이 성장하면서, 교호사주의 이동은 정지되고, 식생대에서 퇴적이 발생하며, 사주의 파고가 증가하였다. 식생의 성장률이 증가하면서 식생대에서 유사는 퇴적되어 사주의 면적은 증가하였으며, 식생이 성장과 사주의 변화과정은 일치하였다. 침두유출시간의 변화에 따른 사주의 변화와 식생성장률의 변화를 분석하였다. 침두유출 시간이 짧아서 침두홍수가 일찍 도달하는 조건에서 사주의 파장은 상대적으로 작고, 하상고의 변화가 작은 특성을 보여주었다. 침두유출 시간이 길어서 침두홍수가 늦게 도달하는 조건에서 사주의 파장은 길고, 유사의 퇴적 면적이 증가하였다.

핵심용어 : 부정류, 교호사주, 수치모의, 식생

1. 서론

하도의 식생은 흐름과 유사이송에 많은 영향을 주고 있으며, 하도의 지형변화에 중요한 역할을 하고 있다. 하도의 식생에 의하여 흐름의 저항은 증가하고 흐름의 방향이 변화되며 유속이 감소되며, 식생대에서 유사는 쉽게 포착되고 유사의 입경이 분급된다. 또한 하도의 식생은 항력과 흐름의 저항을 증가시키고 하상에 작용하는 전단응력을 감소시켜서 유사의 이동이 감소하며, 유사의 퇴적이 증가되어 사주가 증가한다.

하도의 식생이 지형변화에 미치는 영향은 물리적으로 매우 복잡하며, 식생의 밀도가 증가함에 따라 하안 침식과 저수로의 이동특성이 감소하고 하도의 안정성이 증가한다(Jang and Shimizu, 2007; Tal and Paola, 2010).

하도의 식생은 홍수의 변화와 상류에서 공급되는 유사량의 변화에 영향을 많이 받으며, 하도의 지형을 변화시키는데 중요한 역할을 한다. 댐에 의하여 유황이 변하고, 유사량이 차단되면 하도의 식생이 번성하고 저수로에서 하상이 저하되고 하상토가 굽어지며 하도의 역동성에 크게 떨어진다 (Jang and Shimizu, 2010). 그러나 상류에서 공급되는 유사량이 증가하면, 부분적으로 식생대가 파괴되어 하도의 형상이 변화되어 역동성이 증가 한다 (Murray and Paola, 2003). 이러한 식생이 번성한 하도에서 홍수의 소통을 원활히 하여 하안침식 및 침수를 예방하기 위하여 하도관리 측면에서 벌채 등을 하지만, 하천환경을 유지하려는 측면에서는 부정적인 면이 많이 있다. 그러나 홍수소통을 원활히 하고 하천환경을 유지하기 위한 하도의 식생 관리 기준이 아직 정립되어 있지 않으며, 이를 위해서는 하도의 식생에 의한 수리학적 특성과 하도의 지형 변화 관계를 명확하게 파악해야 한다. 따라서 본 연구에서는 2차원 수치모형인 Nays2D 모형을 이용하여 하도식생의 성장과 소멸 고려한 교호사주의 거동을 분석하였다.

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

2. 수치모형

2.1 흐름 및 하상변동

본 연구에서는 사행하천에서 평면 2차원 흐름 거동을 모의하기 위하여 흐름의 지배 방정식은 수심 적분된 2차원 연속 방정식 및 운동량 방정식을 이용하였다. 직교 좌표계에서는 하천의 경계가 복잡한 하천을 모의하는데 한계가 있으므로(Jang and Shimizu, 2005), 이들 식을 일반 좌표계에서 좌표변환을 하여 표시하면 다음과 같다.

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

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u^\xi}{\partial t} + u^\xi \frac{\partial u^\xi}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial u^\xi}{\partial \eta} + \alpha_1 u^\xi u^\xi + \alpha_2 u^\xi u^\eta + \alpha_3 u^\eta u^\eta = \\ & -g \left[(\xi_x^2 + \xi_y^2) \frac{\partial H}{\partial \xi} + (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \right] \frac{\partial H}{\partial \eta} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & - \frac{C_d u^\xi}{hJ} \sqrt{(\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y)^2 + (-\eta_x u^\xi + \xi_x u^\eta)^2} + D^\xi \\ & \frac{\partial u^\eta}{\partial t} + u^\xi \frac{\partial u^\eta}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} + \alpha_4 u^\xi u^\xi + \alpha_5 u^\xi u^\eta + \alpha_6 u^\eta u^\eta = \\ & -g \left[(\eta_x \xi_x + \eta_y \xi_y) \frac{\partial H}{\partial \xi} + (\xi_x^2 + \xi_y^2) \right] \frac{\partial H}{\partial \eta} \end{aligned} \quad (3)$$

$$- \frac{C_d u^\eta}{hJ} \sqrt{(\eta_x u^\xi - \xi_x u^\eta)^2 + (-\eta_x u^\xi + \xi_x u^\eta)^2} + D^\eta$$

여기서, ξ 및 η 는 일반 좌표계에서 공간 좌표 성분, ξ 는 수위(= z)이고, h 는 수심이며, z_b 는 기준면에서 측정된 하상고이다. C_d 는 하상의 마찰계수이며(= $\frac{g n^2}{h^{1/3}}$), g 는 중력가속도이고, n 은 Manning의 조도계수이며, Kishi 등(1973)이 제안한 식(= $\frac{d^{1/6}}{8.9 g}$)을 이용하였다. 여기서 ξ 는 하상토의 평균입경이다. J 는 Jacobian 이며, u^ξ 및 u^η 는 ξ 및 η 방향에서 유속의 성분이며, $u^\xi = \xi_x u + \xi_y v$ 및 $u^\eta = \eta_x u + \eta_y v$ 로 정의된다. 계수 $\alpha_1 \sim \alpha_6$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\alpha_1 = \xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2}, \quad \alpha_2 = 2 \left(\xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi \partial \eta} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi \partial \eta} \right), \quad \alpha_3 = \xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} \quad (4a)$$

$$\alpha_4 = \eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2}, \quad \alpha_5 = 2 \left(\eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi \partial \eta} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi \partial \eta} \right), \quad \alpha_6 = \eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} \quad (4b)$$

식(2)와 식(3)에서 운동량방정식에서 확산항 D^ξ 와 D^η 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$D^\xi = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(v_t \xi_x^2 \frac{\partial u^\xi}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(v_t \eta_x^2 \frac{\partial u^\xi}{\partial \eta} \right), \quad D^\eta = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(v_t \xi_x^2 \frac{\partial u^\eta}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(v_t \eta_x^2 \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} \right) \quad (5)$$

전단력을 선형 분포로 가정하면, 수심 평균 와(난류)점성 계수, v_t , 는 다음과 같다.

$$v_t = \frac{\kappa}{6} u_* h \quad (6)$$

여기서, κ 는 von Karman 상수 (=0.4), u_* 는 전단속도(= $n \sqrt{g(u^2 + v^2)} / h^{1/6}$)이다.

일반 좌표계에서 2차원 유사의 연속 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left[\frac{\partial q_b^\xi}{\partial \xi} + \frac{\partial \left(\frac{q_b^\eta}{J} \right)}{\partial \eta} \right] = 0 \quad (7)$$

여기서, z_b 는 하상고, λ 는 하상재료의 공극률, ξ 및 q_b^ξ 는 ξ 및 η 방향에서 단위 폭당 소류수량이다. 하상에서 소류수량은 Ashida 등 (1972)의 공식으로 계산하였으며, 자세한 내용은 Jang and Shimizu(2005)에 나타나 있다.

2.2 식생성장모형

본 연구에 적용한 수치모형은 흐름의 계산을 평면 2차원, 부정류, 비압축성으로 하고, 운동방정식에는 식생항을 고려하였다. 수치해석 기법으로는 엇갈린 격자(staggerd grid) 상에서 이류항에는 CIP(Cubic Interpolated Pseudoparticle)법을 적용하였으며, 확산항에는 중앙차분법을 적용하였다. 경계조건으로는 상류와 하류의 흐름조건을 같게 하는 주기경계조건(Periodic boundary conditions)을 사용하였다. 측벽에서는 측벽에 수직으로 유속이 없는 것으로 가정하였으며, 흐름 방향으로는 활동(slip) 조건으로 가정하였다.

실제 하천에서 식생의 성장과 소멸을 고려하여 모형화 하는 것은 어려움 있다. 본 연구에서는 식생의 성장과 소멸을 고려하기 위해서 식생의 밀도에 성장을 고려한 성장률 함수 $r(t)$ 을 고려하였다 (Uchida et al., 2015). 식생의 밀도 (λ_0)는 다음과 같다 (Jang and Shimizu, 2007).

$$\lambda_0 = \frac{ND}{lw} \quad (8)$$

식생의 성장률을 고려한 식생밀도(λ)는 다음과 같다.

$$\lambda = \lambda_0 \times Gr(t) \quad (9)$$

여기서, N : 식생의 수, D : 식생의 직경, lw : 식생이 성장하고 있는 영역의 면적이다.

2.3 수치모의 조건

식생의 성장과 소멸을 고려한 교호사주의 거동을 수치모의를 하기 위하여, 유량은 $0.035 \text{ m}^3/s$ 에서 $0.015 \text{ m}^3/s$ 로 변화도록 설정하였으며, 침투홍수가 발생하는 시간은 표 1과 그림 1에 자세히 나타냈다. 수치모의를 위한 수리학적 조건은 표 1과 같다. 식생에 의한 항력을 모의하기 위하여 항력계수(C)는 1.0으로 설정하였다. 식생을 성장률을 고려하지 않은 식생밀도 (λ_0)는 2.0 m^{-1} 으로 설정하였다. 하상토는 균일사로 가정하였으며, 평균입경(d)은 0.55 mm 로 설정하였다. Manning의 조도계수는 하상토의 입경 크기를 고려하여 0.015로 설정하였다. 식생의 발아는 43,200초로 설정하였으며, 86,400 초로 각각 설정하였다. 최대 뿌리 깊이는 5 cm 로 설정하였다.

표 1. 수치모의를 위한 수리학적 조건

Case	Discharge (/s)	Time of Peak (sec)	Flood cycle (sec)	Veg. density (m^{-1})
Run-1	0.0035 ~ 0.015	10,000	30,000	20
Run-2	0.0035 ~ 0.015	15,000	30,000	20
Run-3	0.0035 ~ 0.015	20,000	30,000	20

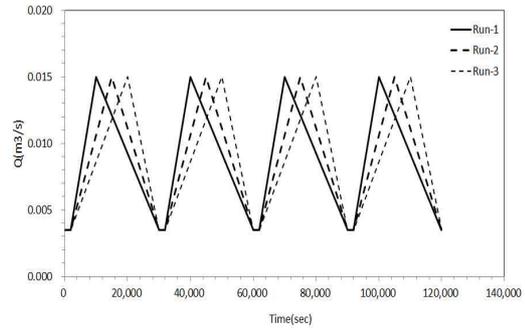
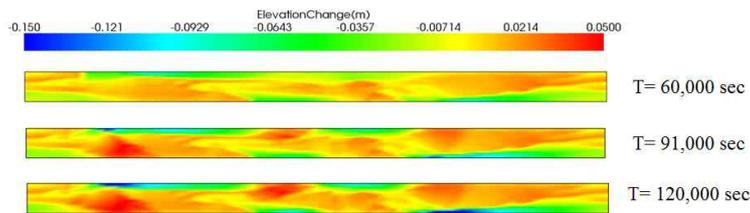


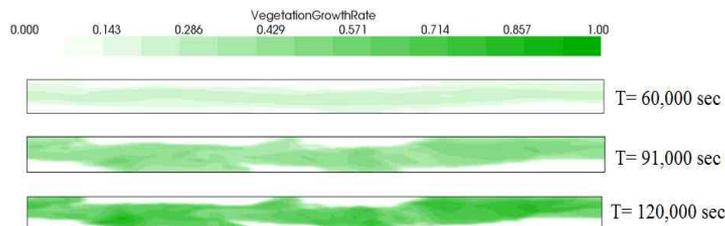
그림 1. 유량곡선

3. 수치모의 결과

식생의 성장과 소멸을 고려한 수치모형의 적용성을 검토하기 위하여, Run-2의 수리학적 조건에 대한 교호사주의 변화 과정을 분석하였다. 초기에 교호사주가 발달하고, 흐름의 방향으로 사주가 이동하였다. 저 유량일 때, 사주가 발생하기 시작하였다. 유량이 증가하면서 사주의 파장은 증가하고 하류로 빠르게 이동하였다. 식생이 성장하면서, 교호사주의 이동은 정지되고, 식생대에서 퇴적이 발생하며, 사주의 파고가 증가하였다 (그림 2(a)). 식생이 없는 구간에서는 흐름이 집중되어 하상세굴 되었다. 또한 식생이 성장하면서 사주가 분열되어 교호사주의 형상이 불규칙하였다 (그림 2(a)). 시간이 증가하면서 사주에서 식생은 빠르게 성장하였다(그림 2(b)). 식생의 성장률이 증가하면서 식생대에서 유사는 퇴적되어 사주의 면적은 증가하였으며, 식생이 성장과 사주의 변화과정은 일치하였다.



(a) 각 시간별 교호사주의 변화



(b) 각 시간별 교호사주의 변화

그림 2. 각 시간별 교호사주와 식생성장률의 변화

침투유출시간의 변화에 따른 사주의 변화와 식생성장률의 변화를 분석하였다. 침투유출 시간이 짧아서 침투홍수가 일찍 도달하는 조건 (Run-1)과 침투유출 시간이 길어서 침투홍수가 늦게 도달하는 조건(Run-3)에 대한 교호사주의 형상은 다른 특성을 보여주고 있다. Run-1에서 사주의 파장은 상대적으로 작고, 하상

고 변화가 작은 특성을 보여준다. 그러나 Run-3에서 사주의 파장은 길고, 유사의 퇴적 면적이 증가하였다(그림 3(c)). 식생의 성장률과 식생면적은 Run-1보다 Run-3에서 증가하며, 교호사주의 변화 특성이 일치하는 특성을 보여주었다.

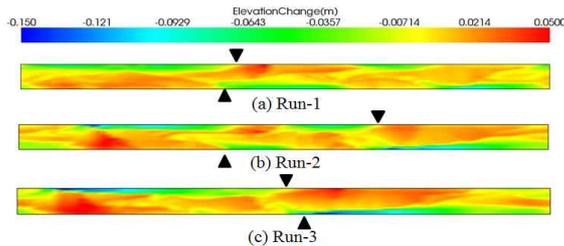


그림 3. 침투유출 시간의 변화에 따른 교호사주 변화

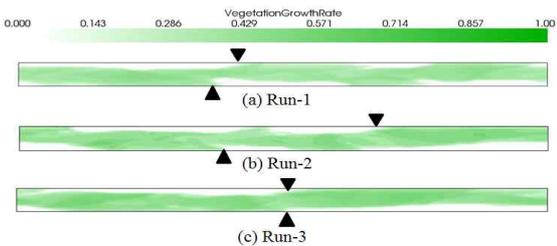


그림 4. 침투유출 시간의 변화에 따른 식생성장률 변화

4. 결과

식생의 성장과 소멸을 고려한 수치모형의 적용성을 검토하기 위하여 교호사주의 변화 과정을 분석하였다. 유량이 증가하면서 사주의 파장은 증가하고 하류로 빠르게 이동하였다. 식생이 성장하면서, 교호사주의 이동은 정지되고, 식생대에서 퇴적이 발생하며, 사주의 파고가 증가하였다. 식생의 성장률이 증가하면서 식생대에서 유사는 퇴적되어 사주의 면적은 증가하였으며, 식생이 성장과 사주의 변화과정은 일치하였다.

침투유출시간의 변화에 따른 사주의 변화와 식생성장률의 변화를 분석하였다. 침투유출 시간이 짧아서 침투홍수가 일찍 도달하는 조건에서 사주의 파장은 상대적으로 작고, 하상고의 변화가 작은 특성을 보여주었다. 침투유출 시간이 길어서 침투홍수가 늦게 도달하는 조건에서 사주의 파장은 길고, 유사의 퇴적 면적이 증가하였다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. Jang, C.-L., and Shimizu, Y. (2005). "Numerical simulation of Relatively Wide, Shallow Channels with Erodible Banks." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 131, No. 7, pp. 565-575.
2. Jang, C.-L., and Shimizu, Y. (2007). "Vegetation effects on the morphological behavior of alluvial channels", *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 45, No 6, pp. 763-772.
3. Tal, M., and Paola, C.(2010). "Effects of vegetation on channel morphodynamics: results and insights from laboratory experiments." *Earth Surf. Process. Landforms*. Vol. 35, pp. 1014-1028. DOI:10.1002/esp.1908
4. Murray, A.B., and Paola, C. (2003). "Modelling the effect of vegetation on channel pattern in bedload rivers." *Earth Surf. Process. Landforms*. Vol. 28, pp. 131-143.
5. Uchida, T., Kimura, I. Kawamura, S., and Shimizu, Y. (2015). "Numerical studies on bed variations of open channels considering vegetation growth and removal." *JSCE*, Vol. 71 No. 4, pp. I_1147-I_1152.