유입유사량 변화에 의한 망상하천의 지형변화 수치모의 분석

Numerical simulation of channel changes of braided river with sediment supply changes

장창래*

Chang-Lae Jang

요 지

유입유사량의 변화에 의한 하도의 지형변화를 파악하는 것은 하천을 복원하거나 유지하는데 중요하다. 본 연구에는 2차원 수치모형을 이용하여 상류에서 유입되는 유사량의 변화에 의하여 망상하천의 저수로 변화와 유사의 분급 특성을 분석하였다. 망상하천의 변화를 파악하기 위하여 하폭은 2.8 m이고, 수로 길이는 50 m로 설정하였다. 하상경사는 0.0125, 유량은 $0.014 m^3/\sec$로 설정하였다. 상류에서 공급되는 유사량은 평형상태의 유사량에 대하여 50%, 70%, 90%, 100%로 감소시켰다. 상류에서 공급되는 유사량이 감소할수록, 하상고는 감소하고 하상토 입경은 증가하였다. 또한 하도 단면에 대한 저수로의 수를 나타내는 망상하천 지수(Braiding Index)는 감소하였다. 이것은 하도의 저수로 수가 감소하는 것을 나타낸다. 유입 유사량이 감소할수록, 하도의 기복도가 감소하며, 이것은 하도의 역동성이 감소하는 것을 의미한다.

핵심용어 : 유입유사량, 망상하천, 수치모의, 망상하천 지수, 기복도

1. 서론

유입유사량의 변화에 의한 하도의 지형변화를 파악하는 것은 하천을 복원하거나 유지하는데 중요하다. 하상토의 입도분포가 넓은 혼합사로 구성된 자갈하천에서 하도의 변화에 따른 하상토의 입도변화 과정은 복잡하다. 유역에서 토지이용의 변화, 산사태 등 자연재해, 홍수 등의 교란에 의하여 유역에서 유입되는 유사량이 변하게 되며, 이로 인하여 유사이송량의 변화, 하상고의 변화, 사주의 변화, 하도 지형의 변화, 하상토의 입도분포 변화 등을 일으키며, 생태계의 서식처 형성 등에도 영향을 주게 된다(Podolak and Wilcock, 2013). 상류에서 유입되는 유사량이 감소하게 되면, 하상이 저하되고 하상토 입경이 굵어지게 되며, 하상의 기복도가 감소하게 된다(Cui et al., 2003).하천으로 유입되는 유사량이 증가하게 되면, 하상고가 상승하고, 하상토의 입경이 감소하게 되며, 하상에서 형성된 여울 등을 되채우게 된다. 특히, 망상하천은 저수로에 많은 하천이 형성되어 있으며, 저수로의 합류와 분류, 저수로의 이동 등이 지속적으로 발생하다. 이와 같이 저수로에 하천변화가 발생한다. 이와 같이 변화가 다양하게 발생하는 하천에서 유입유사량의 변화에 대한 하도의 변화 과정을 파악하는 것은 하천을 관리하거나 복원하는데 중요하다. 따라서 본 연구에서는 2차원 수치모형은 Nay2DH를 이용하여, 상류에서 유입되는 유사량의 변화에 의하여 하도의 변화과정을 파악하였다.

2. 수치모형의 특징

본 모형은 평면 2차원 흐름 거동을 모의하기 위하여 흐름의 지배 방정식은 수심 적분된 2차원 연속 방정식과 운동량 방정식을 이용하였다. 직교좌표계에서 경계적합좌표계로 좌표변환한 지배방정식은 다음과 같다.

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

연속방정식

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

운동량방정식

$$\frac{\partial u^{\xi}}{\partial t}+u^{\xi}\frac{\partial u^{\xi}}{\partial \xi}+u^{\eta}\frac{\partial u^{\xi}}{\partial \eta}+\alpha_1 u^{\xi}u^{\xi}+\alpha_2 u^{\xi}u^{\eta}+\alpha_3 u^{\eta}u^{\eta}=$$
$$-g\left[\left(\xi_x^2+\xi_y^2\right)\frac{\partial H}{\partial \xi}+\left(\xi_x\eta_x+\xi_y\eta_y\right)\frac{\partial H}{\partial \eta}\right]$$
$$-\left(C_f+\frac{1}{2}C_D a_s h\right)\frac{u^{\xi}}{hJ}\sqrt{\left(\eta_y u^{\xi}-\xi_y u^{\eta}\right)^2+\left(-\eta_x u^{\xi}+\xi_x u^{\eta}\right)^2}+D^{\xi} \tag{2}$$

$$\frac{\partial u^{\eta}}{\partial t}+u^{\xi}\frac{\partial u^{\eta}}{\partial \xi}+u^{\eta}\frac{\partial u^{\eta}}{\partial \eta}+\alpha_4 u^{\xi}u^{\xi}+\alpha_5 u^{\xi}u^{\eta}+\alpha_6 u^{\eta}u^{\eta}=$$
$$-g\left[\left(\eta_x\xi_x+\eta_y\xi_y\right)\frac{\partial H}{\partial \xi}+\left(\eta_x^2+\eta_y^2\right)\frac{\partial H}{\partial \eta}\right]$$
$$-\left(C_f+\frac{1}{2}C_D a_s h\right)\frac{u^{\eta}}{hJ}\sqrt{\left(\eta_y u^{\xi}-\xi_y u^{\eta}\right)^2+\left(-\eta_x u^{\xi}+\xi_x u^{\eta}\right)^2}+D^{\eta} \tag{3}$$

여기서, ξ와 η는 일반좌표계의 공간좌표 성분이다. u^{ξ}와 u^{η}는 ξ, η 방향의 유속(m/s)이며, J는 Jacobian 이다. H는 수위($=z+h$, m)이고, z_b는 하상고(m)이다. a_s는 단위체적당 식생에 의한 차단되는 면적이며, C_D는 식생에 의한 항력 계수이다. C_f는 하상 전단계수이고, n은 Manning의 조도계수이다. 여기서 각 항의 매개변수는 다음과 같다.

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

$$\alpha_4=\eta_x\frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2}+\eta_y\frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2},\quad \alpha_5=2\left(\eta_x\frac{\partial^2 x}{\partial \xi \partial \eta}+\eta_y\frac{\partial^2 y}{\partial \xi \partial \eta}\right),\quad \alpha_6=\eta_x\frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2}+\eta_y\frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} \tag{5}$$

확산항은 다음과 같다.

$$D^{\xi}\simeq\frac{\partial}{\partial \xi}\left(\nu_t\,\xi_r^2\frac{\partial u^{\xi}}{\partial \xi}\right)+\frac{\partial}{\partial \eta}\left(\nu_t\,\eta_r^2\frac{\partial u^{\xi}}{\partial \eta}\right) \tag{6}$$

$$D^{\eta}\simeq\frac{\partial}{\partial \xi}\left(\nu_t\xi_r^2\frac{\partial u^{\eta}}{\partial \xi}\right)+\frac{\partial}{\partial \eta}\left(\nu_t\eta_r^2\frac{\partial u^{\eta}}{\partial \eta}\right) \tag{7}$$

여기서, ξ_r과 η_r은 일반좌표계에서 격자의 크기와 국소적인 격자의 크기 비를 나타내며, 유사의 연속 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{z_b}{J}\right)+\frac{1}{1-\lambda}\left[\frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{q_b^{\xi}}{J}\right)+\frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{q_b^{\eta}}{J}\right)\right]=0 \tag{8}$$

여기서, z_b는 하상고(m)이며, λ는 하상재료의 공극률이다. q_b^{ξ}와 q_b^{η}는 ξ와 η방향에서 각각 단위 폭당 소류사량(m3/s/m)이다. 하상에서 소류사량은 Ashida and Michiue(1972)의 공식으로 계산하였다. 하천에서 주 흐름 방향에 대한 횡단 방향으로의 소류사 이송률을 계산하기 위하여, 원심력에 의한 이차류 및 횡방향 경사를 고려하였다. ξ와 η방향에서 유사량은 Watanabe et al.(2001)이 제시한 방법을 사용하였다. 자세한 내용은 Jang and Shimizu(2005)에 설명되어 있다.

2.2 수치모의 기법

수치해석 기법으로는 엇갈림 격자(staggered grid) 상에서 이류항에는 CIP(Cubic Interpolated

Pseudoparticle)법을 적용하였으며, 확산항에는 중앙차분법을 적용하였다. 경계조건으로는 상류에서 흐름을 부여하고, 하류에서 등류수심을 적용하였다. 측벽에서는 측벽에 수직으로 유속이 없는 것으로 가정하였으며, 흐름 방향으로는 활동(slip) 조건으로 가정하였다.

3. 수치모형의 적용 결과

유사공곱 변화에 의한 망상하천의 발달 과정과 유사의 분급 특성을 파악하기 위하여 수로 길이는 50 m이고 수로 폭은 2.8 m의 수로 조건에서 망상하천의 발달할 수 있는 표 1과 같은 수리학적 조건을 적용하였다. 수로 경사는 0.0125이고, 유량은 0.014 m^3/sec이었다.

표 1. 암거 단면규격

Run	Water discharge (m^3/sec)	Bed slope	Mean Dia. of bed material(mm)	Sediment input rate (% of the equilibrium trans port rate)
1	0.014	0.0125	1.48	50
2	0.014	0.0125	1.48	70
3	0.014	0.0125	1.48	90
4	0.014	0.0125	1.48	100
5	0.014	0.0125	1.48	110
6	0.014	0.0125	1.48	115

계산 시간은 3.5 시간이었으며, 계산 간격은 0.01 초였다. 흐름 방향으로 75개, 흐름의 횡방향으로 20개의 계산 격자를 생성하였다. 소류사 하상토 층 두께는 0.006 m, 퇴적 층 두께는 0.01 m, 이동 층 두께는 0.01 m이였으며, 최대 퇴적층 두께는 30이었다. 모형에 적용한 매개변수는 표 2와 같다.

표 2. 모형에 적한 매개변수

Parameter	Unit	Value
Channel length	M	50
Bed slope		0.0125
Mean diameter of sediment()	mm	1.48
Standard deviation of sediment		3.03
Sediment transport Eq.		Ashida and Michiue (1972)
Vector of bedload transport		Watanabe et al.(2001)
Time step(dt)	Seconds	0.01
Run time	Hours	3.5
Grid size	Dx x Dy	0.2 m x 0.1 m
Change of sediment supply		Yes
Thickness of bedload layer	m	0.006
Thickness of deposited layer	m	0.01
Thickness of movable bed layer	m	0.01
Maximum number of deposited layer		30

3.1 하도의 변화 과정

상류에서 공급되는 유사량이 평형상태에서 망상하천이 잘 발달되었다 (그림 1). 특히, 상류에서 저수 이동 활발하고 하류로 이동하며, 지속적으로 변화하고 있다 (Run-4). 그러나 유사량 공급이 증가하면서 상류에서는 하상고가 상승하고 퇴적이 되며, 저수로에 유사가 채워졌다. 저수로는 감소하며, 상류에서 20 m 지점까지 영향이 미쳤다. 즉, 저수로의 수는 감소하고 저수로 변화는 크게 발생하지 않았다. 중류와 하류에서는 저수로의 이동과 수에 큰 영향이 없었다 (Run-5와 6). 유입

유사량이 감소할수록, 상류에서는 깊게 세굴되었으며, 저수로의 수가 감소되었다 (Run-1과 3). 유입되는 유사량이 감소함에 따라, 상류에서 저수로의 단면은 매우 단조로우며, 하도 단면에 대한 저수로의 수를 나타내는 망상하천 지수(Braiding Index)는 감소하였다. 이것은 하도의 저수로 수가 감소하는 것을 나타낸다. 유입 유사량이 감소할수록, 하도단면이 불규칙하게 변하며, 하도의 기복도가 감소하였다. 이것은 하도의 역동성이 감소하는 것을 의미한다.

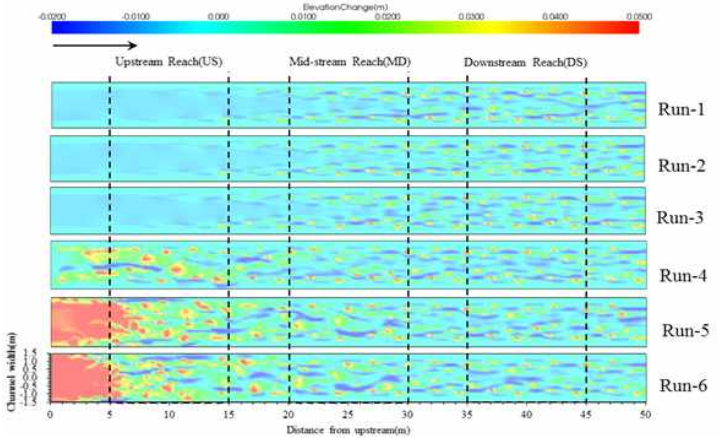

그림 1. 하도변화 과정

상류에서 공급되는 유사량이 평형상태에서 망상하천이 발달에 따른 하상토의 입도변화를 파악하였다 (그림 2). 하상고가 저하됨에 따라 하상토의 입경이 굵어지고 있다 (Run-4). 그러나 유사량 공급이 증가하면서 상류에서는 하상고가 상승하면서, 하상토의 입경이 가늘어지는 특성을 보여주었다. 상류에서 10 m 지점까지는 하상토 입경이 크게 감소하였다.중류와 하류에서는 저수로의 이동과 수에 큰 영향이 없었다 (Run-5와 6). 그러나 상류에서 유입되는 유사량이 감소할수록, 상류에서 하상고가 저하되면서, 하상토의 입경이 굵어지는 특성을 보여주고 있다 (Run-1과 3).

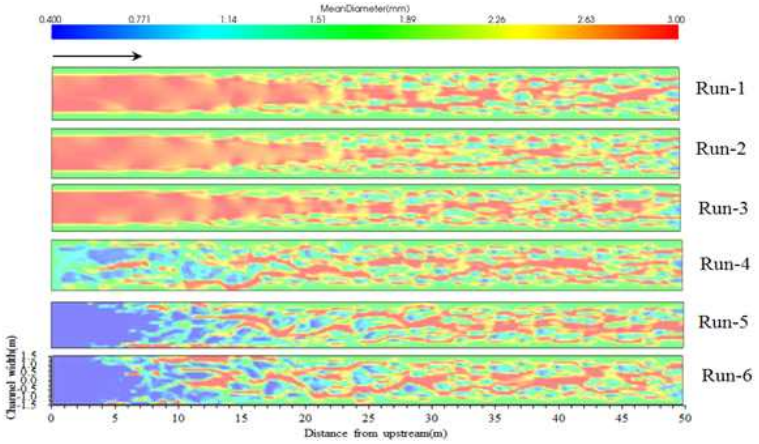

그림 2. 하상토의 입도변화

그림 3은 유입유사량의 변화에 따른 무차원 하상토의 입경 변화를 부여주고 있다. 유입 유사량이 감소함에 따라, 상류에서 무차원 하상토 입경의 크기는 크며, 하류로 갈수로 감소하는 특성을 보여주고 있다. 또한 30 m 지점에서는 매우 불규칙하게 변하며, 이것은 망상하천에서 저수로의 변화가 다양하게 나타나게 때문이다. 유입유사량이 증가하면서 Run-5와 6에서는 무차원 하상토의 입경이 작은 특성을 보여주고 있다.

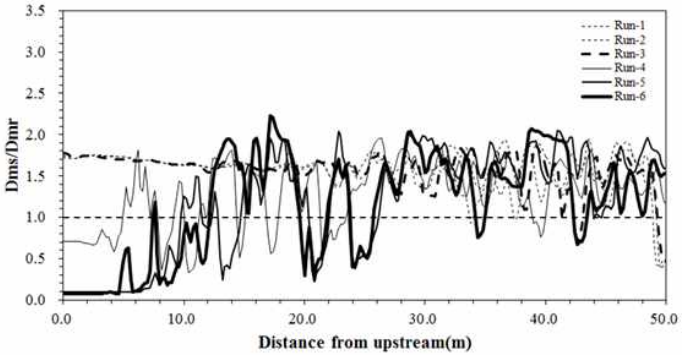

그림 3. 유사량 변화에 따른 무차원 하상토 입경의 변화

4. 결과

본 연구에서 2차원 수치모형을 이용하여 상류에서 유입되는 유사량의 변화에 의하여 망상하천의 저수로 변화와 유사의 분급 특성을 분석하였다. 상류에서 공급되는 유사량이 평형상태에서 망상하천이 잘 발달되었다. 상류에서 저수 이동 활발하고 하류로 이동하며, 지속적으로 변화하고 있다. 유사량 공급이 증가하면서 상류에서는 하상고가 상승하고 퇴적이 되며, 저수로에 유사가 채워졌다. 유입 유사량이 감소할수록, 상류에서는 깊게 세굴되었으며, 저수로의 수가 감소되었다. 유입되는 유사량이 감소함에 따라, 상류에서 저수로의 단면은 매우 단조로우며, 하도 단면에 대한 저수로의 수를 나타내는 망상하천 지수(Braiding Index)는 감소하였다. 이것은 하도의 저수로 수가 감소하는 것을 나타낸다. 유입 유사량이 감소할수록, 하도단면이 불규칙하게 변하며, 하도의 기복도가 감소하였다. 유입 유사량이 감소함에 따라, 상류에서 무차원 하상토 입경의 크기는 크며, 하류로 갈수로 감소하였다. 유입유사량이 증가하면서 무차원 하상토의 입경이 작았다.

감 사 의 글

본 연구는 한국연구재단의 기초연구사업(2012-0002697)과 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원 (12기술혁신C02)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Ashida, K., and Michiue, M. (1972), Study on hydraulic resistance and bed-load transport rate in alluvial streams. Proc. JSCE, 201, 59-69 (in Japanese).
2. Cui, Y., Parker, G., Lisle, T.E., Gott, J., Ball, M.H., Pizzuto, J.E., Allmendinger, N.E., and J.M. Reed (2003), Sediment pulses in mountain rivers: 1. Experiments, Water Resour. Res., 39(9), 1239, doi:10.1029/2002WR001803.
3. Jang, C.-L., and Y. Shimizu (2005), Numerical simulation of relatively wide, shallow channels with erodible banks, J. Hydraul. Eng., 131(7), 565-575.
4. Podolak, C.J.P., and A.R. Wilcock (2013), Experimental study of the response of a gravel streambed to increased sediment supply, Earth Surf. Process. Landforms, 37, 1748-1764 DOI: 10.1002/esp.3468
5. Watanabe, A., Fukuoka, S., Yasutake, Y., and H. Kawaguchi (2001), Groin arrangements made of natural willows for reducing bed deformation in a curved channel, Advances in River Engineering, 7, 285-290 (in Japanese).