

유사의 유입에 의한 충적 선상지(冲積 扇狀地) 형성에 관한 수치모의

Numerical Simulation of Alluvial Fan Formed by Sediment Inflow

장창래*

Chang-Lae Jang

요 지

충적 선상지(alluvial fan)는 자갈이나 유사가 과도하게 이송되어 부채모양으로 퇴적된 것으로서, 하류로 하폭이 증가하는 곳에서 형성된다. 충적 선상지는 유사가 이송하는 하천, 토석류, 그리고 박층류에 의해 형성된다. 토석류는 자갈에서부터 상대적으로 작은 진흙에 이르기까지 운반하는 밀도체이다. 충적하천의 흐름은 사행하천 및 망상하천에 이르는 흐름을 말하며, 박층류는 기본적으로 비하천 홍수류로서, 한 홍수사상에 대하여 선상지에서 부분분할로 형태로 흐른다.

본 연구에서는 충적 선상지에 대한 공학적인 문제를 검토하기 위한 예비연구로서 유입부에서 유사량의 유입조건에 따른 충적 선상지 델타의 형성 과정을 수치모형을 이용하여 파악하였다. 본 모형은 2차원 모형으로서, 이동경계좌표계를 사용하였고, 수치해석 기법으로는 CIP법이 이용되었으며, wet/dry를 고려하여, 유입 유사량의 변화에 따른 특성을 파악하였다. 초기에는 급격하게 선상지의 높이가 급격하게 증가하며, 유입 유사량의 증가에 따라 선상지의 높이가 평형상태를 유지하는 시간이 짧은 것을 보여주고 있다. 선상지의 면적은 유입 유사량이 적을 경우에는 평형상태가 지속적으로 유지되며, 완만한 증가 현상을 보여주었다. 유입 유사량이 증가할 경우에는 초기에 급격한 상승을 하다가 평형상태가 없이 지속적으로 상승하는 것을 보여주었다.

핵심용어 : 일반 좌표계, 충적 선상지 델타, 수치모형, 유사량

1. 서 론

충적 선상지(alluvial fan)는 자갈이나 유사가 과도하게 이송되어 부채모양으로 퇴적된 지형으로서, 하류로 하폭이 증가하는 곳에서 형성된다(Parker, 1999). 충적 선상지는 유사가 이송하는 하천, 토석류, 그리고 박층류에 의해 형성된다. 토석류는 자갈에서부터 상대적으로 작은 진흙에 이르기까지 운반하는 밀도체이다. 충적하천의 흐름은 사행하천 및 망상하천에 이르는 흐름을 말하며, 박층류는 기본적으로 비하천 홍수류로서, 한 홍수사상에 대하여 선상지에서 부분분할로 형태로 그 위를 흐른다. 충적 선상지는 시간에 따라 축방향으로 퇴적의 중심지로서, 항상 가장 낮은 지점을 찾아 그 면적을 증가시키면서, 불안정한 충적 선상지를 형성한다. 이 불안정성은 공학적으로 매우 중요한 의미를 가지고 있다. 홍수에 의한 선상지의 분할(avulsion)은 충적 선상지에서 본류에 설치된 도로, 교량 및 수리시설물을 파괴하고, 인구가 밀집된 충적 선상지가 이동하고 갈라져서 많은 인명과 재산피해를 야기시켜 왔다. 또한 이곳에서 제방을 축조해서 제방을 안정시키려는 노력을 하여도 오랜 시간이 경과한 후에는 제방이 본질적으로 하천의 상승을 변화시킬 수 없기 때문에, 하상은 계속해서 상승하고, 결국에는 제방을 붕괴시키게 된다.

* 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원(E-mail : cljang@kowaco.or.kr)

Paolar 등(1992)은 층적 선상지 유역에서 평균입경의 대규모 변화를 모의할 수 있는 수학적 모형을 개발하였다. 유량과 하천의 형태에 의해 제어되는 확산성 유사이송은 고전적인 선형 이송 확산법을 사용하여 모의하였으나, 상류의 용기율, 침식, 유사공급, 그리고 침하의 변화가 서로 자연스럽게 연결되지 않으며, 선상지에서 하천의 지형, 분할, 연결성을 예측할 수 없다. Parker 등(1998)은 비대칭 층적 선상지의 발달에 관한 이론적인 모형을 개발하여 광산의 침사지에 적용하였다. De Chant 등(1999)은 유사이송의 확산과 준정상상태의 흐름을 고려하여 층적 선상지를 모의할 수 있는 수학적 모형을 제시하였다. Sun 등(2002)은 흐름의 특성을 비교적 간단하게 모의하는 상대적으로 간단한 셀모형(cellular model)을 이용하여 선상지 델타의 형성과정을 수치적으로 모의하였다. 그러나 본 모형은 너무 간단하여 사주와 하천의 상호작용을 정확하게 모의할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 이의 단점을 극복하고 복잡한 흐름 특성 뿐만 아니라, 사주와 하천의 상호작용을 고려하여 층적 선상지를 모의할 수 있는 수치모형을 적용하여, 그 특성을 파악하고자 한다.

2. 지배방정식

흐름의 지배 방정식은 평면 2차원 흐름의 연속 방정식 및 운동량 방정식이 있으며, 직교 좌표계에서는 하천의 경계가 복잡한 하천을 모의하는데 한계가 있으며, 이들 식을 일반 좌표계에서 좌표 변환을 하여 표시하면 다음과 같다.

연속 방정식

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

운동량 방정식

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

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

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

여기서, ξ 및 η 는 일반 좌표계에서 공간 좌표 성분, 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 $u^\eta = n_x u + n_y v$ 로 정의된다. 계수 $\alpha_1 \sim \alpha_6$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \xi_x \frac{\partial^2 X}{\partial \xi^2} + \xi_y \frac{\partial^2 Y}{\partial \xi^2}, \quad \alpha_2 = 2 \left(\xi_x \frac{\partial^2 X}{\partial \xi \partial \eta} + \xi_y \frac{\partial^2 Y}{\partial \xi \partial \eta} \right), \quad \alpha_3 = \xi_x \frac{\partial^2 X}{\partial \eta^2} + \xi_y \frac{\partial^2 Y}{\partial \eta^2} \\ \alpha_4 &= n_x \frac{\partial^2 X}{\partial \xi^2} + n_y \frac{\partial^2 Y}{\partial \xi^2}, \quad \alpha_5 = 2 \left(n_x \frac{\partial^2 X}{\partial \xi \partial \eta} + n_y \frac{\partial^2 Y}{\partial \xi \partial \eta} \right), \quad \alpha_6 = n_x \frac{\partial^2 X}{\partial \eta^2} + n_y \frac{\partial^2 Y}{\partial \eta^2} \end{aligned}$$

식 (2)와 식 (3)에서 확산항 D^s 와 D^n 는 Jang 등(2005)에 의해 설명되어 있다. 일반 좌표계에서 이차원 유사의 연속 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{z_b}{J} \right) + \frac{1}{1-\lambda} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{q^s}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{q^n}{J} \right) \right] = 0 \quad (4)$$

여기서, z_b 는 하상고, λ 는 하상재료의 공극률, q^s 및 q^n 는 ξ 및 η 방향에서 단위 폭 당 소류사량이다.

하상 재료의 소류사량은 Ashida와 Michiue (1972)의 공식으로 계산하였다.

$$\frac{q_b}{\sqrt{sg} d_m^3} = 17 \tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_*} \right) \quad (5)$$

여기서 q_b 는 소류사량, s 는 수중에서 하상재료의 상대 밀도, g 는 중력가속도, d_m 는 각 입경별 소류사의 지름, τ_{*c} 는 무차원 한계 소류력, u_{*c} 는 한계 마찰속도이다.

수치해석 기법으로는 엇갈린 격자(staggerd grid) 상에서 CIP(Cubic Interpolated Pseudoparticle)법이 이류항에 적용되었으며, 중앙차분법이 확산항에 적용되었다. 경계조건으로는 상류와 하류의 흐름조건을 같게 하는 주기경계조건을 사용하였다. 측벽에서는 측벽에 수직으로 유속이 없는 것으로 가정하였으며, 흐름 방향으로는 slip 조건으로 가정하였다.

3. 수치모의 수행

수치모의를 수행하기 위한 지형학적 조건으로서, fan의 각도는 90°를 제시하였으며, 초기수로를 설정하였다. 초기 하천의 길이는 20m이고, 상류단에서 유량은 0.035cms, 하상경사는 0.2%이다. 수치모의 수행하기 위한 수리학적 조건은 표 1과 같다.

표 1. 수치모의를 위한 수리학적 조건

실 험	유량(CMS)	하상경사(%)	Fan 각(deg.)	유입 유사량(CMS)
Run-1	0.035	0.2	90.0	0.003
Run-2	0.035	0.2	90.0	0.015
Run-3	0.035	0.2	90.0	0.03

그림 1은 R-3 조건에 대한 선상지 델타의 모의 결과를 보여주고 있다. 계산 시간이 70분이 되었을 때(그림1 (a)), 선상지의 시작지점은 하상이 높고, 선상지에서 하천이 분열되어 나타났으며, 하류부에서는 fan 형상으로 퇴적지형이 발달하고 있으며, 시간이 진행되어 감에 따라, 선상지에서는 퇴적지형이 중첩되어 하류로 발달해 가고 있다. 퇴적지에서는 유로(流路)가 여러 형태로 분열되어 가고 있으며, 그 형상은 망상하천의 분열형상과 비슷한 특성을 보여주고 있다(그림 1(b)(c)). 선상지에서 유로(流路)의 분열 형상은 선상지 델타 하류에서 더욱 가속되어 가고 있으며, 좌안과 우안으로 편향되어 가고 있다(그림 (d)). 상류단의 유입 유사량의 변화에 따라 선상지 델타의 발달 과정은 다른 특성을 보여주고 있다. 초기에는 약 10분 동안은 급격하게 선상지가 매우 높게 퇴적되며, 시간이 증가하면서 유입 유사량이 적을 경우에는 평형상태를 보여주고 있다. 유입 유사량이 증가 하면서, R-2에서는 선상지의 높이가 평형상태를 유지하다가 100분 후에 다시 증가하였으며,

R-3에서는 80분에 증가하였다. 즉, 유입 유사량의 증가에 따라 선상지의 높이가 평형상태를 유지하는 시간이 짧은 것을 보여주고 있다. 선상지의 면적도 초기에 급격한 증가를 보여주고 있다(그림 2(b)). 유입 유사량이 적을 경우에는 평형상태가 지속적으로 유지되며, 120분 후에는 완만한 증가 현상을 보여주고 있다. 유입 유사량이 증가할 경우에는 초기에 급격한 상승을 하다가 10분 후부터는 평형상태가 없이 지속적으로 상승하는 것을 보여주고 있다. 즉 유입 유사량이 적을 경우에, 선상지 델타가 형성하기 위해서는 오랜 시간이 지속적으로 유지되어야 하는 것을 보여주고 있다.

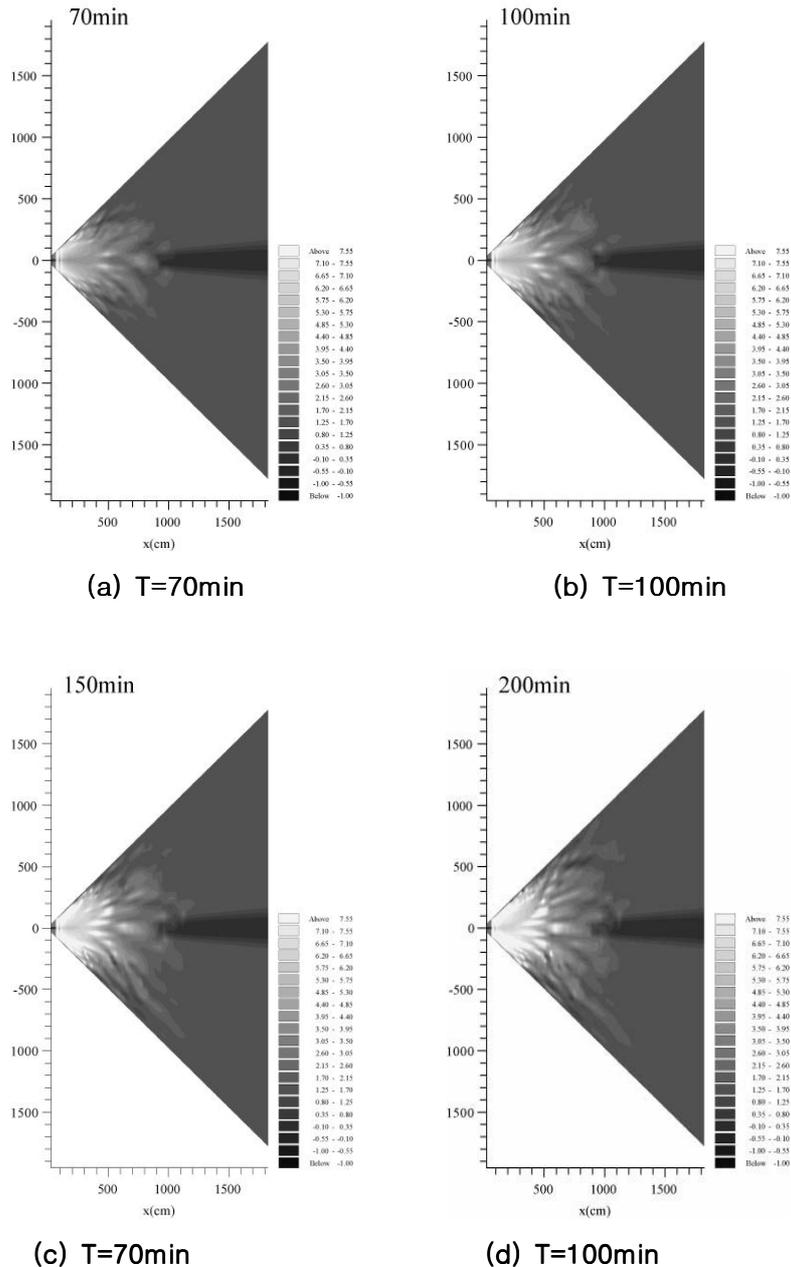


그림 1. R-3 조건에 대한 선상지 델타의 모의 결과

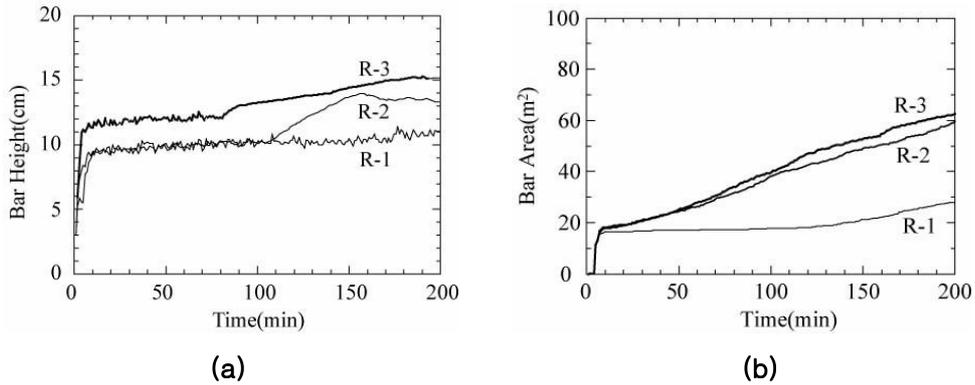


그림 2. 실험 조건별 선상지 델타의 특성:
 (a) 시간에 따른 선상지 델타 높이, (b) 시간에 따른 선상지 델타 면적

4. 결론

본 연구에서는 2차원 수치모형을 이용하여 복잡한 흐름 특성 뿐만 아니라, 사주와 하천의 상호작용을 고려하여 층적 선상지 델타를 모의할 수 있는 수치모형을 적용하여, 유입 유사량의 변화에 따른 특성을 파악하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

선상지 델타의 발달 과정으로 선상지의 시작지점은 하상이 높고, 선상지에서 하천이 분열되어 나타났으며, 계산시간이 증가함에 따라, 선상지에서 퇴적 지형이 중첩되어 하류로 발달해 가고 있다. 퇴적지에서 유로(流路)가 여러 형태로 분열되어 가고 있으며, 그 형상은 망상하천의 분열형상과 비슷한 특성을 보여주고 있다. 유로(流路)의 분열 형상은 선상지 하류에서 더욱 가속되어 가고 있으며, 좌안과 우안으로 편향되어 가고 있다.

상류단의 유입 유사량의 변화에 따라 선상지 델타의 발달과정은 다른 특성을 보여주고 있다. 초기에는 급격하게 선상지의 높이가 급격하게 증가하며, 그 이후에는 유입 유사량이 적을 경우에는 미세한 변동을 유지하며 평형상태를 유지하고 있다. 유입 유사량의 증가에 따라 선상지의 높이가 평형상태를 유지하는 시간이 짧고, 선상지의 면적은 초기에 급격한 상승을 하다가 평형상태가 없이 지속적으로 상승하는 것을 보여주고 있다.

참고문헌

1. Ashida, K., and Michiue, M.(1972) "Study on hydraulic resistance and bed-load transport rate in alluvial streams." *Proc. JSCE*, 201, pp. 59-69.
2. Sun, T., Paolar, C., and Parker, G. (2002). Fluvial fan deltas: linking channel processes with large-scale morphodynamics, *Water Resour. Res.*, Vol. 38., No. 8, pp 26-1 ~ 26-10.
3. Parker, G. (1999). Progress in the modeling of alluvial fans, *J. Hydraul. research*, 37(6), pp. 805 ~ 825.
4. De Chant, L.J., Pease, P. P., and Tchakerian, V. (1999) Modelling alluvial fan morphology. *Earth Surf. Process. Landforms*, 24, pp. 641-652.
5. Jang, C.-L., and Shimizu, Y. (2006). Numerical simulation of relatively wide, shallow with erodible banks." *J. Hydraul. Eng.*, ASCE, Vol. 131, No. 7, pp. 565-575.