

식생된 개수로 흐름에서의 부유사량 추정

Prediction of Suspended Load in Vegetated Open-Channel Flows

최 성욱* · ○강 형식**

1. 서 론

하천의 3대 기능은 이수, 치수 그리고 환경기능이 있다. 이중 하천의 환경기능이란 하천을 구성하는 물은 물론 그 주변 토지를 포함하여 그 곳에 서식하는 식물들을 망라한 하천 그 자체를 의미한다. 그러나 과거 우리 나라의 하천관리 방안은 하천의 이수와 치수 기능만을 강조하였고, 급속한 산업화와 도시화에 따라 하천의 환경기능은 거의 무시되었다. 하천의 환경기능을 파괴시키는 요인에는 도시하수나 공장 폐수와 같은 오염물질의 유입과 부유사 등이 있다. 이중 부유사는 비점오염원으로서 하천내 과도한 부유사가 유입되면 하천내 수중생물의 서식지를 파괴하는 등의 환경문제를 야기시킨다. 이에 따라 미국에서는 부유사로 인한 하천 오염방지를 위한 법안이 개정되었으며, 하천내 부유사의 농도를 줄이는 방안에 대한 연구가 이루어져 왔다. Hayes 등 (1978)은 하천내 식생이 필터와 같은 역할을 함으로써 부유사로 인한 하천오염을 방지하는데 효과적이라는 연구결과를 발표하였다. 이처럼 하천식생이 유사이동에 지대한 영향을 미치고 있음에도 불구하고 지금까지 대부분의 연구는 하천식생의 영향을 무시한 채 이루어져 왔다. 하지만 하천 흐름은 하천을 구성하고 있는 여러 요소들의 상호작용에 의한 복합적인 흐름이므로 하천식생이 흐름에 미치는 영향을 수리학적 측면에서 명확히 규명할 필요가 있다. 또한 최근 자연환경에 대한 관심이 높아짐에 따라 하천수의 오염을 방지하려는 노력이 점차 커지는 현 시점에서 하천내 부유사나 오염물질의 이동에 대한 식생의 영향을 해석하는 것은 반드시 필요한 연구라 할 수 있다.

지금까지 식생된 개수로에서 흐름구조나 부유사 이동에 대해 난류모형을 이용하여 해석하기 시작한 것은 비교적 최근의 일이다. Lopez와 Garcia (1998)는 식생된 개수로에서의 부유사 문제를 $k-\epsilon$ 난류모형을 사용하여 연구하였으며, Tsujimoto (2000)는 수심적분된 $k-\epsilon$ 난류모형을 이용하여 식생된 개수로에서의 유사퇴적에 대해 연구하였다. 또한 실험연구로는 Tollner 등 (1982)이 식생된 개수로에서 유사퇴적에 대해 실험하였으며, Dunn (1996)은 개수로에서 식생에 의한 항력계수를 산정하였다. 국내에서도 권기원과 최성욱 (2000)은 $k-\epsilon$ 난류모형을 이용하여 식생된 개수로에서의 난류구조를 수치모의 하였다.

본 연구는 $k-\epsilon$ 난류모형을 이용하여 식생된 개수로에서 부유사량을 예측한 것으로 수직구조의 해석에 중점을 두었다. 유한체적법을 이용하여 지배방정식과 함께 부유사 보존방정식을 수치모의 하여 식생된 개수로에서 부유사이동 현상에 대해 식생이 어떠한 영향을 미치는가를 파악하였다.

2. 지배방정식

개수로에서 주 흐름방향을 x , 횡 방향을 y , 바닥면에서 수직인 방향을 z 로 정하였다. 하천의 바닥에 균일한 지름을 갖는 식생이 x 와 y 방향으로 동일간격으로 배열되었고 레이놀즈 수가 충분히 큰 경우 Navier-Stokes 방정식을 시간평균하면 다음 식 (1)과 같은 운동량방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z} \right) - f_x + gS_o \tag{1}$$

여기서 u 는 시간평균된 흐름방향의 유속이며, ρ 는 유체의 밀도, ν_{eff} 는 유효동점성계수, f_x 는 단

* 연세대학교 사회환경·건축공학부 조교수

** 연세대학교 대학원 토목공학과 박사과정

위체적당 항력, g 는 중력가속도, S_o 는 바닥경사를 나타낸다. 식 (1)에서 유수로 인하여 식생에 작용하는 단위체적당 항력은 다음 식 (2)와 같다.

$$f_x = \frac{1}{2} C_D a \rho u \sqrt{u^2} \quad (2)$$

여기서 C_D 는 항력계수이고 a 는 식생의 밀도를 나타낸다. 식 (1)에서 유효동점성계수(ν_{eff})는 동점성계수(ν)와 난류동점성계수(ν_t)의 합이며, 난류동점성계수는 다음 식 (3)과 같은 Prandtl-Kolmogorov식으로부터 구할 수 있다.

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

여기서 C_μ 는 경험상수이다. 지배방정식에 대한 폐합식으로서 $k-\varepsilon$ 난류모형을 사용하였으며, 난류에너지 방정식과 난류에너지소산률 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + C_{fk} f_x u - \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \frac{\varepsilon}{k} C_{f\varepsilon} f_x u - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

여기서 σ_k , σ_ε , $C_{1\varepsilon}$ 와 $C_{2\varepsilon}$ 은 난류상수를 나타낸다. 모형에 사용된 난류상수는 $C_\mu = 0.09$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $\sigma_k = 1.00$, $\sigma_\varepsilon = 1.30$ 를 사용하였으며, 이 값들은 Launder와 Spalding (1974)이 제시한 $k-\varepsilon$ 모형의 표준 값들이다. C_{fk} 와 $C_{f\varepsilon}$ 은 각각 k 와 ε 의 수송방정식에서 식생에 의한 영향을 반영하는 계수이며, Lopez와 Garcia (1997)는 $C_{fk} = 1.0$ 과 $C_{f\varepsilon} = 1.33$ 을 제시하였다.

난류흐름에서 일정한 입자 크기와 밀도를 갖고 있는 부유사의 질량보존식은 아래 식 (6)과 같다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(w_s c + \frac{\nu_t}{\sigma_c} \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (6)$$

여기서 c 는 시간평균된 부유사 체적농도, w_s 는 입자의 침강속도, 그리고 σ_c 는 Prandtl-Schmidt 수를 나타낸다.

개수로 바닥에 대한 경계조건으로는 바닥으로부터의 무차원거리 $z^+ (= u_* z / \nu) = 11.5$ 를 기준으로 점성저층과 대수영역으로 구분하는 2층 벽법칙을 이용하였다. 바닥면에서 부유사 농도에 대한 경계조건은 바닥면 근처에서 부유사의 침강과 부상되는 비율이 평형을 이룬다는 가정하에 Garcia와 Parker (1991)가 제시한 아래 식 (7)을 경계조건으로 사용하였다.

$$c = \frac{AZ_u^5}{\left(1 + \frac{A}{0.3} Z_u^5\right)} \quad (7)$$

여기서 $Z_u = Re_p^{0.6} u_* / w_s$ 이고 $A = 1.3 \times 10^{-7}$ 이다. 자유수면에서는 자유수면 부근에 바람 등의 영향으로 인한 전단층을 고려하기 위하여 자유수면 경계조건을 사용하였으며, Celik 과 Rodi (1984)가 제안한 난류에너지 소산율(ε)에 관한 경계조건을 적용하였다. 또한 자유수면에서의 유속, 난류에너지 그리고 부유사 농도는 법선경사가 영이라는 대칭평면 조건을 사용하였다.

3. 수치모의 결과

3.1 하상에서 운동량의 전달

일반적으로 부유사 이동과정의 관점에서 부유사의 분포와 양을 결정할 수 있는 두가지 인자는 난류에 의한 확산과 바닥면에서의 전단이라 할 수 있다. 난류에 의한 확산은 부유된 유사를 수중에 계속 부유시키는 역

할을 하며, 바닥면에서의 전단은 바닥면에 있는 유사를 수중으로 부상시키는데 중요한 역할을 한다. 그림 1은 식생밀도에 대한 하상에서 운동량 전달의 변화를 보여준다. 그림에서 식생의 영향으로 인한 하상에서 운동량 전달현상을 정량적으로 파악하기 위하여 전단속도를 사용하였다. 즉, u_{*b} 는 식생된 개수로에서의 전단속도이고, \sqrt{gHS} 는 식생된 개수로와 동일한 수심과 바닥경사를 갖는 일반 개수로에서의 전단속도이다. 그림에서 식생밀도가 증가할수록 u_{*b} 의 값이 감소하여 하상에서의 운동량 전달이 작아짐을 알 수 있다. 이것은 식생밀도가 증가할수록 바닥면의 유사가 수중으로 부상될 가능성이 더 작아지는 것을 의미한다. 또한 무차원 식생밀도 Ha 가 약 0.001보다 작은 경우 하상에서 운동량 전달의 변화폭이 작으나 Ha 가 약 0.001보다 큰 경우는 식생밀도에 따른 운동량 전달의 변화가 매우 커지는 양상을 볼 수 있다.

3.2 무차원 농도분포

그림 2(a)는 일반 개수로에서 수심에 따른 농도분포를 보여준다. 부유사 입자 크기의 변화에 따른 영향을 살펴보기 위하여, 네가지 크기의 입자(40, 60, 100, 150 μ)를 사용하였고, 계산결과와의 비교를 위하여 Rouse 분포도 함께 도시하였다. 부유사의 농도분포를 산정하기 위한 Rouse 공식은 아래 식 (8)과 같다.

$$\frac{c}{c_b} = \left(\frac{H-z}{z} \frac{b}{H-b} \right)^z \quad (8)$$

여기서 $c_b = c|_{z=b}$, $b = 0.05H$, 그리고 $Z = w_s/(x u_{*b})$ 를 나타낸다. 그림 2(a)에 의하면 식생이 없는 일반 개수로에서 $k-\epsilon$ 난류모형과 Rouse 공식에 의한 부유사의 농도분포가 매우 근사함을 확인할 수 있으며, 대체적으로 수치모의에 의한 값이 Rouse 공식에 의한 값보다 약간 작음을 알 수 있다.

그림 2(b)는 식생된 개수로와 일반 개수로에서 부유사 농도분포에 대한 수치모의 결과를 비교한 그림이다. 네가지 입자 모두에 대하여 식생된 개수로에서의 부유사 농도분포가 일반 개수로 보다 더 균일한 것으로 나타났으며, 입자의 크기가 커짐에 따라 이러한 차이는 더욱더 두드러짐을 알 수 있다. 그림 2(b)에서 부유사 농도를 무차원화 시키기 위해 사용한 c_b 의 값이 서로 다르므로 두 농도분포로부터 유사량을 비교하기는 어려우며, 일반 개수로의 경우와 유사량을 비교한 것은 그림 4에 도시하였다.

3.3 부유사량

그림 3(a)는 일반 개수로에서 부유사 입자의 크기 변화에 따른 부유사량의 변화를 보여준다. 수치모의에 의해 계산된 결과를 Einstein 공식 (1950)과 비교하였으며, 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 수치모의에서 부유사량은 평균유속과 평균농도의 곱(uc)을 수직적분하여 구할 수 있다. 그림에서 부유사 입자의 크기를 40 μ -200 μ 까지 변화시켰을 경우 부유사 입자의 크기가 증가함에 따라 부유사량은 감소하며, 입자의 크기가 약 100 μ 보다 큰 경우에는 q_{ss} 의 변화도 커지는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 3(b)는 일반 개수로에서 수심에 따른 부유사량의 변화를 나타낸 그림이다. 수치모의에 사용된 부유사 입자의 크기는 80 μ 이며, 0.05 m-0.45 m 까지 수심을 변화시켜 부유사량을 계산하였다. 그 결과 수심이 증가할 수록 부유사량 q_{ss} 의 값은 증가하며 수심이 약 0.15 m보다 클 경우 q_{ss} 의 변화가 작아짐을 확인할 수 있다.

그림 4는 무차원 식생밀도(Ha)에 대한 식생된 개수로에서의 부유사량의 변화를 보여준다. 그림의 세로 축은 비교를 위하여 일반 개수로에서의 부유사량(q_{ss})과 식생된 개수로에서의 부유사량(q_{ssv})에 대한 비를 도시하였다. 또한 다양한 크기의 부유사 (40, 80, 150 μ)를 사용하여 수치모의 함으로써 이에 대한 영향을 살펴보았다. 계산에 사용된 유량과 수로경사는 각각 $q = 1.12 \text{ m}^2/\text{s}$ 와 $S_o = 0.0036$ 이다. 그림에 의하면 무차원 식생밀도가 증가할 수록 부유사량은 감소하며, 동일한 식생밀도에 대해서 유사입자의 크기가 작을 수록

수송되는 부유사의 양은 큰 것으로 나타났다. 이것은 유사입자가 클수록 식생에 의한 난류강도 변화에 더욱 큰 영향을 받기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 유사이동에 대한 하천식생의 영향을 검토하기 위해 수치해석을 실시하였다. 난류폐합식은 $k-\epsilon$ 난류모형을 이용하였으며, 지배방정식과 함께 부유사 보존방정식도 수치해석하여 하상에서의 운동량 전달, 부유사의 농도변화, 수심적분된 부유사량을 계산하였다. 이상의 수치모의 결과를 분석하여 얻은 결론은 다음과 같다.

하상에서의 운동량 전달을 검토한 결과 식생밀도가 증가할수록 운동량 전달이 감소하여 유사유입에 영향을 줄 수 있음을 확인하였다. 식생된 개수로에서의 부유사는 일반 개수로에 비해 전 수심에 걸쳐 균일하게 분포하였으며, 유사 입자의 크기가 증가할 수록 일반 개수로의 농도분포와는 큰 차이를 보였다. 동일한 바닥경사와 유량에 대해서 식생밀도가 증가할수록 부유사량은 감소하며, 동일한 식생밀도에 대해서 입자의 크기가 작을수록 부유사량이 증가함을 확인하였다.

5. 참고문헌

- 권기원, 최성욱 (2000). "식생된 개수로 흐름의 $k-\epsilon$ 난류해석." 대한토목학회 논문집, 20(1-B), 11-21.
- Dunn, C.J. (1996). *Experimental determination of drag coefficients in open channel with simulated vegetation*, M.S. Thesis, University of Illinois at Urbana - Champaign, Urbana, IL.
- Hayes, J.C., Barfield, B.J., and Barnhisel, R.I. (1978). "Evaluation of grass characteristics related to sediment filtration." *Meeting of the American Society of Agricultural Engineers*, Chicago, 78-2513.
- Lauder, B.E. and Spalding, D.B. (1974). *The numerical computation of turbulent flow*, *Comp. Meth. in Applied Mechanics*, England.
- Lopez, F. (1994). *Near-wall turbulent coherent structures and their role on sediment transport in smooth-bed open-channel flows*. M.S. Thesis. University of Illinois at Urbana - Champaign.
- Lopez, F. (1997). *Open-channel flow with roughness elements of different spanwise aspect ratios: Turbulence Structure and Numerical Modeling*, Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, IL.
- Lopez, F. and Garcia, M. (1997). "Open-channel flow through simulated vegetation: Turbulence modeling and sediment transport." *Wetlands Res. Program Tech. Rep. WRP-CP-10*, Waterw. Exp. Stn., Vicksburg.
- Lopez, F. and Garcia, M. (1998). "Open-channel flow through simulated vegetation: Suspended sediment transport modeling." *Water Resource Research*, IAHR,34(9), 2341-2352.
- Svensson, U. (1998). *PROBE*, *Swedish Meteorological and Hydrological Institute*. Norrkoping, Sweden.
- Tollner, E.W., Barfield, B.J., and Haynes, J.C. (1982). "Sedimentology of erect vegetal filters" *Journal of the Hydraulic Division*, ASCE, 108(12), 1518-1531.
- Tsujimoto, T (200). "Fluvial processes in streams with vegetation." *Journal of Hydraulic Research*, 37(6), 789-803.

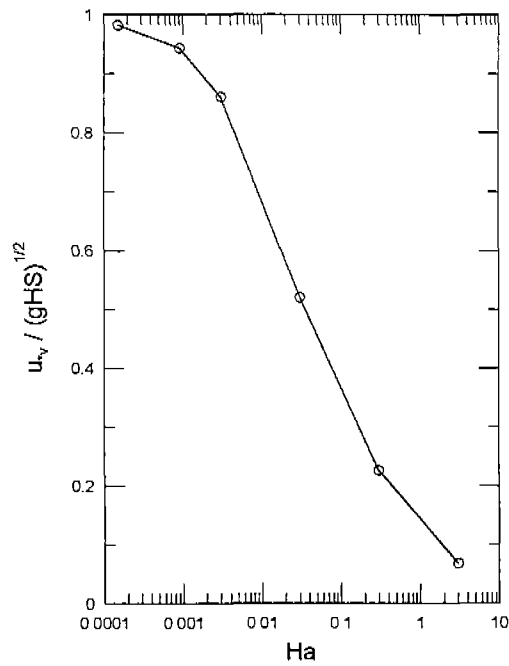
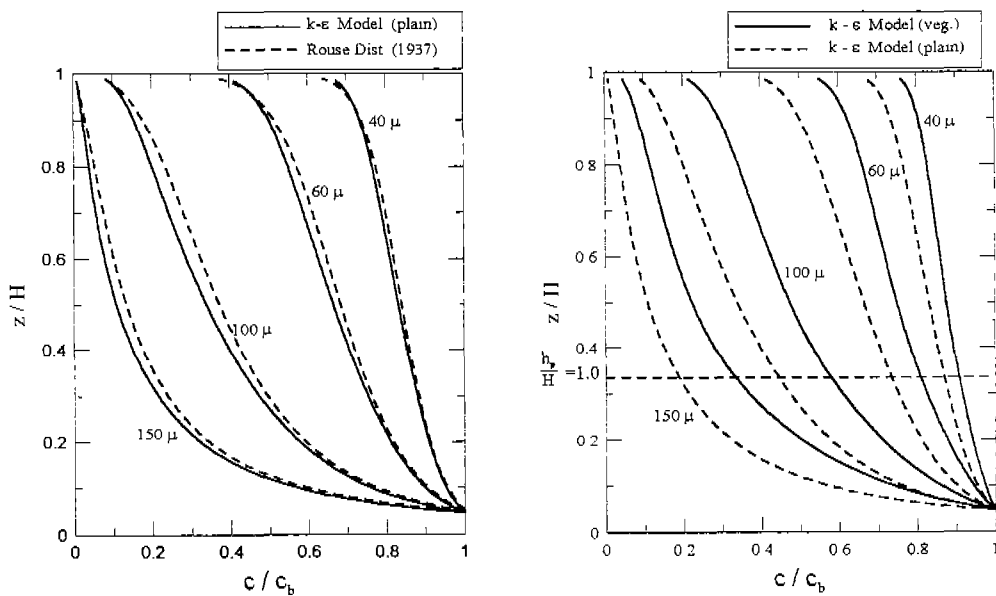


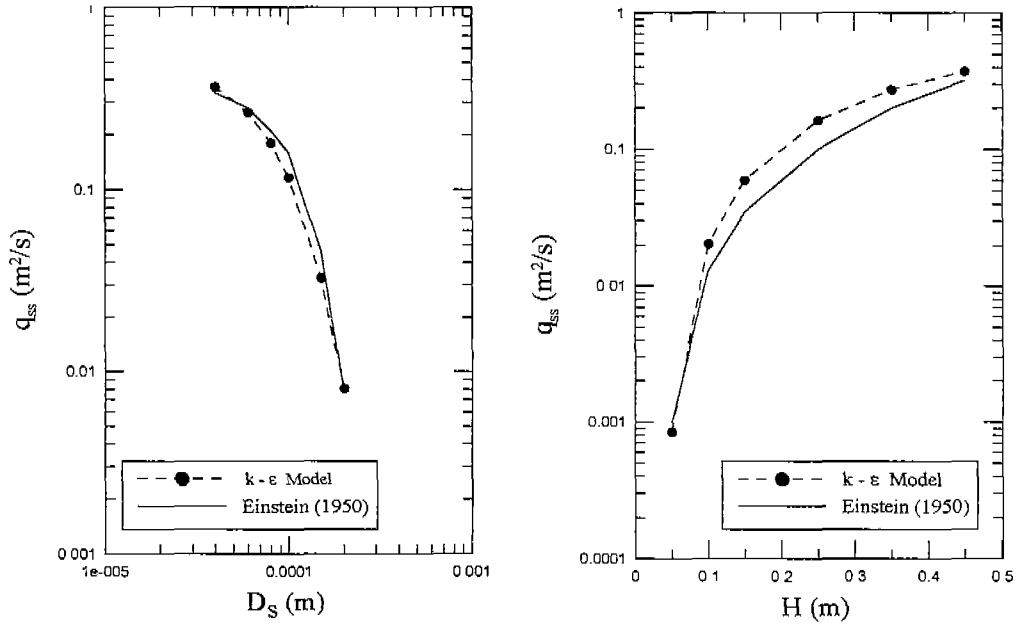
그림 1. 무차원 식생밀도에 따른 하상에서의 운동량의 전달



(a) 일반 개수로에서 수치모의와 Rouse분포 비교

(b) 식생의 유무에 따른 수치모의 비교

그림 2. 부유사 농도분포



(a) 입자크기에 따른 변화

(b) 수심에 따른 변화

그림 3. 일반 개수로에서 부유사량의 변화

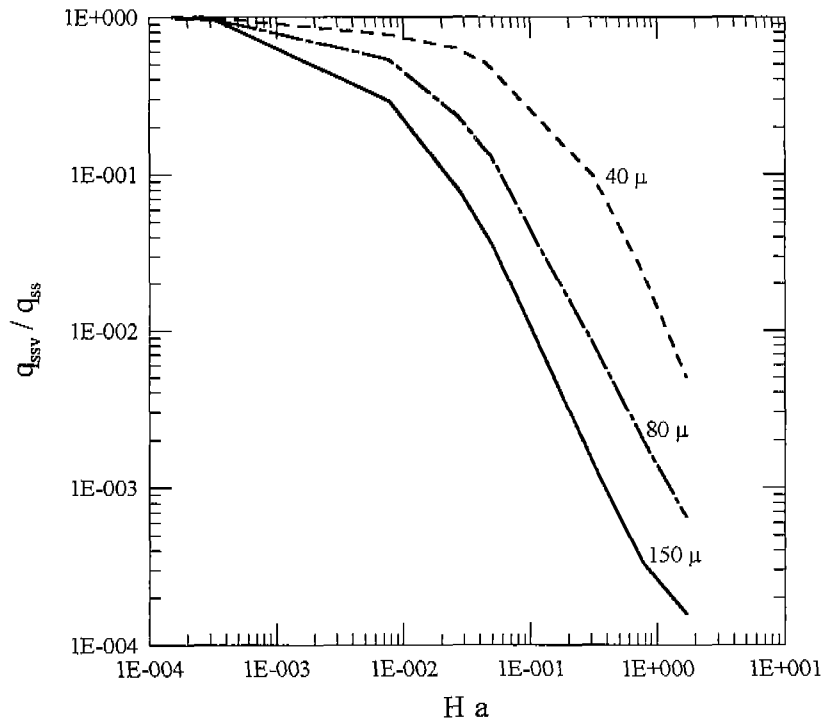


그림 4. 식생밀도에 대한 부유사량의 변화