

식생된 개수로에서의 부유사 농도 변화에 관한 수치해석

Numerical Simulations for Suspended Sediment in Vegetated Open-Channel Flows

최성욱* · 최병웅**

Choi, Sung-Uk · Choi Byungwoong

1. 서 론

과거 하천에 대한 관리는 홍수시 통수능 확보에만 관심이 집중됨에 따라 하천수의 수질문제와 하천변 생태계 문제에 대한 관심은 상대적으로 미흡하였다. 그러나 생활수준의 향상으로 인해 자연환경에 대한 관심이 높아지면서 하천변의 자연 생태계 보전과 하천 수질오염 방지에 대한 노력이 점차 커지고 있다. 최근에는 자연형 하천공법을 도입하여 기존의 콘크리트로 이루어진 저수호안을 생물재료로 대체하여 직선화된 저수로를 곡선화하여 최대한 자연에 가깝게 돌리려는 노력을 하고 있다. 그러나 자연형 하천에 대한 수리학적 연구성과는 미흡한 실정이다.

하천내 식생은 필터와 같은 역할을 함으로써 부유사로 인한 하천오염을 방지하는데 효과적이라는 연구결과가 발표되었다 (Hayes 등, 1978). 하천내 식생은 흐름의 유속을 감소시키고, 토사의 침식을 억제하며, 유사의 퇴적을 유발시키는 역할을 한다. 미국의 보고서에 의하면, 미 중서부의 Cache 강에서 현장 측정된 결과 식생의 영향으로 약 60~80 %의 부유사 퇴적 효과가 증가한다고 보고하였다. 이와 같이 하천내 서식하는 식생이 오염물질의 확산을 억제시킨다는 연구결과는 최근 친환경적인 사회적 요구와 부합하는 것으로 하천의 수질 오염을 방지하기 위해 자연적인 기법으로 방지할 수 있다는 것을 의미한다.

하천내 부유사 수송에 대한 문제를 실험이나 현장관측을 통해 예측하는 것은 그 자체로 의미가 있지만, 비경제적이며 많은 시간이 소모되고 다른 여러 분야로의 응용이 이루어지기 어려운 단점이 있다. 따라서 식생된 개수로에서 난류구조의 변화와 부유사 농도변화를 예측할 수 있는 수치해석에 의한 연구가 필요하다. 과거 식생에 대한 수리학적인 접근은 Manning 공식의 조도계수를 늘려줌으로써 흐름의 유속을 감소시키는 방법을 사용하여왔다. Burke와 Stolzenbach (1983)가 처음으로 2-방정식 모형을 식생이 있는 자유수면흐름에 적용하였으며, Lopez와 Garcia (1998)는 식생된 개수로에서의 부유사 문제를 $k-\epsilon$ 난류모형을 사용하여 연구한 바 있다. Dunn (1996)은 휘어지지 않고 끝은 원통형 실린더 모양의 식생에 대한 항력계수를 산정하였다. 국내에서도 권기원과 최성욱 (2000)은 $k-\epsilon$ 난류모형을 이용하여 식생된 개수로에서의 난류구조를 수치모의 하였다. 또한 강형식과 최성욱 (2000)은 $k-\epsilon$ 난류모형을 이용하여 식생된 개수로에서 난류구조와 부유사 이동 현상에 대하여 수치모의 하였다.

본 연구의 목적은 $k-\epsilon$ 난류모형을 이용하여 식생된 개수로 흐름의 난류구조와 부유사 이동을 해석하는 것이다. 일반 개수로와 식생된 개수로의 평균 흐름 및 난류구조를 분석하고, 부유사 농도분포를 수치모의 하여, 식생된 개수로에서 부유사 이동 현상에 대해 분석하였다.

2. 지배방정식

본 연구에서 사용한 지배방정식은 Navier-Stokes 방정식을 시간평균하여 얻은 운동량 방정식으로 다음과 같다. 이때 좌표계는 주 흐름방향을 x , 횡 방향을 y , 바닥면에서 수직인 방향을 z 로 정하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}(\nu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z}) - f_x + gS_0 \quad (1)$$

여기서 u 는 시간평균된 흐름방향의 유속이며, ν_{eff} 는 유효동점성계수, g 는 중력가속도, S_0 는 바닥경사를 나타낸다. 식 (1)에서 유수로 인하여 식생에 작용하는 단위체적당 항력 (f_x)은 다음식과 같다.

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

여기서 C_D 는 항력계수이고, a 는 식생의 밀도로서 아래 식과 같이 정의된다.

$$a = \frac{D}{A_h} = \frac{D}{l_x l_y} \quad (3)$$

여기서 D 는 식생의 지름을 나타내며, A_h 는 식생간격에 의한 하상의 단위면적, l_x 와 l_y 는 각각 x 와 y 방향으로의 식생의 간격을 나타낸다. Dunn (1996)은 휘어지지 않고 끝은 원통형모양의 식생에 대한 수치실험을 통해 항력계수는 깊이 방향에 따라 변하는 값이며, 식생높이의 1/3지점에서 최대값을 이루고, 항력계수의 평균값을 $C_D = 1.13 \pm 15\%$ 로 제시하였다. 본 수치모의에서는 이러한 항력계수의 특성을 반영하기 어려우므로 Dunn (1996)의 수치실험 결과에 의해 $C_D=1.13$ 을 사용하였다. 식 (1)에서 유효동점성계수 (ν_{eff})는 동점성

* 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 정교수 · 공학박사 · E-mail : schoi@yonsei.ac.kr

** 학생회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정 · E-mail : bw628@yonsei.ac.kr

계수 (ν)와 난류동점성계수 (ν_t)의 합이며, 난류동점성계수는 다음식과 같은 Prand시-Kolmogorov 식으로부터 구할 수 있다.

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

여기서 C_μ 는 경험상수이다.

2-방정식 난류모형인 $k-\epsilon$ 모형을 사용하였다. 식 (4)를 이용하여 난류동점성계수를 산정하기 위해서 다음과 같은 난류운동에너지 (k)와 난류운동에너지 소산율 (ϵ)의 수송방정식을 해석한다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + C_{fk} f_x u - \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \frac{\epsilon}{k} C_{f\epsilon} f_x u - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

모형에 사용된 난류상수는 $C_\mu=0.09$, $C_{1\epsilon}=1.44$, $C_{2\epsilon}=1.92$, $\sigma_k=1.00$, $\sigma_\epsilon=1.30$ 을 사용하였으며, 이 값들은 Launder와 Spalding (1974)이 제시한 표준 값들이다. C_{fk} 와 $C_{f\epsilon}$ 은 각각 k 와 ϵ 의 수송방정식에서 식생에 의한 영향을 조정하는 계수이다.

난류흐름에서 일정한 입자 크기와 밀도를 갖고 있는 부유사의 질량보존식은 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + (w - w_s) \frac{\partial c}{\partial z} = - \frac{\partial \overline{u c}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{w c}}{\partial z} \quad (7)$$

$\overline{u c}$ 와 $\overline{w c}$ 은 각각 흐름방향과 수직방향으로의 레이놀즈 흐름률을 나타내며, 여기서 c 는 시간평균된 부유사 농도, w_s 는 입자의 침강속도를 나타낸다.

3. 경계조건

난류 흐름에서 바닥 경계부근의 유동은 속도경사가 매우 크기 때문에 많은 격자점을 주어야 하지만 전체 계산영역의 아주 작은 부분을 차지하는 벽면 부근에 많은 격자점을 배치하는 것은 비효율적이다. 또한 점성저층에서는 점성효과가 지배적이므로 레이놀즈 수가 큰 난류모형은 적용할 수 없다. 이러한 이유 때문에 일반적으로 갖는 경험공식인 벽 법칙 (law of the wall)이 주로 사용된다. 벽면부근을 점성저층, 완충층, 대수영역으로 구분되는 3층 벽 법칙이 좀 더 정확하지만, 본 연구에서는 계산상의 편의를 위하여 완충층을 생략하고 바닥면으로부터 무차원 거리를 기준점으로 하여 점성저층과 대수영역으로 나눈 2층 벽 법칙을 사용하였다. 바닥면에서의 평균유속, 난류에너지, 그리고 난류에너지 소산율의 경계조건은 벽 함수 (wall function)를 이용하였다.

부유사 보존방정식을 수치모의 하기 위하여 부유사 농도 경계조건은 바닥면 근처에서 유사입자의 침강과 수중으로 부상되는 비율이 평형을 이룬다는 가정하에 Garcia와 Parker (1991)가 제시한 아래의 식을 경계조건으로 사용하였다.

$$c = \frac{AZ_u^5}{(1 + \frac{A}{0.3} Z_u^5)} \quad (8)$$

여기서 $Z_u = Re_p^{0.6} u_* / w_s$ 이고 $A=1.3 \times 10^{-7}$ 이다. 또한 Re_p 는 입자레이놀즈수로서 다음 식과 같이 정의된다.

$$Re_p = \frac{D_s \sqrt{gRD_s}}{\nu} \quad (9)$$

자유수면에서는 자유수면 부근에 바람 등의 영향으로 인한 전단층을 고려하기 위하여 자유수면을 움직이는 벽으로 가정하는 벽 법칙을 적용하는 것이 적당하다. 그러나 벽 법칙의 직접적인 적용에는 한계가 있으므로 자유수면에서 난류의 특성길이를 감소시킴으로써 자유수면의 영향을 고려한다 (Rodi, 1993). 이러한 자유수면의 영향을 고려하기 위해 Celik과 Rodi (1984)가 제안한 식을 난류에너지 소산율의 경계조건으로 사용하였다.

$$\epsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{x \alpha H} \quad (10)$$

여기서 H 는 수심, α 는 경험적인 상수로 Hossain (1980)이 0.07로 제안하였다.

4. 난류구조

식생된 개수로에서의 부유사 이동을 해석하기에 먼저 식생이 개수로 흐름변화에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 해석이 선행되어야 한다. 수치모형이 식생이 없는 일반 개수로의 흐름을 모의하는지 살펴보기 위하여 Lopez (1994)의 실험결과와 비교하였으며, 식생된 개수로 흐름의 경우 Lopez (1997)의 실험결과와 비교하였다.

4.1 일반 개수로

그림 1(a)와 1(b)는 각각 평균유속과 난류강도의 분포를 나타낸 그림이다. 수치모의 계산 결과를 Lopez (1994)의 실험결과와 비교하였다. 수치모의 조건으로는 수심 (H) 0.24 m, 바닥경사 (S_0)는 0.0005를 사용하였다. 그림에 의하면 수치모의 계산 결과와 실험값이 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 1(a)를 보면 바닥근처에서 유속경사가 크고 수면으로 갈수록 작아지게 되므로 변동속도 u' 의 절대값 역시 바닥근처에서 크고 수면으로 갈수록 작은 값을 나타낸다. 따라서 난류강도의 수직분포를 나타낸 그림 1(b)에서 난류강도는 바닥면 부근에서 최대를 보이며 자유수면으로 갈수록 감소함을 볼 수 있다.

4.2 식생된 개수로

그림 2는 식생된 개수로에서 평균유속의 수직분포와 깊이에 따른 난류강도의 변화, 단위밀도당 레이놀즈 응력의 수직분포를 보여준다. 수치모의 계산 결과를 Lopez (1997)의 실험결과와 비교하였다. 실험조건으로는 수심 (H)은 0.335 m이고 바닥경사 (S_0)는 0.0036, 식생 밀도 (a)는 1.09 m^{-1} , 식생높이 (h_p)는 0.1175 m 이다. 식생높이보다 낮은 구간에서는 계산된 결과가 실험결과와 비슷하게 나타났으며, 식생에 의한 영향으로 평균유속이 감소하게 됨을 보여준다. 식생된 개수로에서 깊이에 따른 난류강도의 변화의 그림을 보면, 난류강도는 바닥에서 증가하여 식생높이 부근에서 최대가 되고 다시 수면으로 갈수록 감소함을 알 수 있다. 이는 식생의 영향으로 인해 식생높이 부근에서 유속경사가 커지게 되므로 변동속도 u' 의 절대값 역시 커지게 된다. 따라서 난류강도가 식생높이 부근에서 최대값을 갖고 수면 및 바닥으로 갈수록 작아지게 된다. 레이놀즈 응력은 난류강도의 수직분포와 마찬가지로 식생높이 부근에서 최대값을 보이며 수면과 바닥, 양방향으로 감소하는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 식생된 개수로에서 난류구조를 파악하고 부유사이동에 대한 식생의 영향을 검토하기 위해 수치해석을 하였다. 난류폐합식으로는 2-방정식 모형으로서 등방성 난류모형인 $k-\epsilon$ 모형을 이용하였으며, 평균유속, 난류강도, 레이놀즈 응력에 대하여 살펴보았다. 침수식생을 갖는 개수로에서 식생에 의한 항력으로 유속분포가 전반적으로 약화되었으며 식생높이 부근에서 유속경사가 커짐을 확인하였다. 이에 따라 난류강도와 레이놀즈 응력의 값이 식생높이에서 최대값을 형성하였고, 수면과 바닥으로 갈수록 감소하는 것을 확인하였다. 일반 개수로의 조건에서 부유사 이동에 관하여 수치모의를 하였다. 부유사의 이동이 진행될수록 좀 더 완만한 경사의 분포를 나타내고 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 및 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업 연구비지원 (06건설핵심 B01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 권기원, 최성욱 (2000). "식생된 개수로 흐름의 $k-\epsilon$ 난류해석." 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 20권, 제1-B호, pp. 11~21
2. Burke, R.W. and Stolzenbach, K.D. (1983). Free surface flow through salt marsh grass. MIT-Sea Grant Report MITSG 83-16, Cambridge Mass., 252.
3. Celik, I. and Rodi, W. (1984). "Simulation of free-surface effects in turbulence channel flows." Physico-Chem. Hydrodyn., Vol. 5, pp. 217~227.
4. 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.
5. Launder, B.E. and Spalding, D.B. (1974). "The numerical computation of turbulent flow." Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 3, 269~289.
6. 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, Urbana, IL.
7. 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, Urbana, IL.
8. Rodi, W. (1993). Turbulence models and their application in hydraulics: A state of the art. 3rd Edition, International Association for Hydraulic Research, Delft, The Netherlands.

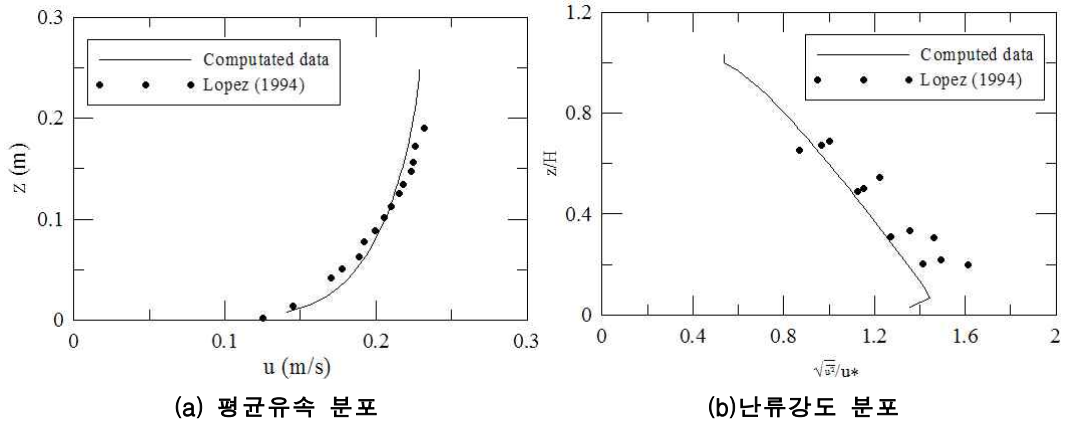


그림 1. 일반 개수로에서 평균유속과 난류강도의 분포

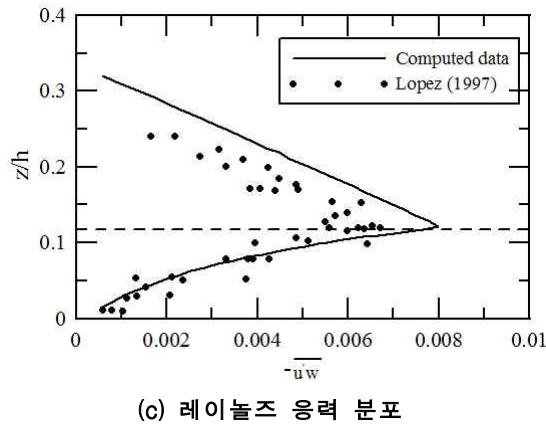
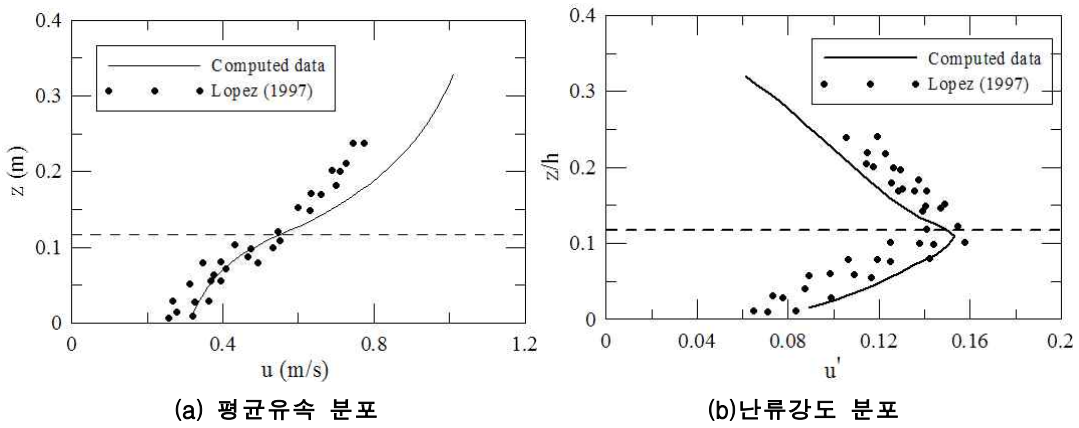


그림 2. 식생된 개수로에서 평균유속과 난류강도와 레이놀즈 응력의 분포

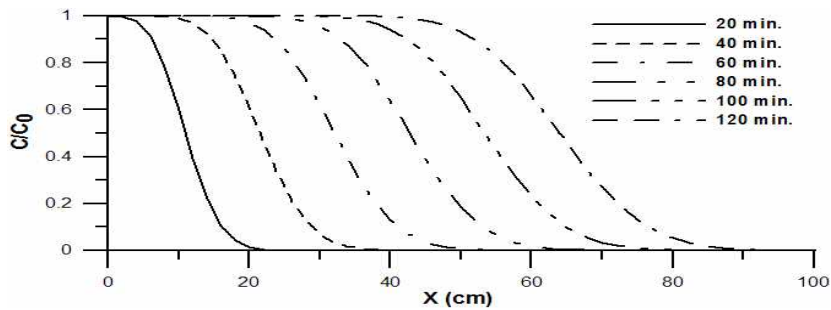


그림 3. 일반 개수로에서 부유사의 농도 분포