

식생된 개수로에서의 수심 평균된 2차원 수치모형

Depth-averaged 2-D numerical model
for the vegetated open-channel flows

김태범*, 최성욱**, 전웅현***

Tae Beom Kim, Sung-Uk Choi, Woong Hyeon Jeon

요 지

과거에는 치수적인 측면에서 하상과 둔치에 자생하는 식생이 홍수시 하천의 통수능을 줄인다는 이유로 기피 대상이 됐으나, 근래에 들어 생활수준의 향상과 더불어 국민의 여가생활에 있어서 하천의 친환경적인 역할이 증대되고 있다. 하천에서의 식생은 토사의 침식을 억제하여 탁도를 줄이며, 수중야생 동·식물들의 서식처를 제공하고, 제방의 식생은 제방의 안정에 기여한다. 뿐만 아니라 식생은 첨두홍수량을 줄이는데 기여하고, 유출에 의한 오염물질을 여과시킨다.

과거에는 하천 식생을 고려하기 위해 Manning 공식 등을 이용하여 단순히 경험적으로 조도계수만을 증가시키는 방법을 사용하였다. 단순히 조도계수를 증가시킬 경우, 식생이 수로에 존재하면 전체적인 흐름저항은 증가하지만, 하상 전단력은 감소한다는 개념과 맞지 않게 된다. 또한 기존 식생수로에 관한 연구의 초점은 주로 수직모형에 의한 수직 흐름구조 변화에 있어 왔다. 하지만 수직모형을 실제 자연하천에 적용하기란 쉽지 않고, 실무적인 측면에서 비실용적이다. 따라서 본 연구에서는 실무적으로 적용성 및 활용도가 높은, 식생항력 개념을 적용시킨, 수심 평균된 2차원 수치모형을 개발하였으며, 직선수로에 식재구간을 설정하여 식생에 의한 흐름특성 변화를 살펴보았다. 식생이 존재함으로써 수면의 상승이 유발되었고, 비식재 구간에서의 평균유속이 상대적으로 높은 증가율을 보였다.

핵심용어 : 수심 평균, 2차원 수치모형, 식생, 개수로

1. 서 론

개수로에 식재된 식생은 평균유속을 감소시켜 수위를 상승시키는 역할을 하며, 바닥 전단력을 감소시켜 유사 퇴적을 유발시킨다. 또한 식생 및 비식생 영역의 경계면 근처에서는 유속 차이가 크게 발생되어 전단에 의한 난류 생성이 증가되고, 식생높이 부근에서는 난류의 비동방성이 강하게 발생된다. 또한 식생영역 내부에서는 와류에 의한 난류생성이 추가로 발생된다. 이와 같이 식생된 개수로 흐름은 일반 개수로 흐름보다 더욱 복잡한 흐름 구조를 갖는다.

하천에 자생하는 식생을 수리학적으로 고려하기 위하여, 과거에는 Manning 공식 등을 이용할 때 조도계수를 늘려 통수능을 줄여줌으로써 수목의 효과를 고려하였다 (Chow, 1959). 이때 식생의 밀도 등에 따라 조정되는 조도계수는 유체역학적인 판단에 근거해서가 아니고 주로 경험적으로 결정되었다. 최근에는 개수로에서의 식생 효과에 대한 간단한 1차원 모형부터 복잡한 유체동역학 모형까지 다양한 방법들이 시도되었다 (Shimizu and Tsujimoto, 1994; Darby, 1999; Lopez and Garcia, 2001). 특히 Tsujimoto (1999), Van de Wiel과 Darby (2004)는 정류조건에서의 2차원

* 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사후 연구원 · Email : geo108@naver.com

** 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수 · Email : schoi@yonsei.ac.kr

*** 연세대학교 사회환경시스템공학부 석사과정 · Email : enfte@yonsei.ac.kr

흐름 및 유사이송 모형을 개발하였고, 최근에 Wu와 Wang (2004)은 부정류 조건의 수치모형을 개발하였다. 국내에서도 식생된 개수로의 흐름에 대한 연구가 활발해지고 있지만, 아직은 수리학적, 유체역학적 측면에서 그 연구가 미흡하다 하겠다. 권기원과 최성우 (1999)은 $k-\epsilon$ 난류모형을 이용하여 식생된 개수로에서의 난류구조를 수치모의 하였으며, 강형식과 최성우 (2004)은 레이놀즈 응력모형을 이용한 식생된 개수로 흐름의 수치모의를 하였다. 이렇듯 기존 식생수로에 관한 연구의 초점은 주로 수직모형에 의한 수직 흐름구조 변화에 있어 왔다. 하지만 실제 자연하천에 적용하기가 쉽지 않고, 실무적으로도 비활용적이다. 따라서 본 연구에서는 식생에 의한 수평 2차원적인 흐름특성 변화를 모의 가능한 수심 적분된 흐름모형을 개발하고자 한다.

2. 지배방정식

Boussinesq 와점성 개념의 포물선 분포 모형을 적용시키고, 식생에 의한 항력항을 추가한 수심 적분된 연속방정식과 Reynolds 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

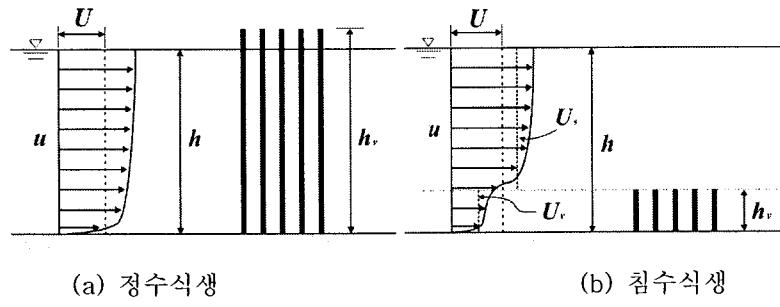
$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(2\nu_t \frac{\partial p}{\partial x} \right) \\ - \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \left(\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial q}{\partial x} \right) \right] + gh \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \tau_{bx} + \frac{1}{\rho} \frac{N_v F_{Dx}}{1 - c_v} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_t \left(\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial q}{\partial x} \right) \right] \\ - \frac{\partial}{\partial y} \left(2\nu_t \frac{\partial q}{\partial y} \right) + gh \frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \tau_{by} + \frac{1}{\rho} \frac{N_v F_{Dy}}{1 - c_v} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $p = hu$, $q = hv$ 의 관계에 있으며, p , q 는 x , y 방향의 단위 폭 당 유량성분, h 는 수심, u , v 는 x , y 방향의 수심평균 유속성분이다. 그리고 t 는 시간, g 는 중력가속도, z_b 는 하상고, τ_{bx} 와 τ_{by} 는 하상전단응력의 x , y 방향 성분, F_{Dx} 와 F_{Dy} 는 하나의 식생줄기에 의한 항력의 x , y 방향 성분, N_v 는 단위면적당 식생 줄기 개수, c_v 는 식생 체적 비율, 그리고 ν_t 는 난류 동점성 계수이다.

식 (2)와 (3)에서 하나의 식생줄기에 의한 항력, F_D 는 다음과 같다.

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A_v U_v^2 \quad (4)$$



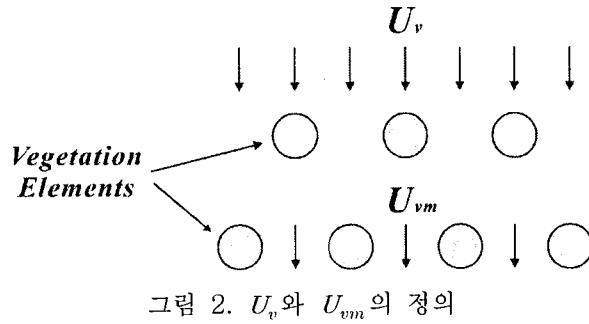


그림 2. U_v 와 U_{vm} 의 정의

식 (4)에서 식생층에서의 평균유속, U_v 는 정수식생의 경우 수심평균 유속, U 와 같다 (그림 1a). 침수식생의 경우 (그림 1b), U_v 는 다음과 같은 Stone과 Shen (2002)의 관계식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\frac{U_v}{U} = \sqrt{\frac{h_v}{h}} \left[\frac{1 - \sqrt{\frac{4\lambda}{\pi}}}{1 - \frac{h_v}{h} \sqrt{\frac{4\lambda}{\pi}}} \right] = \sqrt{\frac{h_v}{h}} \eta_v \quad (5)$$

식 (4)에서 항력계수, C_D 는 식생배열로 인해서 흐름폭이 축소된 단면에서의 유속, U_{vm} 이 아닌 식생배열 사이사이의 전체 단면을 통과하는 흐름의 유속, U_v 에 기초하고 있다 (그림 2). 하지만 U_{vm} 에 기초한 항력계수, C_{Dm} 을 사용하는 것이 더욱 합리적이다. 식생밀도, 식생크기, 그리고 식생 레이놀즈수가 변해도 C_{Dm} 의 변화가 작기 때문에, 조건에 따라 변화량이 큰 C_D 를 사용하는 것보다, C_{Dm} 을 적용하는 것이 좋다 (Stone and Shen, 2002). C_D 와 C_{Dm} 관계식은 균일하게 분포된 식생의 경우 항력계수는 아래와 같다.

$$C_D = \frac{C_{Dm}}{\left(1 - \frac{d_v}{s_v}\right)^2} \quad (6)$$

여기서 s_v 는 식생줄기 사이의 간격이다. 만약 엇갈리게 분포된 식생의 경우라면 항력계수는 다음과 같다.

$$C_D = \frac{C_{Dm}}{(1 - d_v \sqrt{N_v})^2} \quad (7)$$

Stone과 Shen (2002)은 식 (6) 또는 (7)에서 C_{Dm} 의 평균값 1.05를 사용할 것을 제안하였다.

식 (2)와 (3)에서 하상전단응력을 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\tau_b = \rho \frac{gn^2}{R_s^{1/3}} U^2 \quad (8)$$

여기서 n 은 Manning 조도계수이고, 동수반경, R_s 는 Wu 등 (2005)이 제시한 다음 식을 이용한다.

$$R_s = \frac{h_v}{h} \frac{h_v s_v}{2h_v + s_v} + \frac{h - h_v}{h} (h - h_v) \quad (9)$$

3. 수치모형의 적용

개발된 수치모형의 효과를 알아보기 위해서 간단한 모의를 행하였다. 길이 8 m, 폭 2 m의 수

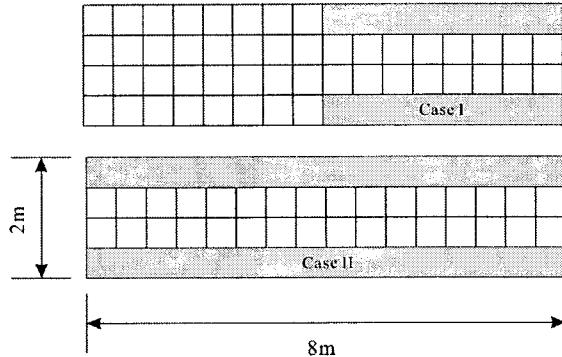


그림 3. 양측벽에 식생이 존재하는 경우 평면도

로에서 $0.033 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 상류 유량과 하류단 수심이 0.055 m인 경우, 그림 3과 같이 수로 측면에 식생 식재에 따른 흐름특성 변화를 살펴보았다. 수로의 기울기는 0.0001, Manning 조도계수는 0.0048, 평균유속은 0.3 m/s 이며, Froude 수가 1 보다 작은 상류조건에 해당한다. 식생 직경은 0.0022 m , 식생밀도는 2.75 m^{-1} 이며, 식생높이는 기본적으로 0.036 m 를 적용하였다. 그림 4와 5는 각각 측벽 및 중앙수로에서의 거리에 따른 수심과 평균유속분포를 나타내고 있다. 양측벽 부근 식생이 존재함으로써 수심은 전체적으로 증가함을 나타내고 있고, 측벽에서의 수심증가량이 약간 더 높다. 측벽에서는 식생이 존재함으로써 전체적으로 평균유속이 감소하는 경향을 보이며, 식재구간에서 더욱 급격하게 감소한다. 식생이 없을 때의 평균유속에 비해서 대략 최대 1/3 감소를 보인다. 중앙수로에서는 식생에 의한 항력이 없기 때문에, 측벽에 비해 통수능이 좋다. 따라서 측벽에 비해서 상대적으로 유속이 상승하는 결과를 보이고 있다. 식생이 없을 때의 평균 유속에 비해서 대략 최대 2배의 증가를 보인다.

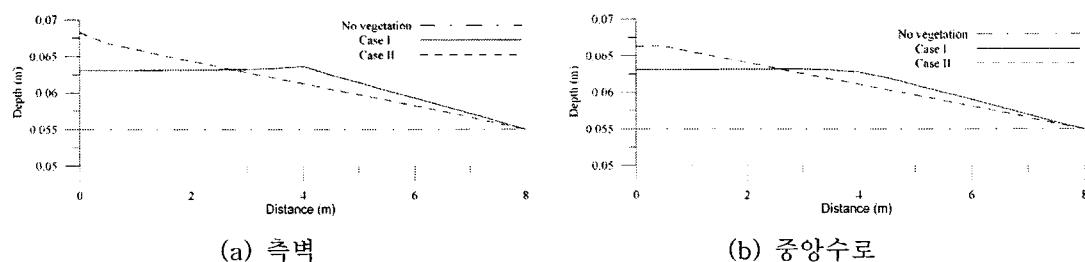


그림 4. 종방향 수심분포

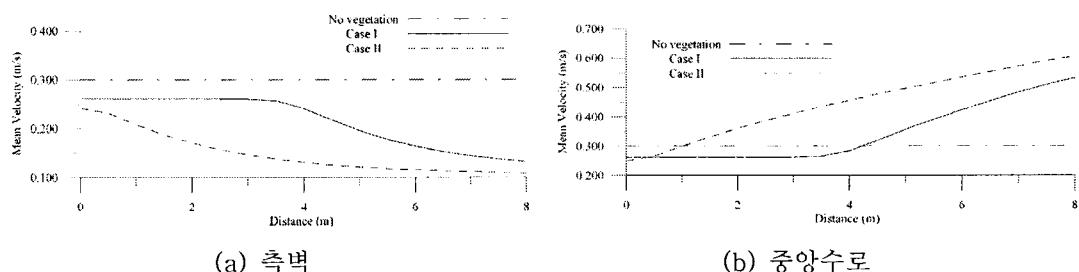


그림 5. 종방향 평균유속분포

4. 결 론

본 연구에서는 식생에 의한 수평 2차원적인 흐름특성 변화를 모의 가능한 수심 적분된 흐름모형을 개발하였다. 친수방정식을 지배방정식으로는 하고, 식생 항력에 대한 정확한 개념을 정립하여 수치모형에 적용하였으며, 식생의 균일 또는 엇갈림 분포에 따른 항력계수 산정이 가능하도록 하였다. 또한 식생에 의한 하상전단응력 변화를 수치모형에 반영하였으며, 개발된 수치모형을 수로 양측면에 식재된 경우에 적용하여 식생에 의한 흐름특성변화를 살펴보았다.

감 사 의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심 기술연구개발사업 (03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

참 고 문 헌

- 강형식, 최성욱 (2004). "식생된 홍수터로 이루어진 복단면 개수로 흐름의 3차원 수치모의." 2004년도 대한토목학회 학술발표회논문집, 대한토목학회, CD-ROM.
- 권기원, 최성욱 (1999). "식생된 개수로 흐름에 대한 $k-\epsilon$ 난류모형." 1999년 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 541-546.
- Chow, V. T. (1959). *Open-channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New-York.
- Darby, S. E. (1999). "Effect of riparian vegetation on flow resistance and flood potential." *J. Hydraul. Eng.*, 125(5), pp. 443-454.
- Lopez, F. and Garica, M. H., (1998). "Open-channel flow through simulated vegetation: Suspended sediment transport mdoeling." *Water Resour. Res.*, 34(9), pp. 2341-2352.
- Shimizu, Y., and Tsujimoto, T. (1994). "Numerical analysis of turbulent open-channel over a vegetation layer using a $k-\epsilon$ turbulence model." *J. Hydroscience and Hydraul. Eng.*, JSCE, 11(2). pp. 57-67.
- Stone, B. M and Shen, H. T. (2002). "Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness." *J. Hydraul. Eng.*, 128(5), pp. 500-506.
- Tsujimoto, T. (1999). "Fluvial process in streams with vegetation." *J. Hydraul. Res.*, 37(6), pp. 789-803.
- Van De Wiel, M. J., and Darby, S. E., (2004). "Numerical modeling of bed topography and bank erosion along tree-lined meandering rivers." in *Riparian Vegetation and Fluvial Geomorphology*, S. J. Bennett and A. Simon (ed.), pp. 267-282, AGU, Washington, D. C.
- Wu, W., and Wang. S. S. Y. (2004). "A depth-averaged two-dimensional numerical model of flow and sediment transport in open channels with vegetation." in *Riparian Vegetation and Fluvial Geomorphology*, S. J. Bennett and A. Simon (ed.), pp. 253-265, AGU, Washington, D. C.
- Wu, W., Shields Jr., F. D., Bennet, S. J., and Wang, S. S. Y. (2005). "A depth-averaged two-dimensional model for flow, sediment transport in open channels with riparian vegetation." *Water Resour. Res.*, 41, W03015.