

홍수터 식생에 의한 흐름방향 확산계수의 영향

Impact of Floodplain Vegetation on Longitudinal Dispersion Coefficient

신재국* · 최성욱** · 김태범***

Shin, Jaekook · Choi, Sung-Uk · Kim, Tae Beom

1. 서 론

산업화와 도시화로 인한 각종 오염물질들이 하천으로 유입되는 경우가 증가하고 있다. 따라서 오염물질의 이동시간과 확산을 정확하게 추정하는 방법은 오염통제나 경고 시스템을 위해 필수적이다. 수질에 대한 관심이 높아지고 있으므로 하천수질관리에 기본정보가 되는 영향인자인 흐름방향 확산계수를 정량적으로 평가하고 예측할 수 있는 수단이 필요하다. 홍수거나 우기에 물고기의 집단폐사는 오염물질의 이송 및 확산 현상 때문이며, 흐름방향 확산계수는 유속분포, 하상의 지형, 식생의 분포에 따라서 변화한다. 특히 자연하천이나 복원하천의 식생은 흐름을 복잡하게 하여 평균흐름의 난류구조를 크게 변화시킨다. 변화된 난류구조로 인해 평균흐름, 횡단면 유속의 분포, 확산계수가 변화한다.

이상호 (2001)는 낙동강 수계 화원, 고령교, 현풍의 하천단면 자료를 이용하여 조도계수를 추정하고 수리학적 하도추적에 의하여 각 수위관측소 지점의 수위-유량 곡선을 제시하였다. 강신욱 등 (2006)은 수위-유량 곡선의 이력효과를 고려하여 낙동강 수계 화원 수위관측소의 고리모양 수위-유량 곡선을 제시하였다. 그러나 이들의 모형은 홍수터의 식생에 의한 영향을 단순히 조도계수로만을 이용하여 반영하였기 때문에 다양한 식생특성이 반영되지 못하는 단점이 있다. Fisher 등 (1979)은 흐름방향 혼합계수를 산정하는 경험식을 제시하고, Green-Duwamish 강에 적용하였으며, 국부 횡방향 혼합계수의 값을 $0.0124m^2/s$ 을 사용하였다. Darby와 Thorne (1996)은 홍수터에 식생이 식재되어 있고, 주수로는 모래 또는 자갈하상을 갖는 자연하천에 대하여, 수위-유량 관계를 예측하는 모형을 개발하였다. 그러나 Darby와 Thorne (1996)의 모형은 식생 높이와 하상재료의 직경만을 변수로 사용하므로, 다양한 조건의 식생에 의한 영향을 제대로 반영하지 못한다. 또한 Darby와 Thorne (1996)의 모형은 Darcy-Weisbach의 마찰계수를 사용하기 때문에 국내에서 주로 이용되는 Manning의 조도계수를 적용하여 수위-유량 곡선을 산정하는 데 어려움이 따른다. 따라서 식생의 직경, 밀도, 높이, 분포상태와 같은 식생의 특성을 고려한 식생의 영향 및 Manning 조도계수를 이용하여 바닥단응력을 고려할 수 있는 횡방향 유속분포 예측 모형의 개발이 필요한 것으로 판단할 수 있다. Perruca 등 (2008)은 식생이 없는 경우와 홍수터에 불규칙한 분포로 식생이 식재되어 있는 경우에 흐름방향 확산계수를 산정하는 모형을 개발하여 기존의 실험자료와 비교하여 모형을 검증하였다. 그러나 자연하천에 적용하지 않아 모형의 정확성을 평가하기 어려운 단점이 있다.

본 연구의 목적은 홍수터에 식생이 식재되어 있는 복단면 개수로의 식생의 밀도에 따른 횡방향 유속분포를 예측하고, 흐름방향 확산계수의 영향을 분석하는 것이다. 식생이 횡방향 유속분포에 미치는 영향을 반영하기 위해 식생의 밀도, 직경, 높이, 분포 상태를 고려하였다. 또한, Manning의 조도계수를 이용하여 바닥단응력을 평가할 수 있도록 하였다.

2. 1차원 흐름모형의 지배방정식

본 연구에서는 Manning의 조도계수를 사용하고, 식생의 다양한 특성을 고려할 수 있는 수위-유량 곡선

* 연세대학교 토목환경공학과 석사과정 · 공학사 · E-mail : sjk1023@yonsei.ac.kr - 발표자

** 정희원 · 연세대학교 토목환경공학과 교수 · 공학박사 · E-mail : schoi@yonsei.ac.kr

*** 정희원 · 연세대학교 토목환경공학과 박사후연구원 · 공학박사 E-mail: geo108@naver.com

산정 및 횡방향 유속산정 모형을 개발하였다. 지배방정식은 Wark 등 (1990)이 제시한 운동량 방정식을 사용하였으며, 다음과 같다.

$$ghS - \frac{1}{\rho}\tau_b + \frac{\partial}{\partial y}\left(\nu_t \frac{\partial q}{\partial y}\right) - \frac{1}{\rho}F_{vD} = 0 \quad (1)$$

여기서 g 는 중력가속도, h 는 수심, S 는 흐름방향 에너지경사, τ_b 는 하상전단력으로 Manning의 공식을 이용하여 계산되며 ($= \rho g n^2 h^{-7/3} q^2$), y 는 횡방향좌표, q 는 y 방향의 단위폭당 유량, ρ 는 유체의 밀도, 그리고 ν_t 는渦점성 계수로 다음식을 이용하여 산정한다.

$$\nu_t = \alpha U^* h \quad (2)$$

여기서 α 는 무차원渦점성 계수로 0.16 을 사용한다 (Darby 와 Thorne, 1996). 식 (1)에서 F_{vD} 는 식생에 의한 항력이고 이때 η_v 는 식생높이와 수심의 비율을 나타내는 계수이며, 다음과 같다.

$$F_{vD} = \frac{1}{2} C_D \rho A_v \frac{\min(h, h_v)}{h} \eta_v^2 U^2 \quad (3)$$

$$\eta_v = \left[\frac{1 - d_v \sqrt{N_v}}{\min(h, h_v) - \frac{1 - d_v \sqrt{N_v}}{h} d_v \sqrt{N_v}} \right] \quad (4)$$

여기서 h 는 수심, h_v 는 식생높이, 그리고 항력계수(C_D)는 항력계수로써, Stone과 Shen (2002)이 제시한 다음 식을 이용하여 산정한다.

$$C_D = \frac{C_{Dm}}{\left(1 - \frac{d_v}{s_v}\right)^2} \quad (\text{균일한 분포}) \quad (5)$$

$$C_D = \frac{C_{Dm}}{\left(1 - d_v \sqrt{N_v}\right)^2} \quad (\text{엇갈린 분포}) \quad (6)$$

여기서 s_v 는 식생줄기 사이의 간격, d_v 는 식생의 직경, N_v 는 단위면적당 식생의 개수, 그리고 C_{Dm} 은 식생줄기가 분포하는 단면에서의 항력계수로써 Stone과 Shen (2002)은 1.05를 제안하였다. 식 (1)의 수치해를 구하기 위해서 유한차분식을 이용한 Newton-Raphson 법을 적용하였다.

3. 흐름방향 확산계수의 산정

하천으로 유입된 오염물질은 이송 및 확산 과정을 통하여 흐름방향, 횡방향 및 연직방향으로 이동한다. 하천의 수심과 하폭은 유로연장에 비해 매우 작기 때문에 하천 단면에 걸쳐 완전히 혼합된 후에는 흐름방향 확산거동이 하류부 수질예측에 중요한 인자이다. Fisher 등 (1979)은 흐름방향 혼합계수를 산정하는 경험식을 제시하였으며, 다음과 같다.

$$K = -\frac{1}{A} \int_0^W u' d \int_0^y \frac{1}{\epsilon_t d} \int_0^y u' d dy dy dy \quad (7)$$

여기서 A 는 유수단면적, u' 은 평균유속과 국부유속의 편차, d 는 국부 수심, y 는 횡방향 좌표, W 는 하폭, ϵ_t 는 국부 횡방향 혼합계수로서 Fisher 등 (1979)이 제시한 $0.0124m^2/s$ 을 사용하였다.

4. 1차원 흐름모형의 검증

Darby와 Thorne (1996)이 제시한 영국의 Severn river의 수위-유량 자료를 이용하여 모형을 검증하였다. 본 연구에서 개발된 모형을 Severn river에 적용하여 RMS 검정을 실시한 결과, 주수로에서는 0.026, 홍수로에서는 0.045의 Manning 조도계값을 갖는 것으로 나타났다. 그림 1을 살펴보면, 본 연구에서 개발된 모형이 0~4 m 수위에서는 유량이 과대 산정되고, 4~6 m 수위에서는 과소 산정되었다. 강턱유량 이상에서는 유량을 다소 과대산정하고 있지만, 개발된 모형의 결과는 대체적으로 Darby와 Thorne (1996)의 관측치

와 유사한 결과를 보인다. 따라서 본 모형은 조도계수와 식생정보가 제시된다면, 수위-유량 곡선을 비교적 정확하게 예측하는 것으로 나타났다.

5. 모형의 적용

안성천 수계 평택 지점에 본 연구를 통해 개발된 모형을 적용하였다. 그림 2는 평택의 횡단 지형을 나타내며, 하상경사는 안성천 수계 하천정비기본계획 (2002)을 참조하여 0.001127을 적용하였다. 그림 3은 본 연구에서 개발된 모형을 적용하여 계획홍수위 7.98 m에 대해 얻은 수위-유량 곡선이다. 그림에서 볼 수 있듯이 2002년에서 2005년 실측 자료와 비교적 잘 일치하고 있으며, 이 때 RMS 검정을 통해 산정된 조도계수는 주수로 0.047, 홍수터 0.058 이다. 주수로와 홍수터의 조도계수가 안성천 수계 하천정비기본계획 (2002)에서 제시된 값 (주수로 = 0.025, 홍수터 = 0.04) 보다 크게 산정되었다. 그림 4는 식생밀도의 변화에 따른 횡방향 유속 분포를 도시한 것이다. 조도계수만 반영하였을 경우 전체 평균유속은 1.74 m/s, 주수로의 평균유속은 2.49 m/s, 홍수터의 평균유속은 1.21 m/s로 모의되었다. 이는 일반적으로 알려진 복단면 수로의 특성과 일치하는 것이다.

횡방향 유속분포에 식생이 미치는 영향을 분석하기 위해, 홍수터에 직경 0.1 m, 높이 0.2 m, 엇갈리게 분포된 식생이 식재되어있다고 가정하여 수치모의를 실시하였다. 식생이 없는 경우와 식생 밀도 0.05, 1.00, 2.00, 4.00 m^{-1} 다섯 가지 경우에 대한 횡방향 유속분포는 유량이 일정할 때, 식생에 의한 저항력의 증가로 식생의 밀도가 높아질수록 홍수터와 주수로 사이의 유속차가 커지는 것을 볼 수 있다. 그림 5는 식생 밀도의 변화에 따른 흐름방향 확산계수의 변화를 도시한 것이다. 식생의 밀도가 커질수록 주수로와 홍수터 사이의 유속차가 커지므로 더 큰 전단력이 발생하여 흐름방향 확산계수가 증가하는 것을 볼 수 있다.

6. 결 론

본 연구를 통해 하상의 저항력을 산정하기 위해 Manning의 조도계수를 사용하고 식생에 의한 저항력을 보다 정확하게 모의하기 위하여 식생의 밀도, 직경, 높이, 분포상태를 고려할 수 있는 흐름모형을 개발 하였다. 개발된 모형을 영국의 Severn river에 적용하고, Darby와 Thorne (1996)의 관측치와 비교하여 유사한 모형을 검증하였다. 또한 안성천 평택에 개발된 모형을 적용하여 조도계수를 검정하고 식생의 영향을 고려한 횡방향 유속분포를 제시하였다. 홍수터의 식생을 고려할 때, 식생에 의한 저항력의 증가로 홍수터의 횡방향 유속이 감소하여, 주수로와 홍수터 사이의 유속차가 커지는 것을 확인하였다. 홍수터와 주수로의 유속차가 커지면, 횡방향 수체 사이의 전단력이 커지므로 흐름방향 확산계수가 증가하는 것을 볼 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 및 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업의 연구비지원(과제명: Ecoriver21, 과제번호: 06건설핵심B01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 강신욱, 이상호, 황만하 (2006). "화원 수위관측소 지점의 고리모양 수위-유량 관계곡선 작성." **한국수자원학회 논문집**, 39(6), 487-494.
2. 안성천 수계 하천정비기본계획 (2002). 국토해양부.
3. 이상호 (2001). "수위관측과 수리학적 하도추적에 의한 수위-유량 관계식 작성." **한국수자원학회 논문집**, 34(5), 551-560.
4. Darby, S.E. and Thorne, C.R. (1996). "Predicting stage-discharge curves in channels with bank vegetation." *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(10), 583-586.

5. Hogo, B.F., John, E.L., Koh, C.R., Imberger, J., and Brooks, N.H. (1979). *Mixing in inland and coastal waters*, Academic Press, Inc., U.K.
6. Perucca, E., Camporeale, C., and Ridolfi, L. (2008) "Estimation of the dispersion coefficient in rivers with riparian vegetation." *Advances in Water Resources*, 32, 78–87.
7. Stone, B.M. and Shen, H.T. (2002). "Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness." *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(5), 500–506.
8. Wark, J.B., Samuels, P.G., and Ervine, D.A. (1990). *A practical method of estimation velocity and discharge in a compound channel*, Flood Hydr., White, W.R. ed., John Wiley and Sons, Inc., U.K.

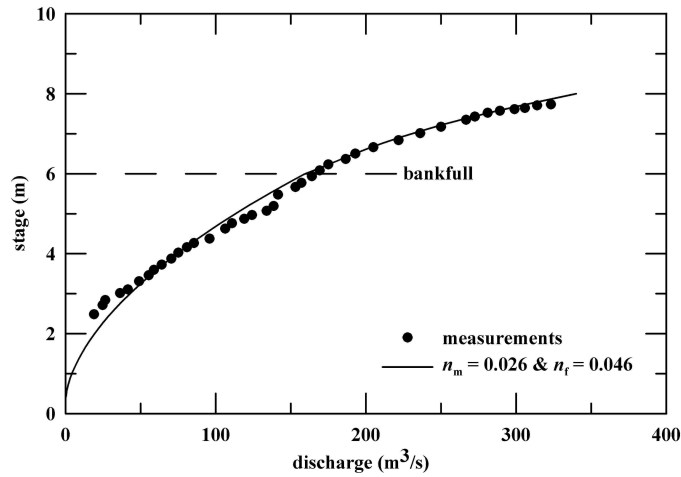


그림 2. Darby와 Thorne (1996)의 관측치와 개발된 모형의 결과 비교

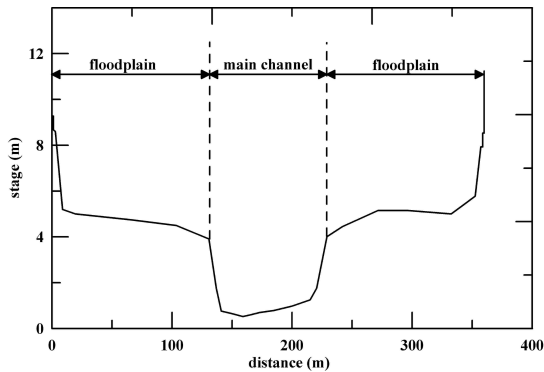


그림 2. 평택지점의 횡단 지형

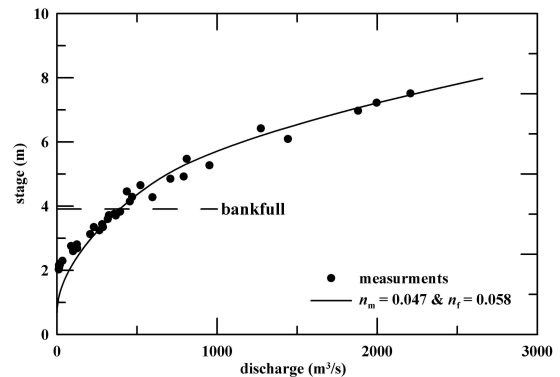


그림 4. 평택지점의 수위-유량 곡선

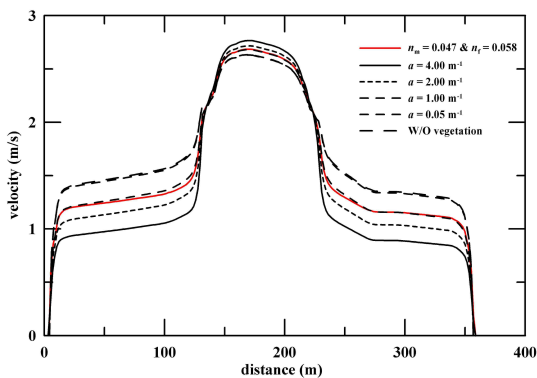


그림 4. 식생밀도에 따른 횡방향 유속 분포

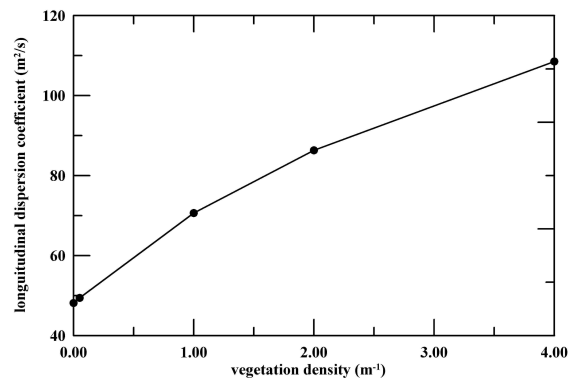


그림 6. 식생밀도에 따른 흐름방향 확산계수 변화