

복단면 개수로에서의 수위-유량 곡선 및 단위유량 예측

Prediction of stage-discharge curve and unit discharge in compound open-channel

신재국*, 김태범**, Pham Van Chien***, 최성욱****
Jaekook Shin, Tae Beom Kim, Pham Van Chien, Sung-Uk Choi

요 지

하천의 수위와 유량에 대한 정확한 정보는 이수, 치수와 같은 수자원 관리에 있어서 가장 기본 물리량이며, 각종 물이용 분쟁 해결, 수공구조물의 설계, 하천의 유사량 산정 및 수리·수문모형의 개발, 검증에 위한 기초자료로 이용된다. 그러나 유량의 직접 측정은 많은 비용이 소요되며, 홍수 시에는 측정이 불가능하다. 지속적인 유량자료의 실측은 얻는 것은 매우 어렵다. 따라서 최근 수치 모형을 이용하여 수위-유량 곡선을 예측하고자 하는 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 복단면 및 불규칙한 하상을 갖는 개수로의 수위-유량 곡선 및 단위유량 예측모형을 개발하고자 한다. 수심 적분된 2차원 운동량 방정식으로부터 정상류와 등류 조건을 가정하여 지배방정식을 구성하였으며, Manning 조도계수를 사용하여 자갈 및 모래와 같은 하상재료에 의한 전단력을 산정한다. 또한 식생항력을 이용하여 홍수터 및 제방의 식생이 수위-유량에 미치는 영향을 분석하였다.

핵심용어 : 수위-유량곡선, 식생, 복단면, 단위유량

1. 서 론

임의의 단면을 흐르고 있는 유량을 연속적으로 실측하는 것은 기술적, 경제적으로 대단히 어렵다. 따라서 일반적으로 관측이 용이한 하천수위를 연속 측정 후, 수위-유량 곡선을 이용하여 유량으로 환산한다. 과거 등한시되던 하천의 심미적, 환경적 기능이 주목을 받으면서 근래에는 하천의 복원 및 친수성 확보를 위한 사업이 활발하게 진행되고 있다. 이러한 하천의 복원 및 친수성 확보를 위한 사업에서 필수 요소인 식생은 동·식물의 서식처 제공, 수질의 개선, 환경적 다양성 확보 등 많은 순기능을 가지고 있다. 그러나 식생에 의한 저항력 증가는 홍수시 수위의 상승, 통수능 저하와 같은 역기능을 야기한다.

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 조도계수만

* 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 석사과정 · E-mail : sjk1023@yonsei.ac.kr
** 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사후 연구원 · E-mail : geo108@naver.com
*** 연세대학교 사회환경시스템공학부 석사과정 · E-mail : chien@yonsei.ac.kr
**** 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수 · E-mail : schoi@yonsei.ac.kr

을 이용하여 반영하였기 때문에 다양한 식생특성이 반영되지 못하는 단점이 있다. 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, 식생의 밀도, 식생의 직경과 같은 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, 높이와 같은 식생의 특성을 고려한 식생의 영향 및 Manning 조도계수를 이용하여 바닥단응력을 고려할 수 있는 모형의 개발이 필요한 것으로 판단할 수 있다.

본 연구의 목적은 홍수터에 식생이 식재되어 있는 복단면 개수로에 적용할 수 있는 수위-유량 곡선의 예측 모형 개발이다. 식생항력을 산정하기 위해 식생의 밀도, 직경, 높이, 분포 상태를 이용하여 식생이 수위-유량 곡선에 미치는 영향을 반영하였고, Manning의 조도계수를 이용하여 바닥단응력을 평가할 수 있도록 하였다.

2. 지배방정식

Darby와 Thorne (1996)은 Wark 등 (1990)이 제시한 운동량 방정식을 사용하여 수위-유량 곡선을 제시하였다. 그러나 Darcy-Weisbach의 마찰계수보다 Manning의 조도계수가 많이 사용되고 있고, 식생의 높이만을 고려하는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 Manning의 조도계수를 사용하고, 식생항력을 고려할 수 있는 모형을 개발하였다. 흐름상태가 정상류일 경우, 복단면 개수로 흐름의 운동량방정식은 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.

$$\nu_t = NEVU^*h \quad (2)$$

여기서 NEV 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.

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

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

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. 현재 개발된 모형은 만곡부에서의 이차류를 고려하지 않으므로, 만곡부 편수위의 영향을 반영하지 못하며, 또한 등류를 가정하기 때문에 부등류에 대한 수치모의는 수행하지 못한다.

3. 모형의 검증

영국의 Severn river의 수위-유량 자료 (Darby와 Thorne, 1996)를 이용하여 모형의 검증을 실시하였다. Darby와 Thorne (1996)이 제시한 Severn river의 주수로와 홍수터에서의 Darcy-weisbach 마찰계수 평균값을 Manning 조도계수로 환산하면 각각 0.025, 0.036이다. 본 연구에서 개발된 모형을 Severn river에 적용하여 RMS 검정을 실시한 결과, 주수로에서는 0.026, 홍수터에서는 0.045의 Manning 조도계수를 갖는 것으로 나타났다. 그림 1을 살펴보면, 본 연구에서 개발된 모형이 0~4 m 수위에서는 유량이 과대 산정되고, 4~6 m 수위에서는 과소 산정된다. 강턱유량 이상에서는 유량을 다소 과대산정하고 있지만, 개발된 모형의 결과는 대체적으로 Darby와 Thorne (1996)에 의해 개발된 모형의 결과 및 관측치와 유사한 결과를 보인다.

4. 모형의 적용

진위천 수계 동연교 지점에 본 연구를 통해 개발된 모형을 적용하였다. 그림 2는 동연교의 횡단 지형을 나타내며, 하상경사는 안성천 수계 하천정비기본계획 (2002)을 참조하여 0.000413을 적용하였다. 그림 3은 본 연구에서 개발된 모형을 적용하여 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 0.055 이다. 주수로와 홍수터의 조도계수가 안성천 수계 하천정비기본계획 (2002)에서 제시된 값 (주수로 = 0.025, 홍수터 = 0.04) 보다 크게 산정되었다. 그 이유는 2000년부터 2008년 까지 시행하였던 진위천 강변도로 공사로 인한 영향이라고 생각된다. 그림 4는 횡방향 단위유량 분포 및 유속 분포를 도시한 것이다. 주수로가 전체유량의 88.45%, 홍수터가 11.55%의 유량을 통수하고 있으며, 주수로의 평균유속은 1.69 m/s, 홍수터의 평균유속은 0.76 m/s로 모의되었다. 이는 일반적으로 알려진 복단면 수로의 특성과 일치하는 것이다.

수위-유량 곡선에 식생이 미치는 영향을 분석하기 위해, 홍수터에 직경 0.1 m, 높이 0.2 m, 엇갈리게 분포된 식생이 식재되어있다고 가정하여 수치모의를 실시하였다. 그림 5는 식생이 없는 경우와 식생 밀도 0.05, 1.00, 2.00 m^{-1} 세 가지 경우에 대한 수위-유량 곡선을 도시한 것이다. 식생에 의한 저항력의 증가로 식생의 밀도가 높아질수록 동일한 유량에서 수위가 상승하는 것을 볼 수 있다. 그림 6과 그림 7은 식생밀도 변화에 따른 단위유량 분포 및 유속분포 변화를 도시한 것이다. 식생의 밀도가 증가할수록 식생에 의한 저항력이 커져 홍수터에서의 통수능이 각각 0.16 %,

2.47 %, 4.05 % 및 유속이 각각 0.34 %, 5.28 %, 8.62 % 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 식생의 영향이 없는 주수로에서 단위유량 및 유속분포는 변화가 없다.

6. 결 론

본 연구를 통해 하상의 저항력을 산정하기 위해 Manning의 조도계수를 사용하고 식생에 의한 저항력을 보다 정확하게 모의하기 위하여 식생의 밀도, 직경, 높이를 고려할 수 있는 모형을 개발하였다. 개발된 모형을 영국의 Severn river에 적용하고, Darby와 Thorne (1996) 모형 결과 및 관측치와 비교하여 유사한 모형의 정확성을 확인하였다. 또한 진위천 동연교에 개발된 모형을 적용하여 조도계수를 검정하고 식생의 영향을 고려한 수위-유량 곡선을 제시하였다. 홍수터의 식생을 고려할 때, 식생에 의한 저항력의 증가로 유량 및 유속이 감소하고, 수위가 상승하는 것을 확인하였고, 식생의 영향이 없는 주수로에서 횡방향 단위유량과 유속은 변화가 없음을 확인하였다. 개발된 모형을 사용하여 주어진 자연하상의 단면과 조도계수, 하상경사, 식생정보를 이용하여 복단면 하천의 수위-유량 곡선과 횡방향 거리에 따른 단위유량 및 유속을 예측할 수 있다. 따라서 하천 홍수터 설계 시 개발된 모형을 적용함으로써, 식생에 의한 보다 정확한 수위의 상승효과를 산정하여 보다 안전한 하천단면 설계가 가능하리라 기대한다. 단, 현재까지 개발된 모형은 만곡부에서의 이차류를 고려하지 않으므로, 만곡부 편수위의 영향을 반영하지 못하며, 또한 등류를 가정하기 때문에 부등류에 대한 수치모의는 수행하지 못한다. 향후 연구를 통해 보완해야 할 과제이다.

감 사 의 글

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

참 고 문 헌

- 강신욱, 이상호, 황만하 (2006). “화원 수위관측소 지점의 고리모양 수위-유량 관계곡선 작성.” **한국수자원학회 논문집**, 39(6), 487-494.
- 안성천 수계 하천정비기본계획 (2002). 국토해양부.
- 이상호 (2001). “수위관측과 수리학적 하도추적에 의한 수위-유량 관계식 작성.” **한국수자원학회 논문집**, 34(5), 551-560.
- 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.
- 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.
- 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.

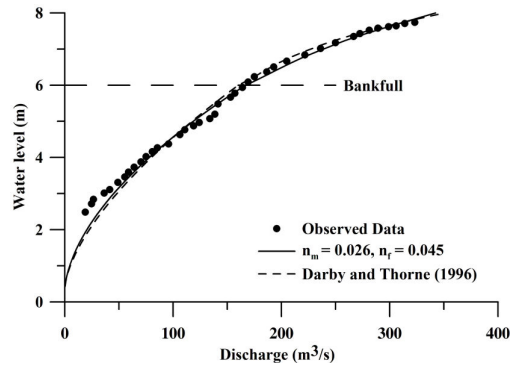


그림 1. Darby와 Thorne (1996)의 모형과 개발된 모형의 결과비교

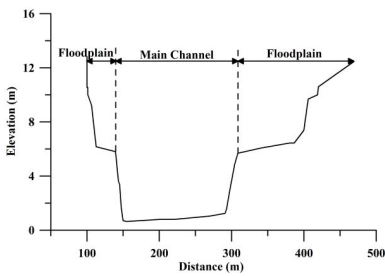


그림 2. 지형 입력자료

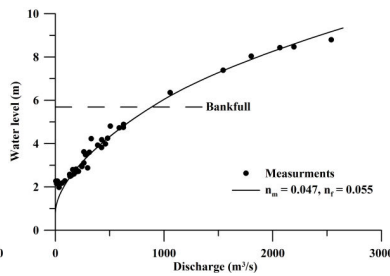


그림 3. 수위-유량 곡선

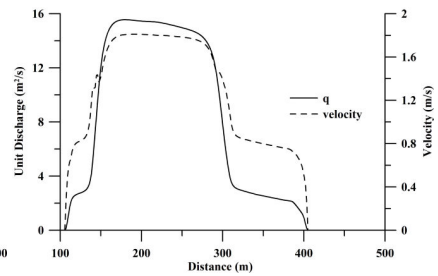


그림 4. 단위유량 및 유속 분포

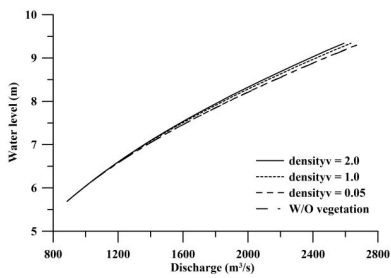


그림 5. 식생밀도변화에 따른 수위-유량 곡선

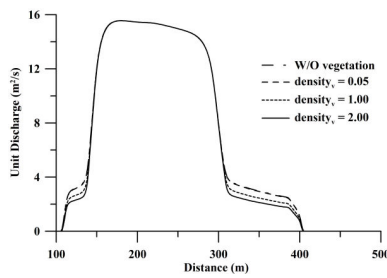


그림 6. 식생밀도변화에 따른 단위유량분포 변화

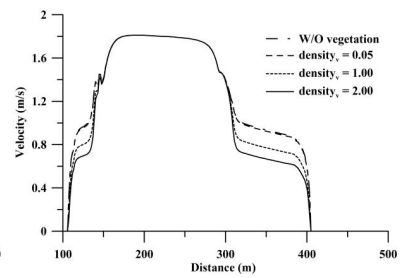


그림 7. 식생밀도변화에 따른 유속분포 변화