

홍수터 식생을 고려한 불규칙한 단면에서의 수위-유량 곡선 및 단위유량 횡분포 예측

Prediction of Stage Discharge Curve and Lateral Distribution of Unit Discharge in an Arbitrary Cross Section Channel with Floodplain Vegetation

김 태 범* / 장 지 연** / 신 재 국*** / 최 성 욱****

Kim, Tae Beom / Jang, Jiyeon / Shin, Jaekook / Choi, Sung-Uk

Abstract

A numerical model was developed to predict the stage-discharge curve and lateral distribution of unit discharge in open channels with nonuniform cross section or compound open-channels. The governing equation is the one-dimensional momentum equation based on assumptions of the steady and uniform flow conditions in the longitudinal direction and the uniform water surface elevation in a cross section. Vegetative drag force term was included in governing equation in order to reflect the effect of floodplain vegetation on the flow characteristics. Finite element method was applied to obtain the numerical solution of the governing equation. Stage-discharge curve and lateral distribution of unit discharge for a given water surface are calculated based on input data, such as the cross sectional geometry, Manning's roughness coefficient, vegetative information and longitudinal slope of channel bed. The developed model was verified by comparing the calculated results with the observed data and the results of Darby and Thorne's(1996) model and the nonlinear $k-\epsilon$ model. The verified model was applied to estimate the upstream boundary conditions in two-dimensional flow model. The numerical results using laterally distributed unit discharge were compared with those obtained using uniformly distributed unit discharge in two-dimensional flow model.

Keywords : stage-discharge curve, lateral distribution of unit discharge, vegetation, floodplain

요 지

본 연구에서는 복단면 개수로 및 불규칙한 하상을 보이는 횡단면 상에서의 수위-유량 곡선 및 단위유량 횡분포 예측을 위한 유한요소모형을 개발하였다. 지배방정식은 정상류와 종방향 등류를 가정한 운동량방정식을 이용하며, 수면은 횡단면에 걸쳐 일정하다고 가정한다. 홍수터 식생의 영향을 반영하기 위해 식생항력이 지배방정식에 포함되었으며, 수치해를 구하기 위해 유한요소법을 적용하였다. 단면형상과 Manning의 조도계수, 식생정보, 종방향 하상경사를 입력자료로 수위-유량 곡선을 예측 가능하며, 주어진 수위에서의 흐름방향 단위유량의 횡방향 분포를 예측할 수 있다. 개발된 모형의

*연세대학교 공과대학 토목환경공학과 연구원 (e-mail: geo108@naver.com)

Researcher, Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

**교신저자, 연세대학교 공과대학 토목환경공학과 석사과정 (e-mail: jiyeon83@yonsei.ac.kr)

Corresponding Author, Graduate student, Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

*** (주)한양 토목사업본부 기술영업팀 사원 (e-mail: sjk1023@hycorp.co.kr)

Staff, Hanyang Corporation, Seoul 138-731, Korea

****연세대학교 공과대학 토목환경공학과 교수 (e-mail: schoi@yonsei.ac.kr)

Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

검증을 위해 실측자료 및 Darby and Thorne (1996)의 모형 결과, 그리고 비선형 $k-\epsilon$ 모형의 결과와도 비교하였다. 검증된 모형의 알고리즘을 2차원 모형의 상류단 경계조건 설정에 활용하여, 유입유량을 절점별 단위유량으로 분배시켰을 때와 그렇지 않았을 때의 결과를 비교하였다.

핵심용어 : 수위-유량 곡선, 단위유량 횡분포, 식생, 홍수터

1. 서론

과거 이수와 치수만을 목적으로 진행되던 사업에서 최근에는 하천의 복원 및 친수성 확보를 위한 사업이 활발하게 진행되고 있으며, 이에 따라 하천의 심미적, 생태적 기능이 주목을 받고 있다. 이러한 하천 복원 및 친수성 확보를 위한 사업에서 필수 요소인 식생은 서식처 제공, 수질의 개선, 환경적 다양성 확보 등 많은 순기능을 가지고 있다. 그러나 식생에 의한 저항력 증가는 홍수 시 수위의 상승, 통수능 저하와 같은 역기능을 야기한다. 또한 하천 복원을 위한 사업의 일환으로 수로 폭의 변경이나 수심 확보를 위한 하상굴착 등은 하천 단면의 변화를 가져오며, 변화된 단면에서의 수위-유량 관계를 정확히 파악할 필요성도 대두되었다.

임의의 단면을 통해 흘러 나가는 유량을 연속적으로 실측하는 것은 기술적, 경제적으로 대단히 어렵다. 따라서 일반적으로 관측이 용이한 하천수위를 연속 측정 후, 유량으로 환산하는 방법을 적용하고 있으며, 국내에서는 주로 회귀분석 등의 통계적 기법을 적용하고 있다(문영일 등, 2003; 김상욱과 이길성, 2008; 이우석 등, 2008; 이창해, 2008). 또한 특정 수계에만 적용 가능한 수위-유량 관계곡선식(이용희와 이상배, 1998; 유주환, 1999; 조홍제 등, 2000; 이상호, 2001; 이재준 등, 2009)을 제시하고 있다. 한계점도 있다. 강신욱 등(2006)은 수위-유량 곡선의 이력효과를 고려하여 낙동강 수계 하천 수위관측소의 고리모형 수위-유량 곡선을 제시하였다. 그러나 이들 모형은 홍수터의 식생에 의한 영향을 단순히 조도계수만을 이용하여 반영하였기 때문에 다양한 식생특성을 반영하지 못한다는 단점이 있다. Darby and Thorne (1996)은 홍수터에 식생이 식재되어 있고, 주수로는 모래 또는 자갈하상을 갖는 자연하천에 대하여, Wark et al. (1990)이 제시한 운동량 방정식을 적용하여 수위-유량 관계를 예측하는 모형을 개발하였다. 그러나 Darby and Thorne (1996)의 모형은 식생 높이와 하상재료의 크기만을 변수로 사용하므로, 식생의 밀도, 식생 직경과 같은 다양한 조건의 식생에 의한 영향을 제대로 반영하지 못한다. 이신재와 박상우(2006)는 자갈하상의 전단력을 이용한 등가조도 산정을 위하여 Wark et al. (1990)의 수리역학 모형을 이용

하였으나, 모의 영역을 주수로에만 국한하여 난류항과 홍수터의 식생이 제외된 간단한 형태만을 적용하였다.

따라서 본 연구에서는 복단면 개수로 및 불규칙한 하상을 보이는 횡단면 상에서의 수위-유량 곡선 예측 및 단위유량 예측을 위한 유한요소모형을 개발하고자 한다. 지배방정식은 Wark et al. (1990)이 제시한 운동량방정식과 유사한 형태를 이용하며, 홍수터 식생 유무에 따라 식생의 밀도, 직경, 높이, 분포 상태를 이용하여 식생이 수위-유량 곡선에 미치는 영향을 반영하도록 하고, Manning의 조도계수를 이용하여 바닥전단응력을 평가할 수 있도록 한다. 개발된 모형의 검증을 위해 실측자료와 비교하며, 또한 Darcy-Weisbach 마찰계수를 이용하는 Darby and Thorne (1996)의 모형 결과와도 비교한다. 검증된 모형의 알고리즘을 2차원 모형의 상류단 경계조건 설정에 활용하여, 절점별 유입유량을 단위 폭 당 유량으로 차등분배시켰을 때와 그렇지 못했을 때의 결과를 비교하고자 한다.

2. 수치이론

개발된 수위-유량 곡선 예측 모형의 이해를 돕기 위해서, 우선 Darby and Thorne (1996)의 모형을 소개한 후, 개발모형에 관한 지배방정식 및 수치해법에 대해서 기술한다.

2.1 Darby and Thorne (1996)의 수위-유량 곡선 모형

2.1.1 지배방정식

Darby and Thorne (1996)은 불규칙한 횡단지형을 가지고, 주수로 양쪽에 홍수터가 존재할 때에 수위-유량 곡선을 산정하는 모형을 제시하였다. 주수로의 하상은 자갈로 구성되어 있고, 홍수터에는 식생이 존재할 때 Darcy-Weisbach 마찰계수를 산정한 후, 수리학적 모형을 적용하여 각 절점에서의 단위 폭 당 유량을 산정한다. Darby and Thorne (1996)은 Wark et al. (1990)이 제시한 아래와 같은 식을 지배방정식으로 채택하였다.

$$ghS_x - \frac{B_s f q^2}{8h^2} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t \frac{\partial q}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

여기서, g 는 중력가속도, h 는 수심, S_x 는 종방향 수로경사, f 는 Darcy-Weisbach 마찰계수, ν_t 는 난류 동점성 계수, y 는 횡단면에 평행한 방향으로의 축을 나타내며, B_s 는 Wark et al. (1990)이 제시한 다음과 같이 계산되는 계수이다.

$$B_s = \sqrt{1 + S_x^2 + S_y^2} \quad (2)$$

여기서, S_y 는 횡방향 경사이다. Eq. (1)은 이차류를 고려하지 않으며, 정상류, 종방향 등류 및 횡방향 수평 수면 등을 가정하여 2차원 천수방정식으로부터 유도 가능하다. Eq. (1)에서 난류 동점성 계수는 다음과 같이 계산된다.

$$\nu_t = \neq VU_*h \quad (3)$$

여기서, $U_* (= \sqrt{ghS_x})$ 는 전단속도이며, $\neq V$ 는 무차원의 동점성 계수로써 보통 0.16의 근사치를 사용하며, 수로 횡단면에 걸쳐 일정한 값을 가정한다. Eq. (1)에서 Darcy-Weisbach 마찰계수를 산정하기 위해서, Masterman and Thorne (1992, 1994)이 제안한 계산 과정을 적용한다. Masterman and Thorne (1992, 1994)은 기본적으로 아래와 같은 Hey (1979)의 경험식에 기초하여 Darcy-Weisbach 마찰계수를 산정하였다.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.03 \log \frac{a_s R}{3.5d_{s4}} \quad (4)$$

여기서, R 은 동수반경, d_{s4} 는 누가 통과율 84% 하상재료 입경이며, a_s 는 형상 보정계수로써 다음과 같이 계산된다.

$$a_s = 11.1 \left(\frac{R}{h_{\max}} \right)^{-0.314} \quad (5)$$

여기서, h_{\max} 는 최대 수심을 나타낸다. 식생이 존재하는 영역에서의 Darcy-Weisbach 마찰계수 산정을 위해서, 다음과 같은 Kouwen (1988)의 경험식을 사용한다.

$$k = 0.14h_v \left[\frac{(mei/\tau)^{0.25}}{h_v} \right]^{1.59} \quad (6)$$

$$mei = 319h_v^{2.3} \quad \text{for green-growing grass} \quad (7)$$

$$mei = 25.4h_v^{2.26} \quad \text{for dormant or dead grass} \quad (8)$$

여기서, h_v 는 식생높이, τ 는 하상 전단응력을 나타낸다.

2.1.2 계산과정

Darby and Thorne (1996)은 Darcy-Weisbach 마찰계수 산정에 있어서, 자갈하상과 식생영역 2 가지로 구분한 반면에, Darby (1999)는 이를 더욱 확장하여 자갈뿐만 아니라 모래하상까지 구분하였으며, 식생영역에 있어서는

곧은 식생과 유연한 식생으로 분류하였다. 본 연구에서는 Darby and Thorne (1996)의 횡단면에서의 수위-유량 산정 과정에 따라 모형을 재현하였으며, 재현된 모형의 계산 과정은 아래와 같다.

- (1) 수로 형상, 수로 경사, 바닥 입자크기와 식생 높이와 같은 조도특성 등 기본 정보를 입력하고, 주어진 수면 높이까지 수심을 50 등분한다.
- (2) 해당 수위에 대해서, 150~200개의 절점을 가지도록 횡방향 분할하고, 각 절점에서의 수심을 계산한다.
- (3) 자갈하상의 경우 Eq. (4)를 이용하여 Darcy-Weisbach 마찰계수를 계산한다. 식생영역의 경우에는 Eqs. (6)~(8)을 이용하여 조도높이 k 를 계산한 후, Eq. (4)의 $3.5d_{s4}$ 대신에 계산된 k 를 이용하여 Darcy-Weisbach 마찰계수를 계산한다. 이 때 첫 번째 계산단계일 경우에는 $\tau = \gamma h S$ 를 적용한다.
- (4) 수로 양측의 경계부에 $q=0$ 의 경계조건을 적용하여, Eq. (1)의 수치해를 구한 후, 각 절점에서 구해진 단위 폭 당 유량을 횡방향으로 적분하여 총유량 Q 를 산정한다.
- (5) Eq. (1)의 2번째 항에 유체밀도를 곱하여 전단응력 τ 를 갱신한다.
- (6) 식생 영역에서 갱신된 전단응력을 적용하여 마찰계수 f 를 재계산한다.
- (7) (4)번 단계를 반복 수행하여 q 와 Q 를 갱신한 후, 앞선 단계의 Q 와 갱신된 Q 를 비교하여 허용오차 이내에 들면, 반복계산을 중단하고, 그렇지 않으면, (5)~(7)번 단계를 반복한다.
- (8) 수위-유량 결과를 출력과일에 작성하고, 수위를 한 단계 상승시켜 (2)~(8)번 단계를 반복한다.

2.2 수위-유량 곡선 모형의 개발

2.2.1 지배방정식

Darby and Thorne (1996)은 Wark et al. (1990)이 제시한 운동량 방정식을 사용하여 수위-유량 곡선 모형을 제작하였으나, 국내에서는 Darcy-Weisbach 마찰계수보다 Manning의 조도계수를 바닥의 거칠기를 나타내는 기준으로 사용하고 있다. 또한 Darby and Thorne (1996)의 모형에서는 Eqs. (6)~(8)과 같이 식생높이만으로 식생의 영향이 결정된다고 볼 수 있다. 하지만 실제로는 식생높이뿐만 아니라 식생줄기의 굵기, 식생밀도, 식생배열 등 다양한 요인에 따라 흐름특성이 바뀔 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Manning의 조도계수를 사용하고, 식생 항력이 포함된 아래와 같은 식을 본 모형의 지배방정식으로 사용한다.

$$ghS_x - \frac{1}{\rho}\tau + \frac{d}{dy}\left(\nu_t \frac{dq}{dy}\right) - \frac{1}{\rho} \frac{N_v F_D}{1-c_v} = 0 \quad (9)$$

여기서, ρ 는 유체밀도, N_v 는 식생줄기 개수, F_D 는 하나의 곧은 식생 줄기에 의한 항력, c_v 는 식생체적농도이며, 좌변 마지막항의 분모 $1-c_v$ 는 식생줄기를 제외한 유체만을 고려하기 위한 것이다. Eq. (9)에서 하상 전단 응력은 Manning의 공식을 적용하여 다음과 같이 계산된다.

$$\tau = \rho \frac{gn^2}{h^{7/3}} q^2 \quad (10)$$

여기서, n 은 Manning의 조도계수이다. Eq. (9)에서 난류 동점성 계수 산정식은 Darby and Thorne (1996)의 모형에서 적용한 Eq. (3)과 동일하지만, 전단속도 산정을 위해서는 아래와 같은 식을 이용한다.

$$U_* = \frac{n\sqrt{g}}{h^{7/6}} q \quad (11)$$

김태범 등 (2010)은 원통형의 곧은 식생을 가정하고, Stone and Shen (2002)의 평균유속과 식생층 유속의 관계식을 적용하여 식생밀도에 대한 정의로부터 식생 항력을 유도한 있으며, 본 연구에서는 김태범 등 (2010)의 관계식을 적용한다. Eq. (9)에서 식생체적농도는 다음과 같다.

$$c_v = \frac{\pi D_v \lambda_a^* \min(h, h_v)}{4h} \quad (12)$$

여기서, D_v 는 식생줄기의 직경이며, λ_a^* 는 식생층에서의 식생밀도이다. 또한 Eq. (9)에서 좌변 마지막 항의 식생항력은 다음과 같이 계산된다.

$$N_D F_D = \frac{\rho}{2} C_D \lambda_a^* \frac{1}{h} \left[\frac{\min(h, h_v)}{h} \eta_v \right]^2 q^2 \quad (13)$$

$$\eta_v = \left[\frac{1 - \sqrt{D_v \lambda_a^*}}{1 - \frac{\min(h, h_v)}{h} \sqrt{D_v \lambda_a^*}} \right] \quad (14)$$

여기서, C_D 는 항력계수이며, 다음과 같이 계산된다.

$$C_D = \frac{C_{Dm}}{(1 - \lambda_a^* s_v)^2} \quad (15)$$

$$C_D = \frac{C_{Dm}}{(1 - \sqrt{\lambda_a^* D_v})^2} \quad (16)$$

여기서, s_v 는 식생줄기 사이의 간격이다. Eq. (15)는 식생이 균일분포일 경우이며, Eq. (16)은 엇갈린 분포일 경우에 적용한다. 여기서 C_{Dm} 은 1.05를 적용한다 (Stone and Shen, 2002). 식생밀도의 정의와 식생항력에 대한 자세한 사항은 김태범 등 (2010)을 참조하기 바란다. Eqs. (9), (10), and (13)을 이용하여 하나의 식으로 정리하면, 아래와 같다.

$$ghS_x - \frac{gn^2}{h^{7/3}} q^2 + \frac{d}{dy}\left(\nu_t \frac{dq}{dy}\right) - \frac{1}{1-c_v} \frac{1}{2} C_D \lambda_a^* \frac{1}{h} \left[\frac{\min(h, h_v)}{h} \eta_v \right]^2 q^2 = 0 \quad (17)$$

2.2.2 유한요소 수치해법

본 연구에서는 Eq. (17)의 수치해를 구하기 위해서 유한요소법을 이용하였다. Eq. (17)의 가중잔차식은 아래와 같다.

$$\int_{\Omega} N^* \left\{ ghS_x - \frac{gn^2}{h^{7/3}} q^2 + \frac{d}{dy}\left(\nu_t \frac{dq}{dy}\right) - \left[\frac{1}{1-c_v} \frac{1}{2} C_D \lambda_a^* \frac{1}{h} \left[\frac{\min(h, h_v)}{h} \eta_v \right]^2 q^2 \right] \right\} d\Omega = 0 \quad (18)$$

여기서, Ω 는 전체 모의영역을 나타내고, N^* 는 가중함수이다. Eq. (18)의 좌변 세 번째 항에 부분적분을 적용하면 다음과 같다.

$$\int_{\Omega} N^* \left\{ ghS_x - \frac{gn^2}{h^{7/3}} q^2 - \left[-\frac{1}{1-c_v} \frac{1}{2} C_D \lambda_a^* \frac{1}{h} \left[\frac{\min(h, h_v)}{h} \eta_v \right]^2 q^2 \right] \right\} d\Omega \quad (19)$$

$$+ \int_{\Gamma} N^* \nu_t \frac{dq}{dy} d\Gamma - \int_{\Omega} \frac{dN^*}{dy} \nu_t \frac{dq}{dy} d\Omega = 0$$

여기서, Γ 는 요소 경계를 나타낸다. Γ 에 대한 적분은 요소 경계에서의 유출입량을 나타내는데, 모의영역 내부에서는 상쇄되는 값이며, 모의영역 끝단의 양쪽 경계에서의 값만 남게 된다. 따라서 모의영역 양쪽 경계에서의 경계조건으로 단위 폭 당 유량의 횡방향 변화율을 0 ($dq/dy=0$)으로 설정하면, 경계에 대한 적분은 소거된다.

모의영역 내부의 변수는 Piecewise Lagrangian 내삽법을 이용하여 나타낼 수 있으며, 본 모형에서는 형상함수와 가중함수가 동일한 형태인 Bubnov-Galerkin 기법을 적용한다. Eq. (19)를 첨자를 이용하여 나타내면 다음과 같다.

3. 모형의 검증

Darby and Thorne (1996)은 영국, Montford Bridge에서의 River Severn의 수위-유량 관측자료를 이용하여 모형의 검증을 실시하였으며, 횡단지형은 Fig. 1과 같이 중앙에 주수로가 위치하고 있으며, 주수로 양측에 홍수터가 위치한다. 하상재료의 d_{84} 는 88 mm이며, 홍수터의 식생 높이는 관측되지 않았지만, 0.015 m 높이의 잔디 (grass)를 대표 식생으로 적용하였다. Darby and Thorne (1996)의 자료를 이용하여 본 연구에서 개발된 모형의 검증을 실시하였다. 횡단지형은 Fig. 1에 점으로 표시된 것과 같으며, Manning의 조도계수는 자갈하상의 조도계수 범위에 속하는 0.035를 주수로와 홍수터에 동일하게 설정하였다. 홍수터 상의 식생정보로 높이 0.015 m, 직경 0.005 m, 밀도 10 m^{-1} 의 잔디를 가정하였다. 개발 모형의 결과는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 파선은 Darby and Thorne (1996)의 결과이고, 점선은 2.1절에서 설명한 Darby and Thorne (1996) 모형을 다시 제작한 후 동일 조건에 적용한 결과이며, 실선은 본 연구의 개발 모형 결과, 그리고 점 기호는 관측 결과이다. Darby and Thorne (1996)의 결과는 수위 4~6 m 범위에서는 유량이 과소 산정되고 있고, 그 외의 수위에서는 유량이 과대 산정되고 있다. 점선으로 나타낸 Darby and Thorne (1996) 모형의 재현 결과를 보면, 대략 4.5 m 이하에서는 과대산정하고 있으며, 대략 6 m 이상에서는 관측치와 잘 맞고 있다. 직선으로 나타낸 본 모형의 결과는 전체적으로 관측치에 비해서 유량이 과대 산정되지만, 홍수터 이상의 수위에서는 Darby and Thorne (1996)의 결과에 비해서 본 모형의 결과에 대한 오차가 작다. 개발된 모형의 결과가 대체적으로 Darby and Thorne (1996)의 결과에 비해서 더욱 향상된 결과를 보인다.

Fig. 3은 홍수터에 잔디가 아닌 직경 0.5 m, 높이 5.0 m,

$$f_i = \int_{\Omega^e} N_i^* \left\{ ghS_x - \frac{gn^2}{h^{7/3}} q^2 - \left[\frac{1}{1-c_v} \frac{1}{2} C_D \lambda_a^* \frac{1}{h} \left[\frac{\min(h, h_v)}{h} \eta_v \right]^2 q^2 \right] \right. \quad (20)$$

$$\left. - \frac{dN_i^*}{dy} \nu_t \frac{dq}{dy} d\Omega^e \right\}$$

$$\sum_{i=1}^N f_i = 0 \quad (21)$$

여기서, Ω^e 는 하나의 요소 영역을 나타내며, i 는 절점을 나타내는 첨자, 그리고 N_e 는 모의영역을 구성하는 요소의 총 개수이다. Eq. (21)은 비선형계를 이루기 때문에, 직접법을 적용하여 해를 구할 수가 없다. 따라서 다음과 같은 Newton-Raphson 법을 적용하여 해를 구한다.

$$\frac{df}{dq_j} \Delta q = -f \quad (22)$$

여기서, f 는 Eq. (20)으로 표현되는 요소별 구성 벡터이며, q_j 는 절점별 해당 변수, 그리고 Δq 는 절점별 단위 폭당 유량의 변화량 벡터이다. Eq. (22)의 df/dq_j 는 다음과 같이 표현되는 Jacobian 행렬이다.

$$\frac{df_i}{dq_j} = \int_{\Omega^e} -\frac{gn^2}{h^{7/3}} 2q N_i^* N_j - \frac{1}{1-c_v} C_D \lambda_a^* \frac{1}{h} \left[\frac{\min(h, h_v)}{h} \eta_v \right]^2 q N_i^* N_j \quad (23)$$

$$- \nu_t \frac{dN_i^*}{dy} \frac{dN_j}{dy} d\Omega^e$$

Eq. (22)를 전체 모의 영역에 대해서 풀면, Jacobian 행렬은 삼중대각행렬 형태로 구성되며, 따라서 Thomas 알고리즘을 적용하여 Eq. (22)의 해를 구할 수 있다. Eqs. (20) and (23)의 적분은 Gauss 구적법을 적용한 수치적분법을 적용한다.

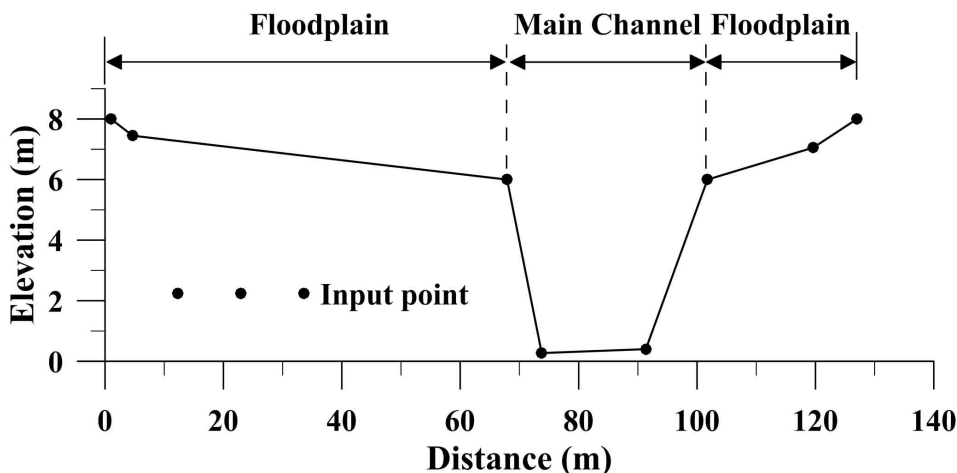


Fig. 1. Cross-section of River Severn at Montford Bridge, England

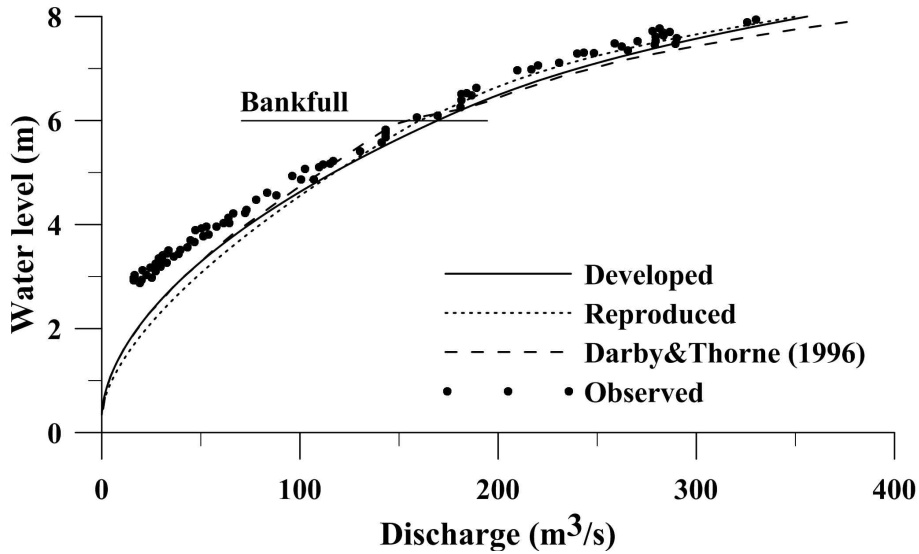


Fig. 2. Predicted and Observed Stage-Discharge Curves

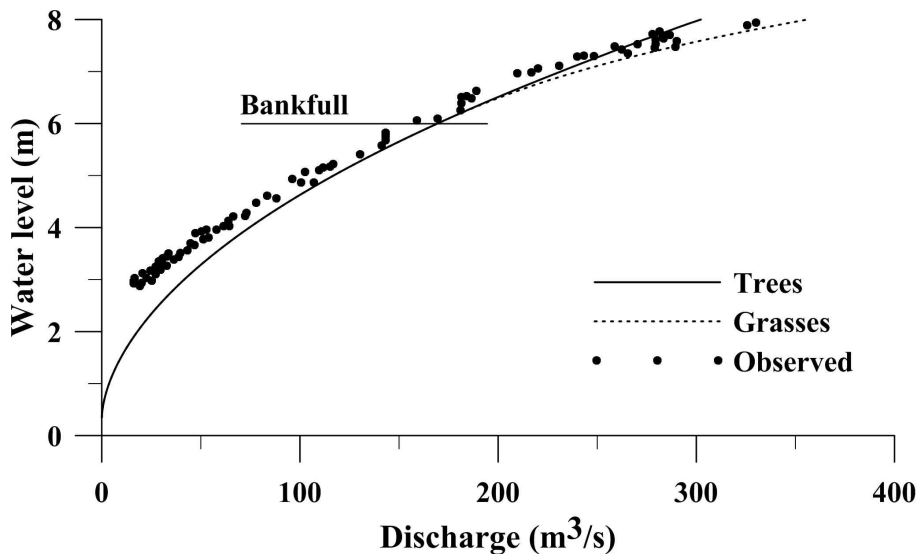


Fig. 3. Predicted Stage-Discharge Curves Depending on the Vegetative Characteristics

밀도 5 m^{-1} 의 나무가 식재되었을 때를 가정한 결과이다. Fig. 3에서 실선은 나무가 식재되어 있는 경우이며, 점선은 잔디가 식재되어 있는 경우이다. 홍수터에 잔디가 식재되어 있을 경우에 비해서, 나무가 식재되어 있을 경우, 식생 항력이 증가하여 홍수터 상의 동일 수위에 대해서 통수능이 감소하는 것을 알 수 있다. 0.015 m 높이의 잔디를 가정했을 때는 수위에 따라 식생의 수물과 비수물 조건이 결정되지만, 5.0 m 높이 나무의 경우 항상 비수물 조건에 해당한다. 가정된 식생 밀도 조건은 0.5 m 직경의 나무가 단위 면적당 10개 식재되어 있을 경우로, 비현실적인 조건이지만, 모의 결과를 확실히 보이기 위해 과장된 식생 밀도 값을 적용하였다.

Fig. 4는 홍수터에 0.015 m 높이의 잔디가 식재되어 있을 때 만수위인 경우에 각 절점에서 평가된 단위 폭 당 유량의 계산 결과이다. Fig. 4에서 실선은 개발된 모형의 결과이고, 점선은 2.1절 내용을 바탕으로 재현된 Darby and Thorne (1996) 모형 결과이며, 기호표시는 Choi et al. (2010)의 비선형 $k-\epsilon$ 모형에 의한 결과이다. 세 가지 모형의 결과를 볼 때, 전체적으로 홍수터에 비해서 주수로에서의 단위 폭 당 유량이 높게 산정되는 경향은 비슷하다. 그러나 재현된 Darby and Thorne (1996) 모형의 결과는 다른 두 모형에 비해서 단위 폭 당 유량이 단면 형상을 따라 산정되는 경향이 약하며, 비선형 $k-\epsilon$ 모형을 기준으로 볼 때, 홍수터에서는 과다 산정되고, 주수로 중앙으로 근

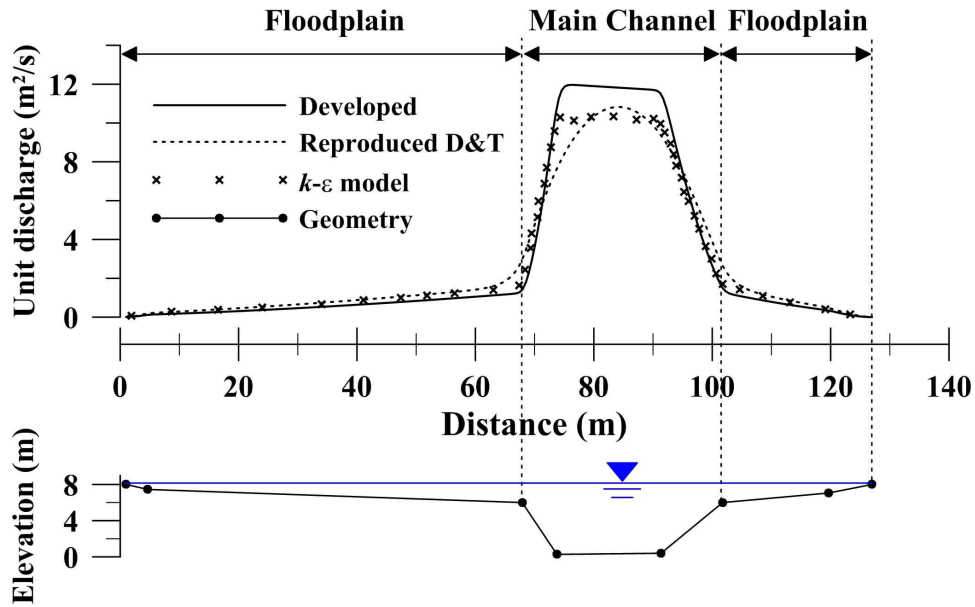


Fig. 4. Cross-sectional Distribution of Flow Discharge per Unit Width

접할수록 과소 산정되는 결과를 보이고 있다. 이는 Darby and Thorne (1996)의 모형에서 Darcy-Weisbach 마찰계수가 각 절점별로 계산되며, 따라서 절점별 단위 폭 당 유량이 수심에 큰 영향을 받기 때문인 것으로 추정된다. 반면에 본 연구에서 개발된 모형의 결과를 보면, 비선형 $k-\epsilon$ 모형의 결과와 비슷하게 단면 형상을 따라 유량이 산정되고 있지만, 홍수터에서는 비선형 $k-\epsilon$ 모형의 결과에 비해서 과소 산정되며, 주수로로 갈수록 과대 산정되는 결과를 보이고 있다. 이는 비선형 $k-\epsilon$ 모형에 비해서 난류 동점성 계수가 작게 산정되어 횡방향 난류 확산의 영향이 작기 때문인 것으로 추정된다. 하지만 전체적인 단위 폭 당 유량의 절점 별 산정에 있어서는 개발 모형이 Darby and Thorne (1996)의 재현 모형에 비해서 지형의 영향을 잘 반영하고 있으며, Darby and Thorne (1996) 재현 모형에 의한 단위유량 분포가 층류분포 형상인 반면에, 개발 모형은 난류분포 형상을 보이며, 비선형 $k-\epsilon$ 모형에 의한 단위유량 분포 형상과도 더욱 유사하다. 개발된 모형의 결과와 재현된 Darby and Thorne (1996) 모형의 결과만을 보면, 두 모형 사이에 총 유량 차이가 확연하게 나타나는 것으로 보이지만, Fig. 2의 결과를 보면, 8m 만수위에서 총 유량의 차이는 매우 작다는 것을 확인할 수 있다.

4. 모형의 적용

컴퓨터 계산능력이 향상됨에 따라 실무에서도 하천에 관한 1차원 수치모의뿐만 아니라 관심 지역의 2차원 모의 결과를 요구하고 있으며, 수공학 관련 연구의 괄목할 만한 발전을 통해 2차원 이상의 수치모형을 주로 개발하고

있다. 또한 실험실 수로와 같은 단순한 지형에만 적용 가능한 단순하고 국한된 수치모형이 아닌 자연하천과 같은 매우 복잡하고, 불규칙한 지형에도 적용 가능한 2차원 모형을 요구하고 있다. 수치모형의 자연하천 적용 시 다양한 조건에 대한 적용성을 높이기 위해서는 실제로 발생 가능한 사항들을 수치모형이 나타낼 수 있어야 한다. 모의구간 상류 또는 하류의 유량이나 수위는 시간에 따라 변화할 수 있기 때문에, 모의영역의 일부는 상황에 따라 침수되거나 마름현상이 나타날 수 있다. 마름과 젖음 현상은 모의영역 내부의 지형에 따라서도 발생할 수 있지만, 기본적으로 상류나 하류의 유량 및 수위 변화에 대해서 발생할 가능성이 더 높다. 현재까지 개발된 2차원 수치모형의 대부분은 사용자가 설정한 경계를 따라서 주어진 유입 유량을 경계조건으로 사용한다. 유입되는 폭은 항상 일정하며, 주어진 유량을 하폭으로 나누어, 경계에 해당하는 절점에는 모두 동일한 단위 폭 당 유량이 경계조건으로 설정된다. 따라서 유량이 감소하여 실제로는 마름 현상이 나타나야 할 지역도 유수가 유입되는 현상이 나타날 수 있다. 또한 주수로 측면에 홍수터 등이 존재하는 복단면 수로에 적용하는 경우에도, 홍수터와 주수로 상의 모든 절점에 동일한 단위 폭 당 유량이 설정되어 홍수터의 수위가 비현실적으로 높아진다거나 불규칙적인 지형의 절점에서는 불안정한 유속이 산정된다. 따라서 본 연구를 통해서 개발된 수위-유량 곡선 산정 모형의 결과를 이미 개발된 자연하천에 적용 가능한 2차원 수치모형(김태범 등, 2006; 김태범 등, 2010)에 적용함으로써, 본 연구를 통해 개발된 모형의 적용성을 평가하고자 하였다.

오산천 일부 구간을 수치모의 영역으로 설정하였으며,

안성천 수계 하천정비기본계획서(건교부, 2002)를 바탕으로 대상구간의 수치모의 자료를 구성하였다. 안성천 수계 하천정비기본계획서(건교부, 2002) 상의 횡단측선 5~0번이 모의대상 구간에 해당하며, 상류단 유입유량은 계획홍수량 $1,000\text{ m}^3/\text{s}$, 하류단 수위는 계획홍수위 11.27 m

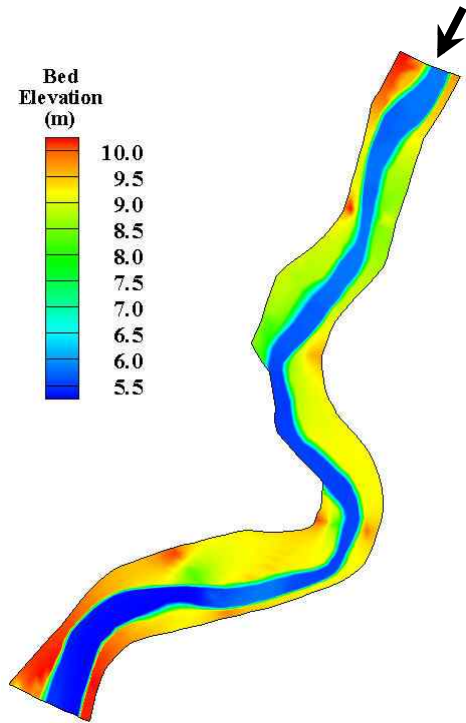


Fig. 5. Bed Elevation of Osan River

를 적용하였다. 모의구간 내의 Manning의 조도계수는 주수로 0.025, 홍수터 0.045를 적용하였다. Fig. 5는 오산천 모의구간에 대한 하상고를 나타내고 있으며, 주수로와 홍수터 간의 지형고도가 확연하게 구별되고 있다. Fig. 5에서 상부 화살표는 유량의 유입 방향을 나타낸다.

Fig. 6은 상류단에서의 지형단면과 본 연구를 통해 개발된 모형의 단위 폭 당 유량 산정 결과를 나타내고 있다. 이 때 종방향 하상 경사는 하천정비기본계획서를 참조하여 1.14×10^{-4} 로 설정하였고, 홍수터에는 식생 정보 없이 Manning의 조도계수 0.045를 적용하였다. 본 연구를 통해 개발된 모형에 적용한 결과, 상류단에서 유입 유량이 $1,000\text{ m}^3/\text{s}$ 인 경우의 수위는 약 13.049 m 에 해당하였다. Fig. 6에서 점 기호는 Manning의 공식을 적용했을 때 산정된 해당 절점에서의 단위 폭 당 유량을 나타낸다. 본 모형에 의한 결과와 Manning의 공식에 의한 결과가 대체적으로 유사한 값을 나타내고 있지만, 주수로와 홍수터 사이의 경계부에서는 차이를 보이고 있다. 이는 Manning의 공식을 통해 산정된 결과에는 난류 확산의 영향이 포함되어 있지 않기 때문이다. 만약 격자를 조밀하게 작성하여 보다 많은 절점에서 단위 폭 당 유량을 산정한다면, 본 개발 모형에 의한 결과와 Manning의 공식에 의한 결과는 더욱 큰 차이를 나타낼 것이다.

Figs. 7 and 8은 각각 2차원 수치모형의 수위 및 유속

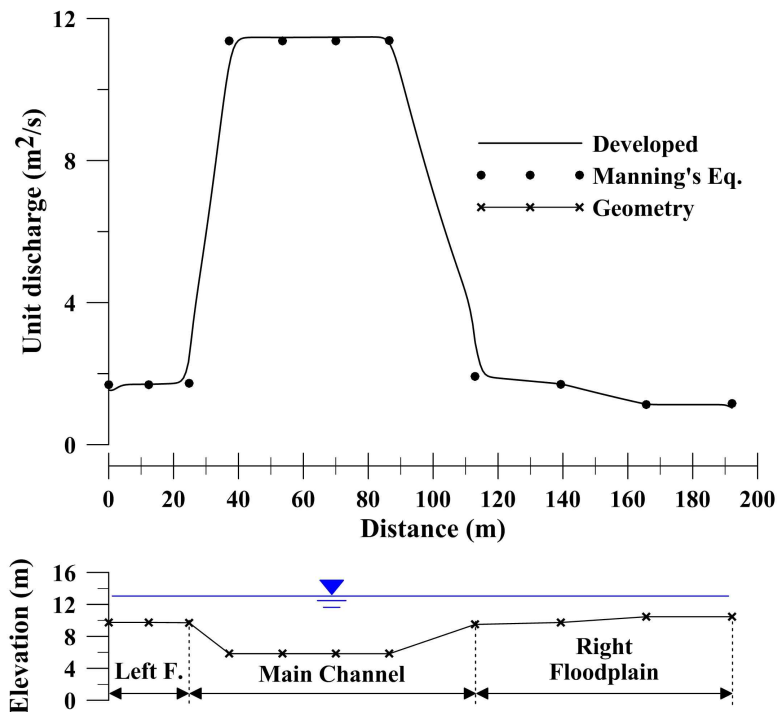


Fig. 6. Cross-sectional Geometry and Distribution of Unit Discharge at Upstream Boundary

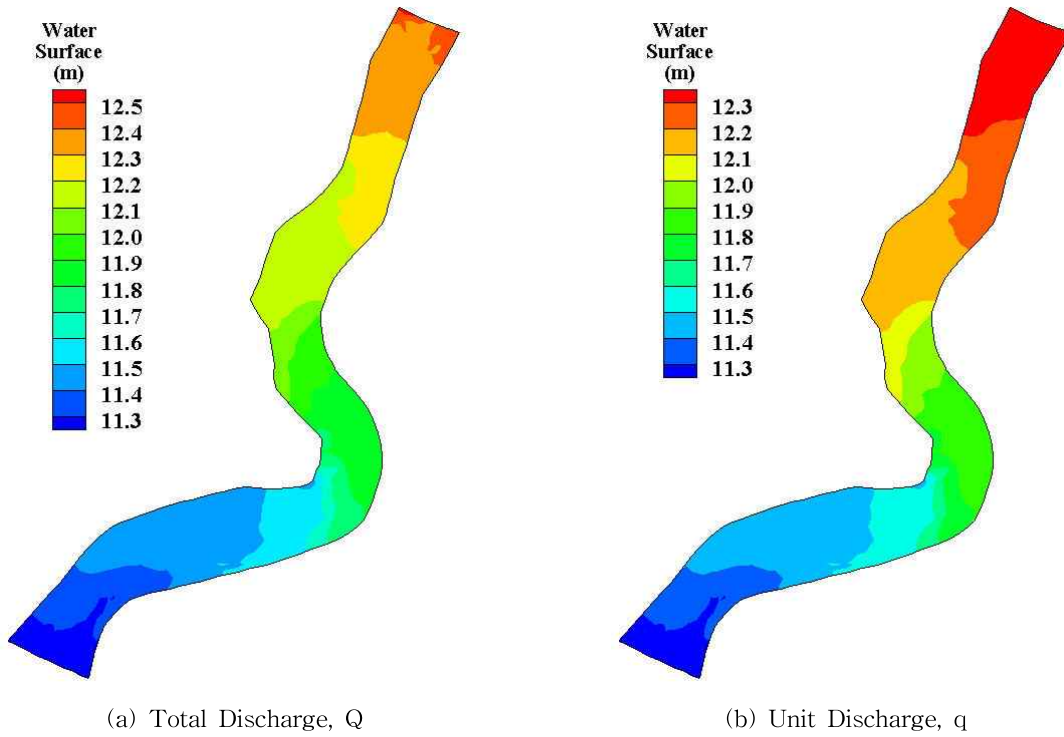


Fig. 7. Water Surface Distribution Depending on Upstream Discharge Condition

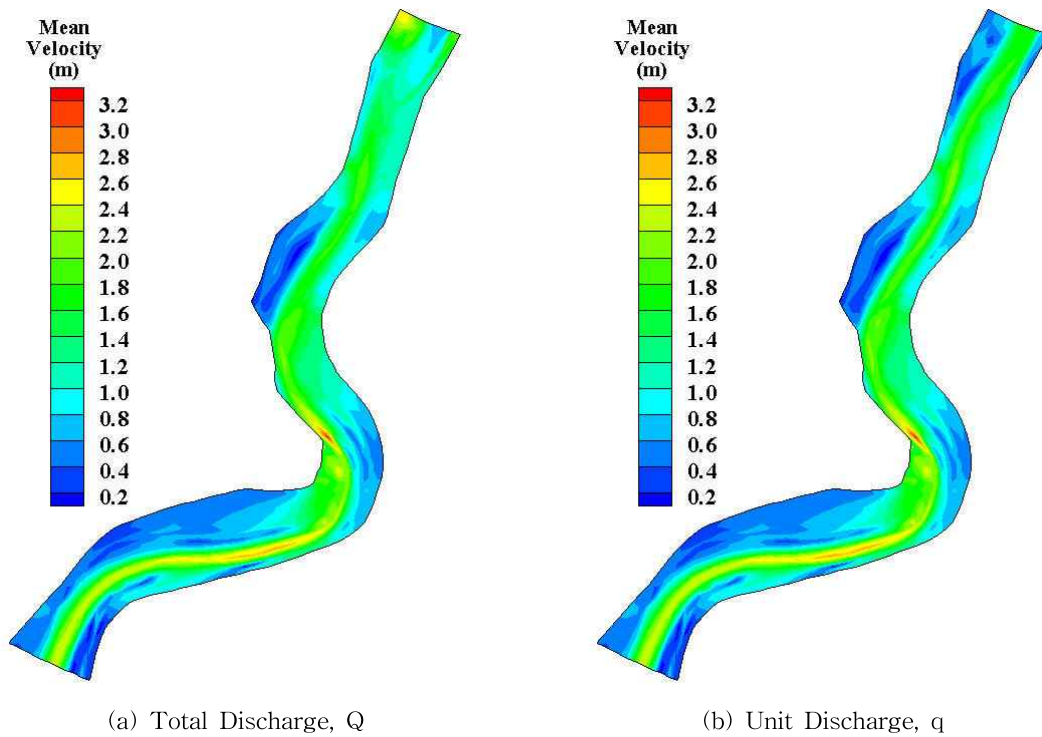


Fig. 8. Mean Velocity Distribution Depending on Upstream Discharge Condition

분포 결과를 나타내고 있다. Figs. 7(a) and 8(a)는 상류단 경계조건으로 총 유량을 이용하고, 총 유량을 단면 폭으로 나누었을 때의 단위 폭 당 유량이 모든 절점에 동일하

게 설정된 경우이며, Figs. 7(b) and 8(b)는 본 개발 모형의 결과인 Fig. 6의 실선 값을 해당 절점에 할당하였을 경우이다. Fig. 7을 보면, 상류단 유입유량의 절점별 분배 유

무에 따라 상류단 부근에서의 수위분포가 차이를 나타내고 있다. 절점별 동일유량을 할당하였을 때에는 Fig. 7(a)와 같이 홍수터의 수위가 높아지는 비정상적인 결과를 나타내고 있지만, 절점별 유량분배를 적용하였을 때에는 Fig. 7(b)와 같이 상류단 수위분포가 균등해지는 합리적인 결과를 나타내고 있다. Fig. 8(a)는 절점별 동일유량이 할당됨으로써 주수로에 비해서 홍수터의 유속이 빨라지는 비정상적인 모의 결과를 나타내는데 비해서, Fig. 8(b)의 절점별 유량분배에 따른 평균유속 분포는 홍수터에 비해서 주수로의 평균유속이 빠른 합리적인 모의 결과를 나타내고 있다. 따라서 실제 하천 또는 복단면 수로에 2차원 수치모형을 적용할 경우, 상류단의 절점별 유량분배를 적용함으로써 더욱 합리적인 모의 결과를 얻을 수 있다.

대부분의 2차원 수치모의 시, 관심 대상구간보다 상류 방향으로 모의 구간을 확장시킴으로써 상류단의 영향을 보완하는 방법을 적용하기도 한다. 하지만 본 개발 모형을 2차원 모형의 상류단에 적용할 경우, 단순한 형태의 상류단을 선택해야 하는 고민을 해결하는 동시에 불규칙한 단면에 의한 수치오류를 줄이고, 수치해의 수렴성을 향상시킬 것으로 기대된다. 또한 본 연구를 통해서 개발된 모형을 2차원 수치모형에 적용할 경우, 상류단의 유입유량 대신 수위를 경계조건으로 설정하는 것도 가능하다. 즉, 상류단에 수위를 설정하면, 주어진 단면 형상 등의 조건을 이용하여 각 절점별 단위 폭 당 유량을 산정할 수 있으며, 산정된 단위 폭 당 유량을 각 절점별 경계조건으로 사용 가능하기 때문이다.

5. 결론

본 연구에서는 불규칙한 하상을 보이는 횡단면에서의 수위-유량 곡선 및 단위 폭 당 유량을 산정하는 유한요소 모형을 개발하였다. 개발된 모형을 영국의 Severn river에 적용하고, Darby and Thorne (1996)의 모형 결과 및 관측치와 비교하여 모형을 검증하였다. 또한 오산천 일부 구간의 2차원 수치모의 시 상류 경계조건으로 개발된 모형을 적용하여 단위 폭 당 유량을 절점별 차등 분배시켰을 때, 더욱 합리적인 결과를 얻을 수 있었다. 본 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 개발된 모형을 사용하여 불규칙한 단면 또는 복단면 하천의 수위-유량 곡선과 횡방향 거리에 따른 단위유량을 예측할 수 있다. 홍수터와 주수로의 조도계수를 구분하거나 또는 홍수터 상의 식생정보를 입력함으로써 보다 현실적이고 유용한 결과를 얻을 수 있다. 따라서 하천복원 및 홍수터 설계 시 개발된 모형을 적용함으로써, 보다 정확한 수

위-유량 관계 변화를 산정하여 보다 안전한 하천단면 설계가 가능하며, 단면별 조도계수 산정에도 활용 가능하다.

- 2) 본 개발 모형의 알고리즘을 2차원 수치모의 시 상류단 경계조건으로 활용하면, 더욱 효율적이고, 편리하며, 현실적인 2차원 모의가 가능할 것으로 기대된다. 유량뿐만 아니라 수위를 상류 유입 경계조건으로 설정 가능하다는 장점도 있다.
- 3) 현재까지 개발된 모형은 만곡부에서의 이차류를 고려하지 않으므로, 만곡부 편수위의 영향을 반영하지 못한다. 또한 비선형 $k-\epsilon$ 모형에 비해서 주수로에서는 과대 산정하고, 홍수터에서는 과소 산정하는 결과를 보이고 있다. 따라서 만곡부의 이차류 효과와 $k-\epsilon$ 방정식의 적용을 통해서 개발 모형을 보완할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업인 자연과 함께하는 하천복원기술개발 연구단(ECORIVER21)(06건설핵심B01)의 연구비 지원에 의해 수행 되었습니다.

참고문헌

- 강신욱, 이상호, 황만하 (2006). “화원 수위관측소 지점의 고리모형 수위-유량 관계곡선 작성.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제6호, pp. 487-494.
- 건설교통부 (2002). **안성천 수계 하천정비기본계획**.
- 김상욱, 이길성 (2008). “베이지안 회귀분석을 이용한 수위-유량 관계곡선의 불확실성 분석.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제9호, pp. 943-958.
- 김태범, 배혜득, 최성욱 (2010). “식생 수로에서의 수리특성 모의를 위한 수심적분 2차원 수치모형의 개발 및 적용.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제30권, 제6B호, pp. 607-615.
- 김태범, 최성욱, 민경덕 (2006). “CDG 유한요소법을 이용한 수심적분 흐름의 수치모의.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제5B호, pp. 447-457.
- 문영일, 조성진, 전시영 (2003). “수위-유량곡선을 위한 비매개 변수적 Kernel 회귀모형.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제6호, pp. 1025-1033.
- 유주환 (1999). “금강수계 수위-유량 곡선 개발 및 적용.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제19권, 제II-6호, pp. 665-675.
- 이상호 (2001). “수위관측과 수리학적 하도추적에 의한 수

위-유량 관계식작성.” **한국수자원학회논문집**, 제34권, 제5호, pp. 551-560.

이신재, 박상우 (2006). “수위-유량자료가 부재한 자갈하천의 조도계수 산정에 관한 연구.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제12호, pp. 985-996.

이용희, 이상배 (1998). “양산천 수위-유량 관계곡선의 유도에 관한 연구.” **한국항만학회논문집**, 한국항만학회, 제9권, pp. 183-195.

이우석, 김상욱, 정은성, 이길성 (2008). “의사우도추정법에 의한 분산합수를 고려한 수위-유량 관계 곡선 산정법 개선.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제8호, pp. 807-823.

이재준, 설지수, 광창재 (2009). “수위-유량 관계곡선을 이용한 경년별 수리특성량 변동에 관한 연구 -낙동강 적포교 및 진동 지점을 중심으로-.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제10호, pp. 867-876.

이창해 (2008). “수위 유량관계식에 새로운 양방향 회귀모형의 적용.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제1호, pp. 17-25.

조홍제, 황재호, 문성준 (2000). “대화강 감조부의 저수위 수위-유량곡선 개선.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제5호, pp. 635-645.

Choi, S.-U., Kang, H., and Shin, J. (2010). “Lateral distribution of unit discharge in a compound channel with vegetation on the floodplain.” *17th Congress of the Asia and Pacific Division of the International Association of Hydraulic Engineering and Research*, Auckland, New Zealand.

Darby, S.E. (1999). “Effect of riparian vegetation on flow resistance and flood potential.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 5, pp. 443-454.

Darby, S.E., and Thorne, C.R. (1996). “Predicting stage-discharge curves in channels with bank vegetation.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 10, pp. 583-586.

Hey, R.D. (1979). “Flow resistance in gravel-bed rivers.” *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 105, No. 4, pp. 365-379.

Kouwen, N. (1988). “Field estimation of the biomechanical properties of grass.” *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 26, No. 5, pp. 559-568.

Masterman, R., and Thorne, C.R. (1992). “Predicting influence of bank vegetation on channel capacity.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 7, pp. 1052-1058.

Masterman, R., and Thorne, C.R. (1994). “Analytical approach to flow resistance in gravel-bed channels with vegetated banks.” *Process models and theoretical geomorphology*, M.J. Kirkby, ed., Wiley, Chichester, England, pp. 201-218.

Stone, B.M., and Shen, H.T. (2002). “Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 5, pp. 550-506.

Wark, J.B., Samuels, P.G., and Ervine, D.A. (1990). “A practical method of estimation velocity and discharge in a compound channel.” *International Conference on River Flood Hydraulics*, W.R. White, ed., John Wiley and Sons, Inc., Chichester, England, pp. 163-172.

논문번호: 11-013	접수: 2011.02.07
수정일자: 2011.02.14	심사완료: 2011.02.14