

불규칙 단면형상에서의 수위-유량 곡선 및 단위유량 예측 및 활용

Prediction and Application of Stage-Discharge Curve and Unit Discharge in Channels with Nonuniform Cross Section

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

요 지

하천의 수위와 유량에 대한 정확한 정보는 이수, 치수와 같은 수자원 관리에 있어서 가장 기본적인 기초자료가 된다. 하천 수위와 유량 자료를 확보하기 위한 지속적인 직접 계측 방법은 많은 시간과 비용이 소모되며, 홍수 시에는 위험성이 존재하여 자료 확보가 불가능하다. 따라서 수치모형을 이용한 수위-유량 자료의 예측과 활용이 필요하며, 2차원 수치모형의 경계조건을 설정할 경우에도 활용할 필요성이 있다.

본 연구에서는 복단면 개수로 및 불규칙한 하상을 보이는 횡단면 상에서의 단위유량 예측을 위한 유한요소모형을 개발한다. 지배방정식은 Wark 등 (1990)이 제시한 운동량방정식을 이용하며, 단면형상과 Manning 조도계수, 그리고 수위를 알면, 결과적으로 흐름방향 단위유량의 횡방향 분포를 얻을 수 있다. 개발된 모형의 검증에 위해 실측 자료와 비교하며, 또한 Darcy-Weisbach 마찰계수를 이용하는 Darby와 Thorne (1996)의 모형 결과와도 비교한다.

검증된 모형의 알고리즘을 2차원 모형의 상류단 경계조건 설정에 활용하여, 절점별 유입유량을 차등분배 시켰을 때와 그렇지 못했을 때의 결과를 비교한다. 또한 수위를 경계조건으로 입력하였을 때 개발 모형을 활용하여 유입유량을 예측하는 활용방안을 제시한다.

핵심용어 : 수위-유량곡선, 단위유량 횡방향 분포, 절점별 유량

1. 서 론

컴퓨터 계산능력이 향상됨에 따라 실무에서도 하천에 관한 1차원 수치모의뿐만 아니라 관심 지역의 2차원 모의 결과를 요구하고 있으며, 수공학관련 연구 분야의 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 적용시 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 대다수는 사용자가 설정한 경계를 통해서 주어진 유입 유량을 경계조건으로 사용한다. 유입되는 폭은 항상 일정하며, 주어진 유량을 하폭으로 나누어, 경계

* 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사후 연구원 · E-mail : geo108@naver.com

** 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 석사과정 · E-mail : chien@yonsei.ac.kr

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

에 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 자연하천에 적용 가능한 2차원 수치 모형 개발에 있어서 가장 먼저 해결되어야 할 사항은 유량 경계조건 설정에 관한 사항이라고 판단된다.

본 연구에서는 복단면 개수로 및 불규칙한 하상을 보이는 횡단면 상에서의 단위유량 예측을 위한 유한요소모형을 개발한다. 지배방정식은 Wark 등 (1990)이 제시한 운동량방정식을 이용하며, 단면형상과 Manning 조도계수, 그리고 수위를 알면, 결과적으로 흐름방향 단위유량의 횡방향 분포를 얻을 수 있다. 개발된 모형의 검증을 위해 실측자료와 비교하며, 또한 Darcy-Weisbach 마찰계수를 이용하는 Darby와 Thorne (1996)의 모형 결과와도 비교한다. 검증된 모형의 알고리즘을 2차원 모형의 상류단 경계조건 설정에 활용하여, 절점별 유입유량을 차등분배 시켰을 때와 그렇지 못했을 때의 결과를 비교한다. 또한 수위를 경계조건으로 입력하였을 때 개발 모형을 활용하여 유입유량을 예측하는 활용방안을 제시한다.

2. 지배방정식

Darby와 Thorne (1996)은 Wark 등 (1990)이 제시한 운동량 방정식을 사용하여 수위-유량 곡선을 제시하였으나, 국내에서는 Darcy-Weisbach의 마찰계수보다 Manning의 조도계수를 바닥의 거칠기를 나타내는 기준으로 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 Manning의 조도계수를 사용하는 다음과 같은 식을 본 모형의 지배방정식으로 사용한다.

$$ghS_x - B_s \frac{gn^2}{h^{7/3}} q^2 + \frac{d}{dy} \left(\nu_t \frac{dq}{dy} \right) = 0 \quad (1)$$

여기서, g 는 중력가속도, h 는 수심, S_x 는 흐름방향 에너지경사, n 은 Manning의 조도계수, y 는 횡방향 좌표, q 는 단위 폭 당 흐름방향 유량, 그리고 B_s 는 Wark 등 (1990)이 제시한 다음과 같이 계산되는 계수이다.

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

여기서, S_y 는 횡방향 경사이다. 식 (1)에서 ν_t 는 와점성 계수로써, 다음 식을 이용하여 산정한다.

$$\nu_t = NEV U^* h \quad (3)$$

여기서, NEV 는 무차원의 와점성 계수로써, Darby와 Thorne (1996)은 0.16을 사용하였으며, U^* 는 전단속도로써 다음 식을 이용하여 계산된다.

$$U^* = \frac{n\sqrt{g}}{h^{7/6}} q \quad (4)$$

3. 수치모형

식 (1)의 수치해를 구하기 위해서 유한요소법을 이용하였다. 식 (1)의 가중잔차식을 아래와 같다.

$$\int_{\Omega} N^* \left[ghS_x - B_s \frac{gn^2}{h^{7/3}} q^2 + \frac{d}{dy} \left(\nu_t \frac{dq}{dy} \right) \right] d\Omega = 0 \quad (5)$$

여기서, Ω 는 전체 모의영역을 나타내고, N^* 는 가중함수이다. 식 (5)의 우변 마지막 항에 부분적분을 적용하면 다음과 같다.

$$\int_{\Omega} N^* \left(ghS_x - B_s \frac{gn^2}{h^{7/3}} q^2 \right) - \frac{dN^*}{dy} \nu_t \frac{dq}{dy} d\Omega = \int_{\Gamma} N^* \nu_t \frac{dp}{dy} d\Gamma \quad (6)$$

여기서, Γ 는 요소 경계를 나타낸다. 식 (6)의 우변은 요소 경계에서의 유출입량을 나타내며, 전체 모의영역 내부에서는 상쇄되는 값이다. 따라서 모의영역 양쪽 경계부에서의 경계조건으로 다음과 같이 설정하면, 식 (6)의 우변은 0이 된다.

$$\frac{dp}{dy} = 0 \quad (7)$$

모의영역 내부의 변수는 Piecewise Lagrangian 내삽법을 이용하여 나타낼 수 있으며, 본 모형에서는 형상함수와 가중함수가 동일한 형태인 Bubnov-Galerkin 기법을 적용하였다. 식 (6)을 첨자를 이용하여 나타내면 다음과 같다.

$$f_i = \int_{\Omega^e} N_i^* \left(ghS_x - B_s \frac{gn^2}{h^{7/3}} q^2 \right) - \frac{dN_i^*}{dy} \nu_t \frac{dq}{dy} d\Omega^e \quad (8)$$

$$\sum_{N_e} f_i = 0$$

여기서 i 는 절점을 나타내는 첨자이며, N_e 는 모의영역을 구성하는 요소의 총 개수이다. 식 (8)은 비선형계를 이루기 때문에, 직접법을 적용하여 해를 구할 수가 없다. 따라서 Newton-Raphson 법을 적용하여 해를 구한다.

4. 모형의 검증

영국의 Severn river의 수위-유량 자료 (Darby와 Thorne, 1996)를 이용하여 모형의 검증을 실시하였다. 횡단 지형은 그림 2에서 볼 수 있듯이, 중앙에 주수로가 위치하고 있으며, 주수로 양측에 홍수터가 위치한다. 그림 1을 살펴보면, 본 연구에서 개발된 모형이 0~3 m 수위에서는 유량이 과대 산정되고, 4.5~5.5 m 수위에서는 과소 산정된다. 강터유량 이상에서는 실측자료와 매우 유사하다. 개발된 모형의 결과는 대체적으로 Darby와 Thorne (1996)의 모형 결과에 비해서 더욱 향상된 결과를 보인다. 그림 2는 만수위 시에 각 절점에서 평가된 단위 폭 당 유량 계산 결과이다. 주수로의 수심이 제일 깊은 부분에서 가장 높은 단위 폭 당 유량이 산정된다.

5. 모형의 적용

안성천 수계 하천정비기본계획서 (건교부, 2002)를 바탕으로 오산천 대상구간의 수치모의 자료를 구성하였다. 상류단 유입유량은 계획홍수량 $1,000 \text{ m}^3/\text{s}$, 하류단 수위는 계획홍수위 11.27 m 를 적용하였으며, 모의구간 내의 조도계수는 주수로 0.025 , 홍수터 0.045 를 적용하였다. 그림 3은 오산천 모의구간에 대한 하상고를 나타내고 있으며, 주수로와 홍수터 간의 지형고도가 확연하게 구별되고 있다. 그림 4는 수위분포 결과를 나타내고 있으며, 상류단 유입유량의 절점별 분배 유무에 따라 상류단 부근에서의 수위분포가 차이를 나타내고 있다. 절점별 동일유량은 할당하였을 때, 홍수터의 수위가 높아지는 비정상적인 결과를 나타내고 있지만, 절점별 유량분배를 적용하였을 때 상류단 수위분포가 균등해지는 합리적인 결과를 나타내고 있다. 그림 5는 절점별 유입유량 분배 유무에 따른 평균유속 분포 결과를 나타내고 있다. 그림 5(a)는 절점별 동일유량이 할당됨으로써 주수로에 비해서 홍수터의 유속이 높아지는 비정상적인 모의 결과를 나타내는데 비해서, 그림 5(b)의 절점별 유량분배에 따른 평균유속 분포는 홍수터에 비해서 주수로의 평균유속이 빠른 합리적인 모의 결과를 나타내고 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 불규칙한 하상을 보이는 횡단면에서의 수위-유량 곡선 및 단위 폭 당 유량을 산정하는 유한요소모형을 개발하였다. 개발된 모형을 영국의 Severn river에 적용하고, Darby와 Thorne (1996) 모형 결과 및 관측치와 비교하여 유사한 모형의 정확성을 확인하였다. 또한 오산천 일부 구간에 개발된 모형을 적용하여 2차원 수치모의 시 상류 경계조건으로 단위 폭 당 유량을 절점별 차등 분배시켰을 때, 더욱 합리적인 결과를 얻을 수 있었다. 개발된 모형을 사용하여 주어진 자연하상의 단면과 조도계수 및 종방향 경사를 이용하여 복단면 하천의 수위-유량 곡선과 횡방향 거리에 따른 단위유량을 예측할 수 있다. 따라서 하천 홍수터 설계 시 개발된 모형을 적용함으로써, 보다 정확한 수위의 상승효과를 산정하여 보다 안전한 하천단면 설계가 가능하리라 기대한다. 또한 2차원 수치모의시 상류단 경계조건으로 수심을 설정하고, 단위폭 당 유량을 자동 계산함으로써, 더욱 효율적인 2차원 모의가 가능하다. 그러나, 현재까지 개발된 모형은 만곡부에서의 이차류를 고려하지 않으므로, 만곡부 편수위의 영향을 반영하지 못한다.

감 사 의 글

본 연구는 국토해양부 및 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업과 수자원의 지속적 확보 기술개발 사업단의 21세기 프론티어 연구개발 사업의 연구비지원(과제명: Ecoriver21, RAMS의 개발, 과제번호: 06건설핵심B01, 2-3-3)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (2002). “안성천 수계 하천정비기본계획.”
- 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.
- 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.

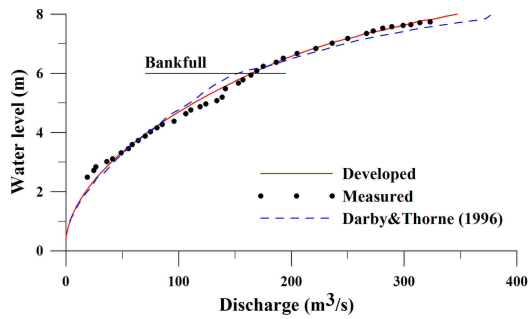


그림 1. 수위-유량 곡선 검증결과

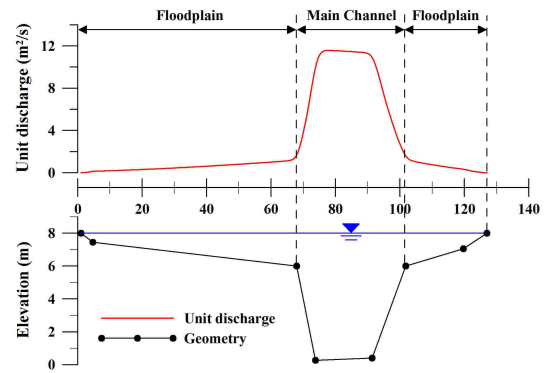


그림 2. 단위 폭 당 유량 계산 결과

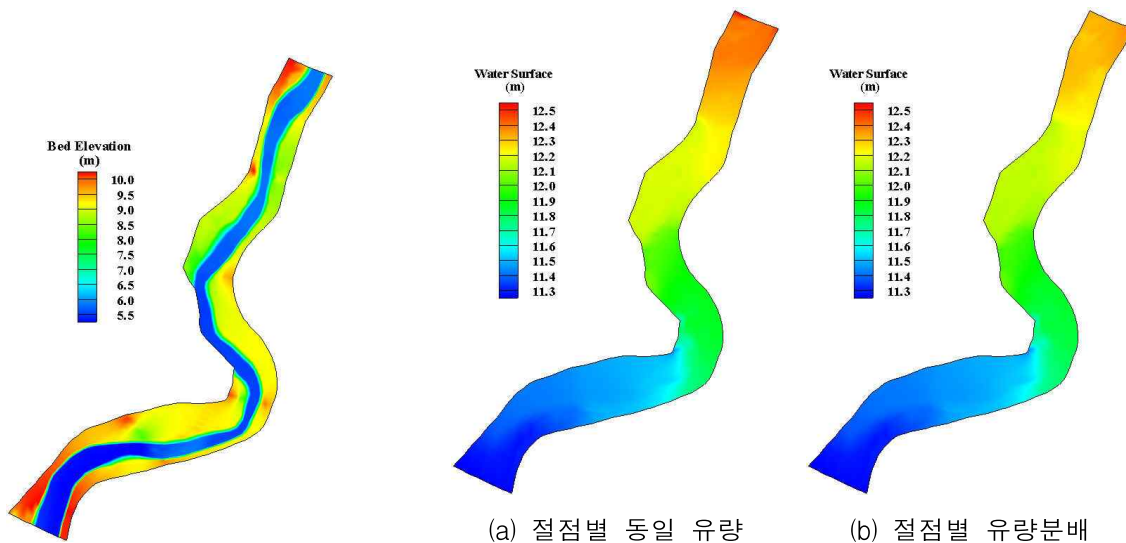


그림 3. 오산천 하상고

그림 4. 수위분포 모의결과

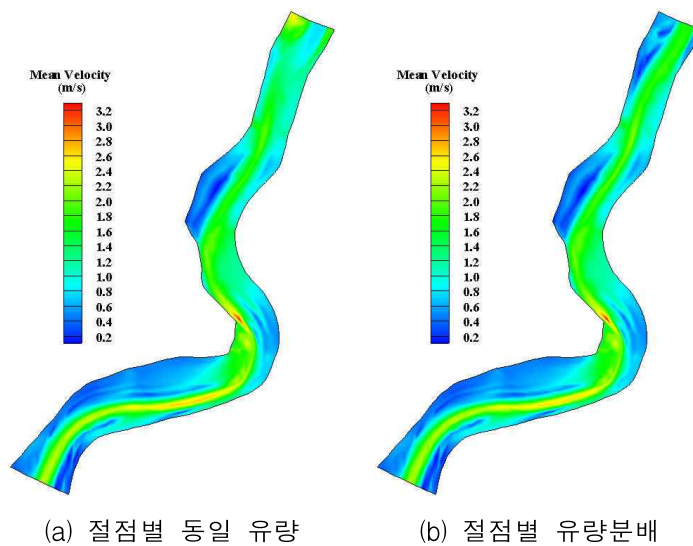


그림 5. 평균유속분포 모의결과