J. Korea Water Resour. Assoc. Vol. 51, No. 10 (2018), pp. 895-903
doi: 10.3741/JKWRA.2018.51.10.895
pISSN 1226-6280
eISSN 2287-6138

Development of 1D finite volume model for discontinues flow simulation (K-River)

Jeong, Anchul[a] · An, Hyunuk[b]* · Kim, Yeonsu[c] · Noh, Joonwoo[c]

[a]International Water Resources Research Institute, Chungnam National University
[b]Local Environmental Engineering Department, Chungnam National University
[c]Water Resources Research Center, K-water Convergence Institute

Paper number: 18-058
Received: 31 July 2018; Revised: 21 August 2018 / 7 September 2018; Accepted: 7 September 2018

Abstract

There are a large number of weirs installed in rivers of Korea, and these characteristics are not common in other countries. When the flow passes through a structure such as a weir, discontinuous flow occurs. In terms of numerical simulation, it affects the numerical instability due to the balance between the flow term and the source term. In order to solve these problems, many researchers used empirical formulas or numerical scheme simplification. Recently, researches have been conducted to use more accurate numerical scheme. K-River was developed to reflect the characteristics of domestic rivers and calculate the discontinuous flow more accurately. For the verification of K-River, 1) numerical experiment simulations with a bump in the bed, 2) laboratory experiment of hydraulic jump simulation, 3) real river were performed. K-River verified its applicability by simulating results similar to the exact solution and observed value in all simulations.

Keywords: Flow analysis model, Discontinues flow, Finite volume model, 1D model

불연속 흐름 모의를 위한 1차원 유한체적 모형 K-River의 개발

정안철[a] · 안현욱[b]* · 김연수[c] · 노준우[c]

[a]충남대학교 국제수자원연구소, [b]충남대학교 지역환경토목학과, [c]K-water 융합연구원 물순환연구소

요 지

국내의 하천에는 많은 수의 보가 설치되어 있으며, 이러한 특성은 국외에서는 흔하지 않은 편이다. 흐름이 보와 같은 구조물을 통과하는 경우에는 불연속 흐름이 발생하게 되며, 수치모의 측면에서는 흐름항과 생성항의 균형 등의 문제로 수치적 안정성에 많은 영향을 준다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 경험식이나 해석기법의 단순화 등에 의존해 왔으며, 최근에 들어서는 보다 정확한 수치해석기법을 이용하려는 연구가 꾸준히 수행되고 있다. K-River는 국내의 하천 특성을 반영하고, 불연속 흐름을 보다 정확히 계산하기 위한 목적으로 개발되었다. K-River의 검증을 위하여 1) 하상융기가 존재하는 개수로 수치실험 모의, 2) 도수현상 실내실험 모의, 3) 실제 하천의 수문 사상 모의를 수행하였다. 모든 모의에서 해석해 및 관측치와 유사한 결과를 모의하여 K-River의 적용성을 검증하였다.

핵심용어: 흐름해석 모형, 불연속 흐름, 유한체적모형, 1차원 모형

1. 서 론

하천의 수리학적 현상을 파악하는 것은 하천 계획수립이나 관리 등을 위해서 매우 중요한 사항으로, 컴퓨터 기술의 발전과 함께 연구나 실무에서 수치해석모형을 이용하여 수리학적 현상을 모사하려는 노력이 지속적으로 이루어져 왔다. 특히, 비용과 노력, 안전 등의 이유로 실측이나 실험이 어려운 댐 붕괴, 제방 붕괴, 수공구조물 건설·운영, 큰 재현기간을 가지는 홍수량에서의 수위 변화 등과 같은 상황에서의 수리학적 특성을 파악하는데 활발히 사용되고 있다. 따라서 다양한 문제해결을 위해 수치해석모형을 사용할 경우에는 보다 정확하

*Corresponding Author. Tel: +82-42-821-5797
E-mail: hyunuk@cnu.ac.kr (H. An)

© 2018 Korea Water Resources Association. All rights reserved.

고 수치적 안정성이 보장되어야 한다.

하천 흐름의 수치모의 측면에서 국내의 하천은 국외에서 흔하지 않은 독특한 특성을 가지고 있는 것으로 알려져 있으며, 그 중에서 가장 대표적인 것이 하천에 설치된 수많은 보(weir)이다(Kim *et al*., 2014). 국내 하천에는 약 33,848 개소의 보가 설치되어 있으며(Kim *et al*., 2016), 최근에 들어서는 국가하천 본류에 16개의 대규모 보가 건설되어 운영 중에 있다. 일반적으로 보를 통과하는 흐름의 상태는 상류-한계류-사류-상류로 변화하는 불연속 흐름이 발생하게 된다. 불연속 흐름은 지형 및 흐름의 급변으로 인해서 발생하며 이러한 현상은 수치해석 측면에서 흐름항과 생성항의 균형 등의 문제로 인해서 모형의 수치적 안정성에 많은 영향을 줄 수 있다. 과거에는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 수리모형실험이나 경험식, 해석기법의 단순화 등에 의존하였다. 최근에 들어서는 보다 정확한 수치해석기법을 통해서 불연속 흐름을 해석하기 위한 연구가 꾸준히 수행되고 있다.

HEC-RAS, FLDWAV 등과 같이 대표적인 1차원 흐름해석 모형이라 할 수 있는 수치해석 모형들은 지배방정식인 Saint-Venant 방정식을 해석하기 위해서 대부분 Preissmann 음해법(Preissmann, 1961)을 이용하고 있다(Kim *et al*., 2009). Preissmann 음해법은 실제 자연조건에서 수치적 안정성을 유지하면서 비교적 합리적인 계산결과를 제공하는 것으로 알려져 있어 개수로 수리학 분야에서 널리 사용되고 있다(Abbott and Basco, 1989; Wu, 2008; Popescu, 2014; Woo *et al*., 2015). 그러나 Preissmann 음해법은 불연속 흐름에 대한 수치감쇠영향이 크기 때문에 불연속 흐름을 정확히 모의할 수 없는 문제가 있어, 천이류 구간, 급변 부정류의 선단부 해석, 수공구조물 주변 해석 등에서 수치적 불안정성을 나타내는 단점이 있다(Jin and Fread, 1997; Hu *et al*., 1998; Kim *et al*., 2008). 이러한 단점을 개선하기 위해서 프루드 수의 크기에 따라서 운동량 방정식에 감소계수(reduction factor)를 적용하는 LPI (Local Partial Inertia) 기법이 제시되었다(Fread *et al*., 1996). LPI 기법은 FLDWAV와 HEC-RAS 등을 비롯하여 다양한 1차원 수치해석 모형에 적용되고 있지만, 모든 불연속 흐름에 대해서 수치안정성을 보장해 주지 못하며 관성항을 부분적으로 무시함에 따라 모의의 정확성에 한계가 존재한다. Zhou *et al*. (2002)은 천수방정식을 이용하여 하상고가 수직 방향으로 변화하는 매우 불규칙한 하상에 대한 모의를 수행하기 위한 Surface Gradient Method를 제시하였다. Riemann해법을 이용하여 흐름률을 계산하고, Godunov방법을 이용하여 조위, 댐 붕괴 등에 적용하여 그 적용성을 입증하였다. Zerihun and Fenton (2006)은 개수로의 짧은 구간에서 발생하는 불연속 흐름을 모의하기 위해서 Boussinesq 타입 운동량 방정식을 1차원 흐름해석에 적용하였다. Boussinesq 타입 운동량 방정식을 통해서 동적 압력을 보정하는 형태로 모형을 구성하여 불연속 흐름이 발생하는 수면형의 계산이 가능한 1차원 유한차분모형을 개발하였다. 개발된 모형은 5가지 형태의 불연속 흐름이 발생하는 실험 결과에 적용하였으며, 불연속 흐름에 의한 수면의 급격한 변화를 잘 모의하는 것으로 나타났다. Kim *et al*. (2007)은 자연하천에서의 천이류 해석을 위한 1차원 흐름해석 모형을 개발하였다. 개발된 모형은 해석해가 존재하는 가상하도, 실제 댐의 여수로, 실제 하천에서 발생하는 도수(hydraulic jump) 현상을 모의하였다. 또한, 개발 모형의 적용성 및 정확도를 평가하기 위해서 동일구간에 적용한 HEC-RAS 모의결과와 비교를 하였다. Chang *et al*. (2017)은 1차원 모형에서 불연속 흐름을 모의하기 위하여 upwinding SPH 모델과 비대칭 커널 함수(non-symmetric kernel function)를 접목한 모형을 제안하였다. 비대칭 커널 함수를 상류부에 적용하고 SPH 방법을 통해서 운동량 방정식을 이산화하여, 경사가 급하거나 불연속 흐름이 발생하는 구간이 해를 산정하는데 효율적으로 이용할 수 있다고 하였다. 그들은 제안한 모형을 불연속 흐름에 대해서 수행된 실내실험 및 수치실험에 적용하였다. 그 결과, 수면형의 경사가 매우 급하게 나타나는 일부 구간에 대해서 모의값이 오차를 포함하지만 대부분 만족할만한 결과를 모의한다는 결과를 제시하였다. 이 외에도 Amiri *et al*. (2013), Rocca *et al*. (2015) 등과 같이 불연속 흐름을 정확하게 모의하기 위한 다양한 연구가 시도되고 있다.

본 연구에서는 유한체적법(Finite Volume Method, FVM)과 Forward Euler 방법을 이용하여 불연속 흐름에 대한 안정적인 해석이 가능한 수치해석 모형인 K-River을 개발하였다. 본 논문에서는 K-River의 적용성 평가를 위해서 불연속 흐름의 대표적인 예라고 할 수 있는 도수현상에 적용하였다. 해석해가 존재하는 수치해석 실험과 도수현상에 대해서 수행한 실내실험을 K-River를 이용하여 모의하고 적용성을 평가하였다. 수치해석 실험과 실내실험은 균일한 단면을 갖는 정상류 상태에서 수행하였다. 실제 하천과 같이 불규칙한 단면에 대한 모형의 적용성 검토를 위해서 월류보가 존재하는 실제 하천에서의 홍수사상에도 추가 적용하였다. K-River의 가장 큰 장점 중 하나는 HEC-RAS의 입력자료를 그대로 이용할 수 있다는 점이다. HEC-RAS는 널리 이용되는 1차원 흐름해석 모형으로 국내에서도 하천 설계 및 관리를 위해서 사용되고 있는 모형이다. 이러한 장점을 이용하여 실제 하천에 대한 K-River의 모의 결과는 관측값 외에도 HEC-RAS 모의 결과와도 비교를 수행하였다.

2. K-River의 개발

2.1 모형의 지배방정식 및 이산화

본 연구에서 개발한 모형의 지배방정식은 하천단면을 적분한 Saint-Venant 방정식으로 Eqs. (1) and (2)와 같이 연속방정식과 운동량방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t}+\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x}=\mathbf{S} \tag{1}$$

$$\mathbf{U}=\begin{bmatrix}A\\Q\end{bmatrix},\ \mathbf{F}=\begin{bmatrix}Q\\ \frac{Q^2}{A}+\frac{A\bar{p}}{\rho}\end{bmatrix},\ \mathbf{S}=\begin{bmatrix}0\\ gA(S_0-S_f)\end{bmatrix} \tag{2}$$

여기서, $\mathbf{U}$, $\mathbf{F}$, $\mathbf{S}$는 각각 흐름에 관한 변수, 흐름율, 생성항을 나타내는 벡터이다. 또한, t와 x는 시간과 단면간 거리, A는 흐름단면적, Q는 유량, $\bar{p}$는 단면에서의 평균 압력, ρ는 물의 평균밀도, S_0는 경사를 나타내며, 마찰경사를 의미하는 S_f는 Manning 공식으로 Eq. (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$S_f=\frac{n^2Q}{A^2R^{4/3}} \tag{3}$$

여기서, n은 조도계수, R은 경심을 의미한다. 경심이나 흐름단면적 등과 같은 자료는 HEC-RAS의 HTab (Hydraulic Property Table) 방법을 차용하여, 수위에 따른 경심, 흐름단면적, 수면폭, 도심 등을 사전에 계산하여 이용하도록 하였다.

천이류와 급변류 등과 같은 불연속 흐름을 안정적으로 처리하기 위해서 유한체적법을 사용하였으며, Fig. 1과 같은 검사체적을 사용하여 이산화를 수행하였다. Fig. 1에서 단면은 x 위치에서 정의하였으며, x_i와 x_{i+1}에서 정의된 단면으로 둘러싸인 검사체적의 평균 단면적을 A_i, 평균 유량을 Q_i로 정의하였다.

Eq. (1)을 Fig. 1과 같이 유한체적법으로 이산화된 공간에 Forward Euler 방법으로 이산화하면 Eq. (4)와 같은 식으로 유도할 수 있다.

$$\mathbf{U}_i^{n+1}=\mathbf{U}_i^n-\frac{\Delta t}{\Delta x}\left(\mathbf{F}_{i+1/2}^n-\mathbf{F}_{i-1/2}^n\right)+\Delta t\mathbf{S}_i^n \tag{4}$$

여기서, n은 시간에 관한 인덱스, i는 검사체적에 관한 인덱스, Δt는 계산시간 간격, Δx는 계산격자 간격, $\mathbf{F}_{i+1/2}^n$는 i번째 셀과 $i+1$번째 셀의 수치흐름률을 의미한다. 수치흐름률을 계산하는 방법은 정확도가 상대적으로 높은 것으로 알려진 근사 Riemann해법 중 하나인 HLL flux를 이용하여 흐름률을 계산하였다.

2.2 흐름률과 생성항의 수치적 균형

Saint-Venant 방정식을 지배방정식으로 사용한 유한체적 모형에서는 불규칙한 지형에 의해 흐름률항과 생성항 간에 불균형이 발생하게 된다. 이 때, 단위 폭의 직사각형 수로 형태로 단면적을 가정하면 Eq. (2)는 Eq. (5)와 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{U}=\begin{bmatrix}h\\hu\end{bmatrix},\ \mathbf{F}=\begin{bmatrix}hu\\hu^2+gh^2/2\end{bmatrix},\ \mathbf{S}=\begin{bmatrix}0\\-hg\frac{\partial z_{bed}}{\partial x}\end{bmatrix} \tag{5}$$

여기서, h는 수위, u는 유속, z_{bed}는 하상고의 높이를 의미한다.

Eq. (5)에서 정수압(hydrostatic) 상태를 가정하면, $u=0$, $h+z_{bed}=const.$ 이므로, Eq. (1)과 Eq. (5)에 의한 운동량 방정식은 Eq. (6)과 같게 된다.

$$\frac{\partial gh^2/2}{\partial x}+\frac{\partial z_{bed}}{\partial x}=0 \tag{6}$$

Eq. (6)은 이산화하기 전에는 자연스럽게 성립하지만, 일반적으로 이산화된 식에서는 불규칙한 지형 등의 영향으로 성립하지 않는 경우가 많다. Fig. 2는 불규칙한 지형에서의 정수압 상태를 나타낸 것이다. Fig. 2와 같은 조건에서는 흐름이 발생하지 않아야 하지만, 이산화된 유한체적 모형에서는 흐름이 발생하며 이 흐름율이 하상경사항의 크기와 일치하지 않으면 수치적 불균형이 발생하여 해의 정확성에 부정적인 영향을 미치게 된다.

이러한 수치적 불균형을 해결하기 위해서 다양한 방법이 제안되었으며, 본 연구에서는 Audusse *et al.* (2004)이 제안한 hydrostatic reconstruction technique를 사용하였다. 위 방법은 불규칙한 지형을 흐름률 계산에 반영할 수 있도록 셀 경계

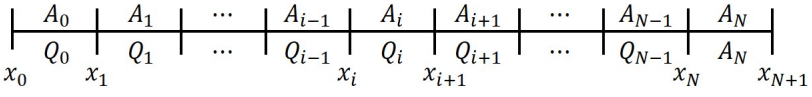


Fig. 1. Discretization and control volume of K-River governing equations

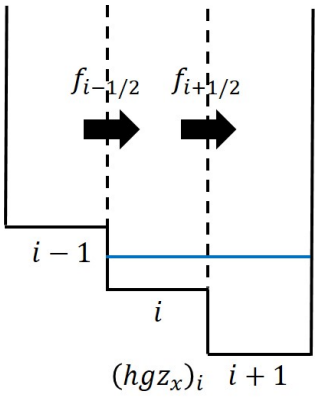


Fig. 2. Hydrostatic condition on irregular bed

면에서의 상태량을 재구축하는 방법이다. Fig. 2에서 $i+1/2$의 셀경계면에서 흐름률은 수치흐름률 $f(h_i, u_i, h_{i+1}, u_{i+1})$로 계산되고, 수치흐름률을 원래의 상태량이 아니라 재구축한 상태량으로 $f(h_{i+1/2-}, u_i, h_{i+1/2+}, u_{i+1})$와 같이 평가하며 재구축한다. 재구축한 상태량을 이용하면 바닥경사를 셀경계면의 단차로 고려하고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 재구축으로 인해 변화된 운동량의 차이를 정수압(hydrodtatic) 상태로 가정하면 두 형태의 생성항이 도출된다. 이를 이용하면 원래 고려되어야할 중력에 의한 압력항과 실제 계산상에서 고려된 중력에 의한 압력항이 각각 상쇄되어 수치적 균형을 맞춰주는 역할을 하게 된다(An and Yu, 2012).

3. 모형의 적용성 평가

3.1 하상융기가 존재하는 개수로 수치실험 모의

Goutal and Maural (1997)이 제시하여 현재까지 많은 모형의 검증에 사용되고 있는 해석해가 존재하고 타원형의 하상융기가 존재하는 하도에 적용을 통해서 모형의 적용성을 평가하였다. Goutal and Maural (1997)은 정상상태에서 수치기법을 검증하고 모의결과의 수렴성을 확인하기 위해서 제시한 세 가지 실험조건을 적용하였다. 각 실험조건은 1) 상류 흐름으로만 구성된 상태(Case Ⅰ), 2) 도수가 발생하지 않는 천이류 상태(Case Ⅱ), 3) 도수가 발생하는 천이류 상태(Case Ⅲ)이다. 위의 실험은 모두 Eq. (7)와 같이 길이 25 m, 폭 1 m의 마찰이 없는 직사각형 단면 수로에서 수행되었으며, 각 실험의 경계조건은 Table 1과 같다.

$$Z(m) = \begin{cases} 0 & \text{if } x \le 8 \\ 0.2 - 0.05(x-10)^2 & \text{if } 8 < x < 12 \\ 0 & \text{if } x \ge 12 \end{cases} \quad (7)$$

Goutal and Maural (1997)의 해석해는 베르누이 방정식을 이용하여 계산될 수 있으며, 도수 발생지점은 Rankine-Hugoniot 관계를 이용하여 찾을 수 있다. 본 연구에서는 100개의 단면을 생성하여 360초 동안에 대한 모의를 수행하여 수렴된 수위와 유량을 베르누이 방정식에 의한 해석해와 비교하면 Fig. 3과 같다.

모의결과, 수위는 해석해와 매우 일치하는 것으로 나타났으며, 지배방정식의 흐름률과 생성항이 적절한 균형을 이루어 정확한 해를 제시하는 것으로 판단하였다. 유량의 경우에도 지형이 급변하는 지점인 하상융기가 존재하는 지점에서 수치적 균형을 잘 이루어 정상상태를 만족할 수 있는 결과가 모의되었다. 자연하도에서 부등류 모의를 수행함에 있어 흐름률과 생성항 간의 균형이 유지되지 못하면, 해가 발산하여 안정적인 모의가 불가능하게 된다. 이러한 점에서 본 연구에서 제안한 모형은 지형이 불규칙한 자연하도에서도 수위와 유량 모두 안정적인 모의가 가능한 것으로 판단된다. 유량의 경우에 하상융기가 존재하는 지점에서 최대오차가 Case Ⅰ은 0.025 m^3/sec, Case Ⅱ는 0.018 m^3/sec, Case Ⅲ은 0.019 m^3/sec와 같이 근소한 오차를 포함하고 있는 것으로 나타났다. 선행연구들(Wang and Kelly, 2017; Aricò *et al.*, 2013; Valiani and Begnudelli, 2006)과 비교하여 거의 유사한 결과를 모의하였다. 위와 같은 오차에 대해서 Cozzolino and Pianese (2006)는 현재까지의 수치기법의 한계로 수치모델링 분야에서 지속적으로 해결해 나가야 할 과제라고 하였다. 따라서 현재까지의 수치해석 분야의 한계를 고려했을 때 K-River가 수치진동 및 수치불안정이 발생하지 않고 안정적으로 모의를 하고 있는 것으로 판단하였다.

3.2 도수현상 실내실험 모의

Mohammed and Qasim (2012)은 위어를 이용하여 도수가 발생하는 실내실험을 약 300여번 수행하였고, 이를 1차원 모

Table 1. Boundary conditions for simulations of steady flow over a bump

Boundary conditions	Case Ⅰ	Case Ⅱ	Case Ⅲ
Upstream boundary condition (water discharge)	4.42 m^3/s	1.53 m^3/s	0.18 m^3/s
Downstream boundary condition (water depth)	2 m	0.406 m	0.33 m

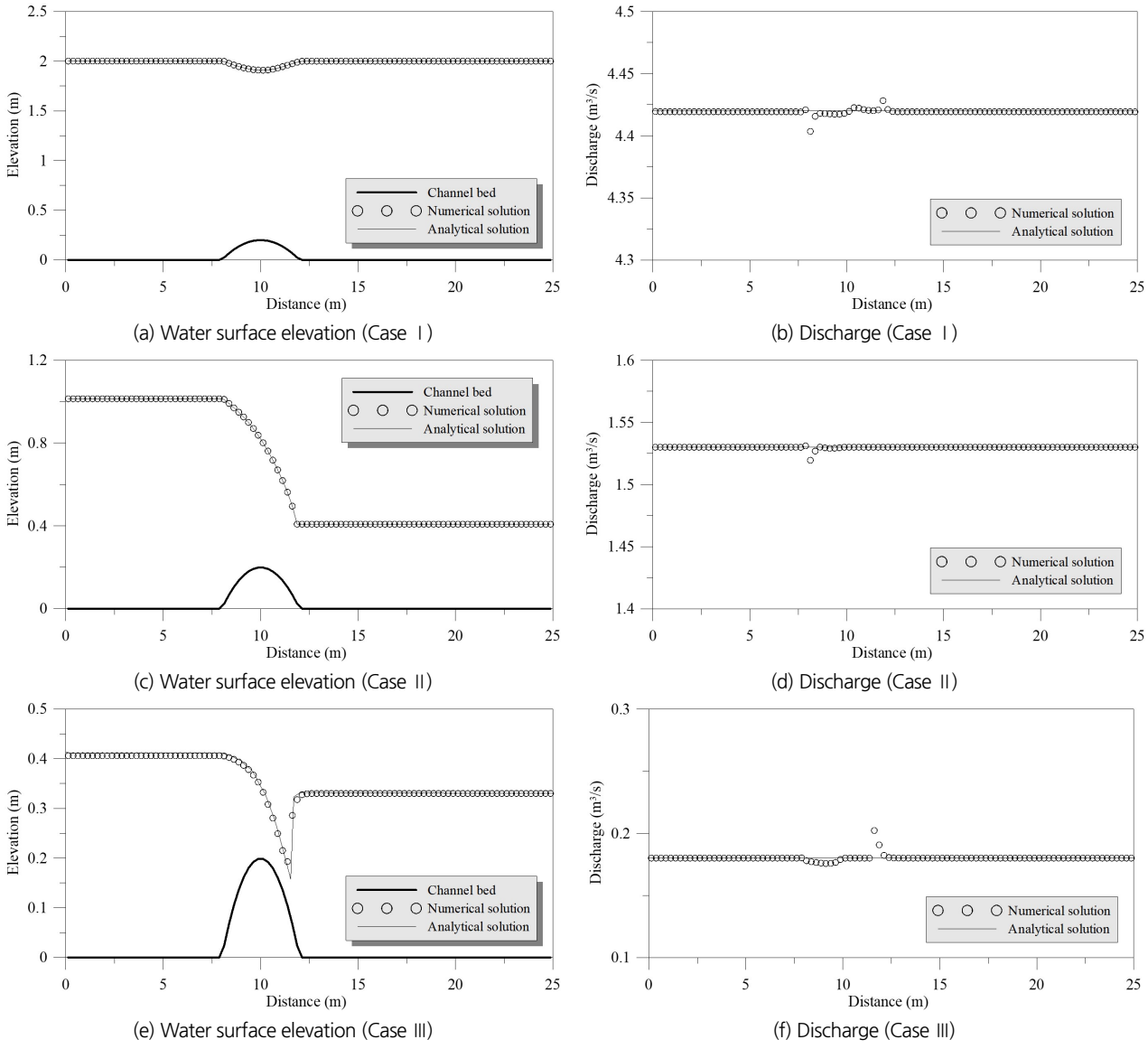


Fig. 3. Simulation results of steady flow over a bump

형인 HEC-RAS와 2차원 모형인 ADH (Adaptive Hydraulics)를 이용하여 모의·검증하는 연구를 수행하였다. 실내실험은 길이 5.0 m, 높이 0.45 m, 폭 0.30 m의 직사각형 수로에서 높이 0.1 m, 천단부 길이 0.08 m, 경사 1:2.5의 위어를 대상으로 상·하류단 경계조건을 변경해가며 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 하류단 경계조건이 0.1 m로 고정된 실험에 대해서 Table 2와 같은 상류단 경계조건에서 이루어진 실험에 대해서 모의를 수행하였다. 1 cm의 격자간격으로 지형을 구성하여 총 500개의 계산 격자를 이용하였으며, 수면형이 안정될 때까지 약 120초 정도를 모의하였다. 조도계수는 0.012를 적용하였다.

Table 2. Boundary conditions for simulations of hydraulic jump

Boundary conditions	Case Ⅰ	Case Ⅱ	Case Ⅲ	Case Ⅳ
Upstream boundary condition (water discharge, m^3/sec)	0.01331	0.01237	0.01186	0.01164

모의결과와 실내실험 결과를 비교하여 도시하면 Fig. 4와 같다. 도수발생 지점과 수면형을 실내실험 결과와 근접하고 안정적으로 모의하는 것으로 나타났다. 모의결과를 정량적으로 평가하기 위해서 Eqs. (8)~(10)과 같이 정의되는 RMSE (Root Mean Square Error)와 BIAS, NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency)를 산정하였다(Table 3).

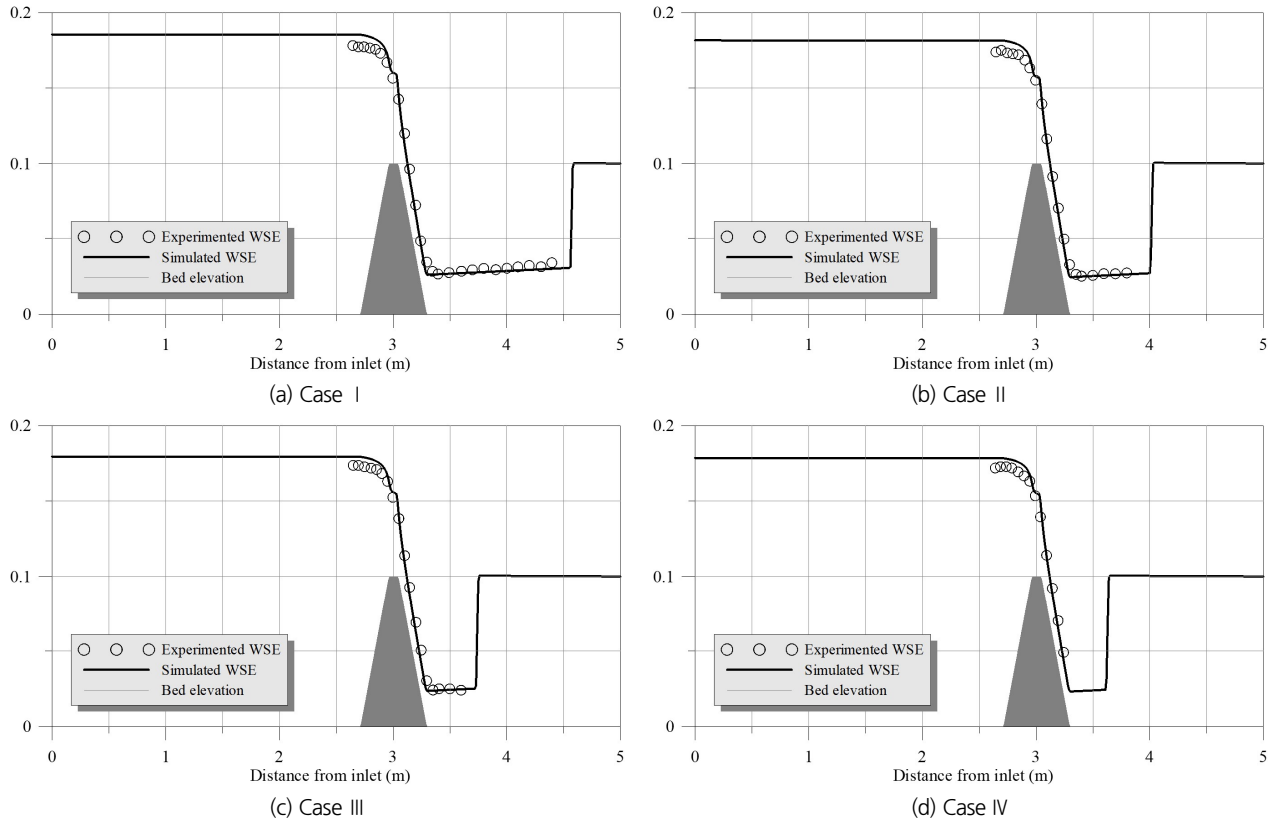


Fig. 4. Simulation results of hydraulic jump

Table 3. Comparison of simulation results of hydraulic jump

Statistical index	Case Ⅰ	Case Ⅱ	Case Ⅲ	Case Ⅳ
RMSE (m)	0.005	0.005	0.005	0.005
BIAS	1.002	1.012	1.005	1.025
NSE	0.994	0.993	0.993	0.983

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i - P_i)^2}{N}} \tag{8}$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^{N} P_i}{\sum_{i=1}^{N} O_i} \tag{9}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(O_i - \overline{O})^2} \tag{10}$$

여기서, N은 자료의 수, O와 P는 관측값과 모의값을 나타낸다. RMSE는 잔차의 제곱근을 산술평균한 값으로 표준편차를 일반화시켜 관측값과 모의치간의 차이를 평가하는 척도이다. RMSE는 0.0에 근접할수록 오차가 없음을 의미한다. BIAS는 모의결과가 과대 혹은 과소 추정을 하는지 평가하기 위해 이용하였으며, 1.0에 근접할수록 모의결과가 양호함을 의미한다. 1.0보다 큰 경우에는 과대추정, 1.0보다 작은 경우에는 과소추정을 의미한다. NSE는 관측값과 모의치 간의 정확성을 검증하는데 주로 사용되는 통계량으로서 1.0이 가장 이상적인 결과를 나타낸다.

모든 모의에서 실험결과를 유사하게 재현하는 것으로 나타났으며, RMSE가 모두 5 mm로 산정되어 오차 역시 크지 않는 것으로 나타났다. BIAS는 모두 1.002~1.025로 산정되어 약간의 과대추정을 하는 것으로 나타났다. 이러한 오차는 위어를 지나는 구간에서 주로 발생하였으나, 오차가 수심 대비 크지 않으므로 허용할 수 있는 수준으로 판단된다. NSE는 모두 1.0보다 작은 0.983~0.994 사이에서 변동하여 정확성이 매우 높은 것으로 나타났다. 따라서 대표적인 불연속 흐름 중 하나인 도수현상을 모의하는데 무리가 없을 것으로 판단하였다.

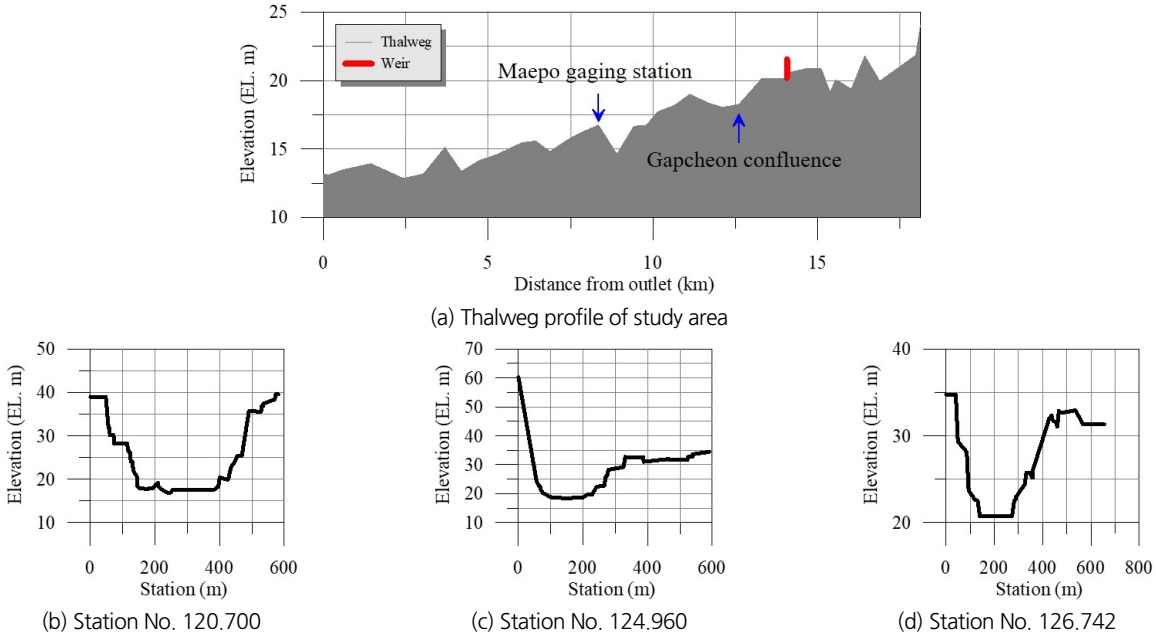
4. 실제 하천 대상의 적용성 평가

실제 하천을 대상으로 K-River의 적용성을 검토하기 위하여 금강 대청조정지댐 하류부터 부강 수위관측소까지 약 18 km 구간을 대상으로 모의를 수행하였다(Fig. 5(a)). 해당 구간에는 국가하천인 갑천이 합류하고, 갑천 합류점 이전에 고무보가 위치하고 있다. 자연하천의 특성에 따라서 불규칙한 형태의 단면 형상을 보이고 있으며, Figs. 5(b)~5(d)는 각각 매포 수위관측소, 갑천 합류후, 갑천 합류전에 위치한 보의 직상류 단면을 나타낸 것이다. 또한, 갑천 합류점 이후에는 매포 수위관측소가 존재하고 있어, 매포 수위관측소의 관측값을 이용하여 모형의 검·보정하였다.

모형의 구성은 대청조정지댐부터 강경 수위관측소까지에 이르는 구간에 대해서 검·보정이 완료된 선행연구(Jeong *et al.*, 2018)의 자료를 이용하였다. Jeong *et al.* (2018)에서 사용한 지형자료는 하천기본계획(MLTMA, 2009)의 지형자료를 이용하였으며, 조도계수는 Manning-Strickler 식을 이용하여 초기값을 산정하고 검·보정 후 이용하였다. 이 때, 사용된 수문자료는 2016년 전체의 일단위 자료를 이용하였다.

실제 모의를 위해서 2011년도 7월의 수문사상을 이용하였으며, 해당기간은 금강유역에서 홍수주의보 및 홍수경보가 발효된 기간이다. 상·하류단 경계조건과 지류인 갑천의 유입량을 나타내면 Fig. 6과 같다.

모의결과는 Fig. 7과 같으며, 매포 수위관측소의 관측수위와 비교하였다. 두 모형 모두 관측수위와 유사한 거동을 나타내었으며, 정량적으로 평가한 결과는 Table 4와 같다. HEC-RAS와 K-River 모두 실제 관측 수위와 유사한 수위를 산정하는 것으로 나타났다. Table 4에서 나타내고 있는 것과 같이, K-River의 모의결과가 HEC-RAS 모의결과보다는 조금 더 관측치를 유사하게 반영하는 것으로 나타났다. Fig. 8은 10일



(a) Thalweg profile of study area

(b) Station No. 120.700 (c) Station No. 124.960 (d) Station No. 126.742

Fig. 5. Thalweg profile and typical cross-section shape at study area

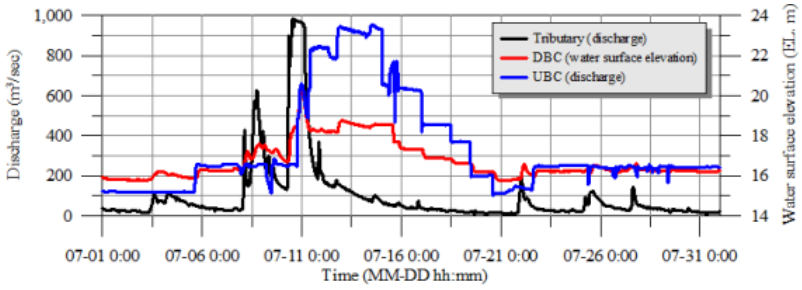


Fig. 6. Boundary condition of study area at 2011

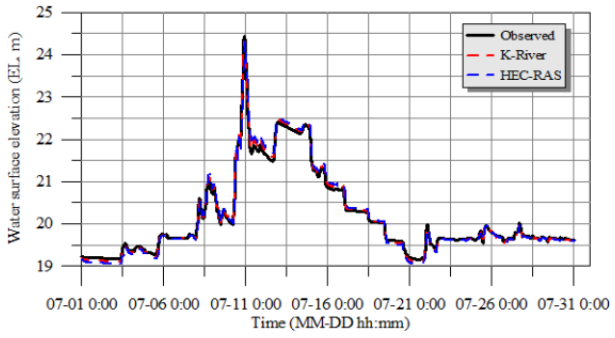


Fig. 7. Comparison of simulation results

Table 4. Comparison of simulation results at Maepo gaging station

Model	RMSE (m)	BIAS	NSE
HEC-RAS	0.130	1.000	0.983
K-River	0.069	1.000	0.995

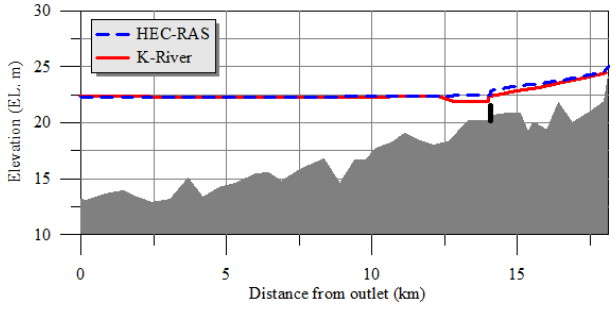


Fig. 8. After 10 days simulated results comparison

간 모의한 수위 결과를 표출한 것이다. K-River의 모의 결과에 의하면 고무보 하류에서 수위가 감소했다 상승하는 현상이 발생하는 반면, HEC-RAS 모의 결과에서는 이와 같은 영향이 없는 것으로 나타났다. 현재까지 측정되는 수문자료에서는 상세한 수위, 유량, 유속 등의 자료가 부족하기 때문에 이러한 현상을 도수 현상이라고 판단하기에는 어려운 부분이 있다. 다만, HEC-RAS는 Pressimann 음해법을 이용하기 때문에 수치감쇠영향으로 인해서 불연속 흐름을 정확하게 모의할 수 없는 반면, Forward Euler 방법을 이용하는 K-River에서 이러한 현상이 모의되었기 때문에 추후 상세한 실제 하천의 자료를 구축하여 검토해볼 필요가 있다고 판단된다.

계산시간 측면에서는 HEC-RAS가 27.43초, K-River가 388.536초로 HEC-RAS가 더 빠르게 모의하는 것으로 나타났다. HEC-RAS는 Implicit 방법을 이용하고 K-River는 Explicit 방법을 이용한다. Explicit 방법은 해의 안정성을 위해서 Courant 수에 의해서 Δt가 결정되도록 하고 있다. 이 때, Δt는 Δx에 반비례하게 되어 Δx가 작아지게 되면 Δt는 증가하게 된다. K-River에서 이용하는 입력자료는 HEC-RAS를 기반으로 구축된 자료를 그대로 입력받아 사용할 수 있도록 구성되어 있다. 따라서 HEC-RAS에서 모의 안정성을 위해 구조물 전·후로 Δx를 매우 작게 구성하였을 경우, K-River의 모의 시간에 큰 영향을 미치게 된다. 위와 같이 작은 Δx를 제외한다면 K-River의 계산속도는 많이 향상될 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 불연속 흐름에 대한 수치모형의 정확도 향상을 위하여 유한체적법과 Forward Euler 방법을 이용한 1차원 흐름해석 모형 K-River를 개발하였다. 모형의 적용성을 평가하기 위해서 하상융기가 존재하는 정상류 흐름에 대해서 모의를 수행하여 해석해와 비교하였다. 또한, 대표적인 불연속 흐름이라고 할 수 있는 도수 현상에 대한 실내실험을 모의하여 실험치와 모의치를 비교하였다. K-River는 두 가지 경우 모두 잘 재현하는 것으로 나타났으며, 실제 적용성에 문제가 없을 것으로 판단하였다. 불규칙한 하상 종·단면에서도 안정적으로 모의를 하는지 검토하기 위하여 금강을 대상으로 적용성을 평가하였다. 모의 대상구간은 합류부와 고무보가 존재하여 불연속 흐름이 발생할 가능성이 크다고 판단되는 대청조정지댐부터 부강 수위관측소까지를 대상으로 하였다. 모의 대상구간 중간에 위치한 매포 수위관측소의 관측치와 비교·검토한 결과, NSE가 0.997로 매우 높게 산정되어 실제 하천에서도 적용성이 높다고 판단하였다. 또한, 하천 설계 등에 많이 활용되고 있는 HEC-RAS와 모의결과를 비교한 결과에서도 K-River가 HEC-RAS 보다 관측치에 유사한 결과를 도출하는 것으로 나타났다.

국내의 하천에는 많은 수의 보가 설치되어 운영되고 있다는 점에서 국외의 하천과 차별점을 갖는다. 이러한 보는 전술한 바와 같이 불연속 흐름을 유발하며, 현재 많이 사용되고 있는 수치모형에서 모의하기에는 다소 어려움이 있다. 이러한 상황에서 본 연구에서 제시한 수치해석모형은 불연속 흐름을 정확하게 모의할 수 있어 하천의 설계 및 유지·관리에 많은 도움이 될 것으로 판단된다. 본 연구에서는 실제 하천에 대한 적용성 평가를 위해서 한 가지 수문사상만을 이용하였으나, 추후 연구에서는 다양한 대상구간과 수문사상에 대해서 적용성 평가 및 하폭변화에 따른 수치적 안정성 검토를 추가로 수행하여 적용성을 확대하고자 한다. 또한, 2차원 침수해석 모형과 연계하여 홍수 시 발생하는 침수사상에 대해서 하도와 침수구역을 1, 2차원 연계해석할 수 있도록 연구를 수행하고자 한다.

감사의 글

이 연구는 충남대학교 및 K-water융합연구원(M170136)에 의해 지원되었습니다.

References

Abbott, M. B., and Basco, D. R. (1989). *Computational fluid dynamics*. Longman Scientific and Technical, New York.

Amiri, S. M., Talebbeydokhti, N., and Baghlani, A. (2013). "A two-dimensional well-balanced numerical model for shallow water equations." *Scientia Iranica*, Vol. 20, No. 1, pp. 97-107.

An, H., and Yu, S. (2012). "Well-balanced shallow water flow simulation on quadtree cut cell grids." *Advances in Water Resources*, Vol. 39, pp. 60-70.

Aricò, C., Sinagra, M., and Tucciarelli, T. (2013). "Anisotropic potential of velocity fields in real fluids: Application to the MAST solution of shallow water equations." *Advances in Water Resources*, Vol. 62, pp. 13-36.

Audusse, E., Bouchut, F., Bristeau, M. O., Klein, R., and Perthame, B. (2004). "A fast and stable well-balanced scheme with hydrostatic reconstruction for shallow water flows." *SIAM Journal on Scientific Computing*, Vol. 25, No. 6, pp. 2050-2065.

Chang, K.-H., Chang, T.-J., and Sheu, T. W.-H. (2017). "Development of an upwinding kernel in SPH-SWEs model for 1D transcritical open channel flows." *Journal of Hydro-environment Research*, Vol. 15, pp. 13-26.

Cozzolino, L., and Pianese, D. (2006). "High-order finite volume modelling of one-dimensional flows." *Proceedings International Conference on Fluvial Hydraulics*, Taylor & Francis, Lisbon, Portugal, Vol. 1-2, pp. 493-502.

Fread, D. L., Jin, M., and Lewis, J. M. (1996). "An LPI numerical implicit solution for unsteady mixed-flow simulation." *Proceedings North American Water and Environment Congress*, ASCE, Anaheim, CA, pp. 1-7.

Goutal, N., and Maurel, F. (1997). *Proceedings of the 2nd workshop on dam-break wave simulation*. Technical Report HE43/97/016/A.

Hu, K., Mingham, C. G., and Causon, D. M. (1998). "A bore-capturing finite volume method for open-channel flows." *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 28, No. 8, pp. 1241-1261.

Jeong, A., Kim, S., Yu, W., Kim, Y., and Jung, K. (2018). "Estimation of river dredging location and volume considering flood risk variation due to riverbed change." *Journal of Korean Society Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 3, pp. 279-291. (in Korean)

Jin, M., and Fread, D. L. (1997). "Dynamic flood routing with explicit and implicit numerical solution schemes." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 123, No. 3, pp. 166-173.

Kim, J. S., and Han, K. Y. (2008). "One-dimensional hydraulic modeling of open channel flow using the Riemann approximate slover I: Model development." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 8, pp. 761-772. (in Korean)

Kim, J. S., Han, K. Y., and Lee, C. H. (2007). "Development of steady non-uniform flow model for a transcritical river." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers B*, Vol. 27, No. 3B, pp. 219-228. (in Korean)

Kim, K., Kim, J., and Kim, W. (2009). "Analysis and comparison of 1D river flow analysis model." *Water for Future*, Vol. 42, No. 7, pp. 56-61. (in Korean)

Kim, K.-H., Lee, H.-R., and Jung, H.-R. (2016). "Improvement study of river-crossing structures in geyongnam prefecture." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 10, pp. 809-821. (in Korean)

Kim, W., Kim, J.S., and Ji, U. (2014). "Development plan of river flow numerical model." *Water for Future*, Vol. 47, No. 6, pp. 29-36. (in Korean)

MLTMA (Ministry of Land, Transport, and Maritime Affairs) (2009). *Geum river basin master plan (changed)*. (in Korean)

Mohammed, J. R., and Qasim, J. M. (2012). "Comparison of one-dimensional HEC-RAS with two-dimensional ADH for flow over trapezoidal profile weirs." *Caspian Journal of Applied Sciences Research*, Vol. 1, No. 6, pp. 1-12.

Popescu, I. (2014). *Computational hydraulics: Numerical methods and modelling*. IWA Publishing.

Preissmann, A. (1961). "Propagation des intumescences dans les canaux et Les Riveres." *Congress de l'Association Francaise de Calcule, Grenoble*, France. (in French)

Rocca, M. L., Montessori, A., Prestininzi, P., and Succi, S. (2015). "A multispeed discrete Boltzmann model for transcritical 2D shallow water flows." *Journal of Computational Physics*, Vol. 284, pp. 117-132.

Valiani, A., and Begnudelli, L. (2006). "Divergence form for bed slope source term in shallow water equations." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, No. 7, pp. 652-665.

Wang, W., and Kelly, D. M. (2017). "A high-order PIC method for advection-dominated flow with application to shallow water waves." *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 87, pp. 583-600.

Woo, H., Kim, W., and Ji, U. (2015). *River hydraulics*. Cheongmoongak. (in Korean)

Wu, W. (2008). *Computational river dynamics*. Taylor & Francis, London.

Zerihun, Y. T., and Fenoton, J. D. (2006). "One-dimensional simulation model for steady transcritical free surface flows at short length transitions." *Advances in Water Resources*, Vol. 29, No. 11, pp. 1598-1607.

Zhou, J. G., Causon, D. M., Ingram, D. M., and Mingham, C. G. (2002). "Numerical solutions of the shallow water equations with discontinuous bed topography." *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 38, No. 8, pp. 769-788.