



Development of river discharge estimation scheme using Monte Carlo simulation and 1D numerical analysis model

Kang, Hansol^a · An, Hyunuk^b · Kim, Yeonsu^c · Hur, Youngteck^d · Noh, Joonwoo^{e*}

^aResearcher, Water Resources Management Research Center, K-water, Daejeon, Korea

^bProfessor, Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea

^cPrincipal Resercher, Water Resources Management Research Center, K-water, Daejeon, Korea

^dPrincipal Resercher, Water Resources Management Research Center, K-water, Daejeon, Korea

^eResearch Fellow, Water Resources Management Research Center, K-water, Daejeon, Korea

Paper number: 22-013

Received: 18 February 2022; Revised: 23 March 2022; Accepted: 24 March 2022

Abstract

Since the frequency of heavy rainfall is increasing due to climate change, water levels in the river exceed past historical records. The rating-curve is to convert water level into flow discharge from the regression analysis of the water level and corresponding flow discharges. However, the rating-curve involves many uncertainties because of the limited data especially when observed water level exceed past historical water levels. In order to compensate for insufficient data and increase the accuracy of flow discharge data, this study estimates the flow discharge in the river computed mathematically using Monte Carlo simulation based on a 1D hydrodynamic numerical model. Based on the existing rating curve, a random combination of coefficients constituting the rating-curve creates a number of virtual rating curve. From the computed results of the hydrodynamic model, it is possible to estimate flow discharge which reproduces best fit to the observed water level. Based on the statistical evaluation of these samples, a method for mathematically estimating the water level and flow discharge of all cross sections is proposed. The proposed methodology is applied to the junction of Yochoen Stream in the Seomjin River. As a result, it is confirmed that the water level reproducibility was greatly improved. Also, the water level and flow discharge can be calculated mathematically when the proposed method is applied.

Keywords: Rating curves, Monte carlo simulation, 1D numerical model, Indirect discharge estimation

Monte Carlo 모의 및 수치해석 모형을 활용한 하천 유량 추정기법의 개발

강한솔^a · 안현욱^b · 김연수^c · 허영택^d · 노준우^{e*}

^aK-water연구원 연구원, ^b충남대학교 지역환경토목학과 교수, ^cK-water연구원 책임연구원, ^dK-water연구원 책임연구원, ^eK-water연구원 연구위원

요 지

기후변화로 집중호우의 강도가 증가함에 따라 하천에서 기왕의 관측 자료가 없는 고수위가 관측되고 있다. 수위-유량 관계 곡선식은 기왕 관측 자료를 바탕으로 수위를 유량으로 환산하기 때문에 관측 자료가 부족한 경우, 유량 자료 생산에 있어서 불확실성이 커지고 정확성이 떨어지게 된다. 부족한 자료를 보완하고 유량자료의 정확성을 높이기 위하여 본 연구에서는 1차원 수치해석 모형을 기반으로 한 Monte Carlo 모의를 이용하여 대상 지역의 유량을 수리학적으로 추정하는 방법을 제시하였다. 기존에 작성되어있는 수위-유량 관계곡선식을 바탕으로 경사, 조도계수, 하폭 등의 영향을 받는 계수와 흐름의 조건에 따라 영향을 받는 지수를 난수로 발생시켜 다수의 가상 곡선식을 생성하였다. 가상의 곡선식과 주요지점의 관측수위를 활용한 수치모의 결과를 비교하여 홍수위의 재현성이 좋은 최적 샘플의 곡선식을 상류 경계 지점의 곡선식으로 선정하였다. 제안한 방법론을 섬진강 요천 합류부를 대상으로 적용하였으며, 그 결과 수위 재현성이 큰 폭으로 개선된 것을 확인하였다. 또한, 제안한 방법론의 적용 시 해당 샘플의 수리해석 결과를 바탕으로 모의단면의 수위와 유량을 수리학적으로 추정할 수 있다는 장점이 있다.

핵심용어: 수위-유량관계곡선식, 몬테카를로 시뮬레이션, 1차원 수치해석 모형, 간접유량 추정

*Corresponding Author. Tel: +82-42-870-7331

E-mail: jnoh@kwwater.or.kr (J. Noh)

1. 서론

기후변화에 따라 가뭄과 홍수가 빈번히 발생하고 있는 상황에서 신뢰성 높은 수문정보의 중요성은 날로 커지고 있다. 수문정보 중 유량자료는 하천이나 댐 이수치수 등 수자원 관리에 있어서 가장 기본이 되는 중요한 기초자료이다. 이에 따라 2020년 수문 조사 기본계획을 통해 유량 국가수문조사망 확대(1차 380개소, 2차 1,489개소)계획을 수립하였으며, 초음파를 적용한 자동 유량 조사 확대 등 다방면으로 유량 자료의 질과 양을 늘리는 노력을 하고 있다. 하지만 최신기술 적용과 전문 인력, 장비가 부족하며 그에 따른 비용이 많이 들기 때문에 연속적으로 직접 관측된 유량 자료는 부족한 실정이다. 일반적으로 연속 유량 자료는 각 유량 관측소에서 작성된 수위-유량관계곡선식(이하 Rating curve)과 관측 수위를 이용하여 산정하고 있다. 하지만 이는 기초자료가 되는 유량 측정 과정에서 기기, 관측원, 계통에 따른 오차나 Rating curve 작성과정에서 생기는 매개변수 추정 오차에 따른 다양한 불확실성을 내포할 수 있다. 이에 따라 다양한 불확실성을 고려한 간접유량 산정 방법이 시계열 유량자료를 생산할 수 있는 방법으로 활용이 가능하다.

수치해석 모형은 적절한 모형의 선정과 정확한 경계조건 및 운영자의 전문적 지식과 경험이 반영된다면 실제 자연 현상을 재현 가능한 것으로 간접유량 산정 및 불확실성 분석에 활용되고 있다. Lee (2001), Lee and Kang (2001)은 DWOPER 모형을 이용하여 수위-수위 경계조건으로부터 유량을 간접 추정하는 방법을 연구하였다. Lee *et al.* (2004)는 HEC-RAS 모형을 이용하여 관측 수위를 유량으로 부정류 계산을 통해 산정하고 이를 실측 유량, Rating curve에 의한 유량과 비교하여 Rating curve 정확도를 높일 수 있음을 판단하였다. Di Baldassarre and Montanari (2009)는 Rating curve의 다양한 불확실성(Rating curve의 외삽 및 내삽에 대한 오차, 계절에 따른 식생 변화로 인한 하상 변동 등)을 HEC-RAS를 통해 분석하였고, Lang *et al.* (2010)은 HEC-RAS와 통계적 설명의 조합으로 외삽에 따른 홍수 분석한 바 있다. Kim and Paik (2015)은 수치표고모델(Digital Elevation Models)과 원격영상자료를 활용하여 수리기하학적 방법을 통해 하폭-유량관계식을 도출한 바 있다. Lee and Kwon (2010)은 2차원 수리학적 모형인 RMA2를 활용하여 쌍치 관측소의 Rating curve을 작성한 바 있다. 이 외에 유량 자료의 질과 양을 위해 Rating curve의 다양한 불확실성을 개선하는 연구로 Choo and Chae (2012)는 수위와 유량만을 이용한 Rating curve이 주변 수문 인자를 반영하지 못하여 생기는 불확실성을 엔트로피 공식을

적용한 Chiu 유속 공식을 통해 개선하고자 하였고, Petersen-Øverleira and Reitan (2009)는 배수효과에 따른 Rating curve의 불확실성을 고려하기 위해 보조 관측소의 수위 차를 활용한 SFD (Stage-Fall-Discharge) 방법을 제시하였다. 측정 자료가 부족한 하천에 대해 Kim *et al.* (2016)는 HPG (Hydraulic Performance Graph)방법을 이용한 Rating curve을 제시하였고, Negatu *et al.* (2022)는 대홍수의 영향으로 Rating curve의 영수위(h_0)가 변화하는 것을 언급하였다. 이에 따라 영수위를 시간에 대한 다항식으로 제시함으로써 수위와 유량 자료의 정확도를 향상시키는 연구를 진행하였다. Hosoda *et al.* (2010)은 홍수파의 이동특성을 고려한 특성곡선기법(Method of Characteristic, MOC)을 이용하여 세 지점의 수위와 파동의 거동을 고려하여 홍수사상에 대한 유량을 추정하였다. Kim (2008)은 몬테카를로 시뮬레이션(Monte-Carlo Simulation, MCS)을 강수 모의발생 과정에서 적용하여 고수위에 대한 Rating curve 작성을 보완한 바 있으며, Kim *et al.* (2013)는 MCS를 이용한 다량의 수문자료로부터 Rating curve 연장 방법으로 불확실성을 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

그러므로 본 연구에서는 간접유량 산정을 통한 연속적인 유량자료 확보와 더불어 Rating curve의 불확실성을 고려하기 위한 방법으로 MCS 방법과 수치해석 모형을 이용한 간접 유량 산정기법을 제시하였다. 수치해석 모형의 상류단 경계 조건으로 적용되는 Rating curve는 경사, 조도계수, 하폭 등에 영향을 받는 계수와 흐름의 조건에 따라 영향을 받는 지수의 함수로 주어진다. Reitan and Petersen-Øverleir (2008), Kim *et al.* (2021)에서 제시된 범위 안에서 균등분포 난수를 발생시켜 다수의 가상 Rating curve를 생성한 바 있다. 가상 Rating curve를 활용하여 해당 지점의 시계열 수위를 유량으로 변환하여 상류단 경계조건으로 활용하고, 하류단 경계조건으로 관측 수위를 활용하였다. 이렇게 구성된 다수의 샘플에 대하여 유한 체적 기반의 1차원 수리해석 모형인 K-River를 적용하여 대상구간 내에 위치한 관측소(비교지점)의 수위 재현성을 평가하였다. 수위 재현성이 좋은 최적 샘플의 Rating curve을 선택하여 상류 경계 지점의 Rating curve으로 선정하고, 수리해석 결과를 바탕으로 모든 단면의 수위와 유량을 간접적으로 추정할 수 있는 기법을 제시하였다. 제안된 방법론을 2020년 8월 대규모 홍수가 발생한 요천 합류부를 대상으로 적용하여 적용성을 검토하였다. 이를 통해 기존에 개발된 Rating curve의 적용범위를 초과하는 대홍수가 발생한 요천 합류부 지역의 분류와 지류의 유량을 간접적으로 추정할 수 있었고, 제안된 방법론을 유량의 추정이 어려운 지점에 적용하여 시계열 유량 자료의 신뢰도 향상에 기여할 수 있음을 확인하였다.

2. 연구방법

2.1 대상지역 및 자료 현황

대상 지역은 2020년 8월 홍수기 발생으로 하천 설계빈도 100년 이상의 집중호우가 발생한 섬진강 요천 합류부로 Fig. 1과 같이 선정하였다. 상류단 경계조건은 Fig. 1의 붉은색 지점으로 본류와 지류에 각각 남원(신덕리) 관측소 및 남원(동림교) 관측소를 선택하였으며, 하류 수위 경계조건으로는 압록(예성교) 관측소를 선택하였다. 해당구간은 본류와 지류의 거리가 각각 26 km 및 15 km이다. 상류단과 하류단 경계조건 사이에 위치한 지점(곡성군(금곡교), 송동(요천대교), 고달(고달교))의 관측 수위자료를 활용하여 홍수사상의 재현성을 검토하였다. 경계지점을 포함한 총 6곳의 수위 관측소의 자료를 이용하여 불확실성이 큰 본류 유량과 지류 유량을 함께 추

정할 수 있도록 구성하였다.

유량-수위 조건의 수치해석을 수행하기 위해서는 시계열 유량자료가 필요하며 이는 관측수위와 Rating curve를 이용하여 생산 가능하다. 상류 관측소의 Rating curve는 한국수문조사연보에서 제시하고 있으며 남원(신덕리) 관측소는 2011년, 남원(동림교) 관측소는 2019년에 구축된 Rating curve를 활용하였다. 남원(신덕리) 관측소의 Rating curve는 Fig. 2(a)와 같으며 수위 범위 0.41~2.25 m에 적용 가능하고 유량측정성과 최고 수위점은 1.53 m이다. 남원(동림교) 관측소의 Rating curve는 Fig. 2(b)과 같으며, 적용수위는 1.22~6.00 m, 유량측정성과 최고점은 2.97 m이다. 적용수위 이상의 산정 유량은 기존 최고점 구간의 Rating curve 식을 적용하였다.

관측수위는 영산강홍수통제소(<http://www.yeongsanriver.go.kr/>)에서 제공하고 있는 자료를 수집하여 이용하였다. 남

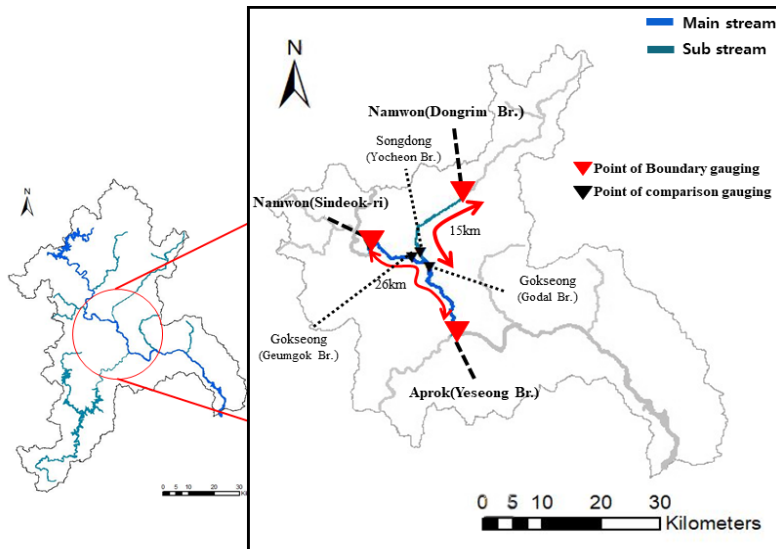
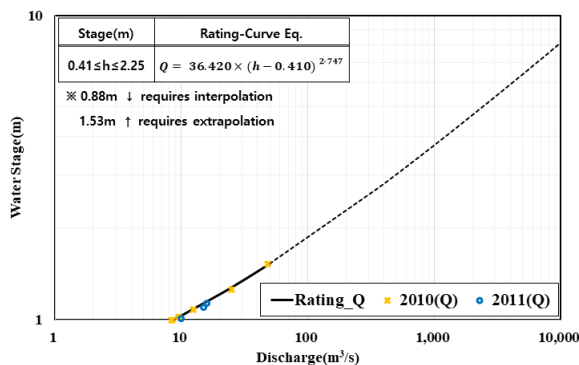
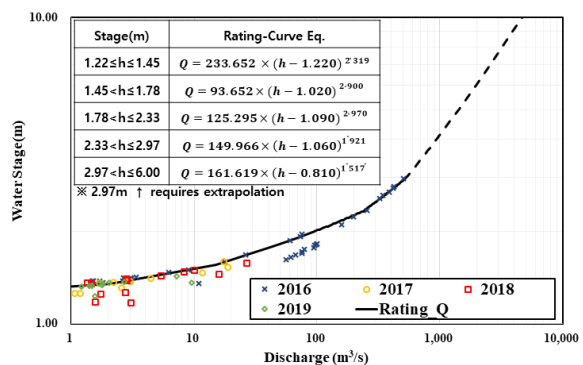


Fig. 1. Geometric data of study area



(a) Namwon (Sindeok-ri) station



(b) Namwon (Donglim-bri) station

Fig. 2. Rating curve from Korea Annual Hydrological Report (2020)

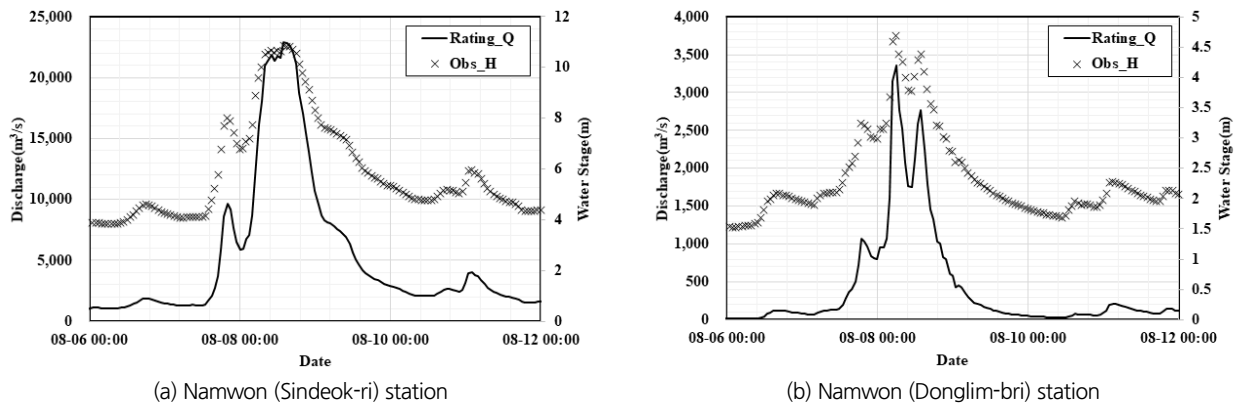


Fig. 3. The observed stage and discharge data of rating curve

원(신덕리) 관측소의 2020년 8월 8일 12:00에서 9일 14:00까지의 기간 동안 관측수위가 누락되어 있다. 본 연구에서 활용하는 수치해석 모형은 유량-수위의 경계조건을 활용하므로 수위 자료의 정확성보다 연속적인 유량 자료의 확보가 중요하다. 이에 따라 보간 방법으로 지류의 유입이 없는 하류의 곡성(금곡교) 관측소의 수위 자료를 이용하였다. 8월 5일에서 8월 15일까지의 기간에 대하여 하류(금곡)의 관측 수위 자료와 상류(신덕리)의 수위 관측 자료간 선형회귀 분석을 통해 수위를 생성하였다. 결국 수위를 보간한 결과와 이를 이용하여 생성한 시계열 유량 자료는 Fig. 3(a)와 같다. 남원(동림교) 관측소의 관측수위 및 Rating curve의 을 통한 시계열 유량 자료는 Fig. 3(b)와 같다.

2020년 국토해양부에서 발간한 섬진강 하천기본계획(보완)에 의하면 100년 빈도로 설계된 요천 합류부 전과 후의 계획 홍수량은 각각 $5,590 \text{ m}^3/\text{s}$, $7,470 \text{ m}^3/\text{s}$ 이며, 요천으로부터 유입되는 양은 $1,880 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 약 25%를 차지한다. 하지만 Rating curve의 선형 보간을 통한 남원(신덕리) 관측소의 고수위 첨두 유량 산정결과는 약 $23,000 \text{ m}^3/\text{s}$, 남원(동림교) 관측소는 약 $3,400 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 100년 빈도 계획 홍수량에 비해 2~3배 이상 높게 나타났다.

2.2 간접유량 산정기법

기존 Rating curve의 적용 범위구간을 초과하는 관측수위에 대하여 Rating curve를 이용해 산정된 유량은 많은 불확실성을 내포하고 있다. 따라서, Rating curve를 기반으로 생성된 시계열 유량 자료를 상류단 경계조건으로 입력하여 수치해석을 하는 경우 하류 관측지점에 수위 재현성이 저하되는 결과가 나타난다. MCS 기법은 다양한 확률분포로부터 특정 변수(variable)의 확률분포를 모의하는데 이용되고 있다. 이를 위해 기본조건은 어떤 한 구성요소의 변화가 다른 구성요소에

영향을 미치지 않는 독립적인 구성요소를 하였다. 다만, 만약 변수들 간의 상관성이 무시할 정도로 작게 존재한다면 독립의 가정을 전제로 한 MCS기법은 큰 오류를 발생시키지 않게 된다. MCS기법은 그 분포 특성이 알려진 확률변수들의 함수로 정의되는 새로운 확률변수의 통계적 특성과 분포함수를 추정할 수 있으므로 자연계의 불확실성을 분석하는데 적합한 방법으로 알려졌다(Kim *et al.*, 2013). 이를 활용하여 본 연구에서는 고수위 유량 자료의 불확실성을 개선한 간접유량 산정기법을 개발하였다. 이를 위해 무작위 유량 자료 중 하도구간의 수위 재현성이 높은 결과를 나타내는 표본 추출을 수행하였다. 해당 연구에 대한 개략적인 절차는 Fig. 4와 같다.

먼저, 가상의 Rating curve 구축을 위하여 하천의 경사, 조도계수, 하폭, 하천의 특성에 따라 결정되는 α' 와 흐름의 조건 및 유적과 수위의 관계에 따라 결정되는 β' 에 대해 일정 범위 안에서 균등분포의 난수를 발생시켰다. α' 와 β' 의 조합을 통하여 생성된 다수의 가상 Rating curve로부터 상류단의 시계열 수위를 유량으로 변환하여 이를 다수의 상류단 경계조건으로, 하류단 경계조건인 경우 시계열 수위를 단일의 하류단 경계조건으로 활용하였다. 다음으로 시뮬레이션을 위해 사용한 K-River는 K-water에서 자체적으로 개발된 1차원 흐름해석모형으로 빠른 시간 내에 다수의 결과 도출이 가능하다. 유한체적법(Finite Volume Method, FVM)을 이용하여 수치해석 시 유량손실을 최소화 할 수 있을 뿐만 아니라 타 모형 대비 부정류 해석에 안정적인 결과를 도출할 수 있다. 또한, 일반적으로 사용하고 있는 HEC-RAS 지형 데이터를 자동변환 기능을 탑재하고 있어 모형의 단면구축에 용이하다. 마지막으로 수위 재현성 평가는 상기 기술된 경계조건과 K-River 모형을 이용하여 하도구간 중 관측소가 존재하는 단면의 계산수위와 관측수위간 정량 평가를 실시하며 이로부터 최적의 샘플을 추출하였다. 추출된 샘플의 각 단면에서의 수위-유량 관계를

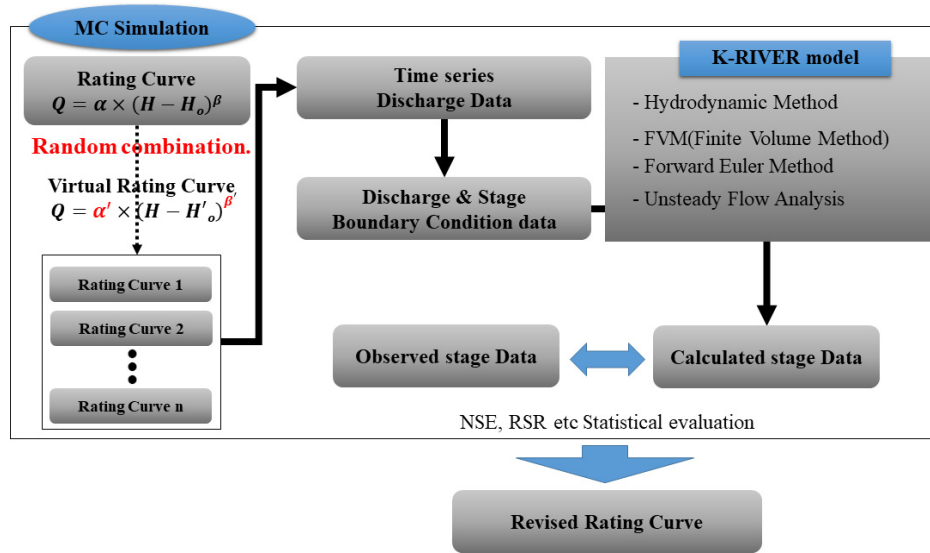


Fig. 4. Flow chart of the rating curve considering uncertainty

이용하여 임의의 지점에서의 Rating curve 구축이 가능할 뿐만 아니라, 상류단 Rating curve는 해당 샘플의 α' , β' 을 이용하여 Rating curve의 구축이 가능하다. 이 전체적인 과정은 무작위 표본으로부터 함수의 수리학적 결과를 이끌어내는 MCS 기법을 활용한 결과이다.

2.2.1 무작위 조합을 이용한 가상 Rating curve

현재 수위와 유량의 관계를 표현하기 위하여 국내 또는 해외에서 가장 널리 쓰이고 있는 Rating curve은 Lambie (1978)가 제시한 지수식을 사용하고 있다(Eq. (1)). 또한, 일반적으로 하나의 지수식을 통해 관측지점의 수위-유량 관계를 나타내기 어려운 경우 구간별 Rating curve를 적용한다.

$$Q = \alpha \times (H - H_o)^\beta \quad (1)$$

여기서, Q 는 유량(m^3/s), H 는 Q 에 상응하는 수위(m), α 와 β 는 회귀분석을 통해 추적한 상수, H_o 는 유량이 0인 점에서의 수위이다. α 는 지점의 지역적 특성에 따른 상수이며, 대하천에서는 큰 값을 소하천에서는 작은 값으로 나타난다(Chang and Lee, 2005). β 는 예외가 존재하지만 하천의 형상과 수위 변화에 따라 달라지는 하천의 통계특성을 반영하는 값이며 형상에 대한 개략적인 범위의 검토가 가능한 상수이다. Kennedy (1984)는 단면통제인 경우 β 는 2.0 이상의 범위에 있으며, 하도통제인 경우는 2.0 보다 작은 범위를 제시하고 있다. Cho (2003)은 β 의 범위를 1.5에서 2.5 사이에 값을 갖는 것으로 제시한 바 있으며, Birgir *et al.* (2021)은 β 에 대해

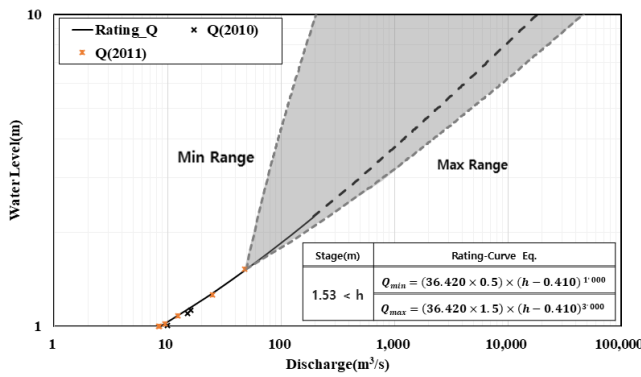
1.0~2.67의 범위를 유체 역학적 증명을 통해 제시하였다.

수위와 유량 간 선형적인 관계를 유지하고, 기존 연구에서 제시하는 범위를 만족함과 동시에 무작위적인 유량 자료를 생성하기 위해 계수(α , β)를 조절하였다. Eq. (2)와 같이 α' 는 기존 α 값에 따라 범위를 설정하였으며, β' 는 앞서 제시한 참고문헌에 따른 범위로 설정하였다. 설정된 범위내에서 균등분포 난수 발생을 통해 계수를 결정하였다. α' 과 β' 를 기반으로 작성된 Rating curve는 Eq. (3)의 형태를 가지며, H_o' 는 가상 Rating curve와 기존 Rating curve의 분리 구간을 맞추기 위한 계산 값으로 Rating curve의 수위 경계 구간에 해당하는 (Q_i , H_i)을 이용한 역산 결과이다.

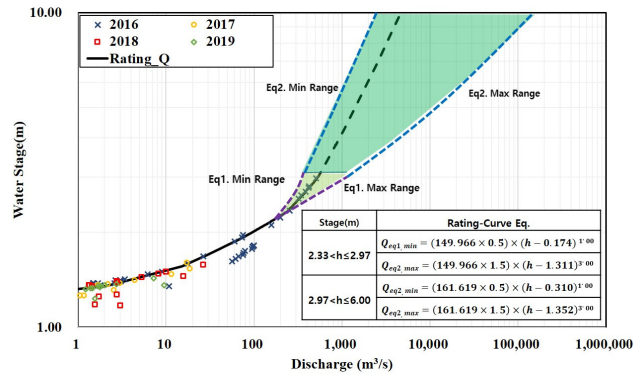
$$\alpha \times (1 - K) \leq \alpha' \leq \alpha \times (1 + K) \quad (2)$$

$$Q' = \alpha' \times (H - H_o')^\beta \quad (3)$$

상기 제시한 방법론의 적용은 본 연구에서 측정성고가 부족하거나 Rating curve 적용 범위 이상에 대해서만 적용하였다. 또한 가상 Rating curve 작성을 위해 균등분포 난수 발생시키기 위한 α' 의 범위는 $0.5\alpha \sim 1.5\alpha$, β' 는 1.0~3.0로 설정하였다. 여기서 α' 의 범위를 위한 α 는 방법론을 적용시키기 전 기존 Rating curve으로부터 추정하였으며 β' 는 상기 제시한 범위를 포함할 수 있도록 설정한 범위이다. 상류지점 수위 관측소에서 방법론을 적용한 수위구간은 남원(신덕리) 관측소는 1.53 m 이상의 수위와 남원(동림교) 관측소는 2.33 m 이상의 수위가 불확실성 구간으로 판단하였다. 이 중, 남원(동림교)



(a) Rating curve in Namwon (Sindeok-ri)



(b) Rating curve in Namwon (Donglim-bri)

Fig. 5. Rating Curve considering uncertainty

관측소의 경우 고수위 구간(2.33~2.97 m)에서 과거 유량 측정성과가 있지만 Rating curve 작성에 사용된 2016~2019년 총 유량측정성과 86개 중 7개가 있으며 2016년에만 관측된 값이다. 이로 인해 불확실성이 존재한다고 판단하여 남원(동림교) 관측소에서는 가상구간을 2개로 구분하여 적용하였다. 매개변수 조절에 따른 가상 Rating curve의 최소 및 최대의 범위와 함께 기존 Rating curve를 Fig. 5와 같이 도시하였다.

2.2.2 입력자료 구축

국내에서 홍수사상의 재현을 위하여 일반적으로 활용되고 있는 DWOPER, HEC-RAS, FLDWAV 등의 모형은 유한차분법(Finite Difference Methods, FDM)기법을 사용하고 있다. FDM기법의 활용시 Mass balance error가 발생할 수 있고, 수치해석시 발산하는 현상이 나타날 수 있을 뿐만 아니라 대부분 소스코드가 공개되지 않아 활용이 어려운 단점이 있다. 특히, 국내의 하천에는 다양한 수리구조물이 설치되어 있어 부정류 모의시 불연속 흐름이 발생하는 경우가 빈번하여 이를 해석할 수 있는 기법을 채용한 모형의 활용이 필수적이다. 본 연구에서는 K-water에서 자체적으로 개발하여 운영하고 있는 K-River를 활용하였으며, K-River는 FVM기법과 Forward Euler방법을 기반으로 불연속 흐름해석을 위한 수치기법이 적용되어 mass balance를 유지할 수 있는 장점이 있다(Jeong *et al.*, 2018).

본 연구의 대상지역은 남원(신덕리) 관측소부터 압록(예성교) 관측소까지 26 km, 지류의 요천 남원(동림교) 관측소부터 합류점까지 약 15 km 이다. 구축에 필요한 하천단면자료는 MOLIT(2003, 2021)을 사용하였다. 조도계수도 각 하천의 하천정비기본계획을 참고하여 각 하천 및 단면 구간별로 0.030~0.035 의 값을 적용하며 자세한 단면별 조도계수는 Table 1과 같다. 수치해석을 위한 초기조건은 홍수가 시작되

Table 1. Roughness coefficient of each river cross-section

River	Cross-section No.	Roughness Coefficient
Seomjin	No. 89.200 ~ No. 87.000	0.032
	No. 86.800 ~ No. 81.200	0.033
	No. 81.086 ~ No. 78.200	0.032
	No. 78.000 ~ No. 62.200	0.030
Yochoen	No. 0.000 ~ No. 10.200	0.033
	No. 10.360 ~ No. 15.290	0.035

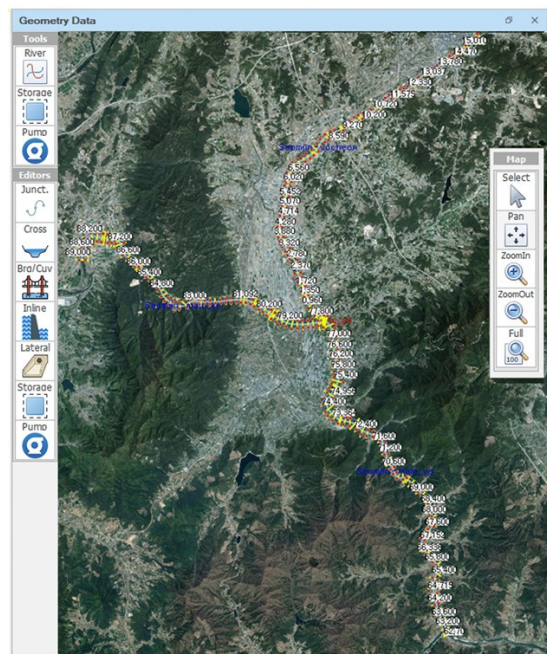


Fig. 6. Geometric data of study area in K-River

기 전 2020. 8. 5 00:00에서 2020. 8. 6 12:00까지 총 36시간의 자료를 이용해 Warming-up 한 결과로 사용하였다. K-River

모형에 구축된 결과는 Fig. 6과 같다.

3. 모의 결과

3.1 기존 Rating curve에 대한 수위 재현성 평가

수위 재현성 평가를 위한 정량적인 지표로 NSE (Nash-Suttcliffe Efficiency)와 RSR (RMSE-observations Standard deviation Ratio)을 이용하였으며 다음 Eqs. (4) and (5)과 같이 구할 수 있다.

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{t=1}^n (h^t - h_o^t)^2}}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (h^t - h_{o,avg})^2}} \quad (4)$$

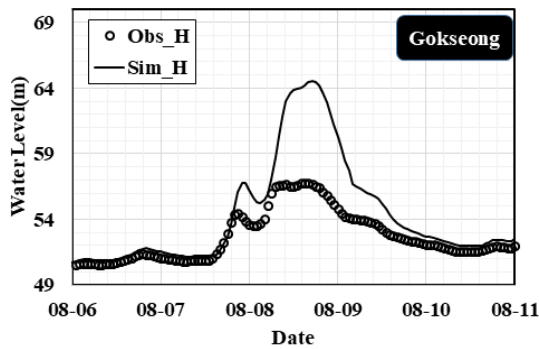
$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{n_t} (h_o^t - h^t)^2}{\sum_{t=1}^{n_t} (h_o^t - h_{avg})^2} \quad (5)$$

여기서, t 는 시간, h_o 는 관측 수위(m)이며, h 는 수치해석 모형을 통한 모의 수위(m), h_{avg} 는 수위의 평균을 나타낸다. NSE는 관측 값과 모의치 간의 정확성을 검증하는데 사용되는 통계량으로서 1.0이 가장 이상적인 결과를 나타낸다. RSR은 RMSE를 정규화 시킨 값이며 평가지표와 함께 Moriasi *et al.* (2007)에서 제시하고 있고 평가지표의 수리학적 평가 범위는 Table 2와 같다.

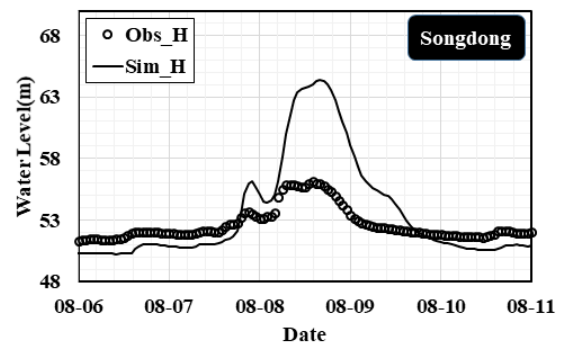
먼저, 기존 Rating curve가 갖는 불확실성을 평가하기 위해 대상지역 관측수위 및 환산 유량자료를 이용하여 비교지점의 수위를 모의하였다. 비교지점 관측소마다 관측 수위(Obs_H)와 K-River 모형을 이용한 모의 수위(Sim_H)를 비교한 결과

Table 2. General performance ratings for recommended statistics (Moriasi *et al.*, 2007)

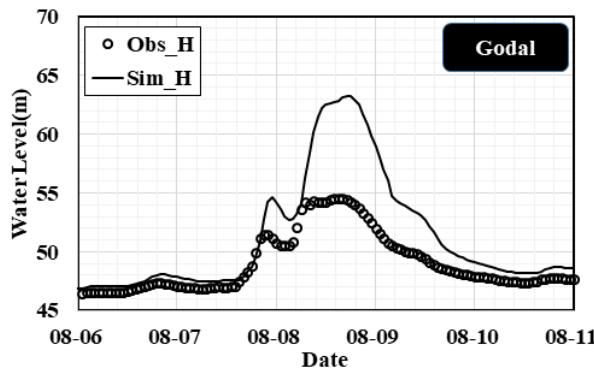
Performance Rating	NSE	RSR
“Very Good”	$0.75 \leq NSE \leq 1.00$	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$
“Good”	$0.65 \leq NSE \leq 0.75$	$0.50 \leq RSR \leq 0.60$
“Satisfactory”	$0.50 \leq NSE \leq 0.65$	$0.60 \leq RSR \leq 0.70$
“Unsatisfactory”	$NSE \leq 0.50$	$RSR > 0.70$



(a) Gokseong (Geumgok-bri) station



(b) Songdong (Yochoen-bri) station

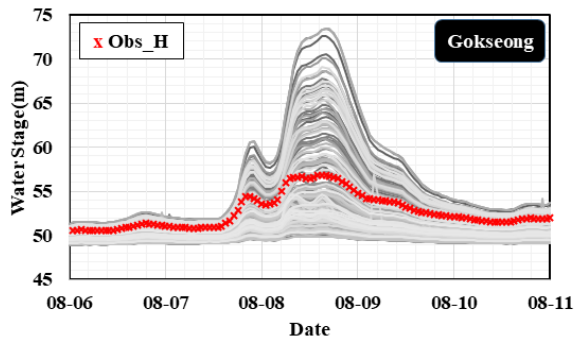


(c) Godal (Godal-bri) station

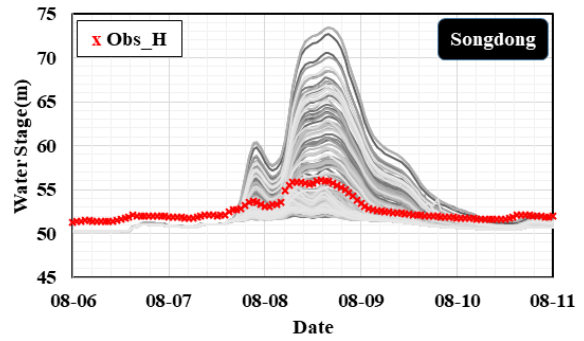
Fig. 7. Result of observe and simulation stage with rating curve

Table 3. Statistical result without considering uncertainty

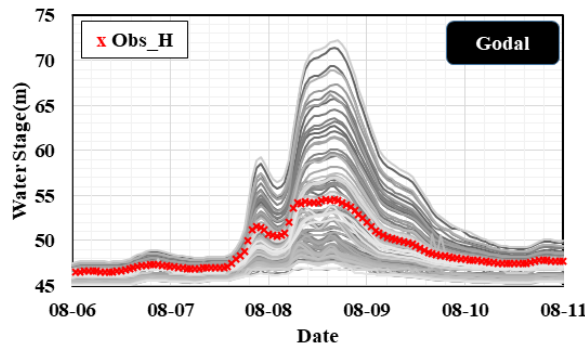
	The highest sim stage (m)	The highest obs stage (m)	NSE		RSR	
Gokseong	64.55	56.82	-1.17	“Unsatisfactory”	1.47	“Unsatisfactory”
Songdong	64.40	56.14	-4.77	“Unsatisfactory”	2.40	“Unsatisfactory”
Godal	63.28	54.51	-0.87	“Unsatisfactory”	1.37	“Unsatisfactory”



(a) Gokseong (Geumgok-bri)



(b) Songdong (Yochoen-bri)



(c) Godal (Godal-bri)

Fig. 8. Result of MC simulation

Table 4. Statistical result in Gokseong, Songdong and Godal

	No.	0	1	...	84	85	86	...	108	...	220	221	...	235	236	...	499
Gokseong (G)	NSE	0.72	-1.85	...	-3.14	0.90	0.25	...	0.96	...	0.97	-9.63	...	0.58	0.97	...	0.58
	RSR	0.28	2.85	...	4.14	0.10	0.76	...	0.04	...	0.03	10.63	...	0.42	0.04	...	0.42
Songdong (S)	NSE	-0.21	0.00	...	-9.10	0.46	0.18	...	0.45	...	0.42	-23.75	...	0.15	0.39	...	0.28
	RSR	1.21	1.00	...	10.10	0.55	0.82	...	0.55	...	0.58	24.75	...	0.85	0.61	...	0.72
Godal (D)	NSE	0.74	-0.33	...	-2.17	0.94	0.54	...	0.97	...	0.97	-6.66	...	0.71	0.97	...	0.75
	RSR	0.24	1.51	...	3.17	0.06	0.46	...	0.03	...	0.03	1.26	...	0.29	0.03	...	0.25

는 Fig. 7과 같이 나타내었으며, 모의 기간은 2020년 8월 6일~11일 간 총 5일이다. 평가지표를 통한 비교 결과는 Table 3과 같으며 세 지점 모두 “Unsatisfactory” 결과로 수위 재현성이 떨어짐을 알 수 있다. 특히, 첨두유량 부분에서 과다하게 산정되는 모의 수위는 Rating curve의 고수위에 대한 불확실성이 반영된 결과로 보인다. 집중호우가 시작되는 8월 7일

19:00 부터 세 관측소 모두 관측 수위보다 모의 수위가 과다 산정되고 있다. 특히, 지류인 요천의 합류 전과 후 관측소들 모두 수위 차이가 발생한 것은 분류와 지류의 Rating curve에서 고수위에 대한 불확실성이 있다는 것과 기존 수위-유량간의 회귀 방법만으로 유량을 추정하기에는 한계가 있음을 확인할 수 있다.

3.2 MCS를 이용한 모의 결과

Rating curve의 불확실성을 고려하고자 2.2.2절에서 제시한 범위를 만족하는 매개변수의 랜덤 조합을 통해 총 500번의 MC 시뮬레이션을 수행하였다. 비교지점 관측소에서 모의 수위와 관측수위 비교 결과는 Fig. 8과 같고, 각 샘플 별 평가지표 NSE, RSR의 분석 결과는 Table 4와 같다. 매개변수 기준 최소 및 최대 가상 Rating curve 설정에 따라 모의결과에서 모의 자료의 최소 및 최대의 모의 수위 구간이 나타났다. 3곳의 관측소(비교지점) 모두 수위 재현성이 높은 샘플을 추출하고자 하였다. 기존 Rating curve가 이미 과다 산정되고 있기 때문에 최대 첨두 수위에서는 최대 20 m 까지 차이를 나타냈다.

수위 재현성 평가 지표 “Very Good” 이상의 결과를 얻는 것을 목표로 설정하였으나, 송동(요천대교) 관측소의 결과는 NSE 0.455, RSR 0.545 로 각각 “Unsatisfactory”와 “Good”으로 나타났다. 또한 기존 Rating curve의 수위 재현성 결과에서와 마찬가지로 다수의 시뮬레이션 결과에서 홍수기 시작 전의 수위가 평균 1 m 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다. 곡성 관측소와 고달 관측소는 지류인 요천의 합류를 중심으로 전과 후 관측소이기에 하류부에 대한 영향을 파악할 수 있다. 따라

서 송동(요천) 관측소를 제외한 NSE와 RSR의 각 합계로부터 최적의 값을 추출하였으며, 그 결과는 Fig. 9와 같다.

4. 고수위 Rating curve 작성

수위 재현성의 최적 값을 생산한 경계지점의 Rating curve는 Fig. 10과 같다. 비교를 위해 기존 Rating curve, 유량측정성과 자료와 함께 도시하였으며 각 연도별로 다른 색을 사용하여 도시하였다. 남원(신덕리) 관측소의 고수위 구간 Rating curve는 $1.53 \leq h$ 범위에서 $Q = 45.306 \times (h - 0.488)^{2.256}$ 로, 요천의 남원(동림교) 관측소는 적용 수위 $2.33 \leq h \leq 2.97$ 범위에서 $Q = 212.952 \times (h - 1.271)^{1.900}$ 를 $2.97 \leq h \leq 6.00$ 범위에서 $Q = 93.092 \times (h + 0.977)^{1.336}$ 으로 작성하였다. 고수위에 대한 실제 유량측정자료가 없는 상황에서 하류의 관측 수위를 이용하여 작성한 Rating curve는 간접적으로 홍수 유량 추정하는데 신뢰성이 더 높일 수 있다고 판단된다.

송동(요천) 관측소는 매개변수의 난수 분포 조합을 이용한 수위 재현성이 현저히 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 수치

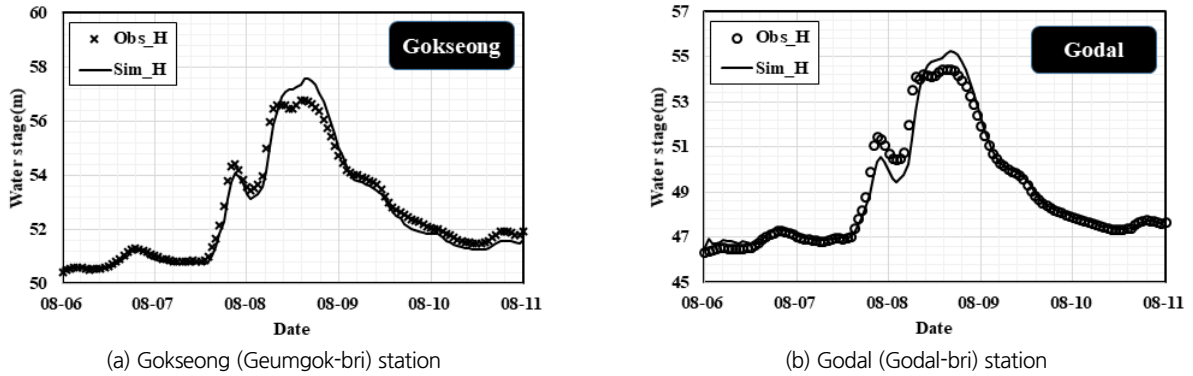


Fig. 9. Best result of MCS

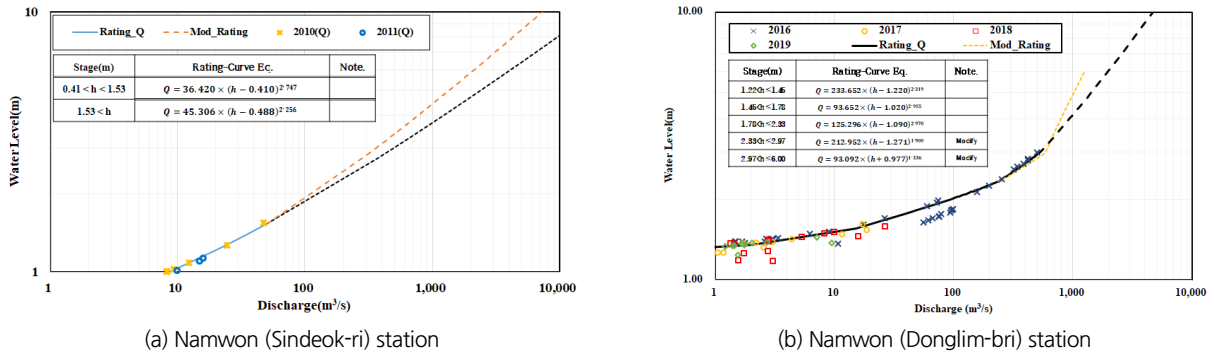
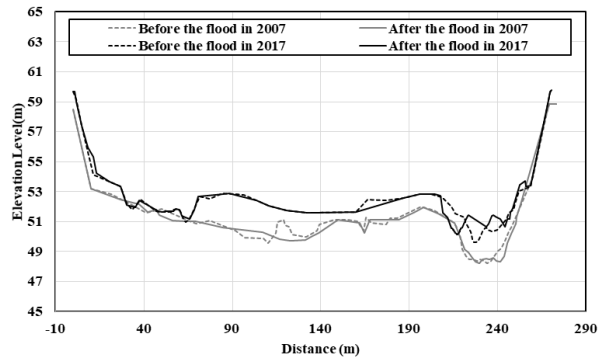


Fig. 10. Modify rating curve equation considering uncertainty



(a) The aerial photography from 2003 to 2020



(b) The river cross section in 2007 and 2017

Fig. 11. The river cross section of Yochoen-bridge. comparison

해석 과정에서 영향을 끼치는 여러 가지 요인 중 하천단면 자료 최신화의 문제로 분석되며, 이를 확인하기 위해 항공사진 및 요천대교 단면 비교를 통해 확인하였다. Fig. 11(a)는 항공사진을 통해 송동(요천대교)의 하상 단면 변화를 시간에 따라 비교한 사진이며, Fig. 11(b)는 2007년과 2017년 홍수기 전후로 요천대교 구간의 하천 단면 변화를 도시한 결과이다. 하천 단면을 구축하기 위해 사용된 하천기본계획 자료가 본류는 2020년 하천기본계획으로 수위 관측 시기와 일치한 것에 반해 요천 구간은 2003년 하천기본계획을 바탕으로 구축되어 차이가 발생한 것으로 분석된다. Lee *et al.* (2004)는 HEC-RAS 모형을 통한 간접유량 추정을 실시함에 있어 횡단면의 측량 및 측정 보완이 된다면 Rating curve의 개선에 도움이 될 것이라 언급하였다. 향후 보완된 하천측량 자료를 사용할 수 있다면 신뢰성과 재현성이 높은 수위-유량 관계 Rating curve의 구축이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 Rating curve의 고수위 환산 유량 자료의 불확실성을 평가하고, 고수위에 대한 유량을 수치해석모형인 K-River를 활용하여 간접적으로 유량을 추정할 수 있는 기법을 제시하였다. Rating curve에 의한 불확실성을 고려하기 위한 방법으로 Rating curve의 매개변수를 균등분포 난수 발생시킴으로서 다수의 Rating curve를 작성하였다. 다수의 Rating curve와 시계열 관측 수위를 이용하여 생산된 시계열 유량 샘플 자료들을 상류단 경계조건으로 설정하여 1차원 수치해석 모형을 이용해 수치모의를 하였고, 하류의 관측소가 설치된 곳(비교지점)의 수위를 계산하였다. 계산된 수위와 홍수기 관

측 수위의 정량적 평가를 통해 다수의 샘플 중 최적의 값을 결정하였다. 최적의 값으로부터 홍수기 기간의 유량과 경계 지점의 Rating curve를 작성할 수 있다. 방법론의 검증에 위해 2020년 홍수가 발생한 섬진강 요천 합류부 지역에 적용하였고 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 수치해석 모형을 통해 기존 Rating curve의 불확실성을 확인할 수 있다. 남원(신덕리) 관측소와 남원(동림교) 관측소를 경계조건으로 설정하고, 하류의 3곳 관측소 수위를 계산하였다. 그 결과 침두 수위에서 평균 8m의 오차와 정량적 평가 기준 “Unsatisfactory” 로 고수위에 대한 불확실성을 확인 하였다.
- 2) Rating curve의 매개변수를 균등분포 난수 발생시킨 샘플 중 하류의 수위 재현성이 높은 최적의 값을 통해 고수위에 대한 유량 자료 및 Rating curve를 작성할 수 있었다. 수위 재현성 결과는 “Very Good” 으로 이를 통해 하류의 관측 수위와 수치해석 모형을 이용함으로써 수리학적으로 신뢰성 높은 간접 유량 추정이 가능하다고 판단된다.
- 3) 본 연구의 방법론을 위해서는 최신 단면자료의 구축이 필수적이다. 섬진강 지류 관측소의 모의 결과를 통해 확인할 수 있었다. 하천단면자료(2003)와 관측시기(2020)의 차이로 인해 본류(2020)에 비해 수위 재현성이 떨어짐을 확인할 수 있었다. 본 연구의 간접유량 추정기법은 시계열 유량 자료 생산에 어려움 혹은 불확실성이 존재하는 곳에 적용이 가능하며 미계측 지역 및 대홍수 발생 시 향후 발생 가능한 수해 대책 마련에 필요한 기초자료 확보에 기여할 수 있을 것이다.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Birgir, H., Helgi, S., Sölvi, R., Axel, Ö.J., Rafael, D.V., and Sigurdur, M.G. (2021). "Generalization of the power law rating curve using hydrodynamic theory and Bayesian hierarchical modeling." *Landsvirkjun Energy Research Fund, Research Fund of Vegagerdin*, Vol. 33, No. 2, e2711. doi: 10.1002/env.2711
- Chang, K.H., and Lee, J.H. (2005). "Stage-discharge rating curve model development and modification." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 38, No.4, pp. 271-280.
- Cho, Y.D. (2003). *The automated program in deriving the stage-discharge curve by applying coefficient of variation*, Master Thesis, Chungnam National University, pp. 14-16.
- Choo, T.H., and Chae, S.K. (2012). "A study on the estimation of discharge in unsteady condition by using the entropy concept." *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 13, No. 12, pp. 6159-6166.
- Di Baldassarre, G., and Montanari, A. (2009). "Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis." *Hydrology and Earth System Science*, Vol. 13, No. 6, pp. 913-921.
- Hosoda, T., Onda, S., Murakami, T., Iwata, M., Shibayama, Y., and Puay, H.T. (2010) "Flood flow simulation in the case of lack of both upstream and downstream boundary conditions." *17th IAHR-APD Congress and 7th IUWM Conference*, IAHR, New Zealand, pp. 1-9.
- Jeong, A.C, An, H.U., Kim, Y.S., and Noh, J.W. (2018). "Development of 1D finite volume model for discontinues flow simulation (K-River)", *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. 10, pp. 895-903.
- Kennedy, E.J. (1984). *Discharge Ratings at gaging station*. Techniques of water-resources investigations 03-A10, The United States Geological Survey (USGS), Washington, D.C., U.S., pp. 5-7. doi: 10.3133/twri03A10
- Kim, J.C., and Paik, K.R. (2015). "Deriving channel width-discharge relationship from remote sensing imagery and digital elevation models." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 8, pp. 685-693.
- Kim, J.S. (2008). *Flood risk analysis and development of rainfall-stage-discharge curve using monte carlo simulation in urban stream*. Ph. D. Dissertation, University of Seoul, pp. 1-141.
- Kim, J.S., Yoon, S.K., and Moon, Y.I. (2013). "Development of rating curve for high water level in an urban stream using Monte Carlo simulation." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 4. pp. 1433-1446. doi: 10.12652/Ksce.2013.33.4.1433
- Kim, S.E., Shin, J.H., Seo, I.W., and Lyu, S. (2016). "Development of stage-discharge rating curve using hydraulic performance graph model." *Procedia Engineering*, Vol. 154, pp. 334-339.
- Kim, Y.S., Oh, S.R., Lee, S.S., Byun, J.S., and An, H.U. (2021). "Application of stage-fall discharge rating curves to a reservoir based on acoustic doppler velocity meter measurement data." *Water 2021*, Vol. 13, No. 17, 2443. doi: 10.3390/w13172443
- Lambie, J.C. (1978). "Measurement of flowvelocity area methods." *Hydrometry: principles and practies*, Edited by Herschy, R.W., Wiley, Chichester, UK, pp. 1-52.
- Lang, M., Pobanz, K., Renard, B., Renouf, E., and Sauquet, E. (2010). "Extrapolation of rating curves by hydraulic modelling, with application to flood frequency analysis", *Hydrological Sciences Journal - Journal des Sciences Hydrologiques*, Vol. 55, No. 6, pp. 883-898.
- Lee, J.J., and Kwon, H.H. (2010). "A basic study of stagedischarge rating stabilization at the ssang-chi gauging station." *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 30, No. 1B, pp. 81-87.
- Lee, S.H. (2001). "Determination of Stage-discharge relations by hydraulic channel routing and stage measurement." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol.34, No. 5, pp. 551-560.
- Lee, S.H., and Kang, S.U. (2001). "Stream discharge estimation by hydraulic channel routing and stage measurement." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 34, No. 5, pp. 543-549.
- Lee, Y.H., Lee, C.S., and Park, K.B. (2004). "Improvement of rating-curve by HEC-RAS." *Journal of the Environment Sciences*, Vol. 13, No. 9, pp. 759-765.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2003). *The basic river plan of the Yocheon River*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2021). *The basic river plan of the Seomjin River*, in press.
- Moriassi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., and Veith, T.L. (2007) "Model evaluation guidelines for Systematic Quantification fo accuracy in watershed simulations." *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, ASABE, Vol. 50, No. 3, pp. 885-900.
- Negatu, T.A., Zimale, F.A., and Steenhuis, T.S. (2022). "Establishing Stage - discharge rating curves in developing countries: Lake Tana Basin, Ethiopia." *Hydrology*, Vol. 9, No. 1, 13.
- Petersen-Overleir, A., and Reitan, T. (2009). "Bayesian analysis of stage-fall-discharge models for gauging stations affected by variable backwater." *Hydrological Processes*, Vol. 23, No. 21, pp. 3057-3074.
- Reitan, T., and Petersen-Overleir, A. (2008). "Bayesian power-law regression with a location parameter, with applications for construction of discharge rating curves." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 22, No. 3, pp. 351-365. doi: 10.1007/s00477-007-0119-0