



Flood stage analysis considering the uncertainty of roughness coefficients and discharge for Cheongmicheon watershed

Shin, Sat-Byeol^a · Park, Jihoon^b · Song, Jung-Hun^c · Kang, Moon Seong^{c*}

^aDepartment of Rural Systems Engineering, Seoul National University

^bClimate Application Department, APEC Climate Center

^cResearch Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

Paper number: 17-030

Received: 20 March 2017; Revised: 6 August 2017 / 14 August 2017; Accepted: 14 August 2017

Abstract

The objective of this study was to analyze the flood stage considering the uncertainty caused by the river roughness coefficients and discharge. The methodology of this study involved the GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) to quantify the uncertainty bounds applying three different storm events. The uncertainty range of the roughness was 0.025~0.040. In case of discharge, the uncertainty stemmed from parameters in stage-discharge rating curve, if h represents stage for discharge Q , which can be written as $Q = A(h - B)^C$. Parameters in rating curve (A , B and C) were estimated by non-linear regression model and assumed by t distribution. The range of parameters in rating curve was 5.138~18.442 for A , -0.524~0.104 for B and 2.427~2.924 for C . By sampling 10,000 parameter sets, Monte Carlo simulations were performed. The simulated stage value was represented by 95% confidence interval. In storm event 1~3, the average bound was 0.39 m, 0.83 m and 0.96 m, respectively. The peak bound was 0.52 m, 1.36 m and 1.75 m, respectively. The recurrence year of each storm event applying the frequency analysis was 1-year, 10-year and 25-year, respectively.

Keywords: Flood stage, Roughness coefficients, Stage-discharge curve, Uncertainty, GLUE

조도계수와 유량의 불확실성을 고려한 청미천 유역의 홍수위 해석

신새별^a · 박지훈^b · 송정현^c · 강문성^{c*}

^a서울대학교 생태조경·지역시스템공학부, ^bAPEC 기후센터 응용사업본부, ^c서울대학교 농업생명과학연구원

요 지

본 연구의 목적은 하천의 조도계수와 유량의 불확실성을 고려하여, 부정류 흐름에서 홍수위 해석에 미치는 영향을 정량적으로 분석하는 데 있다. 본 연구에서는 GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) 기법을 적용하여 조도계수와 유량의 불확실성이 홍수위 해석에 미치는 영향을 분석하고, 강우사상의 크기와 불확실성과의 관계를 분석하였다. 조도계수의 불확실성은 하천기본계획을 참고하여 0.025~0.040의 범위에서 분석하였다. 유량의 불확실성은 수위 h 일 때의 유량을 Q 라고 할 때, $Q = A(h - B)^C$ 로 표현되는 수위-유량관계식의 회귀계수 A , B , C 를 통해 분석하였다. 수위-유량관계식의 회귀계수를 비선형 회귀분석을 통해 추정하였으며, 회귀계수는 t 분포를 가정하여 95% 신뢰도로 상한과 하한의 범위를 산정하였다. 산정된 회귀계수의 범위는 A 는 5.138~18.442, B 는 -0.524~0.104, C 는 2.427~2.924로 산정되었다. 범위 내에서 10,000개의 매개변수 세트를 추출하여 HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System)에 적용하여 Monte Carlo 모의를 수행하였다. 강우사상 1~3에서 모의된 홍수위의 95% 신뢰구간의 평균적인 범위는 각각 0.39 m, 0.83 m, 0.96 m이며, 첨두 홍수위가 발생했을 때의 범위는 각각 0.52 m, 1.36 m, 1.75 m로 산정되었다. 또한 이천관측소의 1986~2015년의 일 강우에 대한 빈도해석을 수행하였으며, 수행 결과 GEV (Generalized Extreme Value) 분포일 때 강우사상 1~3의 재현기간은 각각 1년, 10년, 25년 빈도에 해당되었다. 본 연구를 통해 강우사상의 크기와 불확실성의 관계를 분석하였으며, 향후 다양한 강우사상에 적용하여 검증한다면 홍수위의 불확실성을 예측하여, 하천관리 등을 위한 구조물의 계획 및 설계 시 의사 결정에 실질적인 도움이 될 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어: 홍수위, 조도계수, 수위-유량관계식, 불확실성, GLUE

*Corresponding Author. Tel: +82-2-880-4582
E-mail: mskang@snu.ac.kr (M. S. Kang)

1. 서론

최근 기후변화로 인한 강우량의 시공간적 변동성이 커짐에 따라 가뭄과 집중호우의 발생빈도가 증가하고 있다. 특히 대형 홍수와 같은 자연재해는 단 한 번의 발생으로 엄청난 규모의 재산 손실, 사회기반시설의 파괴 및 인명피해 등을 야기하기 때문에 수리·수문모델링 등을 이용한 철저한 사전대비가 필수적이다. 그러나 모형을 통한 예측은 복잡한 자연의 물리적 현상을 단순화함에 따라 불확실성이 반드시 존재할 수밖에 없으며(Kang and Park, 2003; Kim and Lee, 2008a), 이를 고려하여 모델링의 정확성을 높이는 것이 필요하다.

Yevjevich (1972)는 모형의 불확실성의 종류를 자연적 오차, 모형 구조, 매개변수 추정, 자료 측정 및 관리 등에 의한 불확실성으로 분류한 바 있다. 모형을 통한 정확한 예측을 위해서는 이러한 불확실성 요소들을 고려하는 것이 필요하다. 특히, 매개변수 추정에 따른 불확실성은 모형의 구조 및 변수의 검정 등을 포함하며, 모형의 불확실성을 대변한다고 보고된 바 있다(Beven, 2006). 따라서 이를 정량적으로 분석하려는 노력들이 진행되어 왔으며, 대표적인 방법으로는 GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation)(Beven and Binley, 1992), SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting)(Abbaspour *et al.*, 2004), ParaSol (Parameter Solution)(Van Griensven *et al.*, 2003) 등이 있다. Matott *et al.* (2009)은 불확실성 해석을 수행하는 모델들에 대한 연구사례, 이용 가능한 자료 및 프로그램의 공개 정도 등에 대한 비교를 Table 1과 같이 나타내었다. 이 가운데 GLUE는 수문모형의 불확실성을 분석하기 위한 대표적인 방법으로 1992년 제안된 이래 현재까지 수많은 연구가 수행 중에 있으며, 뛰어난 접근성과 간단하지만 강력한 방법론 등의 장점 등을 가지고 있다.

한편, 하천의 홍수위는 제방고 및 침수면적 등의 결정을 위한 중요한 기반 자료로서 정확한 예측이 필요하지만, 홍수위 예측 과정에 포함된 불확실성에 대한 분석은 미흡한 실정이다

(Kim, 2005). 홍수위 모형의 정확도는 모형의 가정, 기하학적 자료, 흐름조건 및 경계조건, 해석방법 등의 정확도에 의해 결정된다. 이 중에서 모형의 검·보정 요소로서 실제적으로 변화시킬 수 있는 요소는 조도계수와 실측자료, 수리구조물 계수 등이 있다(United States Army Corps of Engineers, 2010). 특히 조도계수와 유량은 홍수위 해석에서 불확실성을 발생시키는 주요한 요인으로서 많은 연구를 통해 보고된 바 있다(Pappenberger *et al.*, 2004, 2006; Jung *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2015). 우선 조도계수는 하천의 수리계산을 실시할 때가 장 중요한 기본적 자료 중 하나로서 고려된다. 그러나 조도계수는 하천 내 수문량, 유사량, 인위적 활동 등에 의해 끊임없이 변하기 때문에 연속적인 관측과 검정이 필요하지만 현실적으로 측량을 통한 정확한 값을 얻기 어려워 대부분이 하천기본계획에서 제시한 값을 사용하고 있는 실정이다. 다음으로 유량은 모형의 흐름조건으로서 일반적으로 수위-유량관계식을 통해 산정된다. 직접적인 유량의 측정은 시간과 비용이 많이 소모되기 때문에 대부분의 경우 기 수립된 수위-유량관계식을 이용하여 유량을 산정한다. 이때, 수위-유량관계식의 매개변수를 추정하는 과정에서 발생하는 오차는 유량의 불확실성에 중요한 요인으로 작용한다.

홍수위 해석에서 발생하는 이와 같은 불확실성을 극복하기 위해 많은 연구들이 수행되어 왔다. 국내에서는 Kim and Lee (2008b)가 수위-유량관계식의 매개변수의 추정을 베이지안 회귀분석을 이용하여 분석한 바 있으며, Jung *et al.* (2013)은 조도계수와 유량의 불확실성을 고려하여 정상류 흐름에서의 홍수위의 불확실성을 분석한 바 있다. 그러나 수위-유량관계식의 불확실성이 모형에 전파되어 최종적으로 홍수위에 미치는 영향에 대한 정량적인 분석은 미비하며, 실제 홍수 사상인 부정류 흐름에서의 홍수위 불확실성 분석에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

이에 본 연구에서는 하천의 조도계수와 유량의 불확실성을 고려하여, 부정류 흐름에서 홍수위 해석에 미치는 영향을

Table 1. Comparison of uncertainty analysis tools for model assessment (Matott *et al.*, 2009)

Tool name	CIT ^a	AV ^b	DIS ^c
GLUE	539	3-4	1
NLFIT	135	2-3	2
ParaSol	2	2-4	1
PEST	197	2-4	1
SUFI, SUFI-2	16	1	3

^aCIT, number of citations determined by a search of SCOPUS database

^bAV, available materials; 1, method description only; 2, source code; 3, manual; 4, executable

^cDIS, form of software distribution; 1, Web download; 2, on request; 3, software not available

정량적으로 분석하는 데 있다. 홍수위의 불확실성을 분석하기 위해, 조도계수와 수위-유량관계식의 불확실성 범위를 추정하고, GLUE 기법을 이용하여 모형의 매개변수 불확실성을 고려한 홍수위의 범위를 산정하고, 강우사상의 크기에 따른 홍수위의 불확실성의 범위를 정량화하고자 한다.

2. 연구방법

본 연구의 흐름도는 Fig. 1과 같다. 홍수위의 불확실성 해석은 데이터 수집, GLUE 전처리, HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System)를 이용한 홍수위 모형 구동 및 GLUE 해석 과정으로 나누어 수행하였다. 데이터 수집 과정에서는 하천의 수위 및 유량 자료 등의 수문 자료와 하천 단면 특성, 조도계수, 확대 및 축소 계수, 하천 수리 시설물 정보 등의 지형 자료 등을 수집하였다. GLUE 전처리 과정에서는 수집한 데이터를 바탕으로 불확실성을 분석하기 위한 매개변수를 선택하고, 선택한 매개변수의 불확실성 범위, 사전분포형, 추출 개수 및 추출 방법 등을 정의하고, 매개변수 세트를 생성하였다. HEC-RAS 시뮬레이션 과정에서는 추출한 매개변수 세트를 통해 실제 모형의 구동을 위한 입력 자료를 생성하고, 모형을 구동하여 홍수위 데이터를 출력하였다. 마지막으로 GLUE 해석 과정에서는 모형의 구동 결과인 홍수위 추정치와 실측치를 비교하여 우도함수를 생성하고, 임계치 및 가중치를 계산한 후 최종적으로 홍수위의 불확실성 구간을 제시하였다.

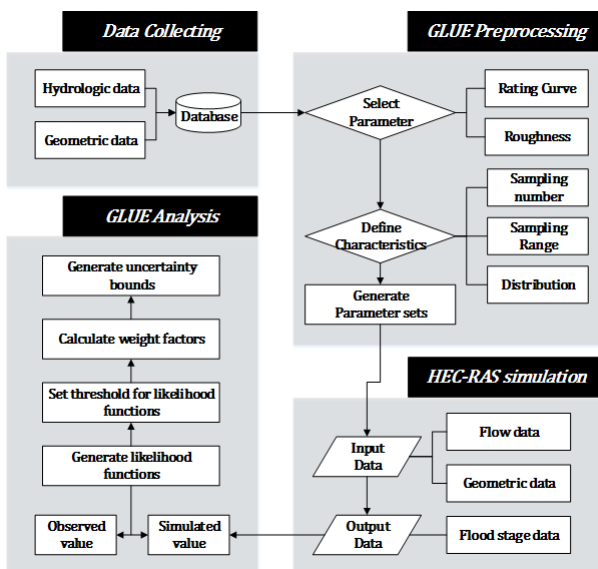


Fig. 1. Flow chart of this study

2.1 대상유역 및 자료구축

연구대상지는 한강 권역 남한강 수계의 청미천 유역의 하류부로 선정하였다. 청미천 유역의 면적은 595.6 km², 유로연장은 60.7 km이다. 청미천 본류의 하상물질은 대부분 자갈 및 모래로 구성되어 있으며, 하상경사는 1/1,200~1/900으로 완만한 편이다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011). 유역 내에 위치한 수위 관측소는 장호원, 원부, 삼합으로 총 3개의 관측소이며, Fig. 2는 대상유역과 수위 관측소의 위치를 개괄적으로 나타내고 있다.

청미천 유역의 강우자료를 수집하기 위해 Thiessen 망 분석을 통하여 유역 인근의 기상관측소를 선정하였다. 분석 결과 청미천 유역은 이천관측소의 지배면적에 완전히 속하는 것으로 나타나, 청미천 유역의 지배관측소로 이천관측소를 선정하였다. 이천관측소의 강우자료를 수집하여 3가지 강우사상을 선정하였으며, 지속시간 24시간의 강우를 대상으로 하였다. Event 1은 평년 수준의 강우사상이며, Event 2와 3은 이천관측소의 일강수량 최대치 중에서 유역 내 수위 관측소의 자료를 이용할 수 있는 기간의 사상으로 선정하였다. 선정된 강우사상은 Table 2와 같다.

하천의 홍수위 해석을 위해서 1차원 수리모형인 HEC-RAS 모형을 사용하였다. HEC-RAS 모형은 미육군공병단의 수문공학센터(Hydrologic Engineering Center, HEC)에서 개발한 모형으로 자연하천 혹은 인공하천의 1차원 정상류 해석을 위해 개발된 HEC-2 모형에 1차원 부정류 해석 모형인 UNET

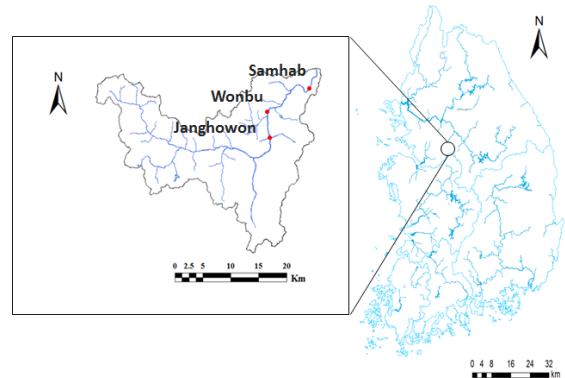


Fig. 2. Location of study watershed and gauging stations

Table 2. Characteristics of storm events for Cheongmicheon watershed

Storm no.	Date	Total rainfall (mm)
1	2012.07.15. ~ 2012.07.16.	91.0
2	2012.07.06. ~ 2012.07.07.	247.5
3	2009.07.12. ~ 2009.07.13.	304.0

(Unsteady flow through a full NETWORK of open channels) 모형을 탑재한 모형이다(United States Army Corps of Engineers, 2010).

본 연구에서는 부정류 흐름조건으로 시간에 따른 홍수위 변화를 모의하였다. HEC-RAS의 입력 자료는 수문자료와 지형자료가 있으며, 출력 자료는 각 단면에서의 유량, 유속, 수위 등이다. 특히, 모형의 정확도를 좌우하는 것은 수문자료의 생성에 사용되는 수위-유량관계곡선과 지형자료로 입력되는 하천 단면, 조도계수 등이다.

먼저, 수문자료 구축을 위해 HEC-RAS에서 각 강우사상별로 부정류를 모의하기 위한 경계조건으로 상·하류단의 수문곡선을 입력하였으며, 수위 관측소의 위치를 기준으로 하였다. 이때, 각 수문곡선을 생성하기 위해 수집한 수위 관측소의 자료는 10분 단위이다. 상류단 경계조건으로 장호원 지점에서 유량수문곡선(flow hydrograph)을 입력하였으며, 측방유입 경계조건으로 원부 지점에서 측방유입수문곡선(lateral flow hydrograph)을 입력하였으며, 하류단 경계조건으로 삼합 지점에서 수위수문곡선(stage hydrograph)을 입력하였다. 장호원 지점의 유량수문곡선은 기 수립된 수위-유량관계식을 통해 산정된 유량 자료를 이용하였다. 원부 지점의 측방유입수문곡선은 유량의 불확실성을 분석하기 위해 본 연구에서 생성한 수위-유량관계곡선으로 모의된 유량과 장호원 지점의 유량의 차이를 측방유입으로 가정하였다.

지형자료 구축을 위해 청미천 하천기본계획보고서(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011)를 참조하여 청미천 하구로부터의 거리가 19.4 km 인 지점으로부터 200 m 간격으로 총 78개 지점에 대한 하천 단면자료를 구축하였다. 확대 및 축소계수는 각각 0.1과 0.3을 적용하였으며, 조도계수는 각 단면에서 main channel과 flood plain 모두 동일한 조도계수를 적용하였다.

2.2 매개변수의 불확실성 범위

2.2.1 조도계수의 불확실성 범위

조도계수의 불확실성을 고려하기 위해 청미천의 하천기본계획을 참고하였다. 하천기본계획 상에서는 구간별로 하천

의 흔적수위를 통해 역산한 방법과 하도형상 및 하상재료를 통한 조도계수 테이블을 이용한 두 가지 방법으로 산정하였으며, 아래의 Table 3과 같다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011).

흔적홍수위로 추정된 조도계수는 0.028~0.033이다. 하도형상 및 하상재료를 통해 추정한 방법의 경우 청미천의 대부분의 구간이 대하천, 자갈하상으로 분류되어 Chow (1959)가 제시한 조도계수 테이블 상에서 0.025~0.040으로 추정되었다. 이를 고려하여 청미천 하천기본계획에서 조도계수는 0.033으로 채택하였으며, 이를 이용하여 각종 수리 계산 등을 수행하였다. 본 연구에서는 조도계수의 불확실성 범위를 0.025~0.040으로 선정하였다.

2.2.2 유량의 불확실성 범위

유량의 불확실성을 고려하기 위해 수위-유량관계식을 생성하여 회귀계수의 범위를 추정하였다. 수위-유량관계식을 생성하기 위해, 2005~2014년의 수문조사연보를 통해 원부 관측소의 유량측량성과를 수집하였으며, 자료가 없는 2009년을 제외한 나머지 연도에서 총 370개의 수위와 유량의 쌍을 수집하였다. 수위-유량관계식의 형태는 가장 일반적으로 사용되는 멱급수 형태로 Lambie (1978)가 제시하였으며, Eq. (1)과 같다.

$$Q = A(h - B)^C \tag{1}$$

이때, Q 는 유량 (m^3/s), h 는 수위 (m), A, B, C 는 수위-유량관계식의 회귀계수이다. A 는 하천의 폭과 규모, 단면적이나 하도경사 등 다양한 인자에 의해 영향을 받기 때문에 일반적인 범위는 없다(Chang and Lee, 2005). B 는 유량이 0인 수위를 나타내는 매개변수로서, 영점 표고와 관련이 있으며 최저계측수위 이하의 값을 가진다. C 는 수위-유량관계곡선의 기울기로, 하천단면형상에 따른 계수를 의미한다. C 의 경우 단면형상과 관련이 되어, 간접적인 추정이 가능하며 약 1.5~2.6 사이의 값을 가지는 것으로 보고된 바 있다(Cho et al., 2004; Retian and Petersen-Overleir, 2008).

Table 3. Estimation of roughness coefficient (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011)

Section	Floodmark inversion	Roughness table	Adoption
Samhab Bridge ~ Keumkok Junction	0.028	0.025 ~ 0.040	0.033
Keumkok Junction ~ Samseong Junction	0.030		
Samseong Junction ~ Seolsung Junction	0.030		
Seolsung Junction ~ Rotab Weir	0.033		
Rotab Weir ~ Janghowon Wier	0.033		

회귀계수의 추정을 위해 SPSS Statistics (IBM, Version 23.0, USA)를 이용하여 비선형 회귀분석을 수행하였으며, L-M (Levenberg-Marquardt) 최적화 알고리즘을 사용하였다. L-M 알고리즘은 비선형 방정식의 최적해를 최소자승으로 구하는 방법으로, 오차 제곱의 합을 줄이기 위해 반복적으로 계산하는 방법이다(Park and Kim, 2013). 일반적으로 수위-유량관계식의 회귀계수 추정은 흐름이 0이 되는 B 를 결정하고, 양변에 로그를 취하여 선형다항식으로 만들어 A 와 C 를 추정하는 방법을 사용한다(Lee et al., 2008). 그러나 대부분의 수위-유량 관계는 유량이 증대함에 따라 오차가 증가하는 비등분산성 경향을 가지고 있으므로, 선형 회귀분석을 수행하는 경우 회귀잔차의 특성에 따라 회귀모형의 정확성이 크게 영향을 받을 수 있다 (Lee et al., 2008; Kim and Lee, 2008b). 따라서 본 연구에서는 흐름이 0이 되는 유효수위 또한 불확실성을 가지는 것으로 가정하여, 비선형 회귀분석을 수행하였다. 회귀계수는 t 분포를 따른다고 가정하였으며, 불확실성 범위는 95% 신뢰구간의 범위로 나타내었다.

2.2.3 민감도 분석 방법

조도계수와 유량의 변화에 따른 홍수위 모의 결과의 변화 정도를 정량적으로 산정하기 위해 민감도 분석을 수행하였다. Song et al. (2016)은 민감도 분석을 수행하기 위해 상대 민감도(relative sensitivity)(Janmes and Burges, 1982)와 민감도 지수(sensitivity index)(Cho and Mostaghimi, 2009)를 이용한 바 있으며, 각각 Eqs. (2) and (3)과 같다.

$$S_r = \frac{\Delta O/O_b}{\Delta P/P_b} = \frac{(O - O_b)/O_b}{(P - P_b)/P_b} \quad (2)$$

$$SI = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_r(i) \quad (3)$$

이때, S_r 은 상대 민감도로 입력 매개변수 값의 변화에 따른 모의결과의 변화를 나타내는 인자이며, P_b 는 기준 매개변수 값 (base parameter value), P 는 입력 매개변수 값, ΔP 는 입력 및 기준 매개변수 값의 차, O_b 는 기준 매개변수 값에 의한 모의 결과, O 는 입력 매개변수 값에 의한 모의결과, ΔO 는 입력 및 기준 값에 따른 모의결과의 차, SI 는 민감도 지수로 상대 민감도 절댓값의 평균이며, N 은 입력 매개변수 값의 개수이다.

본 연구에서는 기준 매개변수 값으로 조도계수와 수위-유량관계식의 회귀계수(A , B , C)의 불확실성 범위의 중간값을 선정하였다. 또한 입력 매개변수 값으로는 기준 매개변수의 -50%, -25%, -10%, +10%, +25%, +50%를 선정하였다. 강우

사상 1의 수문곡선을 상·하류의 경계조건으로 입력하였으며, 모의결과는 침투 홍수위의 값을 비교하여 상대 민감도 및 민감도 지수를 산정하였다.

2.3 매개변수의 불확실성 분석 기법

GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation)는 1992년 Beven과 Binley에 의해 제안된 모형의 불확실성 분석 기법으로, 수문모형의 모의결과가 비슷하거나 동등하더라도 그 모형에 사용된 매개변수의 세트는 다를 수 있다는 데서 출발하였다(Beven and Binley, 1992). 이러한 수문모형의 동등성은 모형의 구조 및 매개변수의 불확실성에서 기인하며, GLUE 기법은 여러 매개변수 조합 가운데서 기준치를 만족시키는 반응변수를 구분하여 모형의 불확실성을 신뢰구간으로 표현하는 것이다. 본 연구에서 수행된 GLUE 기법의 절차는 다음과 같다.

2.3.1 매개변수 추출

매개변수는 사전에 가정한 확률분포로부터 추출되며, 대부분의 경우 매개변수가 어떠한 확률 분포를 가지는지 모르기 때문에 균등하게 분포한다고 가정한다(Beven and Binley, 1992). 본 연구에서는 조도계수와 유량의 불확실성을 분석하기 위해 조도계수와 수위-유량관계식의 회귀계수를 매개변수로 선정하였으며, 10,000개의 매개변수 세트를 추출하였다. 각 매개변수의 추출범위는 조도계수의 경우 하천기본계획 및 문헌조사에 따라 0.025~0.040으로 선정하였으며, 하천 설계기준·해설에 따라 조도계수의 정확도는 유효숫자 둘째 자리이므로(Korea Water Resources Association, 2009), 0.001 간격으로 추출하였다. 수위-유량관계식의 회귀계수는 유량 측정 성과를 통해 수위-유량관계곡선을 생성하여 95% 신뢰구간의 범위를 통해 산정하였다.

2.3.2 우도함수와 기준치 선정

추출한 매개변수를 통해 모의한 결과가 실측치를 잘 반영하는지 적합도(goodness of fit)를 평가하기 위해 우도함수를 선정한다. 우도함수는 모의치와 실측치와의 적합도에 따라 모의결과와 실측값이 잘 맞을수록 커지는 함수를 사용한다. 본 연구에서는 모의치의 성능을 평가하기 위한 우도함수로 NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency)를 선정하였으며, Eq. (4)와 같다.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (-\infty \sim 1) \quad (4)$$

Table 4. Performance evaluation criteria for recommended statistical performance measures for watershed-scale models (Moriassi et al., 2015)

Performance evaluation	Criteria
Very good	$NSE > 0.8$
Good	$0.8 \geq NSE > 0.7$
Satisfactory	$0.7 \geq NSE > 0.5$
Not satisfactory	$0.5 \geq NSE$

이때, O 는 실측치, P 는 모의치, \bar{O} 는 실측치의 평균, i 는 시간 간격, n 은 자료의 수를 의미한다. NSE의 범위는 $-\infty \sim 1$ 의 값을 가지며, 1에 가까울수록 모의결과와 실측치가 가까운 것을 의미한다(Nash and Sutcliffe, 1970). 본 연구에서는 NSE가 -1과 1 사이의 값을 갖도록 표준화하여 사용하였다.

결정된 우도함수는 일정한 기준치(threshold)를 정해 기준치 이상은 반응변수로 미만을 비반응변수로 구분하고, 비반응변수로 분류된 매개변수는 제거한다. 우도함수의 기준치에 대한 명확한 기준은 없으며, 본 연구에서는 Moriassi et al. (2015)가 제시한 수문·수질 모델링의 통계적 성능평가 기준을 참고하였다. Moriassi et al. (2015)는 수문·수질모형의 공간규모(point, field, watershed)와 모의대상(유출량, 유사량, 영양물질 등)별로 다양한 통계적 지표의 평가 기준을 제시하였다(Song and Kang, 2016). 본 연구에서는 Moriassi et al. (2015)가 제시한 유역 단위의 모델을 통해 유량을 모의한 경우에서의 NSE 성능 평가 기준을 준용하였으며, 이는 Table 4와 같다. 이때의 시간 규모는 일, 월, 연 단위의 구분 없이 사용이 가능하다.

Table 4에 따라 본 연구에서는 모형의 성능이 Satisfactory 수준인 0.5를 기준치로 선정하였으며, NSE가 0.5 미만인 경우 비반응변수로 구분하여 우도함수의 가중치 산정에서 제외하였다. 기준치를 높게 선택할수록 이를 만족하는 반응변수의 수가 줄어들게 되며 이는 최종적으로 산정되는 홍수위의 신뢰구간을 좁게 만든다.

2.3.3 불확실성 구간 제시

각각의 반응변수는 최종적으로 우도함수의 가중치(weight)를 통해 평가된다. 가중치는 반응변수들의 우도함수 총합에 대한 해당 반응변수의 우도함수로 Eq. (5)를 통해 산정되며 우수한 성능을 보인 반응변수 세트에 대하여 더 많은 가중치를 부여한다.

$$w_i = \frac{NSE_i}{\sum_{i=1}^n NSE_i} \tag{5}$$

이때, w_i 는 i 번째 반응변수의 우도함수 가중치를 의미하며, n 은 반응변수의 개수이다. 가중치는 모든 반응변수에 대해 $1/n$ 로 동일하지 않고, 각각의 모의성능에 따라 다른 가중치를 가지며, 이는 GLUE 기법의 특징적인 점이다(Li et al., 2010). 반응변수의 우도함수는 가중치를 통해 누적합 1.0으로 스케일이 조정되며, 이는 모의된 개별 홍수위에 대한 분위수(quantile)를 의미한다(Freer et al., 1996).

모의결과를 오름차순으로 정렬한 후 각각의 가중치를 누적하여 하나의 시간 간격에 대한 홍수위의 누적분포함수를 산정한다. 신뢰수준을 결정하여 누적분포함수의 상·하한을 정한 후, 전체 모의시간에 대해 적용하여 홍수위의 신뢰구간을 도출한다. 신뢰수준을 높일수록 불확실성의 범위는 좁아지게 되며, 본 연구에서는 상·하위 2.5%를 절삭한 95% 신뢰구간으로 표현하였다. 이는 조도계수와 유량의 불확실성을 고려한 부정류 흐름에서의 홍수위의 불확실성 범위를 의미한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유량의 불확실성 범위 산정 결과

먼저, GLUE 기법을 적용하기 위한 사전 과정으로 매개변수 세트를 추출하기 위해서는 적절한 추출범위의 산정이 필요하다. 유량의 불확실성을 대표하는 수위-유량관계식의 회귀계수의 불확실성 범위를 산정하기 위하여, 총 370개의 관측된 수위와 유량의 쌍을 수집하여 비선형 회귀분석을 수행하였다. 회귀분석 결과 Eq. (1)의 회귀계수 A, B, C 의 범위는 Table 5와 같이 산정되었다. 이를 통해 유도한 수위-유량관계곡선의 95% 신뢰구간의 범위와 원부 관측소의 유량측정성과를 함께 도시하면 Fig. 3과 같다.

회귀분석 결과 A 의 범위는 5.138~18.442, B 의 범위는 -0.524~0.104, C 의 범위는 2.427~2.924로 산정되었다. 추정된 값에서 B 의 상한은 0.104로 최소 관측수위가 0.1 m 이상의 값을 가지므로 이를 만족한다. 추정된 값에서 C 의 범위는 2.427~2.924로 소폭 큰 값의 범위를 가지는 것으로 나타났다.

Table 5. Estimation of range of parameters A, B and C by non-linear regression analysis

Parameter	Optimized value	Standard error	95% confidence interval	
			Lower	Upper
A	11.790	3.383	5.138	18.442
B	-0.210	0.160	-0.524	0.104
C	2.675	0.126	2.427	2.924

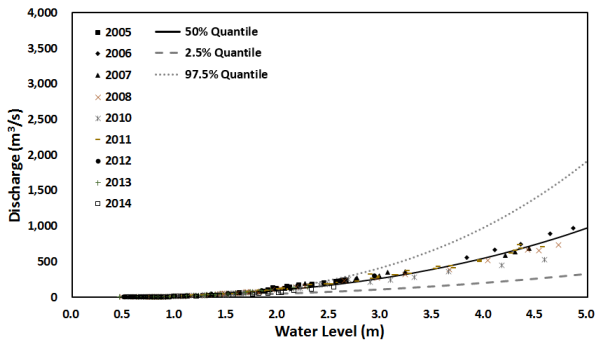


Fig. 3. Stage-discharge rating curve and 95% uncertainty interval based on 2005~2014 discharge measurements at Wonbu

본 연구에서 추정된 수위-유량관계식의 불확실성 범위가 적절한 것인지 검증하기 위해 실제 강우사상 1~3이 발생했던 시기의 실측 수위 및 기 수립된 수위-유량관계식을 적용한 결과와 함께 비교하였다. 기 수립된 수위-유량관계식은 특정 기간 및 수위에 따라 달라지며, 고수위, 중수위, 저수위 관계식으로 나누어 적용된다. 따라서 각 강우사상별로 수문조사연보를 통해 해당 시기 및 특정 수위 조건에 따른 수위-유량관계식을 수집하였으며, 하나의 실선으로 나타내었다. Fig. 4는 각 강우사상 별로 수위-유량의 실측치, 기존의 수위-유량관계곡선으로 도출한 실선, 본 연구의 수위-유량관계곡선으로 도출한 불확실성 범위를 나타낸 것이다.

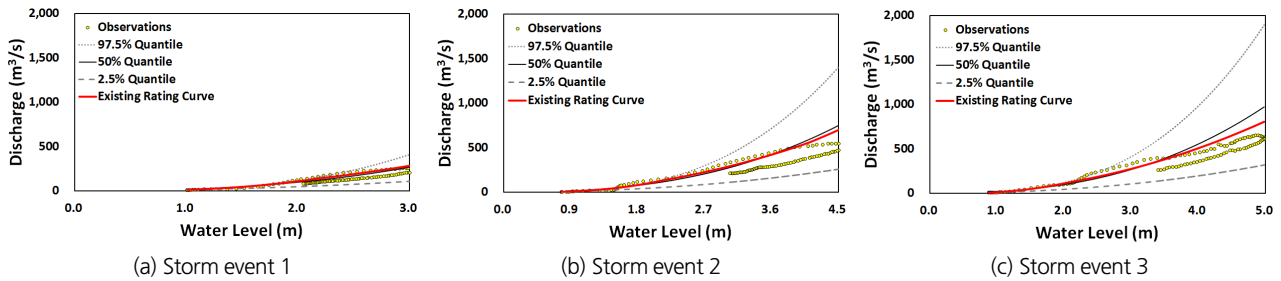


Fig. 4. Validation of uncertainty bounds of stage-discharge rating curve at storm event 1~3

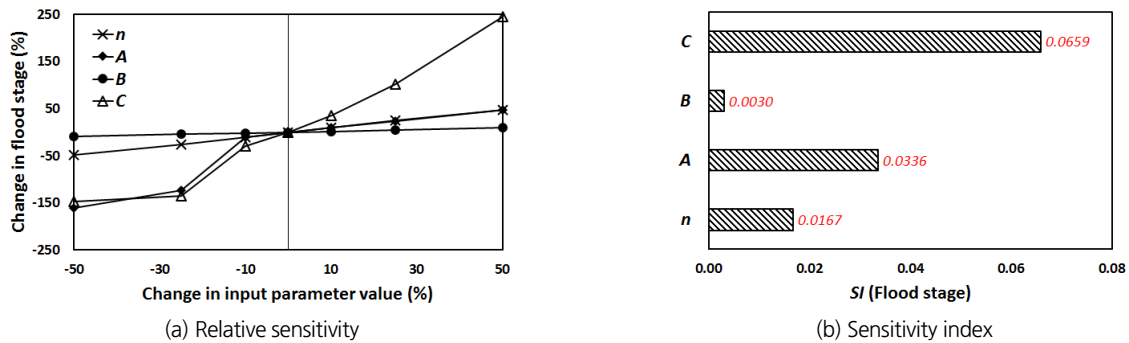


Fig. 5. Sensitivity of flood stage-related parameter: (a) Calculation Procedure of Relative Sensitivity, and (b) Sensitivity Index

강우사상의 크기가 작을 때에는 유량의 불확실성 또한 작은 범위로 나타나 기존의 수위-유량관계식과 큰 차이가 없이 나타났다. 하지만 강우사상이 커질수록 유량의 불확실성 범위가 증가함에 따라 비교적 큰 차이를 보였다. 그러나 유량의 불확실성을 대표하는 중앙값에서의 수위-유량관계식은 기존의 식과 대체로 일치하였으며, 수위가 증가함에 따라 유량이 소폭 크게 나타나는 경향을 보였다.

한편, 기존의 수위-유량관계식을 이용한 유량은 수위의 범위에 따라 각각 다른 관계식을 제시하였지만, 최종적으로 유량의 값이 하나의 확정적인 값으로 제시되기 때문에 실측치를 정확히 반영하기에는 한계가 있다. 이를 고려할 때, 본 연구에서 생성한 수위-유량관계식의 불확실성 범위는 유량의 불확실성을 대표할 수 있을 것으로 사료된다.

3.2 민감도 분석 결과

GLUE 수행에 앞서, 조도계수와 유량의 변화가 모의 결과에 미치는 정도를 정량적으로 나타내기 위해 민감도 분석을 수행하였다. Fig. 5(a)는 조도계수 및 수위-유량관계식의 회귀계수(A, B, C) 기준 값의 -50%, -25%, -10%, +10%, +25%, +50%를 입력하였을 경우 첨두 홍수위의 변화율을 나타낸 것이다. 여기서, 상대 민감도(S)는 홍수위 모의 값 변화율과 매개변수 입력 값 변화율의 비를 나타낸다. Fig. 5(b)는 계산된

상대 민감도를 평균하여 민감도 지수(SI)를 산정한 결과를 나타낸다.

Fig. 5(b)로부터 모든 매개변수에 대해 민감도 지수가 양수로 나타났으며, 이는 매개변수가 증가함에 따라 홍수위 모의 결과 또한 증가함을 의미한다. 홍수위는 C, A, 조도계수, B의 순으로 민감하게 영향을 받는 것으로 나타났다. 민감도 지수가 0.0659로 가장 높게 나타난 것은 C로 수위-유량관계식의 기울기이며, 0.0030으로 가장 낮게 나타난 것은 B로 수위-유량 관계식의 유량이 0인 수위를 나타내는 영유량수위(gage of zero flow)이다. 조도계수와 달리 매개변수 A, B, C는 HEC-RAS 모형에 직접 입력되지 않고, 모형의 경계조건으로 3가지 변수가 모여 하나의 유량 수문곡선을 생성하여 적용된다. 따라서 민감도 지수를 통해 조도계수와 유량 중에서 어떤 인자가 홍수위 모의 결과에 더 큰 영향을 끼치는 지 판별하기는 어려우나, 각 매개변수가 홍수위에 미치는 영향을 고려하여 매개변수가 가지는 불확실성 범위를 신중하게 추정할 필요가 있다.

3.3 가중치에 따른 누적분포함수

각 강우사상 별로 추정된 조도계수와 수위-유량관계식의 회귀계수 A, B, C의 범위 내에서 10,000개의 매개변수 세트를 추출하고, HEC-RAS에 적용하여 Monte Carlo 모의를 수행하였다. 모의결과를 오름차순으로 정렬한 후 각각의 가중치를 누적하여 하나의 시간 간격에 대한 홍수위의 누적분포함

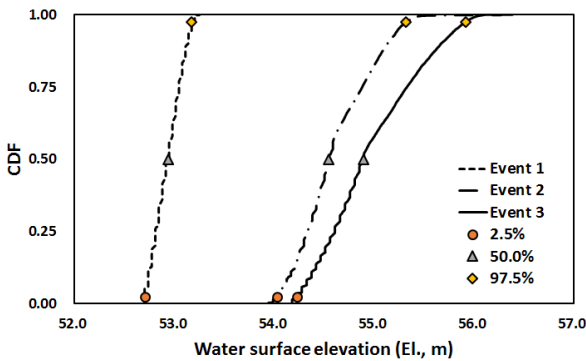


Fig. 6. Cumulative Distribution Function (CDF) of each storm event at peak time

Table 6. Peak flood level at storm event 1~3 (Unit: El., m)

Section	Observation	2.5% quantile	50% quantile	97.5% quantile
Event 1	52.97	52.70	52.94	53.17
Event 2	54.50	54.03	54.54	55.32
Event 3	54.86	54.23	54.89	55.92

수를 도출하였다. 아래의 Fig. 6은 각 강우사상 별로 침투 수위가 발생한 시간에서의 누적분포함수를 나타낸 것이다. 또한 홍수위의 불확실성 범위는 누적분포함수의 신뢰구간 95%의 범위로 나타낼 수 있으며, Table 6은 각 강우사상 별로 침투 수위의 실측치 및 누적분포함수의 2.5%, 50%, 97.5%에서의 수위를 나타낸 것이다.

GLUE 수행 결과 모든 강우사상에서 모의치의 중앙값은 실측치와 근사한 값을 나타내었다. 모의치와 중앙값은 모든 강우사상에서 ±0.04 El., m의 차이를 나타내었다. 또한 강우사상의 크기가 커질수록 누적분포함수곡선은 점차 완만해지고, 이에 따라 홍수위의 불확실성의 범위 역시 증가하는 것으로 나타났다. 강우사상 1~3에서 모의된 침투 수위의 95% 신뢰구간은 각각 0.47 El., m, 1.29 El., m, 1.69 El., m로 나타났다.

각 강우사상별로 홍수위 모의 시간은 10분 간격의 24시간 강우 발생 시 나타나는 수위이다. 따라서 이를 모든 시계열로 확장하여 각 시간 간격에서의 누적분포함수를 생성할 수 있으며, 이를 통해 95% 신뢰수준에서의 홍수위의 불확실성 범위를 정량적으로 나타낼 수 있다.

3.4 홍수위의 불확실성 신뢰구간

강우사상 1~3에서 모의된 홍수위의 95% 신뢰구간은 Fig. 7과 같이 나타난다. 수문곡선의 상승부에서 모의치와 실측치가 불일치하는 경향이 나타난 것은 상류 지점의 경계 조건인 장호원 지점에서의 유량 수문곡선의 영향으로 사료된다. 원부 지점의 측방 유입은 장호원 지점과의 유량 차이로 입력되기 때문에 장호원의 유량 수문곡선의 영향이 비교적 크기 때문이다. 전체적으로 실측 수문사상에 비해 가파르게 상승하는 경향이 있으나, 침투 수위 및 변곡점에서는 대체로 실측치를 잘 반영하였으며, 이후 하강부에서는 일치하거나 실측치보다 소폭 크게 모의되는 경향을 보였다.

강우사상 1~3에서의 침투 수위와 침투 발생 시간은 Table 7과 같다. 각 강우사상별로 침투 수위의 실측치는 모두 신뢰구간 95%내에 포함되며, 중앙값과의 차이는 강우사상 1에서 약 0.02 m, 강우사상 2에서 약 0.07 m, 강우사상 3에서 약 0.07 m로 나타나 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났다. 각 강우사상별로 침투 발생 시간은 누적분위가 커짐에 따라 지연되는 모습을 보였으며, 침투 수위의 지연시간은 각각 강우사상 1에서 10~50분, 강우사상 2에서 -10~60분, 강우사상 3에서 0~60분 정도의 차이를 보였다. 침투 시간의 지연은 최상류단의 유량 수문곡선에 따른 영향으로 사료되며, 기 수립된 수위-유량 관계식을 통해 실측 수위를 직접적으로 변환하여 사용하였기 때문이다. 이에 대한 보완을 위해서는 HEC-HMS (Hydrologic

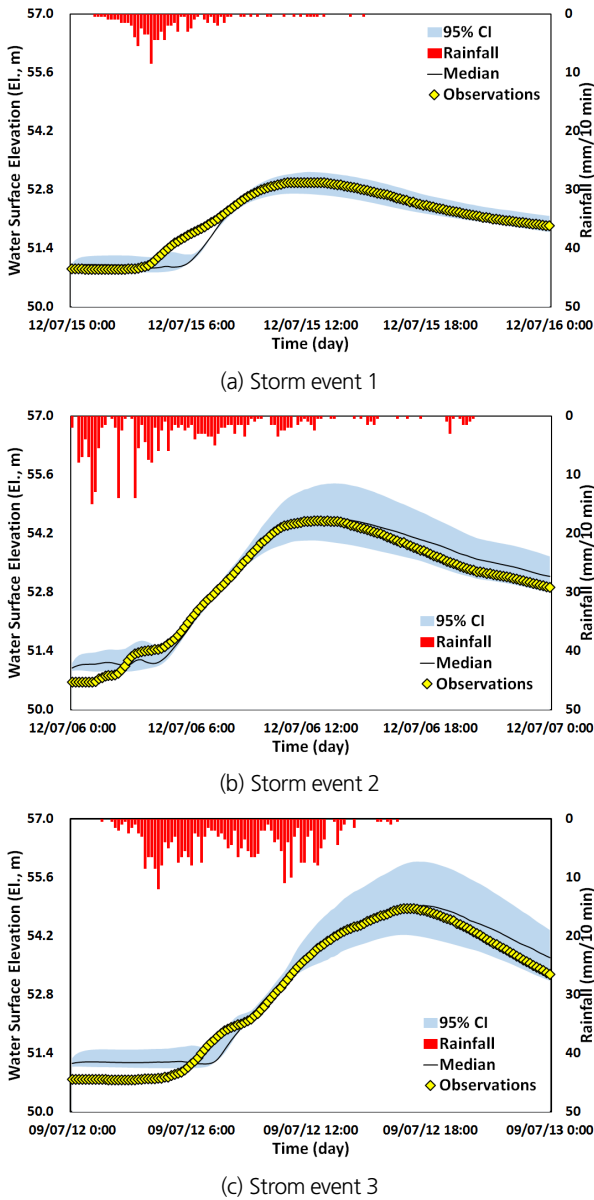


Fig. 7. 95% Confidence (uncertainty) intervals (CI) of storm event 1~3

Table 8. Uncertainty bound variation of each storm event

Storm no.	Uncertainty Bound Variation (m)			
	Minimum	Maximum	Average	Peak Level
1	0.02	0.54	0.39	0.52
2	0.07	1.43	0.83	1.36
3	0.18	1.82	0.96	1.75

Engineering Center’s Hydrologic Modeling System) 등을 이용하여 유역의 유출량을 추정하여 사용하는 방법 등을 고려할 수 있으며, 도달시간 등 수문 곡선의 지연에 영향을 끼치는 인자 등을 조정한다면 최종적으로 홍수위 해석 모형에서 첨두시간이 관측값과 가깝게 모의할 수 있을 것으로 사료된다.

강우사상 1~3에서 산정된 홍수위의 95% 신뢰구간의 평균적인 범위는 각각 0.39 m, 0.83 m, 0.96 m이며, 첨두 홍수위가 발생했을 때의 신뢰구간의 범위는 각각 0.52 m, 1.36 m, 1.75 m로 산정되었다. 각 강우사상별로 산정된 95% 신뢰구간 범위의 최소, 최대, 평균 및 첨두 홍수위에서의 범위는 Table 8과 같다. 강우사상의 규모가 커질수록 홍수위의 불확실성의 범위도 함께 증가하는 것으로 나타났다.

3.5 강우사상 별 홍수위 불확실성 정량화

이천관측소의 1986~2015년까지의 연 최대치 계열의 지속 시간 24시간의 강우에 대한 빈도해석을 수행하였다. 일강우사상의 분포형은 극치사상의 분석에 자주 사용되는 GEV (Generalized Extreme Value) 분포로 가정하였다. 분포의 적합도 검정 수행결과 Kolmogorov-Smirnov 검정, Anderson-Darling 검정, Chi-Squared 검정에서 모두 적합한 것으로 나타났다. 총 강우량 90.0 mm의 강우사상 1은 1년 빈도로 평년 수준의 강우량으로 나타났다. 총 강우량 247.5 mm의 강우사상 2는 10년 빈도, 총 강우량 304.0 mm의 강우사상 3은 25년 빈도의 강우량으로 해석되었다. 실제로 강우사상 2와 3은 이천관측소의 일최대강수량 5순위와 2순위에 해당하는 값이다.

Table 7. Peak flood level and time at storm event 1~3

Section	Observation	5% quantile	50% quantile	95% quantile	
Event 1	Flood level*	52.97	52.70	52.95	53.22
	Time	2012/07/15 11:00	2012/07/15 11:10	2012/07/15 11:20	2012/07/15 11:50
Event 2	Flood level*	54.50	54.03	54.57	55.39
	Time	2012/07/06 12:10	2012/07/06 12:00	2012/07/06 12:50	2012/07/06 13:10
Event 3	Flood level*	54.86	54.23	54.93	55.98
	Time	2009/07/12 16:40	2009/07/12 16:40	2009/07/12 17:40	2009/07/12 17:20

*Unit: EL, m

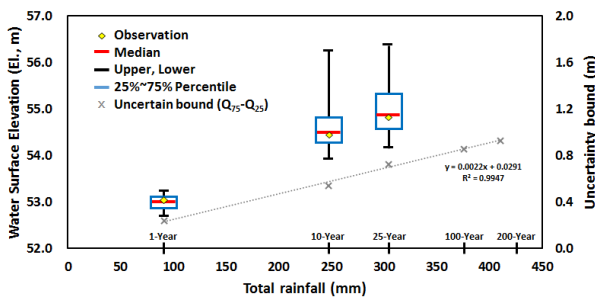


Fig. 8. Uncertainty bounds for each storm event at peak time

GEV 분포를 이용한 빈도해석 결과에 따라 100년 빈도와 200년 빈도에 해당하는 총 강우량의 값을 추정하였으며, 각각 375.7 mm와 410.2 mm로 산정되었다. 빈도 해석을 이용한 결과와 함께 각 강우사상별로 침투 홍수위의 불확실성 범위를 나타내면 Fig. 8과 같다.

강우사상 1~3의 불확실성 분석결과를 바탕으로 홍수위의 불확실성 범위를 침투 홍수위의 누적분위 75%와 25%의 차이로 정의하였다. 강우사상의 크기가 클수록 침투 홍수위가 증가하였으며, 이에 따른 홍수위의 불확실성 범위가 커지는 양상을 보였다. 강우사상의 크기와 불확실성 범위와의 관계는 선형적으로 증가하는 경향을 보이며, 이를 통해 100년 빈도 및 200년 빈도에 해당하는 강우량을 통한 홍수위의 불확실성 범위를 추정하면 각각 0.85 m, 0.93 m이다. 이는 강우사상별로 홍수위의 불확실성을 정량화한 방법의 하나의 예시로서, 대략적인 가정을 통한 추정치이다. 향후 다양한 강우사상에 대한 홍수위의 불확실성 분석을 수행하여 두 인자 간의 관계를 정밀하게 규명한다면 빈도별 강우사상에 대한 홍수위의 불확실성을 정량적으로 나타낼 수 있을 것으로 사료된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 하천 조도계수와 유량의 불확실성이 홍수위 해석에 미치는 영향을 분석하기 위해 GLUE 기법을 이용하여 3가지 강우사상에 대해 적용하였다. 조도계수의 범위는 하천설계기본계획을 참고하여 0.025~0.040의 범위로 선정하였으며, 유량은 원부 관측소의 유량측량성과 자료를 수집하여 비선형 회귀분석을 수행하여 수위-유량관계식의 회귀계수의 범위를 선정하였다. 선정된 범위 내에서 총 10,000개의 매개변수 세트를 추출하여 HEC-RAS 모형에 적용하였으며, 각 강우사상별로 10,000번의 Monte Carlo 모의를 수행하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 수위-유량관계식의 회귀계수 범위는 비선형 회귀분석을 통해 회귀계수를 추정하였으며, 각 회귀계수는 t분포를 가정하여 95% 범위로 산정하였다. Eq. (1)의 수위-유량관계식의 회귀계수 A의 범위는 5.138~18.442, B의 범위는 -0.524~0.104, C의 범위는 2.427~2.924로 산정되었다.
- 2) 강우사상 1~3에서 산정된 홍수위의 95% 신뢰구간의 평균적인 범위는 각각 0.39 m, 0.83 m, 0.96 m이며, 침투 홍수위가 발생했을 때의 신뢰구간의 범위는 각각 0.52 m, 1.36 m, 1.75 m로 산정되었다.
- 3) 이천관측소의 1986~2015년의 연 최대치 계열, 지속시간 24시간 강우에 대한 빈도해석을 수행하였다. GEV 분포일 때 강우사상 1~3의 재현기간은 각각 1년, 10년, 25년 빈도에 해당하는 것으로 나타났다. 강우사상 1~3의 총 강우량은 각각 91.0 mm, 250.5 mm, 304.0 mm이며, 강우사상의 크기가 클수록 홍수위의 불확실성이 증가하는 것으로 나타났다.
- 4) 본 연구를 통해 조도계수와 유량의 불확실성이 홍수위 해석에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 또한 강우사상의 크기와 불확실성의 관계를 분석하였으며, 향후 다양한 강우사상에 적용하여 검증한다면 대규모의 강우사상에서의 홍수위 불확실성 예측 또한 가능할 것으로 사료된다. 이를 통해 하천 관리를 위한 각종 수공구조물 등의 계획 및 설계 시, 설계 빈도에 따른 홍수위의 불확실성 범위를 제한할 수 있으며, 의사결정에 도움이 될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2015R1A2A2A01008152).

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ011686032017)의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

Abbaspour, K. C., Johnson, C. A., and Van Genuchten, M. T. (2004). "Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure." *Vadose Zone Journal*, Vol. 3, No. 4, pp. 1340-1352.

Beven, K. (2006). "A manifesto for the equifinality thesis." *Journal of Hydrology*, Vol. 320, No. 1, pp. 18-36.

- Beven, K., and Binley, A. (1992). "The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction." *Hydrological Processes*, Vol. 6, No. 3, pp. 279-298.
- 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, J., and Mostaghimi, S. (2009). "Dynamic agricultural non-point source assessment tool (DANSAT): model application." *Biosystems Engineering*, Vol. 102, No. 4, pp. 500-515.
- Cho, M. S., Kim, S. H., Choi, H. S., and Park, J. S. (2004). "Uncertainty analysis of flow measurement data in sum river experimental watershed." *Conference of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, pp. 4114-4119.
- Chow, V. T. (1959). *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill Book Company, New York, USA.
- Freer, J., Beven, K., and Ambrose, B. (1996). "Bayesian estimation of uncertainty in runoff prediction and the value of data: an application of the GLUE approach." *Water Resources Research*, Vol. 32, No. 7, pp. 2161-2173.
- James, L. D., and Burges, S. J. (1982). "Selection, calibration and testing of hydrologic models." *Hydrologic Modeling of Small Watersheds*, ASAE, St. Joseph, MI, Vol. 5, pp. 435-472.
- Jung, Y. H., Yeo, K. D., Kim, S. Y., and Lee, S. O. (2013). "The effect of uncertainty in roughness and discharge on flood inundation mapping." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 3, pp. 937-945.
- Kang, M. S., and Park, S. W. (2003). "Short-term food forecasting using artificial neural networks." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 45, No. 2, pp. 45-57.
- Kim, N. S., Kim, J. S., Jang, H. W. and Lee, J. H. (2015). "Hydrologic risk analysis based on extremer drought over the Korean peninsula under climate change." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 4, pp. 45-52.
- Kim, S. U., and Lee, G. S. (2008a). "Uncertainty, where ignorance is bliss, is it folly to be wise?" *Water for Future*, Vol. 41, No. 9, pp. 35-40.
- Kim, S. U., and Lee, G. S. (2008b). "Identification of uncertainty in fitting rating curve with Bayesian regression." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 9, pp. 943-958.
- Kim, W. (2005). "Uncertainty and improvement in the calculation of flood stage." *Conference of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 10, pp. 2942-2949.
- Kim, Y. S., Kim, J. Y., An, H. U., and Jung, K. S. (2015). "Improvement of the method using the coefficient of variation for Automatic Multi-segmentation method of a rating curve." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 10, pp. 807-816.
- Korea Water Resources Association (2009). *River design standard and explanation*, KWRA, pp. 93-100.
- Lambie, J. C. (1978). *Measurement of flow-velocity-area methods*. Hydrometry: Principles and Practices, first edition, edited by Herschy R.W., Wiley, Chichester, UK.
- Lee, W. S., Kim, S. U., Chung, E. S., and Lee, K. S. (2008). "Improvement of rating curve fitting considering variance function with Pseudo-likelihood estimation." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 8, pp. 807-823.
- Li, L., Xia, J., Xu, C. Y., and Singh, V. P. (2010). "Evaluation of the subjective factors of the GLUE method and comparison with the formal Bayesian method in uncertainty assessment of hydrological models." *Journal of Hydrology*, Vol. 390, No. 3, pp. 210-221.
- Matott, L. S., Babendreier, J. E., and Purucker, S. T. (2009). "Evaluating uncertainty in integrated environmental models: a review of concepts and tools." *Water Resources Research*, Vol. 45, No. 6, W06421.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011). *Report of master plan (alteration) for Cheongmicheon river*. pp. 4-126-4-136.
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., and Daggupati, P. (2015). "Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria." *Transactions of the ASABE*, Vol. 58, No. 6, pp. 1763-1785.
- Nash J. E., and Sutcliffe, J. V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models part I - a discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
- Pappenberger, F., Beven, K., Horritt, M., and Blazkova, S. (2004). "Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations." *Journal of Hydrology*, Vol. 302, No. 1, pp. 46-69.
- Pappenberger, F., Matgen, P., Beven, K., Henry, J. B., Pfister, L., and Fraipont, P. (2006). "Influence of uncertain boundary conditions and model structure on flood inundation predictions." *Advances in Water Resources*, Vol. 29, No. 10, pp. 1430-1449.
- Park, J. E., and Kim, S. H. (2013). "Application of Levenberg Marquardt method for calibration of unsteady friction model for a pipeline system." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 4, pp. 389-400.
- Retian, T., and Petersen-Øverleir, A. (2008). "Baysian 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.
- Song, J. H., and Kang, M. S. (2016). "Performance measures and valibration methods for hydrologic and water quality models." *Rural Resources*, Vol. 58, No. 2, pp. 11-22.
- Song, J. H., Kang, M. S., Song, I. H., and Jun, S. M. (2016). "Water balance in irrigation reservoirs considering flood control and irrigation efficiency variation." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 142, No. 4, 04016003.
- United States Army Corps of Engineers (2010). *HEC-RAS river analysis system: User's Manual 4.1*. Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, USA.
- Van Griensven, A., and Bauwens, W. (2003). "Multiobjective auto-calibration for semidistributed water quality models." *Water Resources Research*, Vol. 39, No. 12, pp. SWC 9-1.
- Yevjevich, V. (1972). *Probability and statistics in hydrology*. Water Resources publications, Fort Collins, Colorado, USA.