

조도계수와 유량의 불확실성이 홍수범람도 구축에 미치는 영향

정영훈* · 여규동** · 김수영*** · 이승오****

Jung, Younghun*, Yeo, Kyu Dong**, Kim, Soo Young***, Lee, Seung Oh****

The Effect of Uncertainty in Roughness and Discharge on Flood Inundation Mapping

ABSTRACT

The accuracy of flood inundation maps is determined by the uncertainty propagated from all variables involved in the overall process including input data, model parameters and modeling approaches. This study investigated the uncertainty arising from key variables (flow condition and Manning's n) among model variables in flood inundation mapping for the Missouri River near Boonville, Missouri, USA. Methodology of this study involves the generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) to quantify the uncertainty bounds of flood inundation area. Uncertainty bounds in the GLUE procedure are evaluated by selecting two likelihood functions, which is two statistic (inverse of sum of squared error (1/SAE) and inverse of sum of absolute error (1/SSE)) based on an observed water surface elevation and simulated water surface elevations. The results from GLUE show that likelihood measure based on 1/SSE is more sensitive on observation than likelihood measure based on 1/SAE, and that the uncertainty propagated from two variables produces an uncertainty bound of about 2% in the inundation area compared to observed inundation. Based on the results obtained from this study, it is expected that this study will be useful to identify the characteristic of flood.

Key words : GLUE, Likelihood measure, Uncertainty bound, Roughness, Flow condition

초록

홍수범람도의 정확성은 입력자료, 모형변수, 모델접근방법 등을 포함한 전반적인 구축과정에 포함된 모든 변수들로부터 전달되는 불확실성에 의해 결정된다. 본 연구의 목적은 미국 Missouri주 Boonville시에 위치한 Missouri 강에 대한 홍수범람도 구축과정에서 모델 변수들 가운데 주 요소 (흐름조건, 조도계수)로부터 발생하는 불확실성을 조사하는 것이다. 본 연구를 수행하기 위하여 홍수범람면적의 불확실성 구간을 정량화하기 위한 GLUE (generalized likelihood uncertainty estimation)를 이용하였다. GLUE 수행과정에서 불확실성 구간은 두 개의 우도함수를 선택함으로써 산정되었는데 선택된 우도함수는 제곱오차 합의 역(1/SSE)과 절대오차 합의 역(1/SAE)이다. GLUE의 결과는 제곱오차 합의 역에 의한 우도측정이 절대오차 합의 역에 의한 우도측정보다 관측 자료에 더 민감하였고, 두 개의 변수에 포함된 불확실성은 관측 자료의 약 2%에 해당하는 홍수범람면적의 불확실성 구간에 전달되었다. 이러한 결과를 토대로, 본 연구는 홍수의 특성을 알아내는데 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

검색어 : GLUE, 우도측정, 불확실성구간, 조도계수, 흐름조건

* 인하대학교 수자원시스템연구소 연구교수, 공학박사 (yjung@inha.ac.kr)

** 정회원 · 인하대학교 수자원시스템연구소 연구교수, 공학박사 (yeokd94@gmail.com)

*** 정회원 · 홍익대학교 토목공학과 박사과정, 공학석사 (freedance80@gmail.com)

**** 정회원 · 교신저자 · 홍익대학교 토목공학과 조교수, 공학박사 (Corresponding Author · Department of Urban & Civil Engineering, Hongik Univ., seungoh.lee@hongik.ac.kr)

Received October 15 2012, Revised December 6 2012, Accepted March 4 2013

1. 서론

홍수는 단 시간 내에 수많은 인명과 재산에 피해를 주는 자연재해 중 하나이다. 이러한 피해를 줄이기 위하여 홍수빈도해석과 강우유출모형개발, 홍수 추적과 같은 다양한 연구 및 사업들이 진행되고 있으며(Dawdy 외, 1972; Merz와 Blöschl, 2008a, b; Morin 외, 2009), 그 결과들은 홍수위험관리에 있어 의사결정에 대한 기본적인 정보로서 제공되어왔다. 특히, 홍수범람도(flood inundation map)는 홍수범람의 공간적 분포를 제공함으로써 홍수 위험관리에서 보다 합리적인 의사결정을 하는데 큰 기여를 하고 있다. 예를 들어, 미국 FEMA(Federal emergency manage agency)는 미국 전역에 걸쳐 100년 빈도의 홍수범람도를 제공하고 있으며 이는 홍수보험비를 책정하는데 기본이 된다. 최근 홍수가 더욱 빈번해지고 강도가 더욱 커지면서 홍수범람도의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 이에 따라, 보다 정확성이 높은 홍수범람도가 요구되며, 홍수범람도 구축에 있어서 발생하는 불확실성에 대한 요인을 파악하고 그 영향을 평가할 필요가 있다.

홍수범람도는 일반적으로 크게 관측과 모형을 이용하여 구축되는데, 관측은 최고수위 관측치를 보간하는 방법과 인공위성이나 항공기를 이용한 원격탐사자료로부터 추출되는 방법이 있다. 반면 홍수범람모형은 수문모형, 수리모형, 그리고 지형분석 등으로 이루어져 홍수범람을 예측한다. 수문모형은 일반적으로 홍수량을 추정하는데 사용되며, 수리모형은 수문모형으로부터 얻어진 홍수량을 기본으로 홍수위를 추정하는데 이용된다. 최종적으로 지형분석을 통하여 추정된 홍수위는 홍수범람의 공간적분포를 추정하는데 이용된다. 각각의 구성안에 더 상세한 과정들이 존재하며, 이 과정에서 발생하는 불확실성의 요소들은 다양하게 존재하며 이는 최종 결과물인 홍수범람도에 전달된다.

홍수범람도구축에 있어 불확실성의 중요성은 다양한 문헌을 통하여 소개되어 왔다(Weichel 외 2007; Koivumäki, 2010). Bayesian forecasting system(Krzysztofowicz 1999), generalized likelihood uncertainty estimation(GLUE) (Beven과 Binley, 1992), 그리고 fuzzy extension principle(Maskey 외, 2004)은 홍수범람도 구축에서 불확실성을 정량적으로 산정하는 대표적인 방법들이다. 이러한 방법들 가운데, GLUE는 Beven과 Binley(1992)에 의해 수리학적 모델에서 불확실성을 예측하는 최초의 방법들 가운데 하나이며, 그 과정이 단순하고 다수의 변수에 대한 불확실성을 산정할 수 있는 전역적 방법이라 홍수범람도구축에서 발생하는 다양한 불확실성 요소들을 평가하는데 많이 사용되고 있다(Werner 2004; Pappenberger 외 2005). GLUE를 이용한 불확실성 산정에 있어 Aronica 외(2002)와 Mason 외(2009)는 주하도와 범람원의 조도계수의 조합을 이용하였고, Horritt(2006)은 상류와 하류의

조도계수의 조합을 이용하였다. 따라서, 본 연구는 홍수범람도 구축에서 발생할 수 있는 불확실성 요소들 가운데 조도계수 외에, 수위-유량관계식에서 발생하는 불확실성까지 고려하여 홍수범람도에 미치는 영향을 GLUE를 이용하여 산정하고자 한다. 이 목적을 수행하기 위하여 미국 Missouri주 Boonville 근처 Missouri 강(Boonville 하도)의 홍수위를 추정하는데 HEC-RAS모형과 홍수범람의 공간적 분포를 추정하는데 역거리 가중치(Inverse distance weight: IDW)보간법이 사용되었다.

2. 홍수범람도 구축과정에서 발생하는 불확실성 요소

홍수범람도의 정확성을 개선하기위하여 홍수범람도 구축과정에서 발생하는 불확실성 요소들을 통합적으로 고려하는 것이 중요하다. 홍수범람도 구축과정에 불확실성요소로는 1) 수문모형이나 수위유량 관계곡선으로부터 산정된 흐름조건(flow condition); 2) 수문, 수리, 지형분석등에 사용되는 기상자료, 지형도와 토지이용도와 같은 입력자료; 3)수리모형 종류(예. 1차원 혹은 2차원); 4) 모형 변수들(예. Manning의 조도계수); 5) 모형 흐름 가정(예. 정상류 혹은 비정상류); 6) 조수의 영향; 7) 수리 모형의 경계조건(예. 등류수심 혹은 고정수심); 8) 관측 자료의 부족(예. 관측홍수범람도); 그리고 9) 홍수범람도 구축방법 등에서 발생한다(Merwade 외 2008).

위에서 열거된 불확실성 요소들 가운데 조도계수와 흐름조건은 홍수범람도 구축에서 불확실성을 발생시키는 주요한 요인들이라고 많은 문헌들을 통하여 소개되어 왔다. 조도계수는 HEC-RAS 모형 과정에서 모든 다른 불확실한 변수에 대하여 결정된 결과를 변화시킬 수 있는 유일한 보정계수로서 고려되어 왔다(Nicholas, 2005; Horritt, 2005). HEC-RAS 수리 모형은 하나의 횡단면에 대하여 주하도와 범람원에 걸쳐 최대 20개의 조도계수를 가질 수 있다. 각각의 조도계수는 모델 변수로 고려될 수 있지만, 이러한 점들은 불확실성 해석에서 너무 많은 변수들을 고려해야하기 때문에 홍수범람도에 대하여 정량적으로 불확실성 산정을 어렵게 한다. 이 문제를 극복하기 위해 Pappenberger 외(2005)는 전체 횡단면에 대하여 조도계수를 하나의 값으로 가정하여 홍수범람도에 대한 불확실성을 산정하였다. 이외의 조도계수의 불확실성은 일반적으로 조도계수는 하나의 흐름조건에 대하여 보정되고 다른 흐름조건에 대하여 그 보정된 조도계수가 사용되는 과정에서 발생할 수 있다. 그 보정된 조도계수는 다른 흐름조건에 대한 홍수위를 산정하는데 부적합한 결과를 초래할 수 있기 때문이다.

일반적으로 유량은 홍수범람도 구축에 있어 가장 불확실한 변수들 가운데 하나로써 고려된다(Peppenberger 외, 2006). 앞에서 언급한 것과 같이 홍수범람도 구축에서 사용되는 유량은 크게

수위-유량관계식과 수문모형으로부터 얻어진다. 수위-유량관계식으로부터 얻어지는 유량은 일반적으로 수위-유량관계식을 개발할 때 영향을 주는 관측 자료의 개수, 유량이 증가할 때와 감소할 때 수위의 이력현상, 관계식의 형식(예. 선형 혹은 비선형)에 따라 결정되며 이러한 요소들로부터 불확실성을 포함한다. 또한, 수문모형은 설계홍수량을 추정하기위해 기상자료(예. 강우, 온도), 지형자료(예. 지형도), 토지이용도등을 이용하고, 관측자료(예. 유출량)에 대하여 모델변수를 보정하여 설계홍수량을 산정한다(Hossain 외, 2004). 각각의 방법에서 발생하는 불확실성은 유량에 포함되며, 그 유량이 수리모형의 입력 자료로서 사용될 때 모의된 홍수위(water surface elevation)의 정확성에 영향을 미친다. 최종적으로 지형분석을 통한 홍수범람의 공간적 분포에 불확실성이 전달된다.

3. GLUE를 이용한 불확실성 해석

3.1 Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE)

GLUE 불확실성해석 방법은 Hornberger-Spear-Young 전역적 민감도분석 방법(global sensitivity analysis)을 기본으로 하며 (Hornberger 와 Spear 1981; Young 1983), 가능범위(feasible range)에서 특정 확률밀도분포도(probability density function; PDF)로부터 발생하는 랜덤변수의 조합이 Monte Carlo 모의에 이용된다. GLUE방법의 목적은 변수 조합들 가운데 행위모델(behavioral model)을 가려내는 것이다. 랜덤변수조합을 이용한 Monte Carlo 모의로부터 나온 결과들은 우도측정(likelihood measure)에 의해 가중치를 갖게 된다. 일반적으로 우도측정은 모의된 결과가 관측치에 얼마나 적합한지 판단하는데 사용된다. GLUE의 개념은 Bayes 방정식(식 1)에 기초하며 GLUE에서 사용되는 우도측정은 여러 가지 우도함수에 의해서 결정될 수 있다. 예를 들어, 오차제곱합(sum of squared error: SSE)의 역, 절대오차합(sum of absolute error: SAE)의 역, 그리고 Nash-Sutcliffe efficiency는 대표적인 우도함수들이다.

$$P[\theta|O] = c \cdot L[\epsilon|\theta] \cdot P[\theta] \tag{1}$$

여기서, $P[\theta|O]$ 는 사후확률밀도분포(posterior PDF)를 나타내며, $L[\epsilon|\theta]$ 은 우도를 나타내며, $P[\theta]$ 는 사전확률밀도분포(prior PDF)을 나타낸다. 또한, θ 는 모델변수들을 나타내며, ϵ 은 관측치(O)와 모델에 의해 모의된 값과의 오차를 나타낸다.

우도측정은 관측치와 모델값사이의 적합도를 나타내며, 일반적으로 높은 우도측정은 높은 적합도를 의미한다. 본 연구에서는 우도측정을 계산하기위해 절대오차합의 역(식 2)과 오차제곱합의 역(식 3)의 우도함수를 사용하였다.

$$L_{SAE} = \frac{1}{\sum abs(\epsilon)} \tag{2}$$

$$L_{SSE} = \frac{1}{\sum (\epsilon)^2} \tag{3}$$

식 (2)와 (3)으로부터 얻은 우도측정은 임계값에 따라 행위모델(behavioral model 혹은 accepted dataset)과 비행위모델(non-behavioral model 혹은 non-accepted dataset)로 나뉘어지며, 행위모델은 변수조합(dataset)이 만들어낸 우도측정이 임계값을 만족하는 변수조합을 말한다. 여기서, 변수조합은 주어진 범위안에서 임의로 선택된 조도계수와 유량의 조합을 의미하며, 불확실성 산정은 행위모델에 의하여 도출된 우도측정만을 기반으로 가중치를 두어 누적확률분포(cumulative density function; CDF)를 생성한다. 누적확률분포의 중간값(median)은 일반적으로 모형이 예측한 결과의 대표값으로 사용되며, 불확실성은 5와 95%의 신뢰도로 선택된 90%의 신뢰구간에 의하여 정량화된다(Blasone 외 2008).

3.2 HEC-RAS 모형

GLUE를 이용한 불확실성 해석에서 Monte Carlo 모의를 하는데 랜덤변수에 대한 홍수위를 산정하기 위해 Hydrologic Engineering Center.River Analysis System(HEC-RAS) 수리 모형이 사용되었다. HEC-RAS는 미공병단(United States Army Corps of Engineers; USACE)의 Hydrologic Engineering Center(HEC)에 의해서 개발되었다. HEC-RAS는 범람원을 포함한 하천하도에 대한 정상류와 비정상류 흐름조건에 대하여 수위를 모의할 수 있는 1차원 모형이다. 본 연구에서는 정상류흐름조건 가정으로 홍수위 모의를 수행하였다. 범람원이 저류지로서 역할을 한다면 2차원 모형을 사용하는 것이 더 적절할 수 있으나, 본 연구에서는 주하도와 범람원이 하나의 하도로 가정될 수 있는 흐름조건을 가질 수 있는 홍수량 때문에 1차원 수리모형인 HEC-RAS를 사용하였다. 이는 주하도와 범람원에서 흐름방향이 하천의 중앙선의 흐름방향과 평행하다는 것을 의미한다. 이에 따라, HEC-RAS 모형에서 사용되는 횡단면은 주 하도뿐만 아니라 범람원까지 포함한다. HEC-RAS에서 각각의 횡단면은 조도계수의 값을 기본으로 하는 세부분(subdivision)으로 나뉜다. HEC-RAS에서 기본수위는 에너지식(식 4)에 의해 계산된다.

$$Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_e \tag{4}$$

여기서 Y_1 과 Y_2 는 단면 1과 2에서의 수심을 나타내며, V_1 과 V_2 는 평균유속, Z_1 과 Z_2 는 주하도 바닥의 높이, α_1 과 α_2 는 속도

중계수, g 는 중력, 그리고 h_e 는 에너지 손실을 나타낸다.

HEC-RAS에서 총 통수(total conveyance, Q)는 각 세부분에 대하여 Manning방정식과 연속방정식에 의하여 계산된 모든 통수의 합으로 산정된다(식 5).

$$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

여기서, n 은 조도계수, A 는 흐름면적, R 은 동수반경, 그리고 S_f 는 마찰경사를 나타낸다.

조도계수의 증가는 Manning 방정식에서 고정된 유량과 마찰경사에 대하여 수위를 증가시킨다. 이와 비슷하게 총 통수의 변화는 고정된 유량과 마찰경사의 조건에 대하여 수위의 변화에 영향을 준다. HEC-RAS으로 수위를 모의하기 위해서는 일반적으로 기하학적 자료(예. 하도 중심선, 횡단면, 횡단면 사이의 간격), 유량자료, 그리고 경계조건이 필요하다. 기하학자료는 HEC-GeoRAS를 이용하여 수치표고모델(digital elevation model: DEM)로부터 생성되었다. HEC-GeoRAS는 ArcGIS에서 사용가능하도록 만들어진 하나의 도구로써, HEC-RAS의 정보를 ArcGIS로 내보낼 수 있고, 그 반대로 ArcGIS에서 생성된 자료를 HEC-RAS로 불러들여 기본 자료로 이용할 수 있는 기능을 가지고 있다. 본 연구에서 HEC-RAS의 하류의 경계 조건은 등류수심으로 설정하였다.

3.3 역거리 가중치 보간법(IDW)

HEC-RAS로부터 모의된 홍수위는 각 횡단면에 대하여 산정되는데, 홍수범람의 공간적분포를 위해 각 단면의 홍수위에 대해 전체 하도의 홍수위를 보간하는 것이 필요하다. 이를 위해 Kriging이나 Spline 등과 같은 여러 가지 보간법이 있으나 본 연구에서는 주위 지점의 홍수위에 직접적으로 영향을 받는 역거리 가중 보간법을 사용하였다(식 6).

$$F(x,y) = \sum w_i \cdot f_i \quad (6)$$

여기서, $F(x,y)$ 는 x, y 지점에서 보간될 홍수위, f_i 는 i 지점의 홍수위, w 는 가중치를 나타낸다.

$$w_i = \frac{h_i^{-p}}{\sum_{j=1}^n h_j^{-p}}$$

여기서 p 는 지수변수이며 일반적으로 2의 값이 사용되며, h 는 x, y 지점과 i 지점사이의 거리를 나타낸다.

$$h_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}$$

보간된 홍수위는 수치표고모델과 각각의 셀에 대하여 비교되며, 지형표고보다 높은 홍수위를 선별하여 공간적 홍수범람도를 생성한다.

4. 대상하도와 자료

Missouri 강은 미중부를 가로지르며 북미에서 가장 긴 강이며, Montana서부의 록키산에서 시작되며 Missouri주의 St. Louis의 북부 Mississippi 강으로 합류하기 전 남동쪽으로 약 3,767km에 걸쳐 흐른다. 본 연구를 위해 선택된 Missouri강은 Missouri주 Boonville시 근처의 약 10km의 구간이며, HEC-RAS모의를 위해 구축된 횡단면은 총 7개로 횡단면 사이의 평균간격은 약 1.7km이다. 또한, 횡단면의 평균길이는 약 5km로 비교적 넓은 범람원을 포함하고 있다(Fig. 1).

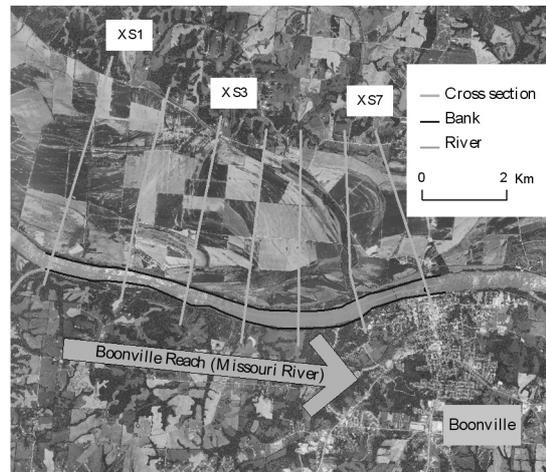


Fig. 1. Study reach (Missouri river near Boonville, Missouri, USA)

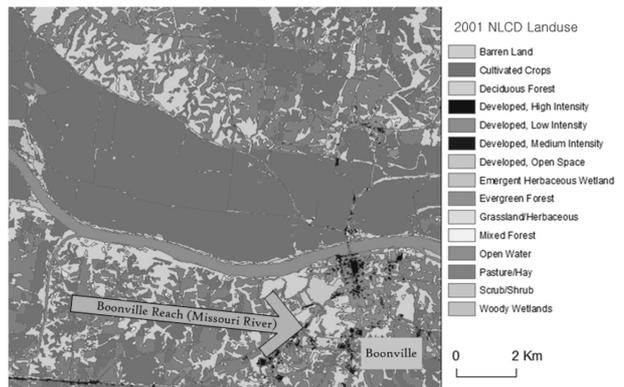


Fig. 2. 2001 NLCD (USGS)

본 연구를 위해 HEC-RAS의 지형자료를 구축하기 위하여 미국 지질조사국(United States Geological Survey: USGS)에서 제공하는 10m 해상도의 수치표고모델과 30m 해상도의 2001 NLCD (national landcover data) 토지이용도를 이용하였다. 수치표고모델은 횡단면의 표고정보를 얻는데 사용되었으며, 2001 NLCD는 각 횡단면에 조도계수를 할당하기 위해 사용되었다(Fig. 2). 본 연구에는 홍수위를 산정하기 위하여 Moore(2010)가 정리한 2001 NLCD의 분류에 따라 초기 조도계수 값으로 각 토지이용별 대표값을 사용하였으며, 조도계수의 오차 범위는 모든 토지이용별 조도계수에 걸쳐 최대값 및 최소값에 대한 대표값의 상대오차의 평균값인 $\pm 25\%$ 을 사용하였다(Table 1과 2). 본 연구에서 모든 조도계수의 오차는 $\pm 25\%$ 의 범위에서 균등 확률밀도분포로부터 백분율의 형태로 무작위로 생성되어 초기 조도계수값에 적용되어 HEC-RAS를 이용한 수위모의에 사용되었다(Table 2). 예를 들어, 만약 한 횡단면에 open water, Mixed forest, Woody wetland의 토지이용이 있다면, 그 횡단면에 포함된 조도계수의 개수는 총 3개가 되며,

대표값으로 초기화 된다(open water: 0.03, Mixed forest: 0.12, Woody wetland: 0.1). 이때, 랜덤 변수가 -25%와 25%의 사이에서 10%가 선택되었다면, 각 조도계수들은(Open water: 0.033, Mixed forest: 0.132, Wood wetland: 0.11) 10%씩 증가되어 HEC-RAS에 적용된다.

수위-유량관계식을 구축하기위하여 USGS Boonville지점의 유량관측소에서 제공하는 88개의 짝을 이루는 침두 유량과 침두 수위자료를 이용하였다(Fig. 3). GLUE에서 우도측정을 계산하기 위해 사용된 관측 홍수 유량은 2007년 5월 13일에 발생한 $9,755\text{m}^3/\text{s}$ 이며 이때의 홍수위(water surface elevation)는 181.44m이다. 유량의 오차 범위는 수위-유량관계식에 대한 t-test로 검증된 $\pm 95\%$ 에 의해 결정되었기 때문에 유량의 오차는 $\pm 95\%$ 에 해당되는 범위에서 t-분포로부터 무작위로 선택되어 HEC-RAS의 유량으로 사용되었다(Table 2). 수위유량관계식 산정은 멱함수의 형식을 따르며 해당 유량관측소에서 관측된 홍수의 크기나 기간에 따라 고수위영역에서 루프현상의 결과를 보이는 관측 자료도 포함될 수 있으나,

Table 1. Roughness coefficients for 2001 NLCD Classification (Moore 2011)

| 2001 NLCD Classification | Roughness Coefficient | | | Source |
|-----------------------------|-----------------------|-------|-------|---------------------|
| | Min | Mean | Max | |
| Open Water | 0.025 | 0.03 | 0.033 | Chow 1959 |
| Developed, Open Space | 0.01 | 0.013 | 0.16 | Calenda et al. 2005 |
| Developed, Low Intensity | 0.038 | 0.05 | 0.063 | Calenda et al. 2005 |
| Developed, Medium Intensity | 0.056 | 0.075 | 0.094 | Calenda et al. 2005 |
| Developed, High Intensity | 0.075 | 0.1 | 0.125 | Calenda et al. 2005 |
| Barren Land | 0.025 | 0.03 | 0.035 | Chow 1959 |
| Deciduous Forest | 0.1 | 0.12 | 0.16 | Chow 1959 |
| Evergreen Forest | 0.1 | 0.12 | 0.16 | Chow 1959 |
| Mixed Forest | 0.1 | 0.12 | 0.16 | Chow 1959 |
| Scrub/Shrub | 0.035 | 0.05 | 0.07 | Chow 1959 |
| Grassland/Herbaceous | 0.025 | 0.03 | 0.035 | Chow 1959 |
| Pasture/Hay | 0.03 | 0.04 | 0.05 | Chow 1959 |
| Cultivated Crops | 0.025 | 0.035 | 0.045 | Chow 1959 |
| Woody Wetlands | 0.08 | 0.1 | 0.12 | Chow 1959 |
| Emergent Herbaceous Wetland | 0.075 | 0.1 | 0.15 | Chow 1959 |

Table 2. The conditions for random variables generated in a MC simulation

| Model Variable | Model variable updated by the random error | Range of Random Number (RN) | | PDF |
|--------------------------|---|-----------------------------|-------|----------------|
| | | Min | Max | |
| Roughness Coefficient, N | $N=N_i(1+RN)$ where, N_i : initial value | -25% | 25% | Uniform |
| Discharge, F | $F = 10^{(a + b \times \log(181.44 - 172.40))} [m^3/s]$ $a = 2.3367 + 0.0627 \times RN$ $b = 1.1721 + 0.0773 \times RN$ | -2.131 | 2.131 | t-distribution |

이를 가려내기에는 기준이 명확하지 않아 해당관측소의 모든 첨두 유량을 포함하였다. 이에 따라 수위유량관계식의 오차범위는 다소 크게 산정될 가능성이 있다. Table 2에서 RN(Random Number)은 각 변수의 주어진 범위에서 발생하는 난수를 의미하며, 이 난수는 조도계수에 대하여 조도계수의 변화율을 의미하고 유량에 대하여 수위-유량관계곡선식의 t-검정을 통한 t-분포의 백분율점(Percentage Point)을 나타낸다. 각 변수별 해당 확률밀도함수에 따라 생성된 난수는 조도계수와 유량을 변화시키며, 이 변화된

조도계수와 유량은 HEC-RAS에 적용되어 총 10,000번의 Monte Carlo 모의가 수행되었다.

5. 결과 및 고찰

홍수범람도에 대한 조도계수와 유량의 불확실성을 정량화하기 위한 총 10,000번의 Monte Carlo 모의에서 HEC-RAS로 계산된 수위의 분포는 Fig. 4에서 나타낸다. 모의된 최대수위와 최소수위의 차는 전체 횡단면에 대하여 약 1.33m에서 2.96m로 상류에서 가장 큰 차이를 보인다. 여기서, 최대수위는 조도계수의 변화율인 24.3%와 수위유량곡선식에 대한 t-분포의 백분율점 1.978이 적용된 조도계수와 유량의 변수조합에서 발생되었고, 최저수위는 조도계수의 변화율이 -24.4%이고 수위유량곡선식에 대한 t-분포의 백분율점이 -1.977일 때 발생하였다. 이는 정상류흐름해석에서 조도계수와 유량이 증가할수록 수위가 상승하는 물리적 현상을 따른다. 상류에서 하류로 갈수록 모의된 최대수위와 최소수위의 차는 좁아지며 수위경사도 급해진다. 이는 조도계수와 유량의외의 하류 경계조건에 의하여 영향을 받은 결과일 수도 있다. 이는 HEC-RAS모의에서 상류의 초기수위는 하류의 경계조건에 의해 결정되기 때문에 에너지공식과 Manning 방정식에 의한 하류의 모의홍수위가 하류의 경계조건인 등류수심을 만족시키는 과정에서 발생할 수 있다 (Hydrologic Engineering Center, 1998).

Fig. 5와 Table 3은 GLUE방법에서 우도 선택에 따라 다르게 생성된 누적확률분포를 보여준다. Fig. 5에서 보이는 누적확률분포는 L_{SSE} 우도에 대하여 거친 곡선을 보이는 반면 L_{SAE} 우도는 상대적으로 부드러운 곡선을 보인다. 이는 단 하나의 관측 홍수위에 대하여 우도측정이 계산되는 과정에서 절대오차의 합보다는 오차의 제곱합으로 계산된 우도측정이 관측 홍수위 훨씬 민감하기 때문이다. 다시 말하면 GLUE는 무작위로 선택된 조도계수와 유량의 조합이 Monte Carlo 모의에서 산정된 홍수위가 관측 홍수위와

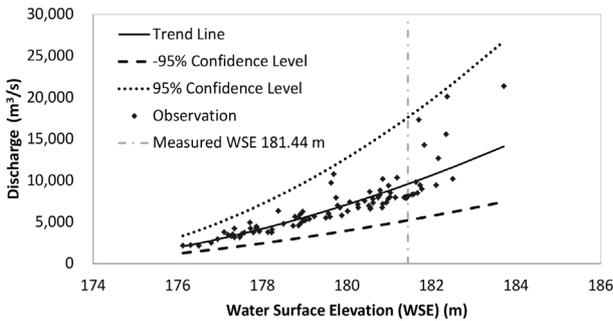


Fig. 3. Stage-discharge rating equation based on peak flow at Boonville, Missouri, USA (USGS)

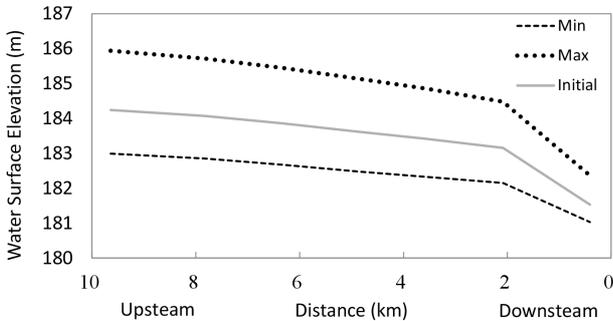


Fig. 4. Water surface elevation simulated by HEC-RAS

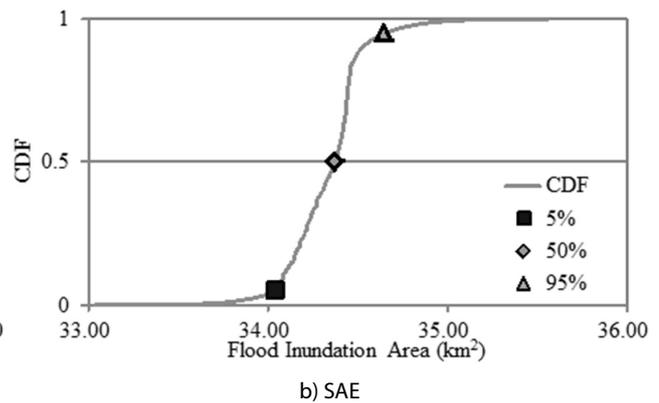
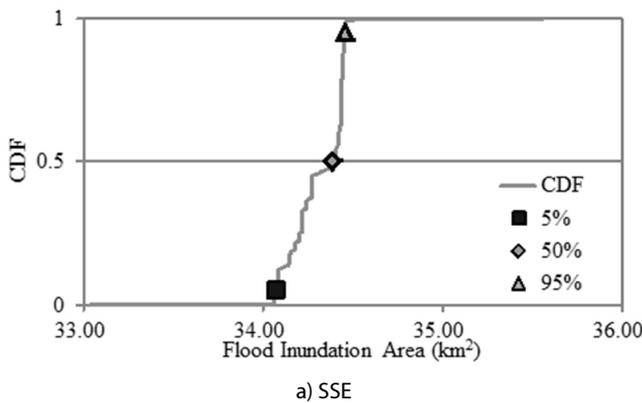


Fig. 5. CDF estimated from GLUE corresponding to likelihood measure

Table 3. Uncertainty quantification using GLUE

| CDF | Flood Inundation Area (km ²) | |
|------------------|--|------------------|
| | L _{SSE} | L _{SAE} |
| 0.00 | 33.038 | |
| 0.05 | 34.075 | 34.039 |
| 0.50 | 34.394 | 34.375 |
| 0.95 | 34.460 | 34.649 |
| 1.00 | 35.565 | |
| 90% Bound | 0.385 | 0.610 |
| Total Difference | 2.527 | |

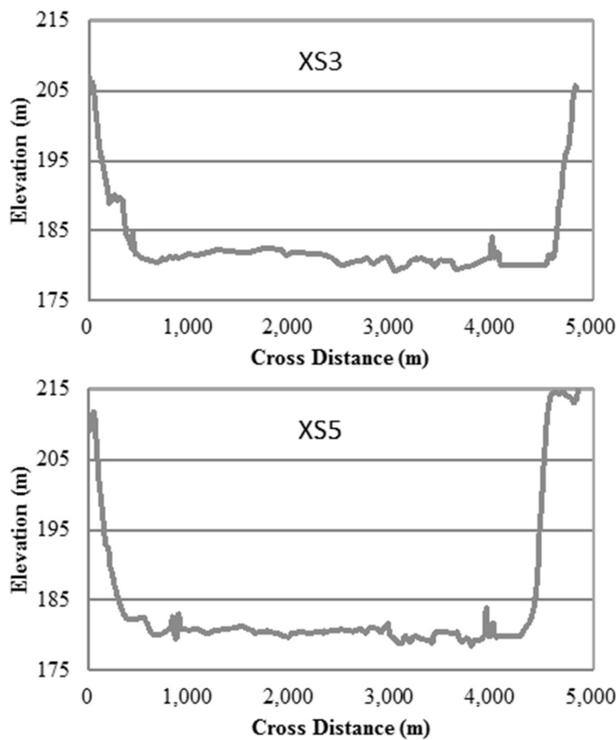


Fig. 6. Examples of valley shape in study reach

비교하며 각각 다른 우도측정을 가지고, 그 우도측정을 기반으로 확률이 계산되기 때문에 각 모의에서 발생된 변수조합은 홍수범람 면적에 대하여 다른 확률을 가진다. 이러한 과정에서 모의된 홍수위가 관측 홍수위와 가까울 때 L_{SSE} 우도는 L_{SAE} 우도보다 상대적으로 큰 우도측정을 가진다. 두 우도는 오차를 기반으로 하는데, L_{SSE} 우도는 오차의 제곱의 합으로 결정되고 L_{SAE} 우도는 절대오차의 합으로 결정되기 때문에, 홍수범람면적에 대하여 L_{SSE} 우도는 L_{SAE} 우도보다 우도측정값의 편차가 훨씬 크다. 이러한 편차는 누적확률 분포를 생성하는 과정에서 가중치에 전달되기 때문에 L_{SAE} 우도를 이용한 누적확률분포가 L_{SSE} 우도를 이용한 누적확률분포보다 상대적으로 부드러운 곡선으로 표현된다. Table 3에서 홍수범람면

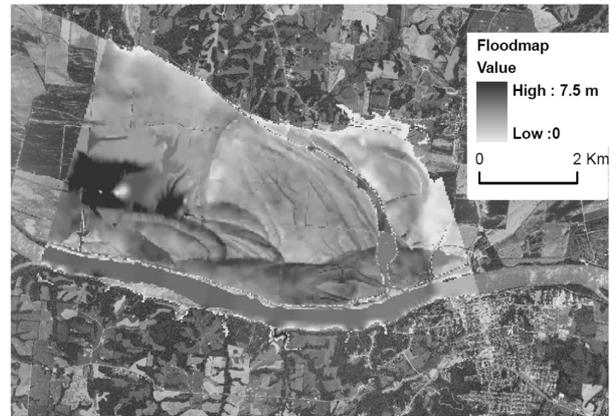


Fig. 7. Spatial distribution of flood inundation for 50% of CDF using LSSE likelihood measure in GLUE

적의 90% 불확실성 한계는 L_{SSE} 우도에 대하여 약 0.38km² 인 반면 L_{SAE} 우도에 대한 홍수범람면적의 90% 불확실성 한계는 약 두 배인 약 0.61km²이다. 두 우도에 대하여 산정된 불확실성은 50%의 홍수범람면적의 약 1~2%이다. 이는 매우 작은 값이라 할 수 있지만 변수 범위에서 모의된 최대·최소 홍수범람면적의 차인 2.5km²를 고려했을 때 조도계수와 유량의 불확실성이 작다고만 단정 지을 수는 없다. 그 이유 중 하나는 홍수범람면적이 하도형상에 의하여 영향을 받았을 것이라 사료된다(Fig. 6). 왜냐하면 홍수위가 이미 하도 사면의 상층부에 도달했을 때 변수들의 불확실성에 의해서 홍수위가 변하더라도 홍수 범람면적에는 영향을 크게 미치지 않을 수도 있기 때문이다. 예를 들어, 직사각형의 형상을 가지고 있는 하도에서 홍수위가 증가하더라도 홍수범람면적에는 크게 영향을 미치지 않는다. 이러한 점들을 고려했을 때 Boonville 지역의 Missouri강 하도의 형상은 U-형에 가까울 것이라 예측은 Fig. 6에 의해 증명되었다. Fig. 6는 L_{SSE} 우도를 이용한 GLUE의 불확실성 해석으로부터 산정된 누적확률분포의 50%에 해당하는, 즉 2007년 5월 13일의 홍수사상에 대한 대표 홍수범람면적이다. Fig. 1에서의 평상시 강의 공간적 분포와 비교했을 때 본 연구를 위해 선택된 홍수사상은 그 규모가 상당히 크다고 판단할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 미국 Missouri주 Boonville 근처 Missouri 강 (Boonville 하도)와 2007년 5월 13일에 발생한 홍수사상에 대하여 홍수범람도 구축에 있어 조도계수와 유량의 불확실성을 GLUE를 이용하여 정량적으로 산정하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) GLUE를 이용하여 산정된 90%의 불확실성 한계는 조도계수와

유량의 오차가 L_{SSE} 우도에 대하여 약 0.38km^2 , L_{SAE} 우도에 대하여 0.61km^2 의 홍수범람면적에 전달되었음을 보여준다. 이는 홍수위 예측에서 불확실성을 줄이기 위하여 수리모형의 매개변수를 보정하고, 그 보정된 모형을 이용하여 홍수범람도를 구축하더라도 모형 매개변수 외에 조도계수와 유량과 같은 입력 자료들의 질에 의하여 오차가 홍수범람도에 전달된다는 것을 의미한다. L_{SSE} 우도측정은 L_{SAE} 우도측정보다 관측 자료에 가까울수록 더욱 민감하게 반응하며, 그 결과 각 Monte Carlo 모의에서 무작위로 생성된 조도계수와 유량으로 구성된 변수조합에 대하여 L_{SSE} 우도측정의 분포의 편차가 크다. 이는 결국 우도함수에 따라 GLUE의 결과가 달라질 수 있음을 보여준다.

- (2) GLUE를 이용하여 산정된 조도계수와 유량의 불확실성은 본 연구에서 선택된 홍수사상에 대하여 비교적 작게 산정되었지만, 대상 홍수사상의 크기와 하도형상의 영향을 고려해야 한다. 이는 GLUE로부터 작게 산정된 불확실성과 대상하도의 형상을 고려했을 때 하도형상의 영향을 받았음을 증명하였다. 즉, 본 연구에서는 U-형상을 가지는 대상하도의 사면 중부분에 도달한 관측 홍수위를 이용했기 때문에 조도계수와 유량의 오차가 홍수범람면적에 미치는 불확실성이 상대적으로 적었다. 사면의 하류부에서 변수들이 불확실성이 홍수범람면적에 더 큰 영향을 미칠 수 있으나 흐름조건에서 유량이 작을수록 작아지는 오차의 범위는 오히려 홍수범람에 대한 불확실성을 상쇄시킬 수 있음을 고려해야한다.

본 연구에서 도출된 결과는 홍수범람도를 구축할 때 발생할 수 있는 불확실성 가운데 조도계수와 유량과 같은 입력 자료의 질이 홍수범람도의 불확실성에 전달되기 때문에 보다 정확성 있는 입력 자료를 확보해야 된다는 것을 의미한다. 이와 더불어 하상형상도 홍수범람도를 구축할 때 발생할 수 있는 하나의 불확실성 요소로 작용할 수 있음을 보여주었다. 이러한 입력 자료의 불확실성에 대한 고려는 홍수 방지나 피해의 대책을 포함한 홍수위험관리(예, 홍수보험, 홍수 피해액 산정)에서 보다 정밀한 계획을 수립하는데 필수적인 홍수범람도의 정확성을 향상시키는데 크게 활용할 것이라 사료된다. 하지만, 본 연구는 하나의 대상지역에 대하여 자료 수집에 대한 한계로 인하여 불확실성 요소들 가운데 두 가지 요인만 고려하여 홍수범람도에 대한 불확실성을 정량화하였기 때문에 추후, 홍수사상의 크기, 지형형상, 대상하도의 규모, 수치표고모델의 정확성과 같은 다른 요인들까지 고려한다면 본 연구의 결과는 홍수위험관리에서 보다 유용한 정보로 사용될 것이라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

Reference

- Aronica, G., Bates, P. D., and Horritt, M. S. (2002). "Assessing the uncertainty in distributed model predictions using observed binary pattern information within GLUE." *Hydrological Processes*, Vol. 16, pp. 2001-2016.
- Beven, K. J., and Binley, A. M. (1992). "The future of distributed models: Model Calibration and Uncertainty Prediction." *Hydrol. Process.*, Vol. 6, pp. 279-298.
- Blasone, R. S., Vrugt, J. A., Madsen, H., Rosbjerg, D., Robinson, B. A., and Zyvoloski, G. A. (2008). "Generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) using adaptive Markov chain Monte Carlo sampling." *Adv. Water Resour.*, Vol. 31, No. 4, pp. 630-648.
- Dawdy, D. R., Lichten, R. W. and Bergmann, J. M. (1972). *A rainfall-runoff simulation model for estimation of flood peaks from small drainage basis*, U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 506-B.
- Hornberger, G. M., and Cosby, B. J. (1985). "Selection of parameter values in environmental models using sparse data: A Case Study." *Applied Math. and Comp.*, Vol. 17, pp. 335-355.
- Horritt, M. S. (2006). "A methodology for the validation of uncertain flood inundation models." *Journal of Hydrology*, Vol. 326, pp. 153-165.
- Hossain, F., Anagnostou, E. N., Dinku, T., and Borga, M. (2004). "Hydrological model sensitivity to parameter and radar rainfall estimation uncertainty." *Hydrol. Processes*, Vol. 18, No. 17, pp. 3277-3291.
- Hydrologic Engineering Center (1998). *HEC-RAS, Hydraulic Reference Manual*. Davis: California.
- Koivumäki, L., Alho, P., Lotsari, E., Käyhkö, J., Saari, A., and Hyypä, H. (2010). "Uncertainties in flood risk mapping: A Case Study on Estimating Building Damages for a River Flood in Finland." *J. Flood Risk Manage.*, Vol. 3, No. 2, pp. 166-183
- Krzysztofowicz, R. (1999). "Bayesian theory of probabilistic forecasting via deterministic hydrologic model." *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 9, pp. 2739-2750.
- Maskey, S., Guinot, V. and Price, R. K. (2004). "Treatment of precipitation uncertainty in rainfall-runoff modelling: A Fuzzy Set Approach." *Advances in Water Resources*, Vol. 27, No. 9, pp. 889-898
- Mason, D. C., Bates, P. D., and Dall' Amico, J. T. (2009). "Calibration of uncertain flood inundation models using remotely sensed water levels." *Journal of Hydrology*, Vol. 368, pp. 224-236.
- Merwade, V., Olivera, F., Arabi, M., and Edleman, S. (2008). "Uncertainty in flood inundation mapping—current issues and future directions." *J. Hydrol. Eng.*, Vol. 13, No. 7, pp. 608-620.

- Merz, R., and Blöschl, G. (2008a). "Flood frequency hydrology: 1. Temporal, Spatial, and Causal Expansion of Information." *Water Resour. Res.*, Vol. 44, W08432, doi:10.1029/2007WR006744.
- Merz, R., and Blöschl, G. (2008b). "Flood frequency hydrology: 2. Combining Data Evidence." *Water Resour. Res.*, Vol. 44, W08433, doi:10.1029/2007WR006745.
- Moore, M. R. (2011). *Development of a high-resolution 1D/2D coupled flood simulation of Charles City*, Master's thesis, University of Iowa.
- Morin, E., Grodek, T., and Dahan, O. (2009). "Flood routing and alluvial aquifer recharge along the ephemeral arid Kuiseb River, Namibia." *J. Hydrol.*, Vol. 368, pp. 262-275.
- Paul D. Bates., Stuart N. Lane., Robert I. Ferguson. (2005). *Computational fluid dynamics applications in environmental hydraulics*, Wiley, USA, pp. 329-355.
- Pappenberger, F., Beven, K., Horritt, M., and Blazkova, S. (2005). "Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations." *Journal of Hydrology*, Vol. 302, No. 1-4, pp. 46-69.
- Pappenberger, F., Beven, K. J., Frodsham, K., Romanovicz, R., Matgen, P. (2006). "Grasping the unavoidable subjectivity in calibration of flood inundation models: A Vulnerability Weighted Approach." *J. Hydrol.* Vol. 333, pp. 275-287.
- Weichel, T., Pappenberger, F., and Schulz, K. (2007). "Sensitivity and uncertainty in flood inundation modelling - Concept of an analysis framework." *Adv. Geosci.*, Vol. 11, pp. 31-36.
- Werner, M. (2004). *Spatial flood extent modelling: A Performance-based Comparison*, Ph.D Thesis, Delft University of Technology, Netherlands.