

## FOA를 이용한 홍수범람도 구축에서 불확실성 요소의 민감도 분석

정영훈\* · 박제량\*\* · 여규동\*\*\* · 이승오\*\*\*\*

Jung, Younghun\*, Park, Jeryang\*\*, Yeo, Kyu Dong\*\*\*, Lee, Seung Oh\*\*\*\*

### Sensitivity Analysis of Uncertainty Sources in Flood Inundation Mapping by using the First Order Approximation Method

#### ABSTRACT

Flood inundation map has been used as a fundamental information in flood risk management. However, there are various sources of uncertainty in flood inundation mapping, which can be another risk in preventing damage from flood. Therefore, it is necessary to remove or reduce uncertainty sources to improve the accuracy of flood inundation maps. However, the entire removal of uncertainty source may be impossible and inefficient due to limitations of knowledge and finance. Sensitivity analysis of uncertainty sources allows an efficient flood risk management by considering various conditions in flood inundation mapping because an uncertainty source under different conditions may propagate in different ways. The objectives of this study are (1) to perform sensitivity analysis of uncertainty sources by different conditions on flood inundation map using the FOA method and (2) to find a major contributor to a propagated uncertainty in the flood inundation map in Flatrock at Columbus, U.S.A. Result of this study illustrates that an uncertainty in a variable is differently propagated to flood inundation map by combination with other uncertainty sources. Moreover, elevation error was found to be the most sensitive to uncertainty in the flood inundation map of the study reach.

**Key words :** Sensitivity analysis, FOA method, Flood inundation map, Uncertainty propagation, Flood risk management

#### 초 록

홍수위험관리에서 홍수범람도는 가장 기본적인 자료로 사용되고 있다. 그러나 홍수범람도 구축과정에서 다양한 형태로 불확실성이 발생하기 때문에 이는 정확한 홍수 방재계획 수립에 걸림돌로 작용할 수 있다. 그러므로 불확실성 요소를 제거하거나 개선하여 홍수범람도의 정확성을 향상시키는 것이 필요하나, 모든 불확실성을 완벽하게 제거하는 것은 경제적 타당성과 홍수에 대한 지식의 한계 때문에 불가능하며 매우 비효율적일 수 있다. 또한, 홍수범람도에 전달되는 불확실성 요소의 영향은 다른 환경변수에 따라 다를 수 있기 때문에 다양한 주변 환경의 조건을 고려한 불확실성 요소에 대한 민감도 분석이 필요하다. 이를 통하여 제거해야하거나 개선시켜야할 불확실성 요소의 우선순위를 정함으로써 전략적이면서도 효율적인 홍수위험관리를 유도할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구는 주변 환경의 조건에 따라 홍수범람도에 미치는 불확실성 요소의 민감도를 FOA방법을 이용하여 분석하고, 이를 미국 Indiana주 Columbus시 근처의 Flatrock 강에 적용하여 홍수범람도에 가장 큰 불확실성을 전달하는 요소를 선별하였다. 본 연구결과는 하나의 불확실성 요소가 다른 입력변수나 매개변수와 같은 주변 환경에 의해 홍수범람도에 다르게 영향을 준다는 것을 확인하였으며 또한, 대상구역의 홍수범람도 구축과정에서 가장 큰 불확실성 요소는 지형자료로 판명되었다.

**검색어 :** 민감도 분석, FOA 방법, 홍수범람도, 불확실성 전파, 홍수위험관리

\* 인하대학교 수자원시스템연구소 연구교수, 공학박사 (jung.younghun@gmail.com)

\*\* 홍익대학교 토목공학과 조교수, 공학박사 (jeryang@hongik.ac.kr)

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

\*\*\*\* 정희원·교신저자·홍익대학교 토목공학과 조교수, 공학박사 (Corresponding Author·Hongik University·seungho.lee@hongik.ac.kr)

Received July 17, 2013/ revised August 16, 2013/ accepted August 21, 2013

## 1. 서론

최근 기후변화와 도시화 등으로 인하여 세계 많은 곳에서 홍수의 강도와 횡수에 대한 추세가 변하고 있는 지역이 늘고 있다(Milly et al., 2002; Villarini et al., 2009). 이에 따라 홍수위험에 대한 인식과 관심이 높아지고, 홍수위험관리의 중요성이 강조되고 있다. 홍수위험관리는 일반적으로 설계홍수량에 대한 홍수범람 지역 및 범위의 예측을 통해 이루어진다. 예를 들어, 미국에서는 FEMA (Federal Emergency Management Agency)가 주도적으로 미국 전역의 홍수보험을 포함한 종합적 홍수위험관리를 하고 있는데 이는 100년 빈도의 홍수사상에 대한 홍수범람예측에 근거하고 있다. 그러나, 이러한 예측 결과의 정확도는 목표 지역의 수요에 따라 크게 달라지며, 세부 조사결과 역시 제한된 자원 및 재정에 따라 불확실성이 항상 존재하게 된다(Merwarde et al., 2008). 따라서, 주요 홍수사상에 대한 인적 및 경제적 손실을 방지하기 위한 홍수 범람도와 같은 홍수예측의 정확성을 개선하는 것은 아직까지도 홍수 위험관리에서 주요한 과제로 남아있다.

홍수예측에 있어서 불확실성을 증가시키는 요인들이 많은 연구에서 소개되어 왔지만 제한된 재정과 홍수특성에 대한 지식의 부족으로 이러한 불확실성을 완벽하게 제거하는 것은 현실적으로 불가능하다. 그러나 이러한 불확실성을 최소화하여 홍수예측의 정확성을 높이고자 하는 노력은 지속적으로 진행되어 왔다(Merwade et al., 2008; Bale, 2009). 여러 불확실성 인자들 중 특히 조도계수, 유량, 지형자료 등은 홍수모델링에서 발생할 수 있는 불확실성에 대한 주요 인자들로 인식되어 왔다(Aronica et al., 2002; Hershey, 2002; Bates et al., 2004; Hine and Hall, 2006; Weichel, 2007; Purvis et al., 2008). 유량자료는 일반적으로 측정된 수위자료를 수위-유량관계식에서 대입하면서 산정되는데, 그 수위-유량 관계식은 보통 100년 빈도 미만의 유량 및 수위자료를 기반으로 도출된다. 그러므로 낮은 빈도의 유량일수록 그 불확실성은 더 커지며, 이는 홍수 예측의 산출물인 홍수범람도에 전달되게 된다. 조도계수는 물의 흐름이 있는 경계면의 형태 및 성질에 따라 정량적으로 정의내리기 어려워 수리모형에서 보정할 수 있는 매개변수로 인식되어 왔다(Pilotti et al., 2011). 그러므로 조도계수의 불명확한 값은 불확실성의 한 요소가 된다. 또한, 수리모형에서 수위 및 물의 흐름방향에 영향을 미치는 수치지도는 조사방법 및 구축과정에서 수평 및 수직 오차가 발생한다. 이러한 오차들은 수리모형을 이용한 수치모의를 위해 구축되는 횡단면도와 수심측량 뿐만 아니라 수면 고로부터 지형고를 감함으로써 생성되는 홍수범람도에서도 불확실성의 요소로 작용한다(Vazquez et al., 2002; Bates et al., 2003; Omer et al., 2003; Wang and Zheng, 2005).

홍수범람도의 정확성을 개선하기 위해 홍수범람도 구축과정에서

서 발생하는 불확실성을 분석하는 많은 연구들이 진행되고 있다 (Jung and Merwade, 2012; Romanowicz et al., 2012). 또한 이러한 과정에서 하나의 불확실성 요소가 다른 입력변수나 매개변수와 같은 주변 환경에 의해서도 영향을 받을 수 있다. 예를 들어, 조도계수의 오차가 유량조건이 고유량일 경우와 저유량일 경우 홍수범람도에 전달되는 불확실성의 크기는 다를 것이다(Merwade et al., 2008). 따라서 이러한 주변 환경의 조건을 고려한 각각의 입력변수 및 매개변수에 대한 민감도 분석은 제한된 자원과 재정하에서 어떤 불확실성 요소를 우선적으로 감소시켜야 하는지에 대한 정보를 제공함으로써 전략적, 경제적으로 홍수위험관리를 가능하게 할 것으로 판단된다.

본 연구의 목적은 1) 홍수범람도 구축과정에서 서로 다른 불확실성을 가지는 주변 변수들의 조건의 조합에 따르는 각각의 대상변수들의 불확실성 전달비(uncertainty propagation rate; UPR)를 산정하여 First-order approximation (FOA) 방법을 이용한 민감도 분석을 수행하고; 2) 민감도 분석을 기반으로 대상구역의 홍수범람도의 주 불확실성 요소를 선별하는 것이다. 이를 위해 미국 Indiana 주 Columbus시 Flatrock 강(Flatrock 하도)을 사례대상지로 설정하여 유량, 조도계수, 지형자료에서의 불확실성 요소가 홍수범람도에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

## 2. 민감도 분석

### 2.1 수리모형(HEC-RAS)

FOA를 이용한 민감도 분석의 Monte Carlo 모의과정에서 무작위 변수(random variable)에 대한 홍수위를 산정하기 위해 Hydrologic Engineering Center River Analysis System (HEC-RAS) 수리모형을 사용하였다. HEC-RAS는 미공병단(United States Army Corps of Engineers; USACE)의 Hydrologic Engineering Center (HEC)에 의해서 개발되었으며, 그 적용이 비교적 간단하기 때문에 하천설계 등 다양한 분야에서 가장 많이 사용되는 수리모형 중 하나이다. HEC-RAS는 주하도와 범람원을 포함한 하천하도에 대한 정상류와 비정상류 흐름조건에 대하여 수위를 모의할 수 있는 1차원 모형이다. 만약 주어진 흐름 조건에 대하여 범람원이 저류지로서 그 기능을 한다면 다차원의 수리모형을 이용하는 것이 더 적절할 수 있으나, 본 연구에서는 홍수범람도 구축과정에서의 홍수위 모의를 수행하기 때문에 주하도와 범람원을 하나의 하도로 가정하여 HEC-RAS를 사용하였다. 이러한 가정은 주하도와 범람원에서의 물의 흐름방향이 하천의 중앙선과 평행하다는 것을 의미한다. 따라서 수치표고모델(digital elevation model; DEM)로부터 얻어진 하천 횡단면은 주하도와 범람원을 포함하며, 조도계수는 각 토지이용도에 따라 한 단면에 20개까지 설정될 수 있다.

HEC-RAS에서 수위는 연속방정식, 에너지방정식 Eq. (1), Manning 방정식 Eq. (2) 등에 의해 계산된다.

$$Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

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 위치수두,  $\alpha_1$ 과  $\alpha_2$ 는 속도가중계수,  $g$ 는 중력계수, 그리고  $h_e$ 는 에너지 손실을 나타낸다.

HEC-RAS에서 총 통수능(total conveyance,  $Q$ )은 각각의 세 부분에 대하여 Manning방정식과 연속방정식에 의하여 계산된 각 통수능의 합으로 산정된다. Eq. (2)는 SI단위의 Manning방정식을 나타낸다.

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

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

HEC-RAS에 의한 수위모의는 기하학적(geometric) 자료(예를 들면 하도 중심선, 횡단면, 횡단면 사이의 간격), 하천지형(bathymetry) 자료, 흐름조건, 조도계수, 경계조건(boundary condition) 등이 필요하다. 하도의 기하학자료와 지형자료는 지리정보시스템(geographic information system; GIS)에서 활용할 수 있는 HEC-GeoRAS를 이용하여 수치표고모델로부터 생성되었다. 본 연구에서 HEC-RAS의 하류의 경계 조건은 분류수심(normal depth)으로 설정하였다.

## 2.2 역거리 가중치 보간법

### (inverse distance weighting; IDW)

HEC-RAS에 의해 모의된 홍수위는 각 단면에 대하여 산정되며, 홍수범람면적을 산정하기 위해 각 단면에서 모의된 홍수위를 하도 전체에 대해 공간적으로 보간하는 것이 필요하다. 선형, Kriging, Natural Neighbor, Spline, Trend 등과 같은 여러 가지 보간법이 있으나 본 연구에서는 주위 지점의 홍수위를 평균하여 셀값을 추정하는 IDW를 사용하였다(Eq. (3)).

$$F(x, y) = \sum w_i \cdot f_i \quad (3)$$

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

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

여기서,  $p$ 는 지수변수로써 일반적으로 2의 값이 사용되며,  $h_i$ 는  $x, y$ 지점과  $i$  지점사이의 거리( $h_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}$ )를 나타낸다. 보간된 홍수위는 수치표고모델과 각각의 셀에 대하여 비교한 후, 지형표고보다 높은 홍수위를 선별하여 공간적 홍수범람도를 생성한다.

## 2.3 First-order approximation (FOA) 민감도 분석

홍수범람모형에서 민감도 분석은 Sobol, Kullback-Leibler entropy, Morris, PEST, RSA (regionalized sensitivity analysis), 회귀분석 등 다양한 방법이 사용되어 왔다. 이러한 다양한 민감도분석 방법 가운데, FOA는 지역적 민감도분석 방법 중 하나로써 UPR을 정량화하는데 사용되었다(Bates and Townley, 1988; Melching, 1992). Benjamin and Cornell (1970)에 의해 제안된 FOA는 결정형 모델(deterministic model)을 이용한 예측에서 다 변수에 의해 전달되는 불확실성을 정량화하는 간단한 방법으로 독립랜덤변수로 구성된 함수에 대한 모멘트 분석에 기초하며, 불확실성을 가지는 각 변수들에 의해 발생하는 모델 결과의 분산 비율을 결정할 수 있다. 이는 수문모형, 해류모형, 지하수모형, 수질모형, 홍수 위험 분석(Lei and Schilling 1994; Sitar et al. 1987; Johnson and Rinaldi 1998; Liu et al. 2001; Zhang et al. 2004; Blumberg and Georgas 2008) 등 많은 분야에서 적용되어 왔다.

FOA방법을 이용하여 UPR을 산정하기 위해서는 우선 랜덤변수  $X$ 에 대하여 종속적인 모델 결과를  $Y$ 라 한다면 확장점 (expansion point;  $x_e$ )을 추가함으로 함수적 관계는 Eq. (4)과 같이 표현할 수 있다.

$$y = f(x) = f[x_e + (x - x_e)] \quad (4)$$

위의 함수는 확장점에 대하여 Taylor의 이론에 따라 Eq. (5)와 같이 확장될 수 있다.

$$f(x) = f(x_e) + \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_e} (x - x_e) + \frac{1}{2!} \left. \frac{d^2y}{dx^2} \right|_{x=x_e} (x - x_e)^2 + \frac{1}{3!} \left. \frac{d^3y}{dx^3} \right|_{x=x_e} (x - x_e)^3 + \dots \quad (5)$$

수자원 및 환경공학 관련 적용에서 랜덤변수의 평균은 일반적으로 확장점으로 사용된다. 이와 더불어 2차 이상의 항목은 첫 항목에

비해서 매우 작다는 가정아래 일반적으로 생략한다.

$$y = f(x) \approx f(\bar{x}) + \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=\bar{x}} (x - \bar{x}) \quad (6)$$

FOA방법은 1차함수에 대하여 평균과 분산을 산정하는 일차와 2차 모멘트를 사용한다. 기대값의 성질을 사용했을 때 기대값은 Eq. (7)와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} E[Y] &= \bar{y} = E\left[f(\bar{x}) + \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=\bar{x}} (x - \bar{x})\right] \\ &= E\left[f(\bar{x}) + \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=\bar{x}} (E[x] - E[\bar{x}])\right] = f(\bar{x}) \end{aligned} \quad (7)$$

Eqs. (6)와 (7)를  $Var [y] = E [(y - \bar{y})^2]$ 의 관계식에 대입했을 때 Eq. (5)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} var[Y] &= E[(y - \bar{y})^2] \\ &= E\left[\left(f(x) + \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=\bar{x}} (x - \bar{x}) - f(\bar{x})\right)^2\right] \\ &= E\left[\left(\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=\bar{x}} (x - \bar{x})\right)^2\right] = \left(\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=\bar{x}}\right)^2 E(x - \bar{x})^2 \\ &= \left(\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=\bar{x}}\right)^2 var[X] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\therefore \sigma_y^2 = \left(\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=\bar{x}}\right)^2 \sigma_x^2 \quad (9)$$

Eq. (7)은 모델 결과(Y)의 불확실성( $\sigma_y$ ), 독립변수(X)의 불확실성( $\sigma_x$ ), 불확실성 전달비( $dy/dx$ )로 구성되어 있다.

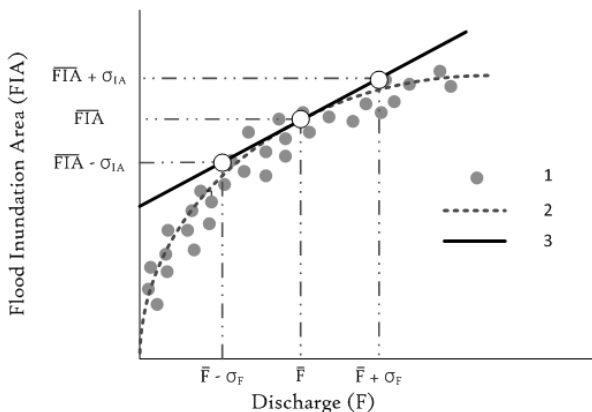


Fig. 1. Application of FOA Method to Flood Inundation Modeling

FOA의 적용은 일반적으로 독립변수들로 구성된 수학적 함수에 적용 가능하지만, 홍수모델을 수학적 함수로 표현하기는 쉽지 않다. 그 이유는 홍수모형은 수문모형, 수리모형, 지형분석 등의 여러 과정이 복합적으로 이루어져 있고, 홍수범람에 대한 지형인자와 같은 요소들의 반응을 수학적으로 표현하기 어렵기 때문이다. 그러므로 본 연구에서는 각 변수들에 대한 홍수범람면적의 회귀분석을 통하여 함수를 만든 후 FOA를 적용하여 민감도 분석을 수행하였다. Fig. 1은 홍수범람면적에 대한 불확실성 요소들의 민감도 분석에 FOA를 적용하는 과정을 나타내며 그 과정은 다음과 같다. 우선, 1) 변수에 대한 홍수범람면적의 분포를 나타내고, 2) 회귀분석을 이용한 함수의 추세선을 추가하고, 3) 그 추세선의 함수에 대하여 FOA를 적용한다.

### 3. 대상하도와 자료

본 연구의 대상하도인 Flatrock 강은 미국 Indiana 주 Henry 카운티에서 시작하여 Columbus시 근처에서 Driftwood 강과 함께 East Fork White River에 합류하기 전 약 14 km에 걸쳐 흐른다. 본 연구를 위해 선택된 Flatrock 강의 하도는 Columbus시 부근의 약 4 km의 구간이며, 홍수위 모의를 위해서 구축된 횡단면은 11 개이고, 횡단면 사이의 평균 간격은 약 350 m이다. 또한, 횡단면의 평균길이는 약 3 km로 비교적 넓은 범람원을 포함하고 있다(Fig. 2).

본 연구에서 홍수위를 산정하기 위하여 HEC-RAS의 횡단면 자료는 미국지질조사국(United States Geological Survey; USGS)에서 제공하는 3 m 해상도의 NED (National Elevation Dataset) DEM (Fig. 2b))으로부터 구축되었다. DEM의 수평 및 수직 오차는 홍수범람도 구축에서 발생하는 불확실성의 결정적 요인이 된다. 이러한 DEM의 수평 및 수직 오차는 서로 상관관계가 있으며, 일반적으로 해상도가 낮을수록 수평 및 수직 오차는 커진다. Sanders (2007)는 홍수범람도 구축에 이용되는 온라인상의 DEM의 종류별 수직오차에 대한 연구를 수행하였으며, 본 연구에서 사용한 USGS에서 제공한 3 m 해상도의 NED DEM의 경우 평균 제곱근 편차(Root Mean Squared Error; RMSE)를 기본으로 한 수직 오차의 범위는 0.3~0.5 m로 제시하고 있다. 이에 따라, 본 연구에서 홍수범람면적에 대한 지형자료 오차의 민감도를 분석하기 위한 Monte Carlo (MC) 모의를 수행하는 과정에서 지형자료의 오차에 대한 무작위 변수를  $\pm 0.5$  m 범위의 정규분포에서 생성하였다.

또한, HEC-RAS의 매개변수로 사용되는 조도계수 설정을 위해 30 m 해상도의 2001 NLCD (National Land Cover Data) 토지이용도를 이용하였으며, Moore (2011)가 정리한 2001 NLCD의 분류에 따른 조도계수 값을 이용하였다(Table 1). 초기 조도계수

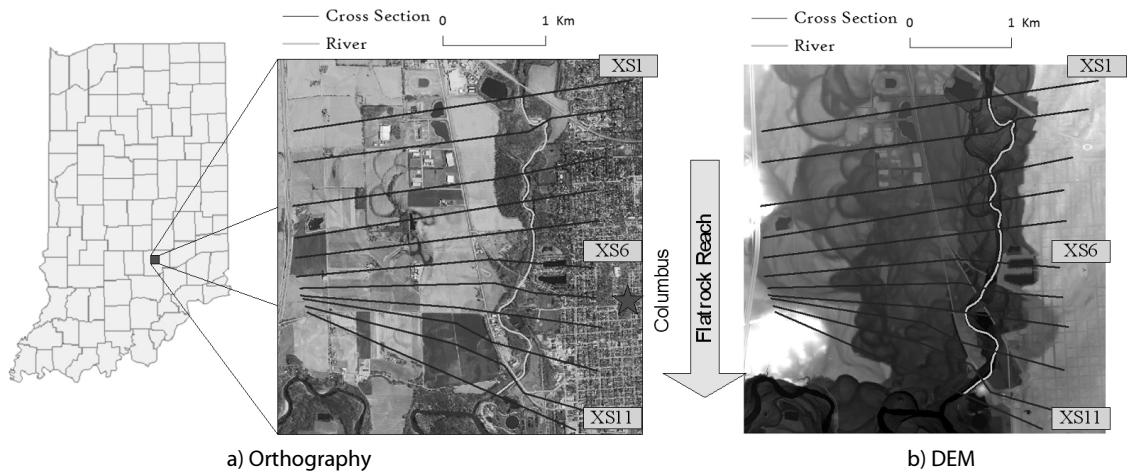


Fig. 2. Case Study Area; Flatrock River at Columbus, IN, US

Table 1. Roughness Coefficients for 2001 NLCD (Moore 2011)

2001 NLCD Classification	Roughness Coefficients			Sources
	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

값으로 각 토지이용별 대표값을 사용하였으며, 조도계수의 오차 범위는 표고가 비교적 낮은 토지이용에 대하여 Chow (1959)의 조도계수 값에서 최대 최소값에 대한 대표값의 평균차이인  $\pm 37.5\%$ 을 사용하였다. 본 연구에서 모든 조도계수의 오차는  $\pm 37.5\%$ 의 범위에서 균등(uniform) 확률밀도분포로부터 무작위로 백분율의 형태가 생성되어 초기 조도계수 값에 적용하여 HEC-RAS를 이용한 홍수위모의의 매개변수로 사용되었다(Table 2). 예를 들어, 한 단면에 세 개의 초기 조도계수 값이 0.3, 0.5, 0.4로 할당되고 무작위 변수가 + 0.2로 생성되었다면, 조도계수는 0.36, 0.6, 0.48로 갱신되어 홍수위 모의를 수행하게 된다.

수리모형에 사용되는 유량조건은 일반적으로 수문모형이나 수위-유량관계식으로부터 얻는다. 수문모형으로부터 얻어지는 유량은 모형의 매개변수와 자연현상을 단순화하는 과정에서 유량산정에 있어서 불확실성이 발생한다. 반면, 수위-유량 관계식은 자료측정 과정에서의 오차나 이력현상(hysteresis)으로부터 불확실성이 발생한다. 본 연구에서 유량조건을 선정하기 위해 사용된 수위-유량 관계식은 USGS Columbus지점의 유량관측소에서 제공하는 41개의 짝을 이루는 침투 유량과 침투 수위자료를 이용하였다(Fig. 3). 본 연구에서 사용된 관측 홍수는 2008년 6월 7일에 발생한 미국 인디애나주 남부지방에 큰 피해를 입혔던 100년 빈도보다

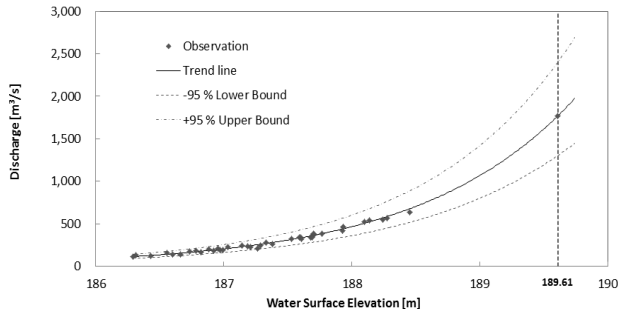


Fig. 3. Stage-Discharge Rating Curve at USGS Flatrock Gauge Station

큰 규모의 홍수사상이다. 홍수량은 1,769 m<sup>3</sup>/s이며 이때의 홍수위는 189.61 m이다. 흐름조건에 대한 t-test로 검증된 ±95 %에 의해 결정되었기 때문에 흐름조건의 오차는 ±95 %에 해당되는 범위에서 t-분포로부터 무작위로 선택되어 HEC-RAS의 흐름조건으로 사용되었다.

#### 4. Monte Carlo 모의

민감도 분석을 위한 Monte Carlo 모의는 HEC-RAS모형에 들어갈 입력변수에 대한 무작위 변수를 생성해야 하며, 이를 위하여

각 입력 범위와 확률분포를 설정하여야 한다. 앞에서 언급했듯이, 본 연구에서 민감도 분석은 세 개의 변수(조도계수, 유량, 지형자료)들에 대하여 수행되었으며, 무작위 변수를 위한 조건은 Table 2에 정리하였다. 또한, 본 연구는 한 변수(대상변수)의 오차가 일정하더라도 다른 변수(조건변수)들의 오차와 결합되어 홍수범람도에 그 오차가 전달되었을 때 다른 변수들의 조건에 따라 대상변수로부터 홍수범람도에 전달되는 불확실성의 양의 변화를 산정하기 위해 Table 3과 같은 시나리오를 만들어 Monte Carlo 모의를 수행하였다. 또한, 변수들의 단위가 모두 다르기 때문에 변수들에 의해 홍수 범람도에 전달되는 불확실성을 직접적으로 비교 분석하는데 어려움이 있다. 그러므로 변수들의 오차 범위를 -0.5부터 +0.5까지 무차원 단위로 변환하여 UPR을 산정하여 변수들의 오차에 의해 전달된 불확실성을 정량적으로 비교분석하였다.

#### 5. 결과 및 고찰

홍수 모델링과정에서 불확실성의 주 요인인 조도계수, 유량, 지형자료 등 세 개의 변수에 대하여 민감도 분석을 수행하였다. 특히 민감도 분석 과정에서 세 개의 변수 가운데 하나는 대상 변수가 되고 나머지 두 개의 변수들은 대상변수의 오차가 홍수 범람도에 전달되는 과정에서 주어진 조건을 결정하는 조건변수로

Table 2. Conditions for Random Generation of Target Variables

Initial (variables)	Target Variables estimated by random variable (RV)	Min	Max	Probability Type
N <sub>i</sub> roughness	$N = N_i(1 + RV)$	-0.375	0.375	Uniform
F <sub>i</sub> Discharge	$F = \text{Exp}(a + 1.82 \times b)$ [m <sup>3</sup> /s] $a = 2.351 + 0.0594 \times RV$ $b = 0.830 + 0.0149 \times RV$	-2.02	2.02	T-distribution
E <sub>i</sub> Topography	$E = E_i + RV$ [m]	-0.5	0.5	Uniform

Table 3. Conditions of Model Variables in Application of the FOA Method

Cases	Target variable: N		Cases	Target variable: F		Cases	Target variable: E	
	Conditional Variables (CV)			Conditional Variables (CV)			Conditional Variables (CV)	
	F	E		N	E		F	N
N1	Min	Min	F1	Min	Min	E1	Min	Min
N2	Min	Mean	F2	Min	Mean	E2	Min	Mean
N3	Min	Max	F3	Min	Max	E3	Min	Max
N4	Mean	Min	F4	Mean	Min	E4	Mean	Min
N5	Mean	Mean	F5	Mean	Mean	E5	Mean	Mean
N6	Mean	Max	F6	Mean	Max	E6	Mean	Max
N7	Max	Min	F7	Max	Min	E7	Max	Min
N8	Max	Mean	F8	Max	Mean	E8	Max	Mean
N9	Max	Max	F9	Max	Max	E9	Max	Max

고려되었다. Fig. (4)은 시나리오별 각 변수의 오차에 대한 홍수범람 면적의 변화의 변화를 보여준다. 유량의 경우 오차가 증가할수록 홍수범람면적은 전체적으로 선형적인 증가추세를 보이며, 조도계수와 유량의 경우 조건변수들이 작은 값을 가질 때는 홍수범람면적은 비선형적으로 증가하지만 조건변수들이 큰 값을 가질수록 선형적인 증가추세를 보였다. 이에 대해서 각각 회귀분석을 통하여 추세선에 대한 함수를 구축하였고, 모든 추세선에 대한 상관계수는 0.99 이상이었다. 각 대상변수별 조건변수의 전체 오차범위를 고려했을

때 유량의 오차로 인하여 발생하는 홍수 범람면적의 범위는 1.687~5.385 km<sup>2</sup> 이며, 조도계수의 경우는 1.684~5.394 km<sup>2</sup> 로 산정되었다. 또한, 지형자료에 대해서 전달된 불확실성의 범위는 1.778~5.368 km<sup>2</sup> 으로 산정되었다. 이러한 결과로부터 조건변수의 전체 오차범위에 대하여 조도계수가 약 3.71 km<sup>2</sup>의 가장 큰 불확실성을 전달 시켰으며, 지형자료가 3.59 km<sup>2</sup>의 가장 작은 불확실성을 전달시켰다. 그러나 그 차이가 매우 적어 조건변수들의 전체 오차범위에 대한 세 변수들의 오차들은 거의 비슷한 불확실성을 홍수범람면적에 전달하는 것으로 나타났다. 조건변수의 전체오차에 대한 결과와는 다르게 시나리오에 의한 세부적인 조건변수들에 대한 각 변수들의 오차에 의해 전달된 홍수범람면적에서의 불확실성은 큰 차이점을 보였다. 예를 들어, 조도계수와 유량의 오차가 모두 최소일 때 지형자료의 오차로부터 홍수범람면적에 전달된 불확실성은 1.778~4.113 km<sup>2</sup> 로 약 2.335 km<sup>2</sup>로 가장 큰 변화를 보였다(Case E1). 반면, 조도계수의 오차가 중간값을 가지고, 지형자료의 값이 최대의 오차를 가질 때 유량의 오차는 홍수범람면적에 약 0.538 km<sup>2</sup>의 가장 작은 불확실성으로 전달되었다(Case F6).

Table 4는 FOA방법을 이용해 산정된 불확실성 전달율을 보여준다. 각 대상 변수별 무차원 단위 1에 대한 불확실성 전달율은 유량의 경우 0.475~1.570 km<sup>2</sup>, 조도계수의 경우 0.494~1.645 km<sup>2</sup>, 지형자료에 대하여 0.955~2.341 km<sup>2</sup>로 산정되었다. 본 연구에서 산정된 대상변수의 오차에 대한 불확실성 전달율은 대부분

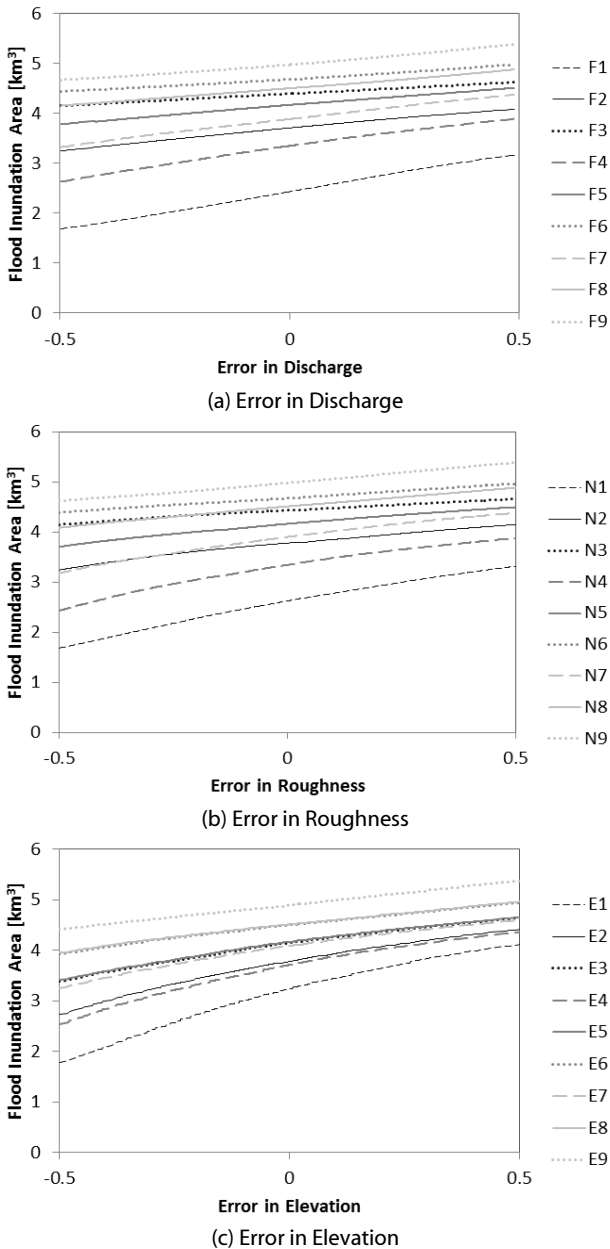


Fig. 4. Simulated Flood Inundation Area by Errors Involved in Variables

Table 4. Estimated Uncertainty Propagation Rate by using the FOA Method [km<sup>2</sup>]

a) Target variable: Discharge (F)

Case	Nmin	Nmean	Nmax
Emin	1.570	0.858	0.475
Emean	1.291	0.739	0.538
Emax	1.054	0.714	0.710

b) Target variable: Roughness (N)

Case	Fmin	Fmean	Fmax
Emin	1.645	0.861	0.494
Emean	1.408	0.774	0.570
Emax	1.184	0.788	0.782

c) Target variable: Elevation (E)

Case	Nmin	Nmean	Nmax
Fmin	2.341	1.623	1.246
Fmean	1.766	1.231	0.965
Fmax	1.301	0.958	0.955

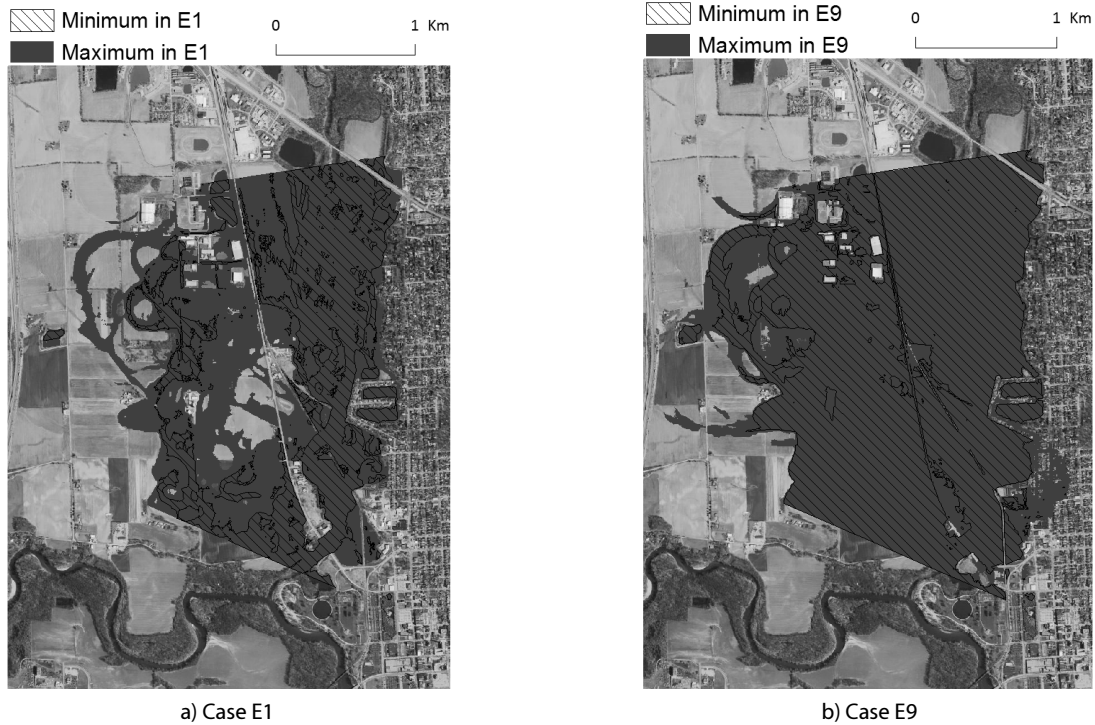


Fig. 5. Comparison of Flood Inundation Maps for Elevation Error

조건변수의 오차가 큰 값을 가질수록 작아진다. 이는 하도에서 조건변수들의 오차가 증가할 때 통수능(conveyance)이 증가하게 되고, 늘어난 통수능에서 대상변수의 일정오차는 상대적으로 적게 홍수범람면적에 전달되기 때문이다. 특히, 유량자료와 조도계수의 오차는 수리모형 내 지배방정식에 의해 홍수위로 전달되지만, 또 다른 조건변수인 지형자료의 오차는 통수능의 크기와 상관없이 직접적으로 홍수위에 전달된다. 그러나 최대의 값을 가지는 조도계수가 조건변수로 작용하고 대상변수가 유량일 때, 또 다른 조건변수인 지형자료의 값이 증가할수록 불확실성 전달율은 오히려 증가하는 모습을 보인다. 이와 비슷하게 최대의 오차를 가지는 유량이 조건변수로 작용하고 대상변수가 조도계수일 경우도 지형자료의 값이 증가할수록 불확실성 전달율이 증가한다. 이는 수리모형과 지형분석 등에 의한 복잡한 과정의 결과로 이 같은 현상에 대한 원인을 알아내기는 매우 어렵다. 그러나 이들 공통점은 두 개의 조건변수 중 하나는 지형자료이며, 나머지 하나의 조건변수는 최대 값을 가진다는 점이다. 조건 변수인 지형자료와 최대값을 가지는 또 다른 조건변수의 결합은 대상변수의 가장 작은 오차(-0.5)에서도 홍수위가 높은 비교적 규모가 큰 통수능 조건을 만들고 이로 인하여 넓은 홍수범람면적의 결과로서 조건변수의 변화에 대한 대상변수의 작은 오차(-0.5)에서 홍수범람면적의 차이를 줄여 조건변수 오차증가에 따른 대상변수의 불확실성 전달율을 높일 수 있다(예,

Fig. 4에서 Case F3, F6, F9, N3, N6, N9). 또한, 어떤 특정수위에서 갑작스럽게 홍수범람면적을 증가시킬 수 있는 지형형상 변화의 가능성으로 인해 대상변수의 불확실성 전달율을 높일 수 있다.

지형자료의 불확실성 전달율을 고려했을 때 대상변수가 다른 변수일 경우보다 전반적으로 그 민감도가 크기 때문에 본 대상 유역의 홍수범람구축과정에서 불확실성을 발생시키는 주요인은 지형자료의 오차로 판단된다. 또한, 대상변수의 같은 오차범위라도 조건변수들의 구성에 따라 홍수범람도에 전달되는 불확실성 전달율은 크게 달라질 수 있다(Table 3, Fig. 4). Fig. 5는 조건변수인 유량과 조도계수가 최소값을 가질 경우(case E1)와 최대값을 가질 경우(case E9)에서 지형자료의 오차가 전달된 홍수범람면적의 차이를 보여준다.

## 6. 결론

본 연구에서는 미국 Indiana주 Columbus 근처 Flatrock강 (Flatrock 하도)와 2008년 6월 7일에 발생한 홍수사상에 대하여 홍수범람도 구축에 있어 유량, 조도계수, 지형자료에 속해 있는 오차가 홍수 범람도에 전달하는 불확실성을 FOA 방법을 이용하여 불확실성 전달율을 산정하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.



- (1) FOA를 적용하기위해 세 개의 입력변수를 포함하는 함수를 구축하는데 어려움이 있기 때문에 각 입력변수에 대한 홍수범람면적의 함수를 회귀분석을 통하여 구축하였고, 이때 모든 함수에 대한 상관계수는 0.99 이상의 값을 보였다. 홍수범람면적에 대한 각 대상변수의 오차는 조건변수의 모든 오차범위에 대하여 매우 비슷하게 불확실성을 전달시켰다. 그러나 각 시나리오를 고려했을 때 대상변수의 오차는 조건변수의 구성에 따라 매우 다르게 홍수범람면적의 불확실성을 발생시켰으며, 조건변수들이 최소일 때 지형자료의 오차가 가장 큰 불확실성을 전달시켰다.
- (2) 본 연구를 통하여 조건변수들의 영향에 따라 대상변수의 오차가 다르게 홍수범람면적에 전달되는 것이 확인되었다. 불확실성 전달율은 대부분 조건변수들의 오차가 작을수록 증가하였으며 조건변수들의 영향에 의해 구성된 초기 통수능 크기의 영향의 크기가 클수록 대상변수의 불확실성 전달율은 작아졌다. 대상변수의 불확실성의 전달율을 비교했을 때 다른 변수들에 비해 더 큰 민감도를 가지는 지형자료가 본 연구에서 홍수범람도에 가장 많은 불확실성을 전달하는 인자로 판명되었다. 이는 불확실성 전달율만 고려했을 때 본 대상지역에서 홍수범람도의 정확성을 향상시키기 위해서 지형자료의 불확실성 요소를 개선 혹은 제거하는데 가장 큰 우선순위를 두어야 한다는 것을 의미한다.

본 연구는 홍수위험관리에서 가장 기본적으로 사용되는 홍수범람도를 구축하는 과정에서 발생할 수 있는 불확실성 가운데 유량, 조도계수, 지형자료 등에 속해있는 오차들을 고려하여 이들이 홍수범람도에 전달하는 불확실성에 대한 민감도를 FOA방법을 이용하여 분석하였다. 본 연구에서 도출된 결과는 홍수범람도 구축과정에서 불확실성의 요소를 제거하기 위한 판단을 내리는 과정에서 우선순위를 두어 효율적으로 홍수범람도의 정확도를 개선할 수 있는 근거를 제공하였다. 그러나 보다 다양한 대상구역에의 적용과 불확실성의 다른 요소들을 고려한다면 효율적 홍수위험관리에 있어 보다 유용한 자료로 사용될 수 있다고 생각된다. 추후 각 요소의 불확실성을 제거하거나 개선하는데 지불되는 비용을 산정할 수 있다면 보다 경제적인 홍수위험관리에 큰 기여를 할 것이다.

## 감사의 글

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

## References

- 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.
- Bales, J. D. and Wagner, C. R. (2009). "Sources of uncertainty in flood inundation maps." *J. Flood Risk Manage*, Vol. 2, No. 2, pp. 139-147.
- Bates, B. C. and Townley, L. R. (1988). "Nonlinear, discrete flood event models, 1. Bayesian estimation of parameters," *J. Hydrol*, Vol. 99, pp. 61-76.
- Bates, P. D., Horritt, M. S., Aronica, G. and Beven, K. J. (2004). "Bayesian updating of flood inundation likelihoods conditioned on flood extent data." *Hydrol. Process*, Vol. 18, pp. 3347-3370.
- Bates, P. D., Marks, K. J. and Horritt, M. S. (2003). "Optimal use of high-resolution topographic data in flood inundation models." *Hydrolog. Process*, Vol. 17, No. 3, pp. 537-557.
- Benjamin, J. R. and Cornell, C. A. (1970). *Probability, statistics and decision making for civil engineers*. McGraw-Hill, New York, N.Y.
- Blumberg, A. F. and Georgas, N. (2008). "Quantifying uncertainty in estuarine and coastal ocean circulation modeling." *J. Hydr. Eng*, Vol. 134, No. 4, pp. 403-415.
- Herschey, R. W. (2002). "The uncertainty in a current meter measurement." *Flow Measur Instru*, Vol. 13, pp. 281-284.
- Hine, D. J. and Hall, J. W. (2006). "Convex analysis of flood inundation model uncertainties and info-gap flood management decisions." *05, Proc. 9th Int. Symp. on Stochastic Hydraulics*, Nijmegen, Netherlands.
- Johnson, P. A. and Rinaldi, M. (1998). *Uncertainty in stream channel restoration. Uncertainty modeling and analysis in civil engineering*, B. M. Ayyub, ed., CRC Press, Boca Raton, Fla, pp. 425-437.
- Jung, Y. and Merwade, V. (2012). "Uncertainty quantification in flood inundation mapping using generalized likelihood uncertainty estimate and sensitivity analysis." *J. Hydrol. Eng*, Vol. 17, No. 4, pp. 507-520.
- Lei, J. and Schilling, W. (1994). "Parameter uncertainty propagation analysis for urban rainfall runoff modeling." *Water Science and Technology*, Vol. 29, No. 1-2, pp. 145-154.
- Liu, J., Tian, F. and Huang, Q. (2001). "A risk analyzing method for reservoir flood control." *Hydrology*, Vol. 21, No. 3, pp. 1-3.
- Melching, C. S. (1992). "An improved first-order reliability approach for assessing uncertainties in hydrologic modeling." *Journal of Hydrology*, Vol. 132, pp. 157-177.
- 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.
- Milly, P. C. D., Wetherald, R. T., Dunne, K. A. and Delworth, T. L. (2002). "Increasing risk of great floods in a changing climate." *Nature*, Vol. 415, No. 31, pp. 514-517.
- Moore, M. R. (2011). *Development of a high-resolution 1D/2D*

- coupled flood simulation of Charles city, Iowa*, Master's Thesis, University of Iowa.
- Omer, C. R., Nelson, E. J. and Zundel, A. K. (2003). "Impact of varied data resolution on hydraulic modeling and floodplain delineation." *J. Am. Water Resour. Assoc.*, Vol. 39, No. 2, pp. 467-475.
- Pilotti, M., Maranzoni, A., Tomirotti, M. and Valerio, G. (2011). "1923 Gleno dam break: Case study and numerical modeling." *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 137, No. 4, pp. 480-492.
- Purvis, M., Bates, P. D. and Hayes, C. M. (2008). "A probabilistic methodology to estimate future coastal flood risk due to sea level rise." *Coastal Eng.* Vol. 55, pp. 1062-1073.
- Romanowicz, R. J., Kiczko, A. and Osuch, M. (2012). "Influence of model reduction on uncertainty of flood inundation predictions." EGU General Assembly Conference Abstracts, Vol. 14, p. 4688.
- Sanders, B. (2007). "Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modeling." *Advances in Water Resources*, Vol. 30, No. 8, pp. 1831-1843.
- Sitar, N., Cawfield, J. D. and Der Kiureghian, A. (1987). "First-order reliability approach to stochastic analysis of subsurface flow and contaminant transport." *Water Resour. Res.*, Vol. 23, pp. 794-804.
- Vazquez, R. F., Feyen, L., Feyen, J. and Refsgaard, J. C. (2002). "Effect of grid size on effective parameters and model performance of the MIKE-SHE code." *Hydrolog. Process.*, Vol. 16, No. 2, pp. 355-372.
- Wang, Y. and Zheng, T. (2005). "Comparison of digital elevation models and understanding of their impact on the flood extent mapping on a coastal floodplain of North Carolina." *Nat. Hazards Rev.*, Vol. 6, No. 1, pp. 34-40.
- 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.
- Zhao, X., Shen, Z., Xiong, M. and Qi, J. (2011). "Key uncertainty sources analysis of water quality model using the first order error method." *Int. J. Environ. Sci. Tech.*, Vol. 8, No. 1, pp. 137-148.