

SWMM 모형 매개변수의 불확실성 정량화 지수 산정 Uncertainty Quantification Index of SWMM Model Parameters

정 건 회* / 심 규 범** / 김 응 석***

Chung, Gunhui / Sim, Kyu Bum / Kim, Eung Seok

Abstract

In the case of rapidly developed urban and industrial complex, the most area becomes impervious, which causes the increasing runoff and high probability of flooding. SWMM model has been widely used to calculate stormwater runoff in urban areas, however, the model is limited to interpreting the actual natural phenomenon. It has the uncertainty in the model structure, so it is difficult to calculate the accurate runoff from the urban basin. In this study, the model parameters were investigated and uncertainty was quantified using Uncertainty Quantification Index (UQI). As a result, pipe roughness coefficient has the largest total uncertainty and largest effect on the total runoff. Therefore, when the stormwater pipe network is designed, pipe roughness coefficient has to be calibrated accurately. The quantified uncertainty should be considered in the runoff calculation. It is recommended to understand the characteristics of each parameter for the prevention and mitigation of urban flood.

Keywords : SWMM model, parameter uncertainty, uncertainty quantification index, pipe roughness coefficient

요 지

급격히 발전하는 도시지역 및 산업단지의 경우 불투수지역이 대부분이며, 이로 인해 유출이 증가함에 따라 내수침수가 발생할 확률이 높아지고 있다. 도시지역의 유출해석은 대부분 SWMM모형을 이용하여 강우-유출해석을 수행하고 있으나 이러한 모형은 실제 자연 현상을 해석하는데 한계가 있으며, 모형 자체도 불확실성을 가지고 있어 정확한 유출해석을 하는데 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 모형의 매개변수를 조사하고 불확실성을 가지는 매개변수를 선정한 후 매개변수의 불확실성 정도를 불확실성 정량화 지수를 이용하여 정량화하였다. 수행 결과 관조도계수의 불확실성이 가장 크며, 유출량에 미치는 영향도 가장 컸다. 그러므로 우수관거 설계 시 관조도계수 추정을 보다 정확히 산정하여야 하며, 불확실성 정도를 예측하여 유출해석에 반영하고, 각 매개변수가 가지는 특성을 파악한다면 내수 침수를 예방하는데 큰 기여를 할 것으로 판단된다.

핵심용어 : SWMM 모형, 매개변수 불확실성, 불확실성 정량화 지수, 관조도계수

* 호서대학교 토목공학과 조교수 (e-mail: gunhui@hoseo.edu)

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Hoseo University.

** 선문대학교 토목공학과 박사과정 (e-mail: telstar07@sunmoon.ac.kr)

Ph.D., Candidate, Department of Civil Engineering, Sunmoon University.

*** 교신저자, 선문대학교 토목공학과 부교수 (e-mail: hydrokes@sunmoon.ac.kr, Tel: 82-41-530-2325)

Corresponding Author, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Sunmoon University.

1. 서 론

최근 이상기후로 인한 홍수가 빈번히 발생하고 있으며, 급속한 도시화 및 산업화로 유역 내 불투수 면적 비율이 증가되어 침수빈도 역시 증가하고 있다. 도시 유역의 홍수 피해 원인 중 대부분은 우수관망에서 빗물의 역류로 인해 발생하는 내수 침수인 것으로 분석되고 있으며, 특히 집중호우 및 게릴라성 폭우로 인해 내수 배제 불량이 야기하는 형태의 내수 침수가 가중되고 있는 것으로 나타났다.

도시 유역의 침수는 자연 유역에 비해 막대한 재산 및 인명 피해를 야기할 수 있기 때문에, 정확한 강우-유출 해석에 기반을 둔 홍수 저감 계획을 수행하는 것은 매우 중요하다. 그러므로 도시 유역에서의 유출 해석은 토양의 종류나 토지 피복 상태 등을 고려하여 유출을 해석하는 자연 유역과는 달리 SWMM 모형 등을 사용하여 우수관망, 우수지, 빗물펌프장 등과 같은 수공구조물을 고려하여 자세하고 정확하게 모의하는 것이 일반적이다.

모형의 유출 해석 정확성을 높이기 위해 모형에 입력되는 강우량, 우수관의 특성, 유역 특성 등의 자료가 정확히 입력되어야 하는 것이 우선 중요한 요소이며, 또한 관의 조도계수, 유출계수 등과 같은 모형의 매개변수 추정이 적절하게 이루어져야 한다. 이러한 요소를 정확하게 갖춘 모형을 적용하여 계산한 유출량은 유역 내 홍수 저감 시설의 용량을 결정하는 기준이 되며, 저류지나 빗물펌프장을 운영하는 기본 정보가 된다. 그러므로 유출량 계산의 신뢰도를 높이는 것은 도시홍수방어에 매우 중요한 목표가 된다.

그러나 강우의 발생 패턴이나 유역에서 유출 현상의 물리적인 해석이 확정적으로 설명이 가능하지 않으며, 임의의 강우사상이 발생할 때 유역의 물리적인 거동을 이해하여 실제 유출량과 같은 유출량을 계산하는 것은 쉽지 않은 일이므로, 강우-유출 모형의 매개변수가 가지는 불확실성을 분석하고, 각 매개변수들이 유출결과에 미치는 영향을 정량화 하는 것은 도시홍수방어의 기본이 된다.

그러므로 도시유역의 유출해석 시 영향을 미치는 매개변수들의 불확실성을 정량화하기 위한 연구들이 다수 수행되었다. 불확실성 분석에 관한 연구를 살펴보면 Joo and Park(2013)은 SWMM 모의 시 입력변수들의 불확실성에 따른 유출 결과를 통하여 민감도 분석을 수행하였으며, Park(2009)은 위험도 평가 시 하중과 저항 각각의 요소들의 불확실성 해석과 이에 따른 위험도-안전계수 관계를 구하는 방법을 살펴보고 이러한 기법을 시험유역의

우수관 설계에 적용하였다. Yu et al. (2011)은 강우-유출 및 강우-유사유출 모의가 가능한 분포형 강우-유사-유출 모형을 선택하고 직접산정이 불가능하거나 불확실성을 포함한 유출관련 매개변수 4개, 유사유출관련 매개변수 5개 총 9개의 매개변수를 선택하여 다중최적화 기법인 MOSCEM을 이용하여 매개변수를 동시에 보정한 경우에 대하여 Pareto 최적해를 추정하고, 이에 따른 예측결과와 불확실성을 평가하였다.

도시유출 해석 시 매개변수 별 유출량 계산에 영향을 미치는 정도를 민감도 분석의 형태로 수행한 연구들이 다수 존재한다. 도시유출모형 매개변수의 민감도 분석을 수행한 연구를 조사한 결과 Wei (2012)는 도시지역 홍수에 보를 위한 도시유출 모형의 활용방안을 알아보기 위해 대표적 도시유출 모형인 SWMM 모형을 이용하여 불투수 지역 조도계수, 투수지역 조도계수, 불투수지역 요면저류량, 투수지역 요면저류량의 4가지 항목의 민감도를 분석하였다. Park (2012)는 도시화 현상으로 인한 도시유역의 수문학적 변화로 발생하는 현황에 대하여 SWMM 모형을 이용하여 유출해석을 수행하였다. 또한 3가지 분포형을 적용시켜 유출량을 산정하고, 유출량을 토대로 매개변수에 대하여 민감도 분석을 수행하였으며 강우량, 불투수율, 불투수지역 조도계수 순으로 민감한 반응을 보였다. Kim et al. (2009)은 물리적 기반의 분포형 모형인 Vflo™ 모형의 매개변수별 민감도를 분석하기 위하여 중랑천 유역을 대상유역으로 선정하고 적용하였으며 Lee et al. (2013)은 최적화 기법을 이용하여 침수 방재효과를 최대화할 수 있는 지하저류조의 최적 설치 위치를 결정할 수 있는 알고리즘을 구성하고, 유출 및 월류량 해석에 관여하는 기본적인 매개변수들의 민감도를 분석을 수행하였다.

본 연구에서는 도시유역의 강우에 따른 유출해석에 자주 사용되는 SWMM 모형 매개변수의 불확실성 분석을 수행하고, 매개변수의 불확실성이 유출계산에 미치는 영향을 불확실성 정량화 지수를 이용하여 계산하였다.

2. 연구방법

2.1 도시유역 강우-유출모형 매개변수의 불확실성 정량화 지수

본 연구에서 다루는 불확실성(Uncertainty)이란 때로는 불확정성(indeterminacy)이라고도 이야기할 수 있으며, '정확히 알 수 없는 성질' 혹은 '확실한 결정이 어려운 성질'로 표현된다. 어떤 변수가 높은 불확실성을 가진다는 것은 발생할 수 있는 모든 경우의 확률이 동일하여 예측을

전혀 할 수 없는 상태를 의미하며, 어떤 변수에 영향을 미치는 요인들 사이의 인과관계를 예측하기 어렵다는 것을 의미하기도 한다. 혹은 어떤 변수에 대한 정보가 부정확하거나 불완전하거나, 측정할 수 없는 등의 이유로 확실하고 믿을 만한 참값에 도달하기 어려운 상태를 말하기도 한다.

수문과정에서 고려되는 불확실성은 여러 가지 형태가 존재할 수 있으나, 강우-유출 모형을 이용하여 유출해석을 수행하는 경우, 유출량의 실측치와 모의값 사이의 불일치가 다양한 종류의 불확실성에 의해 야기될 수 있다고 가정하여 적용하는 경우가 대부분이다. 이러한 불확실성은 자연에서 유출이 발생하기까지의 현상 과정에 내재하는 무작위한 시공간적 변동성에 의해 야기되는 불확실성, 강우 자료 등의 측정에 따른 부정확성과 오차, 자료 관측망의 불완전성, 자료의 처리와 전환 오차 등을 나타내는 자료의 불확실성, 강우-유출 모형이나 설계에 사용되는 매개변수의 불확실성 및 시스템의 물리적 거동이나 과정을 나타내기 위한 모형의 불완전성으로 나타나는 모형 구조의 불확실성 등으로 구분할 수 있다(Oh, 1998).

이 중 강우-유출 모형의 매개변수가 가지는 불확실성에 대한 분석은 초기에 매개변수의 민감도 분석에 의존하여 효율적이고 물리적으로 타당한 매개변수를 결정하기 위한 최적화 방법에 초점이 맞추어져 있었다. Dawdy and O'Donnell (1965)은 USGS 모형에서 8개 매개변수를 1, 5, 10% 씩 각각 변화시켜, 모형의 결과에 민감한 영향을 미치는 매개변수들이 그렇지 않은 변수들보다 참값에 더 빨리 수렴하므로 효율적이고 물리적으로 타당한 매개변수 최적화 절차를 개발하기 위하여 가장 민감한 모형 매개변수를 식별할 필요가 있다고 하였다. 또한 Roger et al. (1985)은 지표 및 지표하 흐름의 매개변수에 대한 민감도를 모형 출력의 편미분으로 정의하여 매개변수 값의 변화를 불확실성의 추정치로 나타낼 수 있다고 하였다.

모형의 매개변수의 불확정성에 의해 야기되는 오차를 표현하는 방법은 여러 가지가 있을 수 있으나, 강우-유출 모형의 매개변수가 가지는 불확실성을 분산이나 변동계수를 이용하여 추정하는 연구가 Mein and Brown (1978)에 의해 수행되었으며, Qaisi (1985)는 관측치에 대한 모형 모의값의 분산정도를 이용하여 SWMM 모형의 총 불확실성, 매개변수의 불확실성, 구조적 불확실성을 제시하였다. Qaisi (1985)는 총 불확실성(total uncertainty)을 관측값들의 평균값에 대한 모형 결과의 오차로 다음과 같이 표현하였다.

$$\text{Total Uncertainty} = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \frac{(Y_{ij}^m - Y_i)^2}{n_1 \cdot n_2} \quad (1)$$

여기서, n_1 은 측정 자료의 개수, n_2 는 모의 횟수, Y_{ij}^m 은 위치 i 에서 j 번째 모의 값, Y_i 는 위치 i 에서 관측값들의 평균을 의미한다.

매개변수 불확실성(parameter uncertainty, PU)은 모형의 모의값의 평균값에 대한 모형의 거동의 분산을 이용하여 표현하였으며, 그 식은 다음과 같다.

$$\text{Parameter Uncertainty}(PU) = \sum \sum \frac{(Y_{ij}^m - Y_i^{mb})^2}{n_1 n_2} \quad (2)$$

여기서, Y_i^{mb} 는 위치 i 의 모의값의 평균을 의미한다.

또한 마지막으로 모형구조에 의한 불확실성(structural uncertainty)은 총 불확실성과 매개변수의 불확실성의 차이로 정의하였다. 즉, 총 불확실성은 매개변수에 의한 불확실성과 모형 구조에 의한 불확실성으로 구성된다고 정의한 것이다.

$$\text{Structural Uncertainty} = \sum \frac{(Y_i^{mb} - Y_i)^2}{n_1} \quad (3)$$

본 연구에서는 매개변수의 불확실성을 분석하기 위해 Qaisi (1985)가 제안한 매개변수 불확실성으로 표현된 Eq. (2)에 적용하여 매개변수의 불확실성을 산정하였으며 이를 매개변수 불확실성(PU)로 정의 하였다. 매개변수에 의한 불확실성 분석을 위해 매개변수 변화에 따른 유역에서의 유출량의 변화를 관찰하였다.

그러나 매개변수 불확실성만을 제시할 경우, 범위가 다른 매개변수들에 의한 불확실성 값만을 이용하여 그 크기를 상대 비교하는 것이 쉽지 않으며, 매개변수 불확실성 값에 대한 의미를 부여하는 것이 쉽지 않다. 그러므로 본 연구에서는 매개변수 불확실성이 유출량의 변화에 미치는 영향을 정량화하였다. 매개변수 변화에 따른 유출량의 변동 폭을 분산으로 계산하여 유출량의 분산(Runoff Variation, RV)에 따른 매개변수의 불확실성을 불확실성 정량화 지수(Uncertainty Quantification Index, UQI)로 정의하였다.

$$\text{Uncertainty Quantification Index}(UQI) = \left| 1 - \frac{PU}{RV} \right| \quad (4)$$

불확실성 정량화 지수는 매개변수의 분산형태로 계산된 매개변수 불확실성과 유출량의 분산이 동일하면 “0”이며, 모형 매개변수의 분산에 비하여 유출량의 분산이 상대적으로 크거나 작을 경우에 “0”보다 큰 값을 가진다. 이는 측

정값의 오차나 모형구조 등 다른 요인들이 매개변수의 변화가 유출량에 미치는 영향보다 더 큰 것을 의미한다.

2.2 베타 확률밀도함수

불확정성을 가지는 도시유역 강우-유출 모형의 매개변수 값의 범위와 상대적 빈도를 추정하는 일은 매개변수 불확실성 분석에서 매우 중요한 일이다. 주어진 입력과 출력 자료를 이용하여 가장 적합한 매개변수를 추정하는 보정의 과정을 거쳐 선정된 매개변수를 기준값 혹은 편의상 기댓값이라 하면, 해당 기댓값을 가지는 매개변수의 확률밀도함수를 추정하여 무작위 추출 과정을 통해 하여 불확실성 분석을 수행한다. 이를 위해 가장 일반적으로 사용되는 확률밀도함수는 정규분포, 삼각형분포, 균등분포, 베타분포 등이 있다. 유한구간(finite interval)을 가지며 모수값에 따라 다양한 형태로 변형이 가능한 베타분포를 선정하였다.

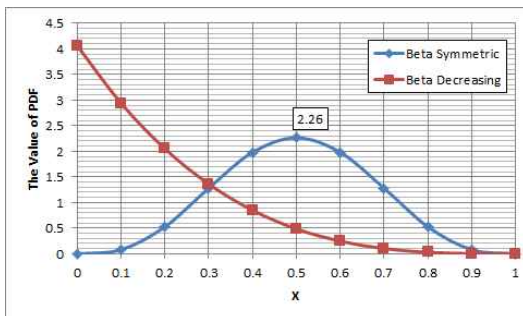
베타분포(Beta distribution)는 모수 a, b의 값에 따라 구간[0, 1]상의 연속형 확률변수의 분포를 표현하는데 사용되는 함수이며, 누적확률밀도함수식은 다음 Eq. (5)와 같다.

$$B(a, b) = \int_0^1 x^{a-1}(1-x)^{b-1} dx \quad (5)$$

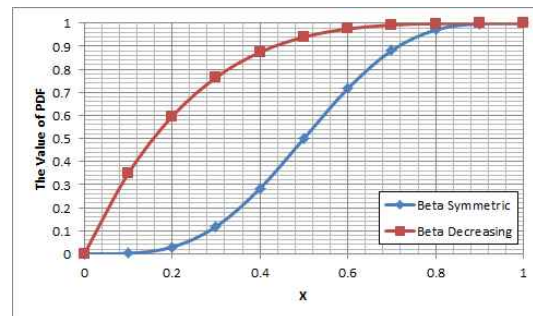
여기서, x는 확률변수이며, a, b는 모수이다. 베타확률변수 x의 확률밀도함수는 다음 Eq. (6)과 같다.

$$f(x; a, b) = \frac{1}{B(a, b)} x^{a-1}(1-x)^{b-1} \quad (0 < x < 1) \quad (6)$$

베타분포는 모수 a, b에 따라 대칭이나 감소분포의 형태로 변화된다. Fig. 1은 베타 대칭 및 감소 분포의 확률밀도함수(Fig. 1(a)), 누적확률밀도함수(Fig. 1(b))를 나타낸다.



(a) Probability Density Function



(b) Cumulative Probability Density Function

Fig. 1. Beta Symmetry and Decrease Distributions

3. 적용 및 결과

3.1 대상유역현황

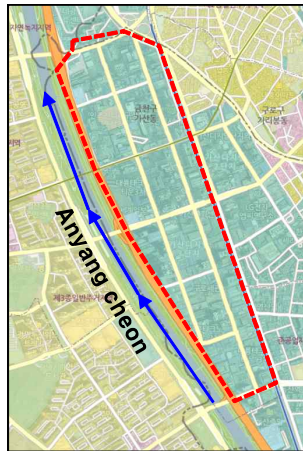
본 연구의 대상지역인 가산1 빗물펌프장 유역은 서울시 금천구 가산동에 위치하고 있으며, 0.48 km²의 유역면적을 차지하고 있다. 또한, 전체유역면적 중 공업지역이 73%로 대부분을 차지하고 있으며, 기타 상업지역 등이 27%를 차지하는 대표적인 공업지역이다. 가산1 빗물펌프장 유역도를 Fig. 2(a)와 같이 나타내었다. 본 연구에서는 SWMM 모형을 이용하여 유출해석을 수행하였다. 가산1 빗물펌프장 SWMM 모형 우수관 관망도는 Fig. 2(b)와 같으며 총 절점 개수는 유출구를 포함하여 34개, 관로는 33개로 이루어져 있다.

3.2 SWMM모형 검·보정

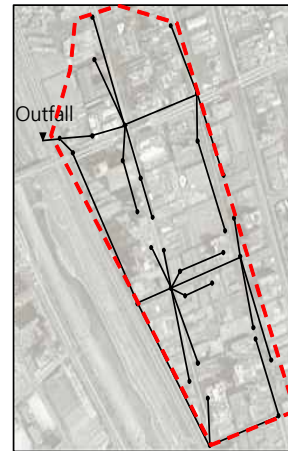
본 연구에서 구축된 SWMM 모형 매개변수 검·보정은 2009년 실제 방류된 토출량을 확보하여 Table 1과 같이 4개의 강우사상으로 수행되었다. SWMM 모형에서 검·보정에 사용된 매개변수는 유역폭, 유역의 불투수면적비, 관로의 조도계수 등이며, 실제 유입량 자료와 비교 분석하였다. Fig. 3은 4개의 강우사상을 이용하여 모형의 매개변수를 검·보정 후 비교하여 나타낸 결과이다.

3.3 불확실성 분석을 위한 매개변수 선정

도시유역의 강우-유출에 일반적으로 사용되는 SWMM 모형의 매개변수들 중 불확실성 분석에 사용될 매개변수를 선정하였다. 우선, 실무 및 연구에서 자주 사용되는 SWMM RUNOFF 블록 매개변수들을 중심으로 제4회 수공학 워크숍, “도시홍수재해관리기술연구단 보고서”, EPA User Manual (2010) 등의 보고서와 선행 연구들에 대한 문헌조사를 통해 불확실성 분석 대상 매개변수들을 조사하였다. 선행연구들 중 Joo et al. (2013)은 모형 입력자료



(a) Location of Study Catchment

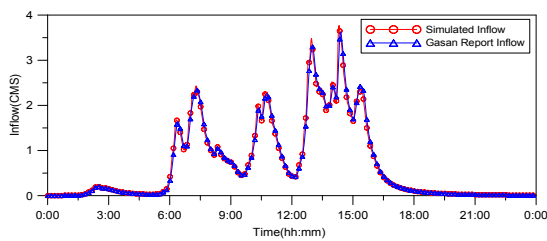


(b) Stormwater Pipe Network of Study Catchment

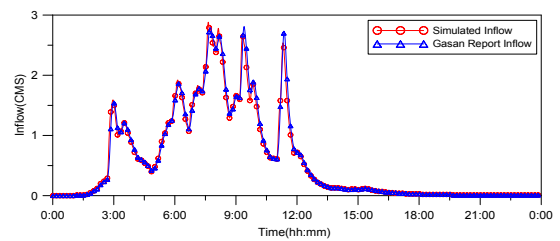
Fig. 2. Location of Gasan1 Stormwater Pumping Station

Table 1. Rainfall Events used for Parameter Calibration

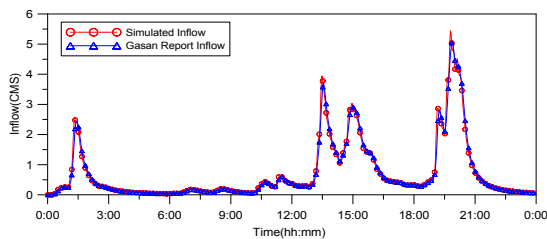
Event No	Rainfall Period	Duration	Total Rainfall Depth (mm)	Peak Rainfall Intensity (mm/hr)	Average Rainfall Intensity (mm/hr)
1	2009.07.09. 00:21 ~ 2009.07.09 15:47	15hr 26min	153.5	28.5	6.4
2	2009.07.12. 00:43 ~ 2009.07.12 14:55	14hr 12min	129.0	26.0	5.4
3	2009.07.14. 00:03 ~ 2009.07.14 20:16	20hr 13min	159.0	41.5	6.6
4	2009.08.12. 00:02 ~ 2009.08.12 14:19	14hr 17min	75.0	18.0	3.1



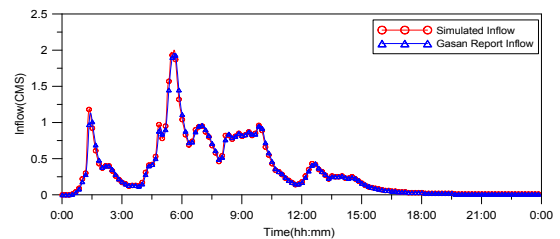
(a) Event 1



(b) Event 2



(c) Event 3



(d) Event 4

Fig. 3. Comparison of Observed and Simulated Runoff after Calibration

들이 강우-유출모형 모의를 통하여 산정된 유출량 값의 신뢰도에 영향을 미치기 때문에 불확실성 정도를 정량화하여야 한다고 주장하고, 민감도 분석 및 불확실성 분석을 통한 매개변수 우선순위를 정하였다. Park (2009)는 정확하고 안정적인 설계를 통하여 도시유출의 신뢰도를 높이고 위험도를 줄이며, 최적화되고 경제적인 설계를 위하여 확률적인 이론을 적용한 불확실성과 위험도를 평가하였다. Kim et al. (1995)은 수공구조물의 설계와 평가에서는 불확실성이 항상 포함되기 때문에 이에 따른 위험도의 산정이 반드시 필요하다고 주장하고, 서울시의 58개 배수구역의 우수관거에 대하여 신뢰도 분석기법을 적용하고, 이에 따른 위험도를 산정하여, 위험도와 안전율과의 관계를 유도하였으며, 우수관거의 설계와 평가 시 이를 활용할 수 있는 기법을 제시하였다. Jung et al. (2013)은 홍수범람도 구역에서 발생할 수 있는 불확실성 요소들 가운데 조도계수 외에, 수위-유량관계식에서 발생하는 불확실성까지 고려하여 홍수범람도에 미치는 영향을 GLUE를 이용하여 산정하였다. Koo (2005)은 군자배수구역에서 실측된 유출 및 수질자료를 사용하여 주요 수질해석 모형 PC-SWMM에 대해 GA를 통한 유출, 수질 주요매개변수의 최적화와 민감도 분석을 하여 모형의 적용성 향상에 기여하였다. Ning Sun et al. (2013)은 GLUE를 이용하여 SWMM 모형의 불확실성 평가를 수행하였다. R. A. Sharifan et al. (2010)은 SWMM 모형을 이용하여 맨홀 중심의 계산과 소유역의 침투홍수량의 민감도 분석을 하였다.

SWMM에는 총 40개의 매개변수(지하수 이동 매개변수 포함)가 사용되고 있으나, 도시유역 유출을 계산하는 RUNOFF

블록에는 총 18개의 매개변수가 사용된다(Table 2). 총 18개의 매개변수들 중 선행연구들과 보고서들의 결과를 종합하고, 유역면적이나 경사, 관로 단면 형태 등 거의 확정적으로 계산이나 결정이 가능한 매개변수들을 제외하여 최종적으로 6개의 매개변수를 불확실성 분석 대상으로 선정하였다. 선정된 매개변수는 유역폭, 불투수면적 비율(%), 투수 및 불투수유역의 조도계수, CN, 관조도계수이다.

3.4 불확실성 지수에 따른 매개변수 민감도 분석

앞서 선정된 6개의 매개변수를 베타분포의 확률밀도함수를 가진다고 가정하고 매개변수 검정에서 구해진 기댓값을 기준으로 분석 범위를 선정하였다. 유역폭, 불투수유역의 조도계수, 투수유역의 조도계수, CN은 베타대칭분포를, 관조도계수 및 불투수면적비율을 베타감소분포를 적용하였다. 민감도 분석을 위한 매개변수 분석 범위는 유출계수인 CN값은 기댓값을 중심으로 $\pm 30\%$, 그 외 5개의 매개변수들은 기댓값의 $\pm 5\%$ 범위에서 변화를 시켰으며, 기댓값은 Table 3에 나타내었다. 이 중 불투수면적비율과 관조도계수는 베타감소분포를 사용하였으므로, 기댓값을 중심으로 대칭으로 범위를 선정하지는 않았다.

선정된 6개 매개변수의 범위 및 단위가 다르기 때문에 Re-Scaling 방법을 이용한 표준화하였다. Re-Scaling 방법은 아래 식과 같다.

$$\text{Standard Index}(S) = \frac{(x - x_{\min})}{x_{\max} - x_{\min}}, (0 \leq S \leq 1) \quad (7)$$

여기서, x 는 매개변수 값, x_{\min} 는 매개변수 중 최솟값,

Table 2. SWMM Parameters and Selection in this Study

SWMM Parameters (40)		RUNOFF block Parameters (18)		Parameters selected (6)
<ul style="list-style-type: none"> · Basin slope · Basin area · Percentage of Impervious Area(%) · Roughness of pervious area · Roughness of impervious area · Basin width · Storage of pervious & impervious area · Maximum initial infiltration ratio · infiltration rate 	<ul style="list-style-type: none"> · Decay constant K · Hydraulic conductivity · Effective void ratio · Average Suction head · CN · Overland runoff · Coefficient of discharge · Pipe roughness · Pipe slope · Shape of pipe · ground water parameter(21) 	<ul style="list-style-type: none"> · Basin area · Basin width · Percentage of Impervious Area (%) · Basin slope · Roughness of pervious area · Roughness of impervious area · Storage of pervious & impervious area · Maximum initial infiltration ratio 	<ul style="list-style-type: none"> · infiltration rate · Decay constant K · Hydraulic conductivity · Effective void ratio · Average Suction head · CN · Coefficient of discharge · Pipe roughness · Pipe slope · Shape of pipe 	<ul style="list-style-type: none"> · Basin width · Percentage of Impervious Area (%) · Roughness of pervious area · Roughness of impervious area · CN · Pipe roughness

x_{max} 는 매개변수 중 최댓값을 의미한다.

각 매개변수 별 100개의 시나리오를 Monte Carlo Sampling 기법을 이용하여 추출하고, Eq. (2)을 이용하여 매개변수의 불확실성(PU)을 계산하였다(Table 4). 산정 결과 불투수면적비의 매개변수 불확실성 값은 0.080, 불투수구역의 조도계수(Roughness of impervious area)는 0.094, 투수구역의 조도계수(Roughness of pervious area)는 0.093, CN은 0.082, 관조도계수는 0.097, 유역폭은 0.085로 산정되었다. 전체적으로 관조도계수, 불투수구역과 투수구역의 조도계수 등 조도계수가 큰 불확실성을 가지는 것으로 나타났다. 이는 매개변수의 정확한 값을 결정하기 어렵다는 불확정성에 따른 불확실성이라고 생각할 때 조도계수의 정확한 값을 결정하는 것이 어렵다는 것을 의미한다.

또한 Eq. (4)에서 제안한 바와 같이 매개변수 불확실성이 유출계산으로 전파되는 정도를 계산하기 위해 매개변수 변화에 따른 총 유출량 변화를 이용하여 불확실성 정량화 지수를 계산하고(Table 4), 민감도 분석의 형태로 Fig. 4에 나타내었다. 관조도계수의 불확실성 정량화 지수값이 0.205로 가장 크게 계산되었다. 즉, 관조도계수가 변화하면 유출량의 변화를 예측하는 것이 가장 어렵다는 것을 의미한다. 반대로 CN값은 매개변수 값이 증가하면 총 유출량이 거의 같은 비율로 증가하므로 유출량 결정에 미치는 매개변수 불확실성의 영향이 가장 적다고 할 수 있다.

정량화된 값이 가지는 방향성은 민감도 분석의 형태로 Fig. 4에 나타내었다. 그 결과, 불투수면적비(Fig. 4(a)), CN(Fig. 4(d)), 유역폭(Fig. 4(f))는 매개변수 값이 증가할수록 총 유출량 또한 증가하는 것으로 나타났다. 불투수면적비와 CN값은 유역 내 침투량을 감소시켜 총 유출량을 증가시키는 경향이 있을 것으로 예상되나, 유역면적이 동일하게 유지되는 상황에서 유역폭이 증가함에 따라 총 유출량이 증가하는 것은 유역폭 결정에 주의를 요함을 의미한다. 반대로 불투수구역의 조도계수(Fig. 4(b))와 투수구역의 조도계수(Fig. 4(c)), 관조도계수(Fig. 4(e))는 매개변수 값이 증가할수록 총 유출량이 감소하였다. 조도계수 값이 증가하면 유역 내 저항이 커지므로 저류나 차단 등에 의한 손실량이 증가하여 총 유출량이 감소하는 영향이 있는 것으로 분석된다. 이것은 임의로 결정된 매개변수값의 범위에 의해 나타난 결과이지만, 일관성을 가지고 증가하거나 감소하는 경향을 보이는 것으로 보아 매개변수값의 범위를 결정함에 있어 주의가 요하기는 하지만, 그 범위가 최종 결과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

4. 결 론

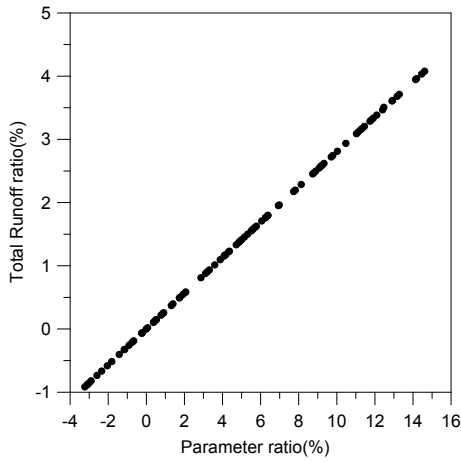
최근 이상기후 및 급속한 도시화로 인한 불투수 면적비율이 증가되면서 내수침수 피해가 급증하고 있다. 내수침

Table 3. Calibrated Parameter Values

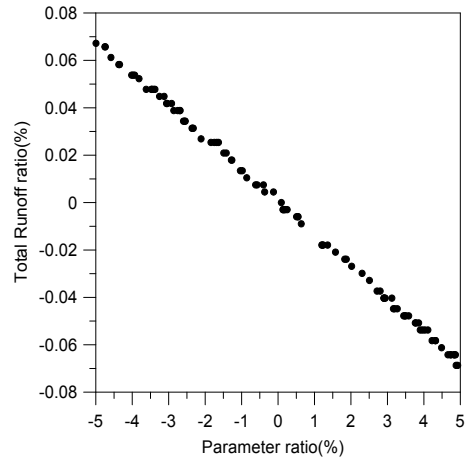
Parameter	Calibrated Value
Basin width (m)	120.9
Percentage of Impervious Area (%)	80.00
Roughness of pervious area	0.040
Roughness of impervious area	0.040
CN	75.0
Pipe roughness	0.0170

Table 4. Uncertainty Index Result of Parameters and Reservoir Characteristics

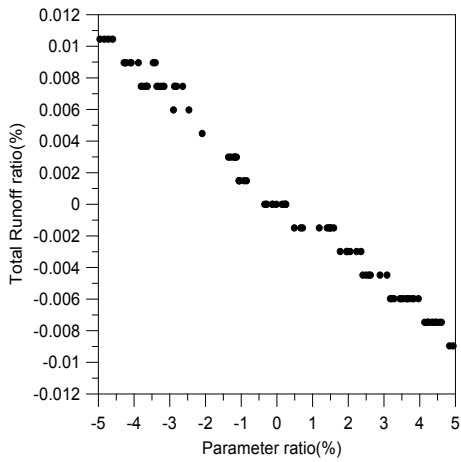
	Percentage of impervious area (%)	Roughness of impervious area	Roughness of pervious area	CN	Pipe roughness	Basin width
Parameter Uncertainty(PU)	0.080	0.094	0.093	0.082	0.097	0.085
Runoff Variation(RV)	0.078	0.093	0.092	0.082	0.122	0.086
Uncertainty Quantification Index(UQI)	0.025	0.011	0.011	0.000	0.205	0.012



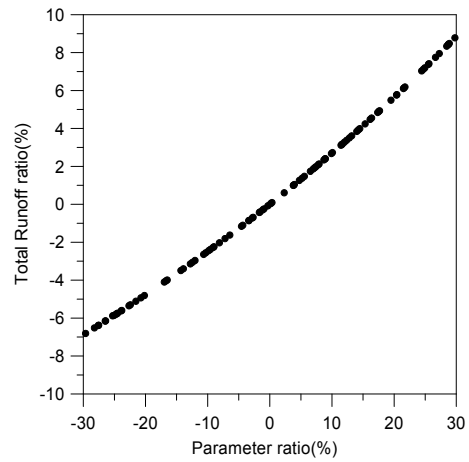
(a) Percentage of Impervious Area (%)–Total Runoff Ratio (%)



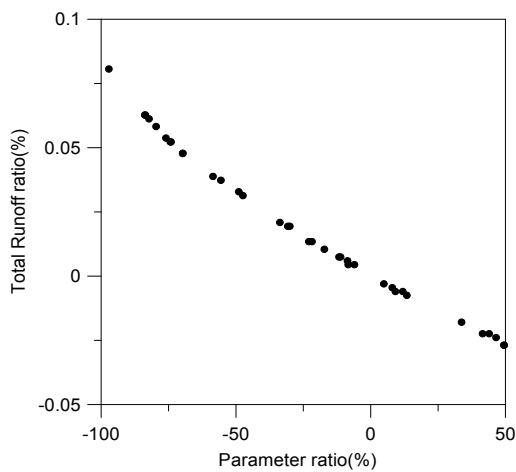
(b) Roughness of impervious area (%)–Total Runoff Ratio (%)



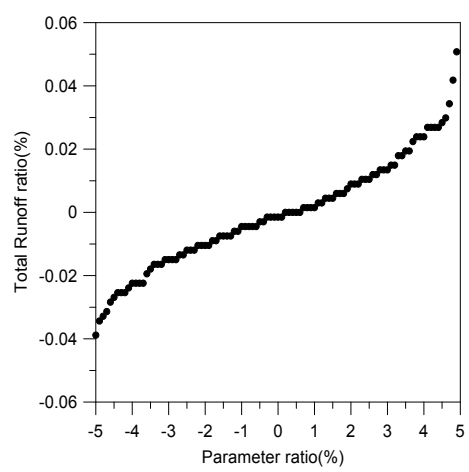
(c) Roughness of pervious area (%)–Total Runoff Ratio (%)



(d) CN Ratio (%)–Total Runoff Ratio (%)



(e) Pipe roughness Ratio (%)–Total Runoff Ratio (%)



(f) Basin Width Ratio (%)–Total Runoff Ratio (%)

Fig. 4. Comparisons of SWMM Parameters and Corresponding Total Runoff

수는 주로 내수배제의 불량으로 발생하며, 막대한 인명 및 재산피해를 야기하고 있다. 이러한 피해를 막고 효율적인 도시홍수방어시스템을 설계하기 위해서는 정확한 강우-유출 모형의 해석이 필요하지만 실제 자연 현상을 해석하는데 많은 불확실성이 존재한다. 자료 추정, 모형구조, 모형 매개변수 등 다양한 형태의 불확실성이 존재하지만, 본 연구에서는 모형의 매개변수들이 가지는 불확실성 분석을 수행하고, 불확실성 정량화 지수를 제안하였다.

도시구역의 유출해석에 사용되는 SWMM 모형의 매개변수 중 6개(유역폭, 불투수면적비율(%), 투수 및 불투수 유역 조도계수, CN, 관조도계수)를 대상으로 불확실성 분석을 수행하였다. 매개변수별 불확실성 분석을 위해 메타분포를 적용하여 Monte Carlo Sampling 기법으로 각각 100개의 자료 추출을 수행하였다. 또한 매개변수 불확실성이 유출의 변화에 미치는 영향을 분석하기 위해 불확실성 정량화 지수를 제안하고, 변화의 비율과 변화의 방향 및 경향을 계산하였다.

그 결과 투수 및 불투수유역의 조도계수와 관조도계수의 불확실성이 다른 매개변수들에 비해 크게 계산되어 조도계수 값의 결정이 어려운 것을 알 수 있었으며, 불확실성 정량화 지수를 계산한 결과 관조도계수가 가장 크고 CN값이 가장 작은 것으로 계산되었다. 계산결과, 유역폭, 불투수면적비율, CN값은 매개변수 값이 증가할수록 총 유출량도 증가하였으며, 이 중 CN값의 변화에 따른 총 유출량 증가량은 매개변수 증가량을 알면 거의 정확히 결정이 가능한 것으로 불확실성 정량화 지수가 계산되어 불확실성이 매우 낮은 것으로 나타났다. 그러나 투수 및 불투수유역 조도계수, 관조도계수는 매개변수 값이 커지면 총 유출량이 감소하는 것으로 나타났으며, 이 중 관조도계수의 변화에 따라 총 유출량의 변화를 결정하는 것이 가장 불확실한 것으로 계산되었다. 매개변수 불확실성도 관조도계수가 가장 컸으므로, 도시구역의 유출 계산에 가장 큰 불확실성을 야기하는 매개변수는 관조도계수인 것으로 나타났다. 그러므로 향후 불확실성이 큰 매개변수를 결정하는 데 보다 주의를 기울여야 할 것이며, 이를 이용하여 도시홍수저감 계획을 수립한다면, 내수 침수를 예방하는데 큰 기여를 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(13AWMP-B066744-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- Dawdy, D.R., and O'Donnell, T. (1965). "Mathematical Models of Catchment Behavior" *J. of the Hydraulic Division, Proceedings of the ASCE*, pp. 123-136.
- EPA (2010). Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0
- Joo, J.G., and Park, S.A. (2013). Uncertainty Analysis of SWMM Input Parameters, *Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 2013, No. 11, pp.517-522.
- Jung, D.H. (2011). The optimal design of water distribution systems considering uncertainties and development of hybrid harmony search using machine learning(C4.5), Korea University School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Master's thesis
- 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, *Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 3, pp. 937-945.
- Kim, B.S., Kim, B.K., and Kim, H.S. (2009). Parameter Sensitivity Analysis of VfloTM Model In Jungnang basin, *Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 6, pp. 503-512.
- Kim, M.M., Chao, W.C., and Heo, J.H. (1995). Analyses of Uncertainty and Risk-Safety Factor Curve of Storm Sewer Systems, *Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 15, No. 5, pp. 1323-1332.
- Koo, J.H. (2005). Improvement of PCSWMM Applicability for Runoff and Water Quality Analysis on Urban Drainage, Kyonggi University School of Department of Civil Engineering, Master's thesis.
- Lee, J.H., Song, Y.H., and Jo, D.J. (2013). Determination of Optimal Locastions of Urban Subsurface Storage considering SWMM Parameter Sensitivity, *Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 13, No. 4, pp. 295-301.
- Ning, Sun., Bongghi, Hong., and Myrna, Hall. (2013). Hydrological processes, Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) : Assessment of the SWMM model uncertainties within the generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) framework for a high-resolution urban sewershed

- Oh, K.C. (1998). Uncertainty analysis of rainfall-runoff model through parameter estimation, Seoul University School of Department of Civil Engineering, Ph.D. Thesis.
- Park, G.R. (2012). Sensitive Analysis of Parameters for Urban Sewer Network Using SWMM Simulation Model, Daejin University School of Department of Civil Engineering, Master's thesis.
- Park, J.A. (2009). Risk Evaluation and Uncertainty Analysis in Urban Sewer System, Daejin University School of Department of Civil Engineering, Master's thesis.
- Qaisi (1985). Uncertainty analysis of stream dissolved oxygen models. Ph.D.thesis.U. of Michigan Ann Arbor. PP. 234.
- Rogers, C.C.M., Beven, K.J.E. Morris, M., and Anderson, M.G. (1985). "Sensitivity Analysis, Calibration and Predictive Uncertainty of the Institute of Hydrology Distributed Model" *Journal of Hydrology*, Vol. 81, pp. 179-191.
- Sharifan, R.A., Roshan, A., Aflatoni, M., Jahedi, A., and Zolghadr, M. (2010). *Procedia Social and Behavioral Sciences 2 : Uncertainty and Sensitivity Analysis of SWMM Model in Computation of Manhole Water Depth and Subcatchment Peak Flood*
- Wei, S.B. (2012). Sensitivity Analysis of SWMM Model for Urban Flood Forecasting, Chonnam University School of Department of Civil Engineering, Master's thesis.
- Yu, W.S., Lee, G.H., Park, C.H., Lee, B.H., and Jung, K.S. (2011). Analysis of Rainfall-Sediment Yield-Runoff Prediction Uncertainty due to Propagation of Parameter Uncertainty, Korea Water Resources Association, pp. 282-286.

<p>paper number : 14-109 Received : 6 November 2014 Revised : 8 January 2015 Accepted : 8 January 2015</p>
