XP-SWMM을 이용한 연안 지역의 침수 모의에 관한 매개변수의 민감도 분석 및 적용 범위 검토

Sensitivity Analysis and Coverage Review of the Parameters for Inundation Simulations of Coastal Areas Using XP-SWMM

선동균* · 강태욱** · 이상호***

Sun, Dongkyun*, Kang, Taeuk**, and Lee, Sangho

Abstract

In the Republic of Korea, XP-SWMM is mainly used to analyze the causes of urban flooding, which occurs continuously, and to establish countermeasures. However, it is difficult for a model to be calibrated because most urban areas are ungauged. Therefore, many engineers use the default values provided in the user manual when using XP-SWMM. In this study, a sensitivity analysis of the four main parameters for simulating two-dimensional inundation with XP-SWMM was conducted. In addition, the proper ranges were reviewed for the parameters by comparing the archived map of the target area (Marine City in Busan) and the simulation results that were derived from parameter changes. The results of this study can be applied in the estimation of input data for various urban inundation analyses.

Key words : XP-SWMM, Inundation Simulation, Sensitivity Analysis, Parameter, Coastal Area

요 지

우리나라에서는 지속적으로 발생하는 도시지역의 침수 현상에 대한 원인 분석과 대책 수립을 위해 XP-SWMM이 주로 활용되고 있다. 하지만 대부분의 도시지역은 미계측 지역이기 때문에 모형 보정이 어렵고, 이에 많은 기술자들은 XP-SWMM의 구성 시 매뉴얼에서 제공하는 기본값을 활용하여 분석을 수행하고 있다. 이 연구에서는 XP-SWMM의 2차원 침수 해석에 필요한 4가지의 주요 매개변수에 대하여 조건수를 이용한 민감도 분석을 수행하였다. 또한, 모의 대상 지역인 부산시 마린시티 지역의 침수혼적도와 매개변수의 변화에 따른 침수 모의의 결과를 비교하여 매개변수별 적정 적용 범위를 결정하였다. 이 연구의 결과는 향후 다양한 도시 침수 해석의 입력자료 구축에 참고될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : XP-SWMM, 침수 모의, 민감도 분석, 매개변수, 연안 지역

1. 서 론

우리나라 도시의 침수 피해는 서울, 부산, 울산뿐만 아니라 전국 각 지역에서 해마다 발생하고 있다. 특히, 우리나라는 삼면이 바다인 지리적 특성과 해양 산업을 중심으로 발달된 많은 연안 도시지역이 존재한다(Kang et al., 2021). 이러한

연안 도시지역은 강우뿐만 아니라 태풍 내습 시 폭풍 해일에 의한 조위 상승과 월파로 인해 침수를 가중시키고 있다. 연안 지역의 대표적인 침수 피해 사례로서, 2003년 태풍 매미의 내습 시, 부산 연안에서 발생한 피해액은 단 12시간 내 무려 900억 원에 달한다(Song and Lee, 2015). 또한, 2016년 태풍 차바 시 부산시 해운대구의 마린시티는 강우와

*정회원, 부경대학교 방재연구소 연구원(E-mail: sundong1026@naver.com)

Member, Researcher, Disaster Prevention Research Institute, Pukyong National University

**교신저자, 정회원, 부경대학교 방재연구소 전임연구교수(Tel: +82-51-629-7720, Fax: +82-51-629-6063, E-mail: ktw62@hanmail.net)

Corresponding Author, Member, Research Professor, Disaster Prevention Research Institute, Pukyong National University

***정회원, 부경대학교 공과대학 토목공학과 교수(E-mail: peterlee@pknu.ac.kr)

Member, Professor, Department of Civil Engineering, Pukyong National University

폭풍 해일에 의한 월파가 발생함에 따라 대규모 침수를 유발하였다(Kang et al., 2019).

이러한 도시지역의 침수 발생에 대한 원인 분석과 대책을 수립하기 위해 국내외 많은 연구와 용역에서 storm water management model (SWMM)이 활용되고 있다. 특히, XP-Software사에서 개발한 XP-SWMM은 유역의 강우-유출을 모의할 수 있고, 경계조건을 고려한 우수 관망 해석 및 지표면의 2차원 침수 분석이 가능하다. 하지만 우리나라 대부분의 도시지역은 미계측 지역이고, 이에 따라 많은 연구와 용역에서 모형에 대한 별도의 검증없이 사용자 매뉴얼에서 제공하는 기본값만 활용하여 분석하고 있다. 따라서 XP-SWMM을 이용한 모형 구성 시 침수 모의 결과에 영향을 줄 수 있는 입력자료에 대한 검토와 입력자료별 적정 범위 설정에 관한 연구가 요구된다.

SWMM의 매개변수 결정 또는 민감도 분석에 관한 연구는 주로 EPA-SWMM의 자동 보정 또는 매개변수 추정에 관한 연구가 많다(Javaheri, 1998; Zaghoul and Abu Kiefa, 2001; Chae, 2004; Cho and Lee, 2006; Barco et al., 2008; Kang, 2013). EPA-SWMM은 미국 환경청(Environmental Protection Agency, EPA)의 지원 아래 개발된 SWMM으로 2차원 침수 분석에 관한 기능이 탑재되어 있지 않다. 따라서 상기의 연구들은 모두 유역의 강우-유출 현상과 우수 관거의 모의에 필요한 매개변수를 결정한 연구들이다. 한편, Temprano et al. (2006)과 Kang and Lee (2014)의 경우, EPA-SWMM의 수질 모의에 관한 매개변수를 결정하는 알고리즘을 개발한 바 있다.

XP-SWMM의 2차원 침수 모의에 관한 입력자료 결정에 관한 연구로서, Son et al. (2014)은 침수 모의 격자 크기와 모의시간 간격에 따른 침수 해석 결과의 정확도를 분석하였고, Tak et al. (2016)은 XP-SWMM에 입력되는 지표면 표고 자료의 정확도가 침수 해석에 미치는 영향을 평가하였다. 그리고 Park et al. (2017)은 XP-SWMM의 관거 구성 밀도에 따른 침수 모의 결과의 영향을 검토하여 고밀도 도심지와 저밀도 도심지에서 고려되어야 하는 적정 관망 구성 밀도를 제시한 바 있다.

상기의 연구들은 XP-SWMM의 침수 모의에 필요한 여러 가지 인자들 중 1~2개의 매개변수만을 고려하였고, 상세한 민감도 분석도 결여되어 있다. 이에 이 연구에서는 XP-SWMM의 2차원 침수 분석과 관련된 4개의 매개변수에 대하여 민감도 분석을 수행하였고, 각 매개변수의 적용 범위를 검토하였다. 민감도 분석과 매개변수별 적정 범위의 결정을 위한 침수 모의 대상 지역은 침수흔적도가 존재하는 부산시 해운대구의 마린시티 지역이다.

2. 연구 방법

2.1 XP-SWMM과 2차원 침수 모의에 관한 지배방정식

2.1.1 XP-SWMM

SWMM은 1971년 미국 환경청의 지원과 Metcalf & Eddy사 등의 공동연구로 개발된 강우-유출 및 지표면 유출 모의 모형이다(Huber and Dickinson, 1988). 한편, 미국 환경청에서 제공하는 EPA-SWMM은 프로그램뿐만 아니라 내부 엔진까지도 제공하고 있어 다양한 기관에서 해당 프로그램을 개선하여 상업적으로 이용하고 있다. 특히, 미국의 XP-Software사에서는 도시 유역의 침수 현상을 해석하기 위하여 EPA-SWMM의 엔진과 WBM Oceanics Australia 및 컨즐랜드 대학교에서 개발한 TUFLOW (Two-dimensional Unsteady FLOW)를 결합하여 XP-SWMM을 개발하였다.

2.1.2 XP-SWMM의 2차원 침수 모의에 관한 지배방정식

수심 평균 2차원 부정류 해석 모형인 TUFLOW 모형의 지배방정식은 2차원 천수방정식(shallow water equations)으로서 X, Y 방향의 연속방정식과 운동량 방정식으로 Eqs. (1)~(3)과 같다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial Hu}{\partial x} + \frac{\partial Hv}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - c_f v + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ + gu \left(\frac{n^2}{H^{4/3}} + \frac{f_1}{2g\partial x} \right) \sqrt{u^2 + v^2} - \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = F_x \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + c_f u + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ + gv \left(\frac{n^2}{H^{4/3}} + \frac{f_1}{2g\partial y} \right) \sqrt{u^2 + v^2} - \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = F_y \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, t 는 시간, x 와 y 는 각각 X, Y 방향의 거리, ζ 는 수면 높이, u 와 v 는 각각 수심 평균된 X, Y 방향의 유속 인자, H 는 수심, c_f 는 코리올리 계수(Coriolis force coefficient), n 은 조도계수, f_1 는 에너지 손실 계수, μ 는 수평 방향의 운동량 확산 계수, p 는 대기압, ρ 는 물의 밀도, F_x 와 F_y 는 각각 X, Y 방향으로 작용하는 외력의 합이다.

2.2 민감도 분석

2.2.1 민감도 분석 방법과 조건

이 연구는 2차원 침수 분석에 영향을 줄 수 있는 매개변수(parameter)의 변화에 따른 침수 모의 결과의 변화를 검토하고자 수행되었다. 이를 위해 연구에서는 민감도 분석(sensitivity analysis)을 수행하였다.

모형의 민감도 분석 방법은 매우 다양하게 존재한다. 이 연구에서는 다양한 민감도 분석 방법 중에서 가장 일반적으로 활용되는 one at a time (OAT) 방법을 이용하였다. OAT

방법은 한 번에 한 개의 매개변수를 반복적으로 변경하면서 결과의 변화를 검토하는 방법으로서, 이때 다른 모든 매개변수들은 기본값(default value)으로 고정시키는 방법이다 (Saltelli et al., 2019). 그리고 이 연구에서는 민감도 분석의 결과를 이용하여 선택된 매개변수의 민감도를 판단할 수 있는 지표로 조건수(condition number; CN_k)를 이용하였다 (Chapra, 2008). Eqs. (4)와 (5)는 조건수를 정의하는 수식을 나타낸다.

$$\frac{\Delta c}{c} = CN_k \frac{\Delta k}{k} \quad (4)$$

$$CN_k = \frac{k}{c} \frac{\Delta c}{\Delta k} \quad (5)$$

여기서, k 는 영향 인자, c 는 영향 인자에 대한 결과, CN_k 는 영향인자 k 에 대한 조건수이다. 따라서 조건수는 영향 인자 k 의 변화율에 대한 결과의 변화율을 나타내는 지표이다.

2.2.2 민감도 분석 대상 매개변수와 범위

2차원 침수 모의에 영향을 주는 인자를 선정하기 위해 TUFLOW 모형에 포함된 매개변수 가운데 XP-SWMM의 입력 자료로 활용되는 인자를 검토하였다. 그 결과, XP-SWMM의 2차원 계산 시간 간격, 지표면 조도계수, Smagorinsky 계수가 각각 TUFLOW 모형의 t , n , μ (Eqs. (1)~(3) 참조)와 관련되어 있는 것으로 판단되었다. 또한, TUFLOW 모형의 지배방정식에는 포함되어 있지 않지만, XP-SWMM의 사용자 편의 환경에서 입력되는 인자인 Wet/dry 깊이(m)도 민감도 분석 대상 매개변수로 고려하였다.

Table 1은 이 연구에서 고려한 2차원 침수 모의에 관한 민감도 분석 대상 매개변수와 분석 범위를 나타낸다. 민감도 분석 대상 매개변수별 분석 범위는 XP-SWMM 및 TUFLOW 모형의 매뉴얼 등에서 선택 가능한 범위를 고려하여 결정되었다. 또한, 민감도 분석의 기본값은 동일한 대상 유역에 대하여 침수 분석을 수행한 선행 연구인 Lee et al. (2020) 및 Kang et al. (2021)에서 활용한 값으로 하였다.

2.3 대상 유역과 침수 모의 방법

2.3.1 대상 유역

연구의 대상 유역은 Fig. 1의 부산광역시 해운대구에 위치한 마린시티이며, 마린시티는 바다 조망을 중심으로 조성된 주거지 및 상업시설 중심의 개발지역이다(Kang et al., 2021). 하지만 연안 지역에 조성된 마린시티는 완공 이후, 폭풍 해일에 의한 침수가 지속적으로 발생되고 있다. Fig. 2는 태풍 차바 내습 시, 마린시티에서 촬영된 침수 피해 영상의 일부이다. 테트라포드(tetrapod)가 마린시티 전면에 건설되어 있지만, 높은 폭풍 해일고와 범람한 해수에 의해 도로와 인접 지역이 침수된 것을 볼 수 있다.

2.3.2 연안 지역의 폭풍 해일을 고려한 침수 모의 방법

대상 유역인 부산시 마린시티에 대하여 폭풍 해일을 고려한 침수 모의를 위해 Lee et al. (2020)이 제안한 방법을 활용하였다(Fig. 3). 즉, 폭풍 해일 모형인 ADCIRC 모형과 파랑 모형인 UnSWAN이 결합된 ADCSWAN (coupled model of ADCIRC and UnSWAN)을 이용하였고, 월파랑 산정에는 FLOW-3D 모형을 이용하였다. 그리고 ADCSWAN 및 FLOW-3D 모형에 의해 산정된 조위와 월파랑을 XP-SWMM의 경계조건으로 반영하여 침수 모의를 수행하였다. 한편, XP-SWMM

Fig. 1. Marine City in Busan, the Republic of Korea

Table 1. Parameters and Exploring Range for Sensitive Analysis

Parameters	Default value (Lee et al., 2020)	Range for sensitive analysis		
		Lower boundary	Upper boundary	Reference
Manning's roughness coefficient	0.035	0.01	0.05	Crowder et al. (2006) Mays (2001)
2D calculation time step (sec)	0.5	0.1	5.0	XP Software (2005)
Smagorinsky coefficient	0.5	0	1.0	WBM Oceanics (2018)
Wet/dry depth (m)	0.002	0.0002	0.02	WBM Oceanics (2018) XP Software (2005)

(a) Wave overtopping

(b) Near shore inundation

* Photo source: <https://www.youtube.com/watch?v=V6rOgdOtWUA>

Fig. 2. Inundation of Marine City during Typhoon Chaba in 2016

Fig. 3. Connection among the Models for Inundation Analysis in Coastal Areas (Lee et al., 2020)

은 폭풍 해일에 의한 월파를 고려함과 동시에 유역의 강우-유출 및 우수 관거를 통한 1차원 흐름 해석이 수행된다. 연안 지역의 폭풍 해일을 고려한 침수 모의에 관한 구체적인 적용 방법은 선행 연구(Lee et al., 2020)를 참조할 수 있다.

3. 연구 결과

3.1 XP-SWMM을 이용한 침수 모의 모형 구축

3.1.1 배수 체계와 지형 및 격자 구성

마린시티 지역에 대한 강우-유출 모의 모형을 구축하기 위해 수치지형도와 우수 시설 계획평면도 등을 수집하였고, 현장 조사를 통해 유역의 경계와 우수 관거의 설치 현황을 분석하였다. 마린시티를 포함한 유역은 일부 나대지를 제외하면 대부분 주거 및 상업지역과 도로로 구성된 전형적인 도시지역이고, 유역 면적은 약 0.53 km²이다. 한편, 마린시티 유역의 배수 체계를 고려하여 전체 유역을 소유역 25개, 우수 관거 25개, 유출부 8개로 구분하였다(Figs. 4 and 5 참조).

XP-SWMM을 이용하여 2차원 지표면 침수 해석을 하려면 지형 자료가 필요하다. 이 연구에서는 1:5,000 수치지도와와

드론을 이용한 자체 측량한 자료를 이용하여 Fig. 4(a)와 같이 수치 지형 표고 모형(digital terrain model; DTM)을 구축하였다. Fig. 4(b)는 침수 모의 대상 영역에 대하여 구성된 2차원 모의 격자를 나타내는데, 격자의 크기는 3 × 3 m이고, 생성된 격자의 개수는 72,728개이다.

3.1.2 월파량 고려

XP-SWMM에 월파량을 고려하기 위해 실제 월파가 발생한 해운대 마린시티의 방파제를 따라 약 30 m 간격으로 32개의 절점(node)을 생성하여 월파 현상을 구현하였다(Fig. 5). Fig. 5(a)는 마린시티 지역에 대한 월파량 입력 지점을 나타낸 것으로서, 유역 경계 주변에 동일 간격으로 원으로 표시한 지점들이 해당된다. Fig. 5(b)는 XP-SWMM에 월파량 입력 지점들을 반영한 화면이다.

3.2 태풍 차바에 대한 침수 모의

3.2.1 외력 조건

2016년 태풍 차바 당시의 마린시티 유역의 침수는 10월 5일 8시~12시에 발생하였다. 해당 시간 동안 관측된 강우

(a) Digital terrain model

(b) Mesh for 2D simulation

Fig. 4. Inundation Simulation Model by XP-SWMM

(a) Location of wave overtopping

(b) Input of wave overtopping

Fig. 5. Considering Wave Overtopping on XP-SWMM

자료를 해운대 자동 기상관측소(AWS)에서 수집하였다(Fig. 6(a)). 관측된 총 강우량은 약 59.0 mm이고, 시간 최대 강우량(강우강도)은 약 40.5 mm/hr이다. Fig. 6(b)는 ADCSWAN 모형의 검증을 위해 태풍 차바에 대한 조위 및 해일고 분석 결과를 부산 가덕도 조위관측소의 실측자료와 비교한 그림이다. 대체로 ADCSWAN 모형의 모의 결과는 실측 결과를

잘 반영하는 것으로 분석되었다. 또한, FLOW-3D 모형을 이용하여 태풍 차바 시 마린시티 전면부로 유입된 월파량을 분석하였다(Fig. 6(c)). 태풍 차바 시 총 월파량은 약 68,940 m³로 분석되었고, 최대 월파량은 9시 20분의 97.35 m³/s인 것으로 검토되었다.

(a) Five-minute rainfall data

(b) Estimation result of sea water level

(c) Estimation result of wave overtopping

Fig. 6. Rainfall Amount and Wave Overtopping in Typhoon Chaba

3.2.2 침수 모의 결과

구축된 XP-SWMM 모형과 태풍 차바 당시의 외력 조건을 고려한 침수 모의 결과는 Fig. 7과 같다. 침수 당시에 구체적으로 조사된 침수심은 없기 때문에 침수 모의의 정확도를

정밀하게 판단할 수는 없다. 다만, 당시에 촬영된 영상을 통해 침수 모의된 결과가 실제 침수 현상을 적절히 구현하고 있음을 확인할 수 있다. 참고로 해당 모의 결과는 Lee et al. (2020) 연구에서도 제시된 바 있다.

Fig. 7. Result of Inundation Simulation in Marine City during Typhoon Chaba (Lee et al., 2020)

Table 2. The Analysis Results of Condition Number (CN_k) for Parameters

Classification	Manning's roughness coefficient		2D calculation time step		Smagorinsky coefficient		Wet/dry depth	
	Value (-)	Inundation area (km ²)	Value (sec)	Inundation area (km ²)	Value (-)	Inundation area (km ²)	Value (m)	Inundation area (km ²)
Default Lee et al. (2020)	0.035	0.0348	0.5	0.0348	0.5	0.0348	0.002	0.0348
Lower boundary	0.01	0.0372	0.1	0.0348	0	0.0345	0.0002	0.0346
Upper boundary	0.05	0.0340	5.0	0.0412	1.0	0.0356	0.02	0.0367
The others	0.015	0.0365	1.0	0.0348	0.1	0.0343	0.001	0.0347
	0.025	0.0358	2.0	0.0342	0.3	0.0344	0.005	0.0351
	0.04	0.0345	3.0	0.0367	0.7	0.0343	0.007	0.0355
	0.045	0.0341	4.0	0.0393	0.9	0.0356	0.01	0.0358
CN_k	0.0805		0.0189		0.0158		0.0061	

3.3 매개변수별 침수 면적의 민감도 분석

2.2절에서 제시한 2차원 침수 모의에 관한 영향 인자인 4개의 매개변수(k)에 대하여 민감도 분석을 수행하였다. 매개변수의 변화에 따른 결과(c)는 침수 면적으로 설정하였다. 즉, 영향 인자의 변화율 대비 분석된 침수 면적의 변화율을 조건수(CN_k)로 고려하였다.

민감도 분석의 기본값은 Fig 7의 침수 모의 결과를 도출한 매개변수로서 이는 Lee et al. (2020)에서 분석한 매개변수 (Table 1의 default value)에 해당된다. 그리고 매개변수별

상한값과 하한값의 적용에 따른 침수 면적의 변화를 분석하여 조건수를 분석하였다(Table 2). 그 결과, 상대적으로 지표면 조도계수의 민감도가 가장 크게 나타났다. 따라서 침수 모의 시 지표면 조도계수의 적절한 추정이 상대적으로 중요한 것으로 분석되었다.

3.4 매개변수별 적정 적용 범위 분석

4개의 매개변수별 민감도 분석 결과를 이용하여 매개변수별 적정 적용 범위를 분석하였다. 매개변수별 적정 적용

범위 분석에는 매개변수의 값에 따라 결정된 침수 면적과 침수흔적도(공공데이터포털(www.data.go.kr 제공, Fig. 8) 상의 침수 면적을 비교하여 상대오차가 5% 이내로 분석되는

Fig. 8. Archived Inundation Map on Marine City Area

값의 범위로 한정하였다.

Fig. 9는 매개변수 변화에 따른 침수 면적과 침수흔적도의 상대오차를 나타낸 그림이다. 지표면 조도계수, Smagorinsky 계수, Wet/dry 깊이의 변화에 따른 침수 면적의 상대오차는 전체 범위에서 5% 이내로 분석되었다. 이는 3.3절의 민감도 분석의 결과에서도 확인할 수 있듯이 해당 매개변수의 변화가 침수 모의 결과에 큰 영향을 주지 않기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 기본값으로 설정된 매개변수 조합(Lee et al., 2020)에 의해 침수 모의가 적절하게 이루어진 상태에서 지표면 조도계수, Smagorinsky 계수, Wet/dry 깊이의 변화는 침수 모의 결과를 바꿀 만큼 큰 영향을 주지 않음을 의미한다. 다만, 지표면 조도계수의 경우, 0.03을 사용하였을 때 침수흔적도와 의 상대오차가 가장 작은 것으로 모의되었고, Smagorinsky 계수의 경우 매뉴얼에서 제시하는 값의 범위(0.06~1.0)에 해당하는 0.9를 적용하였을 때 침수흔적도와 오차가 가장 작은 결과를 도출하였다. Wet/dry 깊이는 매뉴얼에서 제시하는 값인 0.01~0.02일 때도 상대오차가 3.5% 이내로 좋은 결과를 보였지만, 0.006~0.01을 적용했을 때 상대오차가 1% 미만으로 분석되어 더 좋은 결과를 보였다.

한편, 2차원 계산 시간 간격에 따른 민감도 분석 결과,

Fig. 9. Appropriate Range for Parameters

계산 시간 간격이 2.5초 일 때 침수혼적도와 오차가 가장 작게 모의되었으며 2차원 계산 시간 간격이 3.5초를 초과할 때부터 상대오차가 점진적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 침수혼적도와 상대오차 5% 이내에 해당하는 2차원 계산 시간 간격은 0.1~3.0초로 분석되었다.

4. 결 론

이 연구에서는 XP-SWMM의 2차원 침수 분석 시 추정이 필요한 매개변수에 대하여 조건수를 고려하여 민감도 분석을 수행하였고, 매개변수별 적정 추정 범위를 제시하였다. XP-SWMM을 이용한 2차원 침수 분석에 영향을 줄 수 있는 인자를 검토하기 위해 XP-SWMM의 2차원 모의의 근간인 TUFLOW 모형의 지배방정식과 XP-SWMM의 사용자 편의 환경을 검토하였다. 이 연구에서는 4개의 매개변수(지표면 조도계수, 2차원 계산 시간 간격, Smagorinsky 계수, Wet/dry 깊이)에 대하여 조건수를 이용하여 침수 모의의 민감도를 분석하였다.

2차원 침수 모의의 대상 지역은 태풍 차바 시 폭풍 해일에 의한 월파로 인해 침수가 발생했던 부산광역시 해운대구 마린시티 지역으로 하였다. 태풍 차바 시 폭풍 해일에 의한 조위와 월파랑 산정에는 ADCSWAN (ADCIRC와 UnSWAN) 및 FLOW-3D 모형이 이용되었다. 선행 연구인 Lee et al. (2020) 및 Kang et al. (2021)에서 분석했던 침수 모의 결과를 기준으로 매개변수별 민감도 분석을 수행한 결과, 지표면 조도계수의 민감도가 가장 크게 나타났다. 반면에 2차원 계산 시간 간격, Smagorinsky 계수, Wet/dry 깊이(m)의 경우 상대적으로 침수 모의 결과에 영향이 작은 것으로 분석되었다.

한편, 마린시티 지역의 침수혼적도를 기준으로 각각의 매개변수별 적정 적용 범위를 분석하였다. 그 결과, 지표면 조도계수, Smagorinsky 계수, Wet/dry 깊이는 모두 XP-SWMM의 사용자 매뉴얼과 기존 연구의 범위에서 적정값이 결정될 수 있는 것으로 검토되었다. XP-SWMM의 사용자 매뉴얼에서 2차원 계산 시간 간격은 격자 크기의 1/5~1/2이 적절한 것으로 제시하고 있는데, 이 연구에서는 구성한 격자 크기는 3 m이다. 이에 2차원 계산 시간 간격은 0.6~1.5초가 적당한 범위이나, 3초 이내로 분석할 경우 5% 이내의 오차가 유발되는 것으로 분석되었다. 따라서 네 개의 매개변수 모두 매뉴얼을 참고하면 침수 모형 구축 시, 적정값을 결정할 수 있다고 판단된다.

금회 연구에서는 폭풍 해일에 의한 월파가 지배적인 단일 대상지역에 대하여 분석한 결과를 토대로 연안 지역의 침수 분석 시 활용될 수 있는 매개변수의 범위를 검토하였다. 따라서 이 연구에서 분석된 결과는 지역 및 분석 방법의 특수성을 포함하기 때문에 모든 침수 분석에 일반화하여 적용되기는 어렵다. 이에 다양한 지역에 대한 침수 분석을 통한 추가적인 검증이 필요하다.

감사의 글

본 논문은 행정안전부 극한 재난대응 기반기술 개발사업의 일환인 “해안가 복합재난 위험지역 피해저감 기술개발 (연구과제번호: 2018-MOIS31-008)”의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Barco, J., Wong, K.M., and Stenstrom, M.K. (2008). Automatic calibration of the U.S. EPA SWMM model for a large urban catchment. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 134, No. 4, pp. 466-474.
- Chae, J. (2004). *Study of runoff management scheme in urbanization area using XP-SWMM*. Master of Science, Paichai University, Daejeon, Korea.
- Chapra, S.C. (2008). *Surface water-quality modeling*. Waveland press.
- Cho, J., and Lee, J. (2006). Parameter optimization for runoff calibration of SWMM. *Journal of Environmental Impact Assessment*, Vol. 15, No. 6, pp. 435- 441.
- Crowder, R., Van der Leer, D., and Kovacevic, S. (2006). *Integrated modelling of sewers, rivers and overland flows*. WaPUG Autumn Conference, Blackpool.
- Huber, W.C., and Dickinson, R.E. (1988). *Stormwater management model, version 4: user's manual Ver. 2.1*. U.S. Army Corps of Engineers.
- Javaheri, H. (1998). *Automatic calibration of urban run-off models using global optimization techniques*. Master of Science, McGill University, Montreal, Canada.
- Kang, T. (2013). *Embedding an adaptive penalty function in the SCE-UA and its application to parameter estimation of a watershed runoff simulation model*. Ph.D. dissertation, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea.
- Kang, T., and Lee, S. (2014). Development on an automatic calibration module of the SWMM for watershed runoff simulation and water quality simulation. *Journal of the Korean Water Resources Association*, Vol. 47, No. 4, pp. 343-356.
- Kang, T., Lee, S., and Sun, D. (2019). A technical review for reducing inundation damage to high-rise and underground-linked complex buildings in Coastal Areas (1): proposal for analytical method. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 19, No. 5, pp. 35-43.
- Kang, T., Sun, D., and Lee, S. (2021). Analysis on inundation

- characteristics by compound external forces in coastal areas. *Journal of the Korean Water Resources Association*, Vol. 54, No. 7, pp. 463-474.
- Lee, S., Kang, T., Sun, D., and Park, J.J. (2020). Enhancing an analysis method of compound flooding in coastal areas by linking flow simulation models of coasts and watershed. *Sustainability*, Vol. 12, No. 16, 6572.
- Mays, L.M. (2001). *Stormwater Collection Systems Design Handbook*. New York: McGraw-Hill.
- Park, J., Kang, T., and Lee, S. (2017). Evaluation of accuracy depending on pipe network density in urban flood inundation analysis using the SWMM. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 1, pp. 71-78.
- Saltelli, A., Aleksankina, K., Becker, W., Fennell, P., Ferretti, F., Holst, N., et al. (2019). Why so many published sensitivity analyses are false: A systematic review of sensitivity analysis practices. *Environmental modelling & software*, Vol. 114, pp. 29-39.
- Son, A.L., Han, K.Y., and Choi, Y.J. (2014). The Study on Inundation Analysis for Management of Emergency State in Urban Area. *2014 conference of Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association.
- Song, G.U., and Lee, C.H. (2015). *Climate change adaptation measures in Busan coastal areas*. Busan Development Institute, 2015-08-616.
- Tak, Y.H., Kim, Y.D., Kang, B., and Park, M.H. (2016). Sewer overflow simulation evaluation of urban runoff model according to detailed terrain scale. *Journal of Korea water resources Association*, Vol. 49, No. 6, pp. 519-528.
- Temprano, J., Arango, Ó., Cagiao, J., Suárez, J., and Tejero, I. (2006). Stormwater quality calibration by SWMM: A case study in Northern Spain. *Water Sa*, Vol. 32, No. 1, pp. 55-63.
- WBM Oceanics. (2018). *TUFLOW Classic/HPC User Manual*. User manual, Brisbane.
- XP Software. (2005). *XP-SWMM EXPert Stormwater and Wastewater Management Model*. Reference Manual, Canberra, Australia.
- Zaghloul, N.A., and Abu Kiefa, M.A. (2001). Neural network solution of inverse parameters used in the sensitivity-calibration analyses of the SWMM model simulations. *Advances in Engineering Software*, Vol. 32, No. 7, pp. 587-595.

Received	July 27, 2021
Revised	July 28, 2021
Accepted	August 12, 2021