

SWMM 이중배수모형(1D-1D) 기반 실시간 도시침수 예측

Real-time Prediction of Urban Inundation based on SWMM 1D-1D Model

장종경* · 박민기** · 이나은*** · 이재민**** · 양동민*****

Jang, Jong Kyung*, Park, Min Ki**, Lee, Na Eun***, Lee, Jae Min****, and Yang, Dong Min*****

Abstract

The concept of a Major/Minor system was applied to use urban flood prediction techniques, based on rainfall forecasts and real-time simulations, to reduce flood damage, by notifying a possible flood risk in advance. The SWMM one dimensional (1D)-two dimensional (2D) model has become the standard approach used in urban flood modeling, as it can realistically express the interaction between drainage networks and road surfaces. However, it is limited to the flood analysis of small areas due to its two-dimensional model characteristics, such as its long simulation time. Therefore, the SWMM 1D-1D model, which is fast enough to be applied to real-time simulations, is applied to real-time flood forecasting. To improve the accuracy of the model, SWMM 1D-1D model was calibrated using the SWMM 1D-2D model simulation results, and the SWMM 1D-1D model simulation results were extracted using the SWMM5 DLL and EXCEL VBA to analyze the flood situation. Finally, the applicability of the SWMM 1D-1D model was reviewed based on a rainfall event that occurred on 25 August 2014, assuming an hour of predicted rainfall.

Key words : SWMM5 DLL, 1D-1D Model, 1D-2D Model, Flood Prediction

요 지

침수 위험성을 사전에 알림으로써 피해를 저감할 수 있는 침수예측기법 중 예측 강우 및 실시간 모의 기반의 침수예측기법을 활용하기 위해 Major/Minor 시스템 개념을 적용하였다. 도시침수 모델링의 표준사례가 된 SWMM 1D-2D모형은 배수관망과 도로 표면의 상호작용을 더 현실적으로 표현할 수 있지만 긴 모의시간 등 2차원 모형 특성 상 소규모 지역의 원인분석에 제한적으로 사용되고 있다. 따라서 실시간 모의에 적용될 수 있을 만큼 빠르다고 입증된 SWMM 1D-1D모형을 실시간 침수예측에 적용하였다. 모형의 정확도 향상을 위해 SWMM 1D-2D모형 모의결과를 이용하여 SWMM 1D-1D모형을 검증하고 SWMM5 DLL 및 EXCEL VBA를 활용하여 SWMM 1D-1D모형 모의결과를 추출함으로써 침수상황을 분석하였다. 최종적으로 1시간 예측 강우를 가정하여 2014년 8월 25일 강우사상을 대상으로 SWMM 1D-1D모형 기반의 침수예측에 대한 적용 가능성을 검토하였다.

핵심용어 : SWMM5 DLL, 1D-1D모형, 1D-2D모형, 침수예측

*정회원, (주)하이텍스 이사(E-mail: jkcopyleft@naver.com)
Member, Director, HYDEX Co., Ltd.

**정회원, (주)하이텍스 대표이사(E-mail: coolheadmk@gmail.com)
Member, President, HYDEX Co., Ltd.

***정회원, (주)하이텍스 과장(E-mail: un6257@nate.com)
Member, Manager, HYDEX Co., Ltd.

****마인드원(주) 환경사업부 차장(E-mail: quick0321@mind-one.co.kr)
Deputy General Manager, Environmental Business Team, MIND ONE Co., Ltd.

*****교신저자, 정회원, 노아SNC(주) 대표이사(Tel: +82-2-6105-6600, Fax: +82-2-6105-6625, E-mail: ydm320@noaa.co.kr)
Corresponding Author, Member, President, NOAA SNC., Ltd.

1. 서론

최근 기후변화로 국지성 집중 호우가 빈번하게 발생함에 따라 침수피해도 증가하고 있다. 도시지역에 발생한 집중호우는 우수관거 설계빈도를 초과하는 경우가 빈번하며 우수관거 시스템이 양호한 지역에서도 큰 침수피해가 발생하고 있어 우수관거 설계빈도를 상향조정하는 추세이다. 또한 침수피해 저감을 위해 도시지역에서 침수의 위험성을 사전에 알림으로써 선제적인 대응을 도모할 수 있는 침수예측기법에 관한 연구가 진행되어 왔다.

Shin et al. (2007)은 도시 유출모형인 SWMM과 HEC-RAS 등을 연계하여 부산 온천천유역의 홍수예경보시스템구축을 시도하였으며, Jo and Jeon (2013)은 국지성 집중호우로 인한 침수위험도가 높은 소규모 도시유역에서의 침수예측을 위하여 강우량 및 지속시간으로부터 침수예측이 가능한 Flood Nomograph를 구축하여 도시 소유역에서의 홍수예방체계에의 적용성을 평가하였다. 침수예측기법의 한 방법으로 실시간 침수예측 시스템이 있으며 활용자료에 따라 강우정보와 경험적 시나리오 기반, 강우정보와 사전모의 시나리오 기반 및 실시간 모의 기반의 실시간 예측으로 분류될 수 있다. 현재 운영 중인 도시침수 예측시스템은 2002년 Asian Institute of Technology (AIT, Thailand)와 DHI가 실시한 연구 프로젝트의 일환으로 방콕에 설치된 실시간 강우량 예측과 1D-1D모형 기반의 실시간 예측시스템 및 2008년 Denmark의 Copenhagen 남서쪽에 위치한 Hvidovre에 설치된 고해상도 레이더 강우와 사전 모의결과를 활용한 예측시스템 등이 있다(Henonin et al., 2013).

국내에서는 오프라인 1D-2D모형을 이용한 침수원인분석 등에 관한 연구가 주로 진행되고 있다. Yoon et al. (2017)은 효율적으로 실제 하수 시스템 계획 및 정비에 시스템을 적용하기 위해 침수재해 방지에 대한 이중 배수 시스템을 검토하였고 Lee et al. (2014)은 침수면적과 침수심을 종합적으로 고려할 때 이중배수체계 기반의 2차원 침수해석모형을 활용하여 도시유역의 침수해석 수행 시 건물을 고려한 지형 자료를 사용하는 것이 바람직하다고 제시하였다. 침수예측에 적용되는 모형은 1D-1D모형과 1D-2D모형으로 분류될 수 있으며 국외에서는 모형을 활용한 실시간 침수예측 관련 연구가 꾸준히 진행되고 있다.

Djordjević et al. (1991)은 우수관거의 유량은 추가용량이 도로를 따라 흐르거나 맨홀 위의 가상의 공간에 저장되는 현상에 영향을 받는다는 사실을 보여주었다. Randall et al. (2017)은 8,000개 이상의 관거 및 33 km² 이상의 면적을 포함하는 4,000개 이상의 소유역으로 구성되는 대상지역에 대해 1D-1D모형을 구축하고 매개변수 선정 및 검보정 과정을 제시하였다. Allitt et al. (2009)은 1D-1D모형 시뮬레이션은 빠르고 지표면 흐름 경로를 적절하게 설명할 수 있는 한 신뢰할 수 있는 것으로 간주하였으며 이러한 접근방식은

1D-2D모형이 1D-1D모형을 개발하고 보정하는 데 도움이 될 수 있어 보완적일 수도 있다고 제시하였다. Leandro et al. (2009)은 비교 가능한 1D-1D모형 및 1D-2D모형을 개발하기 위한 방법론을 제시하여 1D-1D모형을 조정된 보정 알고리즘과 1D-2D모형 결과를 사용하여 보정하였으며 이를 통해 1D-2D모형 결과는 현장 데이터가 없을 때 더 빠른 1D-1D모형의 정확성을 개선하는 데 유용하다는 것을 입증하였다. 배수관망 영향 고려 시 1D-2D모형은 강우 배수관망과 도로 표면 사이의 상호작용을 나타내는 더 현실적인 접근방식으로 도시침수 모델링의 표준 사례가 되었지만 긴 모의 시간은 여전히 문제점으로 지적되고 있다. Henonin et al. (2013)은 1D-2D모형의 긴 모의 시간으로 인해 그 용도가 사전 시뮬레이션 시나리오에 제한된다고 언급하였고 Wolfs et al. (2018)은 긴 모의시간을 필요로 하는 1D-2D모형은 계산적으로 빠른 시뮬레이션 모형을 필요로 하는 많은 적용사례에 있어 적합하지 않다고 기술하였다.

본 연구에서는 긴 모의시간 및 상용프로그램 사용에 따른 비용/라이선스 문제와 같은 제한이 따르는 SWMM 1D-2D모형을 직접 사용하는 대신 1D-1D모형을 구축하고 정확도 향상을 위해 1D-2D모형 모의결과를 1D-1D모형 검정자료로 활용하였다. 또한, SWMM5 DLL 및 EXCEL VBA를 연계함으로써 SWMM 1D-1D모형 OUTPUT 파일로부터 지표면 도로별 침수량 및 해당 시계열을 추출하여 침수결과 분석을 간소화하였다. 최종적으로 2014년 8월 25일 강우를 대상으로 1시간 예측 강우를 가정하여 도시침수 예측에 대한 적용 가능성을 검토하였다.

2. 연구 방법

2.1 연구 대상지역

대상지역은 부산 북구 D하천 하류지역으로 집중호우 발생 시 하천 인접 지역 및 도로에 침수피해가 발생하는 저지대 지형에 해당한다. 현재 자연재해위험개선지구 정비사업을 통해 침수지역 해소를 위한 배수펌프 및 배수관로 설치 등 재해예방사업이 진행 중이다. 본 연구에서는 개선사업 이전의 관거 및 유역 자료를 기반으로 하천홍수위를 경계조건으로 적용하여 실시간 침수예측의 적용성을 검토하였다. Fig. 1은 부산 북구 D하천 하류 좌안에 위치한 대상유역을 나타내고 있다.

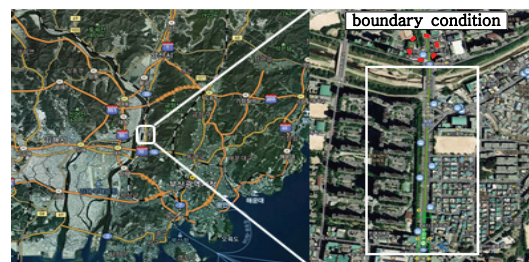


Fig. 1. Topographical Map of Study Area

2.2 Major/Minor 시스템 개요

SWMM은 단일 강우사상 및 유량과 수질의 장기 시뮬레이션에 사용되는 동적 강우량-유출 시뮬레이션 모델이다(Rossman, 2015). SWMM Major/Minor 시스템은 지표 아래 묻힌 관거 시스템을 Minor 시스템으로 구성하고 지표 위 도로를 Major 시스템으로 구성하여 두 시스템 간 유량 교환 등을 동시에 분석하는 방법이다. Minor 시스템의 설계 빈도보다 작은 소규모 강우사상의 경우 도로 위로 침수가 발생하지 않지만 국부적으로 발생하는 집중호우와 같은 대규모 강우사상 발생 시는 도로 위로 침수량이 발생하게 된다. SWMM Major/Minor 시스템은 집중호우로 인한 도로침수 등의 모의에 활용될 수 있으며 상대적으로 모의시간이 짧은 장점이 있어 예측 강우를 활용하는 실시간 침수예측 모의 등에 활용가능하다.

Table 1. Characteristics of Major System Method

Classification	Application method
Offset method	Junctions are used to connect major/minor systems. This method does not take into account energy losses through the manhole connections between the two systems.
Side outlet method	Manhole connections are modeled with side-outlet orifices.
Vertical pipe method	Manhole connections between major/minor systems are modeled with vertical pipes.

Table 1은 SWMM Major 시스템의 적용방법을 나타낸 것으로 Side-outlet 방법과 Vertical pipe 방법은 두 시스템 간 상이한 맨홀을 사용하며 각각 Side-outlet과 Vertical pipe를 이용해 두 시스템을 연결한다. 상이한 맨홀을 사용하므로 입력파일 작성 시 별도의 맨홀 생성이 필요하지만 관망도 상에서 두 시스템이 겹쳐지 않아 결과 조회 시 Offset 방법에 비해 상대적으로 편의성이 높은 장점이 있다. Offset 방법은 Major/Minor 시스템을 연결하기 위해 Junction offset을 이용하기 때문에 두 시스템 사이에 맨홀 연결로 인한 에너지 손실을 고려하지 않는다.

본 연구에서는 관망도 상에서 두 시스템이 겹쳐지는 단점이 있지만 지상과 지하의 수직관계를 실제 상황과 가장 유사하게 표현할 수 있는 Offset 방법을 적용하였다.

2.3 모형 내 Major 시스템 구축방안

대상구역의 관망자료를 기반으로 생성된 1차원 SWMM모형(Minor 시스템)을 대상으로 지표면 도로에 해당하는 Major 시스템을 추가하였다. 기존 1차원 입력파일의 [CONDUITS](관거)과 [XSECTIONS](단면)을 대상으로 Major 시스템에 해당하는 도로 형상자료를 추가하였으며 Major 시스템의 도로 형상자료 작성 시 Junction과의 Offset을 고려한 입력은 성가신 작업이 될 수 있으므로 EXCEL VBA를 활용하여 SWMM 입력 파일의 해당 SECTION에 Major 시스템을 일괄 추가하였다.

구역 내 도로 분석을 통해 도로의 형상을 2차선/4차선/6차선으로 구분하여 [TRANSECTS](불규칙단면)을 구성하였다. GIS자료를 활용하여 기본형상으로 추가된 Major 시스템 관거를 도로정보와 개별 비교함으로써 적합한 [TRANSECTS]로 재설정하였다. Major 시스템의 도로 형상에 대한 입력창에서 조도계수와 거리별 고도를 입력할 수 있으며 이를 활용하여 도로 부분에 대한 관거를 구축하였다. Fig. 2는 VBA를 이용한 일괄자료 입력 및 지표면 적용단면 작성을 포함하는 Major 시스템 적용절차이다. Fig. 3은 Major 시스템에 적용된 지표면 도로에 해당하는 적용단면을 나타낸 것으로 적용단면은 2차선, 4차선, 6차선 도로로 구성되었다.

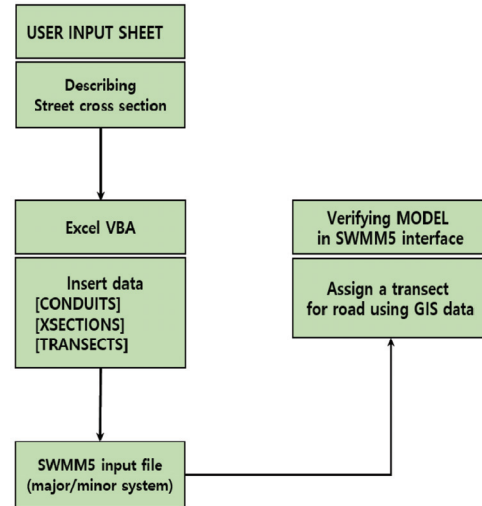


Fig. 2. Construction Process of Major System

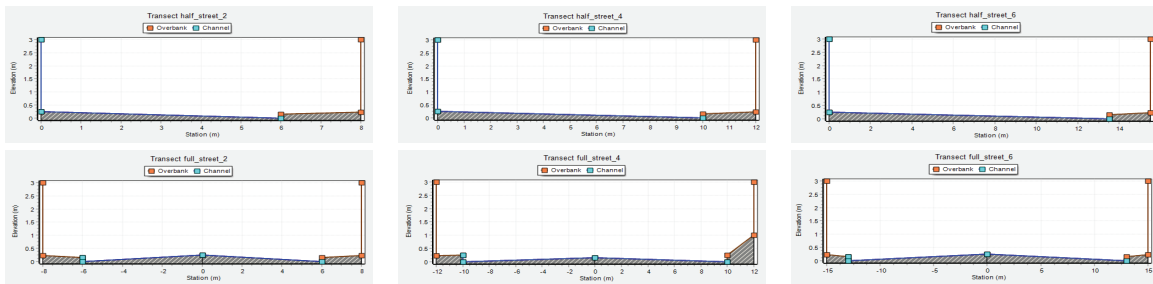


Fig. 3. Conduit Shape of Major System (surface road)

지표면 도로 형상에 대한 입력 제원은 해당구역의 도로상황을 참조하여 규모별 도로 구분을 Table 2와 같이 적용하였다.

Table 2. Road Data Applied for Major System

Classification	Road width (m)	Curb width (m)
2 lane road	12.0	2.0
4 lane road	20.0	2.0
6 lane road	27.0	2.0

2.4 모형 검정 및 결과추출 방안

2.4.1 1D-1D모형 검정 방안

Leandro et al. (2011)은 침수관련 측정자료 부족으로 인해 1D-1D모형의 검보정이 용이하지 않다는 점을 고려하여 1D-1D모형 검정에 1D-2D모형 결과를 활용하는 방안을 제시하였다. 따라서 본 연구에서도 1D-1D모형 검정을 위해 상대적으로 정확한 결과를 도출할 수 있는 1D-2D모형 결과를 관측값으로 가정하여 분석을 진행하였다. 상습 침수지역 중 저지대 중심으로 주요 지점을 선정하고 해당지점의 1D-1D모형과 1D-2D모형의 최대 침수심 결과를 비교하여 1D-1D모형에 대한 검정을 진행하였다.

재현기간(20년, 30년, 50년, 80년) 및 지속기간별(2시간, 3시간, 4시간, 6시간) 확률강우량에 대한 주요지점의 최대 침수심 자료를 추출하여 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 분석하였다.

Manning 조도계수는 출력결과에 대한 비효율성 보고(Carr and Smith, 2006; Wong and Lim, 2006) 및 모형 내 오차를 고려하기 위한 목적의 오용에 대한 경고(Wallingford Software, 2004)에도 불구하고 모형 보정을 위해 일반적으로 선택되는 매개변수이다. 1D-2D모형에 적용된 1D모형과 2D모형 조도계수 0.014와 0.02를 초기 값으로 적용하여 1D-1D모형의 Minor system (우수 관거)와 Major system (지표면 도로)에 대한 조도계수를 조정함으로써 RMSE를 검토하였다. Fig. 4는 1D-1D모형에 대한 검정 절차를 나타내고 있다.

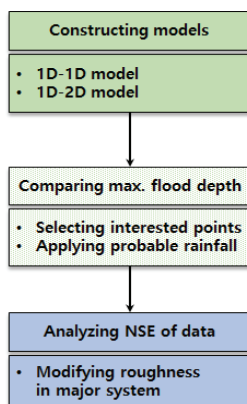


Fig. 4. Calibration Process of 1D-1D Model

2.4.2 침수량 및 침수심 산정방안

SWMM 1D-1D 생성된 결과파일을 대상으로 Major 시스템(도로 부분)의 침수량 및 침수심을 추출하기 위해 SWMM5 DLL을 활용하였다. 생성된 Output 파일은 Binary파일 형태이므로 제시된 규칙에 따라 해당 개체의 결과를 추출할 수 있다. Major 시스템(도로 부분)의 수심과 침수량은 Link variable의 Average water depth (m)와 Volume of water (m³)에 해당하는 자료를 EXCEL VBA로 작성된 함수를 활용하여 추출하였다.

Fig. 5는 모의결과 추출절차이고 Table 3은 Binary 결과파일의 형식을 나타내고 있다. 1D-1D모형의 Major 시스템(지표면 도로) 관거별 유량과 수심에 대한 시계열 자료를 추출함으로써 해당 관거가 위치한 도로의 침수여부를 확인한다.

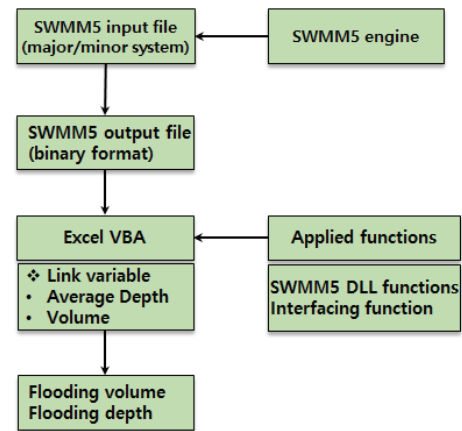


Fig. 5. Analysis Process of Simulation Result

Table 3. Format of the SWMM5 Binary Output File

Classification	Argument	Description
ItemType	The class of item sought (input)	0: Subcatchments 1: Nodes 2: Links 3: System
ItemIndex	The index of the item sought (input)	Starting from 0
VarIndex	The index of the variable sought (input)	Starting from 0
Period	The index of the time period sought (input)	Starting from 1
Value	The value of the result sought (output)	

2.4.3 하천 홍수위 적용방안

침수지역에 대한 모형 적용 시 방류 하천의 홍수위는 침수 모의결과에 영향을 미치는 중요 인자이다. 본 연구에서는 경계조건지점의 수위 관측값이 존재하지 않는 점을 고려하여 홍수위 적용 시 하천정기기본계획 상의 재현기간별 홍수위 자료와 모의적용 강우의 직전 강우량을 연계함으로써 모의적용 홍수위를 산정하였다. 매시간 직전 1시간 동안의 강우량 자료를 대상으로 지속시간별 최대강우량을 산정하고 재현기간 및 지속시간별 확률강우량 자료를 이용하여 해당 재현기간을 산정한다. 산정된 재현기간을 재현기간별 홍수위 자료에 적용하여 현재 강우량 재현기간에 해당하는 홍수위를 산정한다. Table 4와 Fig. 6은 부산 북구 지역의 과거 집중호우에 대한 지속시간별 최대강우량 추이를 분석한 결과로서 지속시간 8시간 이후에는 강우량 증가가 둔화되는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 지속시간 8시간까지의 강우량을 산정하여 해당하는 재현기간을 도출하여 해당 홍수위를 산정하였다.

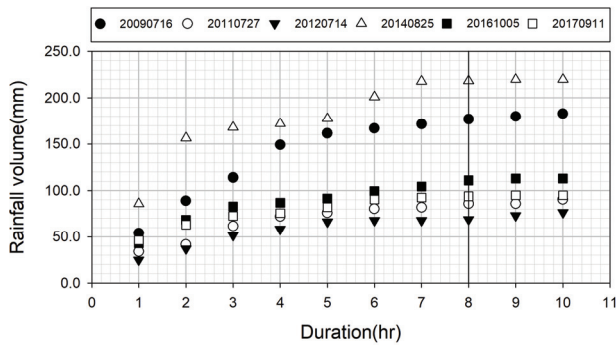


Fig. 6. Graph of Maximum Rainfall by Duration for Historical Rainfall Events

3. 연구 결과

3.1 1D-2D모형 결과를 활용한 1D-1D모형 검정

대상유역에 대해 도시유출모형으로 널리 이용되고 있는 XPSWMM을 활용하여 DEM자료 기반의 1D-2D모형을 구축하고 SWMM5 모형을 이용하여 offset기법을 활용한 1D-1D모형을 구축하였다. Table 5는 대상유역의 1D-1D 및 1D-2D

모형에 대한 특성자료를 나타내고 있다. 대상지역의 면적은 11.49 ha이고 모형의 노드와 링크는 각각 25개로 구성되었으며 Major 시스템의 관거 형상은 도로 양쪽에 관거가 위치하고 있어 도로 중앙선을 기준으로 한쪽만 고려한 형태를 적용하였다. 1D-2D모형은 셀 크기는 2 m, 총 셀 개수는 21,801개이며 도로 양쪽의 건물을 비활성 영역으로 간주하여 모의하였다. 모형 검정을 위해 침수도로에서 지표고가 가장 낮은 맨홀을 침수심 비교지점으로 선택하였으며 Fig. 7은 대상지역의 침수심 비교지점을 나타내고 있다.

Table 5. Overview of Model Input Data

Name		Value
Common	Area (ha)	11.49
	Nodes	25
	Links	25
	Subcatchments	16
	Road roughness	0.017
	Boundary condition (m)	5.14
1D-1D model	Road shape	Half of street
	Major method	Offset method
1D-2D model	Cell size (m)	2
	Cell numbers	21,801

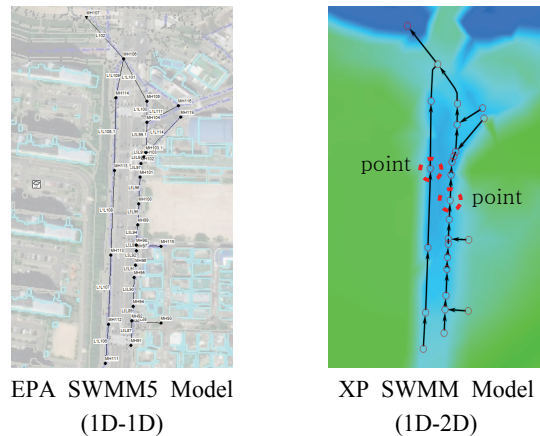


Fig. 7. Selected Points for Comparison of Flood Depth

Table 4. Maximum Rainfall by Duration for Historical Rainfall Events

Event	1hr	2hr	3hr	4hr	5hr	6hr	7hr	8hr	9hr	10hr
20090716	54.0	89.0	114.0	149.0	161.5	167.0	171.5	177.0	180.0	183.0
20110727	34.0	41.5	61.5	72.0	76.0	80.5	82.0	86.0	86.0	90.5
20120714	25.0	37.0	51.5	58.5	66.5	68.0	68.0	69.0	73.0	76.5
20140825	86.0	156.5	168.0	172.0	177.5	201.0	218.0	218.5	220.0	220.0
20161005	43.0	68.5	83.0	87.0	91.5	99.5	104.5	111.0	113.0	113.0
20170911	46.0	63.0	72.5	75.5	82.0	90.5	92.5	94.0	95.0	95.0

1D-2D모형 모의결과를 활용한 1D-1D모형 검토에서 강우특성별 침수상황 검토를 위해 20년, 30년, 50년, 80년 재현기간과 2시간, 3시간, 4시간, 6시간 지속기간에 해당하는 확률강우량을 적용하였다. 강우분석 시 부산기상청(159)의 58년 강우자료를 활용하였고 강우시간분포 시 확률강우량도 개선 및 보완연구(MLTM, 2011)에서 홍수량 산정결과 등을 검토하여 실무적 안전측으로 제시한 HUFF 3분위를 적용하였다.

Table 6은 침수분석에 적용된 재현기간 및 지속기간별 확률강우량이고 Table 7은 Huff 강우시간분포의 회귀분석 자료를 나타내고 있다.

Fig. 8은 검토 전 1D-2D모형과 1D-1D모형의 침수심 관계를 나타내고 있다. 2D모형과 동일한 조도계수 0.02를 적용

시 확률강우량별 최대 침수심 비교결과에서 맨홀 A는 RMSE가 0.15로 맨홀 B는 0.08로 나타났다. RMSE 조정을 위해 지표면 도로 및 관거 조도계수를 대상으로 시행착오법을 적용하여 최종적으로 맨홀 A와 맨홀 B 지점에서 RMSE가 0.10과 0.11가 되도록 조정하였다. Table 8은 조도계수 조정에 적용된 결과와 제한사항으로서 SWMM5 매뉴얼(Rossmann, 2015)에서 제시하는 Closed Conduits와 Open Channels의 조도계수 범위를 참조하였다. 관거와 지표면 도로의 조도계수가 적정 범위 내에서 조정되도록 조도계수의 범위에 제한사항을 적용하였고 최종 도출된 조도계수는 Minor 시스템(관거)의 경우 0.015이고 Major 시스템(지표면 도로)은 0.05로 결정되었다. Fig. 9는 검토 후 1D-2D모형과 1D-1D모형의 침수심 관계를 나타내고 있다.

Table 6. Applied Rainfall Data

Rainfall (mm)		Return period (year)			
		20	30	50	80
Duration (hour)	2	128.00	138.00	150.40	161.80
	3	152.70	164.40	179.10	192.50
	4	176.80	190.30	207.20	222.60
	6	203.00	218.36	237.57	255.20

Table 7. Regression Coefficient of Huff Rainfall Distribution

degree	6	5	4	3	2	1	constant
coefficient	3.4763E-09	-9.7703E-07	9.7085E-05	-4.1707E-03	8.9582E-02	-3.9744E-01	7.9165E-02

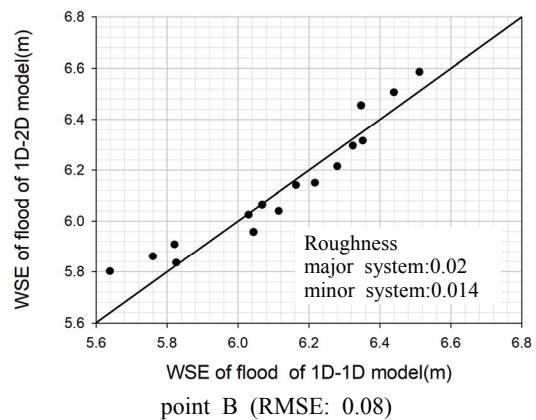
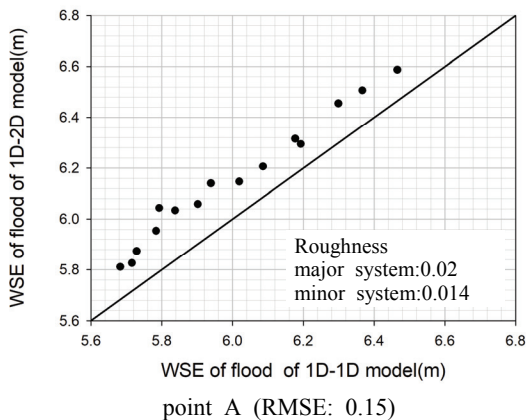


Fig. 8. Comparison Graph for Flooding Depth Before Calibration

Table 8. Calibration of Roughness for 1D-1D Model

Calibration parameters	Initial value	Calibrated value	Constraints applied
Major system (surface road) roughness	0.02	0.05	0.011 ~ 0.1
Minor system (conduit) roughness	0.014	0.015	0.011 ~ 0.015

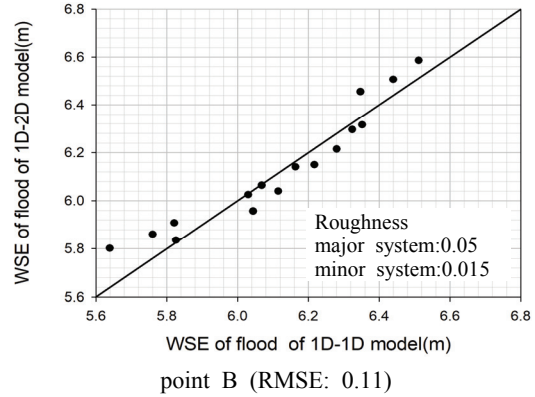
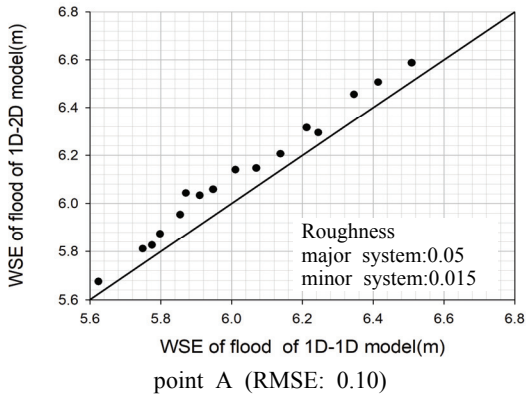


Fig. 9. Comparison Graph for Flooding Depth After Calibration

3.2 1D-1D모형을 활용한 실시간 침수예측 적용

3.2.1 시간별 하천 홍수위 산정

최근 대상지역에 침수 피해를 유발한 2014년 8월 25일 강우사상에 대해 1D-1D모형을 활용한 실시간 침수예측을 적용하였다. 하천 경계조건에 따른 실시간 침수예측 적용을 위해 매시간별 다음 1시간 강우자료를 예측 강우량으로 가정하여 모의를 진행하였다.

2014년 8월 25일 강우사상은 06시 50분에 시작되어 15시 20분에 종료되었고 총 강우량은 220.0 mm이며 침수피해는 14시부터 16시에 발생한 것으로 조사되었다(KOSTAT, 2017).

Fig. 10은 실시간 침수예측을 위해 1D-1D모형에 적용된 2014년 8월 25일 강우사상을 나타내고 있다.

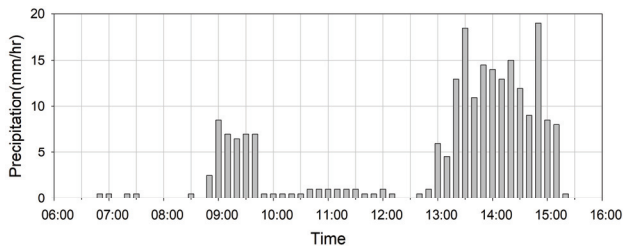


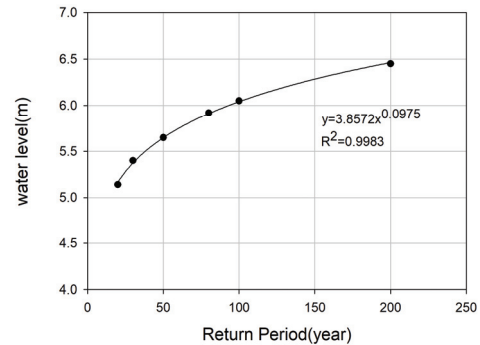
Fig. 10. Rainfall Event Applied for Real Time Forecast Based on 1D-1D Model (August 25, 2014)

강우발생 후 매시간 직전 1시간 강우량을 이용한 지속기간별 최대강우량을 산정하여 최대강우량의 재현기간을 도출하고 재현기간별 하천홍수위 자료의 회귀식을 이용하여 하천 홍수위를 산정하였다. Fig. 11은 부산 북구 D하천의 재현기간별 홍수위와 회귀식을 나타내고 있다.

Table 9는 지속기간별 최대강우량 산정결과를 나타낸 것으로 2014년 8월 25일 강우사상의 매시간별 적용될 하천 홍수위는 매시간 지속기간별 최대강우량을 산정하고 재현기간별 홍수위 관계에 적용하여 홍수위를 산정하였다. 산정

된 강우량의 재현기간이 20년 미만인 경우는 20년의 홍수위인 5.14 m를 적용하였고 20년 이상인 경우 재현기간별 하천 홍수위 회귀식을 적용하여 해당 홍수위를 산정하였다.

최종적으로 실시간 침수예측에 적용될 하천 홍수위는 Fig. 12와 같이 산정되었으며 강우가 집중된 13시부터 15시 이후인 15시부터 17시 사이에 가장 높은 홍수위가 적용된 것을 볼 수 있다. 이는 유역 도달시간 등을 고려할 때 적정하게 산정된 것으로 판단된다.



Return Period (yr)	20	30	50	80	100	200
Water Level (m)	5.14	5.40	5.65	5.92	6.05	6.45

Fig. 11. Flood Water Level of River

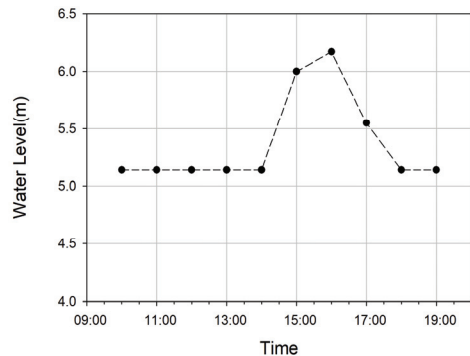


Fig. 12. River Water Level Applied to Simulation Period

Table 9. Determination of Water Surface Elevation for Boundary Condition

Duration		Time applied								
		10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
1hr	RV (mm)	38.5	28.5	6.0	5.0	67.5	86.0	76.5	8.5	0
	RP (year)	-	-	-	-	-	33	-	-	-
2hr	RV (mm)	39.5	42.0	33.0	9.5	70.5	149.5	155.5	85	8.5
	RP (year)	-	-	-	-	-	93	124	-	-
3hr	RV (mm)	41.0	43.5	47.5	38.0	75.5	152.5	168.0	160.5	85
	RP (year)	-	-	-	-	-	31.00	56	42	-
4hr	RV (mm)		44.5	48.5	50.0	79.5	157.5	172.0	168.5	160.5
	RP (year)	-	-	-	-	-	-	28	25	-
5hr	RV (mm)			50.0	51.5	116.0	161.5	177.0	173.5	168.5
	RP (year)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6hr	RV (mm)				53.0	119.0	198.0	199.0	178	173.5
	RP (year)	-	-	-	-	-	23	24	-	-
7hr	RV (mm)					120.5	201.0	218.0	206.5	178
	RP (year)	-	-	-	-	-	-	29	21	-
8hr	RV (mm)						202.5	218.5	218	206.5
	RP (year)	-	-	-	-	-	-	22	21	-
Maximum RP		0	0	0	0	0	93	124	42	0
Calculated WSE		5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	6.00	6.17	5.55	5.14

Note. RP: return period, RV: rainfall volume, WSE: water surface elevation

3.2.2 시간별 침수분석 결과

강우시작 후 14시까지의 지속기간별 강우량의 추정 재현 기간이 20년 미만을 나타내 하천 홍수위 5.14 m를 적용하였다. 15시부터 최대강우량에 대응하는 재현기간이 20년을 초과하여 재현기간에 해당하는 하천홍수위가 적용되었다.

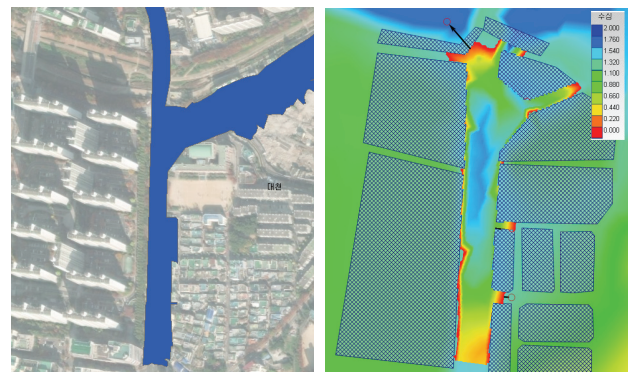
Figs. 14-17은 2014년 8월 25일 강우사상을 예측 강우로 가정하여 산정된 침수심을 나타낸 것으로 매시간 직전까지 내린 강우자료와 그에 따른 하천 홍수위 및 1시간 예측 강우를 적용하였다.

검정 지점으로 사용된 지점 A와 B에 대한 1D-1D모형 홍수위를 분석하여 침수예측의 정확도를 검토하였다.

강우시작 이후 12시 모의까지는 침수가 발생하지 않았으며 13시 모의에서 지점 A는 13시 30분, 지점 B는 13시 10분에 침수가 최초 발생한 것으로 분석되었다.

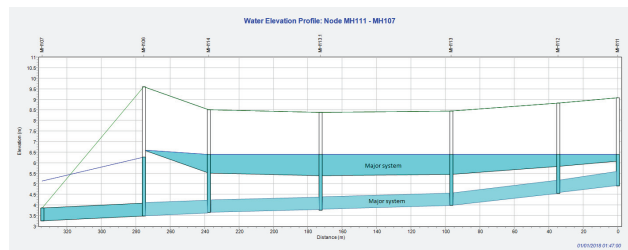
이후 지속적으로 침수심이 증가 추세를 유지하다가 16시 이후 모의에서 침수위가 감소하는 양상을 보인 후 지점 A는 17시 30분, 지점 B는 18시에 침수가 종료되는 것으로 분석되었다. Table 10은 시간에 따른 누적강우량, 하천홍수위 및 지점 A와 B의 침수심 변화를 나타낸 것으로 20.0 cm 이상의 침수심에 대해서는 14시부터 17시까지의 침수 지속시간을 나타내 침수 흔적도(KOSATA, 2017)에 제시된 침수 지속시간(14시부터 16시까지)과 유사한 값을 보이고 있다. Fig. 13은 2014년 8월 25일 강우사상 시 1D-1D모형

모의결과, 1D-2D모형 모의결과 및 침수흔적도(KOSATA, 2017)별 침수구역현황을 나타내고 있다.



Flood map (KOSATA, 2017)

1D-2D model



1D-1D model

Fig. 13. Comparison of Flooding Area for 2014/08/25 Event

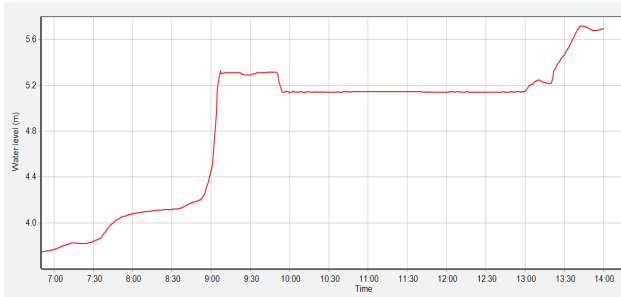
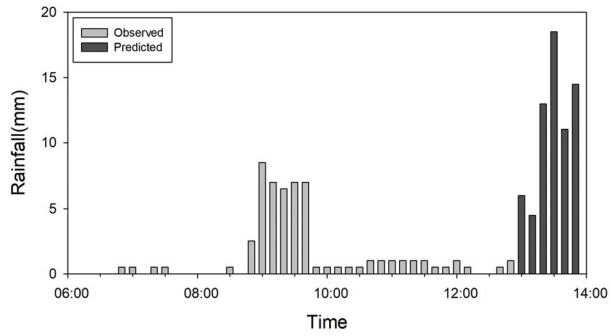


Fig. 14. Predicted Flood Water Level of Point A at 13:00

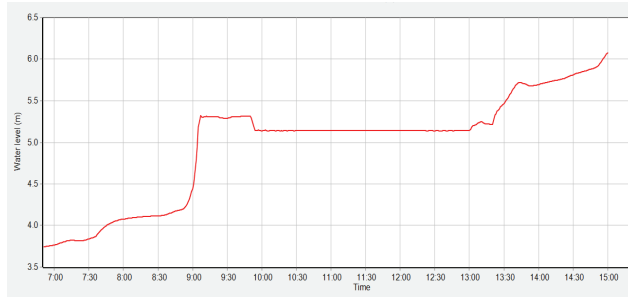
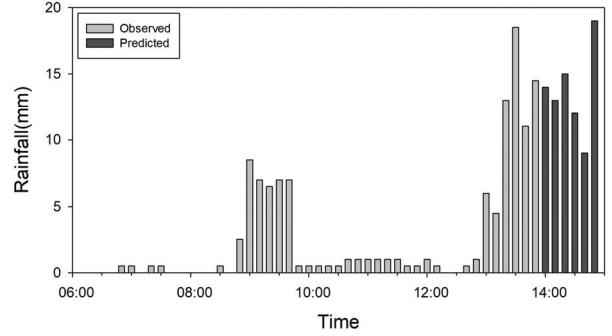


Fig. 15. Predicted Flood Water Level of Point A at 14:00

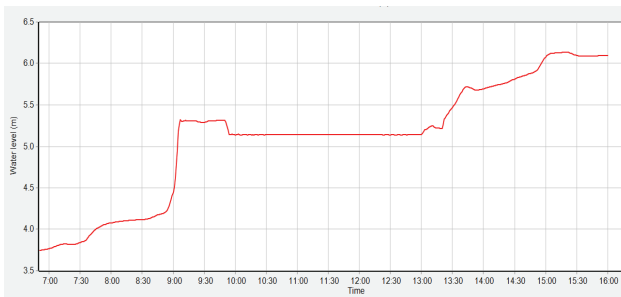
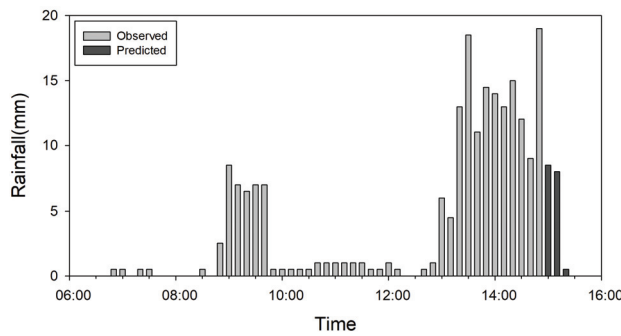


Fig. 16. Predicted Flood Water Level of Point A at 15:00

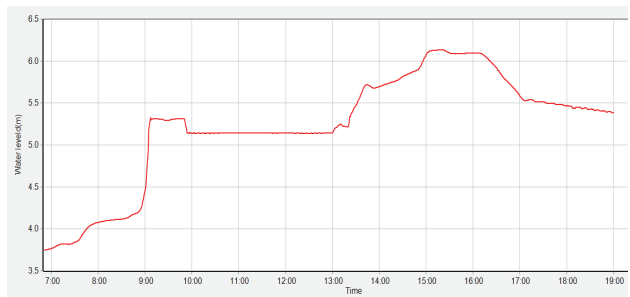
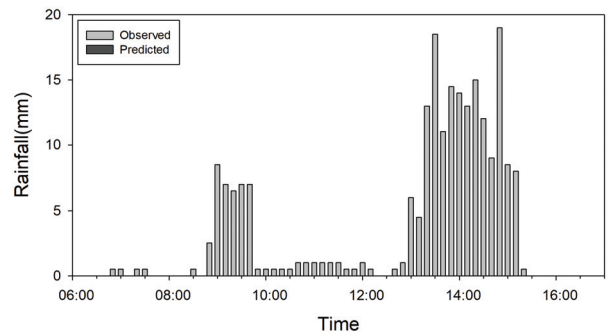


Fig. 17. Predicted Flood Water Level of Point A at 18:00

Table 10. Analysis Result for Each Time of Simulation at Point A and B

Classification	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
Accumulated rainfall (mm)	41.5	45.5	50.5	53.5	121.0	203.0	220.0	220.0	220.0	220.0
Water level of river (m)	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	6	5.17	5.55	5.14	5.14
Flooding depth (m)	Point A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	0.71	0.21	0.00	0.00
	Point B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.47	0.93	0.51	0.00	0.00

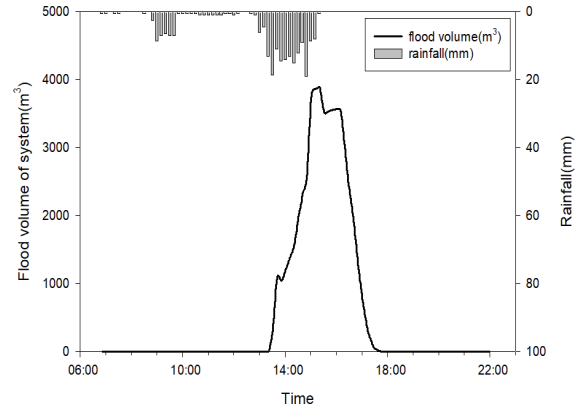
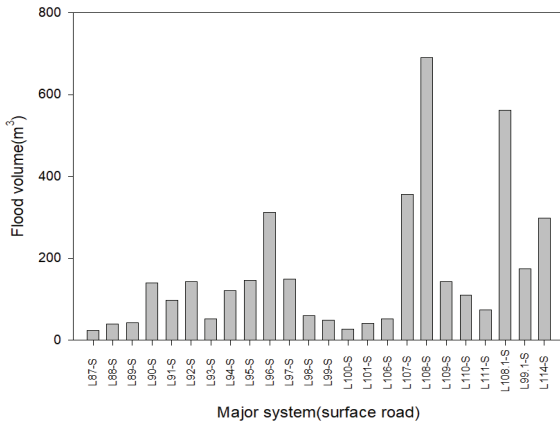


Fig. 18. Analysis Results for Flooding Volume on the Surface Road

SWMM 1D-1D모형의 OUTPUT 파일을 대상으로 SWMM5 DLL과 EXCEL VBA를 연계하여 지표면 도로별 침수량 및 해당 시계열을 추출하였으며 예측 강우의 적용 시점별로 침수발생관거 존재여부 등 침수관련 정보를 분석하였다. Fig. 18은 지표면 도로에 해당하는 Major 시스템 관거별 침수량과 시간에 따른 지표면 도로에서의 총 침수량을 나타내고 있다.

4. 결론

예측 강우 기반의 실시간 도시침수분석과 같은 신속한 모의 및 결과해석이 필요한 경우에 1D-2D 모형이 가지는 긴 모의시간 및 상용 프로그램과 연계 등의 문제점이 발생하게 되어 적용이 용이하지 않다. 이에 본 연구에서는 1D-2D모형 모의결과를 이용한 1D-1D모형 검정 및 SWMM5 DLL을 이용한 결과분석을 적용함으로써 이러한 제한사항을 해결할 수 있는 SWMM 1D-1D모형 기반의 실시간 침수예측에 대한 적용 가능성을 검토하였다.

기 생성된 1D모형 입력파일의 [CONDUITS]과 [XSECTIONS]을 대상으로 EXCEL VBA를 활용하여 Major 시스템에 해당하는 관거자료를 일괄 추가하였으며 [TRANSECTS]를 대상으로 GIS자료를 활용하여 해당 도로에 적합한 Major 시스템 (지표면 도로)을 설정하였다. 또한, Major 시스템의 침수량과 침수심 등을 효율적으로 분석하기 위해 SWMM5 DLL과 EXCEL VBA 기반의 추출 프로그램을 활용하였다. 작성 프로그램을 활용하여 Binary파일 형태의 Output 파일을 대상으로 Link variable의 Average water depth (m)와 Volume of water (m³)에 해당하는 자료를 추출함으로써 결과분석 단계를 간소화하였다.

최대 침수심을 나타낸 2개 지점을 대상으로 1D-2D모형의 분석결과를 활용하여 SWMM 1D-1D모형의 침수심에 대한 검정을 수행하였다. 검정 대상 매개변수로는 Manning 조도계수를 선정하고 SWMM5 매뉴얼에 제시한 적정 범위 내에

서 적용하여 최종적으로 두 지점의 Root Mean Square Error (RMSE)가 0.11 이하가 되도록 조정하였다. 강우와 홍수위의 발생빈도를 동일하다고 가정하고 직전 강우자료의 지속기간별 최대강우량의 발생빈도를 이용하여 하천 홍수위를 산정한 후 예측모의 실행 시 매시간별 하천 경계조건으로 적용하였다. 기왕의 2014년 8월 25일 강우사상을 대상으로 매시간별 1시간 예측 강우를 가정하여 침수예측 분석을 진행하였다. 침수예측 분석결과와 침수 지속시간(14시~17시)은 침수흔적도(KOSTAT, 2017)에서 제시된 침수 지속시간(14시~16시)과 유사한 범위를 보였다.

본 연구에서는 1D-2D모형 모의결과를 이용한 1D-1D모형 검정 및 SWMM5 DLL을 이용한 결과 분석을 기반으로 SWMM 1D-1D모형의 실시간 침수예측에 대한 적용 가능성을 확인하였다. 따라서 향후 기상청 초단기 예측 강우 등 예측 강우와 연계하여 상습 침수지역관리 등에 활용 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 재난예측 및 저감연구개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(MOIS-재난-2015-05).

References

Allitt, R., Blanksby, J., Djordjević, S., Maksimović, Č., and Stewart, D. (2009). *Investigations into 1D-1D and 1D-2D urban flood modelling*. WaPUG Autumn Conference 2009, n. 25, November 2009, Blackpool, UK.

Carr, R.S., and Smith, G.P. (2006). Linking of 2D and pipe hydraulic models at fine spatial scales. *7th International Conference on Urban Drainage Modelling and the 4th International Conference on Water*

- Sensitive Urban Design*, April 2-7, Melbourne, Australia.
- Djordjević, S., Ivetić, M., Maksimović, Ć., and Rajčević, A. (1991). An approach to the simulation of street flooding in the modeling of surcharged flow in storm sewers. *Proceedings of New Technologies in Urban Drainage UDT '91 Conference*, pp. 101-108.
- Henonin, J., Russo, B., Mark, O., and Gourbesville, P. (2013). Real-time urban flood forecasting and modelling: A state of the art. *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 15, No. 3, pp. 717-736.
- Jo, D.J., and Jeon, B.H. (2013). Development of flood nomograph for inundation forecasting in urban districts. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 13, No. 3, pp. 37-42.
- Leandro, J., Chen, A.S., Djordjević, S., and Savić, D.A. (2009). Comparison of 1D/1D and 1D/2D coupled (sewer/surface) hydraulic models for urban flood simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 135, No. 6, pp. 495-504.
- Leandro, J., Djordjević, S., Chen, A.S., Savić, D.A., and Stanić, M. (2011). Calibration of a 1D/1D urban flood model using 1D/2D model results in the absence of field data. *Water Science & Technology*, Vol. 64, No. 5, pp. 1016-1024.
- Lee, J.Y., Jin, G.H., and Ha, S.R. (2014). Analysis of urban inundation considering building footprints based on dual-drainage scheme. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 17, No. 4, pp. 40-51.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM). (2011). *Probability rainfall improvement and complementary research report*.
- Randall, M., Perera, N., Gupta, N., and Ahmad, M. (2017). Development and calibration of a dual drainage model for the Cooksville Creek watershed, Canada. *Journal of Water Management Modeling*, Vol. 25, C419. doi:10.14796/JWMM.C419
- Rossman, L.A. (2015). *Storm water management model user's manual version 5.1*. Cincinnati, OH, USA: United States Environmental Protection Agency.
- Shin, H.S., Park, Y.W., and Hong, I.P. (2007). The study on the development of flood prediction and warning system at ungaged coastal urban area: On-Cheon Stream in Busan, *Journal of the Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 6, pp. 447-458.
- Statistics Korea (KOSTAT). (2017). *Flood trace information*.
- WallingfordSoftware. (2004). *Does traditional calibration hide errors in your demand analysis?* News Articles (February 25, 2008).
- Wolfs, V., Ntegeka, V., Bermúdez, M., Willems, P. (2018). Development of a fast urban flood model for real-time applications. *13th International Conference on Hydroinformatics HIC 2018*, Vol. 3, pp. 2327-2332.
- Wong, T.S.W., and Lim, C.K. (2006). Effect of loss model on evaluation of Manning roughness coefficient of experimental concrete catchment. *Journal of Hydrology*, Vol. 331, No. 1-2, pp. 205-218.
- Yoon, Y.S., Rhee, K.H., and Oh, I.H. (2017). A study on the appropriateness of practical application of flood inundation analysis in urban area using the dual drainage model. *Crisisonomy*, Vol. 13, No. 8, pp. 133-145.

Received	November 12, 2019
Revised	November 15, 2019
Accepted	November 29, 2019