



## Study on the influence of sewer network simplification on urban inundation modelling results

Lee, Seung-Soo<sup>a</sup> · Pakdimanivong, Mary<sup>b</sup> · Jung, Kwan-Sue<sup>c</sup> · Kim, Yeonsu<sup>d\*</sup>

<sup>a</sup>APEC Climate Center

<sup>b</sup>INTRA Corporation Sole Co., LTD.

<sup>c</sup>Department of Civil Engineering, Chungnam National University

<sup>d</sup>K-water Institute

Paper number: 18-001

Received: 8 January 2018; Revised: 31 January 2018; Accepted: 31 January 2018

### Abstract

In urban areas, runoff flow is drained through sewer networks as well as surface areas. Therefore, it is very important to consider sewer networks as a component of hydrological drainage processes when conducting urban inundation modelling. However, most researchers who have implemented urban inundation/flood modelling, instinctively simplified the sewer networks without the appropriate criteria. In this research, a 1D-2D fully coupled urban inundation model is applied to estimate the influence of sewer network simplification on urban inundation modelling based on the dendritic network classification. The one-dimensional (1D) sewerage system analysis model, which was introduced by Lee *et al.* (2017), is used to simulate inlet and overflow phenomena by interacting with surface flow. Two-dimensional (2D) unstructured meshes are also applied to simulate surface flow and are combined with the 1D sewerage analysis model. Sewer network pipes are simplified based on the dendritic network classification method, namely the second and third order, and all cases of pipes are conducted as a control group. Each classified network case, including a control group, is evaluated through their application to the 27 July 2011 extreme rainfall event, which caused severe inundation damages in the Sadang area in Seoul, South Korea. All cases are compared together regarding inundation area, inflow discharge and overflow discharge. Finally, relevant criterion for the simplification method is recommended.

**Keywords:** Coupled 1D-2D model, Urban inundation, Conduit simplification, Dual-drainage

## 하수관망의 간소화가 도시침수 모의에 미치는 영향 분석에 관한 연구

이승수<sup>a</sup> · Mary Pakdimanivong<sup>b</sup> · 정관수<sup>c</sup> · 김연수<sup>d\*</sup>

<sup>a</sup>APEC 기후센터, <sup>b</sup>INTRA Corporation Sole Co., LTD., <sup>c</sup>충남대학교 토목공학과, <sup>d</sup>K-water 융합연구원

### 요 지

도시유역에서 발생한 유출은 지표면뿐만 아니라 하수관망을 통해 배수되며, 도시침수 모의 수행시 하수관망을 수문학적 배수 시스템의 한 구성요로서 고려하는 것은 매우 중요하다. 그러나 도시 침수 모의를 수행하는 대부분의 연구자들이 적절한 기준에 준하지 않고 직관적으로 하수관망을 단순화시켜 모의를 수행하는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 1D-2D 결합 도시침수 해석 모형을 이용하여 수지상 구조에 구분법에 기반하여 단순화된 하수관망의 도시침수 해석 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 하수관망 해석을 위한 1차원 모델은 Lee *et al.* (2017)에 의해 소개된 모형으로서 지표면과 하수관망 사이의 유입과 역류를 동시에 모의할 수 있고, 2차원 지표면 모델은 불규칙 삼각망을 이용하여 지표수 흐름을 모의하며 1차원 하수관망 해석모형과 연계되어 도시침수를 모의할 수 있다. 하수관망은 수지상 구조 구분법에 기반하여 2차, 3차 그리고 단순화 하지 않은 경우로 구분할 수 있으며, 구분된 각 하수관망은 서울시 사당역 인근에 많은 침수 피해를 발생시킨 2011년 7월 27일 강우 사상에 적용하여 제안된 방법의 적용성을 평가하였다. 모든 케이스에 대하여 침수면적, 지표면에서 하수관망으로의 유입 유량, 하수관망에서 지표면으로의 역류 유량 등을 비교하였으며, 마지막으로 하수관망 단순화를 위한 적절한 기준 제시에 대한 논의를 수행하였다.

**핵심용어:** 1D-2D 연계모형, 도시침수, 관 간소화, 이중배수

\*Corresponding Author. Tel: +82-42-870-7331

E-mail: yeonsu0517@gmail.com (Y. Kim)

## 1. 서론

최근 기후변화로 인한 슈퍼태풍의 발생빈도 증가와 집중 호우의 증가로 인해 도시유역의 침수피해가 전 세계적으로 급증하고 있다. 국내의 경우 2011년 7월 서울시 사당역 인근 침수, 2014년 8월 부산시 온천천 유역의 침수와 2016년 태풍 차바에 의한 울산시 태화시장 침수 피해 사례가 대표적이며 해외의 경우 2017년 8월 25일 부터 9월 1일까지 미국 휴스턴 지역에 막대한 침수피해를 일으킨 허리케인 하비가 대표적이라 할 수 있다. 허리케인 하비의 경우 위스콘신 대학의 공간과학공학센터(University of Wisconsin's Space Science and Engineering Center)의 분석결과 누적 강우량이 1,000년 빈도 강우량에 이르는 것으로 분석되었을(Washington Post) 정도로 전 세계적으로 도시유역의 침수 피해를 일으키는 강우의 발생 강도와 빈도가 증가하고 있다. 이러한 피해사례에서 볼 수 있듯이 도시유역에서 발생하는 침수 피해는 인적·물적 자원이 집중되어 있는 도시의 특성상 침수가 발생하면 그 피해가 비도시지역에 비해 막대하므로 이러한 도시침수를 사전에 예측하고 예방하기 위한 노력이 필요하다.

과거 도시침수 저감을 위한 침수위험도 평가에 관한 국내의 연구 사례를 살펴보면 Kim *et al.* (2012)는 도시 유역 내 소 유역별 침수저감사업 우선순위 결정을 위하여 자료포락분석 모형을 이용하여 분석하였다. Joo *et al.* (2013)은 GIS를 이용하여 침수위험 인자를 결정하고 침수위험도 평가를 하기 위한 회귀식 산정에 관한 연구를 수행한바 있다. Yoon *et al.* (2014)는 레이더 자료를 이용한 예측강우와 지상강우 관측소에서 관측된 강우를 이용하여 도시유역의 침수 해석을 수행하고 레이더 예측 강우를 도시침수 예측에 적용할 수 있음을 보인 바 있다. Yoo *et al.* (2015)는 2011년 7월 경기도 지역에서 발생한 침수의 원인을 분석하기 위하여 EPA SWMM모형과 FHWA Hydraulic Toolbox모형을 적용하였으며 우수관 연결 상태와 빗물받이 설치 간격이 불량하여 침수가 유발되었음을 밝힌바 있다. Lee and Yoon (2017)은 EPA SWMM5 모형과 2차원 천수방정식을 이용한 2차원 격자기반 침수해석 모델(GIAM)을 개발하여 강남지역 7.4 km<sup>2</sup>의 영역에 대해서 모델의 적용성 평가를 수행하였다. Park *et al.* (2017)은 SWMM을 이용하여 관거의 적정 규모를 결정하기 위해 관거의 크기 기준에 따른 침수 범람 해석의 민감도를 분석하고 관망 밀도가 높을수록 침수 면적이 증가하는 모의 결과를 나타낸바 있다. 즉, 지선 관거를 모형 구축에서 배제하는 경우 침수 면적이 낮게 나온 것으로써 이는 맨홀을 기준으로 소유역 분할을 수행하고 해당 영역의 유출량이 전부 맨홀로 유입된다는 기본

가정에서 유출 해석을 수행하는 SWMM 모형의 특성에 기인한 것으로 판단된다.

도시침수 범람 모의에 관한 해외 연구 사례를 살펴보면 Leandro *et al.* (2009)은 이중 배수 개념에 기반한 도시 침수 해석 기법의 중요성에 대하여 언급하고 1차원 하수관로 해석 모형과 1차원 지표면 유출 모형을 연계한 1D/1D 모형과 1차원 하수관로 해석 모형을 2차원 지표면 유출 해석 모형과 결합한 1D/2D 모형 비교 모의를 수행하고 모의 수행에 소요되는 시간적 측면에서는 1D/1D 모형을 활용하는 것이 유리함을 언급하고 모의 정확도 측면에서는 1D/2D 모형을 활용하는 것이 유리함을 보였다. Seyoum *et al.* (2012)는 비관성(noninertia) 2차원 홍수 모델과 SWMM 모형을 결합한 도시침수 해석 모형을 개발하여 가상의 조건에서 테스트를 하고 실제 방곡 지역에 적용하여 모형의 적용성을 평가하였으며, 적용결과 침수심은 만족할만한 결과를 보여주었으나 유속에 있어서는 다소 차이가 있음을 보여주었다. Noh *et al.* (2016)은 지표면과 하수관로 사이의 유량교환을 계산하기 위한 계수적용에 앙상블 기법을 적용하여 교환유량 산정을 위한 계수의 변화가 도시침수 범람 해석에 미치는 영향을 실험결과와 비교하여 분석한 바 있다. Lee *et al.* (2016)은 실험 기반 1D/2D 모형을 개발하여 도시침수 해석에 있어서 교환유량 산정 지점을 맨홀과 집수구로 구분하여 비교 모의를 수행하여 교환유량 산정 지점을 집수구로 하는 것이 실제와 유사한 모의 결과를 보여줌을 나타낸 바 있다.

과거 도시침수 해석에 관한 연구는 지표면에서의 높낮이 차에 따른 중력에 의한 유출 해석(Major flow)을 수행하기 위한 다양한 연구가 수행되었으며(Bates *et al.*, 2000) 이는 2차원 흐름 해석의 정확도를 높이기 위한 연구로 집중되어 2000년대 초반까지는 상대적으로 하수관로를 통한 유출(Minor flow) 해석의 중요성은 무시되었다. 그러나 Djordjević *et al.* (1999) 이 수행한 2차원 지표면 흐름과 1차원 하수관로를 연계한 이중배수(dual-drainage) 개념을 활용한 도시침수 해석에 관한 연구 이후 1, 2차원 연계모형의 개발과 활용에 관한 다양한 연구(Chen *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2009; Leandro *et al.*, 2009; Seyoum *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2016; Noh *et al.*, 2016)가 수행된바 있으나 대부분의 연구에서 하수관망은 간략화되어 고려되고 있으며, 이러한 영향을 정량적으로 분석한 연구는 현재까지 거의 없는 것으로 파악된다.

도시유역의 유출 해석은 지표면 유출(surface runoff)과 지표하유출(sub-surface flow)을 동시에 해석하여 실제 도시유역에서 일어나는 유출 현상을 실제와 가장 근사하게 모의하는 것이 중요하다. 그러나 상기 언급된 연구 사례에서 볼 수

있듯이 지표면에서의 흐름 해석 정확도를 높이기 위한 수치해석 기법에 관한 연구와 인공구조물의 영향 분석에 관한 연구 그리고 지표면과 하수관망을 연계한 모형을 이용한 연구는 상대적으로 많이 이루어진 반면 하수관로의 자료 처리에 관한 연구는 미진한 상태로써, 개별 연구자들의 개인적 판단 기준에 의해 모의정확도의 차이가 큰 실정이다.

따라서 본 연구에서는 2011년 7월 서울시 사당역 인근 침수 피해 사례에 대해서 하수관로의 간소화가 도시침수 해석에 미치는 영향을 분석한다. 하수관로를 단순화하기 위해서 Pakdimanivong (2016)이 제시한 바와 같이 수지상(dendritic) 구조 분류 기법에 따라 하수관로를 2차, 3차로 구분하여 침수 해석을 실시한다. 간소화된 하수관로를 이용한 침수 해석 결과는 전체 하수관로를 활용하여 수행된 모의 결과와 비교분석되어 하수관로 간소화가 도시침수 해석 결과에 미치는 영향을 분석한다.

## 2. 연구방법

### 2.1 1D-2D 통합 도시 침수 해석 모형

본 연구에서는 서울시 사당역 인근 지역의 도시침수 해석을 위하여 Lee et al. (2017)이 개발한 1D-2D 연계 도시 침수 해석 모형을 활용하며 2차원 지표면 흐름 해석과 1차원 하수관로 해석을 위한 지배방정식은 다음과 같다.

#### <2차원 지표면 흐름 해석 지배방정식>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = r_e - q_d - q_s \quad (1a)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 M \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (1b)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 N \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (1c)$$

여기서,  $t$ 는 시간(sec),  $h$ 는 수심(m),  $M(=uh)$ 은  $x$ 방향 유량 플럭스( $m^2/s$ ),  $u$ 는  $x$ 방향 유속( $m/s$ ),  $N(=vh)$ 은  $y$ 방향 유량 플럭스( $m^2/s$ ),  $v$ 는  $y$ 방향 유속( $m/s$ ),  $r_e$ 는 강우강도( $m/s$ ),  $q_d$ 는 단위 면적당 지표면과 집수구통 사이의 교환유량( $m/s$ ),  $q_s$ 는 단위 면적당 지표면과 하수관로 사이의 교환유량( $m/s$ ),  $g$ 는 중력 가속도( $m^2/s^2$ ),  $H$ 는 수위(m),  $n$ 은 Manning's 조도계수이다.

#### <1차원 하수관로 흐름 해석 지배방정식>

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_s + q_d \quad (2a)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(uQ)}{\partial x} = -gA \frac{\partial H_p}{\partial x} - gn^2 \frac{|Q|Q}{R^{4/3}A} \quad (2b)$$

여기서,  $A$ 는 하수관로의 통수단면적( $m^2$ ),  $t$ 는 시간(sec),  $Q$ 는 유량( $m^3/s$ ),  $u$ 는 관로내의 유속( $m/s$ ),  $H_p$ 는 피에조수위(m),  $R$ 는 동수반경이다.

본 모형은 불규칙 격자망을 활용하여 도시구역의 형상을 실제와 유사하게 묘사할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 지표면과 하수관로 사이의 유량교환이 맨홀이 아닌 도로위에 분포하고 있는 집수구에서 일어나도록 설계되어 지표면 유출 발생 시 지형의 고도차에 의해 유역 출구 방향으로 흐르는 유출수가 집수구를 포함하고 있는 격자를 통과 하게 되는 경우 유출수의 일정량이 하수관로로 유입된다. 반대로 하수관로의 배수용량을 초과하는 유출수가 하수관로로 유입되어 관로내의 압력이 개별적으로 연결되어 있는 집수구의 지표면 고도보다 높아지는 경우 집수구를 통해 역류 현상이 일어나도록 설계되어 실제 도시구역에서 일어나는 지표면 유출수의 유입과 역류 현상을 실제와 근사하게 모의할 수 있다. 본 연구에서 이용된 1D-2D 연계 도시침수 해석 모형에 관한 보다 자세한 설명은 Lee et al. (2017)을 참고할 수 있다.

### 2.2 대상유역

본 연구의 대상유역이 사당역 인근 유역은 2011년 7월26일부터 29일 사이에 발생한 집중호우로 인하여 61명의 인명 피해(사망 22명, 부상 39명 등)가 발생하였으며(KMA, 2011), 본 연구에서는 2011년 7월 27일 01시부터 12시까지 총 11시간에 걸쳐 내린 집중 호우에 대한 모의를 통해 하수관로의 단순화 기법이 도시침수 모의 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 서울시 사당역 인근 유역에 대한 도시침수 해석을 위한 유역 경계는 Fig. 1과 같다. 대상 유역 면적은 13.04  $km^2$ 이며 지상부 유출 해석을 수행하기 위하여 도로, 건물, 산지 지역을 구분하여 Fig. 2와 같이 불규칙 격자망을 생성하였다. 개별 격자별 고도 데이터를 획득하기 위한 DEM 데이터는 국가지리정보원(www.ngii.go.kr)에서 다운로드 받은 수치지도를 이용하였다. 모의에 사용된 지형 자료는 건물 밀집지역에 대해서는 1:1,000 축척의 수치지도를 사용하였으며 산지 지역에 대해서는 1:5,000 축척의 수치지도를 사용하였다. 토지이용도에 따른 개별 격자별 유출률은 Lee et al. (2017)에서 적용된 기법과 동일하게 전체 격자는 산지 및 야지, 건물 밀집지역,

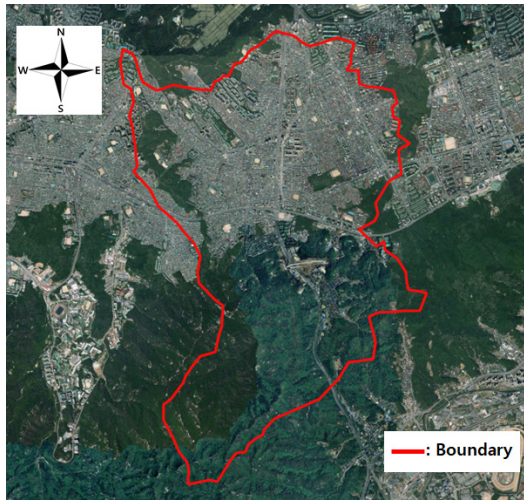


Fig. 1. Study basin

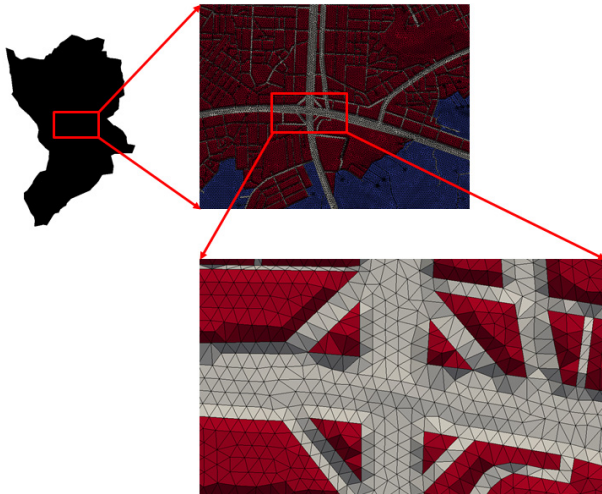


Fig. 2. Generation of unstructured mesh

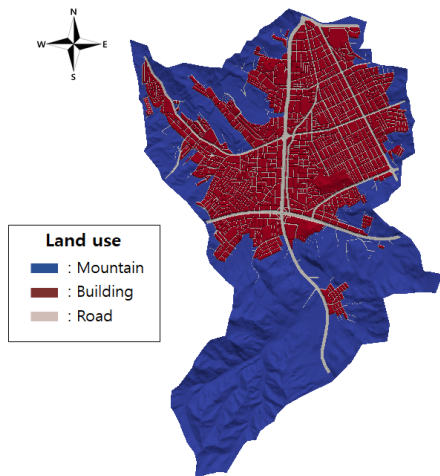


Fig. 3. Land use of study basin

도로 등으로 구분하여 서울시에서 제공받은 shp파일 형태의 토지이용도를 이용하여 개별적으로 유출률 계수(산지: 0.25, 건물밀집지역: 0.5, 도로: 0.75)와 조도계수(산지: 0.067, 건물 밀집지역: 0.043, 도로: 0.2)를 조정하였으며 개별 격자별 토지이용도의 분포(산지, 건물, 도로 등)는 Fig. 3과 같다. 도시침수 해석에 입력 자료로 이용된 강우데이터는 Lee *et al.* (2017) 이 이용한 자료와 동일하게 사당역 인근에 위치하고 있는 용산, 서초, 관악, 남현 강우관측소의 AWS 강우데이터를 이용하였으며 강우의 공간 분포를 고려하기 위하여 Thissen망을 작성하여 적용하였으며 강우자료의 시간간격은 1분이다.

### 2.3 하수관로 단순화기법

도시침수 해석에 이용되는 하수관로의 적용범위와 기준이 명확하지 않아 개별 연구자들의 주관적 판단에 따라 하수관로를 단순화하여 모형에 적용하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 Fig. 4에 나타난 것과 같이 수지상(dendritic) 하천 구분 개념을 도시지역 하수관로 구분에 적용하여 2차(Case-1), 3차 하수관로(Case-2) 그리고 전체 하수관로(Case-3)에 대하여 동일한 조건하에 도시침수 해석을 수행하고 하수관로의 단순화가 모의 결과에 미치는 영향을 분석한다.

Fig. 5에는 대상 유역인 사당역 인근 유역의 하수관로를 2차, 3차 수지상 구조로 구분한 것과 모든 하수관로를 반영한 모습을 보여주고 있다. Table 1에서는 하수관로의 차수 구분에 따른 하수관로와 맨홀의 개수를 나타낸다. 차수에 따른 하수관로의 분류 및 분석결과 Case-1과 Case-2의 하수관로의 개수는 Case-3 대비 각각 1.4%와 3.07% 수준이며 맨홀의 개수는 1.84%와 4.36% 수준이다. 총 연장은 Case-1이 21.76 km, Case-2는 42.44 km 그리고 Case-3은 232.5 km로써 Case-1과 Case-2의 총 관로 연장은 Case-3 대비 각각 9.35%, 18.25%로 분석되었으며 최대(9 m), 최소(0.15 m) 관경은 동일한 것으로 분석되었다.

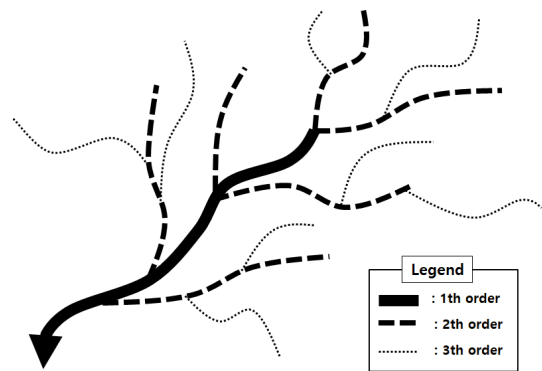


Fig. 4. Concept of dendritic drainage system

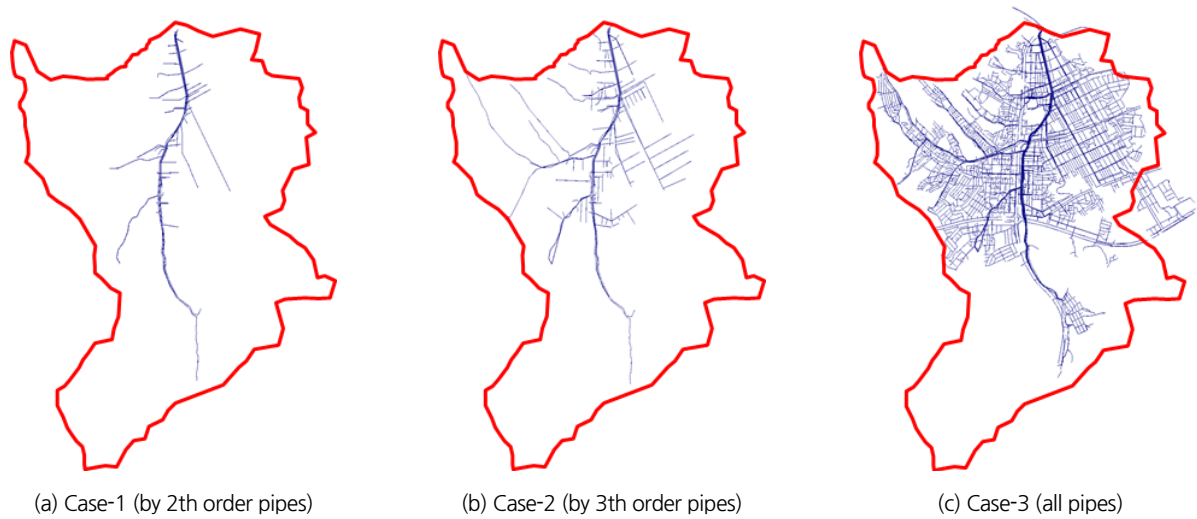


Fig. 5. Arrangement of sewer pipe following dendritic drainage system

Table 1. Number of sewer network data according to pipe order

Index	Case-1	Case-2	Case-3
Pipes	115	252	8,196
Manholes	102	241	5,533

### 3. 모의 결과

Fig. 6에 서울시 사당역 인근 유역에 대한 도시침수 해석 결과를 나타내었다. 도시침수 모의 결과는 개별 지상부 격자의 침수심을 기준으로 20 cm 이상 30 cm 미만, 30 cm 이상 40 cm 이하, 40 cm 이상 50 cm 이하, 50 cm 이상으로 구분하여, 수지상 구조로 구분된 Case-1, Case-2의 모의 결과와 Case-3 구분하여 시간에 따른 침수심의 변화를 분석하였다.

침수해석 결과 50 cm 이상의 침수심 결과 값을 제외한 나머지 3개(Figs. 6(a)~6(c))의 결과에서는 침수심의 변화 패턴이 강우패턴과 유사하게 나타나는 것을 확인하였다. 이는 도시 침수 해석에 이용되는 하수관로의 개수가 적은 경우에도 지표면과 하수관을 통한 유입과 유출이 합리적으로 모의 된다는 것을 의미 한다고 할 수 있다. 또한 Fig. 6(d)에 나타나있는 50 cm 이상의 침수심의 변화 역시 강우로 인한 유출이 발생하여 지표면에서 하수관로의 유입에 의한 정체현상 또는 역류 현상이 활발히 일어나기 전까지는 50 cm 이상의 침수심이 발생하지 않는 것을 알 수 있으며 강우의 발생 강도가 약해지는 오전 9시 이후에는 관로를 통한 배수 효과(drainage effect)로 인하여 침수심이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

추가적으로 Case-1과 Case-2의 시간에 따른 침수심 변화는 Case-3에 비하여 침수심이 급격히 증가하며 침수심의 하

강 속도는 상대적으로 늦게 일어나는 것으로 모의되었다. 이는 하수관로 단순화로 인하여 유역 내에 존재하는 전체 하수관로의 비율이 줄어들어 인하여 유역 내 하수관로를 통한 배수 능력 부족에서 기인한 것으로 판단된다. 하수관로가 단순화 되면 전체 하수관로의 개수가 줄어들게 되어 개별 하수관로가 배수시켜야 하는 유량이 증가하게 되어 관로내의 압력(피에조 수위)을 상승시키게 된다. 상승된 관로내의 압력은 지표면으로 역류하는 유량을 증가시키게 되므로 단순화된 하수관로를 이용하여 침수 모의를 하게 되는 경우 상대적으로 높은 침수심 면적을 보이는 것으로 판단된다.

하수관로의 차수가 낮아짐에 따라서(즉, 고려되는 하수관로의 개수가 적어질수록) 최대 침수 면적이 증가하고 시간에 따른 변동 폭이 증가하는 현상은 지표면과 하수관로 사이의 유량교환의 변화에서도 확인할 수 있다. Fig. 7은 각 케이스별 시간에 따른 지표면과 하수관로 사이의 교환유량의 변화량을 보여준다. Fig. 7은 지표면에서 하수관로로 유입되는 유량을 양(+)의 값으로, 하수관로에서 지표면으로 역류하는 유량을 음(-)의 값으로 표현한다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 오전 1시에 시작된 강우에 대하여 Case-3의 경우에는 5시경까지 지표면으로 역류하는 유량이 없는 것을 확인할 수 있으나 Case-1과 Case-2의 경우에는 이보다 3시간이 이른 오전 2시 경부터 지표면으로의 역류 현상이 발생한 것을 확인할 수 있다. 또한 최대 침수면적을 보여주는 오전 8시 30분 경 지표면에서는 하수관로로 유입되는 유량이 모든 하수관거를 고려한 경우에서 Case-2, Case-1의 순으로 낮아지며 하수관로에서 지표면으로 역류하는 유량은 그 역순으로 변화하는 것을 확인할 수 있다.

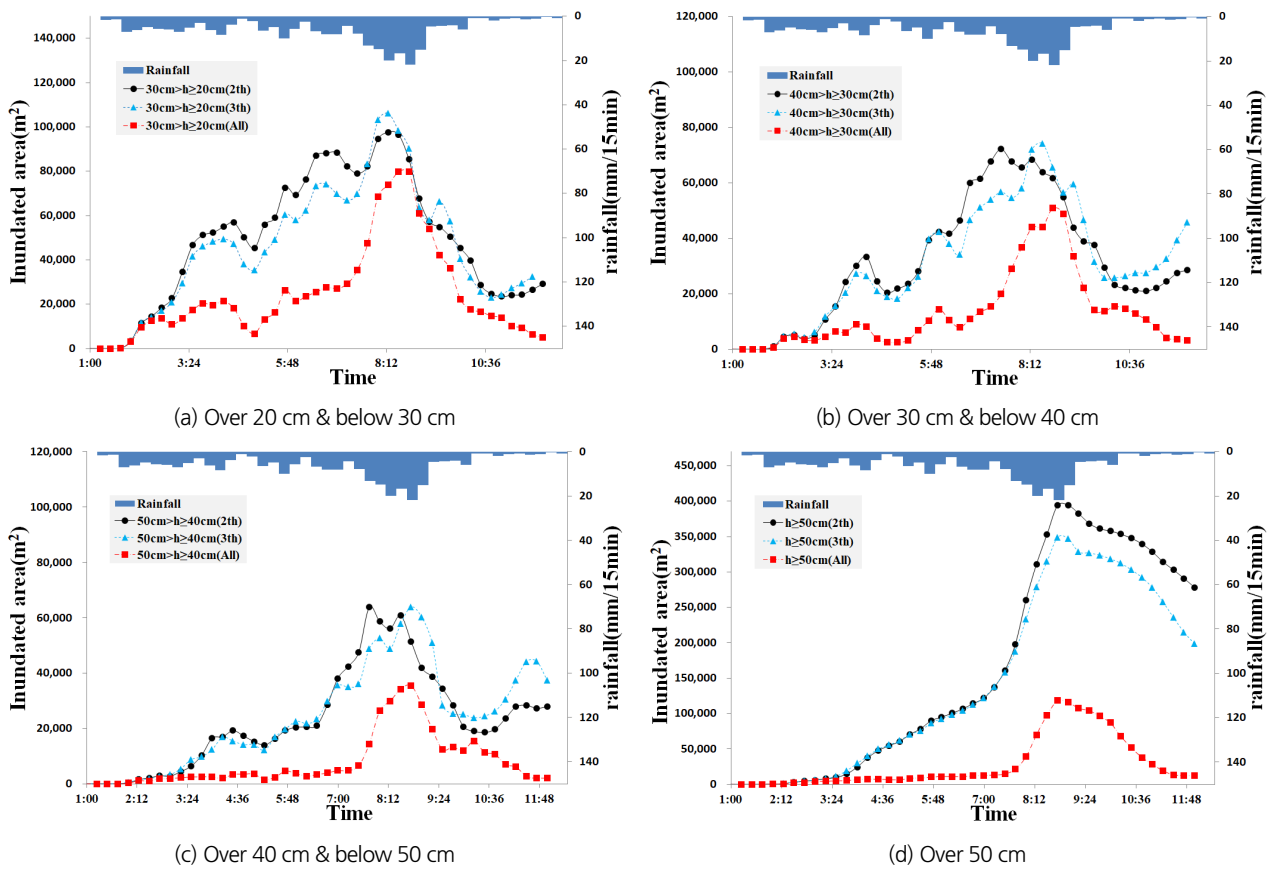


Fig. 6. Time variation of inundation depth

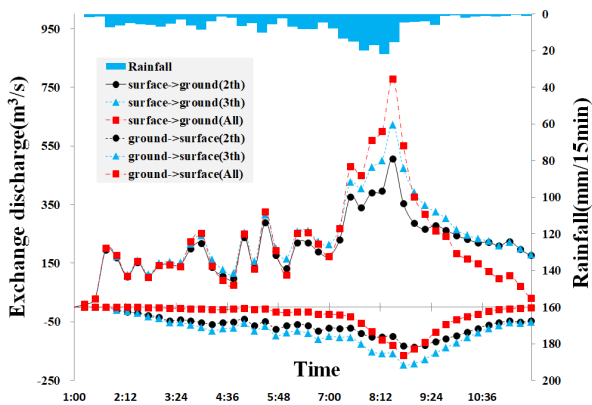


Fig. 7. Time variation of exchange discharge

### 4. 결론

도시유역의 침수 현상은 지표면에서 하수관로로의 유입, 하수관로에서 지표면으로의 역류뿐만 아니라 하수관로와 맨홀에서의 유량교환 그리고 지표면에서 일어나는 인공구조물에 의한 가로막힘 효과와 토지이용도에 따른 유출량 변화 등

과 같이 매우 복잡한 수리·수문학적 현상의 복합적 상호작용에 의해 발생한다. 본 연구에서는 최근 기후변화로 인해 증가된 도시침수의 피해를 저감시키기 위한 노력의 일환으로 도시침수 모형을 활용한 모의 결과의 신뢰도를 높일 수 있는 방법 중 하나인 하수관거 단순화 기법이 침수모의 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 그동안 개별 연구자들의 개인적인 편의 및 판단에 근거하여 수행되던 하수관로 단순화를 수지상 구조에 따라 분리하는 방법을 제안하고 제 2차 및 3차로 단순화된 하수관로를 이용하여 모의된 결과를 전체 하수관로를 이용한 경우와 비교하여 그 특성을 분석하였다. 분석결과 하수관로 단순화가 침수해석에 미치는 영향은 다음과 같다.

- 1) 하수관로를 단순화하여 침수모의를 하는 경우 시간에 따른 침수심의 변화 양상은 전체 하수관로를 고려한 경우와 큰 차이를 보이지 않았으며 이는 지표면과 하수관로를 연계하여 도시침수를 모의하는 1D-2D 연계 도시 침수 해석 모형의 특성상 지표면에서 하수관로로의 유입과 하수관로에서 지표면으로의 역류 현상이 정도의 차이는 있으나

잘 고려된 결과로 판단된다.

- 2) 하수관로가 단순해지면 침수심 변화에 있어 변동 폭이 전체 하수관로를 고려하는 경우에 비해 커지는 것을 확인할 수 있었으며 특히 하수관로에서 지표면으로의 역류 현상이 전체 하수관로를 고려하는 경우에 비해 빠르게 발생하였다. 이는 개별 하수관로가 감당해야 하는 소유역이 증가함에 따라서 하수관로의 배수용량 부족에 기인한 것으로 판단되며 배수용량의 부족 현상이 하수관로내의 압력을 증가시켜 지표면으로의 역류량을 증가시키기 때문인 것으로 분석되었다.
- 3) 하수관로를 단순화 할수록 지표면에 고여 있는 우수가 배수되는 효과가 지체되는 현상이 발생하였으며 이는 위에서 언급한 바와 같이 하수관로의 배수용량이 부족해짐에 따라 발생하는 현상으로 분석되었다.
- 4) 하수관로를 단순화 할수록 지표면에서 하수관로로의 유입량은 줄어들고 하수관로에서 지표면으로의 역류하는 유량은 증가하여 전체 침수 면적이 증가할 뿐만 아니라 침수심이 깊이 지는 것으로 분석되었다.

본 연구의 수행결과 하수관로 단순화는 하수관로의 배수용량을 줄어든다 하며 개별 하수관로가 감당해야 하는 소유역의 유출량을 증가시켜 동일 강우 강도에 대해서 침수 반응을 민감하게 만들 뿐만 아니라 최대 침수 면적과 최대 침수심을 증가시키는 현상을 유발하였다. 따라서 향후에는 하수관로 단순화 기법을 다양한 유역에 적용시켜 하수관로의 전체 저류량을 확인하고 하수관로로의 유입량과 배수량을 정량화하여 비교하는 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 추가적으로 다양한 연구를 통하여 하수관로 단순화 기법에 대한 가이드라인을 구축하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 APCC의 지원을 통해 수행되었습니다.

## References

- Bates, P. D., and De Roo, A. P. J. (2000). "A simple raster-based model for flood inundation simulation." *Journal of Hydrology*, Vol. 236, No. 11, pp. 54-77.
- Chen, A. S., Djordjevic, S., Leandro, J., and Savic, D. (2007). The urban inundation model with bidirectional flow interaction between 2D overland surface and 1D sewer networks. *NOVATECH 2007*.
- Djordjević, S., Prodanović, D., and Maksimović, Č. (1999). "An approach to simulation of dual drainage." *Water Science and Technology*, Vol. 39, No. 9, pp. 95-103.
- Harvey is a 1,000-year flood event unprecedented in scale, The Washington Post, 2017/8/31, [https://www.washingtonpost.com/news/capital-weather-gang/wp/2017/08/31/harvey-is-a-1000-year-flood-event-unprecedented-in-scale/?utm\\_term=.ec5b54c958d6](https://www.washingtonpost.com/news/capital-weather-gang/wp/2017/08/31/harvey-is-a-1000-year-flood-event-unprecedented-in-scale/?utm_term=.ec5b54c958d6).
- Joo, J. G., Yang, J. M., and Kim, J. H. (2013). "Assessment of inundation risk degree for urban areas." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 13, No. 1, pp. 129-136.
- Kim, J., Park, M., Lee, J., and Jun, H. (2012). "An evaluation of inundation risk of urban watershed using data envelopment analysis." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 4, pp. 179-186.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2011). *Abnormal climate report in 2011*, p. 144.
- 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.
- Lee, B., and Yoon, S. (2017). Development of Grid based Inundation Analysis Model (GIAM), *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 3, pp. 181-190.
- Lee, S., Nakagawa, H., Kawaike, K., and Zhang, H. (2016). "Urban inundation simulation considering road network and building configurations." *Journal of Flood Risk Management*, Vol. 9, No. 3, pp. 224-233.
- Lee, S., Noh, S., Jang, C., and Lee, D. (2017). "Simulation and analysis of urban inundation using the integrated 1D-2D urban flood model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 4, pp. 263-275.
- Li, W., Chen, Q., and Mao, J. (2009). "Development of 1D and 2D coupled model to simulate urban inundation: an application to Beijing Olympic Village." *Chinese Science Bulletin*, Vol. 54, No. 9, pp. 1613-1621.
- Noh, S. J., Lee, S., An, H., Kawaike, K., and Nakagawa, H. (2016). "Ensemble urban flood simulation in comparison with laboratory-scale experiments: impact of interaction models for manhole, sewer pipe, and surface flow." *Advances in Water Resources*, Vol. 97, pp. 25-37.
- Pakdimanivong, M. (2016). *Flood damage analysis using integrated urban inundation model in Sadang stream watershed, Korea*. Master's Thesis, Chungnam National University, pp. 31-38.
- Park, J., Kang, T., and Lee, S. (2017). "Evaluation of accuracy depending on pipe network density in urban flood inundation analysis using the SWMM." *The Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 17, No. 1, pp. 71-78.
- Seyoum, S. D., Vojinovic, Z., Price, R. K., and Weesakul, S. (2011). "Coupled 1D and noninertia 2D flood inundation model for simulation of urban flooding." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 138, No. 1, pp. 23-34.

Yoo, D. G., Choi, H. S., and Kim, J. H. (2015). "Applications of EPA-SWMM and FHWA hydraulic toolbox to analyze cause of urban inundation." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 1, pp. 169-180.

Yoon, S. S., Bae, D. H., and Choi, Y. (2014). "Urban inundation forecasting using predicted radar rainfall: case study." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 14, No. 3, pp. 117-126.