

## 건물의 영향을 고려한 이중배수체계기반 침수해석

이정영<sup>1</sup> · 진기호<sup>1</sup> · 하성룡<sup>1\*</sup>

### Analysis of Urban Inundation Considering Building Footprints Based on Dual-Drainage Scheme

Jeong-Young LEE<sup>1</sup> · Gi-Ho JIN<sup>1</sup> · Sung-Ryong HA<sup>1\*</sup>

#### 요 약

본 연구의 목적은 건물의 유무에 따른 도시지역의 침수특성을 이중배수체계기반의 2차원 침수 해석모형을 이용하여 각각 해석하고 해석 결과의 차이를 비교하는데 있다. 이를 위해 LiDAR 측량 기반 1m×1m 해상도의 표고모델과 표고모델 위에 건물의 외벽을 따라 지표수 유입을 억제하는 격자를 생성한 표고모델의 2가지 지형자료를 구축하였고, 2가지 지형조건을 2차원 침수해석모형의 입력 자료로 활용하기 위해 10m×10m 해상도로 re-sampling 하였다. 분석 결과, CCTV 영상에 의한 실측 침수심 자료와 모의값을 비교한 결과, 건물을 고려하지 않은 지형자료를 사용한 경우 침수심이 과소 산출되었으나, 건물을 고려한 경우에는 실측값과 근사하게 모의되었다. 침수심의 차이는 침수 가능 면적의 변화에 따라 침수체적이 변하게 되므로, 지표면으로 유출되는 수문량이 절대량으로 고정된다면 침수 가능영역이 큰 지형자료를 사용한 경우 침수심이 낮아지기 때문인 것으로 판단된다. 한편 침수흔적도와 비교한 침수면적은 두 지형자료 모두 큰 차이를 보이지 않았으나 근사하게 건물을 고려한 경우의 일치도가 높은 것으로 나타났다. 따라서 침수면적과 침수심의 두 가지를 종합적으로 고려한다면, 이중배수체계기반의 2차원 침수해석모형을 활용하여 도시구역의 침수해석을 수행하는 경우, 건물을 고려한 지형자료를 사용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

주요어 : 침수, 지형표고모델, BH(Building Hole), SWMM, 이중배수체계

#### ABSTRACT

This study aims to investigate urban inundation considering building footprints based on dual-drainage scheme. For this purpose, LiDAR data is cultivated to generate two original data set in terms of DEM with 1×1 meter and building layer of the study drainage area in Seoul and then the building layer is overlapped as vector polygon with the mesh data with the same size as DEM. Then, terrain data for modeling were re-sampled to reduce resolution as 10×10 meters. As results, the simulated depth

2014년 8월 25일 접수 Received on August 25, 2014 / 2014년 10월 6일 수정 Revised on October 6, 2014 / 2014년 10월 30일 심사완료 Accepted on October 30, 2014

<sup>1</sup> 충북대학교 도시공학과 Department of Urban Engineering, Chungbuk National University

\* Corresponding Author E-mail : simplet@chungbuk.ac.kr

without considering building footprints has a tendency to underestimate the inundation depth compared to observed data analyzed by CCTV imagery. Otherwise, the simulation result considering building footprints revealed definitely higher fitness. The difference of inundation depth came from the variation of inundation volume which was relevant to inundation extent. If the building footprints are enlarged, the possible inundation depth is increased, which results in being inundation depth higher because hydrological conditions such as rainfall depth are conservational. Otherwise, according to comparison of inundation extents, there were no significant difference but the case of considering building footprint was revealed slightly higher fitness. Thus, it is concluded that the considering building footprint for inundation analysis of urban watershed should be required to improve simulation accuracy synthetically.

**KEYWORDS** : Inundation, Terrain Model, BH(Building Hole), SWMM, Dual-drainage

## 서론

기후변화에 의한 국지성 집중호우가 빈번이 발생함에 따라 최근 우리나라는 도시침수에 의한 피해가 증가하고 있다. 특히 재현빈도가 낮은, 즉 지속시간은 짧은 반면 강수량은 많은 100년 빈도 이상의 강우에 의한 피해가 속출하고 있다. 이와 더불어 급속한 도시화에 따른 도시내 불투수지역의 감소와 과거 관측 강우사상에 근거한 하수관거 설계기준은 이러한 침수피해를 가중시키고 있다.

도시의 침수피해 저감을 위해 하수관거의 설계빈도를 10~30년으로 하되, 국지적 집중호우로 침수우려가 있는 지역은 별도 상향 적용할 수 있다(Ministry of Environment, 2014).

또한 상습침수지역에는 일정 규모 이상의 저류조를 설치하여 순간적인 지표유출수의 유하를 막는 방법을 채택하고 있다. 이와 같은 정량적인 도시 침수피해 저감을 위한 대책은 반드시 정밀도 높은 도시 침수해석이 선행되어야 하며 이에 대한 대안으로 이중배수체계기반의 모형 활용(Djordjevic *et al.*, 1999)과 정밀도 높은 지형자료의 활용(Mark *et al.*, 2004)이 요구되고 있다.

수치해석모형의 발달로 하수관거 내에서의

흐름은 비교적 높은 정확도로 해석할 수 있으나, 지표면 유출수의 경우 박층류 해석의 불확실성과 도시표면의 복잡한 지형구조물에 의한 간섭현상 등으로 정확도를 담보하기 어려운 실정이다. 이에 최근의 도시침수에 관한 연구는 지표면 유출의 해석 정확도를 향상시키기 위한 건물의 처리 등에 관한 연구가 많이 진행되고 있다.

침수해석에 관한 국외의 연구로 Park *et al.*(2014)은 이중배수체계모형과 LiDAR(Light Detection And Ranging) 기반 고해상도 지형자료를 이용하여 소규모 배수구역의 침수해석을 수행하고 그 결과로부터 수두차이에 의한 침수현상의 발생을 규명하였다.

Sanders *et al.*(2008)은 지형자료에서 발생하는 작은 오차가 침수해석 결과에 미치는 영향이 비교적 큰 것을 규명하였고, Shubert *et al.*(2012)는 고해상도 격자를 사용한 2D 침수모형에서 건물을 처리하는 기법에 따른 침수 깊이 및 유속 등이 다양하게 변하고 있음을 규명하고 소규모 건물이 밀집한 지역을 격자형태의 입력자료로 전환시 해상도 및 건물의 방향과 군집화 정도 등에 따라 각각 다른 지표의 수리특성을 보여 일관성 있는 결과가 도출될 수 없음을 밝혔다. 또한 Tsubaki와 Fujita(2013)는 복잡한 건물형태에 맞게 지표면 모

델의 격자를 생성할 경우 의도치 않은 격자가 발생하게 되고 이로 인해 침수 재현력이 저하됨을 밝혔다. 한편 Fewtrell *et al.*(2008)은 지형모델의 해상도가 낮아질 경우 모형의 재현력과 조도계수 등과 같은 매개변수의 일관성이 저하되어 지표면 모델의 해상도가 낮아짐에 따라 침수해석오차가 급격하게 커짐을 밝혔다.

침수해석에 관한 국내의 연구로 Park *et al.*(2013)은 이중배수체계모형을 활용하여 설계강우량의 변화에 따른 하수관거 통수능의 부족을 평가하였고, Lee *et al.*(2013)은 이중배수체계모형을 이용하여 DEM(Digital Elevation Model)과 LiDAR 기반의 지형자료를 활용하여 침수해석을 수행하고 그 모의결과를 실측 침수심과 비교를 통해 LiDAR 자료 기반의 지형자료가 침수해석에 적합하다고 명시하였다. Lee *et al.*(2006)은 GIS를 이용한 침수해석 및 Dual-Drainage 방식의 하수관거모의 모델을 개발하여 지표의 건물특성 고려 없이 월류된 우수의 재유입에 의한 유출만을 모의하였고, Cho *et al.*(2010)은 지표수의 재유입의 관거내로의 재유입 없이 2차원 침수해석에서 건물의 영향만을 분석하였다. Ha *et al.*(2010)은 LiDAR 자료로부터 다양한 해상도의 표고모델을 생산

하여 지형자료의 해상도가 침수해석에 미치는 영향을 분석하였다.

이에 본 연구에서는 이중배수체계기반의 2차원 침수해석모형을 활용하여 건물의 유무에 따른 침수해석결과의 차이를 비교·검토하고자 한다. 대상지역 내 건물의 처리는 Shubert *et al.*(2012)이 제안한 4가지 방법 중 본 대상지역에 적합하다고 판단되는 건물 처리기법을 선정·적용하였다.

## 연구 방법

### 1. 지역의 개황

본 연구의 대상지역은 서울특별시 양천구 신월동의 상습침수지역으로 서울시 서남부를 가로지르는 안양천의 좌안에 위치하고 있다. 양천구의 전체적인 지세는 저평한 구릉지와 한강과 안양천을 중심으로 따라 형성된 배후저습지 지형으로 요약되며 이러한 지세는 서고동저의 경향을 나타낸다. 그림 1은 대상지역을 나타낸 것으로 대상지역은 단독주택지 위주의 전형적인 주거지를 나타내며 대상지의 중심부에 상업시설이 일부 집중되어 있다. 대상지역의 주택지는 약 53%이며 유역면적은 18.24km<sup>2</sup>이다. 그림 2

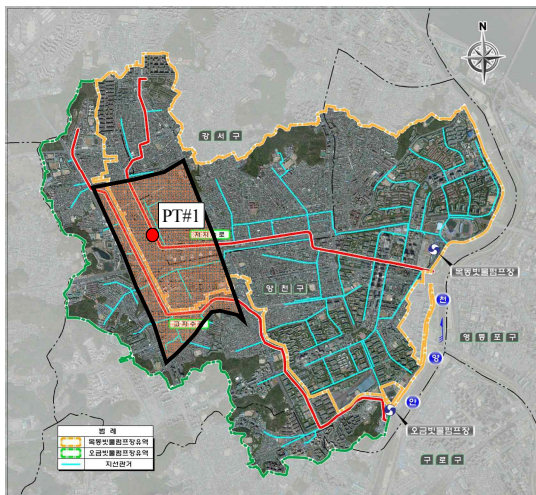


FIGURE 1. Location of study area

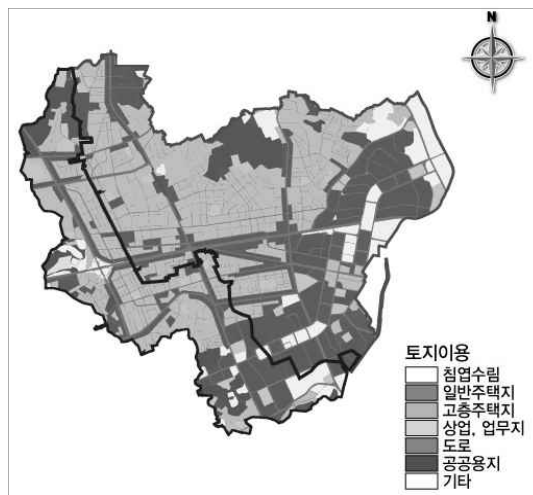


FIGURE 2. Land use map of the study area

는 대상지역의 토지이용형태를 나타내는 것으로 대부분 일반 주택지로 구성되어 있으며 대상구역의 남서쪽에 고층주택지가 위치하고 있는 것으로 나타났다.

일반주택지의 면적은 6.32km<sup>2</sup>, 고층주택지 및 상업 업무지의 면적은 5.10km<sup>2</sup>으로 전체 구역면적의 62.60%에 해당한다.

## 2. 이중배수체계기반 침수 해석모형

이중배수체계는 과거 도시침수에서 활용되던 해석모형의 단점인 지표면 월류량 등이 없어지거나 맨홀에 저류된다는 가정을 보완하기 위해 탄생한 개념으로 지표면 유출수의 관거내 재유입을 설명하기 위해 지표면 유출과 관거 유출을 각각 관련 방정식과 매개변수 등을 통해 해석하고 각 해석결과를 연동하여 모의하는 방식이다(Park *et al.*, 2013). 본 연구에서 활용한 이중배수체계 모형은 XP-SWMM 2D 모형으로 미국 EPA의 SWMM(Storm Water Management Model)모형과 호주 WBN사에서 개발한 2차원 침수해석용 Full Dynamic 엔진인 TUFLOW(Two dimensional Unsteady FLOW)를 결합한 모형이다. 본 모형은 1차원 배수관망 해석은 물론 2차원 지표수 흐름을 해석할 수 있도록 개발되었으며 표고자료 입력시 자체적인 DTM(Digital Terrain Model)을 생성하여 지표수의 동적인 흐름을 모의할 수 있다. 또한 저류지 최적 설계를 위한 별도의 모듈을 제공하고 있으며 재해도 작성을 위한 다양한 위험도 평가기법을 제공한다. 본 모형의 지배방정식은 다음과 같다(식 1).

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - c_f v + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ &+ gu \left( \frac{n^2}{H^{4/3}} + \frac{f_1}{2g\partial x} \right) \sqrt{u^2 + v^2} \\ - \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= F_x \end{aligned}$$

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

여기서,  $\zeta$ 는 수면고도,  $u$ 는 X방향의 깊이에서 평균 유속,  $v$ 는 Y방향 깊이에서 평균 유속,  $H$ 는 수심,  $t$ 는 시간,  $x$ 는 X방향의 거리,  $y$ 는 Y방향의 거리,  $c_f$ 는 코리올리 힘 계수,  $n$ 은 조도계수,  $f_1$ 은 형상손실계수,  $\mu$ 는 모멘텀 수평 확산 계수,  $p$ 는 대기압,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $F_x$ 와  $F_y$ 는 X와 Y방향에서 외부 작용력의 합 XP-SWMM 2D는 지표수의 하수관거로의 재유입이 가능하도록 모형을 설정할 수도 있으며, 특히 침수에 의한 지표수도 재유입 대상에 포함된다. 이러한 지표수는 도로에 설치되어 있는 측구 등을 통해 하수관거로 유입되는데, 국내에는 지표수의 측구유입을 설명할 수 있는 매개변수에 대해 신뢰할 만한 결과가 없어 본 연구에서는 해석모형의 기본 값을 사용하였다.

## 3. 지형자료의 구축

침수해석을 위한 지형모형은 크게 표면의 지표면의 고도자료만을 활용하여 수치모형을 제작하는 경우(DEM: Digital Elevation Model)과 표면 위 점유물 등의 높이를 포함하는 경우(DSM: Digital Surface Model)로 구분할 수 있다. 최근 측량기술의 발달로 인해 LiDAR측량이 가능해짐에 따라 1m×1m 해상도 이하의 DSM을 생산할 수 있게 되었다. 특히 LiDAR 측량 결과의 가공기술이 발달함에 따라 RMSE(Root Mean Square Error) 15cm 미만의 신뢰도 높은 지형자료를 취득할 수 있게 되었다(Néelz *et al.*, 2006; Bales and Wagner, 2009). 이러한 LiDAR자료를 활용하여 도시구역의 침수해석을 수행할 경우 모의결과와의 재현력과 정확성이 높다고 알려져 있다(Lichti *et al.*, 2008).

DSM 기반의 침수해석을 위한 건물의 처리에 관한 기법을 building-resistance, building-block, building-hole, building-porosity 등의 4가지로 분류했고, 그 방법은 다음과 같다(Lee *et al.*, 2013).

- Building-resistance (BR) 방법

건물의 영역에 조도계수 등과 같은 저항계수의 값을 다른 영역에 비해 높게 설정하여 지표수의 유입을 억제하는 방법

- Building-block (BB) 방법

건물의 영역에 균등하게 건물의 지상고를 합성하여 건물을 블록화 시켜 지표수의 유입을 억제하는 방법

- Building-hole (BH) 방법

침수모의를 위한 계산격자 생성 시 건물의 외벽을 따라 유입을 억제하는 격자(Holes)를 생성하여 경계조건을 설정하는 방법

- Building-porosity (BP) 방법

공간적으로 분포된 침수 매개변수(건물 흡인계수, 투과성 등)를 구조물의 위치보다 계산에 용이하도록 개념적으로 침수 해석 모델에 반영시키는 방법

Horritt *et al.*(2011)은 통상적인 침수 해석 시 BR 방법이 비교적 높은 정확도를 보이는 것으로 보고하였으나, Schubert *et al.*(2012)는 BP방법이 가장 높은 정확도를 보이는 것으로 보고하였고 BB/BH방법은 고해상도의 지형자료를 확보할 수 있다면 신뢰도 높은 결과를 도출할 수 있다고 명시하였다. BR방법은 연구 지역에 산재해 있는 모든 건물격자에 일일이 높은 조도계수 값을 설정해야 하기 때문에 입력 자료의 구축에 상당한 시간이 필요하게 되는 단점과 건물의 형상을 정확하게 반영하기 어렵고, BP 방법은 건물에 의해 발생하는 각종 수리계수를 설정해야 하는데 아직 국내에는 이에 대한 연구가 진행되지 않아 이 방법을 적용하기 어렵다. Lee *et al.*(2013)은 소규모 지역에 BB방법 의한 지형자료를 생성하여 건물이 침수특성에 미치는 영향을 해석하고 BB방법의 정확성을 입증하였으나, 금회 분석시 본 대상지역의 높이가 반영된 건물 영역도를 구축하지 못하였기 때

문에 BB방법에 의한 건물처리는 불가능하다.

따라서 본 연구에서 침수해석에 사용하는 지형자료는 건물을 고려하지 않은 DEM과 건물의 정밀한 현상을 반영한 BH기법에 의한 DSM을 사용하여 각 자료를 사용했을 때 침수특성이 변하는 양상을 검토하였다. 특히 Schubert *et al.*(2012)은 BH방법에 대해 다양한 점유면적을 갖는 건물들이 조밀하게 들어서 있는 복합지형에 적합하다고 평가하고 있으므로 본 연구 대상지역에 적합한 방법으로 판단된다.

## 결과 및 고찰

### 1. 침수해석모형의 구축

침수특성의 정확한 분석을 위해 모형 구축 시 해당 유역의 모든 관거를 모의대상으로 설정하였다. 대상유역의 하수관거 연장은 총 31.5km이며 평균 관경은 1,080mm로 분석되었으며, 일부 차집 관거를 제외하면 대부분이 원형 관거인 것으로 조사되었다.

모형의 보정과 검증을 위해 강우 발생시 수위 관측자료를 활용하였으며, 구득한 자료는 서울시로부터 취득이 가능했던 2011년 하수관거내 수위관측 자료이다. 보정을 위한 강우사상은 2011년 7월26일 16:00~24:00일에 관측된 강우사상(강우량 : 110.5mm, 강우강도 : 15.7mm/hr)을 선택하였고, 보정된 모형에 대한 검증은 2011년 7월28일 04:00~11:00일에 관측된 강우사상(강우량 : 60.0mm, 강우강도 : 10.0mm/hr)을 적용하였다.

또한 통수능 부족에 의한 지표면상의 침수특성 분석을 위한 강우사상은 최근 침수가 발생한 2010년 9월 21일에 관측된 강우사상(총강우량: 295mm, 강우강도 : 59.0mm/hr)을 선택하였으며, 침수 관측자료는 경찰청 CCTV 영상자료를 활용하였다.

모형 구축시 활용한 조도계수는 선행연구를 통해 검증된 값을 사용(콘크리트 관 : 0.014)하였으며, 지표수의 맨홀로의 재유입은 모형에서 제공하는 PRE-2009 방법을 활용하였으며 그 식은 다음과 같다(식 2).

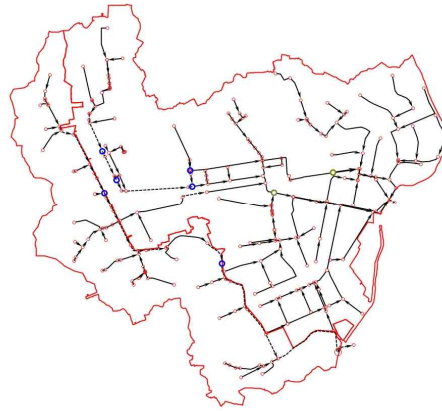


FIGURE 3. Sewer network map

$$Q = A \times (d - h) / t \quad (2)$$

여기서,  $A$ 는 맨홀의 집수면적,  $d$ 는 2차원 중심,  $h$ 는 맨홀의 표고,  $t$ 는 모의시간간격

TABLE 1. Summary of model parameters

Variables	Values
Num. of nodes	260
Area of nodes(ha)	0.01~70.73(AVG: 6.88)
Manning' s n	0.014
Impervious ratio	0.00~0.91(AVG: 0.77)
Num. of conduits	258
Diameter(m)	1.0~3.6(AVG: 2.05)

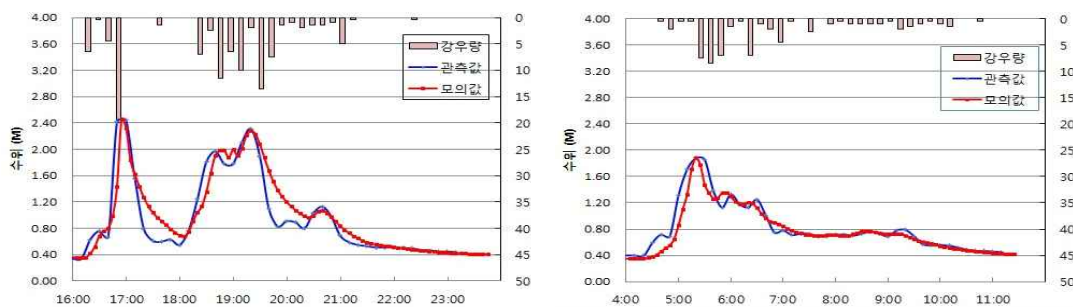
표 1은 대상지역의 모형구축결과의 주요 변

수를, 그림 3은 대상지역의 관거현황 및 모형구축 결과를 나타낸 것으로 대상지의 260개의 맨홀과 258개의 관에 대해 모형을 구축하였다.

## 2. 모형의 검보정

그림 1에서의 1지점(PT#1)은 연구 대상지역내 하수관거에 설치된 수위관측자료(양천구청)를 활용하여 대상유역에 대한 정확한 분석을 위해 적용 모형에 대한 검보정을 실시하였다(그림 4).

모형의 검보정 결과 전체 지점 모두 R가 0.9 이상으로 양호한 재현력을 보이며, 그림 5는 그 결과를 나타낸다.



(a) Calibration(26th July 2011)

(b) Verification(28th July 2011)

FIGURE 4. Calibration & verification results

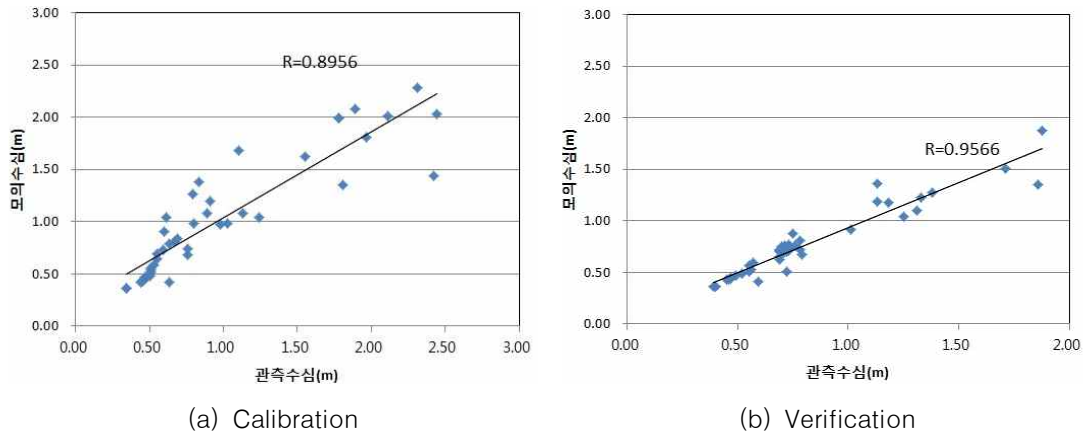


FIGURE 5. The statistics of R value for calibration & verification results

### 3. 지형자료 구축 및 침수해석 결과

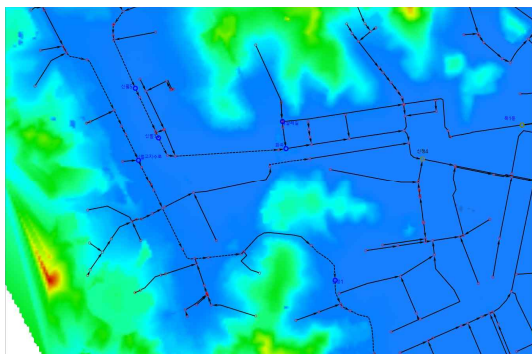
전술한 바와 같이 건물 영향에 따른 대상 구역 내의 침수 특성 분석을 위해 양천구 관내에 침수가 발생한 2010년 9월21일 강우에 대해 모의 하였다.

2차원 침수해석시 본 연구에서는 LiDAR 측량 성과로부터  $1\text{m} \times 1\text{m}$  자료를 구득하여 2차원 침수모의를 위해 침수모의 격자와 동일한 크기의  $10\text{m} \times 10\text{m}$ 로 resampling 수행 후, DEM과 BH기법에 의한 DSM(이하 BH방법)의 2가지 지형자료를 구축하였다(그림 6).

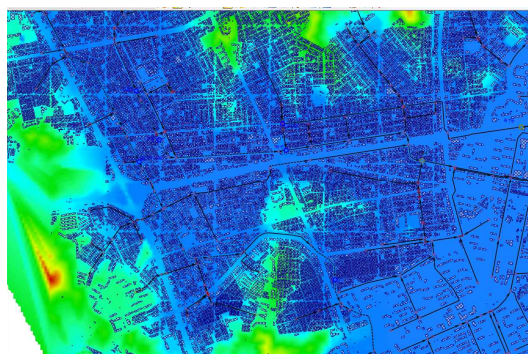
2차원 침수해석모형의 계산격자는  $10\text{m} \times 10\text{m}$ 의 해상도로 총 30,000개 계산 격자가 적용되

었다. 지형자료의 형상으로 보아 지표수는 북서측과 남서측의 고지대의 우수가 인근 지선관거로 유입된 후 서측에서 동측으로 매설된 간선관거를 통해 동남측으로 이송될 것으로 판단된다.

구축된 2가지 지형자료를 이용하여 2차원 침수모형을 수행한 결과, 최대 침수면적 발생하는 시점은 15시40분으로 두 지형자료 모두 동일하게 나타났다. 그러나 침수심의 분포는 지형자료에 종류에 따라 차이가 발생하고 있다. DEM을 활용한 침수심의 분포는 그림 7(a)과 같다. DEM만을 활용한 경우 지표 유출수의 거동은 지표고의 형상에 따라 자연유하하면서 맨홀로 유입·배수되는 형태를 취한다. 반면 BH방법을



(a) DEM



(b) BH method

FIGURE 6. The results of terrain data generation

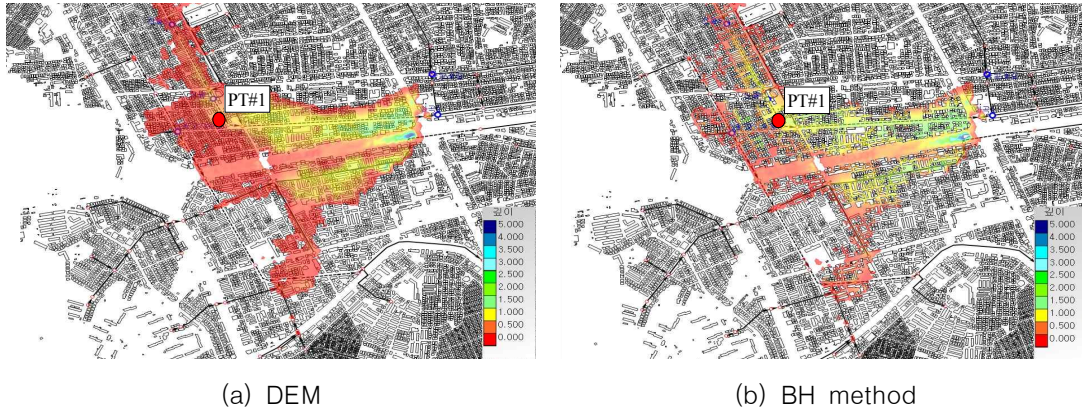


FIGURE 7. Distribution maps of inundation depth

활용한 경우는 지표 유출수가 지표고의 형상뿐만 아니라 건물에 의해 생성된 도로 등을 따라 유하하는 형태를 보인다(그림 7(b)). 지표 유출수의 유하과정 중 우수 관거의 배수능력 이상의 유입유량(지표면 유출량 + 관내 하수량)이 유입되면 초과유량은 맨홀 월류량으로 계산되어 월류 지점에서 인접한 저지대로 지표 유출수가 유입되어 침수가 발생하는 이중배수체계의 침수해석은 공통적으로 적용하였다. 건물의 영향에 따른 침수면적의 형상은 큰 차이를 보이지 않으나 침수심은 BH방법에 의한 지형자료를 사용한 경우가 더 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 특히 대상지역의 북서쪽 도로에서는 약 30cm 이상 BH방법에 의한 침수심이 더 큰 것으로 나타났다. 최대 침수면적은 DEM의 경우 685,200㎡, BH방법의 경우 457,400㎡로 DEM을 적용했을 때 약 1.5배 정도 넓게 나타났다. 표 2는 건물의 영향에 따른 최대 침수면적, 침수심, 침수용량을 나타낸다.

TABLE 2. Summaries of inundation characteristics at inundation peak

Method	volume(㎡)	Area(㎡)	Depth(m)
DEM	313,659	685,200	0.46
BH method	281,228	457,400	0.61

한편 모의 침수심의 정확도 평가를 위해 PT #1 지점의 CCTV 영상을 구독하여 실측 침수심을 도출하고 동시간대의 각 모의 침수심과 비교를 통해 정확도를 평가하였다. 그림 8은 대상지역에서 촬영된 CCTV의 15시 42분 캡처화면으로 지점별 침수심은 45~55cm 인 것으로 추정된다.



FIGURE 8. CCTV data in PT#1 at 15:42

실측 침수심과 비교 결과, BH방법을 활용한 경우가 실측 침수심에 근접한 것으로 나타나 모의 신뢰도가 높은 것으로 나타났으며 DEM을 활용한 경우에는 PT #1지점에서 약 30cm가량 수심이 낮은 것으로 나타났다(표 3). 이는 PT #1 지점이 건물의 이면도로상의 지점으로 상류로부터 유입되는 지표수와 해당 지점의 하



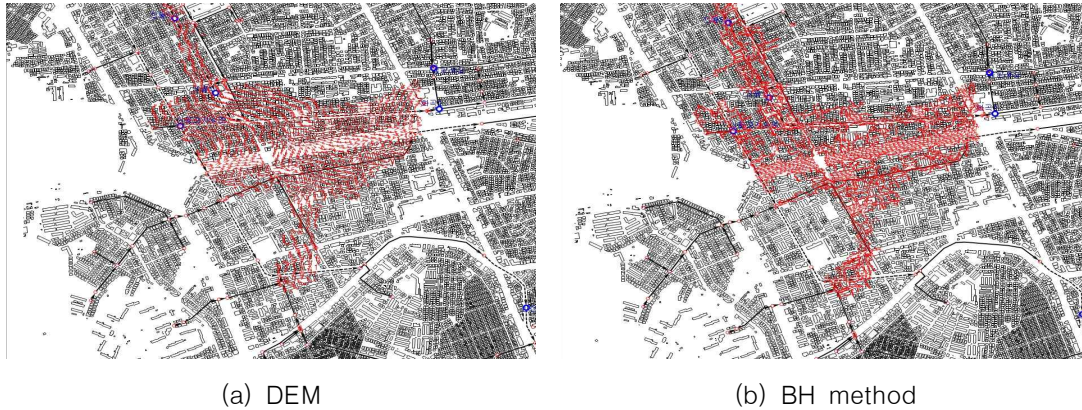


FIGURE 9. Distribution maps of flow direction

수관거에서 월류되는 월류수 등이 합쳐진 지표면 유출수의 유출경로가 점유 건물의 간섭에 의해 원활히 유지될 수 없기 때문이며 또한 전술한 바와 같이 건물 점유로 인해 발생한 침수 가능체적 감소가 침수심 상승의 주요한 원인으로 판단된다. 즉, DEM을 활용한 경우의 침수심은 건물의 영향 없이 지표고에 따라 지표류가 확산되면서 침수면적 계산시 건물의 면적이 침수면적으로 고려되어 전반적으로 침수심이 낮게 모의되는 것으로 판단된다.

4. 지형자료의 종류에 따른 침수면적 비교

건물의 영향에 따른 침수면적의 변화를 비교하기 위해 본 연구에서는 전술한 바와 같이 2010년 9월 21일에 발생했던 침수흔적 조사 결과(그림 10)를 해석결과와 비교하였다. 다만, 본 연구에 활용된 침수흔적도의 경우 해당 지자체의 공무원이 현장을 방문하여 침수유무를 주민에게 묻고 그 결과를 필지 단위로 기록하였기 때문에 실제 침수지역보다 크게 산출되는 경향이 있다.

TABLE 3. Inundation depth at 15:42

Method	Inundation depth(cm)
Observed(CCTV Image)	45~55cm
Simulated	
DEM	0.25
BH	0.60

그림 9는 지형자료별 유속벡터를 나타낸 것으로 DEM의 경우 지형자료의 형상에 따라 일정한 방향성을 보이며 유하하지만 BH방법의 경우 건물에 의한 흐름 간섭현상으로 인해 복잡한 유하패턴을 보이는 것으로 나타났다.

이와 같이 건물은 대상구역의 침수가능면적을 감소시키게 되고 감소된 면적만큼 침수체적이 감소하는 바, 지표면으로 유출되는 강우량이 같다면 침수 가능영역이 큰 지형자료를 사용한 경우에 침수심이 낮아지는 것으로 판단된다.



FIGURE 10. A map of flooding mark

침수흔적도와 일치도 평가는 다음의 식을 이용하여 평가하였다(식 3).

$$F_A = \frac{E_P \cap E_M}{E_P \cup E_M} \quad (3)$$

여기서,  $E_P$ 는 모의 침수면적,  $E_M$ 은 실측 침수면적

만일,  $F_A$ 가 1이라면 완벽하게 일치함을 뜻한다. 또한 과대추정과 과소추정을 평가하기 위해 다음의 두 가지 지표를 추가하였다(식 4).

$$F_{UP} = \frac{E_M - E_P \cap E_M}{E_P \cup E_M}, F_{OP} = \frac{E_P - E_P \cap E_M}{E_P \cup E_M} \quad (4)$$

여기서,  $F_{UP}$ 는 과소 추정,  $F_{OP}$ 는 과대 추정

침수 흔적도에 의한 침수면적은 0.5013km<sup>2</sup>로 주로 대상지역의 간선도로 인근에서 발생하고 있는 것으로 나타났다. 표 4는 건물의 영향 유무에 따른 최대 침수면적을 비교한 것으로 BH방법에 의한 최대 침수면적은 0.4806km<sup>2</sup>로 산출되어 DEM을 활용한 경우보다 신뢰도 높은 것으로 나타났다. 한편 일치도 평가 결과는 표 5와 같다. FA는 BH방법을 적용한 경우가 0.26으로 DEM을 적용한 경우에 비해 약 20%정도 높은 것으로 나타났으나, 과소 추정된 침수면적은 BH방법을 적용했을 때 보다 크게 나타났다. 반면 과대 추정되는 침수면적은 BH방법이 더 적은 것으로 나타났다. 전술한 바와 같이, 침수 흔적도에 의한 침수면적이 통상 과다 산정되는 점을 감안한다면 침수 해석시 건물에 의한 영향을 고려해야 보다 정확한 해석결과를 도출할 수 있음을 의미한다.

TABLE 4. Maximum Inundation extent at 15:40

Method	Inundation area(km <sup>2</sup> )	
Observed	0.5013	
Simulated	DEM	0.7206
	BH method	0.4806

TABLE 5. Errors in validation data and corresponding fit measures

Method	F <sub>A</sub>	F <sub>UP</sub>	F <sub>OP</sub>
DEM	0.23	0.21	0.40
BH method	0.26	0.38	0.36

## 결론


본 연구는 이중배수체계기반의 2차원 침수해석모형을 활용하여 건물의 유무에 따른 침수해석결과와의 차이를 비교·검토하는데 목적이 있다. 이를 위해 이중배수체계기반의 XP-SWMM 2D 모형을 이용하였다. 지형자료는 건물을 고려하지 않은 DEM과 건물을 고려하되 건물 영역을 지표수가 침입할 수 없는 절대영역으로 지정하는 BH방법에 의한 지형자료를 활용하였다.

분석결과, 침수면적의 경우, DEM을 지형자료로 사용한 경우에는 전반적인 침수면적은 실제 침수면적보다 큰 반면, BH방법에 의한 지형자료를 사용한 경우에는 침수면적은 유사하게 나타났다. 또한 침수심의 경우, CCTV를 활용한 실측 침수심과 비교하면, DEM을 지형자료로 사용했을 때는 침수심이 큰 폭으로 과소하게 나타났으나 BH방법을 사용했을 때는 실측값과 근사하게 모의되었다. 이는 침수면적의 변화에 따라 침수체적이 변하게 되므로, 지표면으로 유출되는 수문량이 절대량으로 고정된다면 DEM과 같이 침수 가능영역이 큰 지형자료를 사용한 경우 침수심이 작아질 수밖에 없음을 나타낸다.

따라서 침수면적과 침수심의 두 가지를 종합적으로 고려한다. 이중배수체계기반의 해석모형을 활용하여 도시유역 침수를 해석한다면 건물의 영향을 고려해야하며 사실적인 건물의 묘사 정도가 해석결과와의 신뢰도 향상의 중요한 인자임을 추정할 수 있다.

향후 연구는 대상지역의 건물 밀집도에 따른 지형자료의 구축과 관련하여 침수심, 침수면적, 침수시간에 대한 상세한 연구를 진행하고자 한다.

## 감사의 글

이 논문은 2012 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2011-0028914). 

## REFERENCES

- Bales, J.D. and C.R. Wagner. 2009. Sources of uncertainty in flood inundation maps. *Journal of Flood Risk Management* 2: 139-147.
- Cho, W.H., K.Y. Han and Y.J. Kim. 2010. An evaluation of building effect in 2-dimensional inundation analysis using GIS. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 13(2):119-132 (조완희, 한건연, 김영주. 2010. GIS를 활용한 2차원 침수해석에서의 건물영향분석. *한국지리정보학회지* 13(2): 119-132).
- Djordjevic, S., D. Prodanovic and C. Makximovic. 1999. An approach to simulation of dual drainage. *Water Science and Technology* 39(5):95-103.
- Fewtrell, T.J., P.D. Bates and N.M. Hunter. 2008. Evaluating the effect of scale in flood inundation modelling in urban environments. *Hydrological Processes* 22(26):5107-5118.
- Ha, C.Y., K.Y. Han and W.H. Cho. 2010. 2-D inundation analysis according to post-spacing density of DEMs from LiDAR using GIS. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 13(1):74-88 (하창용, 한건연, 조완희. 2010. GIS를 활용한 LiDAR 자료의 밀도에 따른 2차원 침수해석. *한국지리정보학회지* 13(1):74-88).
- Horritt, M.S. and P.D. Bates. 2011. Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow. *Journal of Hydrology* 253(1-4):239-249.
- Lee, C.H., K.Y. Han and J.S. Kim. 2006. Urban inundation analysis by applying with GIS. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 9(2):115-125 (이창희, 한건연, 김지성. 2006. GIS를 이용한 도시지역 침수해석. *한국지리정보학회지* 9(2):115-125).
- Lee, C.H., K.Y. Han and J.W. Noh. Development of urban inundation analysis model using dual-drainage concept. *Journal of Korean Society of Civil Engineering* 26(4B):379-387 (이창희, 한건연, 노준우. 2006. Dual-Drainage 개념에 의한 도시침수해석모형의 개발. *한국토목학회논문집* 26(4B):379-387).
- Lee, J.Y. and S.R. Ha. 2013. Impact of building blocks on inundation level in urban drainage area. *Journal of Environmental Impact Assessment* 22(1): 99-107 (이정영, 하성룡. 2013. 지표 건물이 도시유역의 침수특성에 미치는 영향. *한국환경영향평가학회지* 22(1):99-107).
- Lichti, D., N. Pfeifer and H.G. Maas. 2008. Terrestrial laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 63:1-3.
- Mark, O., S. Seesakul, C. Apirumanekul, S.B. Aroonnet and S. Djordjevic. 2004. Potential and limitation of 1D modeling of urban flooding. *Journal of Hydrology* 299(3-4):284-299.
- Ministry of Environment. 2014. The guidelines for public sewer facilities installation project. pp.46 (환경부. 2014.

- 공공하수도시설 설치사업 업무지침. 46쪽).
- Nèelz, S., G. Pender, I. Villanueva, M. Wilson, N.G. Wright, P. Bates, D. Mason and C. Whitlow. 2006. Using remotely sensed data to support flood modelling. *Water Management* 159:35-43.
- Park, I.H., J.Y. Lee, J.H. Lee and S.R. Ha. 2014. Evaluation of the causes of inundation in a repeatedly flooded zone in the city of Cheongju, Korea using a 1D/2D model. *Water Science and Technology* 69(11):2175-2183.
- Park, I.H. and S.R. Ha. 2013. An analysis on inundation characteristics of urban watershed according to variation in return period of design rainfall. *Journal of Wetlands Research* 15(4):585-593 (박인혁, 하성룡. 2013. 설계 강우량의 재현 빈도 변화에 따른 도시구역의 침수특성 분석. *한국습지학회지* 15(4):585-593).
- Sanders, B.F., J.E. Schubert and H.A. Gallegos. 2008. Integral formulation of shallow-water equations with anisotropic porosity for urban flood modeling. *Journal of Hydrology* 362:19-38.
- Shubert, J.E. and B.F. Sanders. 2012. Building treatments for urban flood inundation models and implications for predictive skill and modeling efficiency. *Advances in Water Resources* 41:49-64.
- Tsubaki, R. and Y. Kawahara. 2013. The uncertainty of local flow parameters during inundation flow over complex topographies with elevation errors. *Journal of Hydrology* 486:71-87. [KAGIS](#)