



Simulation and analysis of urban inundation using the integrated 1D-2D urban flood model

Lee, Seungsoo^a · Noh, Seong Jin^{c*} · Jang, Cheolhee^b · Rhee, Dong Sop^b

^aDepartment of Climate Application, APEC Climate Center

^bHydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

^cDepartment of Civil Engineering, University of Texas at Arlington

Paper number: 17-019

Received: 23 February 2017; Revised: 5 April 2017; Accepted: 5 April 2017

Abstract

Integrated numerical approaches with physically-based conceptualization are required for accurate urban inundation simulation. In this study, we described, applied and analyzed an integrated 1-dimensional (1D) sewerage system and 2-dimensional (2D) surface flow model, which was suggested by Lee et al. (2015). This model was developed based on dual-drainage concept, and uses storm drains as an discharge exchange spot rather than manholes so that interaction phenomena between surface flow and sewer pipe flow are physically reproduced. In addition, the building block concept which prevents inflows from outside structures is applied in order to consider building effects. The capability of the model is demonstrated via reproducing the past flooding event at the Sadang-cheon River catchment, Seoul, South Korea. The results show the plausible causes of the inundation could be analysed in detail by integrated 1D-2D modeling.

Keywords: Integrated 1D-2D model, Urban inundation, Dual-drainage, Sadang-cheon

1D-2D 통합 도시 침수 해석 모형을 이용한 침수 원인 분석에 관한 연구

이승수^a · 노성진^{c*} · 장철희^b · 이동섭^b

^aAPEC 기후센터 응용사업본부, ^b한국건설기술연구원 수자원·하천연구소, ^cDepartment of Civil Engineering, University of Texas at Arlington

요 지

고정확도의 도시침수 모의를 위해서는 물리적 개념에 기반한 통합적 수치해석이 필요하다. 본 연구에서는 Lee et al. (2015)이 개발한 1차원 하수관망, 2차원 범람 모형의 국내 적용성을 검토하고, 과거 도시 홍수 사상의 침수 원인 분석을 수행하였다. 본 모형은 이중배수 개념에 기반하여 맨홀 대신 집수구를 지표면과 하수관망 사이의 교환유량 산정 지점으로 이용하므로 보다 실제와 유사하게 침수 과정을 모의할 수 있을 뿐 아니라 지표면 범람 해석시 건물에 의한 차단 효과를 고려할 수 있다. 개발된 모형의 적용성은 서울 사당 유역에서 발생한 침수 사상에 대해서 재현 모의를 통해 검증하였다. 적용 결과, 본 연구에서 개발된 모형은 실제 침수 피해 영역을 실제와 유사하게 모의 하였을 뿐만 아니라 침수 원인을 보다 자세히 분석할 수 있는 장점을 보여주었다.

핵심용어: 1D-2D 통합 해석 모형, 도시 침수, 이중 배수, 사당천

1. 서 론

최근 기후변화로 인한 집중 호우의 발생빈도와 강우강도가 증가하고 있다. 이는 급격한 도시화로 인한 도시유역의 불투수층 증가와 맞물려 도시유역의 침수 발생 빈도와 규모를

*Corresponding Author. Tel: +1-817-272-6813
E-mail: seongjin.noh@gmail.com (S. J. Noh)

증가시키고 있다. 인적·물적 자원이 집중되어 있는 도시구역의 특성상 침수가 발생하면 이로 인한 직접적 피해 규모가 비도시지역에 비하여 막대할 뿐만 아니라 교통시스템 마비, 공장 가동 중단, 수인성 질병의 유행 등과 같은 사회경제적 2차 피해를 유발한다.

도시구역의 침수피해를 저감하기 위한 방법은 크게 두 가지로 구분되는데, 우수관거 용량의 확충, 배수펌프장 증설, 하천제방의 보강 그리고 투수층의 비율 증대 등과 같은 구조적 대책과 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 침수원인분석, 실시간 침수예측정보의 생산·전파를 통한 침수 발생 예상 지역의 도로통제, 거주민들의 피난 알림을 통한 피해 예방 등과 같은 비구조적 대책으로 나뉜다. 일반적으로 구조적 대책은 직접적인 침수피해 저감 효과를 볼 수 있다는 장점이 있으나 대규모 예산이 상대적으로 장기간에 걸쳐 투자되어야만 한다는 단점을 가지고 있으며, 비구조적 대책은 상대적으로 적은 비용으로 침수 피해를 저감시킬 수 있으나 효과를 정량화하기 어렵다. 따라서 구조적 대책 수립 이전에 비구조적 방법 중 하나인 고정확도의 수치해석을 통해 침수 취약 지역을 사전에 파악하고 원인을 사전에 분석할 수 있다면 예산 절감 및 효과적인 침수 피해 저감이 가능하다. 하지만, 도시구역은 건물, 도로, 우수관망 등과 같은 다양한 수리수문적 특성을 갖는 인공구조물로 인하여 지형의 높낮이에 따른 강우의 유출 해석을 수행하는 전통적 수리·수문학적 해석기법만으로는 해석의 한계를 가지고 있으므로, 우수관거 및 지표면 양방향의 이중 배수(dual-drainage) 효과를 반드시 고려해야만 정확한 침수 재현 및 분석이 가능하다(Lee et al., 2015).

도시구역의 침수피해 저감을 위한 국내의 연구 사례는 크게 도시구역의 인공구조물이 침수 확산 양상에 미치는 영향을 분석한 연구(Lee et al., 2007; Cho et al., 2011; Son et al., 2016)와 피해 원인 분석을 위한 연구(Shin et al., 2012; Joo et al., 2013; Yoo et al., 2015), 침수 피해 예측에 관한 연구(Kim et al., 2012; Yoon et al., 2014) 그리고 효과적인 우수관거 설계에 관한 연구(Song et al., 2016) 등으로 구분할 수 있다. 과거 이중 배수 개념에 의한 도시 침수 해석 모형의 개발과 적용에 관한 연구(Lee et al., 2006; Lee et al., 2007)가 수행된 적이 있으나 그와 관련 연구가 추가적으로 실행된 사례가 매우 적으며 국내의 경우 일반적으로 신뢰성이 확보되어 있는 상용모형(예를 들어, SWMM, GIS tool 등)을 활용한 연구가 활발하다는 특징을 가지고 있다.

반면, 국외에서는 사용모형을 활용한 연구와 더불어, 침수 해석 방법론 개발에 관한 다양한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 예를 들면, Zhang et al. (2013)은 복잡한 지형에서의 침

수 해석의 효율을 증가시키기 위해 flood-connected domain calculation (FCDC) method 방법을 제안하였다. FCDC 방법은 DEM source와 지형적 관계를 정의하기 위해 삼각형 격자를 이용하며 침수와 연결된 지역을 찾기 위해 구성된다. Yu와 Coulthard (2014)는 FloodMap-HydroInundation2D 모형을 이용, 도시 침수 해석에 있어서 유역 수문학적 매개변수들의 역할을 분석하였다. 연구 결과, 표면 조도계수 등과 같은 내부 매개변수 뿐만 아니라 연구 대상 유역의 외부에서 유입되어 입력자료로 쓰이는 지역의 외부 매개변수들도 침수 해석에 막대한 영향을 미치는 점을 밝혔다. Zhang과 Pan (2016)은 수리·수문학에 바탕을 둔 침수 모형의 해석에 있어서 입력자료의 방대함과 모형 구축의 복잡성과 어려움에 대한 문제를 지적하고 단순하게 사용가능한 몇 가지의 입력자료를 이용하여 빠르게 침수 조건을 결정할 수 있는 GIS기반 urban storm-inundation simulation method (USISM)을 제안하였다. Change et al. (2015)는 도시침수에서 나타나는 독특한 현상인 지상부 흐름(2D)과 우수관거 흐름(1D) 사이의 상호작용을 지표면 상태(투수층, 불투수층)에 따라서 각기 다른 방식으로 모형화 하는 기법을 제안하고, 이를 통해 도시구역의 환경을 더욱 정확하게 반영할 수 있다고 하였다. Saksena와 Merwade (2015)는 DEM 자료의 정확도가 침수 해석 결과에 중요한 영향을 미치나 고해상도 자료를 얻을 수 없는 지역이 다수 존재함을 언급하고 DEM 자료의 수평 수직 해상도가 침수 모형의 결과와 맵핑(mapping)에 미칠 수 있는 영향을 분석하고 저해상도 DEM 자료 이용 시 그 정확도를 향상시킬 수 있는 관계식을 제안하였다. Noh et al. (2016)은 도시구역에서 지표면과 우수관거, 우수관거와 맨홀 사이에서 일어나는 유량 교환현상의 메커니즘을 규명하고 수치모의에 활용하기 위하여 매개변수의 불확실성을 고려한 앙상블(Ensemble) 모의를 통해 유량교환 시 적용 가능한 기법과 계수의 적용 범위에 대해 분석하였다. Leandro et al. (2016)은 도시화된 지역의 강우유출 해석의 가장 어려운 점을 지상부와 우수관거 사이의 복잡한 상호작용과 도시의 주요 특성의 공간적 이질성으로 특정하여 지표면의 공간적 이질성과 건물 타입의 다양성을 고려할 수 있는 방법론에 대한 연구를 수행하고 1) 도시의 공간적 이질성은 평가된 지표면 침수심의 높은 영향에 대해 중간 정도를 가지며 2) 복합적으로 도시의 특성을 더하는 것은 모델에 의해 모의된 동역학적 영향으로 인해 더욱 축적된 영향을 가지며 3) 건물로부터 우수관거로 우수흐름을 연결하는 것은 지표면 침수심에 비선형적 영향을 미치며 4) Open Street Maps 자료는 자연적 투수층의 흐름 방향과 물이 고이는 지역을 정의하는데 효과적임을 보였다.

대부분의 기존 상용모형은 우수관거 통수능 초과 유량이 맨홀을 통해 지표면으로 역류하여 침수를 유발한다는 가정하에 침수 과정을 개념화한다. 즉, 맨홀을 기준으로 한 소유역에서 발생한 표면류가 모두 맨홀을 통해 우수관거로 유입하고 지표면으로의 역류도 맨홀을 통해 이루어진다는 가정이다. 이러한 방식은 도시유역의 유출 해석을 상대적으로 쉽게 할 수 있다는 장점이 있으나, 지표면, 집수구, 우수관거 사이의 유입과 역류의 상호작용을 실제와 유사하게 고려할 수 없을 뿐만 아니라 유입과 역류의 공간적 분포 역시 고려하기 어렵다는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 2차원 지표면 흐름과 1차원 우수관망의 해석을 동시에 수행하여야 하며, 그와 더불어 도시지역에 위치하고 있는 건물의 배치, 도로 등을 종합적으로 고려해야 한다.

본 연구에서는 이중 배수(dual-drainage) 개념에 기반, 1차원 우수관거와 2차원 지표면 흐름을 완전 연동하여 해석하고, 지표면, 집수구, 우수관거, 맨홀 등 도시 유출 요소 간의 흐름 교환을 물리적으로 반영한 1D-2D 통합 도시 침수 해석 모형을 도입하여, 침수피해가 발생했던 서울 사당천 유역의 과거 홍수 사상에 적용하여, 모형의 적합성을 평가하고 침수 원인을 분석하였다. 본 논문의 구성은 2장에서 1D-2D 통합 도시 침수 모형의 개념과 구조 및 수치해석 기법에 대해 기술하고, 3장에서는 모의 수행에 필요한 전처리 과정에 대해서 다룬다. 4장에서는 모의 수행결과와 침수 원인에 대한 분석을 수행하고, 마지막 5장에서는 결론에 대해서 논의한다.

2. 1D-2D 통합 도시 침수 해석 모형

Fig. 1은 본 연구에서 이용된 1D-2D 통합 도시 침수 해석 모형(Lee et al., 2015)의 개념도이며, 화살표는 모형내 각 구성요소간 물의 이동을 나타낸다. 지표면은 투수층과 불투수층으로 구분되며 불투수층에는 건물과 도로 등과 같은 인공구조물이 위치하고 있으며 산지와 같이 지표면이 포장되어 있지 않은 영역은 투수층으로 구분된다. 투수층과 불투수층에 내린 강우는 각각 다른 유출계수(runoff coefficient)가 적용되어 직접유출에 기여하도록 설계하였으며 이에 대한 보다 자세한 설명은 Pakdimanivong (2016)을 참고할 수 있다. 지표면에 내린 강우는 지형의 높낮이에 의해 투수층과 불투수층을 자유롭게 오갈 수 있으며 보통 도로와 인도 사이에 위치하고 있는 집수구(storm drain inlet 또는 gutter)를 통해 차집된다. 집수구의 바로 하단에는 지표면의 집수구와 우수관거를 연결해주는 집수구통(storm drain box)이 위치하고 있다. 집수구통은 다시 우수관거와 연결되어 있으며 우수관거는 맨홀을

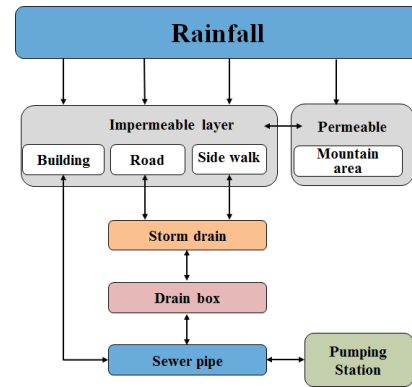


Fig. 1. Concept of 1D-2D coupled urban inundation model

통해서로 다양한 연결관계를 가지고 있으며 최종적으로 배수 펌프장을 통해 배수된다. 다만 건물 옥상에 내린 강우는 집수구와 집수구통을 거치지 않고 우수관거로 직접 배수된다고 가정한다.

2.1 2차원 지표면 흐름 해석 모형

본 연구에서는 복잡한 지형의 표현이 가능하도록 불규칙 삼각망을 이용하여 2차원 동역학파(dynamic wave)의 지표면 흐름을 해석하는 Kawaie (2002)가 제안한 수치해석 기법을 이용하였다. 지배방정식은 2차원 연속방정식과 운동량방정식이며, 다음과 같다.

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

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

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

여기서, h 는 수심, t 는 시간, M 은 x 방향 유량 플럭스($M=uh$, u 는 x 방향 유속), N 은 y 방향 유량 플럭스($N=vh$, v 는 y 방향 유속), r_e 는 지표면에 내리는 단위 면적당 유효유량, q_e 는 지표면과 집수구통 사이의 상호작용에 의한 단위 면적당 교환 유량, g 는 중력가속도, H 는 수위, n 은 매닝 조도계수(Manning's coefficient)이다.

Fig. 2에서와 같이 각 방향의 유량 플럭스(M , N), 및 속도(u , v)를 비구조 격자의 경계(삼각형의 변의 중점)에서, 수심(h)을 비구조 격자의 도심(다각형의 중심)에서 정의하고 Leap-Frog기법을 이용하여 계산을 진행한다.

에 대한 해석 모듈이 필요하다. 또한 우수관망 해석에 있어 가장 중요한 부분이라고 할 수 있는 우수관거 내부 흐름의 경우 수리학적 조건에 따라 자유수면 흐름(Open flow), 압력 흐름(Pressurized flow) 그리고 그 중간 경계인 천이영역 흐름(Transition flow)으로 구분되어 질 수 있다. 이는 각기 다른 두 가지 흐름(Open flow and pressurized flow) 영역에 대해서 개별적인 지배방정식이 이용되어야 함을 의미 한다. 그러나 자유수면 흐름과 압력 흐름을 개별적인 지배방정식으로 해석하는 경우 천이영역 흐름을 구분하는 조건을 정의하기 어려울 뿐만 아니라 천이영역의 흐름을 해석하는데 있어서 수치해석적인 어려움이 따른다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Djordjevic (1999)은 우수관거의 최상단에 가상의 좁고 긴 관(Slot)이 위치하고 있다는 가정을 통하여 자유수면 흐름과 압력 흐름을 하나의 지배방정식으로 해석할 수 있는 Pressimann-slot 모델을 제안하였다. 그 후 대부분의 우수관망 해석 모형에서 Pressimann-slot 모형을 이용한 모의 수행이 이루어 졌으며 본 연구에서도 동일한 개념을 이용하여 우수관거의 해석을 수행하며 그 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_e \quad (9)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(uQ)}{\partial x} = -gA \frac{\partial H_p}{\partial x} - gn^2 \frac{|Q|Q}{R^{4/3}A} \quad (10)$$

여기서, A 는 하수관거의 유효 단면적, Q 는 유량, t 는 시간, u 는 x 방향 유속, H_p 는 관거내의 피에조 수위, n 은 매닝 조도계수, R 은 하수관거의 동수반경이다.

멘홀의 수심을 계산하기 위해서 멘홀 내부에서의 유속을 무시하고 다음의 연속방정식을 이용하여 계산한다.

$$\frac{\partial h_m}{\partial t} = \frac{\sum_{i=1}^M Q_i}{A_m} \quad (11)$$

여기서 h_m 은 멘홀 내부의 수심, M 는 멘홀에 연결되어 있는 하수관거의 개수, Q_i 는 각 하수관거로부터의 유입 또는 유출 유량 그리고 A_m 은 멘홀 바닥의 넓이다.

하수관망의 최하류단 멘홀은 배수펌프장으로 가정하여 우수가 모두 배수 된다는 가정하에 모의를 수행하였다.

집수구통에서의 수심은 멘홀의 수심을 계산하는 방식과 유사하게 유속을 무시하고 다음의 1차원 연속방정식을 이용하여 구한다.

$$\frac{\partial h_{drain}}{\partial t} = \frac{Q_{sd} - Q_{swr}}{A_{drain}} \quad (12)$$

여기서 h_{drain} 은 집수구통에서의 수심, Q_{sd} 는 지표면과 집수구통 사이의 교환유량, Q_{swr} 은 집수구통과 하수관거 사이의 교환유량 그리고 A_{drain} 은 집수구통의 바닥면적이다. 집수구통의 길이와 폭은 각각 20 m와 0.5 m로 가정하였으며 집수구통의 높이를 산정하는 방법은 집수구와 하수관거가 0.2 m 길이의 파이프에 연결되어 있다고 가정하여 연결된 파이프의 부피를 산정한 후 높이로 환산한다. 집수구통의 높이를 산정하는 보다 자세한 방법은 Lee et al. (2015)를 참고 할 수 있다.

2.3 연결부 모형

우수관거로부터 지표면으로의 역류와 지표면에서 우수관거로의 유입은 일반적으로 도로 상에 분포하고 있는 집수구를 통해 이루어진다. 본 연구에서는 지상부 모형과 우수관거 모형을 결합하는 연결부 모형과 맨홀과 우수관거를 이어주는 2가지 종류의 연결부 모형이 이용된다.

연결부 모형은 각 부분별 대표성을 유지하는 하나의 시스템을 해석하기 위해 이용되는 지배방정식으로 동일하게 해석할 수 없는 경우에 서로 다른 두 개의 시스템을 이어주기 위해 필요하다. 예를 들어, 2차원 지상부 모형과 1차원 우수관거 모형의 경우 흐름의 특성이 동일하지 않기 때문에 두 개의 시스템을 각 특성에 맞는 지배방정식을 이용하여 해석을 수행한다. 그러나 지표면에서 우수관거로의 유입, 우수관거로부터 지표면으로의 역류 현상이 발생하는 경우가 존재하며, 서로 다른 두 개의 시스템을 이동하는 유량을 처리해주는 특별한 방식이 필요하게 된다. 따라서 서로 다른 두 개의 시스템을 이동하는 교환유량은 각각의 시스템에 적합한 형태로 변환되어 각 지배방정식의 생성항으로 고려된다. 이와 동일하게 우수관거와 맨홀 사이의 흐름은 수리학적 특성이 다를 뿐만 아니라 여러 개의 우수관거가 연결되어 있는 맨홀 내부에서 일어나는 매우 복잡한 흐름을 1차원 운동량방정식으로 해석할 수 없기 때문에 서로 다른 지배방정식을 이용함과 동시에 연결부 모형을 이용하여 교환유량을 계산한다.

2.3.1 지표면과 집수구통 연결부 모형

지표면에서 집수구통로 유입되는 유량과 집수구통에서 지표면으로 월류하는 유량은 각 수리조건에 따라 위어와 오리피스 상태로 구분되어 질 수 있다. 본 연구에서는 Lee et al. (2012)에 의해 제안된 수정된 위어와 오리피스 공식을 이용하며 그 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \bullet (h_e - h_g)/B_0 \geq 0.5 \text{ 인 경우} \\ & Q = C_{do} \times A_e \sqrt{2g(h_e - h_g)} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \bullet (h_e - h_g)/b_0 < 0.5 \text{ 인 경우} \\ & Q = C_{dw} \times L_e \frac{2}{3} \sqrt{2g} (h_e - h_g)^{1.5} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, Q 는 지표면과 하수관거 사이의 교환유량, C_{do} 는 오리피스 계수, A_e 는 집수구의 넓이, h_e 는 지표면에서 집수구를 포함한 격자의 수심, h_g 는 집수구통의 수심, B_0 는 집수구의 가로와 세로 길이 중 짧은 쪽의 길이, C_{dw} 는 위어 계수, L_e 는 집수구의 둘레길이이다. 집수구통과 하수관거 사이의 교환유량 역시 Eqs. (13) and (14)와 동일한 형태의 공식이 적용된다.

2.3.2 맨홀과 하수관거 사이의 연결부 모형

맨홀과 하수관거 사이의 연결부 모형은 맨홀의 수위와 하수관거 사이의 수위 또는 피에조 수위를 비교하여 낙차식과 월류식을 이용하여 계산할 수 있으며, 본 연구에서는 Lee et al. (2015)에 의해 제안된 다음의 식을 이용한다.

$$\begin{aligned} & \bullet h_m/h_s \geq 2/3 \text{ 인 경우} \\ & Q = 0.35 \times A_s \sqrt{2gh_s} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} & \bullet h_m/h_s < 2/3 \text{ 인 경우} \\ & Q = 0.91 \times A_m \sqrt{2g(h_s - h_m)} \end{aligned} \quad (16)$$

여기서, Q 는 맨홀과 하수관거 사이의 교환유량을 의미하며, A_s 는 맨홀과 연결되어 있는 하수관거에서 우수가 차지하고 있는 단면적, h_s 는 하수관거 내의 수심이다. A_m 은 맨홀에 우수가 차지하고 있는 수심 중 연결된 하수관거의 바닥높이를 기준으로 하수관거가 연장되어 있다고 가정하고 산정한 가상의 단면적, h_m 은 하수관거의 바닥 높이를 기준으로 한 맨홀 내의 수심이다. Eqs. (15) and (16)은 하수관거에서 맨홀로 유량이 유입되는 경우를 산정한 경우이며, 맨홀에서 파이프에 유입되는 유량은 Eqs. (15) and (16)에서 맨홀과 파이프의 위치를 변경하여 적용할 수 있다.

3. 입력자료 구축

3.1 강우입력자료

강우관측 정보는 Fig. 5에서와 같이 대상유역인 서울 사당역 인근의 용산, 서초, 관악, 남현 관측소에서 관측된 기상청 자동기상 관측(AWS, Automated Weather Station) 자료를 이용하였으며 시간적으로는 총 11시간에 걸친 강우 데이터

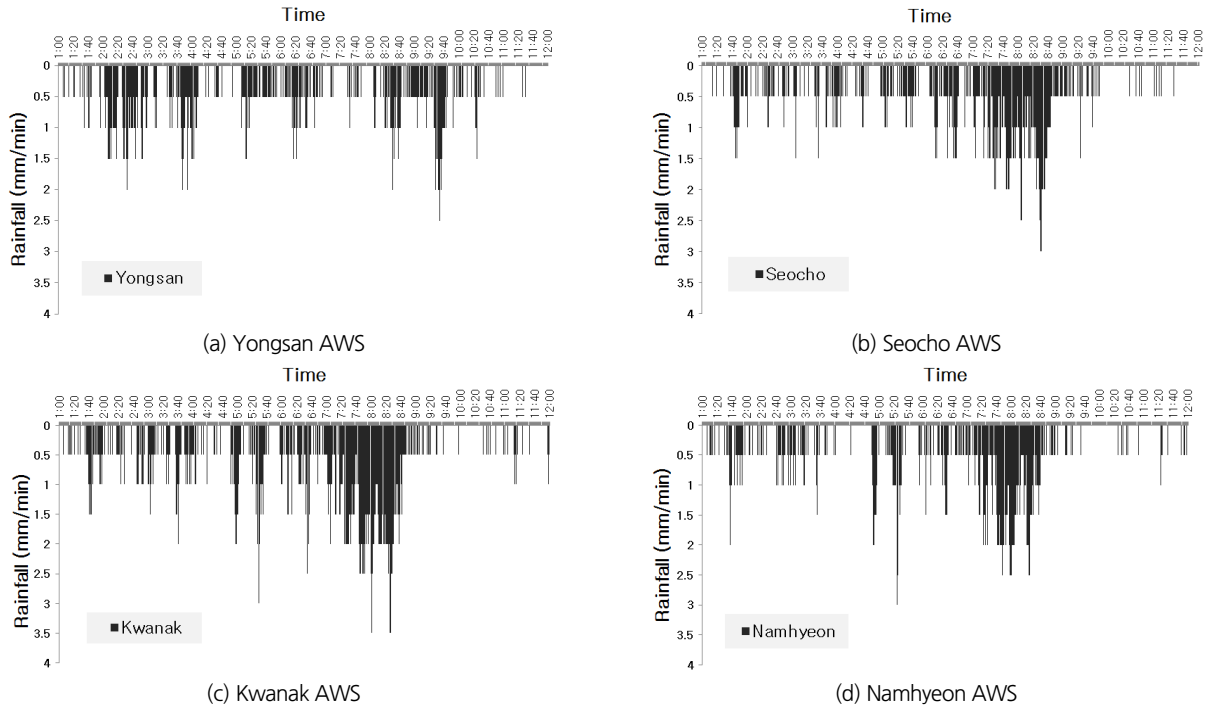


Fig. 5. Control volume



Fig. 6. Position of AWS and Thiessen polygon

를 사용하였다. 또한 강우의 공간적 분포를 고려하기 위해 Fig. 6에서와 같이 Thiessen망을 구축하여 모형에 반영하였다. 수집된 강우데이터는 1분 간격 자료를 이용하여 해당하는 Thiessen망의 영역에서 개별적으로 고려하였다.

3.2 격자 분할

본 연구에서는 GID (<http://www.gidhome.com/>) 프로그램을 사용하여 대상 유역의 불규칙 삼각망을 생성하였다. GID는 수치해석을 위해 필요한 다양한 형태의 격자를 생성해주는 프로그램으로서 2차원 격자뿐만 아니라 3차원 격자도 비교적 쉽게 구현할 수 있다는 장점이 있다. GID를 이용하여 격자를 구축하기 위해서는 먼저 유역 경계, 유역내의 도로망을 표현할 수 있는 토지이용도가 필요하다. 유역내에 분포하고 있는 건물의 경우 개별적인 건물의 형상을 모두 고려하게 되면 격자 간의 간격이 과도하게 좁아지는 문제점이 발생하게 되므로 도로로 둘러싸인 영역은 모두 건물 밀집지역으로 가정하여 격자를 생성하였다. 사당천 유역의 경계를 설정하기 위해서 한강과 반포천의 합류부를 유역의 출구로 설정하여 유역 분할을 수행하였다.

이와 더불어 본 연구에서 수행되는 도시 침수 해석은 도시 지역의 지형에 의한 높낮이뿐만 아니라 도로와 건물 등과 같은 인공구조물을 실제와 유사하게 모의하기 위해 토지이용도별로 개별 속성을 부여하여 집수구의 분포, 건물 밀집 지역의 영향 그리고 토지이용도별 유출계수의 차이 등을 고려하였다. 예를 들면 지상부에서 시작된 유출은 지표면의 높낮이에 따라 흐름방향이 결정되며 집수구를 통해서 우수관거로 유출된다. 이때 지상부에 위치한 집수구는 도로위에 분포하고 있으며 건물 옥상에 떨어진 강우는 건물 옥상에서 직접 우수관거로 유입된다는 가정을 기반으로 한다. 또한 건물 밀집지역

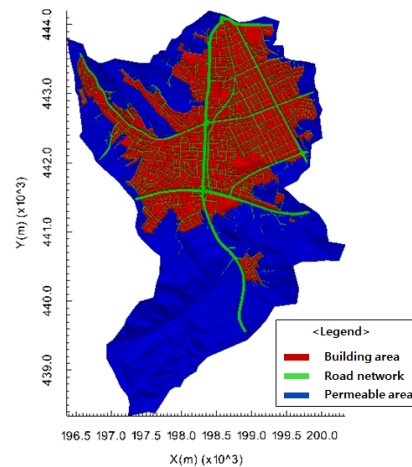


Fig. 7. Mesh generation and landuse of study area (0:Mountained area, 1:Road, 2:Building area)

으로는 지표면에서 발생한 유출수가 침투하지 못하도록 건물 밀집 지역의 지반고를 일괄적으로 10 m씩 상승시켰다. 도시 유역에서 많은 부분을 차지하고 있는 불투수층인 도로와 건물이 아닌 산지 혹은 공터의 경우 투수율이 상대적으로 높아 유출계수를 조정해 줘야 하므로 동일 유역의 격자 임에도 불구하고 각 격자의 속성별로 구분하여 이용하였다. 토지이용도별 생성된 사당천 유역의 격자는 Fig. 7과 같으며 총 305,903개의 삼각격자로 분할되었다. 삼각격자의 크기는 최대 268.66 m²에서 1.26 m²의 분포를 가진다.

3.3 하수관거 자료 처리기법

도시유역 침수 해석에 있어서 필수적인 요소라 할 수 있는 우수관망의 해석을 위해서는 고정확도의 우수관거 데이터의 획득이 중요하다. 우수관망 데이터의 구성 요소로서는 우수관거, 맨홀, 배수펌프장 등이 있으며 각 구성요소별 필요 정보는 Table 1과 같다.

우수관망 데이터는 CAD 형태의 데이터와 GIS 형태의 데이터로 구분되어 질 수 있다. CAD 형태의 데이터의 경우 각 구성요소별 정보를 실제 형상과 유사하게 육안으로 확인할 수 있다는 장점을 가지고 있으나 각 구성요소별 속성 데이터를 수작업을 통해 형성해줘야 하기 때문에 정리 작업에 상당히 시간이 소요된다는 단점이 있다. GIS 데이터의 경우 각 구성요소별 속성 데이터가 디지털화 되어 있어서 비교적 간단히 정보를 수집할 수 있으나 누락된 데이터가 있는 경우 보간에 주의를 기울여야 한다.

본 연구에서는 Fig. 8에서 보여지는 바와 같이 서울시에서 제공하는 GIS 형태의 우수관망 데이터를 이용하였다. 우수관망 데이터는 배수분구 단위로 정리하여 유역의 경계를 벗어난

우수관거가 존재하는 경우 인접한 우수관거와의 연결 관계를 파악한 후 배수분구 내에 영향을 미치지 않는 범위 내에서 연결관계를 설정하였다.

획득한 우수관거 데이터 중 누락된 데이터의 보간과 관련하여 직경이 누락된 경우에는 우수관거와 연결된 맨홀의 직경의 60%로 가정하여 누락된 우수관거의 직경을 보간 하였으며, 지반고가 누락된 경우에는 상·하류단에 연결된 맨홀의

Table 1. Required components and information in the sewerage system

Components	Required information
Sewer pipes	- Shape of pipe - Diameter or height - Length - Height of bottom - Slope - ID of manhole or pump connected in the upstream - ID of manhole or pump connected in the downstream - The number of nodes - Coordinate of nodes
Manholes	- Coordinate of the central point - Area of bottom - Shape of bottom - Height of bottom - The number of pipes connected to manhole - ID of pipes connected to manhole
Pumping stations	- Coordinate of the central point - Height of bottom - Area of bottom - Shape of bottom - The number of pipes connected to pumping station - ID of pipes connected to pumping station - Maximum capacity

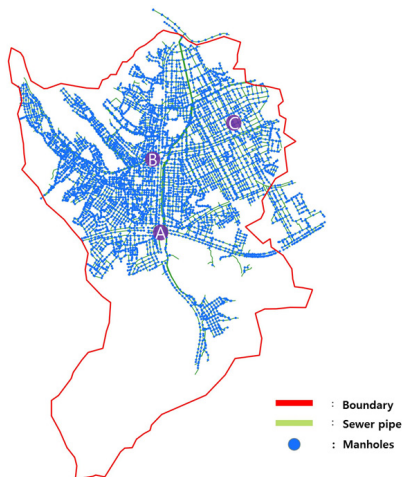


Fig. 8. Distribution of sewer network data

지반고를 기준으로 지반고와 경사를 산정하였다. 또한 상·하류단에 연결된 맨홀의 ID가 존재하지 않는 경우는 우수관거의 양 끝단을 기준으로 가장 가까운 맨홀과 연결되어 있다고 가정하여 누락된 데이터를 보간하였다.

맨홀의 누락 데이터 보간과 관련해서는 바닥의 형상이 누락된 경우 원형으로 가정하였으며, 바닥의 넓이는 연결된 우수관거중 가장 큰 직경을 가진 관거의 1.5배의 직경을 가진다고 가정하였다. 또한 지반고가 누락된 경우에는 연결되어 있는 우수관거중 가장 낮은 지반고를 가진 우수관거의 지반고를 우수관거의 지반고로 가정하였다. 맨홀에 연결된 관거의 개수가 누락된 경우에는 맨홀의 중점 좌표를 기준으로 우수관거의 상·하류단 끝점이 맨홀의 직경 내부에 포함되면 그 우수관거는 맨홀에 연결되어 있다고 가정하였다.

본 연구에서는 우수관거의 간소화 작업을 수행하지 않고 총 5,533개의 맨홀과 8,169개의 우수관거를 이용하였으며 우수관거의 관경은 최대 9 m에서 0.3 m까지 분포한다.

4. 모형의 적용

4.1 대상유역

본 연구의 대상유역인 서울특별시에 위치한 사당역 인근 유역은 2011년 7월 단기간에 내린 집중호우로 인하여 도시침수와 대규모 산사태가 발생하였다. 당시 내린 수도권지역 집중호우로 인하여 한강 유역에 12차례의 홍수예보가 발령되었으며, (Choi et al., 2011) 집중호우 기간(7.26~29) 동안 서울에서만 사망 22명, 부상 39명의 피해가 발생하였다(기상청, 2011). 대상 유역의 크기는 13.04 km²이며 2011년 7월 27일

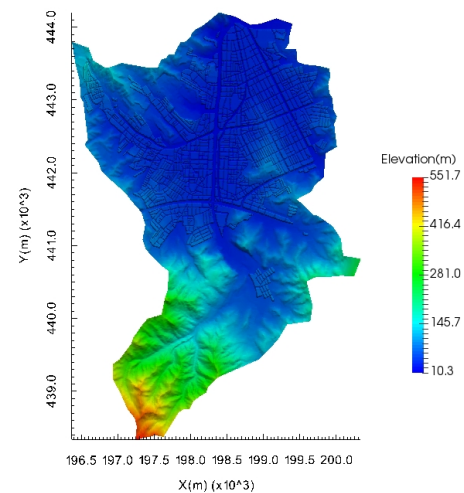


Fig. 9. DEM data of study area

오전 1시부터 12시까지 총 11시간에 걸쳐 모의를 수행하기 위하여 1:5,000 (산지)과 1:1,000 (도시지) 축척의 수치지도를 이용하여 생성한 DEM자료를 이용하였다(Fig. 9).

4.2 지표면 침수 모의 결과

Fig. 10에서는 총 11시간의 모의 중 지표면에서의 침수심이 급격히 증가하기 시작한 오전 6시부터 12시까지 시간에 따른 지표면에서의 침수심 변화를 나타내고 있다. 지표면의 침수심은 오전 6시부터 유역 하단의 산지 쪽에서 발생한 지표면

유출이 유역의 중심부로 흘러들어오기 시작하면서 지표면의 침수심이 증가하기 시작하였으며 오전 8시 35분경에 최대 침수면적이 모의 되었다. 이후 오전 9시 30분경에 도시 중심부에서 최대 침수심을 발생시킨 후 점진적으로 지표면의 우수가 우수관망에 의해 배수되어 침수면적이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 2011년 7월 27일 사당유역에서 발생한 침수는 우수관망의 배수용량 부족과 집수구의 차집능력 부족에서 발생하였다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 Kim *et al.* (2013)에 의해 발표된 침수흔적도

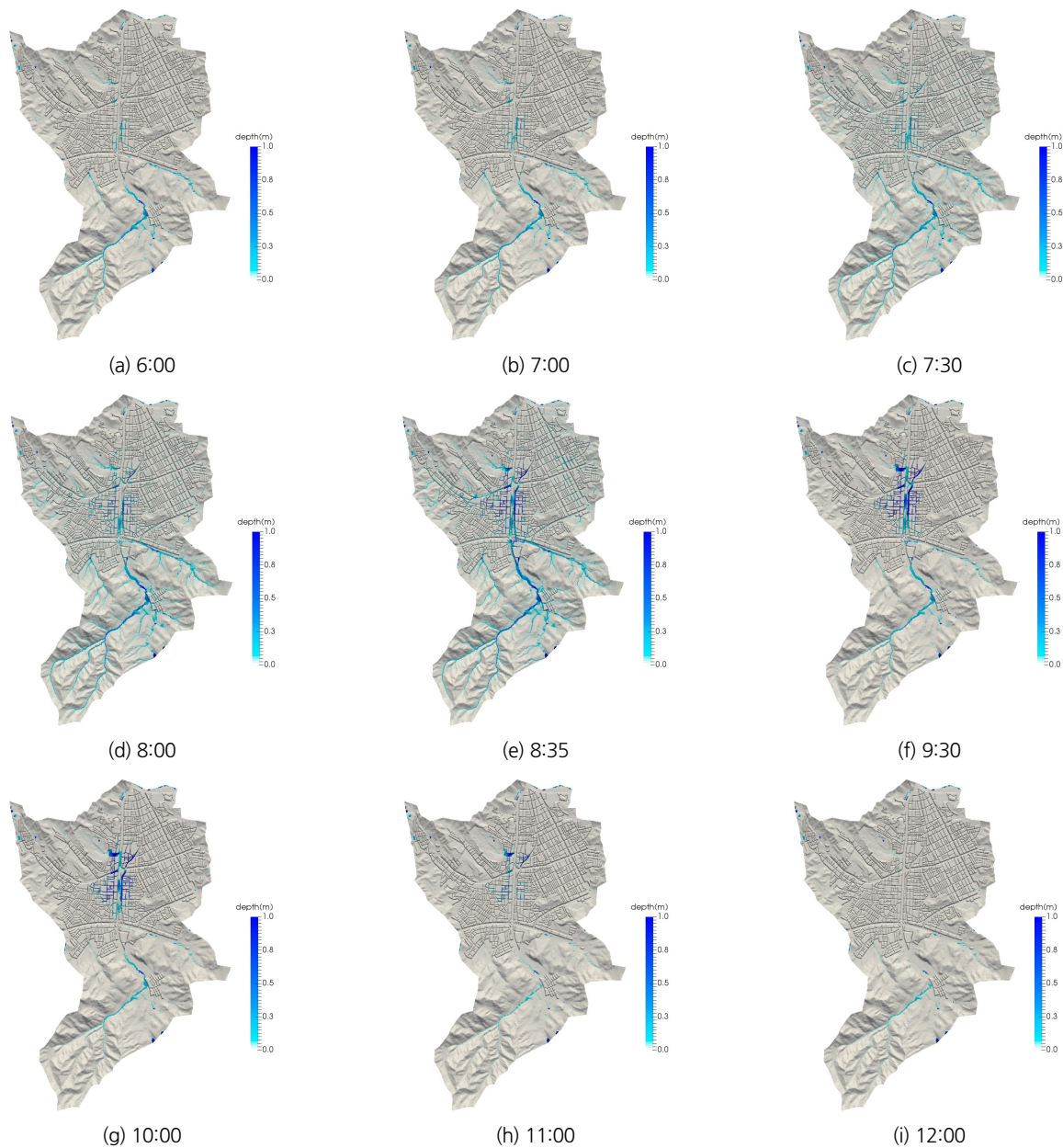


Fig. 10. Time variation of inundated area

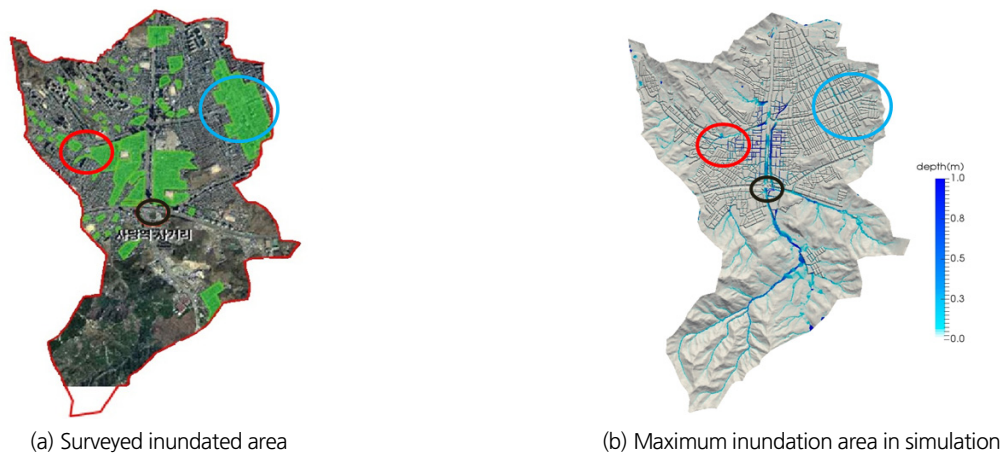


Fig. 11. Control volume

를 이용하여 모형의 정확도 평가를 수행하였다. Fig. 11에는 2011년 7월 23일 발생한 집중호우에 의해 유발된 침수 피해 조사 결과와 본 연구에서 재현된 모의 결과의 비교를 보여준다. 침수피해 흔적도의 경우 피해가 발생된 영역에 대해서 녹색으로 표시를 하고 있으며 침수모의 결과는 각 침수심에 대해서 파란색으로 표현을 하고 있다.

본 연구에서 수행된 침수 재현 결과의 경우 도로로 둘러싸인 영역을 건물 밀집지역으로 가정하여 지반고를 일괄적으로 10 m 상승시켜 모의를 수행하였기 때문에 침수 영역이 과소 평가 되었으나 실제 침수된 도로에 둘러싸인 건물 밀집지역을 침수 영역으로 고려한 침수흔적도에서 가장 많은 영역을 차지하고 있는 사당역 사거리(침수흔적도에서 중앙의 검은색 원으로 표시된 부분) 상단부와 사당역 사거리의 우측상단(침수흔적도에서 최 우측 부분에 빨간색으로 표시된 부분)부분의 침수 영역이 상당히 유사하게 모의 된 것을 볼 수 있다. 사당역 사거리에서 우측상단(침수흔적도에서 파란색 원으로 표시된 부분)에 위치하고 있는 부분 또한 재현 모의 결과에서 실제와 유사하게 모의된 것을 확인할 수 있다.

따라서 본 연구에서 이용된 1D-2D 통합 도시침수 해석 모형은 국내 도시 지역의 침수 결과를 타당하게 모의 할 수 있는 것으로 판단되며 침수 유발 원인을 분석하는데 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 침수원인 분석

Fig. 12는 대상 구역 내 침수심도별 총 침수 면적의 시간별 변화 그래프이다. 시간에 따른 침수 면적은 각 격자별로 계산된 지표면으로부터의 침수심을 10 cm에서 50 cm까지 10 cm 간격으로 구분하고 각 시간별 구역 내 총 침수 면적을 합산하여 계산하였다. 사당구역의 지표면 침수는 강우 발생 후 약 30

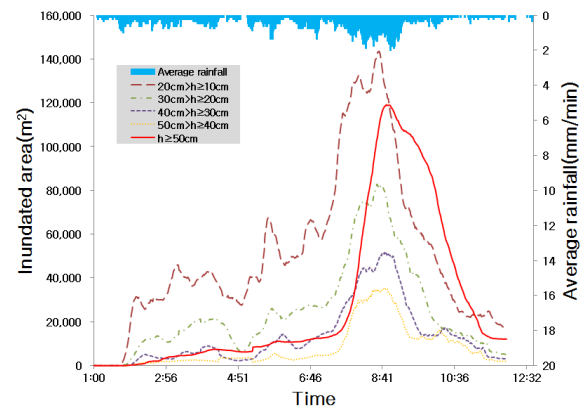


Fig. 12. Time variation of inundation area

분 후인 1:30 (KST) 경부터 10-20 cm의 침수심으로 발생하였다. 최초 침수 발생 이후 누적 강우량에 비례하여 침수심이 증가하였다. 모의 결과중 주목할 부분은 시간이 증가함에 따라 각 깊이별 침수심이 증가하는 경향이 비슷한 변화 양상을 보이지만, 50 cm 이상의 침수심은 최대 강우 강도가 발생한 7시 이후에 급격히 증가하였다는 점이다. 이는 단순히 강우강도 발생에 따른 지표면 유출량으로 설명할 수 없으며 도시유역 유출의 특성에 따른 지표면과 우수관망 사이의 교환유량의 변화에 대한 분석이 필요하다. Fig. 13은 지표면과 집수구통 사이에서 발생한 교환유량의 시간별 변화 그래프이며, 양(+)의 값은 각각 지표면으로부터 우수관거로의 이송 유량(녹색선)과 우수관거로부터 지표면으로의 이송 유량(적색선)이며, 음(-) 값은 반대로 이동한 양이다. Fig. 13에서 7:00 (KST) 이후 우수관거에서 지표면으로 역류하는 유량(-)이 급격히 증가하는 것으로 모의되었다. 이는 우수관망이 배수시킬 수 있는 유량을 지표면에서 우수관거로 유입된 유량이 초과한 것을 의미하

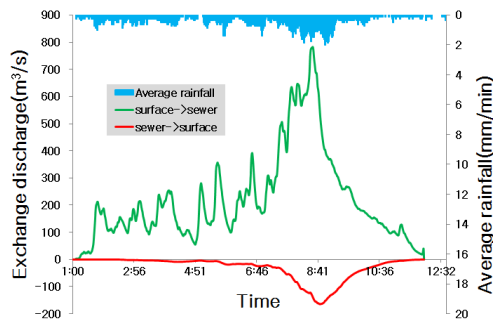
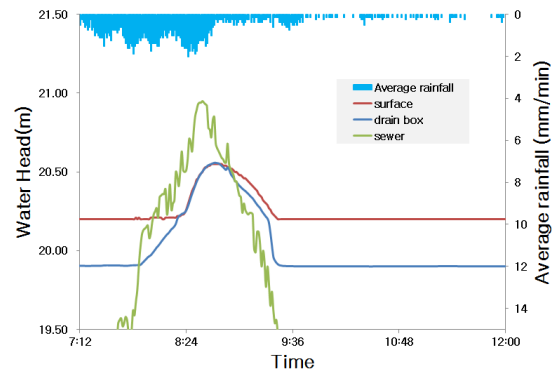


Fig. 13. Time variation of exchange discharge

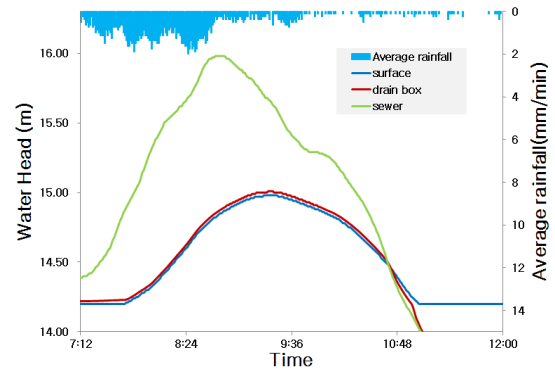
며 우수관망에서 역류한 유량이 도로가 분포하고 있는 영역의 침수심 증가에 직접적으로 기여하여 7시 이후 50 cm 이상의 침수심을 발생시킨 것으로 분석되었다. 이는 다시 말하면 복잡한 도시구역의 지표면과 우수관망 사이의 유량교환은 일방적인 유입 또는 역류가 발생하는 것이 아니라 지표면과 우수관망의 수리학적 조건에 의해 공간적으로 매우 복잡한 상호작용이 이루어짐을 의미한다.

또한 본 연구에서는 도시구역의 유출과 역류 역학관계 분석을 위해 Fig. 14의 A, B, C로 표시된 영역에서 시간에 따른 우수관거의 피에조 수두(piezometric head), 집수구의 수위 그리고 지표면의 수심의 변화를 표시하였다. Fig. 14의 (a)는 사당사거리에 위치하고 있으며, 지형적으로 산지에서 내려온 지표면 유출에 직접적으로 영향을 받기 때문에 산지에서 내려온 유출량이 지표면 수심증가에 직접 기여를 한다. 또한 산지에서 내려온 유출량이 우수관거로 직접 유입되므로 우수관거의 피에조 수두의 변화가 상대적으로 불안정한 것을 확인할 수 있다. Fig. 14의 (b)는 사당구역의 최종심부에 위치하고 있어 집표면 유출 및 우수관거를 통한 유출량의 집중현상으로 인하여 매우 높은 우수관거의 피에조 수두 변화를 확인할 수 있다. 또한 Fig. 14의 (c)는 상대적으로 도시영역의 외곽에 위치하고 있을 뿐만 아니라 주변부에 산지 등 지표면 유출에 직접적으로 기여하는 영역이 위치하고 있지 않아 다소 낮은 피에조 수두의 변화와 지표면 침수심 변화를 보여주고 있다.

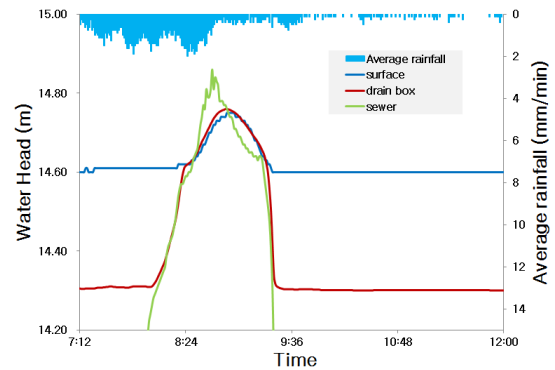
따라서 2011년 7월 27일 사당구역에서 발생한 침수는 우수관망의 내수배제 불량에 의해 발생한 것으로 판단되며 향후 이러한 피해를 예방하기 위해서는 등류상태 하에서 수행되는 우수관거의 최대 배수용량 산출과 더불어 부등류 상태 하에서 각 우수관거가 배수 시킬 수 있는 배수용량을 산출 하는 것이 추가적으로 고려되어야 할 것이다. 또한 Fig. 14에서 주목할 점은 우수관거, 집수구통 그리고 집수구로 이어지는 배수 또는 역류 프로세스에 있어서 비록 우수관거의 피에조 수두가 지표면 수심에 비하여 상당히 높다 하더라도 집수구통의 영향으로



(a) Position A



(b) Position B



(c) Position C

Fig. 14. Temporal variation of water head in drain box

인하여 지표면 유출에 기여하는 정도가 낮아진다는 점이다. 이는 추후 보다 심도 깊은 분석을 통하여 도시 침수 해석에 있어서 집수구통의 역할에 대한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 이중 배수(dual-drainage) 개념에 기반, 1차원 우수관거와 2차원 지표면 흐름을 완전 연동하여 해석하고,

지표면, 집수구, 우수관거, 맨홀 등 도시 유출 요소간의 흐름 교환을 물리적으로 반영하는 1D-2D 통합 도시 침수 해석 모형(Lee et al., 2015)을 이용, 서울 사당천 유역에서 발생한 과거 도시 침수 사상을 모의하여 적용성을 검증하고 침수 유발 원인에 대해 분석하였다. 2011년 7월 27일 침수 사상 모의 결과, 실측 조사 자료와 상당히 유사한 결과를 보였으며, 본 연구로부터 확인된 모형의 장점은 다음과 같다.

- 1) 불규칙 격자망과 토지이용도를 활용하여 도로와 건물, 산지 등과 같이 도시 유역의 유출에 영향을 미치는 요소의 수문 및 수리적 특성을 고려하는 것이 가능하다.
- 2) 도시유역의 인공구조물(도로, 건물 등)이 침수 확산에 미치는 영향을 물리적으로 유사하게 모의 가능하다.
- 3) 지표면과 우수관거의 완전 연동 해석을 통해, 우수관거 통수능 초과 시에만 침수 발생 재현이 가능한 순차적 침수 해석의 한계를 극복하여, 도시 유역의 침수 특성을 시공간적으로 실제와 유사하게 재현 가능하다.
- 4) 우수관거-집수구통-지표면 사이의 피에조 수두 변화의 확인이 가능하여 보다 자세한 침수 원인 분석이 가능하다.

따라서 본 연구에서 이용된 1D-2D 통합 도시 침수 해석 모형은 향후 도시유역 침수 유발 원인을 보다 자세히 규명하여 개선 방향을 제시하는데 이용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서는 도시유역에서 지표면과 우수관거를 연결해주는 집수구통의 역류 완충 효과를 일부 확인하였으며, 향후 보다 심도 깊은 분석을 통하여 도시 침수에 미치는 영향과 기능에 대한 분석이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 APCC의 지원과 한국건설기술연구원 주요사업 “도심지 홍수예방(Smart Flood Management) 연구개발”과 제의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. This material is partly supported by the National Science Foundation (NSF) under CyberSEES-1442735.

References

Chang, T. J., Wang, C. H., and Chen, A. S. (2015). “A novel approach to model dynamic flow interactions between storm sewer system and overland surface for different land covers in urban areas.”

Journal of Hydrology, Vol. 524, pp. 662-679.

Cho, W. H., Han, K. Y., Hwang, T. J., and Son, A. L. (2011). “2-D inundation analysis in urban area considering building and road.” *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 11, No. 5, pp. 159-168.

Choi, S. J., Kang, S. K., Han, S. J., and Lee D. R. (2011). “Investigation of urban inundation damages due to heavy rainfall-focus on Ganam area in Seoul.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Water for future, Vol. 44, No. 10, pp.25-29 (in Korean).

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.

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.

Kawaike, K. (2002). *Study on Flood analysis method in urban area and its application to water resistance evaluation (Doctoral dissertation)*. University of Kyoto (in Japanese).

Kim, S. G., Cho, W. C., and Ahn, J. H. (2013). “Urban flood modeling 1D/2D couple model considering surface runoff.” *Presented at Korea Water Resource Association Conference*, Korea.

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 (2011). *Abnormal climate report in 2011*. 144 pp.

Leandro, J., Schumann, A., and Pfister, A. (2016). “A step towards considering the spatial heterogeneity of urban key features in urban hydrology flood modelling.” *Journal of Hydrology*, Vol. 535, pp. 356-365.

Lee, C. H., and Han, K. Y. (2007). “GIS-based urban flood inundation analysis model considering building effect.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 3, pp. 223-236.

Lee, C. H., Han, K. Y., and Choi, K. Y. (2006). “Development of urban inundation analysis model using dual-drainage concept,” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers B*, Vol. 26 No. 4B, pp. 379-387.

Lee, S., Nakagawa, H., Kawaike, K., and Zhang, H. (2012). “Study on inlet discharge coefficient through the different shapes of storm drains for urban inundation analysis.” *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol. 68, No. 4, pp. I_31-I_36.

Lee, S., Nakagawa, H., Kawaike, K., and Zhang, H. (2015). “Urban inundation simulation considering road network and building configurations.” *Journal of Flood Risk Management*, Vol. 9, No. 3.

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, 25-37.

- Pakdimanivong, M. (2016). *Flood damage analysis using integrated urban inundation model in sadang stream watershed, Korea (Master dissertation)*. Chungnam National University, Daejeon.
- Saksena, S., and Merwade, V. (2015). "Incorporating the effect of DEM resolution and accuracy for improved flood inundation mapping." *Journal of Hydrology*, Vol. 530, pp. 180-194.
- Shin, D. S., Park, J. B., Shon, T. S., and Jo, D. J. (2012). "Preventive measures assessment to prevent flooding complex underground space through hydraulic model experiment." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 4, pp. 59-65.
- Son, A. L., Kim, B., and Han, K. Y. (2015). "A study on prediction of inundation area considering road network in urban area." *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 35, No. 2, pp. 307-318.
- 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.
- Yu, D., and Coulthard, T. J. (2015). "Evaluating the importance of catchment hydrological parameters for urban surface water flood modelling using a simple hydro-inundation model." *Journal of Hydrology*, Vol. 524, pp. 385-400.
- Zhang, S., and Pan, B. (2014). "An urban storm-inundation simulation method based on GIS." *Journal of Hydrology*, Vol. 517, pp. 260-268.
- Zhang, S., Wang, T., and Zhao, B. (2014). "Calculation and visualization of flood inundation based on a topographic triangle network." *Journal of Hydrology*, Vol. 509, pp. 406-415.

