

건물영향을 고려한 GIS기반 도시침수해석 모형

GIS-based Urban Flood Inundation Analysis Model Considering Building Effect

이 창 희* / 한 건 연**

Lee, Chang Hee / Han, Kun Yeun

Abstract

Recently in urban area flood damages increase due to local concentrated heavy rainfall. Even in the cities where stormwater drainage systems are relatively well established flood damage still occurs because of the capacity limitations of the existing stormwater drainage systems. When the flood exceeds the capacity limitation of the urban storm sewer system, it yields huge property losses of public facilities involving roadway inundation to paralyze industrial and transportation system of the city. To prevent such flood damages in urban area, it is necessary to develop adequate inundation analysis model which can consider complicated geometry of urban area and artificial drainage system simultaneously. The Dual-Drainage model used in this study is the urban inundation analysis model which combines SWMM with DEM based 2-dimensional surface flood inundation model. In this study, the dual drainage model has been modified to consider the effect of complex buildings in urban area. Through the simulation of time variable inundation process, it is possible to identify inundation alert locations as well as to establish emergency action plan for the residential area vulnerable to flood inundation.

keywords : Inundation analysis model, Urban area flood, Effect of complex buildings, SWMM

요 지

최근에 들어 도시지역에서는 국지성 집중호우에 의한 홍수피해가 증가하고 있다. 심지어 우수설비 시스템이 비교적 잘 갖추어진 개발 지역에서도 기존의 우수설비시스템의 용량이 초과되어 큰 침수피해가 발생하고 있다. 이로 인해 건물, 공공기반시설 등 재산 및 인명 등에 있어 많은 피해를 야기하고 있으며, 도로의 침수는 운송 시스템의 기능에 문제를 일으키게 되어 도시의 산업과 기능을 마비시킨다. 이러한 도시지역 홍수에 대비하여 도시지역의 복잡한 지형 형상과 인위적 배수시스템을 함께 고려하여 해석할 수 있는 적절한 침수해석모형이 필요하다. 본 연구에서는 배수시스템 해석 모형인 SWMM모형과 도시침수해석 모형인 DEM 기반 침수해석모형을 통합하고, 두 모형간의 유량의 전송과정을 수리학적 관계를 고려한 이중 배수(Dual-Drainage) 개념에 의한 도시침수해석모형을 이용하였다. 본 연구에서는 이중배수 침수해석모형을 수정하여 건물의 영향을 고려할 수 있도록 구성하였다. 본 모형의 개발로 침수상황의 시간별 진행과정을 분석함으로써 도시홍수에 대한 침수위험지점 파악 및 홍수 취약지점에서의 긴급대피 계획수립 등에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 침수해석모형, 도시지역홍수, 건물영향, SWMM

* 서울시정개발연구원 디지털도시부 초빙부연구위원

Guest Associate Research Fellow, Dept. of Digital City, Seoul Development Institute, Seoul 137-071, Korea
(e-mail: changhee@sdi.re.kr)

** 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea
(e-mail: kshanj@knu.ac.kr)

1. 서 론

1.1 연구목적 및 내용

최근에 들어 도시지역에서는 국지성 집중호우에 의한 홍수피해가 증가하는 경향이 있으며, 우수설비 시스템이 비교적 갖추어진 개발 지역에서도 기존의 우수설비시스템의 용량이 초과되어 큰 침수피해가 발생하고 있다. 홍수규모가 배수시스템의 용량을 초과할 경우 건물, 공공기반시설 등 재산 및 인명 등에 있어 많은 피해를 야기하고 있으며, 도로의 침수는 운송 시스템의 기능에 문제를 일으키게 되어 도시의 산업과 기능을 마비시킨다. 이러한 도시지역 홍수에 대비하여 도시지역의 복잡한 지형 형상과 인위적 배수시스템을 함께 고려하여 해석할 수 있는 침수해석모형의 개발이 필요하다.

MOUSE와 SWMM(Storm Water Management Model) 계열 모형들(EPA SWMM, MIKE SWMM, XP SWMM, PC SWMM)(Huber and Dickinson, 1988)은 도시유출해석에 많이 이용되고 있다. 그러나, 이들 모형들은 과부하된 유입구에서의 범람되는 홍수유량곡선만을 제공하며 지표면 범람 지역, 수심, 및 침수기간에 대한 상세한 정보를 제공하지 못한다. 따라서, 도시배수체계모형과 도시침수모형에 대해 상호연계를 수행할 수 있는 새로운 도시범람 모형이 도시지역에서 홍수로 인한 침수해석을 모의하는데 필요하다.

Djordjevic et al.(1999), Hsu et al.(2000), Schmitt et al.(2004), Mark et al.(2004), Nasello and Tucciarelli (2005)을 포함한 많은 연구자들이 지표면과 지하배수망을 함께 고려하여 홍수해석을 수행할 수 있는 기법을 제시하였다. DDSWMM(AMK Associates Int. Ltd., 2004)은 지상의 도로망과 지하의 배수망을 통합하여 홍수해석을 수행할 수 있도록 개발되었고, Smith(2006)는 배수시스템을 이용한 도시홍수 해석에 대한 최근 연구 동향을 정리하였다.

배수시스템 해석 모형의 계산결과를 이용하여 침수 해석을 수행하는 연계모형의 경우 침수초기 월류지점으로부터의 침수진행과정을 잘 모의할 수 있다. 그러나, 지형의 기복이 있는 유역에서 배수시스템을 통한 지표침수유량의 배수과정을 고려하지 못함으로 인하여, 월류발생이 끝난 후 일부지점이 계속 침수된 채 있게 된다(이창희 등, 2006a). 이러한 연계모형의 한계로 인하여 두 모형의 통합모형이 필요하다. 즉, 강우 혹은 월류 유량으로 발생한 지표유량 중 일부가 과부하가 발생하지 않는 유입구 지점을 통과할 때 배수시스템으로 유입되는 것을 고려할 수 있고, 유입된 유

량은 배수시스템 내의 흐름에 반영되도록 배수시스템과 침수해석모형을 통합한 모형 개발이 필요하다. 그러기 위해서는 지표면과 배수시스템에 대한 수리학적 관계를 정립하여야 한다. 일반적으로 배수시스템 해석 모의를 수행할 때 배수구역내의 모든 관로와 유입구에 대한 제원을 준비하고 수집하기에는 자료가 너무 방대하고 시간과 비용이 많이 소요되므로, 대표 간선으로 구축된 배수망에 대해서 모의가 수행된다. 그러므로 대표 간선으로 구축된 배수시스템과 지표유량의 관계에 대한 수리학적 관계를 잘 설명할 수 있는 침수해석 모형이 필요하다. 한편, 도시지역에서 지표류 해석시 홍수유량이 전파될 때의 흐름은 건물의 영향을 받게 된다. 따라서, 건물의 영향은 도시지역의 홍수 범람해석에서 중요한 부분이 된다.

본 연구에서는 배수시스템 해석 모형인 SWMM모형과 도시침수해석 모형인 DEM 기반 침수해석모형(이창희 등, 2006a)을 통합하고, 두 모형간의 유량의 전송과정을 수리학적 관계를 고려한 이중배수(Dual-Drainage) 도시침수해석모형(이창희 등, 2006b)을 수정하여 건물의 영향을 고려할 수 있는 도시침수해석모형을 개발하였다.

본 모형의 적용을 위한 대상 배수구역으로는 과거 침수 기록이 있는 지역으로서 우수지의 수위 상승 및 관거용량 부족에 의한 침수가 빈번히 발생한 도립 배수구역에 대해서 적용하였다. 본 모형의 개발로 침수상황의 시간별 진행과정을 분석함으로써 도시홍수에 대한 침수위험지점 파악 및 주민대피지도 구축 등에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

1.2 기본가정 및 제약사항

본 연구에서 적용된 기본가정 및 제약사항은 다음과 같다.

- ① 각 배수구역의 배수시스템은 주요간선으로 구축되었고, 각 소유역의 유출량은 주요 간선에 위치한 맨홀로 유입되는 것으로 가정하였다.
- ② 도시지역 침수 모의과정에서 침수는 배수시스템의 맨홀에서 월류가 발생하면서 시작되고, 월류가 발생하는 맨홀에서부터 침수유량이 전파되어 가는 것으로 가정하였다.
- ③ 건물의 영향에 대해서는 건물내로의 물의 유입, 건물의 방향성과 밀집도에 대한 영향에 대한 고려는 하지 않았고 건물이 차지하는 점유면적을 이용한 침수과정이 모의되었다.

2. 건물영향을 반영한 이중배수 침수해석모형

2.1 이중배수 침수해석모형의 개념

본 연구에서는 이중배수 도시침수해석모형(이창희 등, 2006b)을 이용하였고, 건물의 영향을 반영할 수 있도록 모형을 수정하였다. 이중배수 도시침수해석모형은 1차원 배수시스템 해석모형과 2차원 지표침수해석모형이 통합된 도시침수해석모형이며, 배수시스템에서의 범람유량을 산정하고 이로 인한 지표면 침수 해석을 실시한다. 지표 침수 유량 중 일부는 월류가 발생하지 않는 유입구 지점을 통과할 때 다시 배수시스템으로 유입되는 것을 고려함으로써 재유입되는 양을 산정하고 유입된 유량은 배수시스템 내의 흐름에 반영된다. 모형의 구성은 다음과 같으며, Fig. 1은 이중배수 도시침수해석 모형의 개념도이다.

(1) 수문학적 강우-유출 해석 모형

수문학적 강우-유출 해석 모형은 각 소유역의 맨홀로 유입되는 홍수량을 산정하게 된다. 본 연구에서는 비선형 저류 방정식을 이용하는 미국 환경보존국에서 개발된 우수관리모형인 SWMM(Storm Water Management Model)모형의 RUNOFF블록을 이용한다.

(2) 도시배수시스템에서의 동역학적 흐름해석 모형

도시배수시스템에서의 동역학적 흐름해석 모형은 도시배수시스템의 흐름을 추적하고 지표면으로 월류되는 시간별 홍수량을 산정하며, 이를 위해 SWMM 모형의 EXTRAN 블록을 이용한다. SWMM 모형의 EXTRAN 블록은 주요 배수 시스템을 통해 동역학적 홍수 추적을 수행하며 우수관거 네트워크의 영향과 배수영향, 개수로 흐름, 압력류 혹은 과부하 흐름, 및 위어, 오리피스, 펌프와 같은 수공구조물에 대한 해석 등을 수행할 수 있다.

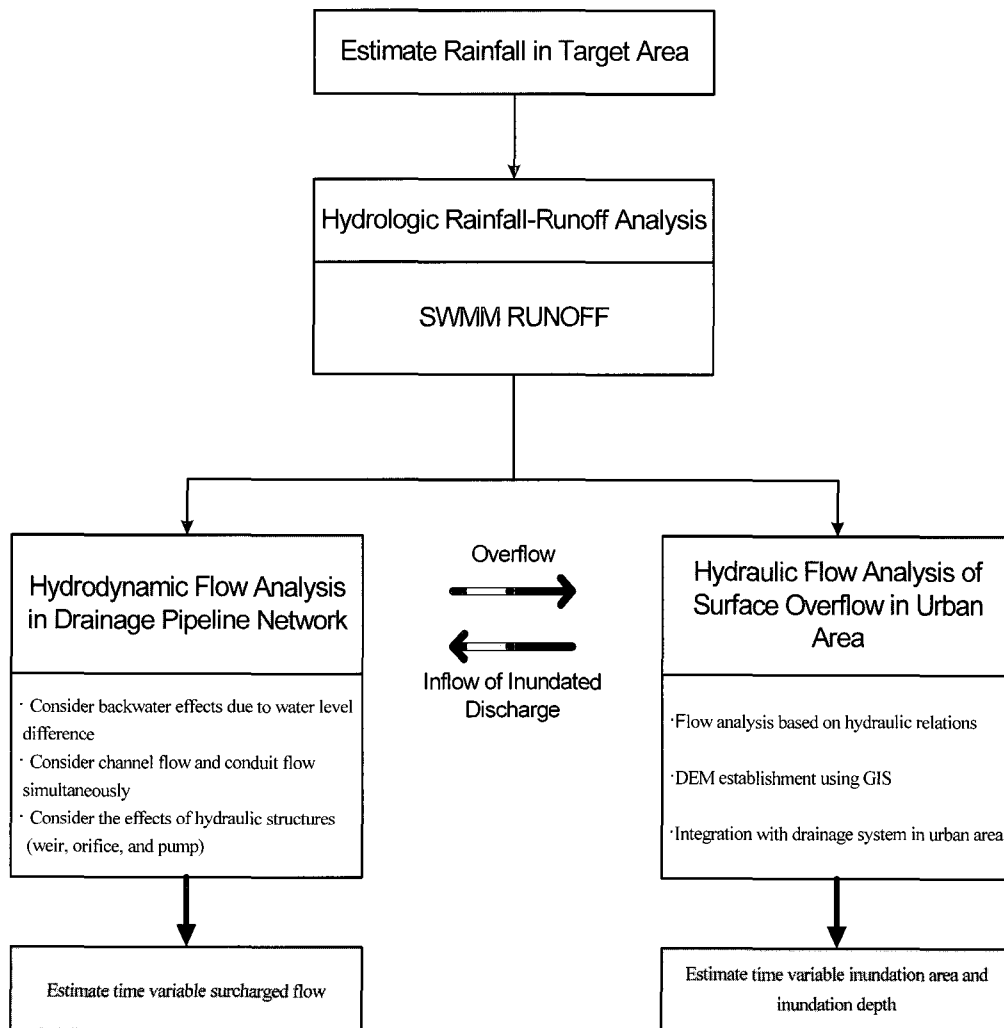


Fig. 1. Schematic of Dual-Drainage model for urban area inundation

(3) 도시지역 지표범람지역에서의 DEM 기반의 흐름해석 모형

도시지역 지표범람지역에서의 DEM 기반의 흐름해석 모형에서는 범람된 유량의 시간별 침수구역 및 침수심을 산정한다. GIS 자료를 활용하여 DEM을 구축하고, 천수방정식을 근사화한 확산형 방정식(Akan and Yen, 1981)을 이용한다.

(4) 모형의 통합(이중배수 도시침수해석)

강우-유출 해석 모형과 도시배수시스템에서의 동역학적 흐름해석 모형은 SWMM 모형의 RUNOFF 블록과 EXTRAN 블록을 이용하고, 도시지역 침수해석을 위한 DEM 기반의 흐름해석 모형과 통합된다.

2.2 배수시스템에서의 흐름해석

SWMM RUNOFF블록(Huber and Dickinson, 1988; James et al., 1999a)에서 이용하는 지표면 유출량에 대한 소유역에서의 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dd}{dt} = A \cdot i^* - Q \quad (1)$$

유출량은 Manning 공식을 사용한다.

$$Q = W \cdot \frac{1}{n} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} \quad (2)$$

여기서, V 는 소유역에서의 물의 체적= $A \times d$, d 는 수심, t 는 시간, A 는 수표면 면적, i^* 는 초과 강우량, Q 는 유출량, W 는 소유역 폭, n 는 Manning의 조도계수, d_p 는 지면저류깊이, S 는 소유역경사이다.

SWMM EXTRAN블록(Roesner et al., 1988; James et al., 1999b)에서 연결관로에서 우수관로의 흐름문제를 해석하기 위한 기본미분방정식은 점변 부정류식인 천수 방정식으로부터 운동량방정식과 연속방정식을 연계한 다음 식을 이용한다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gAS_f - 2V \frac{\partial A}{\partial t} - V^2 \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

여기서, A 는 단면적, Q 는 관로 유량, V 는 관로 유속, x 는 관로/수로 방향의 거리, t 는 시간, g 는 중력가속도, H 는 관로 수위(= $z+h$), z 는 관로 최심고, h 는 관로 수심, S_f 는 마찰(에너지) 경사이다.

접점에서는 연속방정식을 사용하며, 다음 식이 이용

된다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\sum Q_t}{A_s} \quad (4)$$

여기서, A_s 는 절점의 수표면적, $\sum Q_t$ 는 절점의 유량 변화량, H 는 절점의 수위, t 는 시간이다.

2.3 배수시스템과 지표홍수유량과의 관계식

월류 유량은 Eq. (5)와 같은 경우에 발생된다.

$$Q_1 > Q_2 \quad (5)$$

여기서,

$Q_1 = \sum_{i=1}^n (Q_{in})_i + Q_{sur}$ = 절점(맨홀)으로 유입되는 총 유량

$Q_2 = \sum_{j=1}^m (Q_{out})_j$ = 절점(맨홀)에서 배수되는 총 유량

Q_{sur} = 소유역에서 맨홀로 유입되는 총 유량

Q_{in} = 유입 관로 유량

Q_{out} = 유출 관로 유량

n = 유입 관로 수

m = 유출 관로 수

SWMM모형은 홍수경감대책에 있어서 필요한 월류 유량에 의한 침수지점과 침수심 같은 상세한 정보를 계산할 수 없다. 따라서 2차원 침수해석에 의한 범람특성에 대한 분석이 필요하다.

2.4 월류유량에 대한 DEM기반 침수해석

2차원 침수해석을 위한 기본 방정식을 x 와 y 방향 성분으로 기술하면 연속방정식과 운동방정식은 Eqs. (6)~(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial d}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = e \quad (6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g(S_{ox} - S_{fx} - \frac{\partial d}{\partial x}) \quad (7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = g(S_{oy} - S_{fy} - \frac{\partial d}{\partial y}) \quad (8)$$

여기서, d 는 지표면 수심, q_x 와 q_y 는 x 와 y 방향에

대한 단위폭당 유량, u 와 v 는 x 와 y 방향의 평균 속도, S_{ox} 와 S_{oy} 는 x 와 y 방향의 바닥경사, S_{fx} 와 S_{fy} 는 x 와 y 방향의 마찰경사, t 는 시간, g 는 중력에 의한 가속, e 는 단위면적당 생성항 혹은 소멸항이다.

도시지역에서 지표류 해석시 Fig. 2와 같이 홍수유량이 전달될 때 흐름은 건물의 영향을 받게 된다. 따라서, 건물의 영향은 도시지역의 홍수 범람해석에서 중요한 부분이 된다. 본 연구에서는 건물영향을 고려하기 위해서 건물영향인자를 고려한 Eq. (9)를 이용하였다.(Hsu et al., 2000).

$$\frac{\partial d}{\partial t} + \frac{\partial [(1-\beta)q_x]}{\partial x} + \frac{\partial [(1-\beta)q_y]}{\partial y} = e \quad (9)$$

여기서, β 는 총면적에 대한 건물면적에 대한 선형비 ($\sqrt{A_b/A}$)를 나타내는 억류비(detaining ratio)이며, A_b 는 격자내 건물의 총 면적, A 는 격자의 면적이다.

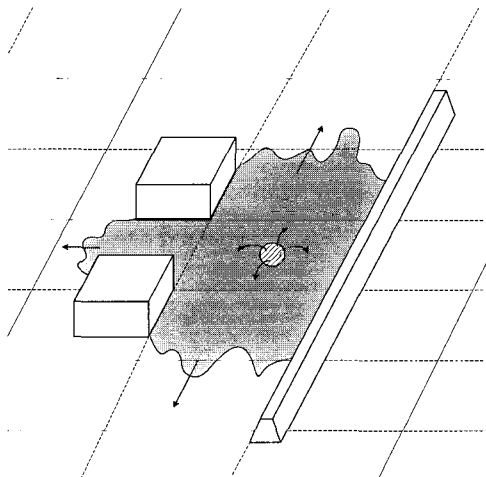


Fig. 2. Inundation of surcharged flow with complex building arrangement and topography

2.5 배수시스템으로 재유입되는 지표침수유량

지표면으로 전과되는 홍수범람유량은 범람이 발생되지 않는 유입구 지점이나, 과부하로 인해 월류가 발생하는 지점을 통과하게 된다. 월류가 발생하는 지점을 통과할 경우 지표류에 월류가 발생하는 지점의 범람유량이 함께 고려되어지게 되고, 범람이 발생하지 않는 지점에는 Fig. 3과 같이 일부 유량은 유입구 지점으로 유입되며, 유입된 유량은 배수시스템을 통해 흘러가게 된다.

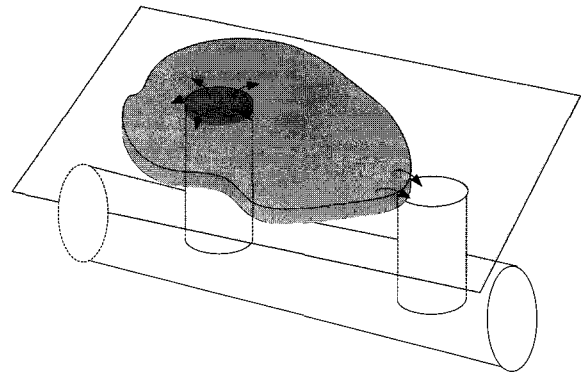


Fig. 3. Inundated surface flow passing through manhole entrance

$Q_1 > Q_2$ 인 경우 발생한 월류유량은 2차원 침수해석 모형에 의해 해석된다. 침수유량 중 일부는 월류가 발생하지 않는 배수시스템 유입지점을 지나가게 된다. 이 경우 일부 침수유량은 맨홀로 다시 유입되므로 Q_{sur} 은 다음과 같이 수정될 수 있다.

$$Q_{sur} = Q_{sur} + Q_o \quad (10)$$

여기서, Q_o 는 맨홀 지점으로 재유입되는 지표 침수유량이다.

재유입 유량은 다음 2가지 조건으로 고려할 수 있다.

첫 번째 방법으로는 유입구 과부하 여부에 따라 위어 혹은 오리피스 흐름 형태의 유입형태의 유입으로 설정하는 경우다.

두 번째 방법으로는 유입구 지점에서의 지표면 수심에 해당 되는 격자체적내의 유량이 유입구의 유입가능 상태에 따라 유입되도록 설정한 경우이다. 즉, 격자 지점과 연결되어 있는 배수시스템 내부의 여유 공간만큼 채워주는 방식을 이용한 경우이다. 이때, 맨홀 지점으로 재유입 되는 지표 침수유량은 Eq. (11)을 이용하며, 유입구 지점의 격자의 침수심은 순간적으로 zero가 된다. 유입된 총 유입유량을 이용하여 EXTRAN 블록에서 해당 격자의 배수시스템과 총유입유량에 대한 월류유량이 산정된다. 계산된 월류유량은 다시 해당 격자에 채워진다.

$$Q_o = \frac{FP(i) \times W^2}{\Delta t} \quad (11)$$

여기서, Δt = 계산 시간 간격, W = 격자크기, $FP(i)$ = i 번째 격자에서의 수심이다.

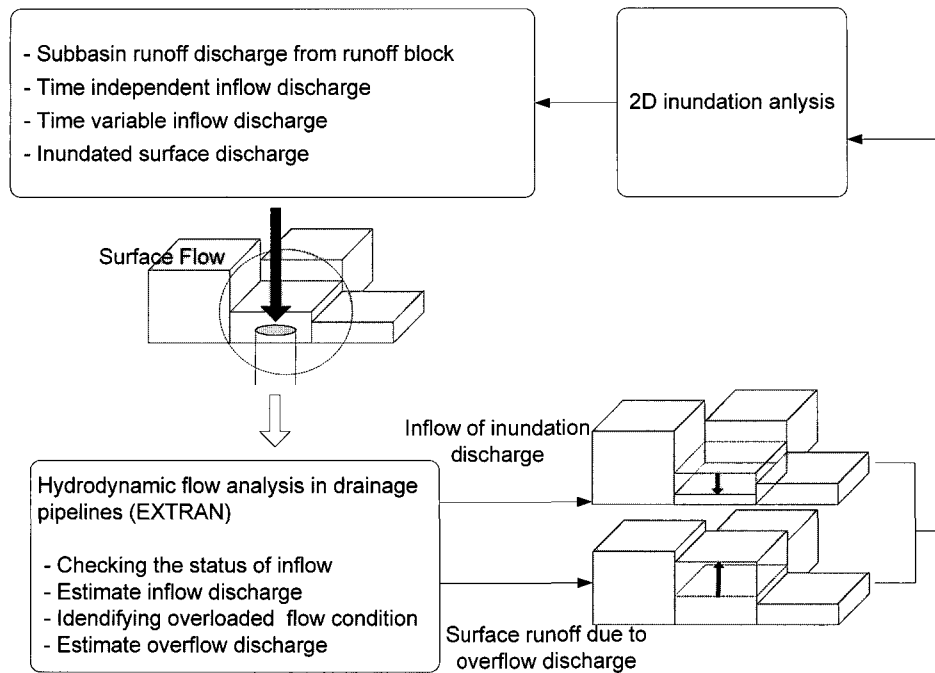


Fig. 4. Depth variation due to surcharged overflow and inflow discharge

2.6 모형의 통합

Fig. 4는 SWMM 모형의 EXTRAN 블록과 DEM 기반 침수해석모형과의 통합과정에서 배수시스템에서의 과부하 및 재유입 과정을 표현한 것이다.

3. 모형의 적용

지표면으로 월류된 유량이 배수시스템으로 다시 유입되지 않고 지표면으로만 전파되는 것으로 가정한 경우와 통합 침수해석모형을 이용한 적용결과와 비교검토를 수행하였다. 본 모형의 적용을 위한 대상 배수구역으로는 과거 침수 기록이 있는 지역으로서 유수지의 수위 상승 및 관거용량 부족에 의한 침수가 빈번히 발생한 도립 배수구역에 대해서 적용하였다. 적용 강우사상은 서울시에 많은 침수피해를 입힌 2001년 7월 14일~15일 동안의 사상을 이용하였다.

3.1 대상지점 현황

도립 배수구역은 유역면적이 189.5ha이고, 산지가 거의 없는 평탄한 지형이며, 불투수면적의 비율이 91% 정도로 포장율이 높고, 유수지를 겸비한 빗물펌프장이 있다. 2001년 7월 구로관측소 강우기록일지에 의하면 (Fig. 5) 7월 14일 오후부터 강우가 내리기 시작하였으며, 이 기간에 발생된 시간 최대강우량은 03:00~04:00 시간의 99mm로서 1998년의 1시간 강우량 67mm를 상회하였다. 또한, 집중호우 및 빗물펌프장 용량 부족으로

인하여 도립 유수지의 수위가 상승하여 유수지의 H.W.L.(9.5m)을 초과한 10.3m 까지 상승함에 따라 역류의 발생으로 침수가 발생하였다. Fig. 5는 2001년 7월 14일~15일 동안 관측된 강우사상이며, Fig. 6(a)는 도립 배수구역의 주요 침수지역이다.

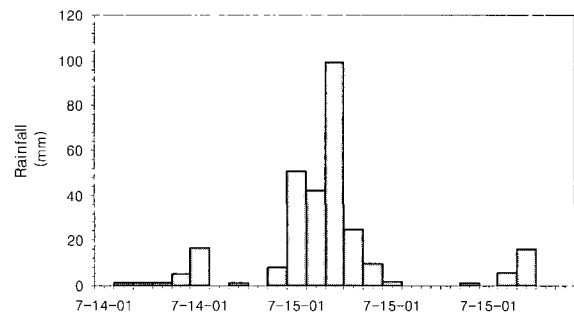


Fig. 5. Rainfall distribution for model simulation (July 14th, 2001 ~ July 15th, 2001)

모형 적용을 위한 유역의 배수 계통도는 Fig. 6(b)와 같이 주요간선만을 이용하였고, Fig. 6(c)는 1:1,000 수치지도를 이용하여 추출된 대상유역의 DEM이다. 도시 배수 유역의 범람 양상을 모의하기 위한 격자의 크기는 20m×20m로서 전체 6,775개의 격자가 도시배수유역의 형상을 대표하게 되며, 배수시스템 하류 유출지점에 위치한 유수지에서의 수위상승으로 인하여 배수영향을 고려하였다.

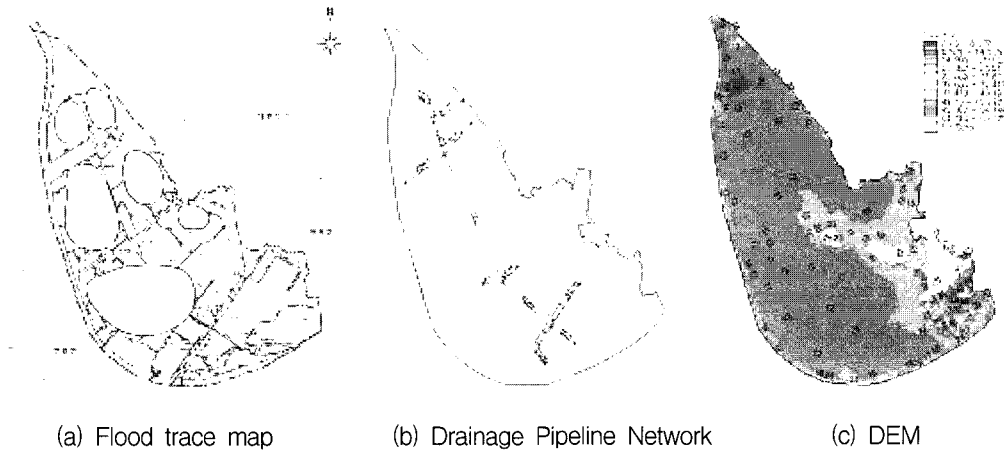


Fig. 6. Description of target basin area

3.2 모의 결과

SWMM모형에서 산정되는 지표면으로 월류한 유량은 다시 배수시스템으로 유입되지 않고 지표면으로만 전파되는 것으로 가정한 경우에 대한 적용 결과는 Fig. 7과 같다. 월류로 인한 침수유량의 배수시스템으로의 배수를 고려하지 않는 경우 모의 초기에는 지표면을 통해 월류된 유량이 전파되어 가는 과정을 잘 모의되나, 시간이 어느 정도 흐른 뒤 배수시스템에서의 월류량 발생이 끝났음에도 불구하고 계속 침수된 채 남아 있으며 월류된 유량이 하류부로 전달되지 않고 저수지와 같이 물이 고여 있는 상태가 되었다. 이러한 이유는 지표면으로만 침수된 유량이 전파되도록 했을 경우 침수된 지역의 수위가 주변 지형보다 낮은 경우가 발생하기 때문이다.

그러나, 실제 이들 침수지점에 배수가 가능한 유입구

지점이 있다고 한다면 과부하 혹은 월류가 끝난 후 이 유입구 지점으로 물이 배수될 것이다. 과부하가 발생하지 않는 배수시스템 유입구 지점을 통과할 때 일부 유량이 다시 배수시스템으로 유입되도록 고려한 침수해석 결과는 Fig. 8 및 Fig. 10과 같다. Fig. 8는 지표 유량이 맨홀 혹은 오리피스형으로 유입되는 경우이고, Fig. 10은 유입구 지점이 위치한 격자의 유량이 배수시스템 내부 상태에 따라 유입되도록 한 경우이다.

Fig. 9는 Fig. 7과 Fig. 8의 차이를 나타낸다. 여기서, 침수유량의 재유입을 고려하지 않은 경우와 재유입유량을 오리피스 혹은 위어형으로 고려한 침수해석모형은 크게 차이가 나타나지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 위어 혹은 오리피스형으로 유입되는 조건으로는 배수시스템으로 유입되는 유량이 매우 적기 때문이다. 즉, 격자크기(20m×20m)에 비해 유입구 직경(기본 값으로 1.22m)이 매우 작고, 배수시스템 내부의 여유공간이 있음에도

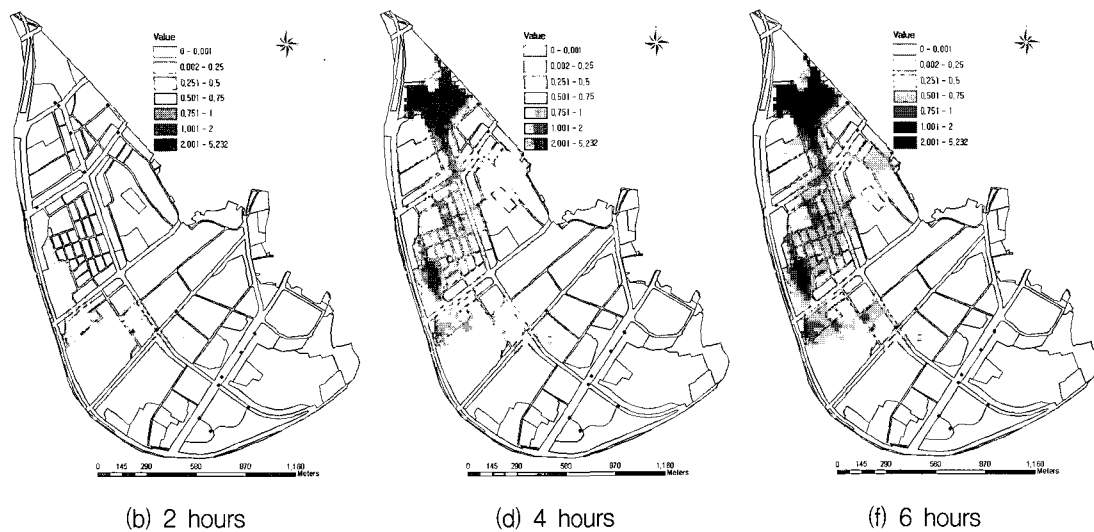


Fig. 7. Analysis of Flood Inundation without return flow consideration

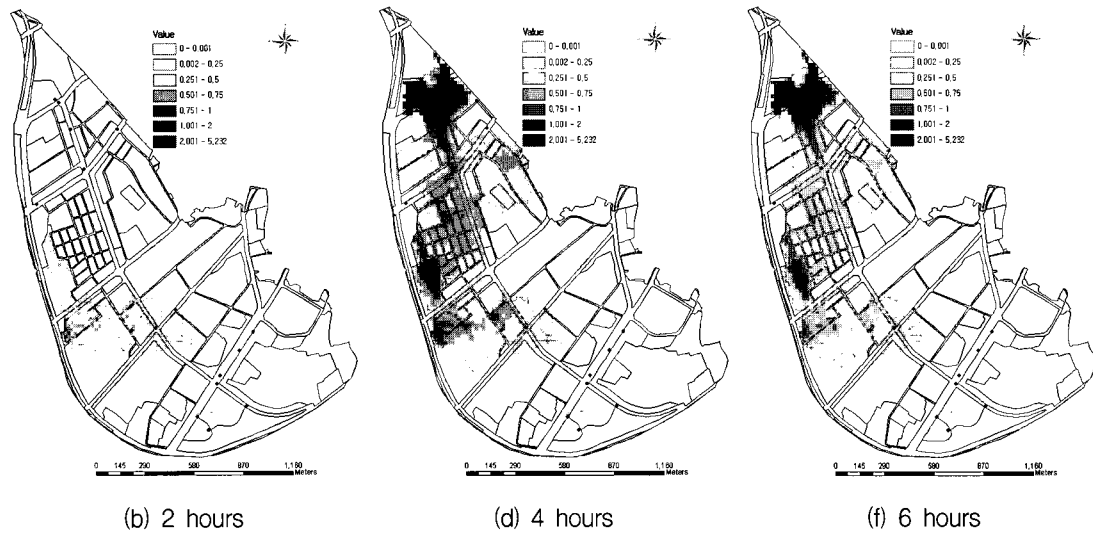


Fig. 8. Analysis of Flood Inundation with return flow through weir or orifice

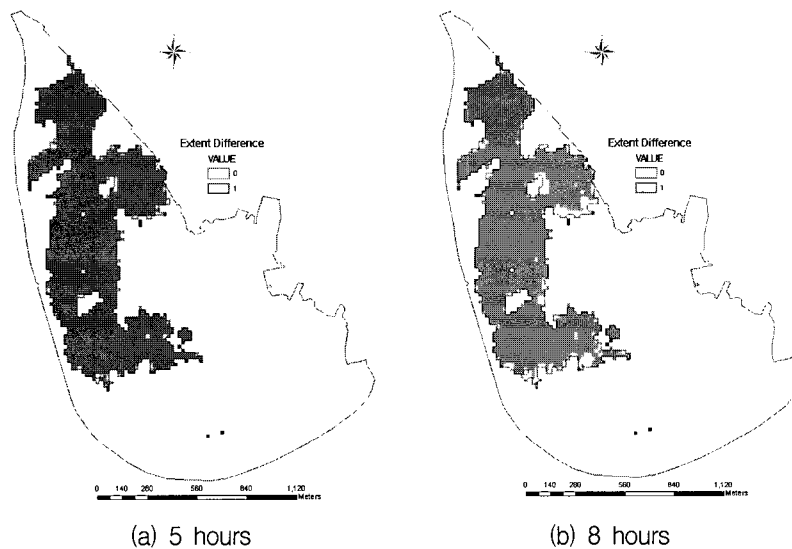


Fig. 9. Difference between with and without return flow (Return flow through weir or orifice)

불구하고 유입되는 입력 유량은 위어 혹은 오리피스 식에 의해 계산된 양만 유입되기 때문이다. 그리고, 입력 자료를 구축할 때 배수 계통도에서 주요 간선만이 이용되기 때문에 범람된 유량이 다시 유입구로 유입되기 위한 유입구의 수가 실제 유입구 수만큼 조밀하게 입력되지 못하여 간선에 대해서만 계산이 이루어지기 때문이다. 오리피스 혹은 위어형으로 재유입량을 산정하는 침수해석모형을 적용하기 위해서는 적용대상구역의 배수 시스템으로 유입되는 모든 유입구를 고려해야 하지만 현실적으로 모든 유입구를 고려한 입력 자료의 구축은 시간 및 비용에 많은 어려움이 동반된다. 그러므로, 침수지점의 유량이 배수되는 과정을 모의하기 위해서는 다른 방법이 필요하다.

재유입량을 산정하기 위한 다른 방법으로 지표면

수침에 해당 되는 격자체적내의 유량이 유입구의 유입 가능 상태에 따라 유입되도록 설정한 경우이다. 유입되고 남은 유량은 지표면으로 전파되고 유입된 유량은 배수시스템에서 내부 유량과 함께 모의된다. Fig. 10에서 보여 지듯이 Fig. 8과 비교했을 때 침수된 유량이 시간이 경과함에 따라 배수되는 과정을 잘 모의함을 볼 수 있다.

3.3 건물의 영향

건물의 영향을 검토하기 위해 수치지도로부터 대상 구역의 건물 데이터를 Fig. 11과 같이 추출하였다. Fig. 11(a)에서와 보는 바와 같이 매우 복잡하게 배치되어 있는 건물 모두를 다 고려하는 격자를 구성하는 것은 어려운 일이다. 이러한 문제 해결을 위해서 건물들이

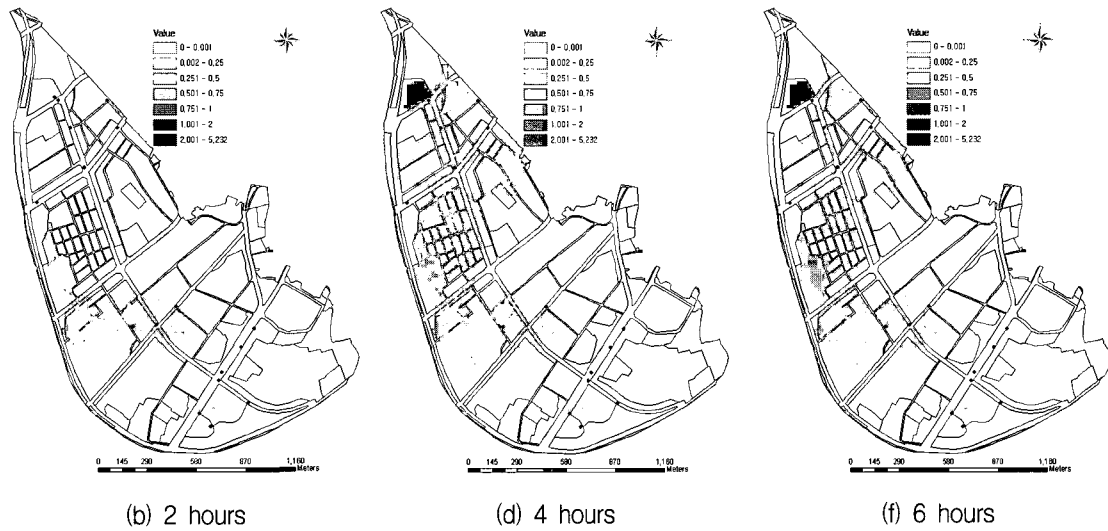


Fig. 10. Results of inundation analysis considering the relation between the condition of drainage network system and cell discharge return flow

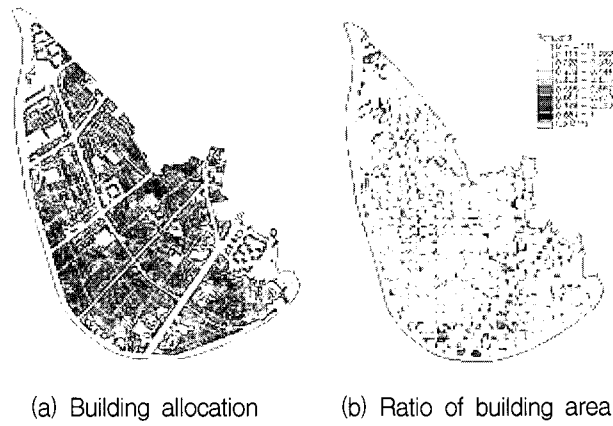


Fig. 11. Building allocations and ratio of building area

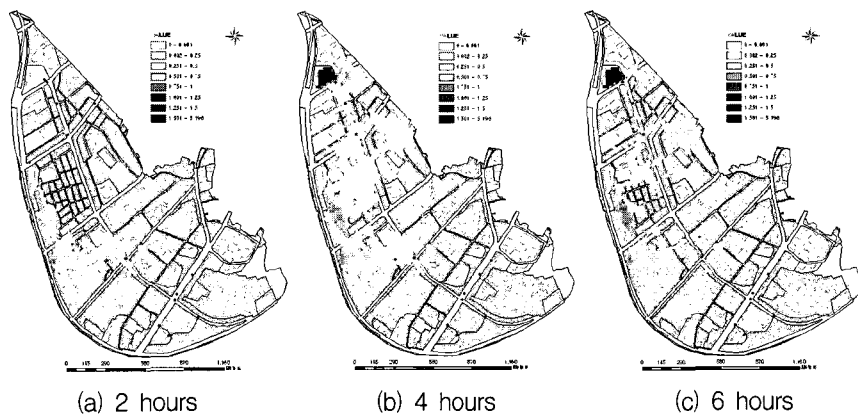
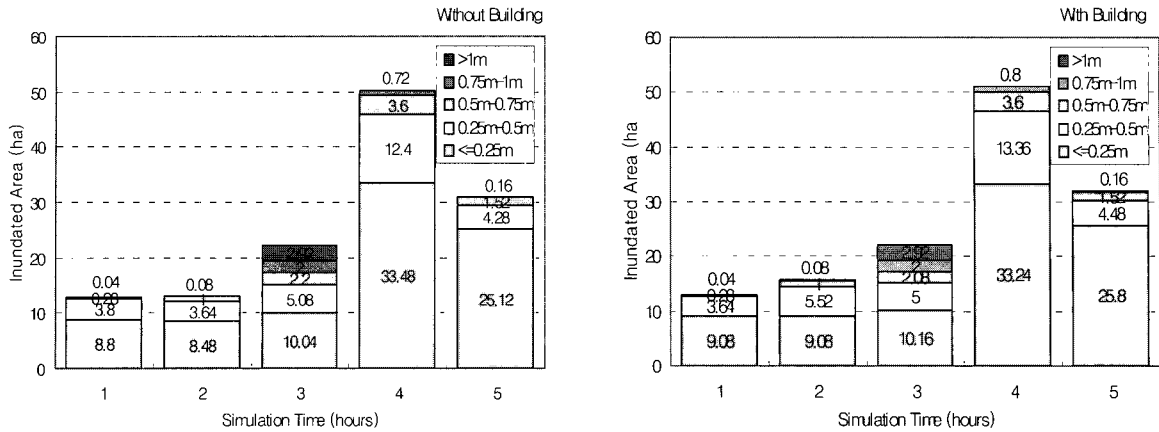


Fig. 12 Flood inundation analysis with effects of buildings

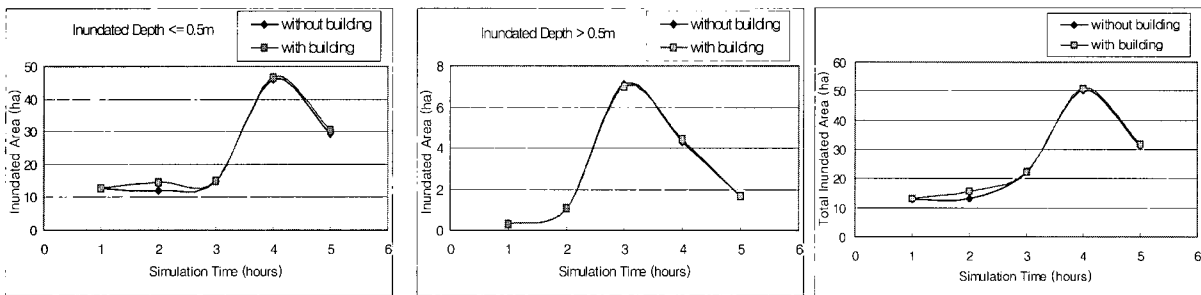
셀 내에 차지하는 비율인 β 를 Fig. 11(b)와 같이 구하여 Eq. (9)에 의한 침수지역 해석에 이용되었다. 건물 영향을 고려하여 도시침수해석을 수행한 적용 결과는 Fig. 12와 같다.

Fig. 13은 각 유역에 대해서 건물 영향을 고려하지 않는 경우와 고려한 경우에 대해서 침수면적을 시간별로 나타낸 그래프이며, Table 1은 최대침수심의 변화량을 나타낸다. Fig. 13에서 나타나듯이 건물영향으로 인



(a) Inundation area without effects of buildings

(b) Inundation area with effects of buildings



(c) For inundation depth ≤ 0.5 m

(d) For inundation depth > 0.5 m

(e) Total inundation area

Fig. 13. Time variation of inundated area due to building effects

Table. 1. Maximum depth variation due to building effects

Classification	Maximum depth increase (cm)	Maximum depth decrease (cm)
Depth variation	10.6	25.8

하여 침수발생 초기 0.5m 이하 침수심을 가지는 면적 차이가 다소 발생되며, 건물 영향에 의해 침수면적이 증가됨을 알 수 있다. Fig. 14는 임의 구간 A를 DEM과 동일한 크기의 격자로 구성하여 좌측상단의 격자를 1번으로 하고 오른쪽하단의 격자를 60번으로 지정하여 1년부터 60번 지점까지의 수심의 변화를 시간대 별로 도시한 것이다.

Fig. 15는 건물 영향을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대한 침수심의 차이를 보여준다. 여기서, 파란색으로 표시된 지점은 건물로 인해 수위가 상승된 지점이고, 빨간색으로 표시된 지점은 건물로 인해 수위가 낮아진 지점이다. Fig. 15(a)와 Fig. 15(b)와 같이 모의 1시간 및 2시간이 경과한 시점에서는 침수유량이 왼쪽으로 전파되며 침수유량이 전파되는 동안 건물로 인한 흐름의 방해로 인해 오른쪽 부분은 침수심이 높게 나타나고, 왼쪽부분은 유하된 흐름이 줄어들어 낮아지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 15(c)는 우수지 부근에서 침수유량이 발생되어 침수유량이 상류지점에 영향을 미칠 때

의 침수심의 차이를 나타내며, Fig. 15(d)는 우수지 부분으로 다시 물이 빠지면서 발생하는 침수심의 차이를 보여준다.

본 연구를 통해 건물에 의한 점유면적 및 흐름의 방해 등으로 인하여 침수심 및 침수범위의 변화를 확인할 수 있었다. 건물 영향으로 인한 침수해석을 통해 침수유량의 도달 시간 및 시간별 침수범위를 보다 정확히 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

3.4 비교검토 및 고찰

호우기간 동안 시간별 침수지역과 침수심에 대한 정확한 기록이 없으므로, Fig. 16(a)과 같이 홍수가 끝난 후 작성된 홍수흔적도를 이용하여 건물영향을 고려함과 동시에 재유입을 고려한 모의결과인 Fig. 16(b)와 비교하였다. 홍수 후 조사를 통해 구축된 침수흔적도와 검증되기 때문에 시간별 침수범위 및 침수심 변화에 대한 비교는 할 수 없었고, 최대 침수범위에 대해서만 비교되었다.

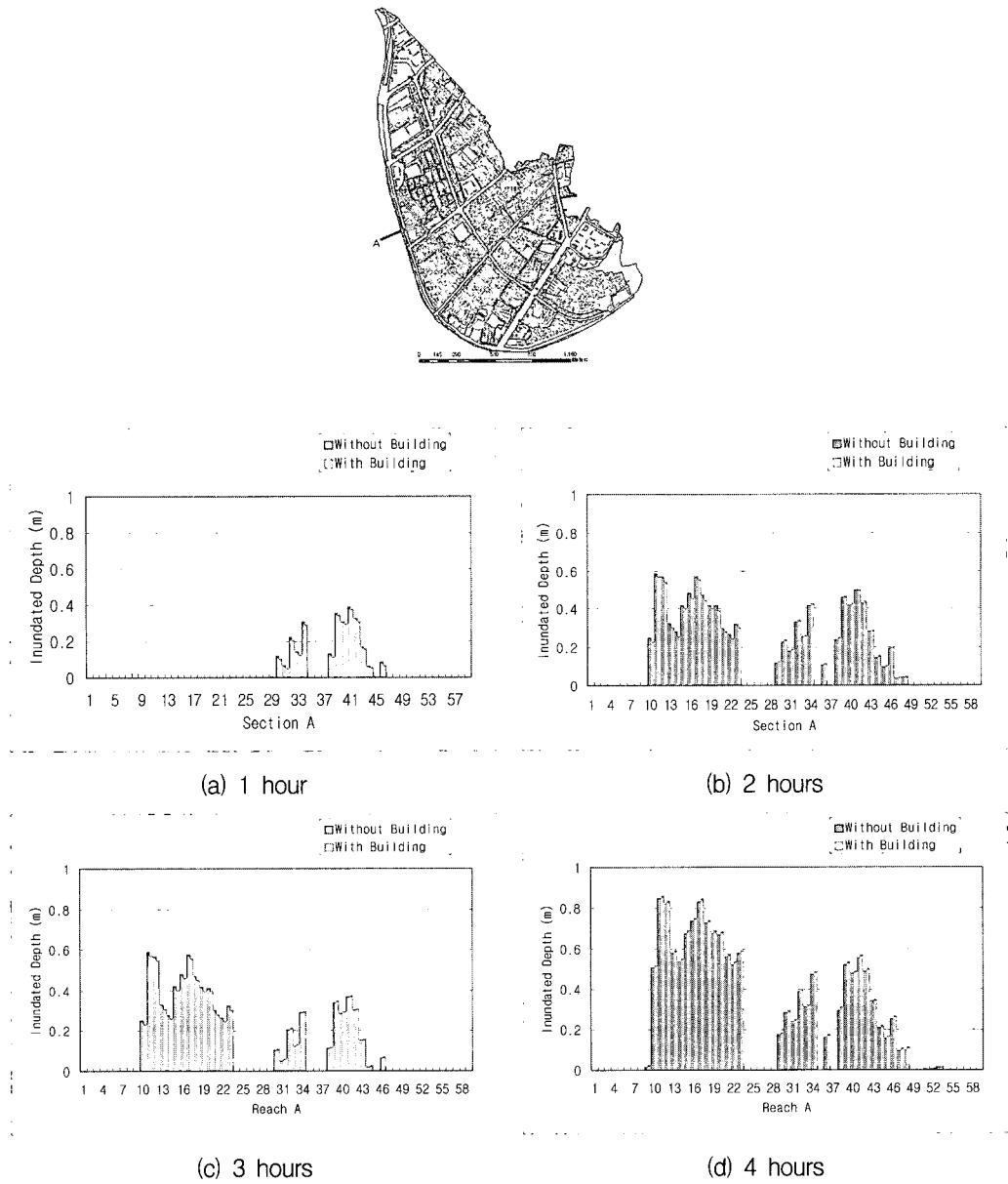


Fig 14. Difference of inundated depth considering buildings in section A

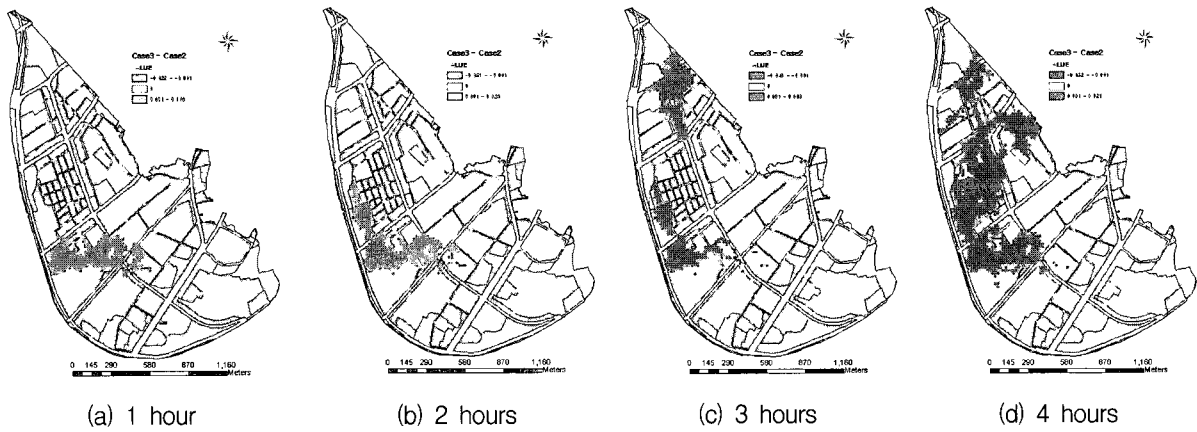
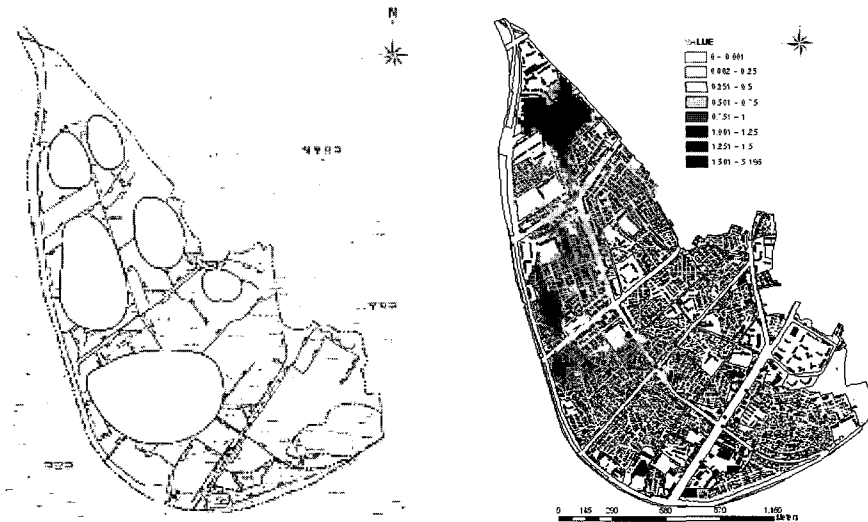


Fig 15. Flood depth variation due to buildings



(a) Flood trace map (b) Simulation results of inundated area
Fig. 16. Comparison between flood trace map and simulated result

본 모형을 통해 모의된 결과의 검증은 위해 모형의 검증은 침수흔적도의 침수면적인 A_{obs} 와 모형으로부터 해석된 침수면적인 A_{cal} 의 비교(Bates and De Roo, 2000)로 이루어졌고 다음 식을 이용하였다.

$$Fit(\%) = \frac{A_{obs} \cap A_{cal}}{A_{obs} \cup A_{cal}} \times 100 \quad (12)$$

Eq. (12)에 의해 모형의 적합도는 74%로 침수흔적도에서 호우시의 도로변의 침수상황이 표시되어 있지 않으므로 이를 감안하면 모의 결과가 잘 일치하는 것으로 볼 수 있다. 일부지점에서 모의결과와 침수흔적도의 침수면적의 오차가 발생하는 것은 인접 배수구역에서 처리되지 못한 홍수량이 모의대상 배수구역에 유입되었던 상황을 정확히 반영하지 못했고, 모형의 입력자료를 구축할 때 배수시스템의 주요 간선만을 고려하여 지선에서의 월류현상에 대한 분석이 이루어지지 않았으며, 침수흔적도 역시 홍수가 끝난 후 작성되었기 때문인 것으로 판단된다.

그러나, 본 모형은 침수흔적도에서 구현할 수 없는 시간별 침수범위와 침수심의 변동양상과 침수유량의 배수과정에 대한 모의가 가능하며, 사후 조사에 의하여 작성되는 침수흔적도에서 표시되지 않는 호우시의 도로변의 침수상황을 나타낼 수 있으므로, 모의 준비 과정에서 인접 배수구역에 대한 영향 및 배수시스템의 구성이 잘 이루어질 경우 정확한 침수예측이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 도시침수해석 모형 개발에 관한 연구로서 본 연구의 주요 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서는 배수시스템 해석 모형과 도시침수 해석 모형간의 유량의 전송과정의 수리학적 관계를 고려하며, 건물의 영향을 고려할 수 있는 도시 침수해석모형을 개발하였다. 본 연구모형을 도립 배수구역에서 2001년 7월 홍수에 대해서 적용하였다. 홍수 기간동안 지표침수유량 및 시간별 배수과정을 분석하여 2차원 범람양상에 대한 범람수심 및 범람지역을 주요 시간대별로 계산하였고, 실측치인 침수흔적도와 비교함으로써 모형의 적용성을 검증하였다.
- (2) 지표면으로 월류된 유량은 지표면을 통해서만 전송되며 다시 배수시스템으로 유입되지 않는 경우 침수가 발생하는 초기에는 지표면을 통해 월류된 유량이 전파되어 가는 과정을 잘 모의되나, 시간이 경과한 후 침수된 지역의 수위가 주변 지형보다 낮은 경우 배수시스템에서의 월류된 유량이 하루부로 전달되지 않고 저수지와 같이 물이 고여 월류량 발생이 끝났음에도 불구하고 계속 침수된 채 고여 있는 상태가 되었다.
- (3) 침수유량이 과부하가 발생하지 않는 유입구 지점을 통과할 때 일부유량이 다시 배수시스템으로 유입되는 조건으로 위어 혹은 오리피스형 재유입

과 배수시스템 내부 상태에 따라 배수시스템으로 재유입의 두 가지 상황에 대한 침수해석을 수행하였다

- (4) 위어 혹은 오리피스형 재유입인 경우 배수시스템으로의 재유입을 통한 침수유량의 배수과정이 나타나지 않았다. 반면 유입구 지점이 위치하는 격자내의 유량이 배수시스템 내부 상태에 따라 배수시스템으로 유입되는 것으로 가정하여 해석한 경우 유입되고 남은 유량은 지표면으로 전파되고 유입된 유량은 배수시스템에서 내부 유량과 함께 모의되어, 침수된 유량이 시간이 경과함에 따라 배수되는 과정을 잘 모의함을 볼 수 있었다.
- (5) 건물에 의한 점유면적 및 흐름의 방해 등으로 인하여 침수심 및 침수범위의 변화를 확인할 수 있었다. 건물 영향으로 인한 침수해석을 통해 침수유량의 도달 시간 및 시간별 침수범위를 보다 정확히 예측할 수 있을 것으로 판단된다.
- (6) 본 연구에서 개발된 침수해석 모형을 이용하여 최고침수위와 최고침수범위를 비교적 단시간에 효율적으로 계산함으로써 홍수피해와 투자액을 감안한 경제적인 배수시설의 결정을 위한 기본자료로 활용될 수 있으며, 국가 중요 시설물의 입지 선정, 주민의 보호 및 이동 등을 포함한 홍수피해의 판단자료로 이용될 수 있다.

감사의 글

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(과제명:내배수 침수재해 저감기술개발) 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 이창희, 한건연, 최규현 (2006a). "SWMM을 연계한 DEM기반의 도시침수해석 모형." **한국수자원학회 논문집**, 제39권, 제5호, 한국수자원학회, pp. 383-394.
- 이창희, 한건연, 최규현 (2006b). "Dual-Drainage 개념에 의한 도시침수해석모형의 개발." **대한토목학회 논문집**, 제26권, 제4B호, 대한토목학회, pp. 379-387.
- Akan, A.O. and Yen, B.C. (1981). "Diffusion-wave flood routing in channel networks." *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 107, No. 6, pp. 719-732.
- AMK Associates, International, Ltd (2004). *Dual Drainage Storm Water Management Model, Program Documentation and Reference Manual, Release 2.1*, Ontario, Canada, p. 170.
- Bates, P.D. and De Roo, A.P.J. (2000). "A simple raster-based model for flood inundation simulation" *Journal of Hydrology*, Vol. 236, pp. 54-77.
- Djordjevic, S., Prodanovic, D., and Maksimovic, C. (1999). "An approach to simulation of dual drainage." *Water Science and Technology*, Vol. 39, No. 9, pp. 95-103.
- Hsu, M.H., Chen, S.H. and Chang, T.J. (2000). "Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system." *Journal of Hydrology*, Vol. 234, pp. 21-37.
- Huber, W.C. and Dickinson, R.E. (1988). *Storm Water Management Model. User's Manual Ver. IV*, U.S. EPA.
- James, W., Robert, W. and James, C. (1999a). *Water Systems Models Hydrology*, Comutational Hydraulics Int., Ontario, Canada.
- James, W., Robert, W. and James, C. (1999b). *Water Systems Models Hydraulics*, Comutational Hydraulics Int., Ontario, Canada.
- Mark, O., Weesakul, S., Apirumanekul, C., Aroonnet, S.B., and Djordjevic, S. (2004). "Potential and limitations of 1D modeling of urban flooding", *Journal of Hydrology*, Vol. 299, pp. 284-299.
- Nasello, C., and Tucciarelli, T. (2005). "Dual Multilevel Urban Drainage Model", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.131, No.9, pp. 748-754.
- Roesner, L.A., Aldrich, J.A. and Dickinson, R.E. (1988). *Strom Water Management Model User's Manual Version 4 : Extran Addendum*, U.S. EPA.
- Schmitt, T. G., Thomas, M., and Ettrich, N. (2004). "Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems", *Journal of Hydrology*, Vol. 299, pp. 300-311.

Smith, M. (2006). "Comment on 'Potential and limitations of 1D modeling of urban flooding' by O. Mark et al.", *Journal of Hydrology*. Vol.321,

pp. 1-4.

(논문번호:06-102/접수:2006.10.27/심사완료:2007.02.15)