건물 및 도로영향을 고려한 도시지역에서의 2차원 침수해석

2-D Inundation Analysis in Urban Area considering Building and Road

조완희* · 한건연** · 황택진*** · 손아롱****

Cho, Wan Hee · Han, Kun Yeun · Hwang, Taek Jin · Son, Ah Long

Abstract

The purpose of this study is to construct topography data considering buildings and roads that have an important effect on flow of flood wave by using GIS and to improve the accuracy of 2-D inundation analysis according to constructed topography data. The effect on buildings and roads is considered in the area, where inundation occur, including Bexco and roads around Centumcity in 2009 and goodness of fit of 2-D inundation analysis is analyzed from grid size. When considering building effect, the goodness of fit compared with real inundation area is 83.24% and when having no consideration for the effect, the results of simulation are 63.99%. It is expected that the study results will be utilized as basic data for the establishment of identification of inundation risk area and measure of flood damage mitigation in urban area.

Key words : SWMM, Diffusion Wave, Building, Road, 2-D inundation analysis

요 지

본 연구의 목적은 홍수파의 흐름에 커다란 영향을 미치는 건물 및 도로를 고려한 지형자료를 GIS tool을 이용하여 구축하고, 실제 지형이 최대한 반영된 지형자료를 바탕으로 2차원 침수해석을 실시함으로써 침수해석의 정확도를 향상시키는데 있다. 본 연구에서는 2009년의 집중호우로 인하여 BEXCO 및 센텀시티 주변 도로 침수가 발생했던 지역에 대하여 건물 및 도로의 영향을 고려한 2차원 침수해석을 실시하여 건물 및 도로의 영향을 정량적으로 분석하였다. 실제 침수면적에 따른 적합도를 분석한 결과 건물 영향을 고려하였을 때는 83.24%로 나타났으며, 건물 영향을 고려하지 않았을 때는 63.99%로 나타났다. 따라서 건물 및 도로의 영향을 고려한 2차원 침수해석 결과는 이상호우에 대비하여 도시지역의 침수 위험지역을 정확하게 파악하고 홍수피해 경감대책을 수립하기 위한 효율적인 판단자료로서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : SWMM, 확산파, 건물, 도로, 2차원 침수해석

1. 서 론

최근 발생하고 있는 주요 침수피해를 살펴보면, 하천의 범람이나 월류와 같은 외수범람의 영향 보다는 국지적인 이상호우에 따른 배수시스템의 내수배제 능력 초과로 인하여 나타나는 내수침수가 대부분을 차지하는 것을 알 수 있다. 유출억제기능을 가지고 있던 삼림, 초지 등이 도시화 및 산업화에 따라 주택, 도로 등의 콘크리트와 아스팔트의 불투수면으로 바뀌게 되어 홍수유출량이 증가하고 도달시간도 단축되어 대규모 홍수피해가 발생할 위험이 커지게 된 반면 배수시설, 저류시설, 지하침투시설 등의 홍수유출을 억제할 수 있는 시설의 부족에 따라 내수침수가 지속적으로 발생하는 것으로 판단된다. 특히 하천에서의 홍수위 상승에 따른 외수범람과

배수불량에서 기인하는 내수침수가 겹치는 경우 도시지역에서의 홍수피해는 더욱 가중될 것으로 판단된다. 이러한 도시지역의 홍수피해를 줄이기 위해서는 홍수범람에 대한 예측이 반드시 필요하다. 내수배제 능력의 부족으로 월류가 발생하거나 하천의 제방붕괴 및 수공구조물의 통수능 부족 등으로 인하여 범람이 발생하는 경우, 재해 예방차원에서 가장 근본적인 것은 침수의 양상을 파악하는 것이다. 즉, 어느 지역까지 침수가 확장될 것인가를 파악하는 것이 매우 중요하다. 그러나 도시지역의 침수현상은 비도시 지역과는 달리 지표류 흐름 과정에 있어 토지이용상황과 배수시스템과 같은 인위적인 요소에 의해 크게 영향을 받는다. 또한 지표류의 유하 방향은 배수체계, 도로, 그리고 건물과 같은 시설물에 의해 변화한다. 따라서 도시지역에서 정교한 침수해석을 위해서는 도시

*정회원 · 한국수자원공사 댐 · 유역관리처 위촉연구원 (E-mail : wanhee@kwater.or.kr)

**정회원 · 경북대학교 건축 · 토목공학부 교수

***동의대학교 토목공학과 교수

****경북대학교 건축 · 토목공학부 박사수료

지역의 토지이용상황을 고려한 수문분석과 배수관거를 통한 홍수추적을 실시하고 그 결과를 건물과 도로의 영향을 고려한 지형자료와 함께 2차원 침수해석 모형의 입력자료로 활용하여 침수해석을 실시할 필요가 있다.

도시지역에서의 침수해석과 관련한 연구를 살펴보면, Fukuoka et al.(1998)은 수리모형 실험을 통하여 도시의 주거지역에서 홍수파의 거동과 건물배열에 따른 수리학적 영향을 연구하였으며, 실험결과를 바탕으로 수치모형에 대한 개발 및 검증을 수행하였고, 모형의 정확도와 관령이 있는 격자의 크기에 대하여 Marks and Bates(2000)는 도시지역에서의 침수해석을 위해서는 구조물의 영향을 고려하기 위하여 격자의 크기를 1~5 m로 만들어야 한다고 제안하였다. Horritt and Bates(2002)는 제방과 연계한 도시지역에서의 2차원 침수해석 및 예측에 관한 연구를 수행하였고, Shige-eda and Akiyama(2003)은 구조물의 유무에 따른 2차원 침수해석 결과를 수리모형 실험 결과와 비교하는 연구를 수행하여 수치모형의 적용성을 검증하였다. 또한 단순화된 Raster 기반의 2차원 모형(Bates and De roo, 2000; Bradbrook et al., 2004; Yu and Lane, 2006a, 2006b)이 2차원 천수방정식을 모두 고려하여 동역학적으로 해석하는 모형에 비하여 계산효율이 높고 지형자료의 처리가 쉽기 때문에 특히 홍수에 대한 침수해석에 다양하게 적용되었다. Schmitt et al.(2004)은 도시지역 배수시스템에서의 범람에 관한 침수해석과 관련한 연구를 수행하였고, Leandro et al.(2009)은 관거와 지표면을 연계한 도시지역에서의 2차원 침수해석에 관한 연구를 수행하였으며, Yu(2010)는 영역의 분해에 기초한 도시지역에서의 2차원 침수해석을 통하여 계산시간의 단축을 위한 방법을 제시하였다.

국내에서는 이창희 등(2006a)이 SWMM 모형과 DEM기반 침수해석 모형과의 연계모형을 개발 및 적용함으로써 배수시스템의 용량을 초과한 강우가 발생하거나 혹은 외수위 상승으로 인한 배수불량시 발생하는 월류유량에 대하여 시간별 침수심 및 침수범위를 계산하였고, 이창희 등(2006b)은 GIS를 기반으로한 도시지역의 침수해석에서 내배수시스템과 지하공간의 침수해석을 연계하여 모의를 실시한 바 있으며, 이창희와 한건연(2007)은 건물이 차지하는 면적의 비율을 고려하여 계산격자의 면적을 수정한 후 이를 침수해석에 적용하여 도시지역에서의 건물영향을 분석하는 연구를 수행하였다. 최계운 등(2007)은 MOUSE 및 MIKE21 모형을 연계한 침수해석을 실시하였고, 이종형 등(2008)은 XP-SWMM 모형을 적용하여 시간별 침수위, 침수범위 등을 계산하는 연구를 수행하였다. 또한 김영주 등(2010)은 SWMM 모형을 통하여 유출해석 및 월류량을 계산하여 2차원 침수해석을 실시하여 지하저류조의 설치에 따른 침수저감효과에 대한 연구를 수행하였고, 조완희 등(2010)은 도시지역에서의 침수해석에서 건물영향을 분석하는 방안을 제시하는 등 최근에는 외수범람에 따른 침수해석 연구와 더불어 배수시스템의 배제불량이나 외수위의 상승에 따른 내수침수에 관한 많은 연구가 진행되고 있다.

그러나 현재까지 수행된 대부분의 침수해석과 관련한 연구에서는 침수해석에서 커다란 장애가 될 수 있는 건물 및 도

로의 영향을 고려하지 않고 단지 등고선과 표고점 등을 이용하여 지형자료를 구축하여 침수해석을 실시하였다. 또한 건물 영향을 고려한 연구가 선행되기는 했으나 단순히 건물의 비율을 고려하여 구축된 지형격자를 적용한 침수해석(이창희와 한건연, 2007)과 TIN자료로부터 추출된 Point 값을 직접 적용한 침수해석(조완희 등, 2010)에서는 실제지형의 위치를 반영하지 못하거나 지형의 왜곡이 나타나는 것을 확인하였다. 건물과 같은 구조물의 영향을 고려하지 않은 경우 건물의 차지하는 면적이 무시되기 때문에 침수심과 침수위가 실제와 다르게 계산될 수 있으며, 시간에 따른 홍수파의 확산양상도 다르게 나타날 수 있고, 건물 영향을 고려하지 않은 침수해석 결과를 활용하여 홍수위험지도 및 EAP 등을 구축하는 경우 최대 침수심 및 최대 유속이 발생하는 지점이 실제와 다르게 계산될 수 있는 위험성을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 부산광역시 해운대구 우동지역과 센텀시티 일원의 BEXCO지역을 배수구역으로 선정하여 2009년 7월 7일에 발생한 이상호우에 대하여 SWMM 모형과 확산과 방정식을 기본 식으로 하는 2차원 침수해석 모형을 통합하여 배수시스템으로부터 월류된 유량이 발생하는 경우 2차원 침수해석을 실시하도록 구성하였다. 또한 수치지형도로부터 추출한 건물 및 도로자료와 등고선 및 표고점을 활용하여 구축된 지표면자료를 합성하여 실제지형을 고려한 지형도를 구축하여 건물 및 도로의 영향을 고려한 도시지역에서의 2차원 침수해석을 수행하였다. 본 연구에서 제시한 방법에 따라 대상구역의 실제지형을 최대한 반영할 수 있는 지형자료를 구축하고, 침수해석을 위한 자료구축 및 실행, 결과분석을 위한 자동화를 구현하여 침수해석 모형의 적용성 및 안정성을 보다 향상시킨다면, 도시지역의 홍수와 관련된 재난에 대비한 위험지역의 파악 및 홍수피해 대책을 수립하기 위한 효율적인 판단자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 도시지역 침수해석모형

본 연구에서는 내수배제 불량이나 외수위 상승에 따른 배수시스템에서의 월류량에 대한 2차원 침수해석을 수행하기 위하여 미국 환경보호국(EPA, Environmental Protection Agency)에서 개발한 도시지역 유출해석 모형인 SWMM(Storm Water Management Model) 모형과 확산과 방정식을 기본 식으로 하는 2차원 침수해석 모형을 통합하여 침수해석을 실시하도록 구성하였다.

2.1 SWMM 모형

SWMM 모형은 도시구역 내에서 강우사상으로 인한 유출량과 오염물질에 대한 지표면 및 지표하 흐름, 배수관망에서의 유출량 추적, 저류량 산정, 오염물질의 처리 등을 모의할 수 있는 모형이다. SWMM 모형의 주요 계산 블록은 강우로부터 발생한 유출량과 수질 구성요소들을 계산하기 위한 RUNOFF 블록, 과부하가 일어나지 않는 경우 배수시스템의 유량과 수질에 대하여 운동과 추적에 기초하여 계산하는 TRANSPORT 블록, 저류조절 장치를 통한 유량 및 수질을

추적하는 STORAGE/TREATMENT 블록, 그리고 동역학과 추적에 의하여 수리학적 유량 계산을 수행하는 EXTRAN 블록으로 구성된다. 추가적인 보조 블록에서는 강우사상에 대한 선행 입력, 통계학적 분석, 그래프 출력 등이 수행된다. 배수 시스템의 용량을 초과하거나, 하천수위 상승으로 관로 내에 역류가 발생함으로써 우수 배제를 제대로 수행하지 못할 경우 발생하는 월류량을 계산하기 위해서는 동역학과 추적에 의하여 수리학적 유량 계산을 수행하는 EXTRAN 블록이 적합하며, EXTRAN 블록을 수행하기 이전에 각 소유역마다 강우로 인하여 발생한 유출 수문곡선이 필요하다. 각 소유역에 대한 유출 수문곡선을 계산하기 위한 모형으로 합리식, HEC-HMS, ILLUDAS 모형 등도 이용 가능하나 본 연구에서는 도시지역의 물리적인 특성을 보다 잘 반영할 수 있는 SWMM 모형의 RUNOFF 블록을 이용하였다.

RUNOFF 블록은 초기 연산이 수행되는 부분으로 강우사상에 대해 배수유역에서의 유출현상과 수질변화를 모의하며, 임의의 강우우량도, 선행강우조건, 토지이용도, 지형도 등의 자료를 이용하여 지표면 및 지표하 유출을 추적한다. RUNOFF 블록에서의 지표면유출에는 마찰경사를 유역경사와 같다고 가정하는 운동과 근사법인 비선형 저류방정식이 사용된다. 각 소유역에서의 수심과 유량을 결정하기 위해 연속방정식과 Manning 공식이 사용된다. 운동과 근사법은 배수영향이 큰 경우에는 적합하지 않다. 계산 수행시에는 상류부 경계조건만이 필요하고, 각 수로요소는 다른 요소에 대해 독립적인 계단형 수로로 가정한다. RUNOFF 블록에서 관로유출은 비선형 저류방정식으로부터 계산된다. 이 방정식의 해를 구하기 위하여 모형개발 초기에는 수정 Euler 방법을 사용하였으나, 후에 보다 안정된 해를 얻기 위해 Newton-Raphson 방법으로 대체되었다. Manning 공식이 각 적분 연산구간에서 사용되며, 유출현상의 동역학적 거동은 준 정류(Quasi-steady)상태로 근사 처리된다.

EXTRAN 블록은 배수관망시스템에서 유량과 수심을 계산하기 위해 개수로 · 관수로 등으로 유입되는 RUNOFF 블록 또는 타 지표면 유출 모형으로 부터의 유입 수문곡선을 동역학과 방정식을 사용하여 추적한다. EXTRAN 블록은 합류, 분류시스템으로 구성되는 도시 배수유역에서 유출현상을 모의할 수 있으며, 자연수로와 같은 임의 단면의 수로도 사다리꼴로 근사시켜 계산한다. 흐름을 정류로 가정하고 유출해석을 하는 경우 배수 수문곡선을 구할 수 없는데, 이러한 문제점을 보완하기 EXTRAN 블록은 흐름을 부정류로 계산하도록 설계되었다. 기본 방정식으로 1차원 부정류 점변 흐름방정식인 동역학과 방정식을 사용하며, 수치해석적으로 시간에 대하여 양해법을 사용한다. 계산시간 간격은 시스템 내에서 가장 짧은 수로 · 관로를 통과하는 파속의 크기를 고려하여 결정되며, 배수시스템을 LINK와 NODE로 구성하여 기존의 유출모형이 관망형태를 수지상 형태로 한정된 점을 보완할 뿐만 아니라, LOOP형 배수관망, 웨어, 오리피스, 펌프 등의 수리구조물로 인한 측방류 유입, 부분적인 압력류 등을 계산할 수 있다.

2.2 2차원 침수해석 모형

본 연구에서는 도시지역에서의 침수해석을 위한 확산과 기반의 2차원 침수해석 모형을 적용하였다. 선행된 연구를 통하여 확산과 방정식을 적용한 2차원 지표류 흐름해석의 적합성이 확인되었고(Akan and Yen, 1981; Hromadka and Lai, 1985; Tayfur et al, 1993; Fennema et al, 1994), 본 연구에서 적용한 확산과 기반의 2차원 침수해석 모형 또한 선행된 연구를 통하여 적용성이 입증되었다(최규현과 한건연, 2005a, 2005b; 이창희 등, 2006a, 2006b; 조완희 등, 2009). 확산과 기반 2차원 침수해석 모형의 기본방정식인 천수방정식을 x, y 방향 성분으로 기술하면 연속방정식과 운동량방정식을 식(1)~식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial d}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = e \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g \left(S_{ox} - S_{fx} - \frac{\partial d}{\partial x} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = g \left(S_{oy} - S_{fy} - \frac{\partial d}{\partial y} \right) \quad (3)$$

여기서, d = 지표면 수심

q_x, q_y = x, y 방향에 대한 단위폭당 유량

u, v = x, y 방향의 평균 속도

S_{ox}, S_{oy} = x, y 방향의 하상경사

S_{fx}, S_{fy} = x, y 방향의 마찰경사

e = x, y 단위면적당 생성항 혹은 소멸항

배수시스템 내에서 발생한 월류량은 생성항으로 취급되고, 월류로 인하여 지표면으로 전파되는 유량이 다시 배수시스템으로 유입되는 유량은 소멸항으로 취급된다. 운동량 방정식을 간단히 나타내는데 있어서, 운동과 근사법은 하상경사와 마찰경사를 제외한 모든 항을 무시할 수 있다고 가정한다. 특히 가파른 수로바닥경사에 적합한 이 가정은 많은 강우-유출 모형의 기초가 되어왔다. 그러나 운동과 근사법으로는 홍수파에 대한 모의를 수행할 때 중요한 하류 교란으로 발생하는 배수효과를 예측할 수 없다. 확산과 근사법은 배수효과를 고려할 수 있으며, 거친 표면위의 지표류와 수로흐름에 적용될 수 있다. 확산과 모형의 근사해는 운동과 모형보다도 더욱 넓은 적용범위를 갖게 되며, 동역학과 모형과 비교하면 매우 작은 정도의 손실만이 있게 된다. 또한, 동역학과 모형에 비하여 확산과 모형의 근사해의 경우 계산시간에 있어서의 큰 개선이 있게 된다. 확산과 근사법에 기초한 운동량 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{fx} - S_{ox} = \frac{\partial d}{\partial x} \quad (4)$$

연속 및 운동량 방정식과 함께 마찰과 관련된 유량과 수심 및 다른 매개변수들을 관계 짓기 위한 방정식을 통해 수리학적 매개변수가 이용된다. x 방향 수심-유량 관계의 일반화된 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_x = \alpha_x d^\beta \quad (5)$$

여기서, α_x 와 β 는 층류 혹은 난류와 같은 흐름형에 의해 결정되는 매개변수들이다. 즉, x 방향 층류에서 다음과 같이 된다.

$$\alpha_x = \frac{8g}{K\nu} S_{fx}; \beta = 3 \quad (6)$$

여기서, K 는 저항계수이며, 이와 마찬가지로 거친 영역의 난류에서는 Manning의 경험적 저항 방정식이 사용된다.

$$\alpha_x = \frac{S_{fx}^{1/2}}{n}; \beta = 5/3 \quad (7)$$

비압축성 유체의 연속 방정식에서 단위시간당 해당격자로 들어오고, 나가는 유효유량은 DEM 격자 내부의 유량변화에 비례한다. 격자 (j, k) 에 연속방정식의 1차 근사법의 적용 결과는 다음과 같다.

$$d^{t+\Delta t}(j, k) = d^t(j, k) + \bar{e}\Delta t - \left[\frac{d_x^t(k \rightarrow k+1) - q_x^t(k-1 \rightarrow k)}{W} \right] \Delta t - \left[\frac{d_y^t(j \rightarrow j+1) - q_y^t(j-1 \rightarrow j)}{W} \right] \Delta t \quad (8)$$

여기서, $d^{t+\Delta t}(j, k)$ = 시간 $t + \Delta t$ 에서 격자 (j, k) 의 흐름 수심
 $d^t(j, k)$ = 시간 t 에서 격자 (j, k) 의 흐름 수심
 $\bar{e}$ = 시간 t 에서 단위 시간단계의 생성 · 소멸량
 $d_x^t(k \rightarrow k+1)$ = (j, k) 와 $(j, k+1)$ 사이의 x 방향 단위유량
 $q_x^t(k-1 \rightarrow k)$ = $(j, k-1)$ 과 (j, k) 사이의 x 방향 단위유량
 $d_y^t(j \rightarrow j+1)$ = (j, k) 와 $(j+1, k)$ y 방향 단위유량
 $q_y^t(j-1 \rightarrow j)$ = $(j-1, k)$ 과 (j, k) 사이의 y 방향 단위유량
 W = 격자 크기

특정 시간 및 위치의 단위유량은 오직 마찰 경사의 부호에 의해 결정되는 흐름방향에 의해 결정된다. 예를 들면, x 방향의 1차원 마찰 경사는 다음과 같이 계산된다.

$$S'_{fx}(k-1 \rightarrow k) = S_{ox}(k-1 \rightarrow k) - \frac{d^t(j, k) - d^t(j, k-1)}{W} \quad (9)$$

여기서, 수로 바닥 경사는 다음과 같이 주어져 있다.

$$S_{ox}(k-1 \rightarrow k) = \frac{E(j, k) - E(j, k-1)}{W} \quad (10)$$

여기서, E 는 사각형 격자의 중앙 표면고도를 나타내며, 화살표는 방향을 의미한다. 계산된 마찰 경사에 기초하여, 유량은 다음과 같이 근사적으로 표현된다.

① $S'_{fx}(k-1 \rightarrow k) \geq 0$ 인 경우

$$q_x^t(k-1 \rightarrow k) = \frac{1}{n(j, k-1)} [d^t(j, k-1)]^{5/3} [S'_{fx}(k-1 \rightarrow k)]^{1/2} \quad (11)$$

② $S'_{fx}(k-1 \rightarrow k) < 0$ 인 경우

$$q_x^t(k-1 \rightarrow k) = \frac{1}{n(j, k)} [d^t(j, k)]^{5/3} [S'_{fx}(k-1 \rightarrow k)]^{1/2} \quad (12)$$

마찬가지로, 유량 $q_x^t(k \rightarrow k+1)$ 은 $S'_{fx}(k \rightarrow k+1)$ 의 부호에 근거하여 계산되며, y 방향의 유량은 y 방향의 마찰경사의 부호에 근거하여 계산된다. 표면수심의 초기조건은 0으로 가정하지만 이는 필요한 경우 특정 값이 입력된다. 경계조건은 유역 외부의 요소로의 유입이 없다고 가정하며, 해석은 지정된 종료시간이 끝날 때까지 진행된다.

3. 모형의 적용

3.1 대상유역

본 연구의 대상유역인 부산광역시 해운대구 우동지역과 센텀시티 일원의 BEXCO(Busan Exhibition and Convention Center) 지역은 수영강 하류부에 위치하고 있으며, 배수구역 면적은 65.48 ha이고 배수구역의 80% 이상이 주거 및 상업지역으로 개발되어 있는 지역이다. Fig. 1은 대상유역의 위치 및 형상을 보여준다. 대상유역은 우수관로의 최종 방류구가 수영강 계획홍수위(EL. 0.54 m) 보다 낮게 설치되어 우수의 내수배제 불량으로 침수가 자주 발생하는 상습침수지역으로

Fig. 1. Location and Shape of Study Area

Fig. 2. Inundation Trace Map of Study Area (2009.7.7)

집중호우에 따른 도로 및 상업지역에서의 침수피해에 대한 대책 및 관리가 요구되는 지역이다. 대상구역의 침수사례로는 센텀시티 부지조성 이후 2008년 4차레에 걸쳐 내수배제 불량에 의한 침수가 발생하였으며, 2009년 7월 7일 집중호우와 2009년 7월 19일 집중호우로 인해 BEXCO 및 센텀시티 주변 도로에 침수피해가 발생하였다. 본 연구의 대상사례인 2009년 7월 7일 집중호우에 따른 대상구역의 침수피해는 수영강 부근의 해수면이 만조위일 때 집중호우가 겹쳐 외수위의 상승으로 인하여 우수배제가 제대로 이루어지지 않았기 때문에 발생한 것으로 확인되었다. Fig. 2는 2009년 7월 7일 집중호우시 대상구역의 침수피해 지역을 보여준다.

3.2 도시지역 유출해석

강우자료는 2009년 7월 7일 당시 해운대 AWS자료를 이용하였으며, 총 강우량은 지속시간 13시간 동안 343.5mm로 기록되었다. Fig. 3은 대상구역 주변의 해운대 AWS에 기록된 우량주상도를 보여준다. SWMM 모형을 적용한 대상구역의 유출해석에 적용된 우수관망도는 Fig. 4와 같다. 본 연구의 대상구역은 우수관로의 최종방류구가 수영강 하구와 수영

Fig. 3. Hyetograph at Haeundae AWS (2009.7.7)

Fig. 4. Drainage System in Study Area

Fig. 5. Surge Point in Drainage System

Fig. 6. Surge at J59 and J76 manhole

만에 접해있어 만조시 집중호우가 겹치는 경우에는 외수위의 상승으로 인하여 우수배제 불량에 따른 침수피해가 우려되는 지역이다. 이에 따라 본 연구에서는 외수위 상승에 따른 우수배제 불량을 고려하기 위하여 우수관망도의 경계조건에 외수위 부분을 입력할 수 있도록 구성하였으며, 외수의 경계조건은 국립해양조사원에서 제공하는 조위자료를 이용하였다. 유출해석을 위하여 대상유역을 102개의 소유역으로 구분하였으며, 맨홀 및 유입부는 78개로 구성하였다. SWMM 모형에 2009년 7월 7일 당시 강우자료를 적용한 유출해석을 통하여 J59 맨홀과 J76 맨홀에서 월류가 발생하는 것을 확인하였다. Fig. 5는 월류가 발생한 J59 맨홀과 J76 맨홀의 위치를 보여주고, Fig. 6은 유출해석을 통하여 계산된 J59 맨홀과 J76 맨홀에서의 월류량을 보여준다.

3.3 2차원 침수해석

SWMM 모형을 적용한 유출해석을 통하여 계산된 월류량을 확산과 기반의 2차원 침수해석모형에 적용하여 대상구역에서의 침수해석을 실시하였다. 침수해석에 미치는 건물 및 도로의 영향을 고려하기 위하여 건물 및 도로의 영향을 고려한 계산격자와 건물 및 도로의 영향을 고려하지 않은 계산격자에 대한 침수해석을 수행하였다. 대상구역에서의 2차원 침수해석을 위하여 대상유역을 총 955,724개의 2 m×2 m 계산

Fig. 7. Synthetic Grid Shape of Study Area considering Building and Road

Fig. 8. Analysis of Flood Inundation with Building and Road

(a) 3hr

(b) 5hr

(c) 10hr

(d) Max.

Fig. 9. Analysis of Flood Inundation without Building and Road

격자로 구성하였다. Fig. 7은 기존의 표고점과 등고선을 이용하여 생성된 지형자료에 수치지도로부터 추출한 건물과 도로를 합성하는 과정을 통하여 만들어진 계산격자의 형상을 보여준다. 2차원 침수해석을 위한 제내지에서의 조도계수는 홍수지도제작지침(건설교통부, 2001)의 범람모형 매개변수 산정 절차에 의거 토지이용에 따른 점유면적을 바탕으로 조도계수를 산출하는 합성등가조도계수 방법을 채택하였으며, 본 연구에서는 홍수지도 제작(낙동강 하류부) 보고서(건설교통부, 2006)에 제시된 부산지구의 합성등가조도계수에 기초하여 0.070~0.125사이의 값을 적용하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 건물 및 도로의 영향을 고려한 경우와 건물 및 도로의 영향을 고려하지 않은 경우에 대한 대상유역에서의 2차원 침수해석 결

과를 나타낸 것이다.

4. 침수해석 결과 및 분석

본 연구에서는 2차원 침수해석에서의 건물 및 도로의 영향을 정량적으로 분석하였다. 건물 및 도로의 영향을 고려한 2차원 침수해석결과 32,484 m²에 해당하는 지역에서 침수가 발생하는 것으로 계산되었고, 건물 및 도로의 영향을 고려하지 않은 경우는 30,224 m²에 해당하는 지역에서 침수가 발생하는 것으로 계산되었다. 또한 건물 및 도로의 영향을 고려한 경우의 최대 침수심은 1.179 m, 건물 및 도로의 영향을 고려하지 않는 경우의 최대 침수심은 1.071 m로 계산되었다.

건물 및 도로영향을 고려한 도시지역에서의 2차원 침수해석

Table 1. Results of Inundation Analysis

	With Building and Road	Without Building and Road
Inundation Area (m ²)	32,484	30,224
Max. Depth (m)	1.179	1.071
Fitness (%)	83.32	63.99

Fig. 10. Comparison Point about Inundation Depth

본 연구에서는 2차원 침수해석의 침수범위에 대한 공간적 분포도를 정량적으로 분석하기 위하여 식(13)과 같은 적합도 공식을 적용하여 대상유역에서의 침수해석 결과를 분석하였다. 대상유역에서의 시간별 침수지역 및 침수심에 대한 정확한 기록이 없고 추후 작성된 침수흔적도만 존재하기 때문에, 침수해석의 결과로 나타난 최대 침수범위와 Fig. 2에 제시된 침수흔적도의 면적비교를 통하여 적합도를 분석하였다.

$$Fit(\%) = \frac{A_{obs} \cap A_{cal}}{A_{obs} \cup A_{cal}} \times 100 \quad (13)$$

침수해석에 대한 적합도는 침수흔적도의 실제침수면적인 A_{obs} 와 침수해석 모형으로부터 계산된 침수면적인 A_{cal} 의 비교를 통하여 분석하였다. 2009년 7월 7일 호우사상 당시의 실제 침수면적은 30,000 m²로 기록되었으며, Table 1에 제시된 것과 같이 건물 및 도로의 영향을 고려한 경우의 침수면적은 32,484 m², 건물 및 도로의 영향을 고려하지 않은 경우의 침수면적은 30,224 m²로 계산되어 단순히 침수면적으로 비교를 한다면 건물 및 도로의 영향을 고려하지 않은 경우가 보다 정확한 계산결과를 나타내는 것으로 판단될 수 있기 때문에 본 연구에서는 공간적 분포양상을 분석하기 위하여 적합도 분석을 실시하였다. 식(13)에 제시된 적합도 공식을 적용한 결과 건물 및 도로의 영향을 고려한 경우는 83.32%의 적합도를 나타내는 것으로 분석되었고, 건물 및 도로의 영향을 고려하지 않은 경우는 63.99%로 적합도가 크게 떨어지는 것으로 분석되었다. 따라서 건물 및 도로의 영향을 고려한 2차원 침수해석 결과의 공간적 분포도가 실제 침수범위와 매우 유사한 양상을 보이고 있는 것을 확인할 수 있었다. Table.

Table 2. Comparison of Inundation Depth

Point	With Building and Road	Without Building and Road
A	0.408m	0.311m
B	0.441m	0.354m
C	0.643m	0.536m
D	1.168m	1.034m

1은 대상유역에서의 2차원 침수해석 결과를 정리한 것이다.

도시지역 침수피해에 대한 홍수위험지도의 작성이나 홍수위험도를 계산하는 경우 침수심은 중요한 계산인자가 된다. 이에 따라 본 연구에서는 건물 및 도로의 영향에 따른 침수심의 차이를 분석하기 위하여 Fig. 10과 같이 4군데의 지점을 선정하여 침수심의 변화를 분석하였다.

건물 및 도로의 영향에 따른 대상지점에서의 침수심을 비교한 결과 0.09 m~0.13 m정도의 차이를 보이는 것으로 확인되었다. 건물 및 도로의 영향을 고려하지 않은 경우 건물의 차지하는 면적 및 위치 등이 무시되기 때문에 침수심이 실제에 따른 홍수파의 확산양상도 다르게 나타날 수 있고, 건물 및 도로의 영향을 고려하지 않은 침수해석 결과를 활용하여 홍수위험지도 및 EAP 등을 구축하는 경우 최대 침수심 및 최대 유속이 발생하는 지점이 실제와 다르게 계산될 수 있는 위험성을 가질 수 있다. 따라서 본 연구의 대상유역과 같이 경제발전과 인구집중에 따라 막대한 경제적 손실이 예상되는 도시지역에서의 침수피해에 대한 저감대책 수립을 위해서는 건물 및 도로의 영향을 고려한 정교한 침수해석이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 2009년 7월 7일에 부산지역에서 발생한 돌발강우에 대하여 건물 및 도로의 영향을 고려함으로써 실제에 근접한 지형자료를 구축하여 2차원 침수해석을 실시하였다. 건물 및 도로의 고려여부에 따라 침수해석시 침수심 및 침수면적에 미치는 영향을 분석하기 위하여 건물 및 도로의 영향을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우로 시나리오를 구분하여 침수해석을 수행하였다. 본 연구의 주요 결과들을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서는 미국 환경보전국에서 개발한 SWMM 모형과 확산파 방정식을 기본식으로 하는 2차원 침수해석 모형을 통합하여 배수시스템으로부터 월류된 유량이 발생하는 경우 2차원 침수해석을 실시하도록 구성하였으며, 수치지형도로부터 추출한 건물 및 도로자료와 등고선 및 표고점을 활용하여 구축된 지표면자료를 합성하여 실제지형에 근접한 지형자료를 구축하였다.
- 2) 건물 및 도로의 영향을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대하여 최대 침수심을 비교하였다. 건물 및 도로의 영향을 고려한 경우의 최대 침수심은 1.179 m, 건물 및 도로의 영향을 고려하지 않은 경우의 최대 침수심은 1.071 m로 계산되었다. 이는 건물의 영향으로 침수가 지

체되는 현상이 발생하고 건물의 체적으로 인해 침수심이 더 높게 나타나는 것으로 분석되었다.

- 3) 2009년 7월 7일의 집중호우로 인하여 BEXCO 및 센텀시티 주변 도로 침수가 발생했던 지역에 대하여 건물 및 도로의 영향을 고려한 2차원 침수해석 결과를 당시의 침수흔적 자료와 비교하여 침수해석 결과의 적합도를 분석하였다. 적합도 공식을 적용한 결과 건물 및 도로의 영향을 고려한 경우는 83.32%의 적합도를 나타내는 것으로 분석되었고, 건물 및 도로의 영향을 고려하지 않은 경우는 63.99%로 적합도가 크게 떨어지는 것으로 분석되었다.
- 4) 도시지역 침수피해에 대한 홍수위험지도의 작성이나 홍수위험도를 계산하는 경우 침수심은 중요한 계산인자가 된다. 이에 따라 본 연구에서는 건물 및 도로의 영향에 따른 지점별 침수심의 차이를 분석하기 위하여 4군데의 지점을 선정하여 최대 침수심의 변화를 분석하였다. 건물 및 도로의 영향에 따른 대상지점에서의 침수심을 비교한 결과 0.09 m~0.13 m정도의 차이를 보이는 것으로 확인되었다.
- 5) 건물 및 도로의 영향을 고려하지 않은 경우 건물의 차지하는 면적 및 위치 등이 무시되기 때문에 침수심이 실에 따른 홍수파의 확산양상도 다르게 나타날 수 있고, 건물 및 도로의 영향을 고려하지 않은 침수해석 결과를 활용하여 홍수위험지도 및 EAP 등을 구축하는 경우 최대 침수심 및 최대 유속이 발생하는 지점이 실제와 다르게 계산될 수 있는 위험성을 가질 수 있다. 따라서 경제발전과 인구집중에 따라 막대한 경제적 손실이 예상되는 도시지역에서의 침수피해에 대한 저감대책 수립을 위해서는 건물 및 도로의 영향을 고려한 정교한 침수해석이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 건설교통부 (2001) **홍수지도 제작지침**.
 건설교통부 (2006) **홍수지도 제작(낙동강 하류부) 보고서**.
 김영주, 한건연, 조완희 (2010) 지하저류조 설치에 따른 침수피해 저감효과 분석, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제30권, 제1B호, pp. 41-52.
 이종형, 연기석 (2008) XP-SWMM 모형을 적용한 도시지역의 침수해석, **한국방재학회 논문집**, 한국방재학회, 제8권, 제5호, pp. 155-161.
 이창희, 한건연, 최규현 (2006a) SWMM을 연계한 DEM기반의 도시침수해석 모형, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제5호, pp. 441-452.
 이창희, 한건연, 김지성 (2006b) GIS를 이용한 도시지역 침수해

- 석, **한국지리정보학회지**, 한국지리정보학회, 제9권, 제2호, pp. 115-125.
 이창희, 한건연 (2007) 건물영향을 고려한 GIS기반 도시침수해석 모형, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제3호, pp. 223-236.
 조완희, 한건연, 최승용 (2009) GIS와 연계한 확산과 침수해석 모형의 적용에 대한 연구, **한국지리정보학회지**, 한국지리정보학회, 제12권, 제3호, pp. 88-100.
 조완희, 한건연, 김영주 (2010) GIS를 활용한 2차원 침수해석에서의 건물영향 분석, **한국지리정보학회지**, 한국지리정보학회, 제13권, 제2호, pp. 119-132.
 최계운, 이호선, 이소영 (2007) MOUSE 및 MIKE21 통합모형을 이용한 도시구역의 침수분석, **한국방재학회 논문집**, 한국방재학회, 제7권, 제4호, pp. 75-83.
 최규현, 한건연 (2005a) 댐붕괴 해석을 위한 2차원 홍수범람 모형의 개발 : I. 이론 및 모형의 검증, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제25권, 제2B호, pp. 135-142.
 최규현, 한건연 (2005b) 댐붕괴 해석을 위한 2차원 홍수범람 모형의 개발 : II. 적용 예, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제25권, 제2B호, pp. 143-149.
 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.
 Bates, P.D. and De Roo, A.P.J. (2000) A simple raster-based model for flood inundation simulation, *Hydrological Processes*, Vol. 236, pp. 54-77.
 Bradbrook, K.F., Lane, S.N., Waller, S.G., and Bates, P.D. (2004) Two dimensional diffusion wave modelling of flood inundation using a simplified channel representation, *International Journal of River Basin Management*, Vol. 2, No. 3, pp. 1-13.
 Fennema, R.J., Neidrauer, C.J., Johnson, R.A., MacVictor, T.K., and Perkins, W.A. (1994) A computer model to simulate natural everglades hydrology, *The Ecosystem and its Restoration*, St. Lucie Press, Florida, USA. pp. 249-289.
 Fukuoka, S., Kawashima, M., Hokoyama, H., and Mizuguchi, M. (1998) The numerical simulation model of flood-induced flows in urban residential area and the study of damage reduction, *Journal of Hydraulic, Coastal and Environmental Engineering*, No. 600, pp. 23-36.
 Horritt, M. S. and Bates, P. D. (2002) Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation, *Journal of Hydrology*, Vol. 268, No. 1, pp. 87-99.
 Hromadka, T.V. and Lai, C. (1985) Solving the two-dimensional diffusion flow model, *Proc. Spec. Conf., sponsored by the Hydro. Div. of ASCE*, Lake Buena Vista, Florida, USA.
 Leandro, J., Chen, A.S., Djordjevic, S., and Savic, D.A. (2009) Comparison of 1D/1D and 1D/2D Coupled (Sewer/Surface) Hydraulic Models for Urban Flood Simulation, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 135, No. 6, pp. 95-594.
 Marks, S. and Bates, P.D. (2000) Integration of high-resolution topographic data with floodplain flow models, *Hydrological Processes*, Vol. 14, pp. 2109-2122.
 Schmitt, T.G., Thomas, M., and Etrich, N. (2004) Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems, *Journal of Hydrology*, Vol. 299, No. 3, pp. 300-311.
 Shige-eda, M. and Akiyama, J. (2003) Numerical and Experimental Study on Two-Dimensional Flood Flows with and without Structures, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 10, pp. 817-821.
 Tayfur, G., Kavvas, M.L., Govindaraju, R.S., and Storm, D.E. (1993) Applicability of St. Venant equations for two-dimensional overland flows over rough infiltrating surface, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 1, pp. 51-63.

Yu, D. (2010) Parallelization of a two-dimensional flood inundation model based on domain decomposition, *Environmental Modelling & Software*, Vol. 25, pp. 935-945.

Yu, D. and Lane, S.N. (2006a) Urban fluvial flood modelling using a two-dimensional diffusion wave treatment, part 1: mesh resolution effects, *Hydrological Processes*, Vol. 207, pp. 1541-1565.

Yu, D. and Lane, S.N. (2006b) Urban fluvial flood modelling using

a two-dimensional diffusion wave treatment, part 2: development of a sub grid-scale treatment, *Hydrological Processes*, Vol. 207, pp. 1567-1583.

◎ 논문접수일 : 11년 08월 02일
◎ 심사의뢰일 : 11년 08월 22일
◎ 심사완료일 : 11년 10월 11일