

도시지역 침수해석을 위한 수치모형의 적용 및 평가

Application and Evaluation of Numerical Modeling for Urban Flood Inundation Analysis

한건연*, 조완희**, 이경택***, 이창희****

Kun Yeun Han, Ki Hong Ahn, Wan Hee Cho, Chang Hee Lee

요 지

최근의 이상기후 등에 의해 도시유역에서의 강우가 증가하게 되면, 홍수유출량의 증가를 야기하고 이로 인하여 하천이 월류하거나 제방이 붕괴되고, 배수시스템을 통한 배수가 불량하게 되어 침수피해가 발생하게 된다. 도시지역 홍수피해는 주거지역으로 확장되어 주택을 파손시키고 경우에 따라서는 인명손실을 일으키기도 한다. 특히 도시지역에서는 인구와 각종 시설들이 집중되어 있기 때문에 일단 침수가 발생하게 되면 막대한 피해가 발생한다. 이러한 도시홍수 피해를 줄이기 위해서, 홍수 범람에 대한 예측이 반드시 필요하다.

본 연구에서는 Link와 Node로 구성된 개개의 요소가 해당지점을 대표하도록 구성되는 비정형 격자기반의 침수해석 모형을 개발하였고, 비정형 격자기반 침수해석모형의 적용성을 검증하기 위해 일방향 경사유역 및 DEM기반 침수해석 모형과 비교하였다. DEM기반 침수해석 모형과의 비교를 위해 SWMM 모형을 이용하여 배수시스템에서 월류되는 유량을 산정하였고, 월류된 유량이 전파되어 가는 과정을 해석하기 위하여 먼저 흐름을 수로형과 위어형 흐름으로 구분하였다. 다음으로 내부의 위상관계를 분석하여 각 Link와 Node에 고유번호를 지정하고 각 Link에 연결된 Node번호들을 지정하여 침수해석을 실시하였다. DEM기반 침수해석 모형과 비정형 격자기반 침수해석 모형을 적용한 침수해석 결과에 대하여 GIS Tool을 이용하여 대상유역에 대한 입력자료를 구축하고, 모의 결과를 도시함으로써 두 침수해석 모형의 비교 및 분석을 실시하였다.

핵심용어 : 도시지역 침수해석, SWMM, DEM기반 침수해석, 비정형 격자기반 침수해석

1. 서 론

최근 들어 전세계적으로 지구 온난화와 이상기후에 따라 호우 발생빈도가 증가하고 홍수위험도가 증대되고 있다. 미국과 중앙아메리카 지역에서는 2005년에 허리케인 리타, 스텐, 월마 등에 의해 수천명의 인명피해와 상당한 재산피해를 입은바 있었고, 특히 미국에서는 허리케인 카트리나가 강타한 미국 뉴올리언즈에서의 침수로 인해 인명 1,242명, 재산 200조원의 피해를 당하였다. 일본에서는 2004년에 10여개의 태풍에 의해서 290명의 인명피해, 50조원 이상의 재산피해를 입었고, 2005년에는 태풍 나비에 의해서 37조원의 재산피해를 입었다. 2006년 7월 중국남부를 강타한 태풍 빌리스로 후난지역 346명, 관동지역 106명 등 530명이 사망하였다.

* 정회원 · 경북대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 · E-Mail : kshanj@knu.ac.kr

** 정회원 · 경북대학교 토목공학과 박사과정 · 공학석사 · E-Mail : jobbaeng@hotmail.com

*** 정회원 · 경북대학교 토목공학과 석사과정 · 공학사 · E-Mail : ktredboy@hanmail.net

**** 정회원 · 서울시정개발연구원 디지털도시부 부연구위원·공학박사·E-mail:changhee@sdi.re.kr

집중호우로 인한 도시 내수배제 능력의 부족으로 월류가 발생하거나 하천의 제방붕괴, 통수능의 부족 등으로 인하여 범람이 발생하는 경우, 재해 예방차원에서 가장 근본적인 것은 침수의 양상을 파악할 수 있어야 한다. 즉, 어느 지역까지 침수지역이 확장될 것인가, 얼마나 빠르게 범람된 흐름이 흘러갈 것인가, 그리고 언제 홍수위가 감소할 것인가를 파악하는 것이 매우 중요하다. 그러므로 국내 도시지역 지형특성에 적합한 침수예측 모형의 개발이 필요하며, 이를 이용하여 다양한 범람 조건을 좀 더 편리하게 모의할 수 있게 된다.

2. 비정형 격자기반 침수해석

비정형 격자에서의 침수해석의 일반적인 형태는 Link와 Node로 구성된 개개의 요소가 해당지점을 대표하도록 구성된다. Node는 폐합된 도형으로 이루어진 개개의 격자가 이에 해당 되며, Node와 관련된 변수는 유량, 수위, 그리고 표면적이다. Link는 각 격자의 경계면, 혹은 Node의 중심간의 길이에 해당되며, 유량을 전송하는 통로와 같다. 각 격자에서의 수위와 격자간에 이동되는 유량은 연속방정식과 운동방정식에 의해 구해진다. 특정 격자에서의 연속 방정식은 다음과 같다.

$$A_{si} \frac{dH_i}{dt} = Q_{in} + \sum_k Q_{i,k} (H_j - H_k) \quad (1)$$

여기서, A_{si} = 격자 i의 표면적

Q_{in} = 외부유입량

$Q_{i,k}$ = 격자 i 와 격자 k 사이의 이동되는 유량

식 (1)에서 $Q_{i,k}$ 가 양수이면 유량이 격자 k에서 격자 i로 이동되는 것을 의미하고, 음수이면 격자 i에서 격자 k로 흐른다는 것을 의미한다. 식 (1)에서 유량 $Q_{i,k}$ 는 그림 1과 같이 수로형과 위어형의 두 가지 흐름으로 구분되는데, 두개의 격자가 모두 도로부분인 경우는 수로형에 해당되고, 위어형의 경우는 도로와 도로 이외의 지점간의 물의 이송이나, 도로 이외의 지점들 간의 물의 이동인 경우가 해당된다.

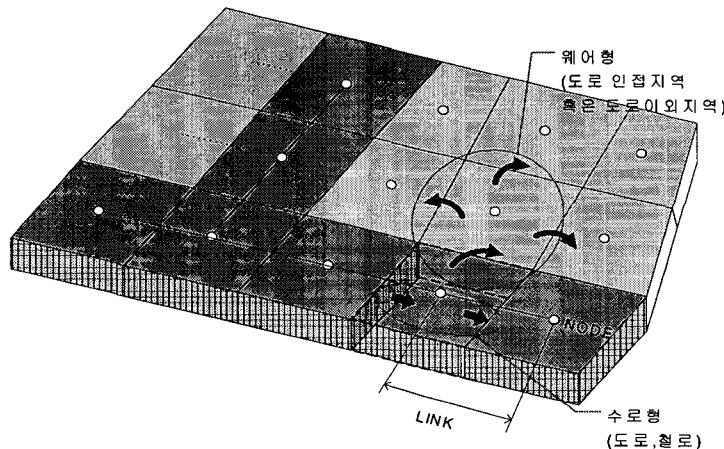


그림 1. 비정형격자 침수모형의 개념도

인접한 두 격자인 i 와 k의 수위를 각각 H_i 와 H_k 라고 명명하고, $H_i < H_k$ 인 경우 두 인접한 격자간의 이동되는 유량은 수로형인 경우 다음과 같이 계산된다.

$$Q_{i,k} = sign(H_k - H_i)\Phi(\bar{H}_{i,k})\sqrt{|H_k - H_i|} \quad (2)$$

여기서, $\Phi = \frac{A(H)R(H)^{2/3}}{n\sqrt{\Delta x}}$

$$\bar{H}_{i,k} = \alpha H_k + (1 - \alpha) H_i$$

α = 가중인자

두 인접한 격자 간의 이동되는 유량이 위어형인 경우에는 자유 월류위어와 수중위어로 구분하여 계산된다.

① $(H_i - H_w) < \frac{2}{3}(H_k - H_w)$ 인 경우 : 자유 월류위어(free overflow weir)

$$Q_{i,k} = \mu_1 L_w \sqrt{2g} (H_k - H_w)^{3/2} \quad (3)$$

② $(H_i - H_w) \geq \frac{2}{3}(H_k - H_w)$ 인 경우 : 수중위어(submerged weir)

$$Q_{i,k} = \mu_2 L_w \sqrt{2g} (H_k - H_w)(H_k - H_i)^{1/2} \quad (4)$$

여기서, L_w = 경계면 유효폭

H_w = 경계면 최고표고

μ_1 = 유량계수 ($0.36 \sim 0.57$)

μ_2 = 유량계수 ($2.598 \mu_1$)

식 (2.13)은 유한차분접근법에 의해 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$A_{si} \frac{H_i^{n+1} - H_i^n}{\Delta t} = Q_{in} + \left\{ \Theta \sum_k Q_{i,k}^{n+1} + (1 - \Theta) \sum_k Q_{i,k}^n \right\} \quad (5)$$

도시침수해석을 위한 본 모형에서는 $\Theta=0$ 으로 하여 양해법을 채택하였다. 적절한 경계 조건과 초기조건을 가지고 연속방정식과 운동방정식을 이용하여 구축된 mesh에서 수위와 유량을 가지고 침수해석을 실시하게 된다.

3. 비정형 격자기반 침수해석 모형의 적용

본 연구에서는 Link와 Node로 구성된 개개의 요소가 해당지점을 대표하도록 구성되는 비정형 격자기반의 침수해석 모형을 개발하였고, 비정형 격자기반 침수해석모형의 적용성을 검증하기 위

하여 DEM기반 침수해석 모형과 비교하였다.

비정형 격자기반 지표침수과정을 해석하기 위하여, 먼저 흐름을 수로형과 위어형 흐름으로 구분하였다. 도시지역에서는 도로의 양쪽에 건물들이 건설되기 때문에 침수유량은 도로를 따라 전파되어 가면서 주변 거주지 및 상가로 침수피해를 일으키게 되므로 도로를 따라 흐르는 흐름은 수로형으로 계산하였고, 도로에서 주변 거주지 및 상가로 유량이 전파되는 흐름은 위어형 흐름으로 계산하여 침수해석을 실시하였다.

그림 2는 비정형 격자기반 침수해석에 적용된 반포 배수구역에 대한 격자의 형상 및 월류량 발생지점을 보여준다. 또한 그림 3은 비정형 격자의 Elevation을 나타낸다. 비정형 격자는 반포 배수구역의 토지이용 현황도와 도로 및 유역의 교차점을 중심으로 하여 구성하였다. 강우사상은 지난 2001년에는 7월 14일 16:20시경부터 강우가 내리기 시작하여, 그날 자정 무렵인 23:30시부터 익일 06:00시까지 호우가 집중되었던 강우를 적용하였다.

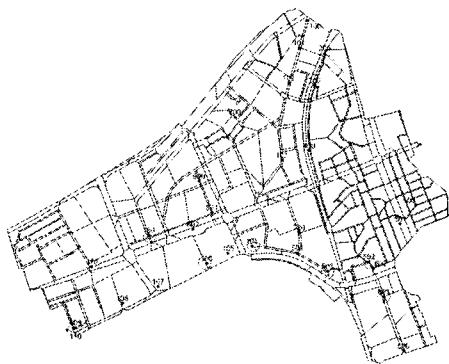


그림 2. 비정형 격자의 형상 및 월류량 발생지점

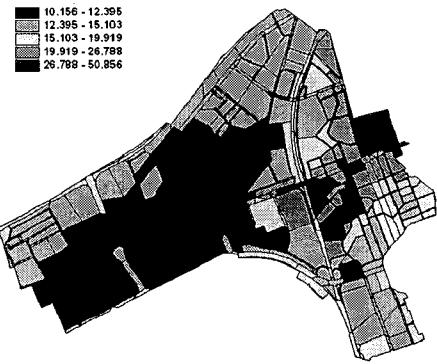
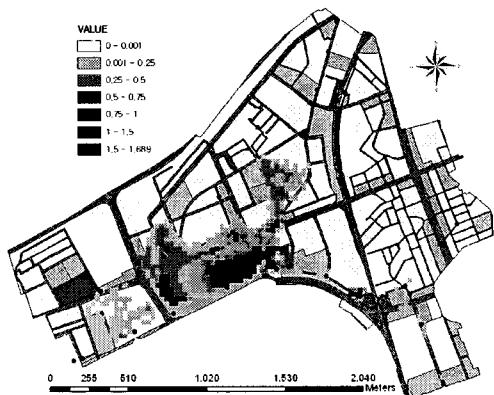
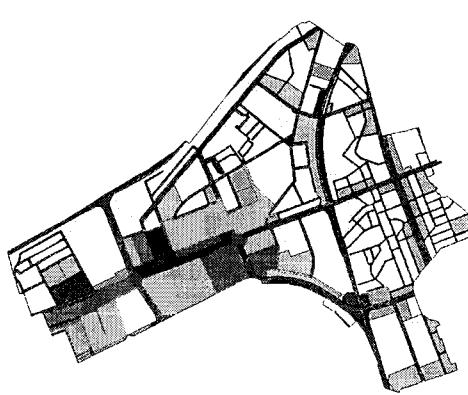


그림 3. 비정형 격자의 Elevation

그림 4는 비정형 격자로 구성된 대상유역을 비정형 격자기반 침수해석 모형으로 모의된 결과를 DEM기반 침수해석 모형으로 모의된 결과와 비교한 것이다. 그림 4에서 두 모형을 비교해 본 결과 침수범위와 침수심이 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만, 비정형 격자의 점유면적에 따라 일부 구간에서는 침수범위의 차이를 나타내고 있다.



(a) DEM기반 침수해석 모형



(b) 비정형 격자기반 침수해석 모형

그림 4. DEM기반 침수해석 모형과의 비교

표 1은 DEM기반 침수해석 모형과 비정형 격자기반 침수해석 모형의 모의시간과 계산격자의 수를 비교한 것이다.

표 1. DEM기반 침수해석 모형과의 비교

	DEM기반 침수해석	비정형 격자기반 침수해석
계산격자의 수	5178	Node-652, Link-1593
모의시간	15hr 37min	22min

4. 결 론

본 연구에서는 도시지역 침수해석을 위해 비정형 격자를 기반으로 하는 침수해석 모형을 개발하였다. 배수시스템에 대한 SWMM 모형과 비정형 격자기반의 침수해석 모형을 통합하고, 강우규모가 배수시스템의 용량을 초과하거나, 하천의 수위상승으로 우수배제를 제대로 수행하지 못함으로써 발생하는 도시지역 침수과정의 해석기법을 제시하였다. 본 연구에서 개발된 모형을 반포 배수구역에 적용하여 침수흔적도 및 DEM기반 침수해석 모형과 비교한 결과 침수범위 및 침수심에 있어 비교적 잘 일치되는 것으로 나타났다.

각 격자의 표고값은 격자를 이루는 폐합도면내의 표고값들을 평균한 값으로 지정되므로 균일한 격자 크기로 구성되는 DEM 기반 침수해석 모형과 다양한 크기의 격자로 구성되는 비정형 격자기반 침수해석모형은 격자의 표고값에 따라 흐름방향 및 전송유량의 차이가 발생할 수 있다. 격자의 Elevation을 이용하여 계산된 수위는 비정형 격자인 경우 격자를 어떻게 구성하느냐에 따라 계산의 결과에 영향을 미치게 된다. 그러므로, 모의 구간을 Link(유량을 전송하는 통로)와 Node(절점, 격자)로 구성하는 비정형 격자기반 모형을 이용하여 지표류 침수해석을 수행하는 경우 격자를 구성할 때 유량 전파과정에서의 지역적 특성을 잘 반영할 수 있는 격자를 생성해야 하는 주의가 요구된다. 반면, 비정형 격자기반 침수해석모형은 DEM 기반 침수해석 모형보다 격자수가 상당히 줄어들기 때문에 계산시간에 있어서 큰 개선효과를 볼 수 있었다.

감 사 의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

참 고 문 현

1. 한국수자원학회, 서울특별시 (2002). 2001 수해백서.
2. 도시홍수재해관리기술연구사업단 (2004). “국내 도시홍수 침수원인 조사 및 분석.”, 2003년도 도시홍수 재해관리 기술보고서, FFC03-09.
3. 도시홍수재해관리기술연구사업단 (2005). “DEM 기반 침수예측모형 개발.”, 2004년도 도시홍수 재해관리 기술보고서, FFC04-09.
4. M.S. Horritt, P.D. Bates(2002). “Evaluation of 1D and 2D Numerical Models for Predicting River Flood Inundation.” Journal of Hydrology 268, 87~99.