

# Sub-Grid를 적용한 2차원 도시침수 해석기법의 개발

## The Development of 2D Urban Inundation Analysis by Sub-Grid Scale Treatment

한건연\*, 안기홍\*\*, 조완희\*\*\*, 이동구\*\*\*\*

Kun-Yeun Han, Ki-Hong Ahn, Wan-Hee Cho, Dong Gu Lee

---

### 요 지

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 합리적으로 모의할 수 있게 된다. 또한 물리적인 모형과의 비교를 통해 매우 복잡한 지형을 가진 도시침수계산 등이 이루어질 수 있으며, 침수구역에 대한 적절한 예경보 및 피난대책의 수립이 가능하게 된다.

본 연구에서는 기존의 DEM 기반 침수해석 모형에서 계산시간이 오래 걸린다는 단점을 보완하기 위해 Sub-Grid를 적용한 침수해석 모형을 개발하였다. 하나의 격자는  $e_1, e_2, e_3, e_4$ 의 표고를 가지는 4개의 보조격자로 구성하였다. 25m×25m의 Sub-Grid를 갖는 50m×50m의 격자에 대한 침수해석 결과와 Sub-Grid가 없이 25m×25m 및 50m×50m 격자로 구성된 대상유역에 대한 침수해석 결과를 비교하였다.

**핵심용어 :** DEM 격자크기의 변화, Sub-Grid, 도시지역 침수해석, 침수흔적도

---

## 1. 서 론

최근의 이상호우 및 국지성 호우 등으로 인하여 도시지역에서는 많은 인명과 재산피해가 발생하고 있다. 홍수 발생빈도가 증가하고 홍수 규모가 증대하는 등 강우 패턴이 과거와 달라지고, 극한 호우의 발생가능성이 증가함으로써 홍수시 피해의 규모도 증가하고 있다. 특히, 경제발전과 인구증가에 따라 도시지역의 침수는 심각한 인명 및 재산 피해를 야기하게 된다. 우리나라의 경우도 서울지방을 비롯한 경기도 지역은 대도시의 특성상 침수에 의해 도시 사회기반시설에 큰 문제점을 야기하였으며, 대도시의 침수는 기존 시설물 및 재산 피해 뿐 아니라 장래 생산성에 있어서도 막대한 경제적 손실이 예상된다.

---

\* 정회원·경북대학교 토목공학과 교수·E-mail : kshanj@knu.ac.kr

\*\* 정회원·경북대학교 토목공학과 박사수료·E-mail : khahnew@empal.com

\*\*\* 정회원·경북대학교 토목공학과 박사수료·E-mail : jobbaeng@hanmail.net

\*\*\*\* 정회원·경북대학교 토목공학과 박사수료·E-mail : ldg@gb.go.kr

격자크기에 따른 침수해석 결과를 통해, 일반적으로 격자크기가 작아질수록 적합도는 높게 나타나지만 격자크기가 작게 되면 침수해석에 적용되는 총 계산격자의 수가 늘어나게 되므로 상당히 많은 계산시간이 요구된다. 다시 말해, 격자크기가 작아질수록 복잡한 지표면의 범람을 예측하는 경우 개선된 예측결과를 얻을 수는 있지만, 침수해석에는 상당한 시간이 요구된다는 것이다.

본 연구에서는 기존의 DEM 기반 침수해석 모형에서 계산시간이 오래 걸린다는 단점을 보완하기 위해 Sub-Grid를 적용한 침수해석 모형을 개발하였다. 하나의 격자는  $e_1, e_2, e_3, e_4$ 의 표고를 가지는 4개의 보조격자로 구성하였다. 25m×25m의 Sub-Grid를 갖는 50m×50m의 격자에 대한 침수해석 결과와 Sub-Grid가 없이 25m×25m 및 50m×50m 격자로 구성된 대상유역에 대한 침수해석 결과를 비교하였다.

## 2. 도시지역에서의 침수해석

### 2.1 2차원 도시침수해석

범람된 유량이 지표면으로 전달되는 경우에 지표면의 저류, 홍수의 감쇠, 건물 주위에서의 흐름, 가로에서의 흐름 등에 따라 그 물리적인 양상을 수식으로 표시하기에는 큰 어려움이 있다. 그러나, DEM 기반 침수해석은 범람예상구역의 물리적인 특성을 정확하게 반영할 수 있는 수리학적 방정식을 기본식으로 하여 해석될 수 있다. 침수해석 지점의 적정범위를 지형도 등을 이용해서 설정하고, 격자망을 구성하여 연속방정식과 운동량 방정식에 의해 흐름을 해석할 수 있다. 천수방정식을  $x, y$  방향 성분으로 기술하면 연속방정식과 운동방정식을 식 (1)~(3)과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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

배수시스템 내에서 발생한 범람유량은 생성항으로 취급되고, 범람유량의 지표면으로 전파되는 유량이 다시 배수시스템으로 유입되는 유량은 소멸항으로 취급된다. 침수된 유량의 연속 방정식에서 단위시간당 해당격자로 들어오고, 나가는 유효유량은 DEM 격자 내부의 유량변화에 비례한다. 격자  $(j, k)$  에 연속방정식의 일차 근사법의 적용결과는 다음과 같다.

$$d^{t+\Delta t}(j, k) = d^t(j, k) + \bar{e}\Delta t - \left[ \frac{q_x^t(k \rightarrow k+1) - q_x^t(k-1 \rightarrow k)}{W} \right] \Delta t - \left[ \frac{q_y^t(j \rightarrow j+1) - q_y^t(j-1 \rightarrow j)}{W} \right] \Delta t \quad (4)$$

### 2.2 Sub-Grid 기법을 이용한 침수해석

그림 1은 침수해석에 적용되는 격자 및 Sub-Grid의 형상을 보여준다. 하나의 격자는  $e_1, e_2, e_3$ , 그리고  $e_4$ 의 표고를 가지는 4개의 Sub-Grid로 구성된다. 또한, 그림 1은 4개의 Sub-Grid가 가지는 표고에 따른 격자 내에서의 형상을 개념적으로 보여주고 있다. Sub-Grid를 고려하지 않는

다면, 4개의 Sub-Grid가 가지는 표고의 평균값으로 격자의 표고  $E$ 를 간단하게 계산할 수 있다. 이러한 경우 수위  $H_{ij}$ 와 격자 내에 채워진 물의 체적  $V_{ij}$ 간의 관계는 선형적이며 다음과 같은 식 (5)로 표시할 수 있다.

$$V_{ij} = w^2 \left( H_{ij} - \frac{1}{N_{ij}} \sum_{k=1}^{N_{ij}} e_k \right) \quad (5)$$

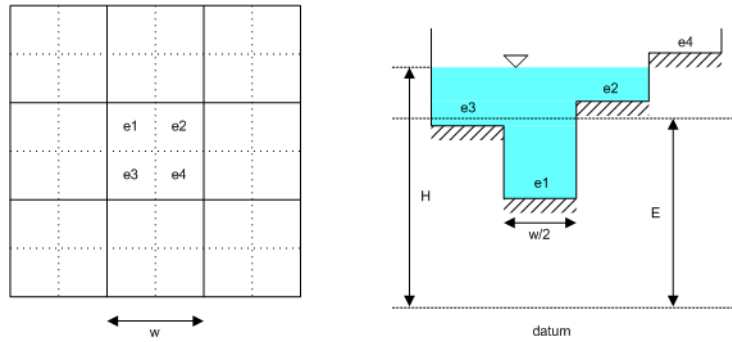


그림 1. 침수해석에 적용되는 Sub-Grid의 형상

그러나 식 (5)는  $\min(E_{ij}) < H_{ij} < \max(E_{ij})$ 인 경우 실제로 격자에 채워지는 물의 용량이 과소 평가 될 수 있으므로 그로 인한 영향을 반영하기 위해 수정될 필요가 있다. 과소평가된 물의 체적은 수위의 과대산정을 야기하며 확산형 모형에서 격자의 크기가 커짐에 따라 해석결과가 많은 영향을 받는 이유를 부분적으로 설명하고 있다. 하나의 격자를  $2 \times 2$ 의 Sub-Grid로 나눌 경우 체적의 최대 과소평가는  $H_{ij} = E_{ij}$ 인 경우에 발생하며 이것은  $H_{ij} = \max(E_{ij})$ 인 경우에 0으로 작아진다. Sub-Grid를 고려한 물의 체적  $V_{ij}$ 와 수위  $H_{ij}$ 간의 관계에 대한 일차적인 근사 값을 다음과 같이 산정하였다.

$$V_{ij} = \frac{W^2}{N_{ij}} \left( N_{ij}^k H_{ij} - \sum_{k=1}^{N_{ij}^k} e_k \right) \quad (6)$$

수위가 Sub-Grid의 평균표고 보다 작지만 최소 값보다 큰 경우, 식 (6)은 침수가 발생하는 것으로 판단하는 반면 식 (5)는 침수가 나타나지 않는 것으로 판단한다. 수위가 Sub-Grid의 평균표고 보다 큰 경우, 식 (5)는 침수가 발생하는 것으로 판단한다. 그러므로, 식 (5)에서 나타나는 최대 오차는 수위와 Sub-Grid의 평균표고가 같을 때 발생하게 된다. 또한 모든 Sub-Grid가 완전히 침수될 때까지 수위가 상승하면 오차가 줄어들어 결국 '0'이 된다. 수위가 낮아지는 경우 반대의 상황이 발생한다.

Sub-Grid의 형상은 격자 내에서의 수위 상승률과 밀접한 관련이 있다. 식 (5)에서는 침수가 발생하지만 식 (6)에서는 부분적으로 침수가 발생하는 경우(수위가 Sub-Grid 평균표고 보다 크지만 최대 값보다 작은 경우), 격자 내에서의 수위 상승은 식 (5)에서 예상하는 것보다 더 빠르게 나타난다. 이러한 수위의 상승률을 고려하고 인접한 셀 사이에 수위차를 기초로 하는 확산 모형인 경우, 식 (6)은 물이 홍수터에서 확산되는 양상에 영향을 미칠 수 있다. 상위의 격자에서 침수가 발생한다면, Sub-Grid에서는 이미 유량이 유입되고 있는 것으로 생각해야 한다. 이것은 식 (5)에서 보다 더 빠른 홍수파의 확산을 의미하는 것이다.

### 3. 모형의 적용

대상유역은 금호강과 신천이 흐르고 있고 금호강 하류단에서 팔거천이 합류하는 유역이다. 따라서 본 연구에서는 대구지역의 금호강 주변과 신천 합류지점 그리고 팔거천 합류지점을 대상으로 하여 1차원 수리학적 모의를 진행하였고, 그림 2는 하천의 수리계산에 적용된 대상유역의 금호강과 신천, 팔거천에 대한 하천모식도 이다. 그림 3과 그림 4는 월류로 인한 외수의 영향을 고려한 2차원 도시지역 침수해석에 적용된 대상유역의 TIN 및 DEM Grid의 형상을 보여준다.

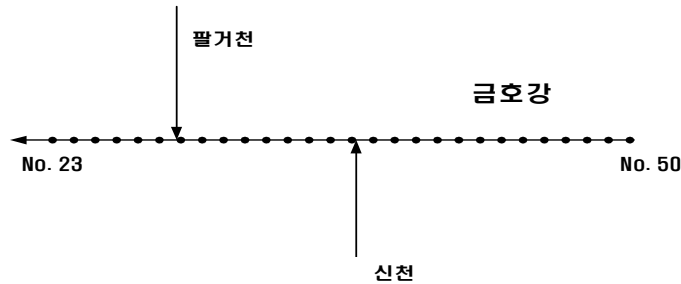


그림 2. 대상유역의 하천모식도

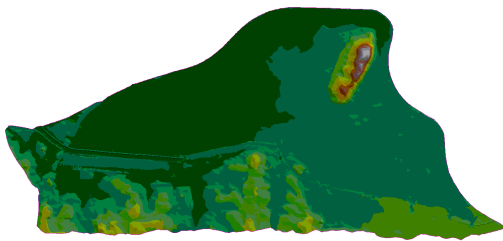


그림 3. 대상유역의 TIN 자료

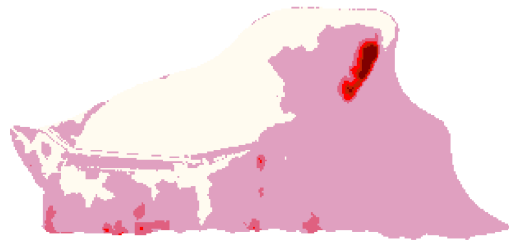


그림 4. 대상유역의 DEM Grid 자료

1차원 수리해석을 위한 상·하류단 경계는 각각 금호강 본류 No.50, No.23지점이고, 팔거천과 신천 측방유입 경계로 설정하였다. 유입유량은 100년 빈도의 강우에 의한 유량수문곡선을 적용하였으며, 하류단 경계인 No.23 지점에서의 경계조건으로 적용될 수위 수문곡선을 산정하기 위하여 No.0~28 사이구간에 대한 부정류 해석을 실시한 자료를 이용하였다. 대상유역의 100년 빈도 강우에 대하여 제방의 붕괴가 발생하지 않는다는 가정 하에, 1차원 수리해석을 실시하여 하천으로부터 제내지로 유입되는 월류유량을 산정하였다.

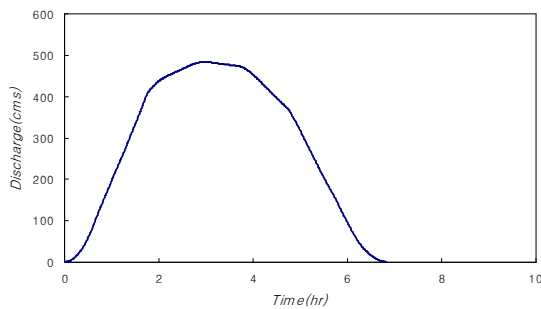


그림 5. 제내지로 유입되는 월류유량

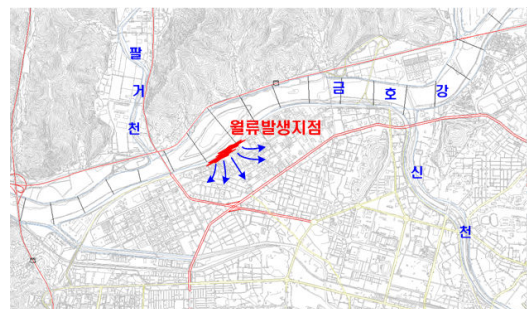


그림 6. 대상유역의 월류 발생지점

침수해석에 적용된 계산격자는 27640개이고, 10시간 동안의 침수양상을 해석하기 위한 계산시간은 2시간 48분이 소요되었다. 아래의 그림 7과 그림 8은 월류 발생 2시간 및 10시간 후의 침수해석 결과를 나타내고 있다.

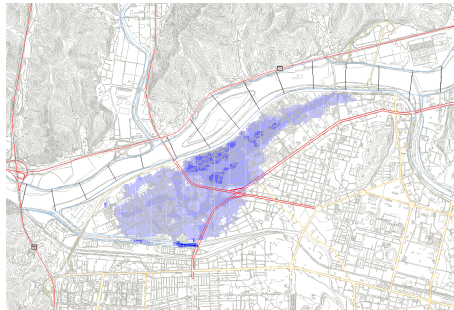


그림 7. 월류 발생 2시간 후

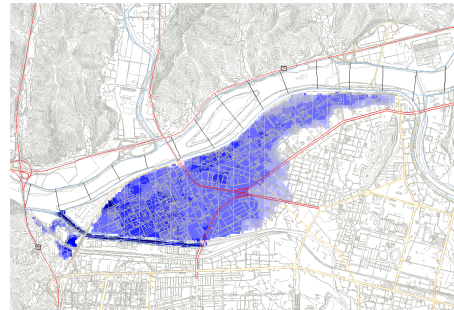


그림 8. 월류 발생 10시간 후

#### 4. 결 론

DEM기반 침수해석 모형의 단점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 Sub-Grid의 개념을 도입한 DEM기반 침수해석 모형을 개발하였다. Sub-Grid를 고려한 침수해석 기법을 적용한 침수해석 결과를 다른 침수해석 기법 및 실제 침수실적도와 비교하여 계산의 신속성과 정확성의 관점에서 Sub-Grid를 고려한 DEM 기반 침수해석의 적용성을 평가할 수 있을 것이다. 또한, 월류된 유량의 재유입, 건물의 영향, 각각의 격자에 대응하는 적절한 지표면 조도계수 등을 고려한 경우에 대하여 침수해석을 실시함으로써 도시지역 침수해석에 있어 보다 적절한 침수해석 기법의 적용성을 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감 사 의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설기술혁신사업 (03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구단의 연구성과물로서 관계당국에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. 도시홍수재해관리기술연구사업단 (2005). “DEM 기반 침수예측모형 개발.”, 2004년도 도시홍수 재해관리 기술보고서, FFC04-09.
2. 도시홍수재해관리기술연구사업단 (2006). “비정형 격자기반의 침수해석모형 개발 및 적용.”, 2005년도 도시홍수 재해관리 기술보고서, FFC05-10.
3. 도시홍수재해관리기술연구사업단 (2007). “도시지역 침수해석 모형의 개발.”, 2006년도 도시홍수 재해관리 기술보고서, FFC06-06.
4. Yu, D., Lane, S.N. (2005). “Urban fluvial flood modelling using a two-dimensional diffusion-wave treatment, part 2: development of a sub-grid-scale treatment.” Hydrological Processes.