

## Dual-Drainage 개념에 의한 도시침수해석모형의 개발

## Development of Urban Inundation Analysis Model Using Dual-Drainage Concept

이창희\* · 한건연\*\* · 노준우\*\*\*

Lee, Chang Hee · Han, Kun Yeun · Noh, Joon Woo

## Abstract

An urban inundation model coupling an one-dimensional stormwater model, SWMM(Storm Water Management Model), and a two-dimensional inundation model was developed to simulate inundation caused by the surcharge of storm sewers in urban areas. The limitation of this model which can not simulate the interaction between drainage systems and surcharged flow was resolved by developing Dual-Drainage inundation analysis model which was based upon hydraulic flow routing procedures for surface flow and pipe flow. The Dual-Drainage inundation analysis model can simulate the effect of complex storm drainage system. The developed model was applied to Dorim, catchment. The computed inundated depth and area have good agreement with the observed data during the flood events. The developed model can help the decision support system of flood control authority for redesigning and constructing flood prevention structures and making the potential inundation zone, and establishing flood-mitigation measures.

**Keywords** : urban inundation analysis, dual-drainage, storm sewer system, SWMM

## 요 지

본 연구의 목적은 Dual-Drainage 개념에 의한 도시침수해석모형을 개발함에 있으며, 이를 위해 도시지역 배수시스템 해석 모형으로 널리 이용되고 있는 SWMM모형과 월류유량의 전과과정을 계산하는 DEM기반 침수해석모형을 통합하였다. 배수시스템 해석 모형인 SWMM모형의 계산결과를 이용하여 침수해석을 수행하는 연계모형의 경우 월류지점으로부터의 침수진행 과정을 잘 모의할 수 있으나, 월류발생이 끝난 시간에도 지형상의 영향으로 인하여 일부 침수유량이 일부지점에 계속 침수된 채 있는 등 지표침수유량의 배수과정을 제대로 모의하지 못할 수 있다. 이를 해결하기 위해서는 침수지역에 대한 지표류 홍수 추적시 일부 침수유량이 과부하가 발생하지 않는 유입구 지점을 통과할 때 다시 배수시스템으로 유입되는 것을 고려하여 재유입되는 양을 산정하고 유입된 유량은 배수시스템 내의 흐름에 반영되도록 배수시스템과 침수해석모형을 통합한 새로운 모형을 개발하였다. 본 모형을 이용하여 침수상황의 시간별 진행과정을 분석함으로써 도시홍수에 대한 침수위험지점 파악 및 주민대피지도 구축 등에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 도시침수해석, Dual-Drainage, 배수시스템, SWMM

## 1. 서 론

최근에 들어 도시지역에서는 국지성 집중호우에 의한 홍수 피해가 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.

배수시스템과 침수해석모형과의 연계해석을 위한 연구동향은 다음과 같다. Hsu 등(2000)은 SWMM과 2차원 확산과 지표류 해석을 연계한 도시 침수모의를 수행하였고, Mark 등(2004)은 배수시스템과 연계하여 침수해석을 1차원적으로 해석 한 바 있다. 그러나, 배수시스템 해석 모형인 SWMM 모형의 계산결과를 이용하여 침수해석을 수행하는 연계모형의 경우 월류지점으로부터의 침수진행과정을 잘 모의할 수 있으나, 월류발생이 끝난 시간에도 지형상의 영향으로 인하여 일부 침수유량이 일부지점에 계속 침수된 채 있는 등 지표침수유량의 배수과정을 제대로 모의하지 못할 수 있다. 이를 해결하기 위해서는 침수지역에 대한 지표류 홍수 추적시 일부 침수유량이 과부하가 발생하지 않는 유입구 지점을 통

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

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

\*\*\*정회원 · 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원(E-mail : jnoh@kowaco.or.kr)

과할 때 다시 배수시스템으로 유입되는 것을 고려하여 재유입되는 양을 산정하고 유입된 유량은 배수시스템 내의 흐름에 반영되도록 배수시스템과 침수해석모형을 통합한 새로운 모형을 개발이 요구된다.

본 연구에서는 Dual-Drainage 개념(Djordjevic 등, 1999; Schmitt 등, 2004)에 의한 도시침수해석모형을 개발하였고, 이를 위해 도시지역 배수시스템 해석 모형으로 널리 이용되고 있는 SWMM모형과 월류유량의 전과과정을 계산하는 DEM기반 침수해석모형을 통합하고, 모형의 적용성을 검토하였다. 본 모형의 적용을 위한 대상 배수구역으로는 과거 침수 기록이 있는 지역으로서 유수지의 수위 상승 및 관거용량 부족에 의한 침수가 빈번히 발생한 도림 배수구역에 대해서 적용하였다. 본 모형의 개발로 침수상황의 시간별 진행과정을 분석함으로써 도시홍수에 대한 침수위험지점 파악 및 주민대피지도 구축 등에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. Dual-Drainage 도시침수해석모형의 개요

Dual-Drainage 침수해석모형은 1차원 배수시스템 해석모형과 2차원 지표침수해석모형이 통합된 도시침수해석모형이다. Dual-Drainage 도시침수해석모형은 배수시스템에서의 범람유량을 산정하고 이로 인한 지표면 침수 해석을 실시하도록 개발되었다. 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. 각 모형의 구성은 다

음과 같으며, 그림 1은 Dual-Drainage 침수해석 모형의 개념도이다.

### 2.1 수문학적 강우-유출 해석 모형

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

### 2.2 도시배수시스템에서의 동역학적 흐름해석 모형

도시배수시스템에서의 동역학적 흐름해석 모형은 도시배수시스템의 흐름을 추적하고 지표면으로 월류되는 시간별 홍수량을 산정하며, 이를 위해 SWMM 모형의 EXTRAN 블록을 이용하였다. 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.

### 2.3 도시지역 지표범람지역에서의 수리학적 흐름해석 모형

도시지역 지표범람지역에서의 수리학적 흐름해석 모형에서는 범람된 유량의 시간별 침수구역 및 침수심을 산정하게 된다. GIS 자료를 활용하여 DEM을 구축하고, 천수방정식을 근사화한 확산형 방정식(Fennema 등, 1994; Akan 등, 1981; Yen 등, 1989)을 이용하여 DEM기반 침수해석 모형을 개발

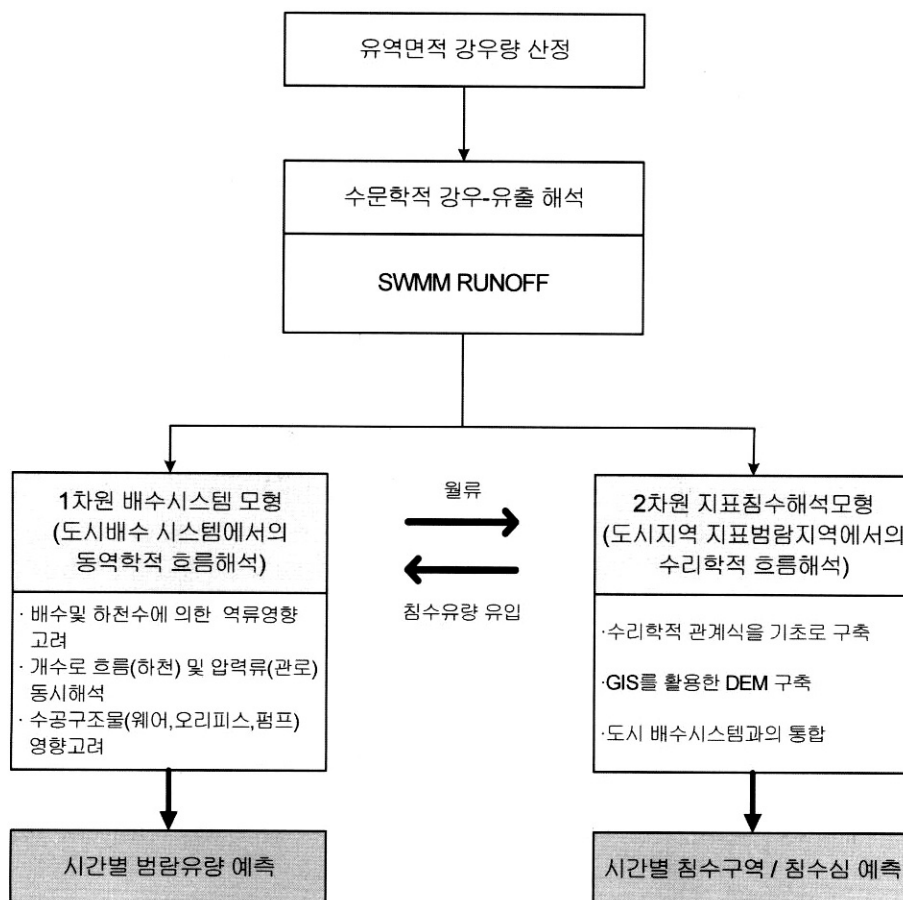


그림 1. Dual-Drainage 침수해석모형의 개념도

하였다.

### 2.4 모형의 통합

강우-유출 해석 모형과 도시배수시스템에서의 동역학적 흐름해석 모형은 SWMM 모형의 RUNOFF 블록과 EXTRAN 블록을 이용하였고, 동역학적 흐름해석 모형인 SWMM EXTRAN 블록을 수정하여 도시지역 침수해석을 위한 DEM 기반의 흐름해석 모형과 통합하였다.

## 3. Dual-Drainage 도시침수해석모형의 개발

### 3.1 배수시스템에서의 흐름해석

SWMM RUNOFF블록(Huber 등, 1988; James 등, 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 등, 1988; James 등, 1999b)에서 연결관로에서 우수관로의 흐름문제를 해석하기 위한 기본미분방정식은 점변 부정류식인 천수방정식으로부터 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,  $A$  = 단면적,  $Q$  = 관로 유량,  $V$  = 관로 유속,  $x$  = 관로/수로 방향의 거리,  $t$  = 시간,  $g$  = 중력가속도,  $H = z + h$  = 관로 수위,  $z$  = 관로 최심고,  $h$  = 관로 수심,  $S_f$  = 마찰(에너지) 경사이다.

접점에서는 연속방정식을 사용하며, 다음식이 이용된다.

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

여기서,  $A_s$  = 접점에서의 수표면적

### 3.2 배수시스템과 지표홍수유량과의 관계식

배수시스템과 도시침수모형을 통합하기 위해서는 우선 다음과 같은 개념정리가 요구된다. 배수체계에서의 과부하는 접점과 연결된 모든 관로의 유량이 가득 차거나, 계산수위가 접점에서의 연결된 관로 중 가장 높은 곳의 정부(頂部)와 지표고 사이에 있는 상태를 말한다. 그리고, 범람은 동수경사선이 지표면을 넘어서고 접점에서 유량이 지표면으로 넘어감으로써 범람이 발생 할 손실이 생길 경우를 의미한다 (Schmitt 등, 2004). SWMM모형은 과부하가 일어나는 동안 식 (5)와 같은 각 접점에서의 연속방정식을 이용하여 월류유량을 계산한다.

$$\sum Q(t) = 0 \quad (5)$$

여기서  $\sum Q$ 는 각 접점에서의 유입량과 유출량의 합을 뜻한다.

### 3.3 월류유량에 대한 DEM기반 침수해석

침수해석 지점의 적정범위를 지형도 등을 이용해서 설정하고, 격자망을 구성하여 연속방정식과 운동량 방정식에 의해 흐름을 해석할 수 있다. 천수방정식을  $x, y$  방향 성분으로 기술하면 연속방정식과 운동량방정식은 식 (6)~(8)과 같다.

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

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

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

여기서,  $d$  = 지표면 수심,  $q_x, q_y = x, y$  방향에 대한 단위 폭당 유량,  $u, v = x, y$  방향의 평균 속도,  $S_{ox}, S_{oy} = x, y$  방향의 바닥경사,  $S_{fx}, S_{fy} = x, y$  방향의 마찰경사,  $t$  = 시간,  $g$  = 중력에 의한 가속도,  $e$  = 단위면적당 생성항 혹은 소멸항 이다.

### 3.4 배수시스템으로 재유입되는 지표침수유량

지표면으로 전파되는 홍수범람유량은 범람이 발생되지 않는 유입구 지점이나, 과부하로 인해 월류가 발생하는 지점을 통과하게 된다. 월류가 발생하는 지점을 통과할 경우 지표면에 월류가 발생하는 지점의 범람유량이 함께 고려되어지게 되고, 범람이 발생하지 않는 지점에는 그림 2와 같이 일부 유량은 유입구 지점으로 유입되며, 유입된 유량은 배수시스템을 통해 흘러가게 된다.

EXTRAN 블록에서 유입구에서 유입량이 입력되는 경우는 3가지 경우가 있다. 첫째는 RUNOFF 블록에서 계산한 각 지점별 유입유량을 내부 임시저장 파일로 저장 후 EXTRAN에서 그 파일을 읽는 경우이고, 두 번째 경우는 DI 입력카드에서 어떤 특정 유입구에 항상 일정 유량이 유입되는 것으로 설정하는 경우이다. 마지막으로 K3 입력카드에 유입 지점별로 시간별 유입 유량을 직접 입력하는 방법이 있다. 특정 지점에서 유입되는 총 유입유량은 식 (9)와 같이 표현된다.

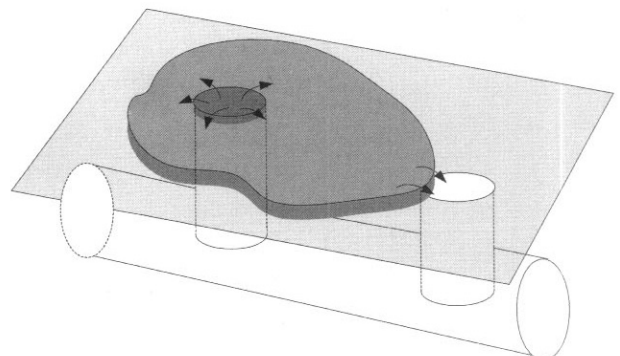


그림 2. 유입구 지점을 통과하는 범람 지표류

$$QIN(j) = QINST(j) + QTAPE(j) + QCARD(j) \quad (9)$$

여기서,

$$\begin{aligned} QIN(j) &= \text{특정 유입구로 유입되는 총유량} \\ QINST(j) &= \text{일정한 유입 유량 (D1 입력카드에서 입력)} \\ QTATE(j) &= \text{RUNOFF 블록에서 계산되는 유입유량} \\ QCARD(j) &= \text{시간별 유입 유량 (K3 입력카드에서 입력)} \\ j &= \text{유입구 지점} \end{aligned}$$

지표침수유량이 다시 유입구로 유입되는 방법은 다음 2가지로 고려할 수 있다. 첫 번째 방법으로는 유입구 과부하 여부에 따라 위어 혹은 오리피스 흐름 형태로 유입되도록 하여 식 (9)에 추가하는 방법이다.

$$QINNEW(j) = QIN(j) + QADD1(j) \quad (10)$$

여기서,

$$\begin{aligned} QINNEW(j) &= \text{유입구로 유입되는 총 유량} \\ QADD1(j) &= \text{위어 혹은 오리피스 흐름 형태로 유입되는 유량} \end{aligned}$$

위어 혹은 오리피스형태로 유입된다고 가정한 경우 유입구로 유입되는 유량은 위어 흐름 형태로 유입되며, 식 (11)과 같이 계산된다(Brown 등, 1996). 이때 위어 길이는 유입구의 주변길이가 된다.

$$Q_{in} = k_w L_w \sqrt{2gd}^{1.5} \quad (11)$$

여기서,  $k_w$  = 위어 유량 계수,  $L_w$  = 위어길이,  $g$  = 중력가속도,  $d$  = 수심이다.

한편, 유입 지점의 우수관거가 과부하 되었을 경우, 즉 범람은 되지 않았지만 수위가 접점에서의 수위가 연결된 관로 중 가장 높은 곳의 정부와 지표고도 사이에 있는 상태인 경우와 식 (12) 조건이 만족되는 경우 유입유량 형태는 오리피스 형태의 유입으로 변환되며, 다음과 같은 식 (13)가 이용된다(Brown 등, 1996).

$$d > \frac{k_o A_o}{k_w L_w} \quad (12)$$

$$Q_{in} = k_o A_o \sqrt{2gd} \quad (13)$$

여기서,  $k_o$  = 오리피스 유량 계수,  $A_o$  = 오리피스 면적,  $d$  = 특성깊이. 즉, 지표면 범람 수위와 배수시스템 내의 수위 차이이다.

유입되는 유량을 위어나 오리피스로 가정한 경우는 계산에 의한 재유입 유량이 실제 재유입될 수 있는 양보다 적게 계산될 수 있다. 그 이유로는 배수시스템 모의시 모든 배수계통도를 고려하는 것이 아니라 실제로는 주요 간선에 대해서만 적용된다. 또한, 식 (11) 혹은 식 (13)에 의해 계산되는 유입유량은 유입구의 직경 혹은 둘레의 길이에 영향을 받게 되는데 모든 유입구를 고려하지 않은 상태에서 격자크기에 비해서 매우 작은 유입구 표면적을 이용하여 계산되는 재유입유량은 실제 재유입유량보다 적게 계산된다. 따라서, 모든 배수시스템의 맨홀 및 유입구를 고려하지 않는 경우에 대해서 적용될 수 있는 방법이 요구된다.

지표면 유량이 다시 유입구로 유입되는 두 번째 방법으로

는 유입구 지점에서의 지표면 수심에 해당 되는 격자체적내의 유량이 유입구의 유입가능 상태에 따라 유입되도록 설정한 경우이다. EXTRAN 블록에서 접점에서의 총 유입유량은 식 (9)에 의해 계산하는데, 이 값에 식 (14)와 같이 유입구가 위치한 격자내의 유량을 유입유량에 더하게 된다. 이때 유입구 지점의 격자의 침수심은 순간적으로 zero가 된다. 식 (14)에 의해 유입된 총 유입유량을 이용하여 EXTRAN 블록에서 흐름해석을 수행하여 해당 격자의 배수시스템과 총유입유량에 대한 월류유량이 다시 산정된다. 계산된 월류유량은 다시 해당 격자에 채워진다.

$$QINNEW(j) = QIN(j) + QADD2(j) \quad (14)$$

여기서,  $QINNEW(j)$  는 유입구로 유입되는 총 유량이고,  $QADD2(j)$  는 유입구 지점이 설정된 격자가 포함하는 유량이며 식 (15)와 같다.

$$QADD2(j) = \frac{FP(i) \times W^2}{\Delta t} \quad (15)$$

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

두 번째 경우인 입구 지점에서의 지표면 수심에 해당 되는 격자체적내의 유량이 유입구의 유입가능 상태에 따라 유입되도록 설정한 경우는 주요 간선에 대해서 적용되는 경우에 적합하며, 배수시스템내에서 흐름해석과 연동되므로 월류될 수 있는 경우와 유입될 수 있는 경우를 모두 고려하므로 시스템의 상태를 잘 반영한다고 볼 수 있다.

### 3.5 모형의 통합

그림 3은 SWMM 모형의 EXTRAN 블록과 DEM 기반 침수해석모형과의 통합과정에서 배수시스템에서의 과부하 및 재유입 과정을 표현한 것이다.

본 연구에서 개발된 도시지역 침수해석을 위한 Dual-Drainage 침수해석모형은 도시지역에서 수리수문 해석모형인 SWMM모형과 DEM 기반의 2차원 모형을 통합하여 배수시스템에서의 월류유량과 침수유량의 재유입을 고려하고, 지표 침수유량의 전과과정에서 건물의 영향을 고려할 수 있도록 구성한 모형으로써 그림 4는 Dual-Drainage 침수해석모형의 계산흐름도이다.

## 4. 모형의 적용

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

### 4.1 대상지점 현황

도림 배수구역은 유역면적이 189.5ha이고, 산지가 거의 없는 평탄한 지형이며, 대림1동, 대림3동 및 대림2동 일부의

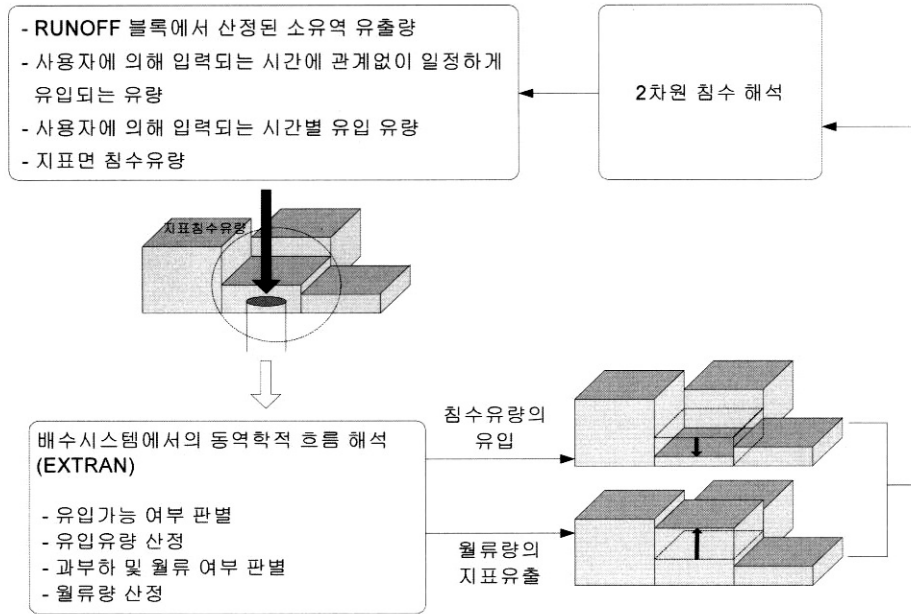


그림 3. 월류량 및 유입유량에 의한 수심변화

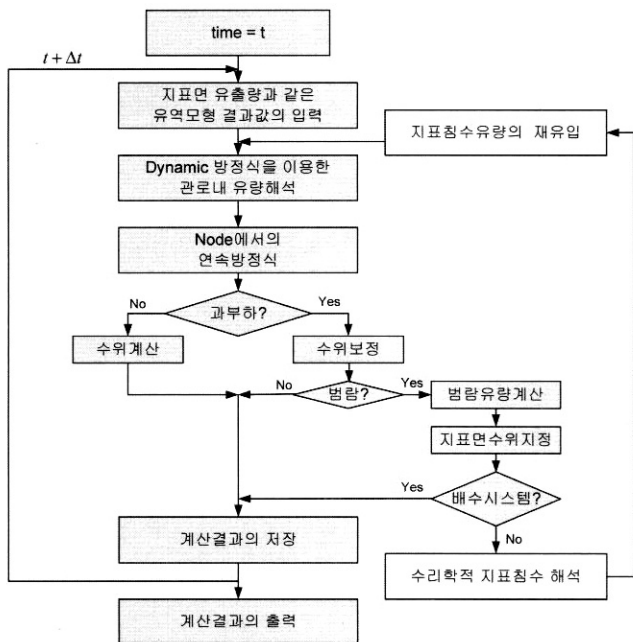


그림 4. Dual-Drainage 침수해석모형의 계산흐름도

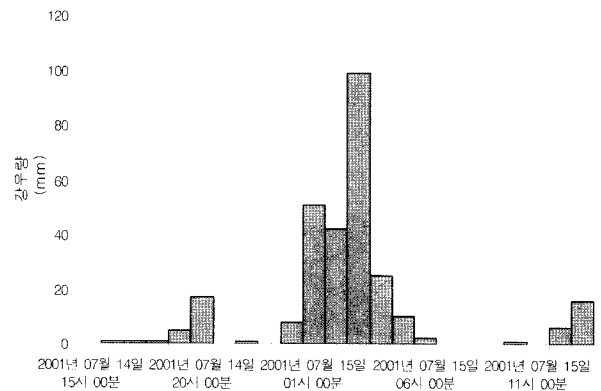


그림 5. 우량주상도(2001년 7월 14일~2001년 7월 15일)

도림천 우안변을 배수구역으로 하고 있으며, 불투수면적의 비율이 91% 정도로 포장율이 높고 충분히 도시화된 구역이다. 빗물펌프장은 도림천 중·하류부 우안측에 위치하고 유수지를 겸비하고 있다. 2001년 7월 구로관측소 강우기록일에 의하면 7월 14일 오후부터 강우가 내리기 시작하였으며, 이 기간에 발생된 시간 최대강우량은 03:00~04:00시간의 99 mm로서 1998년의 1시간 강우량 67 mm를 상회하였다. 또한, 집중호우 및 빗물펌프장 용량 부족으로 인하여 도림 1 유수지의 수위가 상승하여 유수지의 H.W.L(9.5 m)을 초과한 10.3 m 까지 상승함에 따라 배수영향에 의한 침수가 발생하였다. 그림 5는 2001년 7월 14일~15일 동안 관측된 강우사상이며, 그림 6(a)는 도림 배수구역의 주요 침수지역이다.

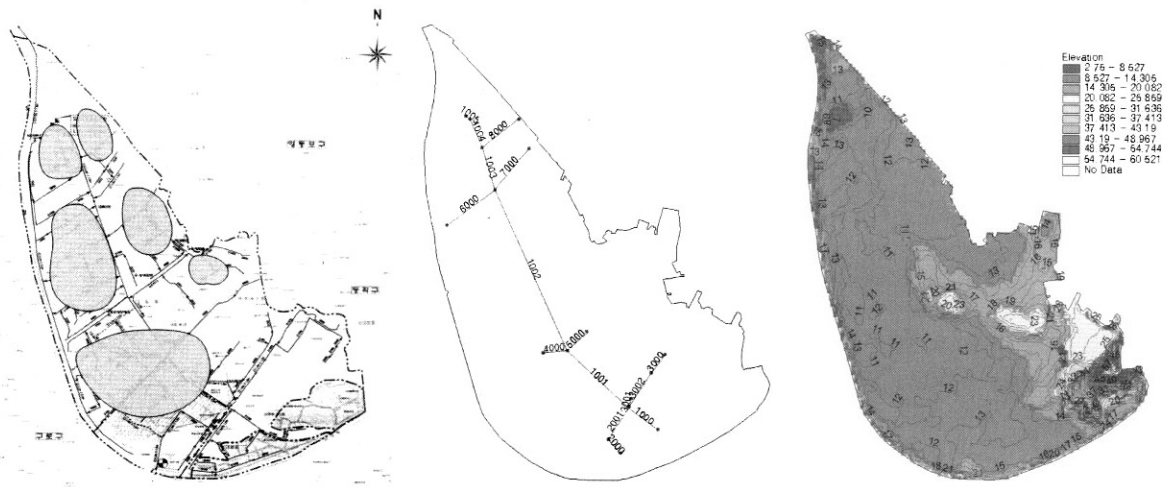
모형 적용을 위한 구역의 배수 계통도는 그림 6(b)와 같이 주요간선만을 이용하였고, 그림 6(c)는 1:1,000 수치지도

를 이용하여 추출된 대상구역의 DEM이다. 도시 배수 구역의 범람 양상을 모의하기 위한 격자의 크기는 20 m×20 m로서 전체 6,775개의 격자가 도시배수구역의 형상을 대표하게 되며, 배수시스템 하류 유출지점에 위치한 유수지에서의 수위상승으로 인하여 배수영향을 고려하였다.

#### 4.2 모의 결과

SWMM모형에서 산정되는 지표면으로 월류한 유량은 다시 배수시스템으로 유입되지 않고 지표면으로만 전파되는 것으로 가정한 경우에 대한 적용 결과는 그림 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 배수 시스템에서의 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

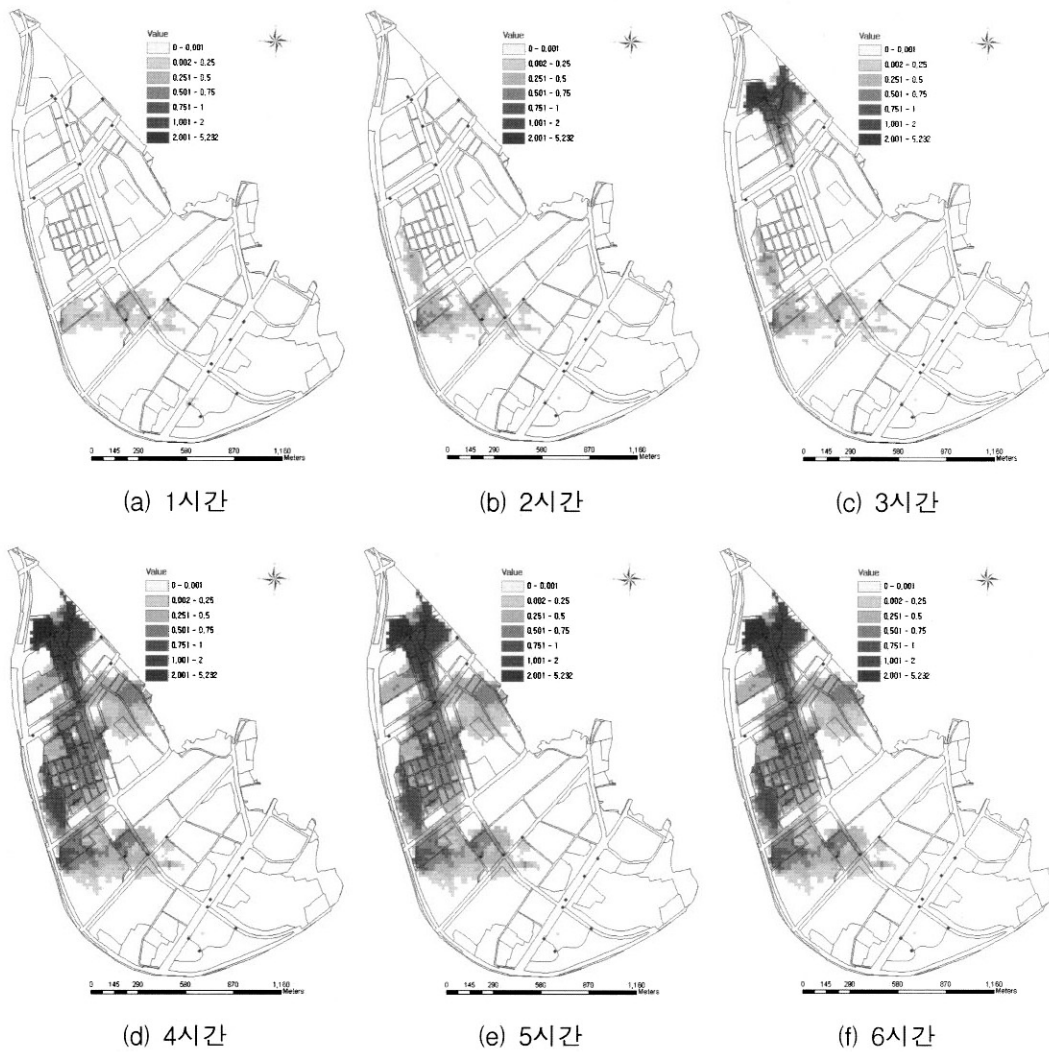


(a) 침수흔적도(서울특별시, 2003)

(b) 배수계통도

(c) DEM

그림 6. 대상유역 현황



(a) 1시간

(b) 2시간

(c) 3시간

(d) 4시간

(e) 5시간

(f) 6시간

그림 7. 재유입을 고려하지 않은 경우

지점으로 물이 배수 될 것이다. 그러므로, 과부하가 발생하지 않는 배수시스템 유입구 지점을 통과할 때 일부 유량이 다시 배수시스템으로 유입되도록 고려한 Dual-Drainage 침수 해석에 의한 적용이 필요하다. Dual-Drainage 침수해석 결과는 그림 8과 그림 10과 같다. 그림 8은 유입구의 유량이 맨홀 혹은 오리피스형으로 유입되는 경우이고, 그림 10은 유

입구 지점 격자의 유량이 배수시스템 내부 상태에 따라 침수량이 유입구로 유입되도록 한 경우이다.

그림 9는 그림 7과 그림 8의 차이를 나타낸다. 그림 9의 결과 침수유량의 재유입을 고려하지 않은 경우와 재유입유량을 오리피스 혹은 위어형으로 고려한 Dual-Drainage 침수해석모형은 크게 차이가 나타나지 않는 것을 볼 수 있다. 이는

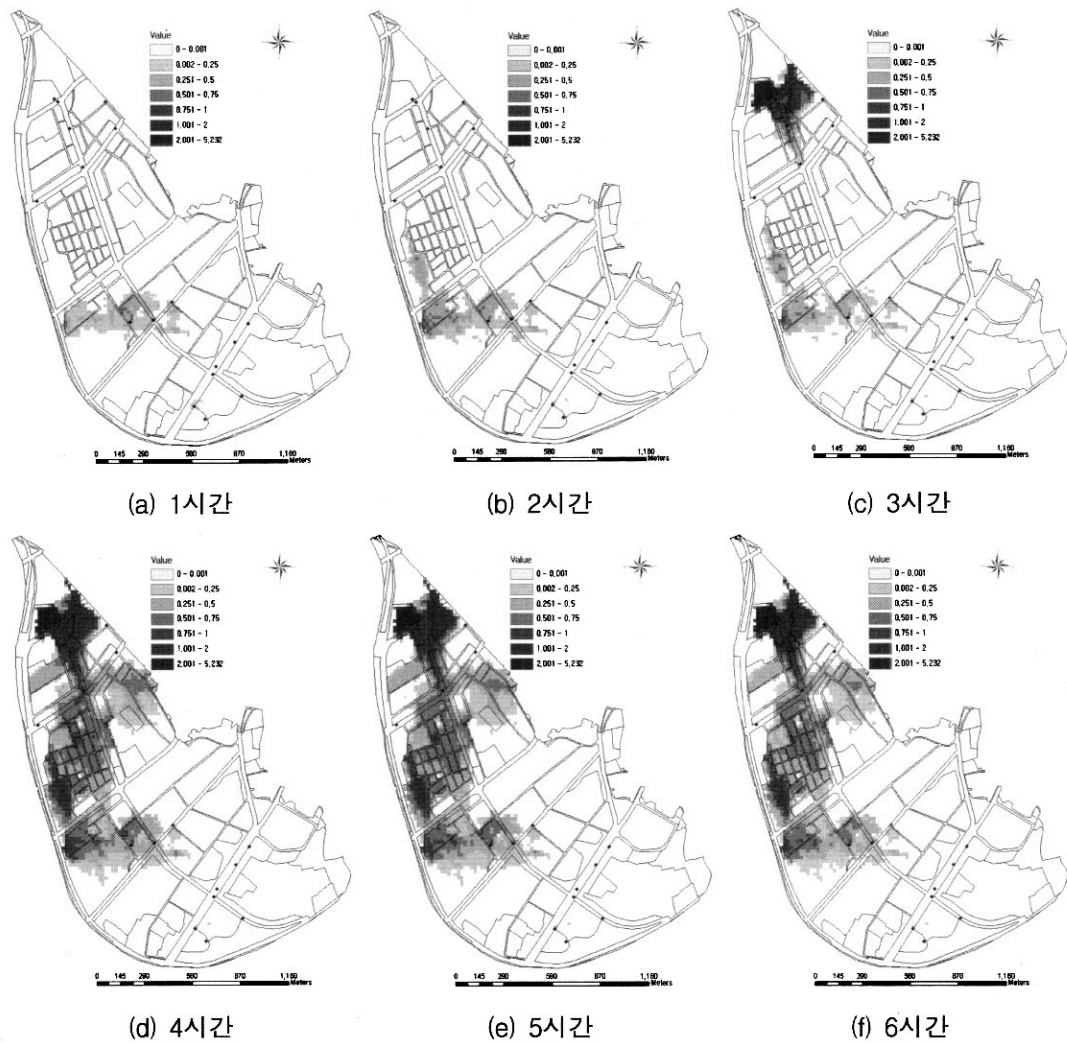


그림 8. Dual-Drainage 침수해석 결과(위어 혹은 오리피스 유입)

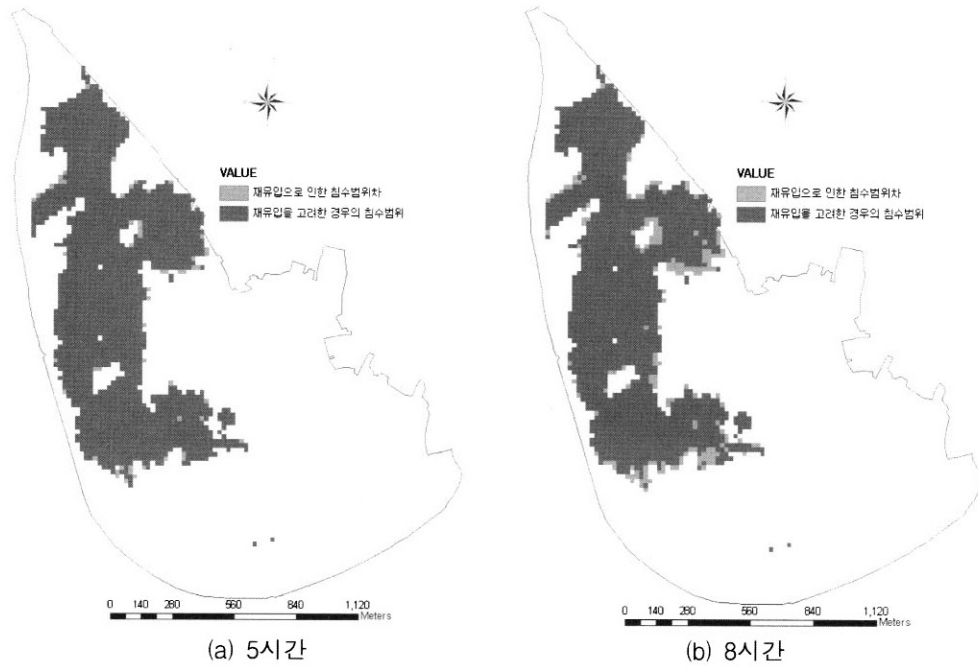
배수시스템으로 재 유입되는 유량이 매우 적게 계산되기 때문이다. 그 이유는 위어 혹은 오리피스 형 유입으로 가정한 결과 이들 유입유량은 격자크기(20 m×20 m)에 비해 유입구 직경(기본 값으로 1.22)이 매우 작고, 배수시스템 내부의 여유공간이 있음에도 불구하고 유입되는 입력 유량은 위어 혹은 오리피스 형태로 유입되도록 산정된 양만 유입되기 때문이다. 또한, 배수 계통도에서 간선만을 이용함으로 범람된 유량이 다시 유입구로 유입되기 위한 유입구의 수가 실제 유입구 수만큼 조밀하지 못하기 때문이다. 즉, 오리피스 혹은 위어형으로 재유입량을 산정하는 Dual-Drainage 침수해석모형을 적용하기 위해서는 적용대상구역의 배수시스템으로 유입되는 모든 유입구를 고려해야 된다. 그러나, 현실적으로 배수시스템에 대해서 모든 유입구를 고려한 입력 자료를 구축하기에는 시간 및 비용에 많은 어려움이 동반된다. 그러므로, 침수지점의 유량이 배수되는 과정을 모의하기 위해서는 다른 방법이 필요하다.

재유입량을 산정하기 위한 다른 방법으로 지표면 수심에 해당 되는 격자체적내의 유량이 유입구의 유입가능 상태에 따라 유입되도록 설정한 경우이다. 유입되고 남은 유량은 지표면으로 전파되고 유입된 유량은 배수시스템에서 내부 유량과 함께 모의된다. 그림 10에서 보여 지듯이 그림 9와 비교했을 때 침수된 유량이 시간이 경과함에 따라 배수되는 과정을 잘

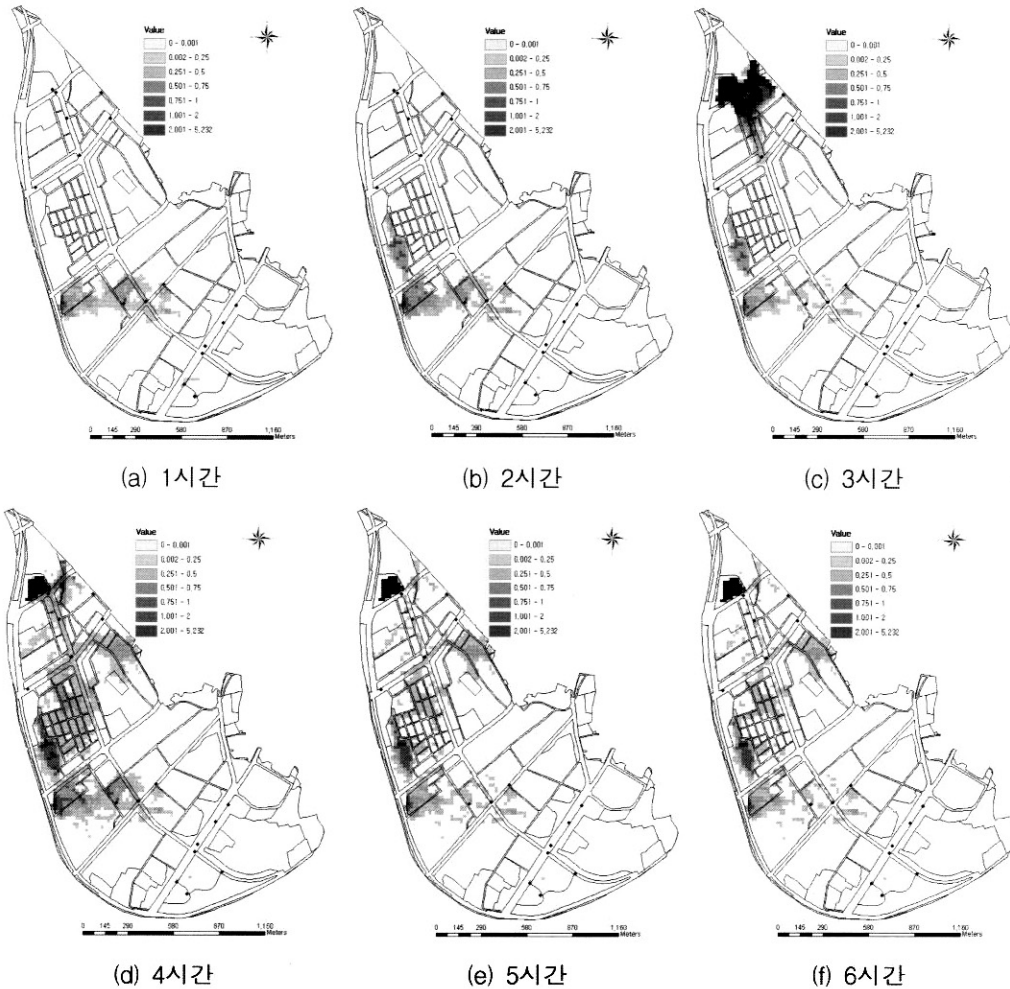
모의함을 볼 수 있다. 또한, 그림 6(a)의 침수흔적도에서 호우시의 도로변의 침수상황이 표시되어 있지 않으므로 이를 감안하면 모의 결과가 잘 일치하는 것으로 볼 수 있다. 일부지점에서 모의결과와 침수흔적도의 침수면적의 오차가 발생하는 것은 인접 배수구역에서 처리되지 못한 홍수량이 모의대상 배수구역으로 유입되는 경우를 반영하지 못했고, 모형의 입력자료를 구축할 때 배수시스템의 주요 간선만을 고려하여 지선에서의 월류현상에 대한 분석이 이루어지지 않았으며, 침수흔적도 역시 홍수가 끝난 후 작성되었기 때문인 것으로 판단된다. 그러나, 본 모형은 침수흔적도에서 구현할 수 없는 시간별 침수범위와 침수심의 변동양상과 침수유량의 배수과정에 대한 모의가 가능하다. 또한, 모의 준비 과정에서 인접 배수구역에서 처리되는 못한 홍수량의 유입 영향을 고려하고, 월류 지점 및 배수시점을 잘 반영할 수 있도록 배수시스템 구축할 경우 정확한 침수예측이 가능할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구는 Dual-Drainage 개념에 의한 도시침수해석 모형 개발에 관한 연구로써 배수시스템에 대한 SWMM 모형과 DEM 기반의 침수해석 모형을 통합하고, 강우규모가 배수시설의 용량을 초과하거나, 하천의 수위상승으로 배수시스템에



(a) 5시간 (b) 8시간  
 그림 9. 재유입을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우와의 차(위어 혹은 오리피스 유입)



(a) 1시간 (b) 2시간 (c) 3시간  
 (d) 4시간 (e) 5시간 (f) 6시간  
 그림 10. Dual-Drainage 침수해석에 의한 적용결과(배수시스템 내부 상태에 따른 격자침수량 유입)

서 우수배제를 제대로 수행하지 못함으로써 발생하는 도시 지역 침수과정에 대한 해석 기법을 제시하였다. 본 연구의 주요 연구결과는 다음과 같다.

1. 지표면으로 월류된 유량은 지표면을 통해서만 전송되며 다

시 배수시스템으로 유입되지 않는 경우 내수침수가 발생하는 초기에는 지표면을 통해 월류된 유량이 전파되어 가는 과정을 잘 모의하였다. 그러나, 시간이 경과한 후 지표면으로만 침수된 유량이 전파되도록 했을 경우 침수된 지



역의 수위가 주변 지형보다 낮은 지점에서는 월류된 유량이 하류부로 전달되지 않고 저수지와 같이 물이 고여 월류량 발생이 끝났음에도 불구하고 계속 침수된 채 고여 있는 상태가 되었다. 그러므로 침수유량의 배수과정을 모의할 수 있는 새로운 모형의 개발이 필요함을 확인할 수 있었다.

2. Dual-Drainage 침수해석모형 중 위어 혹은 오리피스형 재유입인 경우 배수시스템으로의 재유입을 통한 침수유량의 배수과정이 나타나지 않았다. 그 이유는 다시 배수시스템으로 유입되는 유량이 매우 적기 때문이다. 위어 혹은 오리피스 형으로 유입되는 경우 격자크기에 비해 유입구 직경이 매우 작고, 배수 계통도에서 주요 대표 간선만을 이용함으로 침수 유량이 다시 유입구로 유입되기 위한 유입구의 수가 실제 유입구 수만큼 입력된 상태로 모의되지 못한다. 또한, 배수시스템 내부의 여유공간과 관계없이 유입되는 입력 유량은 위어 혹은 오리피스 식에 의한 계산된 유량으로만 유입된다. 결국 도시침수유량의 배수과정을 모의하기 위해서는 위어 혹은 오리피스형 재유입 이외의 다른 방법이 요구됨을 확인할 수 있었다.
3. Dual-Drainage 침수해석모형 중 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.
4. 본 연구결과 지표류 유출 해석의 물리적 특성을 잘 반영하며, 도시지역의 복잡한 배수시스템 해석모형과 지표범람 모형을 통합한 모형 개발로 인해 더욱 정교한 도시지역에서의 홍수 범람 해석을 실시할 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

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

서울특별시(2003) 강남지역 2001 수해원인분석에 따른 펌프장분야 기본설계, pp. 181-193.

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.

Brown, S.A, Stein, S.M., and Warner, J.C. (1996) Urban Drainage Design Manual, *Hydraulic Engineering Circular No. 22*, Federal Highway Administration, Washington. DC.

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.

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*, Edited by Davis, S.M., Ogden, J.C., St. Lucie Press, pp. 249-289.

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*, Computational Hydraulics Int., Ontario, Canada.

James, W., Robert, W., and James, C. (1999b) *Water systems models Hydraulics*, Computational 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.

Roesner, L.A., Aldrich, J.A., and Dickinson, R.E. (1988) *Storm Water Management Model User's Manual Version 4 : Extran Addendum*, U.S. EPA.

Schmitt, T.G., Thomas, M., and Etrich, N. (2004) Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems, *Journal of Hydrology*, Vol. 299. pp. 300-311.

Yen, C.L., Hsu, M.H., and Lai, J.S. (1989) Two-dimensional unsteady flow simulation in flood plain - a comparison between ADE and SES methods. *Proceedings of the Computer Applications in Civil and Hydraulic Engineering*, Taipei, pp. 1-18.

(접수일: 2006.2.7/심사일: 2006.4.12/심사완료일: 2006.5.12)