

# 도시 침수피해 위험도 평가체계 구축

## Construction of Hazard Risk Assessment Systems for Urban Flooding

김원석<sup>1)</sup>, 김동규<sup>2)</sup>, 김의명<sup>3)</sup>, 유환희<sup>4)</sup>

Kim, Weon Seok, Kim, Dong Kyoo, Kim, Eui Myoung, Yoo, Hwan Hee

- 1) 경상대학교 대학원 도시공학과 석사과정, E-mail : one2ne@nate.com
- 2) 경상대학교 대학원 도시공학과 박사과정, E-mail : doikim@gsnd.net
- 3) (주)한국공간정보통신 차장, E-mail : kemyoung@hotmail.com
- 4) 경상대학교 건설공학부 도시공학전공 교수, E-mail : hhyoo@gsnu.ac.kr

### 요 지

세계적인 기상이변으로 전 세계적으로 예측하기 힘든 규모의 자연재해가 발생하고 있고, 향후에도 증가될 가능성이 매우 높은 실정이다. 또한 인구의 집중화와 도시화로 자연재해가 발생하면 엄청난 인명과 재산피해를 발생시키고 있다. 본 연구에서는 도시의 일부 지역을 대상으로 그지역에 대한 지형, 하수관거, 기후 등의 공간 및 속성 데이터베이스를 바탕으로 자연재해중 우리나라에서 가장 빈도가 높은 침수재해에 초점을 두고 도시의 강우 유출모형인 SWMM을 이용하여 우수관거 해석 및 월류량을 산정하고 해수위 상승에 따른 저지대 우수관망 월류량을 계산하여 침수구역 예상 및 침수심 산정을 하고 침수특성을 분석하였다. 이는 해안 저지대 도시지역에서 빈도별 침수량을 예상하여 피해지역의 침수구역에 대한 홍수에 의한 위험도를 평가할 뿐 아니라 단계적 대피 계획, 주요시설 보호 및 이동, 위험지구에 대한 사전 개선대책 수립 등 홍수피해 경감계획 수립에 기초 자료로 사용될 수 있을 것으로 예상된다.

### 1. 서 론

우리나라의 자연재해의 대부분은 풍수해가 차지하고 있어 자연재해의 특성은 바로 풍수해의 특성이라 할 수 있다. 최근 통계를 보면 피해원인으로 호우 37%, 호우 및 태풍 22%, 태풍 15% 순이었고, 전체 인명피해의 50%가 호우에 의하여 발생하였다. 따라서 자연재해에 의한 피해중 홍수는 그 빈도와 규모에서 우리나라

에 가장 큰 영향을 주는 재해임에 틀림없다. 방재 기본법의 재정으로 각 지자체에서 자연재해 대처 및 예방에 대한 사업이 주요 이슈화 되지만 이를 지원할 이론적 시스템은 아직 미비한 상태이다.

해안저지대 도시지역에서 해수위의 영향에 따라 많은 피해가 발생하는데 이는 태풍시 해일에 의한 침수위험도와, 우수관망의 배수불량에 의한 원인도 크다고 판

단하고 본 연구에서는 2003년 9월 태풍 '매미' 상륙시 피해가 상당히 크게 발생한 마산시 월영동 일대 저지대 침수지역을 연구대상지역으로 선정, 도시 강우 유출모형인 SWMM을 이용하여 우수관거 해석 및 월류량을 산정하고 이에 따른 침수 피해 구역을 판단하였다.

## 2. 침수재해 평가체계

### 2.1 연구수행방법

연구수행방법은 연구 대상 지역의 유역 현황 및 우수관망을 조사하여 SWMM모형에 입력하고 배수구역 및 강우특성을 결정하여 해수위상승에 따른 저지대 우수관망 월류량을 계산하며, 이를 이용하여 침수구역 예상 및 침수심 산정을 하여 침수 특성을 분석한다. 아래 그림은 연구진행 흐름도이다.

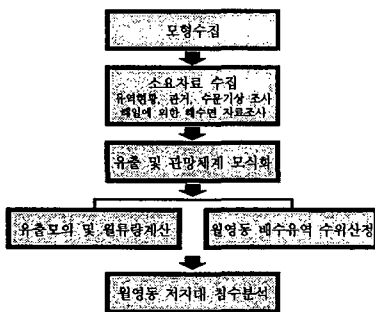


그림 1. 연구진행 흐름도

### 2.2 대상유역 유출량 산정

#### 2.2.1 강우-유출모형의 선정

모형을 선택할 때는 연구의 목적, 가용 자료의 수준, 적용대상유역, 모형의 취득 가능성 등이 고려되어야 한다. 또한 모형의 한계와 특성에 대한 면밀한 고려가 필요하다. 도시유역에 대한 강우-유출 해석

이라 할때 이용 가능한 모형은 BRRL, ILLUDAS, SWMM, STORM 등이 있다. 본 연구와 같이 도시유역 및 인위적인 배수체계에 대한 적용만이 아니라 소규모 배수유역에 대한 합성 및 분리와 함께 배수유역내 각종 수리시설물을 동시에 고려 가능한 모형은 SWMM 모형이라고 판단하였다.

#### 2.2.2 SWMM의 기본구조

SWMM은 도시유역의 강우에 의한 홍수량을 사정하기 위하여 1971년에 미국 EPA의 지원 아래 Metcalf&Eddy사가 개발한 모형으로서, Florida 대학 및 WRE(Water Resources Engineers)의 공동연구에 의하여 도시유역 하수시스템내의 유량과 수질을 모의할 수 있도록 구성되었다.(Huber and Dickinson, 1988) SWMM 모형은 다음 그림과 같이 4개의 실행블록과 6개의 보조블록들로 구성되어 있으며, 126개의 부 프로그램들을 포함하고 있다.

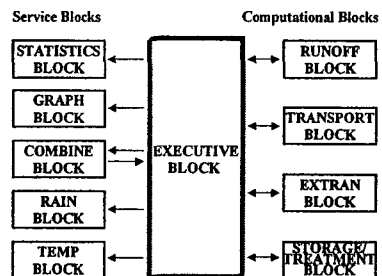


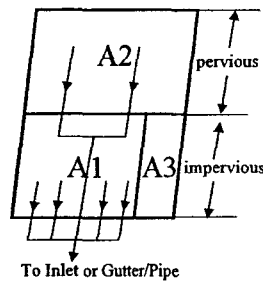
그림 2. SWMM 블록간의 관계

#### 2.2.3 소유역 특성

SWMM은 유역특성의 공간적 변화를 반영하기 위하여 전체유역을 소유역으로 분할하여 각 소유역의 유출을 모의하고, 각 소유역의 유출을 하도/관거 망을 통하여 추적함으로써 전체 유역의 유출을 계

산한다.

SWMM은 각 소유역을 공간적으로 일체화된 비선형 저수지로 취급하여 수학적 으로 표현하고 각 소유역의 유출은 하도/관거 망을 통하여 추적된다. 비선형 저수지 방법에서는 실제유역을 아래 그림과 같이 직사각형 모양으로 표현함으로써 실제유역의 모든 기하학적 특성을 몇 개의 매개변수로 표현할 뿐이며 유역의 고유 모양은 가정되지 않는다.



Subarea	Perviousness	Depression Storage
A1	Impervious	Yes
A2	Pervious	Yes
A3	Impervious	No

그림 3. 소유역 세부 영영과 지표면 분류

소유역과 관련한 입력 자료들은 소유역의 면적, 유역의 평균경사, 불투수지역의 면적, 하도 및 관망의 길이, 관경 또는 하도의 폭, 하도의 경사 등이 있다. 그리고 투수 및 불투수유역의 Manning계수와 하도 및 관망의 Manning계수, 지표면 저류, 침투관련 매개변수들, 그리고 유역폭 등이 다.

#### 2.2.4 침투 및 증발산

SWMM의 증발량 계산은 입력된 월 증발량을 이용하여 부프로그램인 RHYDRO에서 계산되어지거나, Temp Block에서 시계열 자료를 사용하여 산정할 수 있다.

이러한 증발량의 계산 값은 유출과 침투가 일어나기 전의 손실로서 제거하는 방법을 사용하여 고려한다.

투수지역에 대한 침투량을 모의하는 방법으로는 Green-Ampt 방법을 사용할 수 있다. 이 방법은 물리적 개념에 기초한 식들로 구성된 장점이 있다. SWMM 모형에는 12가지 토양 매개변수를 사용할 수 있으며, 본 연구에서는 Green-Ampt 침투식을 적용하여 대상유역의 토양 종류를 반영하였다. Green-Ampt 식에서 누가침투체적  $F$  (mm)가 지면 포화 시점의 침투체적  $F_s$ 보다 작은 경우, 실제침투율  $f$ 는 강우강도  $i$  (mm/sec)와 같다. 이때의  $F_s$ 는 아래 식(1)과 같다.

$$F_s = \frac{S_u \cdot IMD}{i/K_s - 1} \quad i > K_s \quad (1)$$

누가침투체적  $F$  (mm)가  $F_s$  보다 같거나 큰 경우, 실제침투율  $f$ 는 아래 식(2)의 침투능  $f_p$  (mm/sec)와 같다.

$$f_p = K_s \left( 1 + \frac{S_u \cdot IMD}{F} \right) \quad (2)$$

$S_u$ 는 습윤선의 흡인 수두(mm),  $IMD$ 는 초기 수분 부족량(mm/mm),  $K_s$ 는 토양의 포화 수리 전도도(mm/sec)이다. 결국, 침투율은 토양 함수비뿐만 아니라 침투된 물의 체적에 의해서도 결정됨을 알 수 있다.

#### 2.2.5 지표면 유출

강우-유출현상의 모의를 위하여 지표면 유출이 발생하는 소유역을 지면저류가 없는 불투수역(A3)과 지면저류가 있는 불투수역(A1), 그리고 지면저류가 있는 투수역(A2)의 세 부분으로 구분한다. 그리고 이

들 지표면을 통한 유출량은 유역을 비선형저수지로 가정한 후 연속방정식과 Manning식을 사용하여 계산한다.

지표면 유출이 발생하는 유역에서 초기 ( $t=0$ )조건은 지표면 저류량이 0이다. 경계 조건은 유역의 상류 끝에서 외부유입이 없는 것이다. 상류 유역에서 강우로 인해 발생하는 지표면유출은 수리학적으로 연결된 하류 유역에 유입되며, 다른 유역으로 유출되지 않는다. 지표면 유출에 대한 기본방정식은 마찰경사를 유역경사와 같다고 가정하는 운동과 근사법의 비선형저류방정식이 사용된다.

### 2.2.6 하도 및 관거 유출

SWMM에서 RUNOFF 블록과 TRANSPORT 블록, EXTRAN 블록은 하도와 관거의 흐름을 모의할 수 있다. RUNOFF 블록은 앞의 지표흐름에 대한 모의에서 사용되었던 비선형저수지 이론을 하도/관거의 흐름 추적에 사용하고 TRANSPORT 블록의 흐름지배방정식은 다음의 운동파식으로 구성된다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad S_f = S_0 \quad (3)$$

여기서,  $x$ 는 수로/관길이,  $t$ 는 시간,  $S_0$ 는 수로/관경사,  $S_f$ 는 마찰경사,  $Q$ 는 유량,  $A$ 는 흐름 단면적이다.

위 식의 마찰경사는 Manning 식으로부터 구할 수 있다.

$$S_f = \frac{n^2 Q^2}{A^2 R^{4/3}} \quad (4)$$

여기서,  $n$ 은 Manning의 조도계수,  $R$ 은 동수반경이다. 위의 두 식으로부터 다음과 같이 유량을 구할 수 있다.

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S_0^{1/2} \quad (5)$$

위 식에서 흐름 단면적  $A$ 와 동수반경  $R$ 은 수심  $h$ 의 함수이다.

## 3. 적용 및 결과

### 3.1 대상지 선정

연구 대상 지역은 2003년 태풍 '매미' 상륙시 해일에 의한 피해가 크게 나타난 마산 월영동 일대로 이 지역의 특징은 저지대에 위치해 있고 일부 우수관의 방류구가 최고 만조위보다 아래에 위치하고 태풍 내습시 강한 바람에 의한 수면상승과 기압차에 의한 수면 상승 등의 이유로 저지대 침수가 일어났던 지역이다. 다음 그림은 연구대상 지역의 위성사진이다

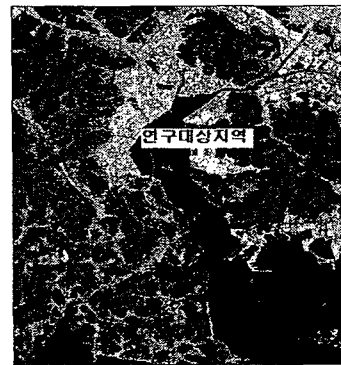


그림 4. 대상지역 위성사진

마산시의 연안지역의 특징은 아래 그림 5와 그림 6과 같이 해안의 지반고가 대체적으로 1.9~2.2m로 낮게 나타나고 있으며 우수관 상단이 지면으로부터 0.7~1.2m 아래에 위치해 마산만의 대조기 만조시 우수관이 해수에 잠기게 되는 상황이다.

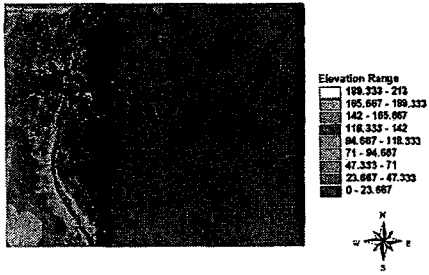


그림 5. 대상구역 TIN분석

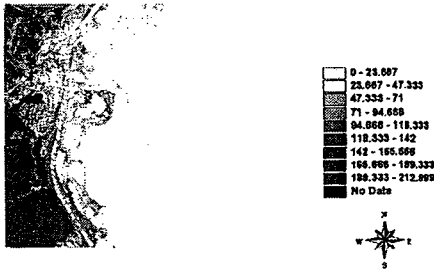


그림 6. 대상구역 수치표고모델

또한 우수관의 지반고가 낮아 비가오지 않을 경우에도 대조기 전후에는 우수관에서 우수가 관에 차 있으며 썰물시 수위가 낮아지면 해수와 같이 방류되는 것으로 나타났다. 그래서 조금만 비가와도 우수가 우수관에서 해양으로 방류되지 못하고 우수관에 저류되다가 해수의 역류로 도시침수가 발생하는 것으로 나타났다. 다음 그림은 연구대상 지역의 배수구역도와 절점 및 관망 모식도이다.

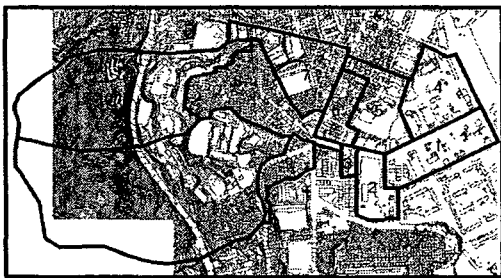


그림 7. 대상구역 배수구역도

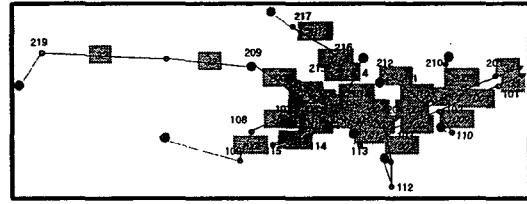


그림 8. 대상구역 절점 및 관망 모식도

### 3.2 연구결과

아래 표는 빈도별 강우량(10년, 30년, 100년, 150년)과 해수위(-0.4m, 0m, 1m, 1.5m, 2.1m)의 변동에 따른 맨홀에서의 월류지점을 산출한 것이다.

표 1. 빈도별 강우량에 따른 월류지점

빈도	해수위	월류지점	
		노드	관망
10년 빈도 1시간 강우	-0.4	112, 211, 212, 214	
	0	112, 211, 212, 214	
	1	112, 210, 211, 212, 214	
	1.5	110, 112, 210, 211, 212, 214	
	2.1	110, 111, 112, 210, 211, 212, 214	
30년 빈도 1시간 강우	-0.4	209, 210, 211, 212, 214	
	0	110, 112, 209, 210, 211, 212, 214	
	1	110, 112, 209, 210, 211, 212, 214	
	1.5	110, 111, 112, 209, 210, 211, 212, 214	
	2.1	110, 111, 112, 209, 210, 211, 212, 214	
100년 빈도 1시간 강우	-0.4	110, 111, 112, 209, 210, 211, 212, 214, 215, 217	
	0	110, 111, 112, 209, 210, 211, 212, 214, 215, 217	
	1	110, 111, 112, 209, 210, 211, 212, 214, 215, 217	
	1.5	110, 111, 112, 209, 210, 211, 212, 214, 215, 217	
	2.1	110, 111, 112, 209, 210, 211, 212, 214, 215, 217	
150년 빈도 1시간 강우	-0.4	110, 111, 112, 209, 210, 211, 212, 214, 215, 217	
	0	110, 111, 112, 209, 210, 211, 212, 214, 215, 217	
	1	110, 111, 112, 209, 210, 211, 212, 214, 215, 217	
	1.5	110, 111, 112, 209, 210, 211, 212, 214, 215, 217	
	2.1	107, 110, 111, 112, 209, 210, 211, 212, 214, 215, 217	

그림 9는 150년빈도 강우시 해수위가 2.1m인 경우에 침수되는 지역을 나타내는 것으로 수치는 침수심을 나타낸다.

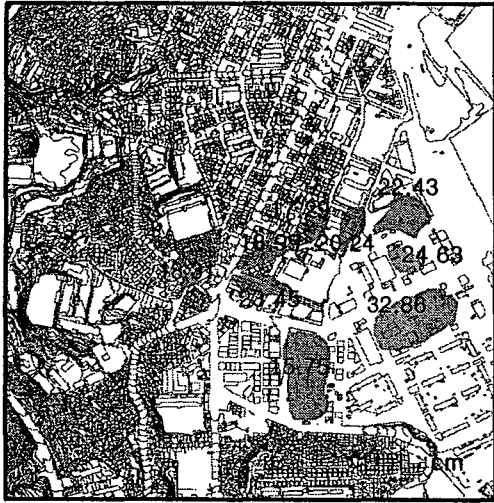


그림 9. 150년빈도(해수위 2.1m) 침수지역

그림 10은 해수위의 변화에 따른 월류량을 비교한 것으로 해수위가 바다로 배수 가능한 -0.4m, 0m, 1m, 1.5m의 경우에는 수위상승에 따라 월류량이 소폭 증가하는데 반해 2.1m인 경우 우수관에서 더 이상 바다로 배수가 이루어지지 않아 역류하여 많은 월류량이 발생하였다. 2.1m의 경우에는 가장 작은 강우 빈도인 10년빈도에서도 많은 유량이 월류 한 것으로 나타나 해수위 영향에 따라 우수관은 많은 영향을 받는 것으로 나타났다.

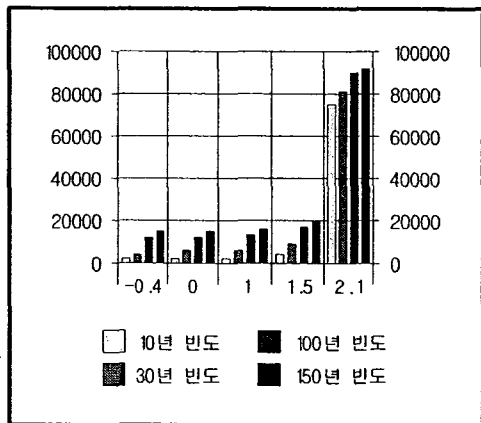


그림 10. 해수위 변화에 따른 빈도별 월류량

#### 4. 결 론

본 연구에서는 월영동 유역에 대한 SWMM 모형을 적용하여 지속시간별, 빈도별 홍수량을 산정고 이들 강우량이 해수면 상승에 의해 어떠한 유출특성을 보이는지 분석하였다. 월영동 해안의 지표 표고가 2.1m인데 해수위가 상승하여 2.1m를 넘어갈 경우 강우에 의한 침수보다는 해일에 의해 침수되는 것이 주된 요인이기 때문에 2.1m 이상의 경우 해일 피해에서 평가하는 것이 타당하다고 판단하였다. 따라서, 최고 해수위를 2.1m로 하여 -0.4m, 0m, 1m, 1.5m, 2.1m, 5가지 해수위에 대한 침수특성을 분석하였다. 분석결과에 의하면 빈도별 강우량이 증가하고, 해수위가 상승할수록 침수량, 즉 우수관에서 월류되는 유출량이 급격하게 증가함을 알 수 있었고 바다로 배수되는 조건이 유역내 침수유역에 중요한 영향을 주기 때문에 해수위의 영향이 매우 중요한 인자로 작용함을 알 수 있었다.

본 연구결과는 단순히 빈도별 강우량과 해수위에 대한 개념만 포함 하였지만, 앞으로 이들 변량이 위험도에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 방안이 모색되어야 할 것이다.

#### 참고문헌

1. Lewis A. Rossman, Storm Water Management Model, EPA, 2005
2. William James, etc., User's guide to SWMM, 2003
3. 한국수자원학회, 2003년 태풍 매미로 인한 재해특성 및 조사보고서, 한국수자원학회, 2003
4. 한건연 외 2명, 국내도시홍수 침수원인 조사 및 분석, 도시홍수재해관리사업단, 2003