

## 도시유역의 침수계획규모 결정을 위한 침수특성치에 관한 연구

### A Study on Flooding Characteristic Value for the Decision Method of an Urban Basin Design Magnitude

안정환\* / 조원철\*\* / 김호성\*\*\*

Ahn, Jeonghwan / Cho, Woncheol / Kim, Hosoung

#### Abstract

This paper is on the decision of design magnitude for flood control of urban basin, based on flooding characteristic values. In Korea, a design magnitude for flood control is established based on peak discharge of the outlet of basin. However, this method is inappropriate in an urban basin because sewerage only can flow out as much as it could and other discharge overflow to basin. In order to calculate a design magnitude for flood control of an urban basin, flooding characteristic values (peak discharge of pipe, average flooded depth, maximum flooded depths of an important point, flooded area, flooded volume, flooded time) were used as a tool. Using the Gwanghwamun Square as an example, a methodology was proposed that used XP-SWMM 2010 model as a platform to predict urban flood disaster. It can help other local government and residents to better understand, prepare for and manage a flood in urban environments.

**Keywords** : flooding characteristic values, average flooded depth, maximum flooded depth of important points, flooded area, design magnitude for flood control

#### 요 지

본 연구는 유역의 침수특성치를 기준으로 하여 침수계획규모를 설정하는 방법을 연구한 것이다. 본 연구에서는 2010년 9월 21일 광화문일대에 발생한 침수피해를 이용하여 XP-SWMM 2010 모형을 검증한 후 침수예상도를 산정하였다. 확률강우량은 Huff의 4분위법으로 분포시켰으며, 기존의 유역출구점을 기준으로 한 임계지속시간의 문제점을 제시하였으며 침수특성치(관로침투유출량, 평균침수심, 특정지점의 최대침수심, 침수면적, 침수총량, 침수지속시간)를 기준으로 유역침수계획규모를 설정하는 방법을 제시하였다. 현재 유역의 침수계획규모 설정시 사용되고 있는 관로침투유출량은 도시유역의 침수특성을 합리적으로 반영하지 못하는 것으로 판단되었으며 도시유역에서 발생하는 침수의 결과치인 침수특성이 침수계획규모 설정에 합리적인 것으로 나타났다. 유역의 침수계획규모는 각 유역의 지리·물리·사회·경제적 특성에 기반한 침수특성치를 선택하여 그 유역이 감당할 수 있는 침수특성치를 제외한 나머지의 침수특성치를 극복할 수 있도록 설정해야 할 것이다.

**핵심용어** : 침수특성치, 평균침수심, 특정지점의 최대침수심, 침수면적, 침수계획규모

\* 교신저자, 연세대학교 대학원 토목환경공학과 박사과정 (e-mail: ahn.jeonghwan@gmail.com, Tel: 02-2123-7496)

*Corresponding Author*, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei Univ., Seoul 120-749, Korea.

\*\* 연세대학교 공과대학 토목환경공학과 교수 (e-mail: woncheol@yonsei.ac.kr)

Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei Univ., Seoul 120-749, Korea.

\*\*\* 연세대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정 (e-mail: enang18@nate.com)

Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei Univ., Seoul 120-749, Korea.

## 1. 서론

2010년 9월 21일 서울에 내린 집중호우로 인해 광화문 일대가 침수되는 피해가 발생하였고, 2011년 7월 27일 우면산 산사태까지 최근 들어 호우로 인한 도시지역의 피해가 증가하였다. 산업발달로 인한 급격한 도시화는 강우유출과정에서 유출의 양적인 증가와 도달시간의 감소라는 두 가지의 주요한 변화를 일으켰다. 건물과 노면 포장 등의 불투수층이 증가하여 유출의 양적인 면을 증가시켰고, 지표면 및 물길 정비로 인하여 수로의 통수능이 증가하여 짧은 시간에 많은 양의 물이 한 곳에 모이게 되어 강우의 도달시간이 짧아지는 결과를 초래하였다. 유역의 출구점을 기준으로 설정한 임계지속시간으로 인하여 유역 내부에 심각한 피해가 발생하였다. 기후의 극한현상으로 인하여 지금까지 발생하였던 강우와는 다른 새로운 패턴의 강우가 발생하는 것도 하나의 원인으로 지목되고 있다.

도시지역의 침수를 모의하기 위해서는 우수관로의 흐름은 1차원, 맨홀을 월류하여 침수를 발생시키는 유량의 지표면 흐름은 2차원 모의를 실시하여야 한다. 최근 1, 2차원 연계모형에 대한 연구가 진행되고 있으며, 본 연구에서 사용하는 XP-SWMM 2010은 1차원 모의에서는 SWMM을, 2차원 모의에서는 TUFLOW 엔진을 사용하는 모형이다. 모형의 모의 결과를 기초하여 유출구의 침투유출량, 침수면적, 침수총량, 평균 침수깊이, 침수지속시간을 기준으로 임계지속시간을 산정하였다.

Hsu et al. (2000)은 관망의 절점에서 잉여수에 의해 발생하는 침수를 SWMM 모형을 적용하여 모의하였고, Phillips et al. (2005)은 XP-SWMM 모형과 TUFLOW 엔진을 이용한 1D/2D모델링을 하여 도시지역 2차원 침수해석에서 XP-SWMM의 적용성을 평가하였다. Smith et al. (2006)은 도시유역에서 홍수에 의해 발생하는 침수구역을 소구역별로 분할하여 구역별 배수구역을 산정하는 연구를 진행하였다. 이창희(2005)는 GIS를 기반으로 도시지역 침수해석 시 내배수시스템과 지하공간의 침수해석을 연계한 연구를 수행하였다. 이창희 등(2006)은 배수시스템의 과부하로 인한 도시지역 침수심을 계산하기 위해 우수배수시스템모형과 2차원 지표류 모형을 연계한 모형을 개발하였다.

명확한 기준 없이 사용되고 있는 임계지속시간의 개념을 장성모 등(2004)은 치수목적의 설계홍수량 산정 시 수문학적 인자에 따른 임계지속시간의 변화를 파악하여 그 적용성을 알아보았고, 회귀식을 산출하여 수문인자에 따른 편차를 정량화하여 수문설계 실무에 적용하고자 하였

다. 박인태(2008)는 지형특성을 고려한 임계지속시간을 추정하는 연구를 진행하여 지형학적 수문요소들에 대하여 상관분석과 다중회귀분석을 실시하여 지형학적 특성이 고려된 임계지속시간을 예측하는 일반식을 제안하였다. 유역특성과 임계지속시간의 상관성을 검토한 안경수와 김인식(2004)은 홍수도달시간, 유역면적, 유로연장 순으로 임계지속시간과의 상관성이 있고 유역의 형상계수와 유출곡선지수는 상관이 적다는 연구를 진행하였다. 이 연구에서는 소규모 하천에 대한 임계지속시간을 산정하는 회귀식을 제안하였다.

시민의 재산권과 안전의 보장에 대한 요구가 가중되고 있는 현 시점에 맞춰 현재까지 도시유역의 치수계획규모 설정의 기준이 되어왔던 관로 내 침투유출량의 유효성을 검토하고 새로운 치수계획규모 설정의 기준을 모색하기 위하여 도시유역의 피해에 직접적인 영향을 미치는 요소를 분석하였다. 시설물이 목적하는 기능을 수행하는데 가장 큰 부하를 유발하는 조건의 강우 지속시간을 의미하는 임계지속시간의 개념에 따라 도시 수공시설물이 목적하는 기능을 고려하여 침수특성치를 선정하고 각 침수특성치의 특성을 분석하였다.

## 2. 침수해석 모형

도시지역은 오랫동안 도시 유출량과 수질문제는 우수 범람 조절과 점오염원 폐수의 처리에 원인이 있다고 생각되어 왔다. 지난 20여년 사이 실제 관측을 통하여, 합류식 관거의 우수 범람과 유출에 따른 도시지역 비점 오염원의 심각한 잠재력으로 인식되어 왔다. 지금은 고성능의 컴퓨터가 등장하여 비점 오염원의 양적·질적 문제를 해결할 수 있는 모형의 발전을 이끌었다. 1969~1971년에 개발된 EPA의 Storm Water Management Model (SWMM)이 그 중 하나이다. 본 연구에서는 도시지역의 침수모의를 하기 위해 1D/2D 연계모형인 XP-SWMM 2010을 적용하였다. XP-SWMM 2010은 SWMM 모형을 기반으로 원도 우상에서 사용자의 편의를 확보하고 다양한 조건과 수리 구조물에 대한 모의가 가능하도록 XP-Software사에서 개선했던 모형으로 기본적인 이론 및 해석 방법은 SWMM과 동일하다.

XP-SWMM 2010은 1차원 분석 엔진으로 우수관망 해석 모형인 EPA SWMM 엔진을 기본으로 하고, 2차원 분석 엔진은 지표면 2차원 흐름을 모의할 수 있는 TUFLOW 엔진을 사용한다. XP-SWMM의 최신버전인 XP-SWMM 2010은 두 엔진을 연계하여 침수분석을 실시한다.

### 3. 모형의 구성

#### 3.1 연구대상 지역

본 연구의 대상지역인 청계천 유역 효자배수분구는 서울시하수도정비기본계획(2002.2, 서울시)에서 24개 배수분구로 구분된 중랑치리구역에 위치한 유역면적이 528.90 ha인 지역으로 유역의 상류부는 급한 경사를 이루고 있는 산지이며 중하류부로 내려오면 경사가 급격히 완만해지며 평지부를 형성하고 있다. 중류부부터 도시화가 진행되어 평지를 이루고 있는 하류부는 완전히 도시화된 전형적인 도시 배수분구로 다소 짧은 홍수도달시간을 갖고 있는 유역이다. 유역의 표고차는 278.8m, 평균지반고는 EL. 68.8m이며, 최근 침수피해가 발생하고 있는 광화문 광장 일

Table 1. Current Status of Sub-basin in the Hyoja Drainage Basin

Name of drainage basin		Basin Area (ha)	
Drainage basin	Drainage Area		
Hyoja drainage basin	Baegun-dong	Naeja-dong	121.84
		Singyo-dong	85375
		Hyoja-dong	81.14
		Subtotal	288.73
	Joonghak-cheon	Kyungbokkung	110.96
		Samcheong-dong	114.42
		Jongno	14.79
		Subtotal	240.17
	Total		528.90

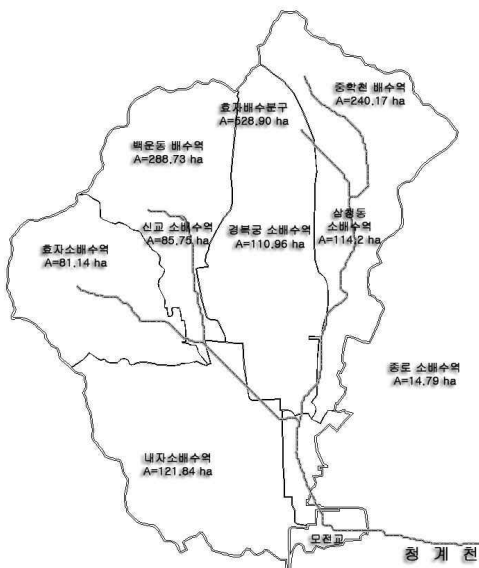


Fig. 1. A Catchment Basin Map of Hyoja Drainage Basin

대의 지반고는 약 EL. 30.0m 내외이다. Table 1은 효자배수분구의 소유역 현황이며 Fig. 1은 유역을 도시한 것이다.

#### 3.2 입력자료

##### 3.2.1 관망자료

1차원 분석을 모의하기 위해서는 Node와 Link 자료를 구축하여야한다. Node 자료를 구축하기 위해 Hydraulic Layer에서 지반고와 관저고를 입력하고 지반고 2D연결 옵션을 선택하여 맨홀에서 월류된 유량은 지표면으로 유출될 수 있도록 설정하였으며, Runoff Layer에서는 유역면적, 불투수율, 너비, 유역경사 등을 구하여 Node 자료를 구축하였다. Link 자료로는 관거 형상과 직경, 연장, 관고 등의 데이터를 입력하였고, 효자배수분구를 총 172개의 소유역으로 모형을 구축하였다.

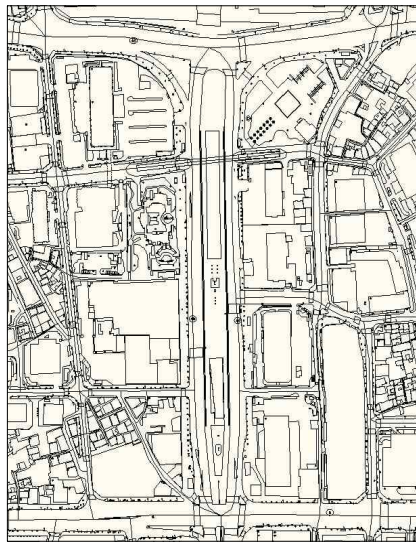
##### 3.2.2 지형자료

지형자료는 유량이 맨홀을 월류하여 지표면으로 유출된 이후의 지표면흐름을 분석하기 위한 자료이다. 지형자료를 구축하기 위해서 1:1000의 축척을 갖는 수치지도를 사용하였다. 효자배수분구 중 침수피해가 발생한 광화문일대 1:1000축척의 수치지도(도엽번호: 376082045~376082067)를 기반으로 표고점과 등고선을 이용하여 shape 파일을 생성한 후 DTM을 구축하여 모형에 적용하였다. DTM에는 X좌표, Y좌표, 지반고의 자료가 포함되어 있다. Fig. 2(a)는 광화문일대의 수치지도이고, Fig. 2(b)는 수치지도를 기반으로 생성된 DTM을 도시한 것이다.

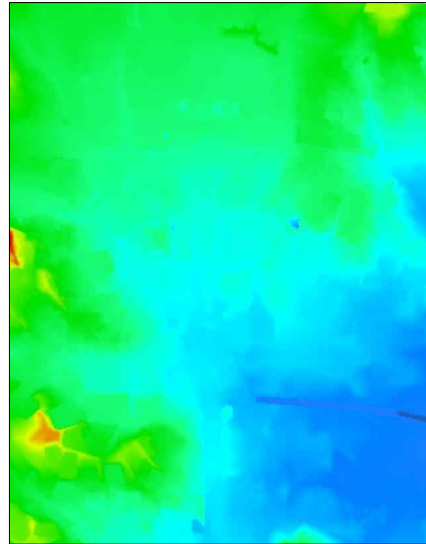
#### 3.3 모형의 검증

세종로 사거리의 백운동천 암거는 광화문 지하로를 만들면서 관로가 C자형으로 시공되었고, 관로가 굴절되어 마찰이 증가하고 유속이 느려져 주간선으로서 우수소통 능력이 떨어져 집중호우 발생 시 청계천으로 우수배출이 늦어졌다. C자형 굴곡관이 침수피해의 주요 원인중 하나로 주목되고 있어 C자형 굴곡관에 에너지 손실계수를 1.0~1.8까지 0.1간격으로 변화시켜 모의를 실시하였다. Table 2는 각 Case별 모의조건이다.

에너지 손실계수 1.0을 고려한 Case 1과 1.8을 고려한 Case 9의 모의결과는 큰 차이를 보였다. 침수면적에는 1.20배, 하수관거를 월류한 침수총량은 1.86배의 차이를 보였고 평균침수심 역시 1.53배로 침수피해 차이가 명확하게 나타났다. C자형 굴곡이 2010년 9월 21일 발생한 침수피해 증가에 영향을 미친 것으로 평가되어 정확한 모형을 구축



(a) Digital map



(b) DTM

Fig. 2. The Digital Map and DTM in a Target Basin

Table 2. Simulated Condition by Cases

Case	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Energy loss coefficient	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8

하기 위해 관로의 굴곡을 구현하는 에너지 보정계수를 0.1의 일정간격으로 변화시켜 최적의 계수를 산정하는 모형의 검증과정을 실시하였다.

XP-SWMM 2010 모형을 검증하기 위해 작년에 실제 발생한 호우피해현황과 에너지 손실계수를 변화시켜 수행한 모의결과와 비교하였다. 본 연구에서는 침수피해 현황 중 3곳의 지점을 선택하여 실제 침수깊이를 측정하여 모의결과와 실제피해현황을 비교하여 모형을 검증하였다. Table 3을 살펴보면, 실제 침수피해가 발생한 Site 1(지하철 5호선 광화문역 7번 출구)의 침수깊이와 가장 유사한 결과를 산출해내는 경우는 Case 9이다. Site 2(세종로사거리 횡단보도)와 Site 3(지하철 5호선 광화문역 6번 출구)의 결과를 비교해보아도 Case 9가 실제 발생한 침수깊이와 가장 유사한 결과를 산출되어 본 연구에서는 C자형 굴곡관의 에너지 손실계수로 1.8을 채택하였다.

#### 4. 수치모의 및 결과

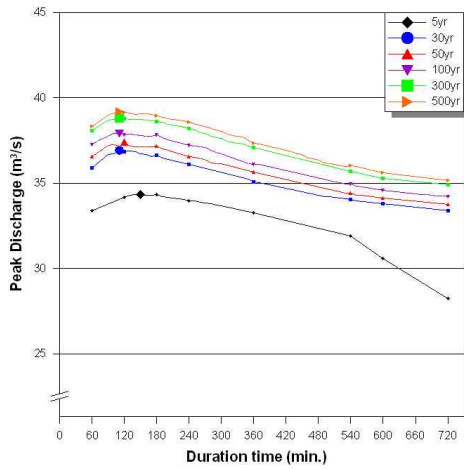
본 연구에서는 임계지속시간을 결정하기 위한 목적특성치로 유역 출구점에서의 관로침두유출량, 평균침수심, 중요지점의 최대침수심, 침수면적, 침수총량, 침수지속시간을 선정하였다. 각 침수특성치에 의한 임계지속시간을

Table 3. Flooded Depth of Important Points

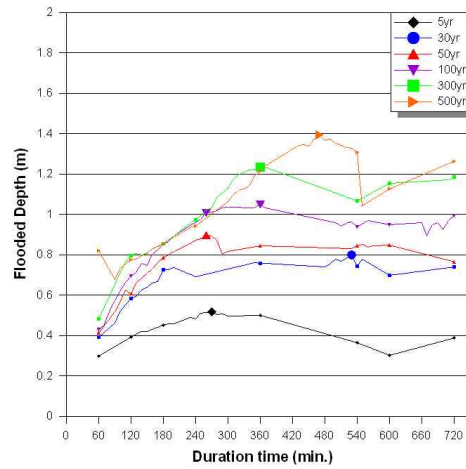
Case	Site 1 (m)	Site 2 (m)	Site 3 (m)
Case 1	0.36	0.08	0.05
Case 2	0.38	0.12	0.07
Case 3	0.40	0.14	0.09
Case 4	0.42	0.17	0.12
Case 5	0.44	0.17	0.13
Case 6	0.45	0.18	0.15
Case 7	0.46	0.20	0.16
Case 8	0.47	0.21	0.18
Case 9	0.48	0.25	0.21
Real flooded depth	0.47	0.24	0.20

6개의 재현기간(5년, 30년, 50년, 100년, 300년, 500년) 별 확률강우량에 대하여 산정하였으며 강우의 분포는 Huff의 4분위법 중 네 번째 분위를 사용하였다. 임계지속시간은 각 확률강우량을 지속시간 10분 단위로 모의하여 목적으로 하는 침수특성치가 최대가 되는 지속시간으로 결정하였다.

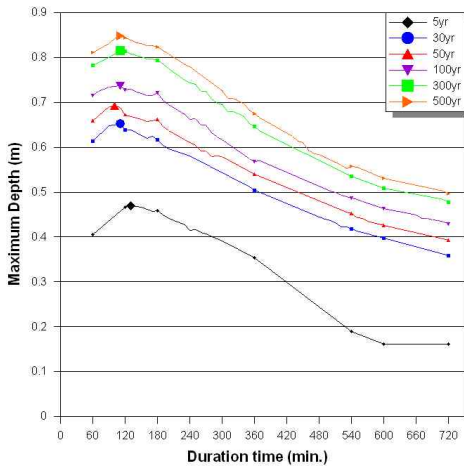
Fig. 3에 지속시간별 침수특성치를 도시하였다. 현재까지 유역 치수계획과 임계지속시간 설정의 기준으로 사용



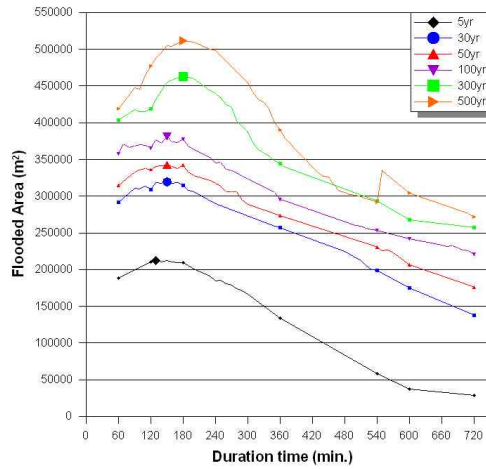
(a) Peak discharge of pipe



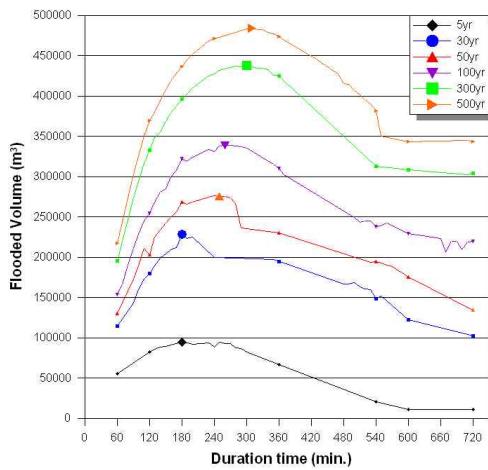
(b) Average flooded depth



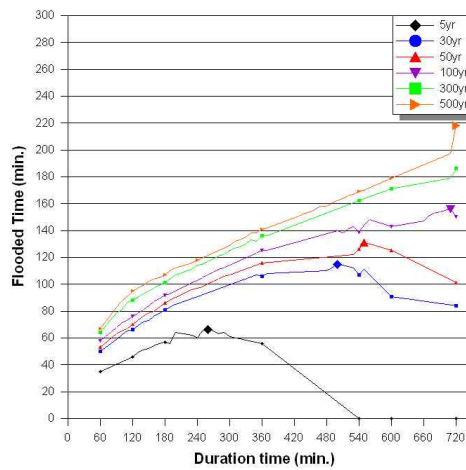
(c) Flooded depth of an important point



(d) Flooded area



(e) Flooded volume

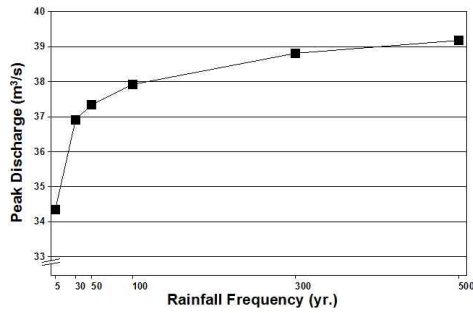


(f) Flooded time

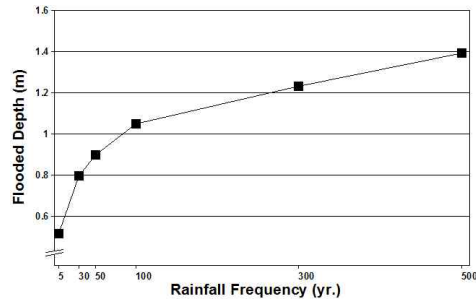
Fig. 3. Flooding Characteristic Values by Duration Time

하고 있는 (a) 관로침투유출량은 재현기간 5년을 제외한 모든 재현기간에서 지속시간에 따른 변화가 10% 내외로 분석되었다. 도시유역의 특성상 관로의 통수능을 초과하

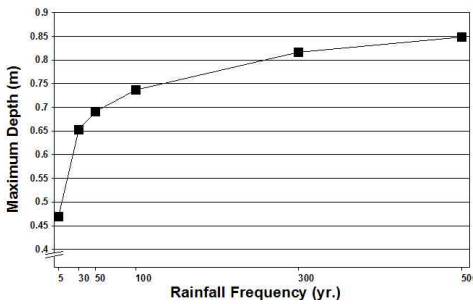
는 유량은 관로를 통해 유출되지 못하고 지표면으로 범람하며 관로 유출에 기여하지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 도시지역에 있어 임계지속시간의 설정과 유역치수계



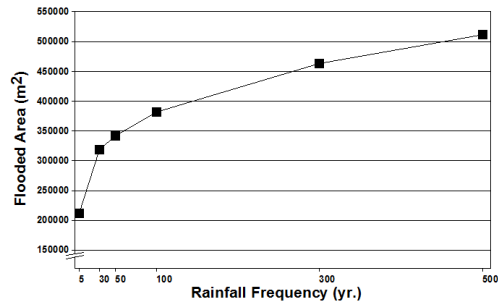
(a) Peak discharge of pipe



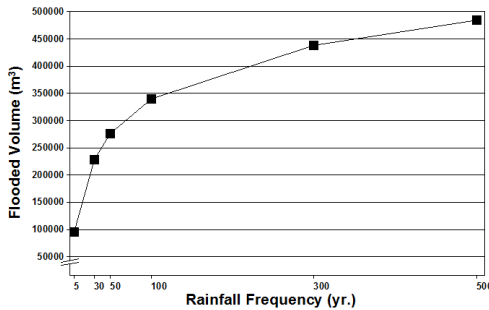
(b) Average flooded depth



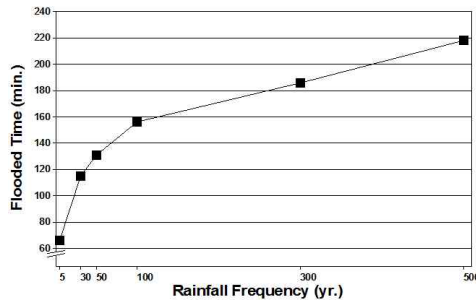
(c) Flooded depth of an important point



(d) Flooded area



(e) Flooded volume



(f) Flooded time

Fig. 4. Flooding Characteristic Values by Return Periods

획의 목표가 침수피해를 방지하거나 저감하는 것임을 고려할 때 관로침수유출량은 임계지속시간을 결정하고 유역치수계획을 수립하는데 목적특성치로 효과적이지 못할 것임을 의미한다. (b) 평균침수심은 낮은 발생빈도의 경우에는 지속시간별로 큰 차이를 보이지 않으나 높은 발생빈도에서는 지속시간별로 의미있는 차이를 보였다. (c) 중요지점의 최대침수심, (d) 침수면적, 그리고 (e) 침수총량의 경우는 지속시간별로 현격한 차이를 보였으며 특히, 현재 도시유역 설계강우의 지속시간으로 많이 적용되고 있는 짧은 지속시간에서 최대값을 나타내었다. (f) 침수지속시간은 강우의 규모가 커질수록 지속시간과 함께 증가하는 것으로 분석되었다.

Fig. 4는 재현기간별로 임계지속시간에 대한 침수특성

치를 나타낸 것이다. 모든 침수특성치에서 공통적으로 재현기간 50년까지는 급격한 증가추세를 보이나 재현기간이 증가할수록 증가율은 감소하는 것으로 분석되었다. 치수계획의 규모가 재현기간과 비례하지 않으며 특히 높은 재현기간(100년 이상) 구간에서는 치수계획규모를 소폭 상승시키는 것만으로 계획빈도를 크게 상승시키게 된다. 치수계획규모를 설정할 때 재현기간보다는 물리적 현상을 기준으로 해야 함을 시사한다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 2010년 9월 21일 광화문일대에 발생한 침수피해를 이용하여 XP-SWMM 2010 모형을 검증한

후 침수예상도를 산정하였다. 확률강우량은 Huff의 4분위법으로 분포시켰으며, 기존의 유역출구점을 기준으로 한 임계지속시간의 문제점을 제시하고 침투유출량, 평균침수심, 특정지점의 최대침수심, 침수면적, 침수총량, 침수지속시간을 기준으로 한 새로운 임계지속시간을 설정하여 침수특성치를 기준으로 하여 유역치수계획규모로 설정하는 방법을 제시하였다. 본 연구로 얻은 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

세종로사거리에 설치되었던 C자형 굴곡관의 에너지 손실계수는 1.8로 산정되었으며, 에너지 손실계수를 1.0과 1.8로 고려한 모의결과, 침수면적에서는 1.20배, 침수총량은 1.86배, 평균침수심은 1.53배의 차이를 보였다. 이는 C자형 굴곡관이 배수불량에 크게 관여하는 결과로 해석되어 관로의 개선이 필요한 것으로 판단된다.

재현기간별(5, 30, 50, 100, 300, 500년) 지속시간(60~720분)에 해당하는 확률강우량을 Huff의 4분위법으로 분포시켜 모의를 실시한 후, 유역 출구점에서 발생하는 침투유출량을 기준으로 설정한 임계지속시간의 적합성 여부를 판단하였다. 그 결과 출구점에서의 최대 침투유출량과 최소 침투유출량의 차이는 재현기간 5년일 때 1.22배, 30년부터 500년까지는 1.11배로 나타났다. 침투유출량은 재현기간 5년에서 34.34 m<sup>3</sup>/s, 500년에서 39.19 m<sup>3</sup>/s로 산출되었고, 두 재현기간의 침투유출량 차이는 4.85 m<sup>3</sup>/s의 미소한 차이를 보이고 있다. 반면에 평균침수심, 특정지점의 최대침수심, 침수면적, 침수총량, 침수지속시간 등은 해당 재현기간의 지속시간에 따른 피해규모에서 1.59~7.44배의 큰 차이를 보여 유역 내에 발생하는 침수피해규모를 기준으로 임계지속시간을 설정하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

관로의 침투유출량은 하류에 직접적인 영향을 받는 하천이나 시설물의 위치한 경우, 평균침수심은 저지대에 시설이 밀집하여있는 경우, 특정지점의 최대침수심은 발전소, 문화재, 지하시설입구 등 침수에 민감한 주요시설이 위치한 경우, 침수지속시간은 침수에 취약한 농작물의 재배지가 위치한 경우 등의 예처럼 유역의 침수특성치 중 각 유역의 지리·물리·사회·경제적 특성에 맞는 침수특성치를 선택하여 치수(배수)계획규모를 설정해야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발 사업인 ‘극한호우에 대응한 유역치수계획규모 설정 방안’ 과제의 일환으로 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 서울특별시 (2002). 서울시하수도정비기본계획보고서.
- 박인태(2008). 신안유역의 지형특성을 고려한 임계지속시간 추정. 석사학위논문, 경상대학교
- 안경수, 김인식 (2002). “최적설계수문량 산정에 대한 임계지속시간의 적용에 관한 연구.” **공학기술연구**, 인천대학교공학기술연구소, 제17권, 제1호, pp. 75-84.
- 이창희(2005). GIS기반 도시침수해석 통합모형의 개발. 박사학위논문, 경북대학교.
- 이창희, 한건연, 최규현 (2006). “SWMM을 연계한 DEM 기반의 도시침수해석 모형.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제5호, pp. 441-452.
- 장성모, 강인주, 이은태 (2004). “설계홍수량 산정에 따른 임계지속시간의 적용성에 관한 연구.” **한국습지학회지**, 한국습지학회, 제6권, 제3호, pp. 119-126.
- 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.
- Phillips, B.C., Yu, S., Thompson, G.R., and Silva, N.de. (2005). “1D and 2D Modelling of Urban Drainage Systems using XP-SWMM and TUFLOW.” 10th International Conference on Urban Drainage, Copenhagen, Denmark, August 2005, pp. 21-26.
- Smith, J., Phillips, B.C., and Yu, S. (2006). “Modelling Overland Flows and Drainage Augmentations in Dubbo.” 46th Floodplain Management Authorities Conference, March 2006.

논문번호: 12-005	접수: 2012.01.19
수정일자: 2012.05.07/07.17	심사완료: 2012.07.17