

역사기록에 나타난 극치호우사상 검증을 위한 홍수범람 해석

Analysis of Flood Inundation for Extreme Rainfall Event in Historical Documents

Kyung Ho Yoon*, Hyeon Jun Kim**

Safety Research Division, National Disaster Management Institute,

136 Mapo-daero, Mapo-gu, Seoul, Republic of Korea

Abstract

Currently, a typical example of abnormal weather in the global increasing trend can be said to be convenient and flood through the overflow of domestic demand inundation or embankment by the torrential rainfall. In order to strengthen this facility standards, but we need the expansion of rainfall data period, South Korea still has rainfall records continuously from Yeongjo to Soonjo for annals of the Chosun Dynasty. Therefore, in the previous studies of the present study, using these historical materials were calculated probability rainfall. In this study, to determine the time distribution of rainfall using the Huff quartile and Random Cascade model Ch'ugu-gi daily rainfall, was constructed a cross-sectional input data for the Cheonggyecheon flow section in the old literature. Furthermore, the actual rill Cheonggyecheon tributary sections to confirm the damaging of the peripheral portion of the river, and estimates the cross-sectional input data by considering the various documentary, which the Digital Elevation Model (DEM). It was to evaluate the spatial scale of damage.

Key words: extreme rainfall event, flood, inundation, historical documents, DEM

국문초록

현재 전 지구적으로 증가 추세에 있는 이상기후 현상의 대표적인 예는 집중호우로 인한 도심 내 내수침수 또는 제방의 월류를 통한 홍수라 할 수 있다. 이에 시설기준을 강화하기 위해서는 강우 자료기간의 확충이 필요한데, 우리나라는 조선왕조실록에 영조부터 순조까지 측우기의 강우기록이 남아 있다. 이에 본 연구의 선행연구에

* Tel. +82-2-2078-7896. Fax. +82-2-2078-7789. E-mail. luipen@naver.com

Submission & Publication Process

Received: Jun. 12, 2015 / Revised: Jul. 14, 2015 / Accepted: Jul. 20, 2015

서는 이들 역사자료를 이용하여 확률강우량을 산정하였다. 본 연구에서는 측우기 일강우량을 Huff 4분위와 Random Cascade 모델을 이용해 강우의 시간분포를 결정하였고, 청계천 개수계획평면중단도(1936년, 경성부), 춘천사실(1760년), 동국여지비고(1870년), 조선지형도집성(1921년), 경성지적도(1912년), 청계천 유물 발굴조사 보고서(2006년) 등의 고문헌을 통하여 청계천 분류 구간에 대하여 단면 입력자료를 구성하였다. 또한 실제 청계천의 주변부 피해양상을 확인하기 위하여 청계천의 지류구간에 대해서도 금천교 발굴조사보고서(2003년), 영천교 발굴조사보고서(2003년) 등의 자료와 함께 근대까지의 기록물들을 활용하여 단면 입력자료를 추정하고 이를 수치고도모형(DEM)으로 공간적 피해규모를 평가하고자 하였다.

주제어: 극치호우사상, 홍수범람, 역사기록, 수치고도모형

I. 서론

1. 연구 배경

전 지구적으로 발생빈도가 증가하고 있는 이상기후 현상과 관련하여 제방 등의 시설기준을 강화하는데 있어 138년(서울지점 기준)에 불과한 강우 자료기간은 한정적이라 할 수 있다. 이와 같은 자료기간의 문제를 해결하기 위해 최근 역사기록 혹은 고고학적 발견에 의한 과거의 극한 홍수기록을 발견하는 것은 많은 관심을 가지고 수행되고 있다.

과거 홍수를 비롯한 재해에 관한 기록은 각 국가별 역사자료에서 찾아볼 수 있는데 중국이 대표적인 예이다. Liu 등에 의해 중국의 지방지(fang zhi) 기록으로부터 935년간(A.D. 975~1909)의 중국 광둥지방 태풍 빈도 기록이 조사되었고, 중국기상국(2004)은 중국역사기록 3,000년 동안 발생한 모든 기상기록을 망라하여 정리하였는데, 갑골문자로 기록된 것으로부터 청나라 말기(1911년)까지 강수, 홍수, 황사 등 기상이변에 대한 기록을 정리하였다.

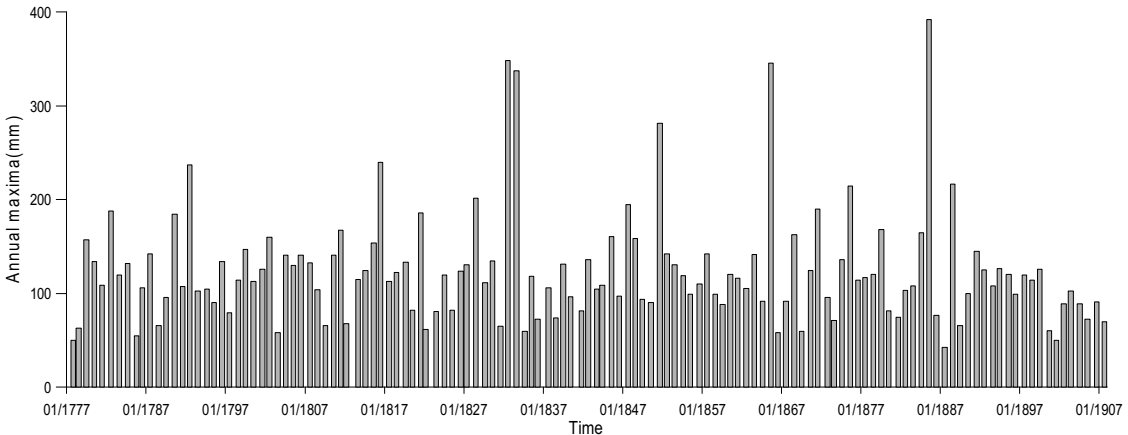
우리나라도 역사 기록물 혹은 개인의 일기나 기행문에서도 과거의 재해기록을 찾아 볼 수 있다. 우리나라의 역사기록에는 정성적인 내용뿐만 아니라 강우량과 같은 구체적인 자료도 기술되어 있는데, 삼국사기를 비롯하여 고려사에는 그 시대에 발생하였던 주요 홍수에 대하여 언급하고 있으며, 특히 조선왕조실록에는 조선의 개국 이래 500년간에 발생한 홍수와 피해지역, 피해규모 등을 자세히 기록되어 있으며 그 중에서도 영조대 창덕궁과 경희궁에 설치된 측우기의 일강우량 자료가 순조시절까지 존재하고 있다.

II. 측우기 자료를 이용한 자료기간 확충에 따른 확률강우량 산정

측우기 자료는 국내강우분석에서 자주 언급되는 자료기간의 부족으로 인해 발생하는 해석의 신뢰도

문제를 보완하는데 큰 도움을 줄 것으로 기대되어 이를 이용한 정성적 또는 정량적 해석이 다양하게 이루어지고 있으며, 측우기의 자료기간이 131년으로 현대 관측기간보다 길기 때문에 만약 현대자료와 함께 어우러질 수 있다면 약 200년 전후의 장기간의 자료를 가질 수 있기 때문에 그 의미가 크다할 수 있다.

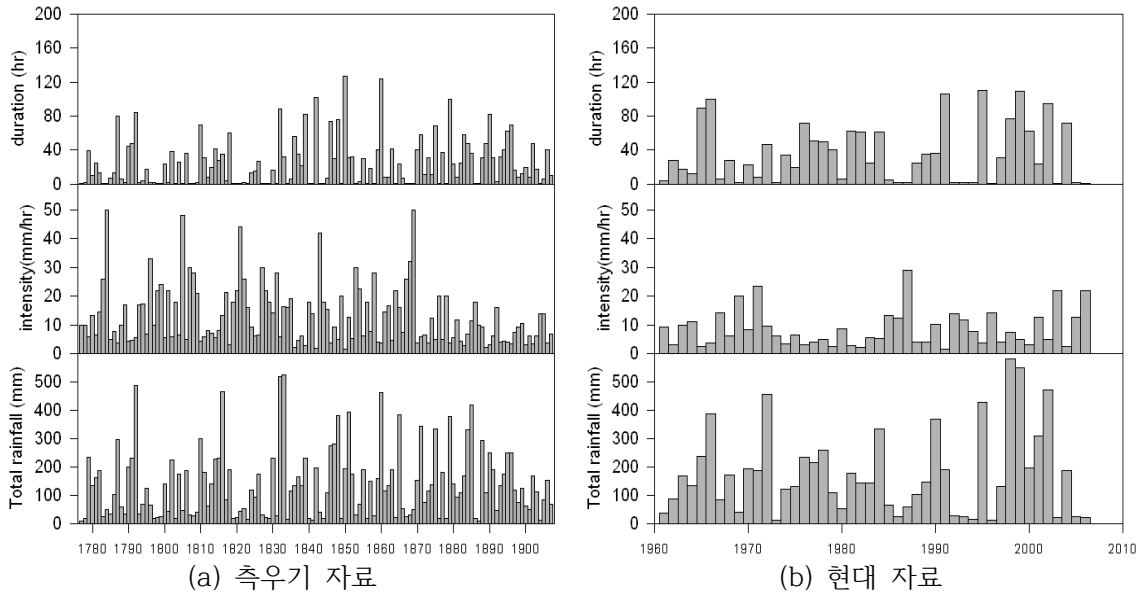
이에 본 연구의 선행연구에서는 조선왕조실록과 승정원일기를 토대로 1777년부터 1853년까지 측우기 일강우량 연최대치 자료를 <그림 1>과 같이 구축하였다.



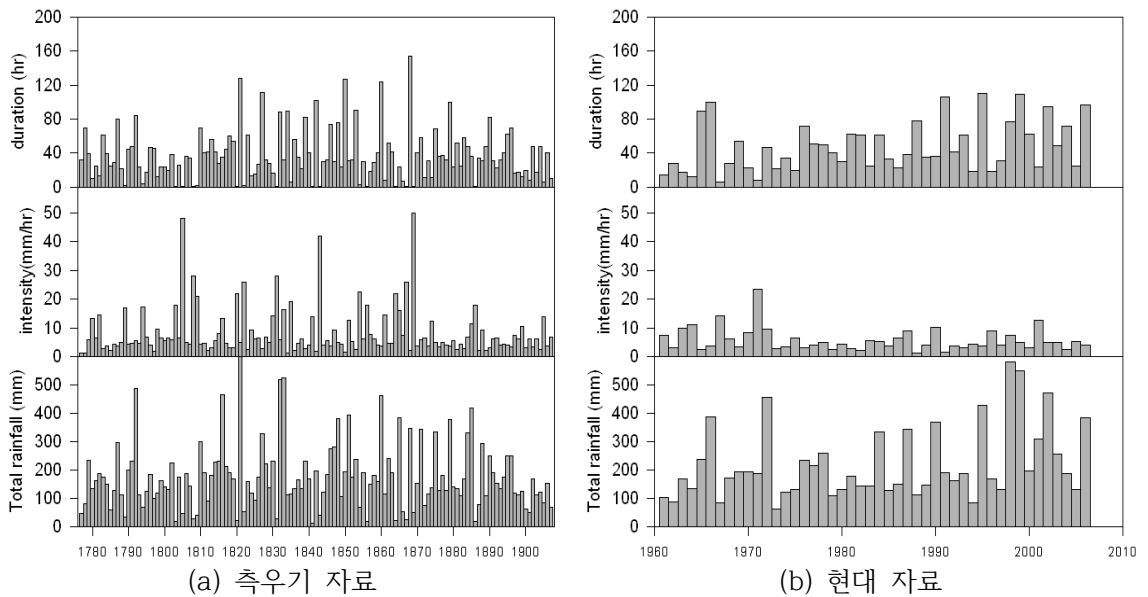
<그림 1> 측우기 일강우자료의 연최대치계열

이렇게 구축된 측우기 기록은 일강우자료이므로 총강우량과 강우강도를 함께 고려하여 계산한 재현기간을 기준으로 이를 보완하였다(유철상, 2006). 강우자료를 독립호우사상으로 분리하여 계열을 작성하였는데, 이는 독립호우사상의 경우 강우지속기간, 총강우량 그리고 호우평균강우강도(이하 강우강도)의 세 가지 구성요소를 가지고 있지만, 그 중 두 가지만 정의되면 상관관계에 의해 나머지 요소의 값을 파악할 수 있다는 점에서 측우기의 총강우량과 강우강도 대해 이변량 지수분포를 적용하여 매년 최대 재현기간을 가지는 호우사상을 연최대치 호우사상으로 결정하는 방안을 적용하였다(유철상, 2007).

이변량 지수분포의 적용시 매개변수 추정은 전기간 자료를 대상으로 추정하는 방안(<그림 2>)과 장기간의 관측기간만을 고려하여(<그림 3>) 연도별로 매개변수를 추정하는 방안을 비교하였고, 또한 측우기 자료에 대한 적용성을 확인하기 위한 비교수단으로 현대 강우자료에 동일한 방법을 적용하여 비교를 실시하였다.



<그림 2> 연최대치계열 (total year parameter)



<그림 3> 연최대치계열 (annual year parameter)

국내의 경우 강우나 홍수의 빈도해석을 수행할 때 항상 한정된 자료의 문제에 부딪히게 된다. 이때, 역사적 증거나 문서, 물리적 증거 등의 역사적 자료를 통해 자료의 확장 및 정확도의 증가가 가능해져 빈도해석 결과의 개선에 도움을 줄 수 있으며, 강우강도가 아닌 호우사상의 분석을 위해서는 점강우모형 또는 이변량 대수분포를 이용한 해석이 적합하다(유철상, 2007).

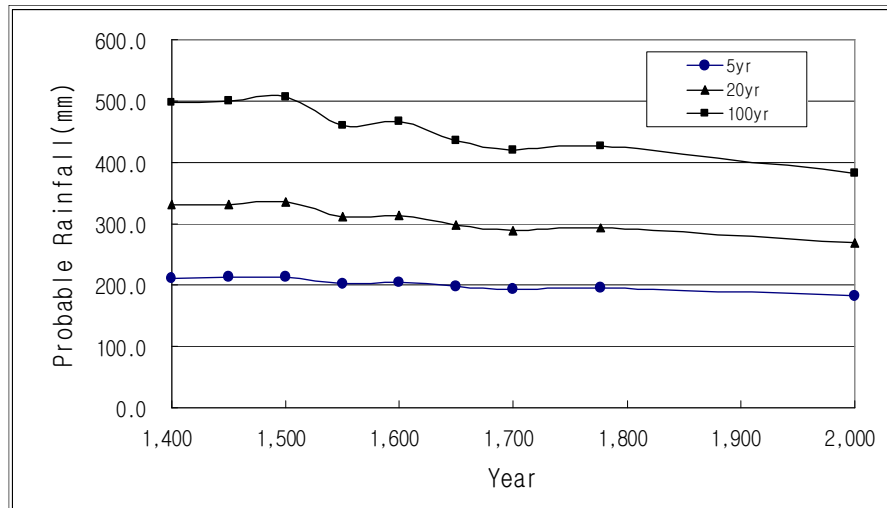
또한 역사기록을 고려한 빈도해석기법(Historical Frequency Analysis)에서 역사적 자료는 대부분

특정임계치를 초과하는 절단된 자료(censored data) 형태로 존재하므로, 앞서 구축한 극한홍수사상의 자료를 즉 역사적 자료를 통해 자료기간을 확충하여 확률강우량을 산정하였다. 역사적 관측자료의 기간 중 특정한 임계치를 초과한 횟수만을 이용하여 분석하는 Binomial censored data MLE(stedinger 등, 1986)을 이용하여 <표 1>과 같이 근대기록만으로 산정된 확률강우량과 자료기간을 누적시키며 산정한 확률강우량을 비교하였다.

<표 1> 문헌기록을 이용한 자료확충에 따른 확률강우량의 변화

자료 기간 (~년도)	총자료년수 (년)	복원 호우사상수 ("上上"규모: 281.3mm/day)	이변량대수분포 매개변수		1일 확률강우량(mm)	
			평균	표준편차	5년	100년
근현대자료	96		4.8592	0.4292	183.3	385.2
~1777	131		4.8995	0.4540	194.8	427.2
~1700	208	3	4.8945	0.4500	193.2	420.7
~1650	258	8	4.9055	0.4590	196.7	435.3
~1600	308	17	4.9275	0.4780	204.3	467.0
~1550	258	19	4.9235	0.4740	202.8	460.4
~1500	408	26	4.9545	0.4990	213.5	506.2
~1450	458	29	4.9515	0.4960	212.3	500.8
~1400	516	33	4.9485	0.4950	211.5	498.1

Binomial censored data MLE는 모멘트조정법이 정량적인 관측자료와 정량, 정성적인 역사적 자료가 함께 존재하는 경우에 적용에 문제점을 가진다는 점을 고려하여, 역사적 관측자료의 기간(h) 중 특정한 임계치 $X_0 = \ln(P_0)$ 를 초과한 횟수(k)만을 이용하여 분석을 수행한 것이다.



<그림 4> 자료확충에 따른 확률강우량의 변화

문헌기록을 이용하여 확률강우량을 산정할 경우, 현대자료만을 이용한 분석결과에 비해 1일 확률강

우량의 크기가 저빈도에서는 최대 약 16.5%까지 증가하고 고빈도(100년 이상)에서는 최대 약 31.4%까지 증가하였으며, 이를 <표 1>에 나타냈다. 이 때 <표 1>에서 상상(上上)의 의미는 조선왕조실록에서 홍수의 강도를 상·중·하로 분류하였는데, 이중 상상은 실록에서 가장 큰 강우크기를 나타낸 것으로, 복원 호우사상수는 측우기 관측 호우사상을 1일 확률강우량으로 변환하였을 때 281.3mm/day에 해당하는 호우사상수를 뜻한다.

<표 1>과 마찬가지로 <그림 4>에서는 자료를 확충하였더라도 동일 재현기간내에서 고빈도의 경우가 확률강우량의 증가가 더 크다는 것을 확인할 수 있다.

III. 극치호우사상을 이용한 홍수량 산정

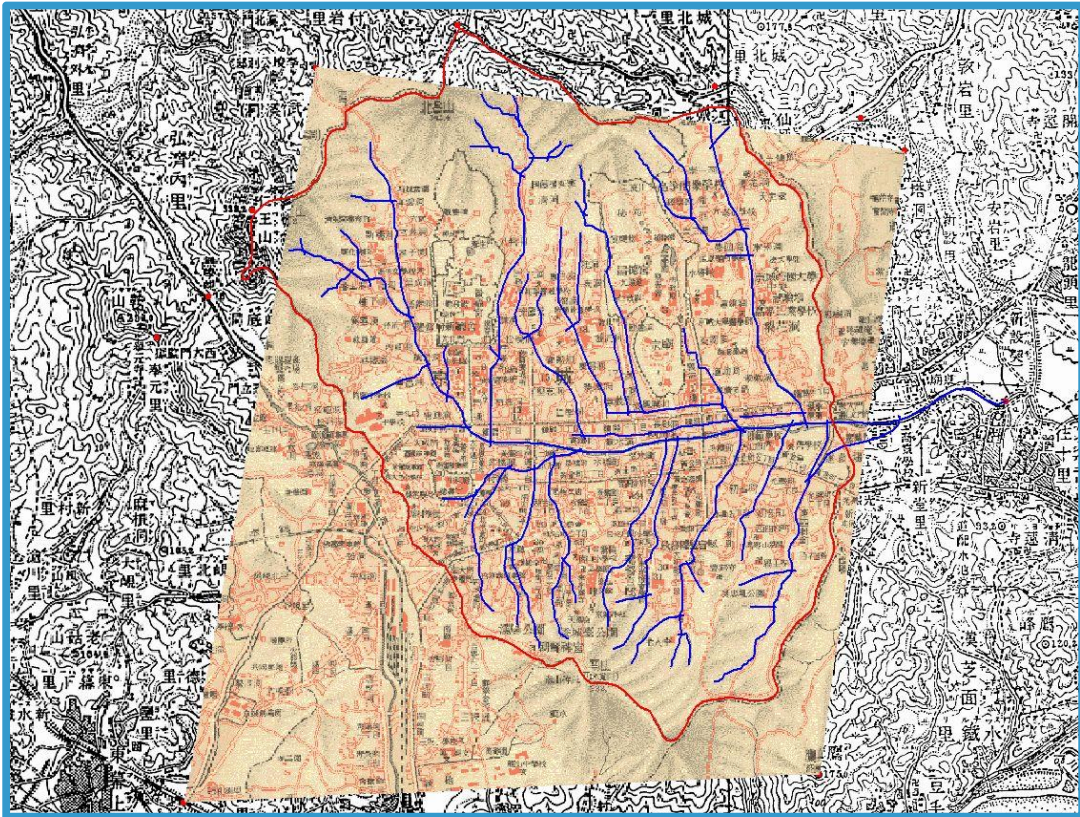
본 연구에서는 선행연구로부터 측우기의 자료를 확충하여 산정된 확률강우량 중 극치호우사상 발생에 따른 홍수범람해석은 <그림 5>의 절차에 따라 분석을 수행하였다.



<그림 5> 청계천 홍수 분석 절차

1. 과거 청계천 유역경계 및 하천 추출

과거 청계천 유역에 대한 극한홍수 사례분석을 위하여 하천 및 유역경계를 설정하였다. 하천 및 유역경계는 고문헌 및 사진자료(서울 600년 등)를 수집하여 1900년대 초반의 한성지도를 토대로 GIS(Geographic Information System) 자료를 구축한 것과 함께 1912년 조선총독부에 의해 만들어진 경성부지적원도를 바탕으로 더욱 더 정확한 지형자료를 확보하였다. 유역경계 또한 조선시대 도성의 하천 최하류 지점인 오간수문을 출구점으로 선정하였으며 유출량의 정확한 구분을 위하여 이간수문을 포함하여 소유역을 더욱 더 세분화하여 구축하였다.

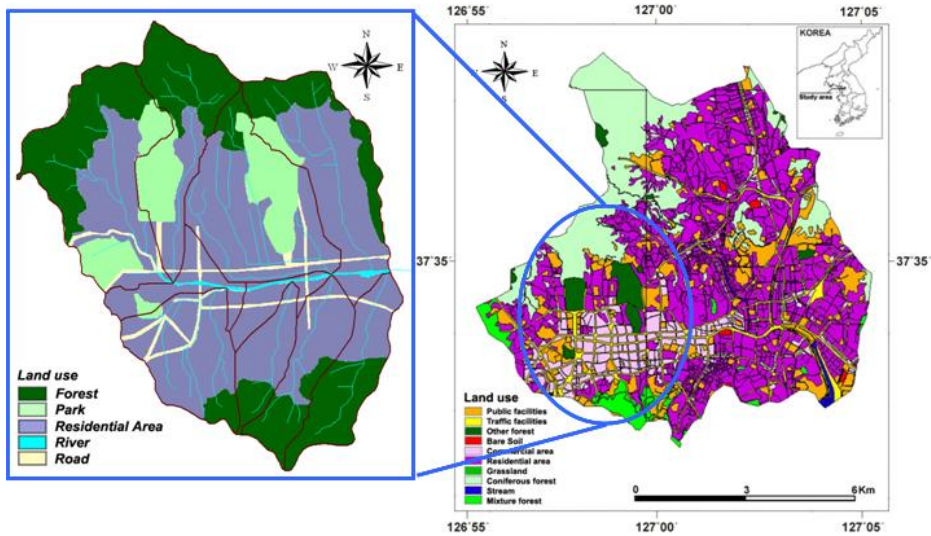


〈그림 6〉 과거 청계천 유역경계 및 하천 추출(경성부 지적원도)

2. 과거 청계천 토지이용자료 구축

과거 청계천의 토지이용은 서울 600년(1994, 대학당) 등의 문헌자료 및 과거의 지형도를 기반으로 그림 7과 같이 추정하였다. 도성 중앙으로 경복궁과 창덕궁, 덕수궁, 사원이 위치하는데 이는 공원 및 녹지로 분류하였으며, 도성 외곽으로 산림지역이 위치하고, 하천 및 주요 도로를 제외한 대부분의 지역을 도성 내의 주거지역으로 구분하였다. 주거지역의 경우 경복궁과 창덕궁의 사이는 예로부터 권문

세가들의 주거지로 도성의 중심지(북촌)이며, 대부분이 기와집의 형태이다. 이를 제외한 나머지 주거 지역은 대부분 일반 서민들의 초가집임을 조선후기 사진자료를 통해 확인하였다.



<그림 7> 과거 청계천 토지이용자료 구축(청계천 복원공사 이전의 토지이용현황)

3. HEC-HMS를 이용한 과거 청계천 유역 극한홍수량 산정

1) 홍수유출량 산정지점

본 연구에서는 소유역을 출구지점을 오간수문과 이간수문 지점으로 하여 청계천의 본류의 주요 다리를 중심으로 10개의 소유역을 구분하고, 이간수문 지점에서 청계천의 지류인 북영천, 계생동천, 옥류천, 원동천에 대해 4개의 소유역을 구분하였으며, 이는 <표 2>와 같다.

<표 2> 소유역 구분



2) 홍수도달시간 산정

<표 3> 홍수도달시간 산정

하천	산정지점	유로 연장 (km)	S (m/m)	홍수도달시간(hr)			
				Kirpich	Kraven (I)	Kraven (II)	Rziha
청계천	옥인동 하구	2.8	0.145	0.30	0.06	0.38	0.12
	경복궁 하구	3.2	0.134	0.35	0.07	0.44	0.15
	수표교	1.1	0.018	0.34	0.07	0.15	0.17
	장통교	1.8	0.085	0.27	0.05	0.26	0.11
	창덕궁 하구	2.9	0.013	0.80	0.20	0.40	0.54
	효경교 하류	1.1	0.043	0.24	0.04	0.15	0.10
	하랑교	1.9	0.052	0.33	0.06	0.26	0.15
	태평교 상류	2.3	0.100	0.30	0.05	0.31	0.12
	오간수문 상류	2.5	0.141	0.29	0.05	0.35	0.11
오간수문	3.3	0.029	0.65	0.15	0.46	0.39	

홍수도달시간의 산정은 하천설계기준(2005, 한국수자원학회)에 제시된 Kirpich공식, Rziha공식, Kraven공식(I), Kraven(II)공식을 이용하여 홍수량 산정지점별로 산정하였다. 표 3은 각 산정공식별 도달시간 산정 결과로, 본 연구에서는 이 중 문헌조사에 의한 유역현황과 대략적인 유속을 고려하여 Kraven(II) 공식을 이용하여 산정하였다.

3) 매개변수 산정

유효우량을 산정하기 위한 유출곡선지수(CN)는 AMC -II 조건하에서의 평균유출곡선지수를 산정하였다. 홍수추적은 Clark 단위도를 사용하였으며, Clark 유역추적법의 저류상수는 도달시간(Tc)과의

관계를 이용하는 $K=aTc$ 방법을 적용하였고 계수 a 는 1.0을 채택 하였다. 그리고 소유역을 15개로 분할 하였지만 유역현황은 <표 2>의 조건을 사용하였다. 상기와 같은 방법으로 산정한 홍수량 산정을 위한 매개변수는 다음 <표 4>와 같다.

<표 4> 홍수량 산정 매개변수

하천	산정지점	유역면적 (km ²)	유로연장 (km)	도달시간 (hr)	CN값 (AMC-II)
청계천	옥인동 하구	3.4	2.8	0.38	70
	경복궁 하구	2.0	3.2	0.44	63
	수표교	0.7	1.1	0.15	76
	장통교	1.6	1.8	0.26	75
	창덕궁 하구	2.8	2.9	0.40	74
	효경교 하류	0.4	1.1	0.15	78
	하랑교	0.8	1.9	0.26	73
	태평교 상류	1.2	2.3	0.31	72
	오간수문 상류	1.1	2.5	0.35	70
	오간수문	2.6	3.3	0.46	76

3) Huff의 시간분포 및 Random Cascade 시간분포를 이용한 과거 청계천유역 극한홍수량 산정

<표 5> 홍수량 산정 결과

소유역 구분	유역면적 (km ²)	과거 강우시간분포별 홍수량(m ³ /s)							
		1828년 (202mm 강우 - 24시간)				1885년 (392mm 강우 - 24시간)			
		Huff 2분위	Random Cascade			Huff 2분위	Random Cascade		
		Min.	Avg.	Max.		Min.	Avg.	Max.	
1	3.4	11.2	9.8	16.8	32.4	28.3	21.1	38.5	68.0
2	2.0	5.7	5.2	8.4	16.5	15.8	11.8	21.4	37.3
3	0.7	2.5	2.5	4.8	9.9	6.0	5.2	9.9	19.6
4	1.6	5.7	5.0	8.9	17.4	13.4	10.5	19.3	35.0
5	0.5	1.8	1.7	3.4	7.0	4.2	3.6	6.9	13.7
6	1.6	6.4	5.4	9.8	18.4	14.5	11.1	20.3	36.2
7	0.5	1.8	1.7	3.1	6.3	4.1	3.4	6.5	12.4
8	0.8	3.2	2.7	5.0	9.5	7.0	5.5	10.1	18.3
9	0.6	2.1	2.0	3.9	8.2	4.9	4.3	8.3	16.5
10	0.1	0.3	0.3	0.5	1.1	0.6	0.5	1.1	2.1
11	1.2	4.6	4.1	7.3	14.4	10.7	8.5	15.7	28.8
12	2.2	7.9	6.8	11.9	22.7	18.7	14.4	26.2	46.3
13	0.2	0.8	0.7	1.4	3.0	1.8	1.6	3.1	6.1
14	0.1	0.4	0.4	0.7	1.6	0.9	0.8	1.6	3.2
15	1.1	3.8	3.4	5.9	11.7	9.1	7.2	13.2	24.0
소유역	16.6	54.1	47.5	81.6	160.2	128.5	100.6	181.1	324.2

본 연구에서 사용된 강우량은 극치수문사상을 반영하기 위하여 과거 측우기 일우량 가운데 200mm 이상의 강우로 한정하였다. 그리고 과거 청계천 유역의 최종 출구점인 오간수문 지점을 기준으로

Huff의 시간분포와 일강우량을 고해상도로 시간분포시키기 위해 Random Cascade 모형을 이용하여 각각의 빈도별 홍수량을 산정하였다.

먼저 측우기 우량중에서 과거 일 최대강우량이었던 392mm (1885.07.16)의 호우사상을 강우지속기간이 24시간이라는 기본 가정하에 청계천복원 타당성 조사 및 기본계획 보고서를 토대로 Huff의 2분위로 시간분포를 시켰다. 측우기 일 최대강우량인 392mm와 가장 작은 극치값과 비교하기 위하여 1828년 7월 4일의 202mm의 호우사상에 대하여 상기의 조건과 동일하게 적용하여 홍수량을 산정하였다.

Random Cascade 모형으로 시간분포를 시켜 총 50여 개 Case에 대하여 Huff의 시간분포와 마찬가지로 392mm (1885.07.16)와 202mm (1828.07.04)에 대하여 홍수량을 모의하였다.

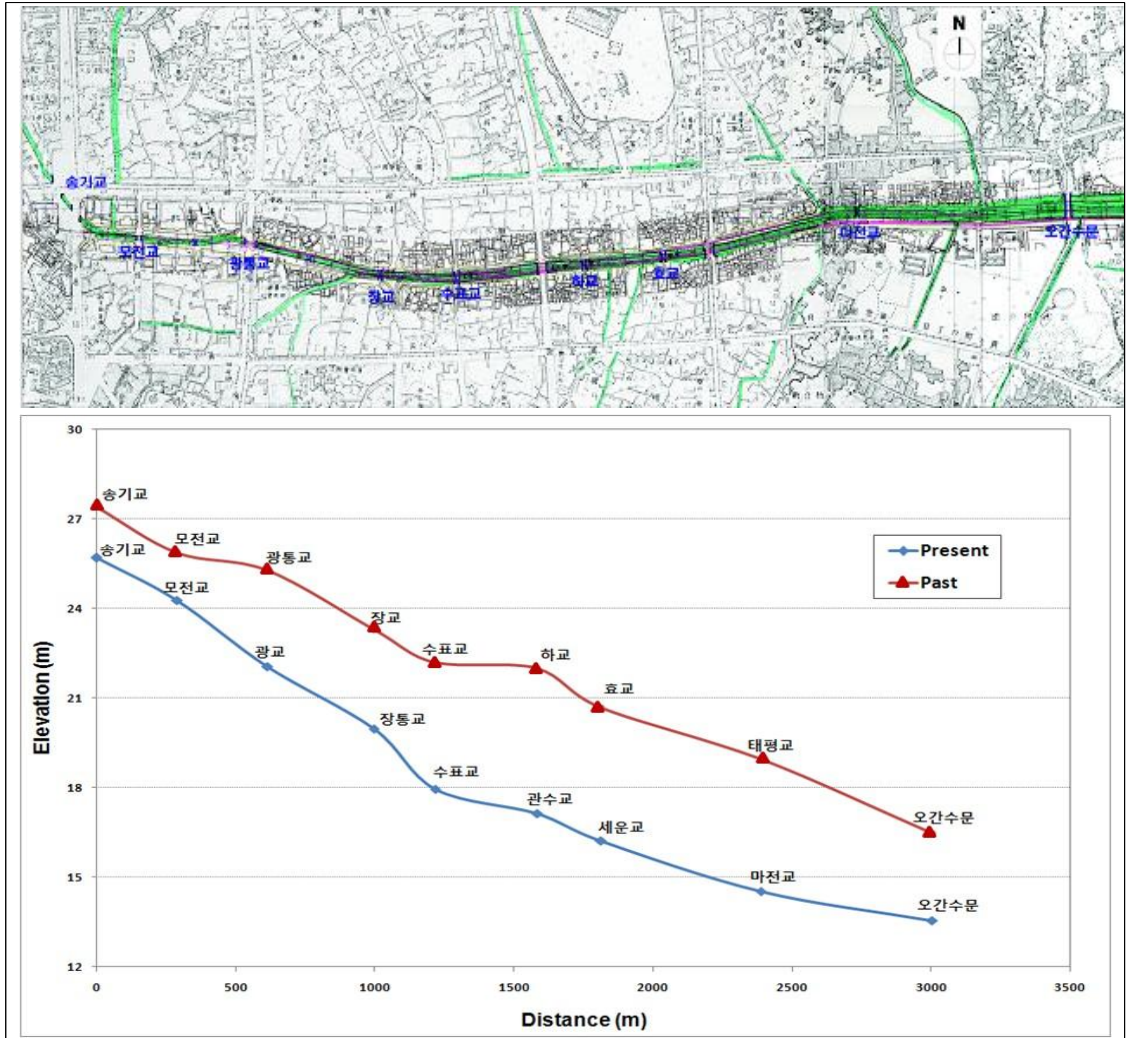
<표 5>는 과거 측우기 일 최대우량 392 mm(1885년 7월 16일), 극치값이 가장 적은 일 강우량 202 mm(1828년 7월 4일)에 대한 Huff의 강우지속기간 24시간 시간분포 및 Random Cascade 분포형에 의한 각 소유역별 홍수량 산정 결과이다.

IV. 극치호우사상에 대한 홍수범람 해석

1. HEC-RAS를 이용한 홍수위 분석

1) 과거 청계천 본류구간 하천 중·횡단면 추정

본 연구에서는 청계천 개수계획평면중단도(1936년, 경성부), 준천사실(1760년), 동국여지비고(1870년), 조선지형도집성(1921), 청계천 유물 발굴조사보고서(2006)의 하천 중·횡단도 자료를 이용하여 단면을 추정하였다. 단면 추정은 청계천 본류구간의 주요 다리가 위치하였던 지점으로 오간수교를 포함한 상류의 총 8개 지점에 대해 수행하였다.



<그림 8> 청계천 본류구간의 현재 및 과거의 하천종단 비교

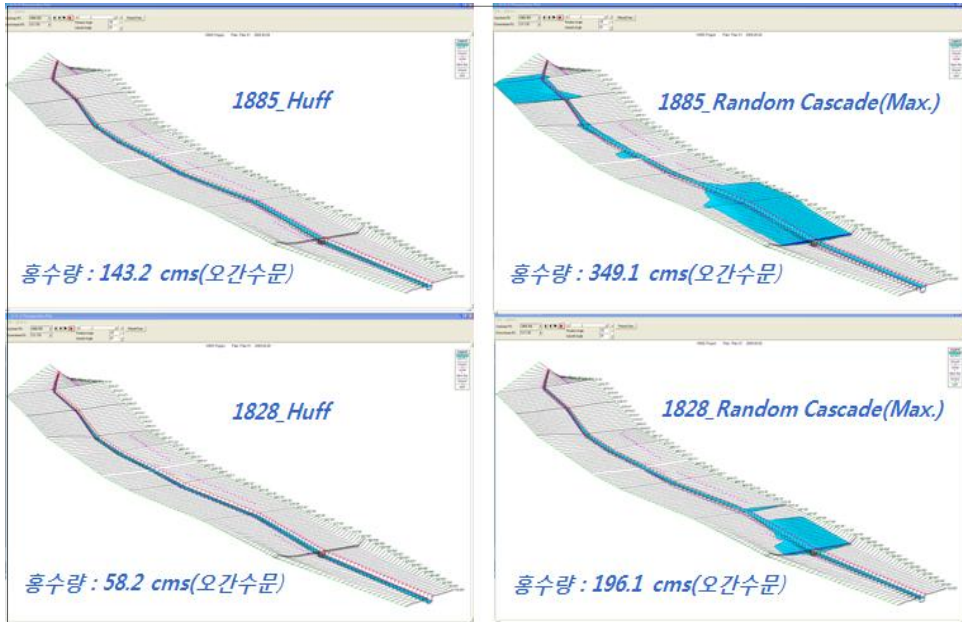
2) 과거 청계천 조도계수 추정

조도계수는 하천 본류구간의 경우는 하천설계기준에서 제시한 값을 사용하였으며, 그림 7에 대해 각 토지피복유형별 조도계수는 FLO-2D User's Manual의 Overland Flow Manning's Roughness Value 를 사용하여 하도 및 범람구역의 조도계수를 산정하였다.

3) HEC-RAS를 이용한 홍수위 산정

HEC-RAS 모의를 위해 총 8개 사상의 홍수량을 입력하였다. 먼저, Huff의 4분위법으로 분해된 392

mm, 202mm의 강우를 이용하여 산정된 1885년과 1828년의 홍수량을 모의에 사용하였다. 두 번째로 1885년, 1828년의 Random Cascade 모형에 의한 각 Case 별 홍수량 중 최대, 최저, 평균 홍수량을 이용하였다.

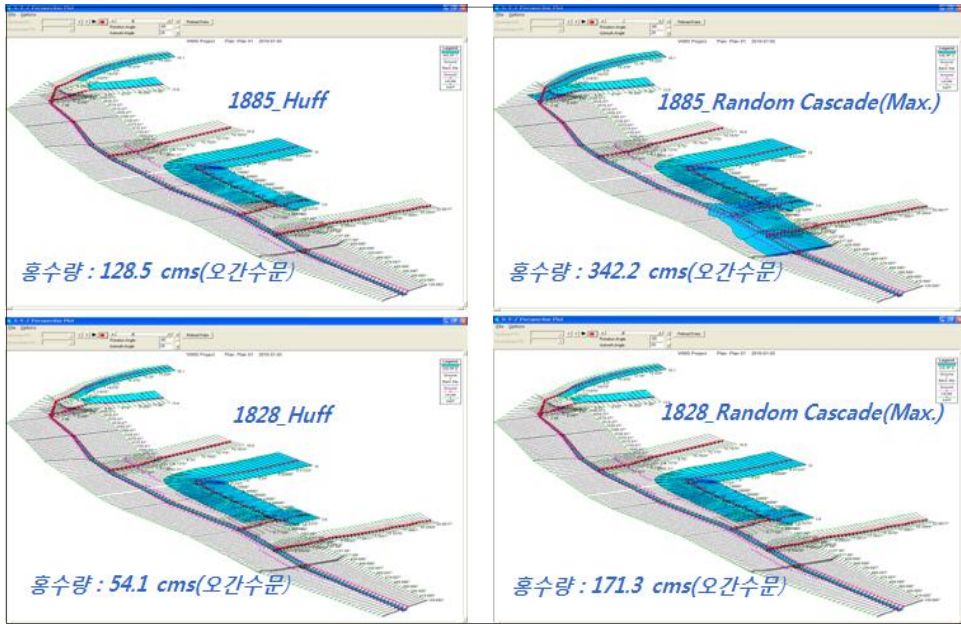


<그림 9> 청계천 본류 구간에 대한 HEC-RAS 모의 결과

HEC-RAS를 이용하여 본류 구간에 대하여 각 홍수사상별 홍수위를 산정한 결과를 살펴보면, Huff 시간분포에 의한 1885년, 1828년 홍수량은 유역경계의 출구점인 오간수문 지점에서 각각 143.2 m³/s(1885), 58.2 m³/s(1828)로 월류가 거의 발생하지 않는 것으로 모의되었다.

이와는 다르게 Random Cascade 방법에 의한 시간분포시 1885년에서의 최대홍수량은 349.1 m³/s로 수표교 일부구간과 주변 지류가 합류하는 태평교 부분에서부터 월류가 발생하였으며 1882년에서의 최대 홍수량은 196.1 m³/s로 태평교 하류 지점부터 오간수문 상류까지 월류가 발생하는 것으로 모의가 되었다.

이상과 같이 과거 단면자료를 추정하여 홍수위를 산정한 결과, 약 190 m³/s 이상의 홍수량이 발생할 경우 청계천의 일부 구간에 홍수범람의 피해가 발생하였을 것으로 판단된다.



<그림 10> 청계천 본류 및 지류 구간에 대한 HEC-RAS 모의 결과

보다 정확한 범람양상을 모의하기 위하여 청계천의 본류구간과 함께 백운동천, 중학천, 원동천, 북영천, 흥덕동천 등의 지류구간에 대한 단면을 구성하여 본류 구간과 마찬가지로 8개 사상의 홍수량에 대하여 HEC-RAS를 이용하여 모의하였으며 모의 결과는 <그림 10>과 같다.

HEC-RAS를 이용하여 지류를 포함한 청계천 유역의 각 홍수사상별 홍수위를 산정한 결과를 살펴보면, Huff 시간분포에 의한 1885년, 1828년 홍수량은 유역경계의 출구점인 오간수문 지점에서 각각 128.5 m³/s(1885), 54.1 m³/s(1828)로 청계천 본류구간에는 월류가 거의 발생하지 않는 것으로 모의되었다. 하지만 중학천과 북영천과 같이 일부 지류 구간에서는 범람이 발생하였다. 또한, Random Cascade 방법으로 구한 1828년의 최대홍수량은 171.3 m³/s로 본류 구간이 월류가 발생하지 않는 것에 비해 주변 지류들에서는 월류가 발생하였다.

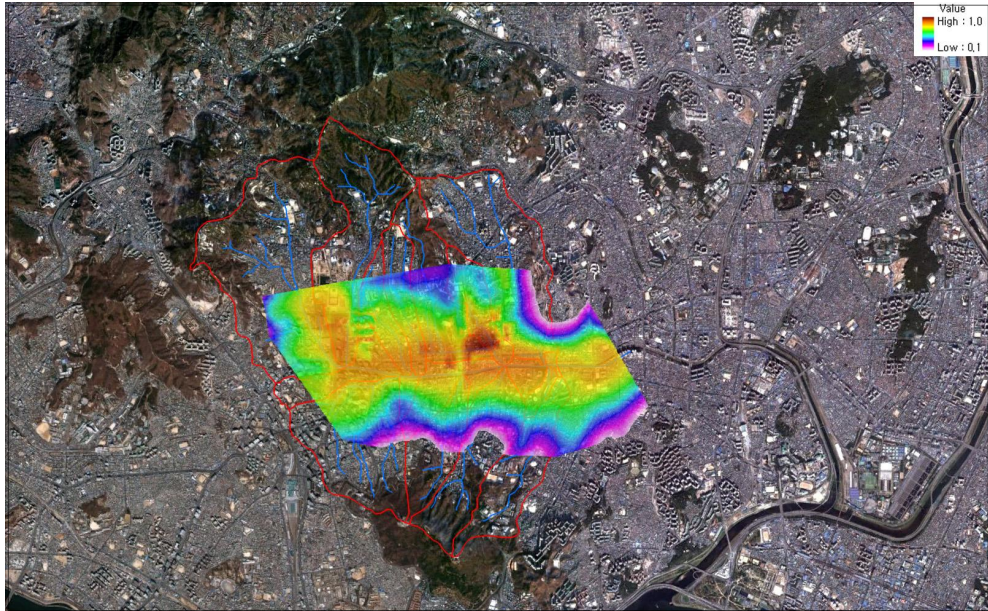
이와는 다르게 Random Cascade 방법에 의한 1885년의 최대홍수량은 오간수문을 기점으로 342.2 m³/s로 주변 지류와 함께 청계천 본류구간에서도 수표교부터 오간수문까지 범람이 확대되는 것으로 모의되었다.

이상 홍수위를 분석한 결과, 청계천 본류 구간에 대한 범람 모의시 190 m³/s 이상에서 월류가 발생한 것과는 달리 지류 구간을 포함하여 범람을 모의할 경우에는 340 m³/s 이상에서만 본류구간에 월류가 발생하는 것으로 모의되었다.

2. DEM을 이용한 청계천 유역의 홍수범람해석

HEC-RAS에서 산정된 홍수위를 과거 역사기록 상의 피해기록과 비교·분석하기 위하여 수치고도모

형(DEM)을 이용하여 공간적 피해규모를 평가하고자 하였다. 즉, HEC-RAS와 수치고도모형을 연계 모의하여 청계천 유역의 홍수범람구역의 공간적 분포를 도출하고자 한 것이다.



<그림 11> DEM을 이용한 청계천 본류 및 인접 지류의 홍수 범람 구역

<그림 11>은 HEC-RAS 모의에서 사용한 총 8개의 홍수사상중 392mm 일강우에 대하여 Random Cascade 방법으로 시간분포시켜 구한 342.2 m³/s에 대하여 산정된 홍수위와 수치고도모형의 지형자료를 토대로 모의된 침수심에 따른 범람양상을 나타내고 있으며, 홍수량, 침수심 범위, 침수면적을 <표 6>에서 확인할 수 있다.

<표 6> 청계천 본류 및 지류 홍수범람구역 산정결과 비교

홍수사상		홍수량(m ³ /s)	침수심 범위(m)	침수면적(km ²)
	시간분포(24hr)			
청계천 본류	Random Cascade - Max.	194.6	0.6 ~ 0.7	0.45
		194.6	0.7 ~ 0.8	0.7
		194.6	0.8 ~ 0.9	1.64
		194.6	0.9 ~ 1.0	1.96
청계천 본류 및 인접지류	Random Cascade - Max.	342.2	0.6 ~ 0.7	1.39
		342.2	0.7 ~ 0.8	0.61
		342.2	0.8 ~ 0.9	3.43
		342.2	0.9 ~ 1.0	0.26

이러한 모의결과를 토대로 실제 과거 청계천에서 발생한 극한홍수 피해기록과 비교·분석을 수행하였다. 이러한 이유는 실제 관측했던 측우기 우량에 기초하여 산정된 극한홍수량에 의한 범람 모의가

실제 조선왕조실록이나 승정원일기 등과 같은 역사기록물에 적힌 피해기록과 비교하는 것을 통해 극한홍수량 및 측우기를 통해 기록된 극한호우사상을 검증할 수 있기 때문이다.

서울시립대학교 부설연구소인 서울학연구소에서 1995년에 여러 역사문헌 자료를 토대로 1894년의 서울의 모습을 모형으로 제작한 ‘100년전 서울의 옛모습’을 활용하여 홍수 범람 구역과 비교하였다. 이는 과거 청계천 인근의 토지이용 상태뿐만 아니라 주거지의 배치상태 등 과거 청계천의 실제 모습에 대한 자료가 요구되기 때문이다. 홍수범람구역에 의한 가옥 피해의 규모를 ‘100년전 서울의 옛모습’과 비교하여 산정하였다.

그 결과 <그림 11> 같은 경우 가옥피해 규모는 침수심이 0.4~1.0m일 때 약 2,800가구 정도로 분석되었다.

실제 조선왕조실록에는 측우기에 의해 관측된 일강우량이 200mm 이상일 경우에 도성지역에서 발생했던 홍수피해 기록을 구체적으로 기록하고 있다. 특히, 1832년 7월 19일에는 348mm의 집중호우로 도성내의 다섯 고을에서 3천 1백 66호의 민가가 피해를 입었으며, 죽은 사람도 64명이나 되었다고 한다. 1816년 7월 10일과 11일 양일간에 걸쳐서 내린 464mm의 비에 오부(五部)의 전후에 무너진 집이 3천 6백 88호나 되었다고 하며, 이는 <표 7>과 같다.

<표 7> 조선왕조실록의 홍수피해 기록

일자	측우기 일강우량 (mm)	조선왕조실록의 홍수피해 기록
1885/07/16	392.0	520 호 유실
1832/07/19	348.4	3,166 호 유실, 64명 익사 (서울)
7/05 ~ 7/31	1,395.3	10,836호 유실, 357명 익사 (전국)
1865/08/30	345.4	1,322 호 유실, 익사자 다수
1833/08/17	337.5	1,218 호 유실
1851/09/05	281.1	가옥 파괴 다수
1816/07/10	240.1	1816/07/11 에 피해 기록
1792/07/01	236.8	가옥 파괴 다수
1816/07/11	224.0	3,688 호 유실
1888/07/08	216.8	기록 없음
1875/08/28	214.5	가옥 파괴 다수

마찬가지로 최대홍수량인 1885년의 342.2 m³/s의 경우 도성내 전체 침수면적 5.69 km²에 대한 가옥피해 규모는 약 1290가구로 분석되었고 본 연구에서 분석한 1885년 7월 16일 홍수사상에 대해서는 총 520호의 가옥이 유실되었다고 기록되었다. 조선왕조실록의 피해기록과 모의 결과를 비교한 결과 약 2.5배의 차이가 발생하였다. 하지만 이는 가옥의 침수(沈水)와 유실(流失)의 구분 때문이다. 조선왕조실록에는 유실에 대한 기록만 있기 때문에 침수에 대한 피해를 명확히 하기는 어렵다. 특히, 가옥이라 하더라도 한옥과 초가집의 건축방식이 다르기 때문에 실질적인 피해양상이 다른 점을 고려한다면 광범위한 0.8m이상의 침수면적이 광범위하다고 하더라도 실제로는 청계천 양안에 피해가 집중되었을 것으로 판단된다. 따라서 피해가 집중되는 것으로 모의된 오간수문 상류와 수표교 일대에 대해 추산하면 약 670여가구가 0.8m 이상의 침수를 입는 것으로 모의되었으므로 조선왕조실록의 기록과 비교하였

을 때, 적정 모의 범위로 볼 수 있을 것으로 판단된다.

<표 8> 침수면적별 가옥피해 규모 산정결과

홍수사상			침수심 범위(m)	침수면적(km ²)	가옥피해
	시간분포(24hr)	홍수량(m ³ /s)			
청계천 본류	Random Cascade Max.	194.6	0.6 ~ 0.7	0.45	60가구
		194.6	0.7 ~ 0.8	0.7	180가구
		194.6	0.8 ~ 0.9	1.64	240가구
		194.6	0.9 ~ 1.0	1.96	580가구
청계천 본류 및 인접지류	Random Cascade Max.	342.2	0.6 ~ 0.7	1.39	180가구
		342.2	0.7 ~ 0.8	0.61	190가구
		342.2	0.8 ~ 0.9	3.43	590가구
		342.2	0.9 ~ 1.0	0.26	80가구

V. 결론

본 연구에서는 선행연구에서 구축된 극치호우사상을 과거 조선시대 청계천 유역에 적용하여 홍수량 산정을 하였고, 이를 하천수리모형인 HEC-RAS 모형을 이용하여 조선시대 청계천 본류구간 및 지류 구간에 대하여 각 홍수사상별 홍수위를 산정하였다.

이렇게 산정된 홍수위를 과거 역사기록 상의 피해기록과 비교·분석하기 위하여 수치고도모형(DEM)을 활용하여 공간적 피해규모를 평가하고자 하였다. 실측 자료가 없는 청계천 유역에 대하여 HEC-RAS 입력자료를 구성하기 위하여 역사문헌 및 근대의 기록물을 활용하였다. 총 8개 사상의 홍수사상을 사용하였으며, Huff의 시간분포로 분해된 392mm, 202mm의 일강우에 대하여 1885년/1882년의 홍수량을 산정하여 모의하였다. 다음으로 1885년/1882년의 Random Cascade 모형에 의한 각 Case 별 홍수량 중에서 최대, 최저, 평균 홍수량을 이용하였다. 이처럼 청계천 유역에 대하여 산정된 홍수위를 수치고도모형(DEM)과 연계하여 홍수범람구역을 산정하였으며 이를 서울학연구소에서 제작한 ‘100년전 서울의 옛모습’의 가옥규모를 통해 실제 피해규모와 비교하였다.

모의 결과와 조선왕조실록의 기록과 비교하였을 때 적정 모의 범위로 판단되며, 따라서 과거 측우기 기록을 이용하여 추정된 극치호우사상에 의한 확률강우량 또한 합리적인 수준이라고 판단된다.

이상의 본 연구는 이상기후에 대비한 시설기준 강화를 위해 수행되었으며, 측우기의 자료 기간을 포함하여 자료기간을 확대하였을 때 산정된 확률강우량과 이를 검증하고자 한 것이다. 그 결과, 측우기 기록을 활용한 극치호우사상의 추정이 과거 청계천 유역에 대한 홍수범람해석과 실록에 기록된 피해양상이 유사하다는 점에 비춰볼 때 향후 설계기준 변경 시, 사회구성원의 합의를 이끌어내는데 기초자료로 활용될 수 있으며, 비정기적 역사자료가 포함된 확률강우량을 설계기준의 참고자료로 이용되는 것도 가능하다.

참고문헌

- 김대하, 유철상, 김현준. 2007. 조선왕조실록 및 측우기 기록에 나타난 주요 호우사상의 평가: 2. 정량적 평가. 한국수자원학회논문집. 40(7): 545-554.
- 김현준. 2000a 조선왕조실록에 수록된 홍수기록 조사. 한국수자원학회논문집. 33(1): 365-370.
- 서울특별시. 2004. 대학과 연계한 하천관리에 대한 연구.
- 서울특별시. 2005. 서울시 복개하천 복원 타당성 조사연구.
- 서울특별시. 2003. 청계천의 역사와 문화.
- 서울특별시사편찬위원회. 2000. 서울의 하천.
- 서울역사박물관. 2006. 서울발굴유물특별전 - 청계천.
- 서울학연구소. 1995. 서울의 옛모습(사진과 모형으로 보는 100년 전의 서울).
- 시정개발연구원. 2003. 청계천복원 타당성조사 및 기본계획 보고서.
- 서울역사박물관. 2006. 서울발굴유물특별전 - 청계천.
- 유철상. 2000. 서울지점 연강수량 자료에 나타난 장기 건조기의 재현 가능성에 관한 고찰. 한국수자원학회논문집. 33(5): 519-526.
- 유철상, 김대하, 김현준. 2007. 조선왕조실록 및 측우기 기록에 나타난 주요 호우사상의 평가: 1. 정성적 평가. 한국수자원학회 논문집. 40(7): 533-543.
- 유철상, 박민규. 2008. 측우기자료의 연최대 호우사상 구축에 관한 연구. 한국수자원학회 학술발표회논문집.
- 윤경호. 2009. 역사기록을 이용한 청계천의 홍수범람해석. 한국수자원학회 학술발표회논문집.
- 전종갑, 문병권. 1997. 측우기 강우량 자료의 복원과 분석. 한국기상학회지. 33(4): 691-707.
- 정현숙. 1999. 서울지역 강수량의 시계열에 나타난 시간 변동성의 해석. 서울대학교 대학원 박사학위논문.
- 조신섭, 이정형, 김병수. 1996. 시계열 모형을 이용한 측우기 자료의 분석. 응용통계연구. 9(2): 25-43.
- 한국수자원학회. 2003. 청계천복원 건설공사 수리 및 수치모형실험 보고서.
- 朝鮮總督府. 1923, 1935. 朝鮮の河川.
- 朝鮮總督府. 1926. 朝鮮ノ洪水.
- 朝鮮總督府. 1928. 朝鮮の災害.
- 朝鮮總督府. 1929. 朝鮮河川調査書.
- 朝鮮總督府. 1930~1938. 朝鮮河川調査年報.
- 朝鮮總督府. 1930, 1933, 1938. 朝鮮風水害誌.

- 朝鮮總督府. 1936. 朝鮮の洪水.
- 和田雄治. 1911. 朝鮮古代觀測記錄調査報告書.
- Arnold, B. C. and D. Strauss. 1988. Bivariate Distributions with Exponential Conditionals. *Journal of the American Statistical Association*. 83(402): 522-527.
- Bacchi, B., G. Becciu, and N. T. Kottegoga. 1994. Bivariate Exponential Model Applied to Intensities and Durations of Extreme Rainfall. *Journal of Hydrology*. 155(1): 225-236.
- Coles, S. and J. A. Tawn. 1991. Modelling Extreme Multivariate Events. *Journal of the Royal Statistical Society Series B*. 53(2): 377-392.
- Ekstrom, M., H. J. Fowler, C. G. Kilsby, and P. D. Jones. 2005. New Estimates of Future Changes in Extreme Rainfall across the UK using Regional Climate Model Integrations 2. Future Estimates and Use in Impact Studies. *Journal of Hydrology*. 300(1): 234-251.
- Fowler, H. J., M. Ekstrom, C. G. Kilsby, and P. D. Jones. 2005. New Estimates of Future Changes in Extreme Rainfall across the UK Using Regional Climate Model Integrations. 1. Assesment of Control Climate. *Journal of Hydrology*. 300(1): 212-233.
- Grimaldi, S. and F. Serinaldi. 2006 Asymmetric Copula in Multivairate Flood Frequency Analysis. *Advances in Water Resources*. 29(8): 1155-1167.
- Jung, H. S., G. H. Lim, and J. H. Oh, 2001. Interpretation of the Transient Variations in the Time Series of Precipitation Amounts in Seoul, Korea: Part 1. Diurnal Yariation. *Journal of Climate*. 14(13): 2989-3004.
- Kurothe, R. S., N. K. Goel, and B. S. Mathur. 1997. Derived Flood Frequency Distribution of Negatively Correlated Rainfall Intensity and Duration. *Water Resources Research*, 33(9): 2103-2107.
- Restrepo-Posada, P. J. and P. S. Eagleson. 1982. Identification of Independent Rainstorms. *Journal of Hydrology*. 55(1): 303-319.
- Yoo, C. 2006. Long-term Analysis of Wet and Dry Years in Seoul, Korea. *Journal of Hydrology*. 318(1): 24-36.

윤경호: 연세대학교에서 토목공학 석사학위를 받고(논문: 확률강우량의 경년변화에 따른 홍수위 변동분석. 2009년 8월), 현재 국립재난안전연구원 연구원으로 재직 중이다. 국가기반체계, 재난대비, 위험관리, 위험분석이 주요 관심분야이며, 주요 논문으로는 “국가기반시설 재난관리 현황분석(2014)” 등이 있다(luipen@naver.com).

김현준: 서울대학교에서 농업토목공학 박사학위를 받고(논문: 2매개변수 쌍곡선형 일유출 모형의 개발. 2001년 8월), 현재 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 소장으로서 재직 중이다. 유출모형, 물수지 등 지속적인 수자원 개발 관련 분야가 주요 관심분야이며, 주요 논문으로는 “통합 도시 침수 해석 모형을 이용한 사당천 유역 홍수 모의(2014)” 등이 있다(hukim@kict.re.kr).