

An Estimation of the Design Flood based on the 2017 Mushim River Flood in Cheongju

Hyung Joon Chang^{1#}, Ho Jin Lee¹, Myung Gyu Hwang¹, Ho Kwon Cheon², Hyo Sang Lee¹⁺

¹ School of Civil Engineering, Chungbuk National University, 1 Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do 28644, Korea

² Isan corporation, 121 Burim-ro, Dongan-gu, Anyang-si, Gyeonggi-do 14066, Korea

Abstract

This study aims to evaluate the effect of the 2017 flood on design flood estimation at Mushim River in Cheongju. The design floods were estimated in two cases (CASE 1 and CASE 2) and compared to each other using hydrological data from 1967 to 2016 and 1967 to 2017, respectively. The FARD model was used to estimate the probable rainfall, and the HEC-HMS model was calibrated based on 15 flood events. All calibrated parameter sets were applied to the two cases to estimate the design flood. The range of the design flood was estimated from 364.9 to 1,231.6 m³/s for Case 1, while from 431.0 to 1,455.0 m³/s for CASE 2. The finding that the design flood of CASE 2 was approximately 18% greater than that of CASE 1 indicates that the flood event on July 16th, 2017 increased the design flood in this river by 66.1 ~ 412.4 m³/s. The observed peak discharge on July 16th 2017 (1,028.5 m³/s) was below the current target design flood (1,355 m³/s) but the maximum estimated design flood in CASE 2 was greater than the current target, which confirmed an increase of flood risk.

Key words: rainfall-runoff model, calibrated parameter, Mushim river, design flood

1. 서론

급증하는 이상기후로 인하여 집중호우, 태풍, 가뭄 등의 자연재해에 의한 피해가 증가하고 있다. 또한, 도시화로 인하여 인적 및 물적 피해의 규모는 과거와 비교하여 크게 증가하였다. 이러한 피해를 방지하기 위하여 수방 구조물 등의 설치가 필요하며, 이를 위하여 보다 정확한 설계홍수량의 산정이 필요하다.

설계홍수량은 각국의 독특한 수문조건 및 과거 관측 자료를 반영하여 다양한 방법으로 산정 및 적용된다. 설계홍수량 산정 방법은 크게 최적치 개념과 최대치 개념으로 구분할 수 있다. 최대치 개념은 사회·경제적 측면 보다는 설계 안전도를 최대로 고려하는 것을 의미하며, 자연에서 발생할 수 있는 최대 홍수량을 산정하여 설계홍수량으로 적용한다. 최적치 개념은 사회·경제적 측면을 고려하여 산정된 특정 빈도의 확률홍수량

The 1st author: Hyung Joon Chang, Tel. +82-43-272-0312, Fax. +82-43-275-2377, e-mail. hyungjoonchang@chungbuk.ac.kr

+ Corresponding author: Hyo Sang Lee, Tel. +82-43-272-0312, e-mail. hyosanglee@chungbuk.ac.kr

을 설계홍수량으로 적용한다.

우리나라, 미국 및 영국 등에서는 최적치 개념을 적용하여 빈도별 설계홍수량을 산정하고 있으며, 일본 등에서는 해당 유역에서 경험적 최대치를 적용하는 최대치 개념을 적용하고 있다.

설계홍수량은 관측 유량 자료를 바탕으로 빈도 해석을 통하여 산정하는 것이 일반적이지만, 우리나라는 관측 유량 자료의 부족으로 정확한 설계홍수량 산정이 어려운 실정이다. 이에 우리나라는 관측 강우 자료를 바탕으로 확률강우량을 우선적으로 산정하고, 확률강우량을 강우-유출모형에 적용하여 홍수량을 산정하는 방법을 채택하고 있다. 확률강우량은 FARD(Frequency Analysis of Rainfall Data) 모형을 활용한 강우 빈도 해석을 통하여 산정되며, 설계홍수량은 강우-유출모형인 HEC-HMS(Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) 모형(Clark 단위도법 및 Muskingum 방법)을 적용하여 산정되고 있다(MLTMA, 2012).

최근 우리나라에서 발생한 극심한 호우 사상은 설계홍수량 산정에 큰 영향을 미치고 있으며, 2002년 태풍 루사, 2011년 수도권지역의 집중호우 및 2017년 청주지역의 집중호우가 대표적이다. 2002년 8월에 발생한 태풍 루사는 강릉에서는 일 최대강우량 870.5 mm를 기록하는 등 많은 피해를 야기하였다(NEMA, 2012).

2017년 7월 16일에는 충청북도 청주지역에 시간당 최대 91.8 mm, 일 최대강우량 290.2 mm를 기록한 집중호우가 발생하였다. 특히 청주 무심천에서는 계획빈도 100년을 초과하는 강우로 인하여 가경천, 석남천이 범람하고, 서청주 IC 부근에서 침수가 발생하였다. 이로 인하여, 충청북도에서만 5명이 사망하고, 2,539명의 이재민이 발생하는 등 인명피해가 발생하였다(Chungcheongbuk-do, 2017).

위와 같이 최근 우리나라에서 집중호우, 태풍 등의 극한홍수사상의 발생횟수가 증가하고 있으며, 발생한 집중호우의 특성을 분석하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. Kim, *et. al.*(2002)은 2002년 강원도 지역을 대상으로 태풍루사로 인한 강우량을 기존에 제시된

PMP(Probable Maximum Precipitation)도의 추정값과 비교하였다. 그 결과, 지속기간 12시간 ~ 48시간에 대해서는 태풍 루사를 분석하여 산정한 PMP가 기존의 PMP 보다 크게 나타남을 확인하였다. Moon & Yoon(2010)은 2010년 9월 서울에서 발생한 국지성 집중호우를 분석하였다. 강서구에서는 지속기간 1, 2, 3 및 4시간에 대한 관측 강우량이 각각 50, 200, 200 및 100년 빈도를 초과하였으며, 이와 같은 높은 빈도의 홍수사상이 홍수의 주된 요인이라고 판단하였다. Yoon, *et. al.*(2011)은 2011년 7월 26일에 발생한 집중호우의 홍수 특성을 분석하였다. 그 결과, 한강 하류 구간이 중류 구간보다 수위가 일찍 상승함을 확인하였으며, 원인으로는 하류 구간에서 발생한 국지성 호우인 것으로 분석하였다. 이를 통하여 하천기본계획 수립 시 국지적인 홍수사상의 발생으로 인한 지류 하천의 홍수량이 계획빈도를 초과하는 경우를 반영할 수 있는 연구가 필요하다고 판단하였다.

극한홍수사상에 대한 모의와 분석, 그리고 이에 대한 대비 방안에 관한 연구는 다음과 같다. Wu, *et. al.*(2013)은 중국의 주장강을 대상으로 1951년부터 2010년까지 23개 관측소의 수문자료를 활용하여 극한 홍수사상을 분석하였다. Pearson type III 분포형을 적용하여 빈도 해석을 실시하였다. 그 결과, 1980년 이후 주장강의 극한 홍수사상이 급격히 증가하는 모습을 확인하였다. 향후 다양한 분석을 통하여 홍수량 증가의 원인을 확인하여야 하며, 그에 대한 대책 방안을 세워야 할 것으로 판단하였다. Choi, *et. al.*(2016)은 극한 홍수사상이 연속적으로 일어나는 거대 홍수사상을 가정하여 예측 불가능한 거대 홍수에 대해 모의와 분석을 수행하였다. IETD(Inter Event Time Definition)를 통하여 연속 강우의 시간 간격을 결정하여 관측 홍수사상을 연속적으로 발생시켜 평창강 유역을 대상으로 거대홍수를 모의하였다. 그 결과, 단일 홍수사상에 의한 모의 홍수량과 비교하여 연속 홍수사상에 의한 모의 홍수량이 6 ~ 17% 증가하는 것으로 확인하였다.

연구유역인 청주 무심천 유역은 1990년대 이후 급격

한 도시화를 경험하고 있다. 이 지역의 유출 특성을 분석한 대표적인 연구로는 Chang, *et. al.*(2015)이 있다. Chang, *et. al.*(2015)은 1997년, 2005년 토지이용 변화에 따른 유역 유출 특성 분석을 위하여 1990년대 및 2000년대 홍수사상을 바탕으로 HEC-HMS 모형을 구축하였다. 100년, 200년 및 500년 빈도 확률강우량을 산정하여 모형에 적용하고, 설계홍수량을 산정하였다. 분석 결과, 2000년대의 모의 결과 값이 1990년대 모의 결과 값과 비교하여 100년 빈도에서는 첨두홍수량이 3 ~ 7% 증가하였으며, 첨두홍수량이 발생한 시간은 10.2 ~ 16.0% 빨라졌다. 이러한 유출 특성 변화는 무심천 유역의 토지이용 변화(농지: 2.18% 감소, 산지: 8.88% 감소, 도시: 5.86%)가 주요한 것으로 판단하였다. 이상기후로 인한 강우특성 및 유역 수문환경 변화를 대응하기 위하여 정도 높은 설계홍수량 산정 및 홍수대책의 설계기준강화가 필요하다고 판단하였다.

본 연구에서는 2000년대 이후 청주 무심천 유역에서 발생한 15개 관측 홍수사상을 바탕으로 유역 강우-유출 모형(HEC-HMS)을 검정하며, 이의 실무 적용성을 검토하였다. 또한, 2016년 및 2017년 7월 16일까지의 관측 강우 자료를 바탕으로 100년 빈도의 설계홍수량을 각각 산정하고 비교하였다. 이를 통하여 2017년 7월 16일 홍수사상이 설계홍수량 산정에 미치는 영향을 확인하였다. 또한, 현재 무심천 유역의 하천 정비 수준을 본 연구에서 모의된 설계홍수량과 비교하여 무심천 유역의 안전관리 수준을 평가하였다.

II. 무심천 연구유역 및 홍수 수문사상

1. 무심천 연구 유역

연구 유역인 무심천은 한반도 중부 지방을 흐르는 금강의 지류하천이다. 무심천은 충청북도 청주시의 머구미 고개에서 발원하여 청주시를 관통하고, 미호천으로 유입된다. 무심천의 하류부는 충청북도청이 위치하는 도시화 지역이며, 상류부는 구 청원군의 농촌지역이다. 다음 <Figure 1>은 청주 무심천 유역도이다. 무심천 유

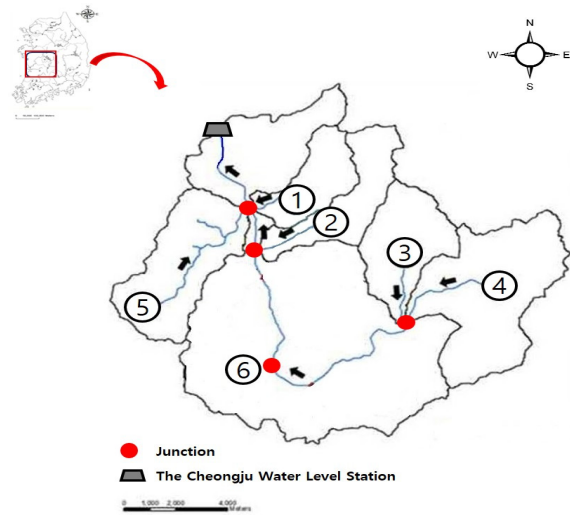


Figure 1. Study catchment of Mushim River in Cheongju

역의 면적은 청주 수위관측소(홍덕대교)를 종점으로 166.4 km²이며, 유로연장은 64 km이다. 무심천 유역의 연평균 기온은 12.8℃이고, 연평균 강우량은 1203 mm이다(Chungcheongbuk-do, 2010). 본 연구에서는 무심천 유역을 6개의 소유역으로 구분하였으며, 소유역별 기본 유역특성은 <Table 1>과 같다.

여기서, Area는 유역면적, Length는 유로연장, SCS-CN (Soil Conservation Service-Curve Number)은 유출 곡선지수, U.R.(Urbanisation Rate)은 도시화 비율이다. 특히, SCS-CN은 강우에 따른 직접유출량을 계산하기 위한 유효우량 산정에 적용되는 방법으로, 유역의 수문학적 조건 및 토양의 종류를 바탕으로 결정된다. 소유역의 면적과 유로연장은 각각 8.71 ~ 86.93 km²와 5.37 ~ 27.72 km의 분포를 보이고 있으며, 소유역 6(86.93 km², 27.72 km)이 가장 큰 면적과 유로연장을

Table 1. Catchment characteristics of subcatchments at Mushim river in Cheongju

No.	Name of stream	Area (km ²)	Length (km)	SCS-CN	U.R. (%)
①	Youngun	8.71	5.37	68.6	22.39
②	Wolun	10.87	8.85	61.6	7.08
③	Hangye	13.80	6.75	71.9	2.90
④	Mushim (sub)	27.96	14.23	77.4	3.72
⑤	Mipyeong	18.10	8.99	70.9	22.10
⑥	Mushim (main)	86.93	27.72	70.5	14.49

나타내고 있다. 소유역 1과 5는 청주시의 시가화 지역으로 상대적으로 높은 도시화 비율(22.39%, 22.10%)을 나타내고 있다. 상류의 소유역 3과 4는 유역의 대부분이 산지, 논 및 밭 등으로 구성되어, 낮은 도시화 비율(2.90%, 3.72%)을 나타내고 있다.

2. 홍수수문사상

본 연구에서는 국가 수자원관리 종합 정보시스템(www.wamis.go.kr) 및 기상청(www.kma.go.kr)에서 1967년부터 2017년까지의 관측 수문자료를 활용하였다. 유량 자료는 대상 연구 유역 내에 위치하고 있는 청주 수위관측소의 자료를 활용하였다. 청주 수위관측소는 1981년부터 관측을 실시하고 있지만, 초기 관측 자료에서 결측 및 오류가 발견되어 일 단위 관측 자료는 1987년 이후, 시 단위 관측 자료는 1994년 이후부터 수문 분석에 활용될 수 있다.

본 연구에서는 청주 무심천 유역의 수문 분석을 위하여 2000년대 이후 15개 관측 홍수사상을 수집하였으며, 다음 <Table 2>와 같다.

다음 <Figure 2>는 15개 관측 홍수사상별 홍수특성인 총 강우량(Total rainfall, mm), 총 유출량(Total runoff, mm), 최대강우강도(M.R.I. (Maximum Rainfall Intensity), mm/hr), 첨두홍수량(Peak discharge, mm/hr), 강우지속시간(Rainfall duration, hr), 지체시간(Lag time, hr), 총 잠재증발산량(T.P.E. (Total Potential Evapotranspiration), mm), 유출비(Runoff ratio, 유출/강우), 5일 선행강우(P5(Precipitation of 5days), mm/5days)을 나타내고 있다. 총 강우량과 총 유출량은 각각 41.0 ~ 303.1 mm와 9.6 ~ 138.6 mm의 넓은 범위를 보이고 있고, 최대강우강도는 홍수사상 6(46.0 mm/hr)과 15(86.2 mm/hr)를 제외한 나머지 13개 홍수사상에서 10.0 ~ 30.0 mm/hr 범위에 속하는 수치를 보이는 것을 확인하였다. 강우지속시간은 7개 홍수사상에서 10시간미만의 기록을 보이며, 유출비는 0.18 ~ 0.62의 범위를 보이고 있다. 15개 관측 홍수사상의 평균 유출비는 0.43으로 비교적 낮은 유출비를 나타내고

Table 2. 15 observed flood events since 2000 at Mushim River in Cheongju

Flood events	15 observed flood events since 2000	
	Start date	End date
1	2002-08-31	2002-09-02
2	2005-08-21	2005-08-24
3	2007-07-09	2007-07-12
4	2007-07-23	2007-07-26
5	2007-09-14	2007-09-17
6	2010-08-15	2010-08-17
7	2010-09-05	2010-09-07
8	2011-07-03	2011-07-05
9	2012-07-18	2012-07-20
10	2012-08-30	2012-09-01
11	2013-07-02	2013-07-04
12	2014-08-10	2014-08-11
13	2014-09-23	2014-09-25
14	2015-06-25	2015-06-27
15	2017-07-15	2017-07-17

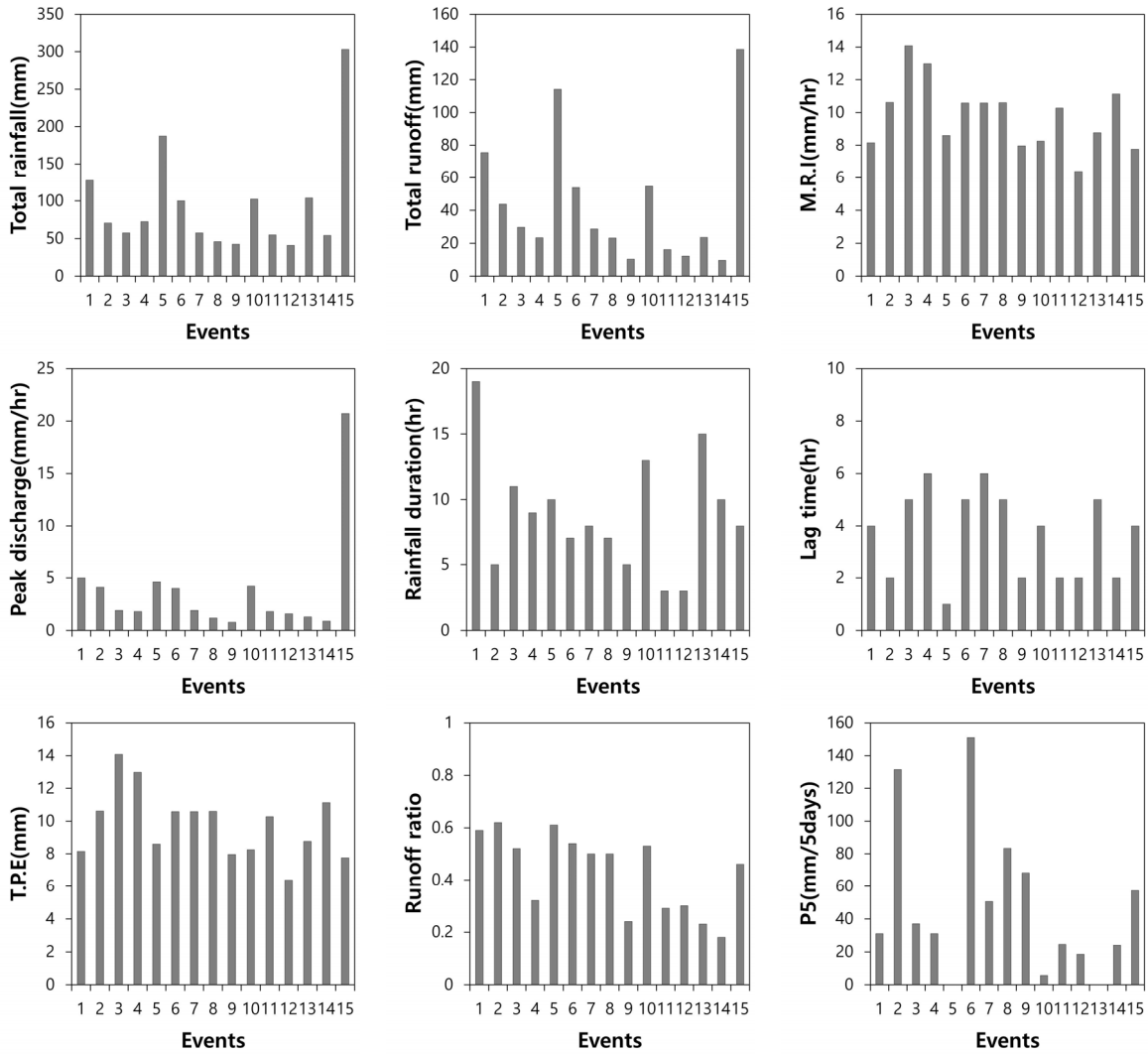
있다. 5일 선행강우는 최소 0.0 mm에서 최대 151.0 mm의 값을 보인다.

3. 2017년 7월 16일 홍수사상

2017년 7월 16일 충청북도 청주 지역에 발생한 집중호우(시간 최대 91.8 mm, 일 최대 290.2 mm)는 충청북도에서만 사망 5명, 이재민 2,539명 등의 인명피해를 발생시켰다(Chungcheongbuk-do, 2017). 다음 <Figure 3>은 2017년 7월 16일의 청주 무심천의 홍수 수문곡선이다.

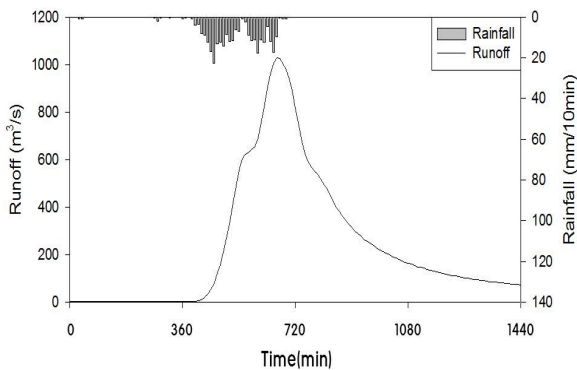
강우는 2017년 7월 16일 오전 4시 30분부터 청주지역에 관측되었으며, 오전 6시 40분에는 호우주의보가 발표되었다. 이후 청주 인근지역에서도 강우가 관측되기 시작하였으며, 오전 7시 10분에는 호우주의보가 경보로 대치되었다. 오전 9시 10분부터 20분간 소강상태에 접어들었으나, 다시 고강도의 강우가 발생하였고, 오전 11시까지 시간 당 최대 91.8 mm(임의시간)의 집중호우가 발생하였다.

2017년 7월 16일 관측 홍수사상의 강우특성은 다음 <Table 3>과 같다. 해당 홍수사상이 발생하기 이전에 5일 선행강우가 57.3 mm로 관측되었다. 이를 통하여 무심천 유역의 토양이 평소보다 비교적 습윤한 상태였



※ Source: Total rainfall, maximum rainfall intensity and P5 data from KMA(2017)

Figure 2. Flood characteristics of 15 observed flood events since 2000 at Mushim River in Cheongju



※ Source: Data from KMA(2017) and ME(2017)

Figure 3. Flood hydrograph on 16th July 2017 at Mushim River in Cheongju

을 것으로 판단되며, 유출비(총 유출량/총 강우량)는 0.5로 나타나고 있다.

Table 3. Flood characteristics of the flood event on 16th July 2017 at Mushim River in Cheongju(2017.7.15.~2017.7.17.)

Name	Data
Total rainfall(mm)	303.1
Total runoff(mm)	138.6
Maximum rainfall intensity(mm/hr)	86.2
Peak discharge(mm/hr)	20.7
Rainfall duration(hr)	8
Lag time(hr)	4
Total potential evapotranspiration(mm)	7.8
Runoff ratio	0.5
P5(mm/5day)	57.3
Observed highest water level(El,m)	41.95

III. 유역 유출 분석 모형

본 연구에서는 유역의 강우 빈도 해석 모형과 강우-유출 모형으로 각각 FARD와 HEC-HMS 모형을 적용하였다. FARD 모형을 활용하여 빈도별(100, 200, 500년) 확률강우량을 산정하였으며, 2017년 7월 16일 홍수사상을 포함한 2000년대 이후 관측 15개 홍수사상을 바탕으로 HEC-HMS 모형을 활용하여 검정하였다. 이를 통하여 다양한 경우의 설계홍수량이 산정 및 분석하였다.

1. 확률설계강우량 산정 - FARD

FARD는 2006년 국립재난안전연구원에서 개발한 모형으로, 우리나라의 설계실무에서 널리 활용되고 있는 모형이다. 이 모형은 강우의 발생빈도를 확률론적으로 해석하고, 이를 예비해석, 확률분포 모형, 매개변수 추정, 매개변수 적합성 검토, 적합도 검정, 최적 확률분포형 선정 등의 절차를 통하여 빈도별 확률강우량을 산정하였다. 특히, 확률분포 모형의 매개변수 추정은 비교적 상대오차가 작고, 자료수가 적은 경우에 적합한 확률가중모멘트법을 활용하였다. 또한, 최적 확률분포형은 수자원 계획의 안정성 등을 고려하여 Gumbel 분포를 적용하였다(MLTMA, 20112). FARD 모형을 활용한 강우빈도 해석의 일반적인 절차 및 추가적인 설명은 「설계홍수량 산정요령」(2012)을 참고한다.

2. HEC-HMS 모형: Clark 단위도법 및 Muskingum 방법

HEC-HMS 모형은 미 육군 공병단 수자원 연구소에서 개발하였으며, 국내에서 설계홍수량 산정에 가장 많이 사용되는 대표적인 강우-유출 모형이다. 이 모형은 원하는 지점에서의 유출량 및 이의 발생시간에 대하여 효과적으로 모의 가능한 모형이다. HEC-HMS 모형의 모의 결과는 수질 분석 및 홍수위 산정 등의 추가적인 수문 분석을 위한 다양한 모형에 기초적이 자료로 활용될 수 있다. HEC-HMS 모형은 손실, 직접유출, 하도추적 및 기저유량 모형 등으로 이루어져 있다. 우리나라

는 SCS-CN 방법, Clark 단위도법과 Muskingum 방법을 표준방법으로 채택하고, HEC-HMS 모형에 적용한다(MLTMA, 2012). 강우-유출 모형 매개변수들은 산정 공식에 의하여 산정되며, HEC-HMS 모형의 최적화 도구를 활용하여 검정할 수 있다. 본 연구에서 활용된 매개변수 최적화 탐색방법은 UG(Univariate Gradient)이고, 목적함수로는 PRMSE(The Peak weighted Root Mean Square Error)이다(USACE-HEC, 2000).

IV. 유역 유출 분석 모형 적용 결과

1. 청주 무심천 유역의 확률강우량 산정

1967년부터 기상 관측을 실시한 청주기상지청에서 2017년까지 관측된 51개년의 강우자료를 바탕으로 지속기간별 연최대강우량을 산정하였다. 이를 FARD 모형에 적용하여 지점 빈도해석을 통한 확률강우량을 산정하였으며, 그 결과는 다음 <Table 4>와 같다. CASE 1은 1967년부터 2016년까지 50개년의 관측 수문자료를, CASE 2는 2017년을 포함한 51개년의 관측 수문자료를 바탕으로 산정한 무심천 유역의 확률강우량이다. 이를 활용하여 설계홍수량 산정하였으며, 2017년 7월 17일 홍수사상이 미치는 영향을 평가하였다. 여기서, 설계홍수량 산정에는 지속기간 6시간 확률강우량을 활용하였는데, 이는 「무심천 하천정비기본계획」(1990)

Table 4. Probable rainfall by return periods at Mushim River in Cheongju

Duration (hr)	Probable rainfall by return periods(mm)					
	100 year		200 year		500 year	
	CASE 1	CASE 2	CASE 1	CASE 2	CASE 1	CASE 2
1	69.1	73.2	75.1	79.7	82.2	87.7
2	100.4	109.2	109.5	119.5	121.4	132.9
3	130.5	143.8	142.0	157.1	157.9	175.4
4	150.0	169.8	163.5	186.1	181.7	208.0
6	173.9	194.2	189.8	212.9	210.4	237.3
9	198.8	217.6	216.5	238.1	239.9	265.0
12	223.0	240.9	243.3	263.7	270.0	293.7
18	252.8	268.6	275.6	293.5	305.5	326.3
24	269.8	284.1	293.7	310.1	325.2	344.1

및 「청주시 풍수해저감종합계획」(2012)에 제시된 임계 지속시간을 바탕으로 가장 가까운 지속시간으로 선정하였다.

지속시간 6시간 확률강우량 산정결과는 CASE 1에서 100년, 200년 및 500년 빈도 각각 173.9 mm, 189.8 mm, 210.4 mm로 나타나며, CASE 2에서는 194.2 mm, 212.9 mm, 237.3 mm의 값을 보이고 있다. 2017년 7월 16일 홍수사상이 포함된 CASE 2의 결과 값은 CASE 1과 비교하여 100년, 200년 및 500년 빈도 각각 20.3 mm, 23.1 mm 및 26.9 mm 증가된 결과를 나타내고 있다. 이러한 확률강우량의 증가는 설계홍수량의 증가로 나타날 것으로 판단된다.

V. 유역 유출 모형 적용 결과

1. HEC-HMS 모형을 활용한 관측 홍수사상별 검정 결과

2000년대 이후 청주 무심천 유역의 15개 관측 홍수사상을 바탕으로 HEC-HMS 모형을 활용하여 홍수사상별 검정을 실시하였으며, 그 결과는 다음 <Table 5>

Table 5. Calibrated results using HEC-HMS model based on 15 observed flood events since 2000 at Mushim River in Cheongju

Flood events	Observed data	Calibrated results	
	Peak discharge (m ³ /s)	Peak discharge (m ³ /s)	PRMSE (m ³ /s)
1	248.8	238.5	10.9
2	204.2	163.5	28.9
3	93.1	51.6	21.3
4	87.9	89.0	6.0
5	228.8	259.8	21.8
6	197.8	189.2	15.6
7	95.1	61.4	14.7
8	61.8	42.9	13.1
9	37.8	36.8	3.7
10	209	172.8	27.0
11	87.6	49.1	14.2
12	80.5	47.6	15.3
13	63.9	106.1	28.3
14	46.5	46.2	6.5
15	1028.5	1004.2	98.8

와 같다.

검정 모의 결과와 관측 수문자료의 침투홍수량을 비교한 결과, 오차는 최소 0.3 m³/s(홍수사상 14)에서 최대 42.2 m³/s(홍수사상 13)으로 나타났다. 홍수사상 2, 3 및 13에서는 40 m³/s이상의 비교적 높은 오차를 보였지만, 나머지 홍수사상에서는 40 m³/s이하의 오차를 보이고 있다. 홍수사상 4, 6, 9 및 14의 오차는 1.1, 8.6, 1.0 및 0.3m³/s으로 나타나고 있다. HEC-HMS 모형의 PRMSE 검정 결과는 홍수사상 9(3.7 m³/s)에서 가장 작은 수치를 보이고, 홍수사상 15(98.8 m³/s)에서 가장 큰 수치를 보인다. 홍수사상 15를 제외한 나머지 모든 홍수사상은 PRMSE 수치가 30이하로 비교적 우수한 결과 값을 나타내며, 홍수사상 15 또한 100 이하의 결과를 나타내고 있다. 이를 통하여 구축된 HEC-HMS 모형이 비교적 우수한 모의 성능을 보이고 있음을 확인하였다. 홍수사상별 HEC-HMS 모형 매개변수 검정 결과는 다음 <Table 6>과 같다.

<Table 6> a)의 검정 도달 매개변수는 홍수사상 13의 소유역 4(19.46hr)에서 가장 큰 결과 값을 보이고 있으며, 홍수사상 15의 소유역 1(0.69hr)에서 가장 작은 검정 결과를 나타내고 있다. 모든 홍수사상에서 소유역 4의 검정 결과가 다른 소유역보다 큰 검정 결과를 보이고 있다. 이는 소유역 4(무심천(소))가 무심천 유역 종점(청주 수위관측소)으로부터 물리적으로 가장 거리가 멀기 때문으로 판단된다.

<Table 6> b)의 검정 저류상수 결과에서는 홍수사상 15의 소유역 3(15.83hr)에서 가장 큰 결과 값을 보이고 있으며, 가장 작은 수치는 홍수사상 13 소유역 1에서 0.02hr로 나타났다. 검정 저류상수의 경우 소유역 3(한계천) 및 소유역 4(무심천(소))에서 대체적으로 큰 결과를 나타내고 있다. 두 유역은 각각 2.90%, 3.72%의 도시화 비율을 보이고 있으며, 이는 다른 유역들보다 낮은 비율을 가지고 있다. 따라서 면적의 대부분이 산지 또는 평야로 이루어져 있어, 강우를 저류할 수 있는 능력이 다른 유역들 보다 비교적 우수하기에 높은 결과 값을 보이고 있는 것으로 판단된다. 다음 <Table 7>은

Table 6. Calibrated result of model parameters using HEC-HMS model based on 15 observed flood events since 2000 at Mushim River in Cheongju

a) Calibrated time of concentration (T_c) by subcatchments

Flood events	Subcatchments					
	1	2	3	4	5	6
1	1.74	1.53	1.25	12.17	1.58	4.30
2	1.11	0.99	0.83	5.52	1.05	1.95
3	1.83	0.99	1.22	3.75	1.66	4.22
4	1.11	0.99	1.22	12.85	1.05	1.33
5	1.83	1.57	1.88	12.85	1.66	3.86
6	1.14	1.46	1.22	12.81	1.54	4.22
7	1.11	0.99	1.22	3.75	1.54	4.22
8	1.11	0.99	1.22	3.75	1.05	1.33
9	1.11	0.99	1.88	12.23	1.05	1.33
10	1.83	1.57	1.22	3.75	1.66	2.87
11	1.11	0.99	1.22	5.52	1.05	1.95
12	1.11	0.99	1.22	8.11	1.05	1.33
13	1.15	1.02	9.56	19.46	1.08	6.88
14	1.11	0.99	2.84	12.85	1.05	1.95
15	0.69	1.32	4.21	19.19	0.71	1.33

b) Calibrated storage coefficient (S_c) by subcatchments

Flood events	Subcatchments					
	1	2	3	4	5	6
1	0.69	0.69	2.49	1.45	0.92	1.73
2	0.48	0.46	1.26	0.65	0.42	0.54
3	0.69	0.46	1.26	0.96	0.96	1.17
4	0.48	0.46	9.55	3.35	0.42	1.73
5	0.68	0.46	4.28	3.35	1.37	1.65
6	0.66	0.66	1.26	2.18	0.89	1.71
7	0.66	0.46	1.26	0.96	0.89	0.79
8	0.48	0.46	1.26	0.96	0.41	1.17
9	0.48	0.46	4.17	1.45	0.42	1.17
10	0.71	0.71	1.26	1.41	0.91	1.17
11	0.48	0.46	1.26	0.65	0.42	0.54
12	0.44	0.44	1.31	0.89	0.44	0.89
13	0.02	0.72	15.21	7.90	0.67	4.38
14	0.48	0.46	6.42	3.35	0.42	2.76
15	0.40	0.59	15.83	5.07	1.19	6.32

c) Calibrated Muskingum-K by reaches

Flood events	Reaches			
	1	2	3	4
1	2.77	1.12	0.02	0.04
2	0.84	0.34	0.02	0.04
3	1.24	1.07	0.02	0.04
4	2.88	1.07	0.02	0.04
5	2.88	1.13	0.02	0.04
6	0.84	1.07	0.02	0.04
7	1.24	1.07	0.02	0.02
8	1.24	1.07	0.02	0.04
9	2.68	0.34	0.02	0.02
10	1.24	1.07	0.02	0.04
11	0.84	0.34	0.02	0.03
12	0.84	0.34	0.02	0.03
13	2.88	1.75	0.12	0.02
14	2.88	0.34	0.02	0.04
15	4.30	0.50	0.02	0.04

2000년대 이후 15개 관측 홍수사상을 모형에 적용하여 검정한 소유역별 매개변수 평균값을 나타내고 있다.

〈Table 7〉 a)의 소유역별 검정 도달시간의 평균값은 1.16 ~ 9.90 hr의 범위를 보이고, 검정 저류상수는 0.52 ~ 4.54 hr의 범위를 가지고 있다. 소유역 3에서는 검정 저류상수 평균값이 4.54 hr로 다른 유역들 보다 큰 값을 나타내고 있다. 소유역 3의 도시화 비율은 2.90%로 가장 낮은 도시화 비율을 보이고 있다. 유역의 대부분이 산지 및 평야 등의 투수층으로 이루어져 있다고 볼 수 있으며, 따라서 저류상수가 다른 유역들 보다 높은 것으로 판단된다. 소유역 4의 검정 도달시간 평균값은 9.90 hr로 가장 큰 값을 가지고 있다. 〈Table 7〉 b)의 소유역별 검정 Muskingum-K 평균값은 0.03 ~ 1.97 hr의 범위를 가지고 있다. 하도 1이 1.97 hr로 가장 큰 값을 보이고 있다.

2. 검정 모형을 활용한 100년 빈도 설계홍수량 산정

설계홍수량은 Case 1 및 2의 지속기간 6시간 100년 빈도 확률강우량을 HEC-HMS 모형에 적용하여 산정되었으며, 그 결과는 다음 〈Table 8〉과 같고, 산정결과를 도시한 그래프는 〈Figure 4〉와 같다. 이때 모형에 적용된 매개변수는 2000년 이후 15개 관측 홍수사상을 바탕으로 검정된 15개 모형 매개변수, 검정된 15개 모형 매개변수의 평균, 그리고 「설계홍수량 산정요령」(2012)에서 제시된 공식을 활용하여 산정된 매개변수, 총 17개 세트이다. 여기서, Clark 단위도법의 도달시간 매개변수는 Kraven 공식(Ⅱ), 저류상수 매개변수는 Sabol 공식, Muskingum-K 매개변수는 하도 유하 시간의 2/3을 적용하여 산정하였다(MLTMA, 2012). 또한, 〈Table

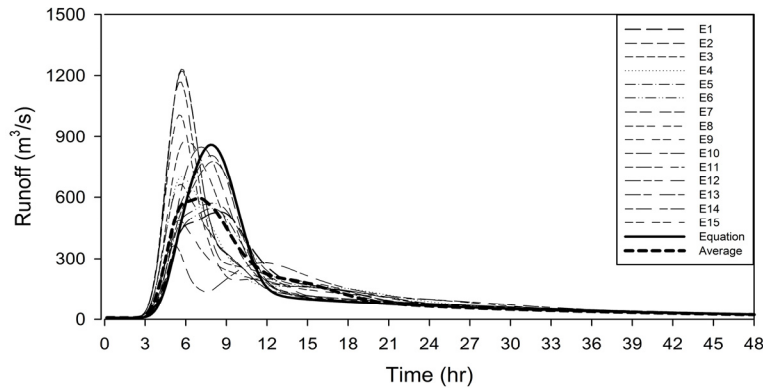
Table 7. Average of calibrated model parameters of HEC-HMS model

a) Average calibrated model parameters by subcatchments

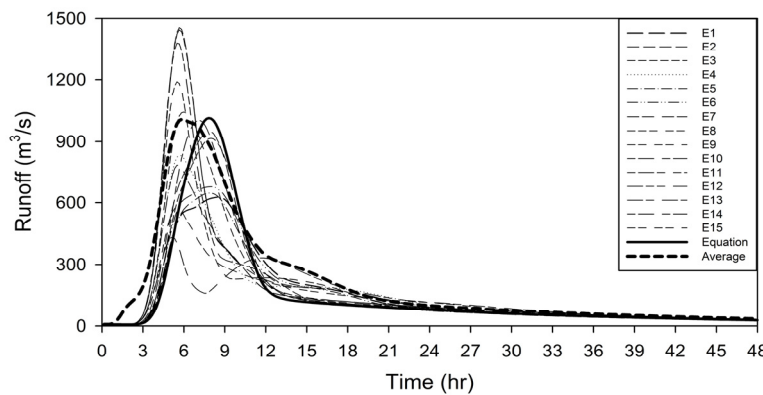
Subcatchments	1	2	3	4	5	6
T_c (hr)	1.27	1.16	2.15	9.90	1.25	2.87
S_c (hr)	0.52	0.53	4.54	2.31	0.72	1.85

b) Average calibrated model parameters by reaches

Reaches	1	2	3	4
Muskingum_K (hr)	1.97	0.84	0.03	0.03



a) Estimated design flood based on the observed hydrological data from 1967 to 2016



b) Estimated design flood based on the observed hydrological data from 1967 to 2017

Figure 4. Estimated design flood of 6 hour duration 100 year return period by parameter sets at Mushim River in Cheongju

8)에서 Equation은 공식을 활용하여 계산된 매개변수를 적용하여 산정한 설계홍수량이며, Average는 검정된 15개 모형 매개변수의 평균을 적용하여 산정한 설계홍수량이다.

설계홍수량 모의 결과는 C 1에서 최대 1,231.6 m³/s (홍수사상 2)에서 최소 364.9 m³/s(홍수사상 13)의 범위를 보이고 있으며, 5개 홍수사상 (홍수사상 2, 8, 9, 11, 12)의 모의 결과는 산정 공식에 의한 모의 결과 858.1 m³/s보다 큰 값을 나타내고 있다. Case 2의 설계홍수량 모의 결과는 최대 1,455.0 m³/s(홍수사상 2)에서 최소 431.0 m³/s(홍수사상 13)의 범위를 보이고 있으며, Case 1의 결과와 비교하여 최대 412.4 m³/s, 최소 66.1 m³/s 증가된 수치를 나타내고 있다. 이를 통하여 2017년 7월 16일 청주에 발생한 홍수사상이 설계홍수량 산정에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

Table 8. Estimated design flood of 6 hour duration 100 year return period by parameter sets at Mushim River in Cheongju

Parameter sets	Design flood (m ³ /s)	
	CASE 1	CASE 2
Flood events 1	528.9	626.3
Flood events 2	1231.6	1455.0
Flood events 3	775.9	915.8
Flood events 4	701.2	833.0
Flood events 5	546.0	646.9
Flood events 6	571.5	677.1
Flood events 7	805.4	950.8
Flood events 8	878.7	1042.2
Flood events 9	1006.2	1189.7
Flood events 10	847.5	1002.1
Flood events 11	1222.5	1444.2
Flood events 12	1167.7	1379.1
Flood events 13	364.9	431.0
Flood events 14	661.3	784.3
Flood events 15	487.1	578.4
Equation	858.1	1013.7
Average	595.0	1007.4

3. 현재 적용중인 무심천 설계홍수량 Vs. 2017년 7월 16일 홍수사상이 반영된 산정 설계홍수량

무심천 유역에는 ‘고향의 강 정비 사업’ 및 ‘자연형 하천정화사업’ 등의 다양한 하천 정비 사업이 수행되어졌다. 이들 사업에 적용된 관련 보고서(Chungcheongbuk-do, 1990; Chungcheongbuk-do, 2010, Cheongju-si, 2012)에서 제시된 무심천 설계홍수량 및 계획홍수위를 본 연구의 산정 결과 및 관측 수문자료와 비교·평가하여 안전관리 수준을 평가하였다.

본 연구의 최종유출구인 청주 수위관측소 지점의 100년 빈도 설계홍수량 및 계획홍수위는 다음 <Table 9>와 같다.

여기서, ①은 「무심천 하천정비기본계획」(1990: 114, 153), ②는 「청주시 풍수해저감종합계획」(2012: 4-12, 4-36)에 제시된 100년 빈도 설계홍수량 및 계획홍수위이다. 현재 청주 수위관측소 지점의 방재 수준은 「무심천 하천정비기본계획」(1990)에 제시되어있는 설계홍수량에 맞추어져있다.

2017년 7월 16일에 발생한 홍수사상의 관측 최대 홍수위는 EL. 41.95 m으로 계획홍수위에 근접한(①: -0.1 m, ②: -0.11 m) 수치를 나타내고 있지만, 관측 첨두홍수량은 1,028.5 m³/s으로 ① 및 ②에서 제시된 설계홍수량 이내의 값을 보이고 있다.

하지만 Case 2에서 모의된 청주 수위관측소 지점의 설계홍수량은 최대 1,455.0 m³/s로, 현재 적용되고 있는 설계홍수량보다 큰 수치를 나타내고 있다.

향후 이상기후의 발생 증가 및 유역의 변화 등을 고려할 때, 무심천 유역의 설계홍수량 재산정 및 추가적인 안전관리 대책 마련이 필요하다고 판단할 수 있다.

VI. 결론

본 연구에서는 2017년 7월 16일 청주에서 발생한 홍수사상을 포함한 확률강우량 및 설계홍수량을 산정하고, 청주 무심천 유역의 홍수 위험성을 평가하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 2000년대 이후 15개 관측 홍수사상을 바탕으로 HEC-HMS 모형의 검정을 실시하였으며, 모든 홍수사상에서 PRMSE 목적함수 값이 100 m³/s 이하를 보였다. 이는 구축된 강우-유출 모형이 적합한 모의 성능을 보이고 있다고 판단할 수 있다. 따라서 향후 관측 홍수사상의 검정을 통한 설계홍수량 산정의 활용성을 확인하였다.

(2) 2017년 7월 16일 홍수사상을 반영하여 산정된 지속기간 6시간 확률강우량(Case 2)은 해당 홍수사상을 반영하지 않은 결과(Case 1)보다 20.3 ~ 26.9 mm 크게 산정되었다. 산정된 확률강우량을 적용한 Case 2의 설계홍수량(지속기간 6시간-100년 빈도)은 Case 1의 결과보다 최대 66.1 m³/s, 최소 412.4 m³/s이 증가된 결과를 나타내고 있다. 이를 통하여 2017년 7월 16일 홍수사상이 확률강우량 산정에 미치는 영향을 확인하였다.

(3) 청주에서 발생한 2017년 7월 16일 홍수사상의 관측 최대 수위는 「무심천 하천정비기본계획」(1990) 및 「청주시 풍수해저감종합계획」(2012)에서 제시된 계획홍수위에 근접한 수치를 나타내고 있으나, 관측 첨두홍수량은 설계홍수량보다 낮은 수치를 보이고 있다. 하지만 Case 2의 최대 모의 설계홍수량은 현재 무심천 하천관리 수준보다 높은 수치를 나타내고 있어, 향후 무심천 유역의 설계홍수량 재산정 및 추가적인 안전관리 대책 마련이 필요하다고 판단할 수 있다.

Table 9. 100 year return period design flood and project water elevation at Cheongju water level station

Name	Design flood (m ³ /s)	Project water elevation (EL,m)	Note
①	1,355	42.05	No.25+170
②	1,600	42.06	No.25+190

※ Source: Data from Chungcheongbuk-do(1990) and Cheongju-si (2012)

본 연구는 2000년대 이후 15개 관측 홍수사상을 바탕으로 HEC-HMS 모형을 검정하였으며, 기존의 매개변수 산정 공식이 아닌 각각의 검정 매개변수를 활용하여 설계홍수량을 산정한 후, 매개변수 검정 결과의 실무 적용성을 확인하였다. 또한 최근 발생한 2017년 홍수사상을 반영한 설계홍수량을 산정하여, 현재 무심천 유역의 홍수위협관리 수준을 평가하였다. 향후 추가적인 연구를 통하여 검정 홍수사상의 개수 및 검정 매개변수의 적용 방법 등을 보완하여 안전한 하천관리를 위한 신뢰도 높은 설계홍수량이 제시될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2018년도 충북대학교 연구년제 지원에 의하여 연구되었음(This work was conducted during the research year of Chungbuk National University in 2018).

References

Chang, Hyung Joon, Hyo Sang Lee, Kook Hee Cho, and Moo Kyeong Lee. 2015. Assessment of Flood Characteristics Due to Land Use Changes in Cheongju - Mushim River, Chungbuk. *Crisisonomy*. 11(4): 185-205.

Cheongju-si. 2012. Comprehensive Plans for the Reduction of Damage from Storm and Flood for Cheongju-si.

Choi, Chang Hyun, Dae Gun Han, Jung Wook Kim, Jae Won Jung, Duck Hwan Kim, and Hung Soo Kim. 2016. Mega Flood Simulation Assuming Successive Extreme Rainfall Events. *Journal of Wetland Research*. 18(1): 76-83.

Chungcheongbuk-do. 1990. Mushimcheon River Management Basic Plan.

Chungcheongbuk-do. 2010. Mushimcheon River Management Basic Plan.

Chungcheongbuk-do. 2017. Chungcheongbuk-do State of Flood Damage and Restoration Plan. *Chungcheongbuk-do Disaster*

Prevention and Water Management Forum.

Kim, Nam Won, Chang Wan Kim, and Hyo Seop Woo. 2002. Characteristics of Rainfall and Flood Damage by Typhoon Rusa. In *Proceeding of Korea Society of Civil Engineering*. 2002(11): 1203-1210.

Korea Meteorological Administration(KMA). 2017. National Meteorological Combined Information. <http://www.weather.go.kr> (Retrieved 2017.9.12.)

Ministry of Environment(ME). 2017. Geum River Flood Control Office. <http://www.geumri-ver.go.kr> (Retrieved 2017.9.14.)

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA). 2012. Design Flood Estimation Method.

Moon, Young Il and Sun Kwon Yoon. 2010. 9.21 Analysis and Reaction Plan for Urban Flood Damage by Localized Torrential Rainfall Event, Seoul. *Water for Future*. 43(12): 23-32.

National Emergency Management Agency (NEMA). 2012. Annual Disaster Report.

USACE-HEC. 2000. Hydrologic Modeling HEC-HMS User's Manual.

Wu, Z. Y., G. H. Lu, Z. Y. Liu, J. X. Wang, and H. Xiao. 2013. Trends of Extreme Flood Events in the Pearl River Basin during 1951-2010. *Advances in Climate Change Research*. 4(2): 110-116.

Yoon, Kwang Seok, Lynn Seo, and Sang Jin Kwak. 2011. Analysis of Flood Characteristics of the Torrential Rainfall at the End of July 2011. *Water for Future*. 44(10): 19-24.

Korean References Translated from the English

국토해양부. 2012. 설계홍수량 산정요령.

기상청. 2017. 국가기상종합정보. <http://www.weather.go.kr> (검색일: 2017.9.12.)

김남원, 김창완, 우효섭. 2002. 태풍 루사(Rusa)의 강우 특성과 홍수피해 특성. 대한토목학회 학술대회. 2002(11): 1203-1210.

문영일, 윤선권. 2010. 9.21 국지성 집중호우에 의한 도심 홍수 피해 원인분석과 대응방안: 서울특별시를 중심으로. 수자원학회 물과 미래. 43(12): 23-32.

소방방재청. 2012. 2011년 재해연보.

윤광석, 서린, 곽상진. 2011. 2011년 7월말 집중호우의 홍수특

- 성 분석. 수자원학회 물과 미래. 44(10): 19-24.
- 장형준, 이효상, 조국희, 이무경. 2015a. 도시 이용 변화에 따른 홍수 유출특성의 평가: 청주 무심천, 충북. Crisisonomy. 11(4): 185-205.
- 청주시. 2012. 청주시 풍수해저감종합계획.
- 최창현, 한대건, 김정욱, 정재원, 김덕환, 김형수. 2016. 연속적인 극한호우사상의 발생을 가정한 거대홍수모의. 한국습지학회지. 18(1): 76-83.
- 충청북도. 1990. 무심천 하천정비기본계획.
- 충청북도. 2010. 무심천 하천기본계획.
- 충청북도. 2017. 충청북도 홍수피해 현황 및 복구방안. 충청북도 재해예방 및 물 관리 토론회.
- 환경부. 2017. 금강홍수통제소. <http://www.geumriver.go.kr> (검색일: 2017.9.14.)

Received: Dec. 28, 2017 / Revised: Mar. 27, 2018 / Accepted: Jun. 15, 2018

청주 무심천 지역의 2017년 7월 16일 홍수사상을 반영한 설계홍수량의 산정

국문초록 본 연구의 목적은 2017년 7월 16일 홍수사상이 청주 무심천 지역의 설계홍수량 산정에 미치는 영향을 확인하는 것이다. 설계홍수량은 1967~2016년까지의 수문자료를 바탕으로 한 Case 1 및 1967~2017년 7월까지의 수문자료를 바탕으로 한 Case 2로 구분하여 산정되었다. 본 연구에서는 FARD 모형을 활용하여 확률강우량이 산정되었으며, 2000년 이후 15개 관측 홍수사상을 바탕으로 HEC-HMS 모형을 검정하였다. 검정된 모든 HEC-HMS 모형의 매개변수는 설계홍수량 산정 과정에 적용되었다. 그 결과, Case 1의 설계홍수량 모의 결과는 $364.9 \sim 1,231.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 이고, Case 2의 결과는 Case 1과 비교하여 $66.1 \sim 412.4 \text{ m}^3/\text{s}$ (약 18%) 증가된 $431.0 \sim 1,455.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 를 나타내고 있다. 이를 통하여 2017년 7월 16일 홍수사상이 설계홍수량 증가에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 2017년 7월 16일 홍수사상의 최대 관측 유량은 $1,028.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 로, 현재 적용되고 있는 설계홍수량인 $1,355 \text{ m}^3/\text{s}$ 보다 낮은 수치를 보이고 있다. 그러나 Case 2에서 모의된 최대 설계홍수량은 설계홍수량보다 큰 수치를 나타내고 있어, 홍수에 대한 청주 무심천 지역의 위험성이 증가하는 것으로 판단할 수 있다.

주제어 : 강우-유출모형, 검정 매개변수, 무심천, 설계홍수량

- Profiles **Hyung Joon Chang** : He received Ph.D. degree from Chungbuk National University, Cheongju, Korea in 2018 (Thesis : Development of regionalisation model for runoff in ungauged catchments). He is a lecturer, School of Civil Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, Korea(hyungjoonchang@chungbuk.ac.kr).
- Ho Jin Lee** : He received Ph.D. degree from Chungbuk National University, Korea in 2004 (Thesis : Effect of the tidal current on the wave prediction). He is an associate professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, Korea(hojinlee@chungbuk.ac.kr).
- Myung Gyu Hwang** : He received B.A. from Chungbuk National University, Cheongju, Korea in 2016. He is on Master course and studying on design flood estimation(myunggyu0305@chungbuk.ac.kr).
- Ho Kwon Cheon** : He is a chartered professional engineer (PE) in water resource engineering company, Isan corporation. He is in Ph.D. course of Chungbuk National University, Cheongju, Korea(freedomho@naver.com).
- Hyo Sang Lee** : He received Ph.D. degree from Imperial College, London, The UK in 2006 (Thesis : Regionalisation of rainfall-runoff models in the UK). He is an associate Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, Korea. The main study field is application of rainfall-runoff models at gauged and ungauged catchments. Also, he writes "Application of Rainfall Runoff Model with Rainfall Uncertainty(2009)", "Assessment of Conceptual Rainfall Runoff Models for Regionalisation at Miho Catchment(2012)" and so on(hyosanglee@chungbuk.ac.kr).