

소규모 산지 유역의 유출특성을 반영한 매개변수 최적화 분석

Analysis of Parameter Optimization Reflecting the Characteristics of Runoff in Small Mountain Catchment

임종성¹⁾ · 이호진[†]
Joungsung Lim · Hojin Lee

Received: 11th July 2024; Revised: 18th July, 2024; Accepted: 31st July, 2024

ABSTRACT : In Korea, torrential rain frequency and intensity have surged over the past five years (2019-2023), breaking rainfall records. Due to insufficient observation facilities for rainfall and runoff data in small mountainous catchments, preparing for unexpected floods is challenging. This study examines the Bidogyo catchment in Goesan-gun, Chungcheongbuk-do, comparing design flood discharge calculated with optimized parameters versus standard guidelines. Using HEC-HMS and Q-GIS for model construction, five rainfall events were analyzed with data from the National Water Resources Management Information System. The time of concentration (Tc) and storage constant (K) were calculated using the Seokyeongdae formula and model optimization. Results showed that optimized parameters produced higher objective function values for flood events. The design flood discharge varied by -10.7% to 17.3% from the standard guidelines when using optimized parameters. Moreover, optimized parameters yielded flood discharges closer to observed values, highlighting limitations of the Seokyeongdae formula for all catchments. Further research aims to develop suitable parameter estimation methods for small mountainous catchments in Korea.

Keywords : Catchment characteristics, Design flood, HEC-HMS, Mountain catchment, Runoff

요지 : 우리나라는 최근 5년(2019년~2023년)간 발생한 강우의 모든 기록이 경신 될 만큼 집중호우의 발생빈도와 강도가 급증하고 있다. 소규모 산지 유역은 수문분석에 필요한 관측시설의 미비로 자료확보가 어려워 국지성 집중호우로 인한 돌발홍수에 대한 사전 대비가 어려운 실정이다. 이에 본 연구에서는 국내 소규모 산지유역인 충청북도 괴산군에 위치한 비도교 유역을 대상으로 최적화된 매개변수와 홍수량산정 표준지침에서 제시한 매개변수를 활용하여 산출된 설계홍수량을 비교하였다. 강우-유출모형은 HEC-HMS를 활용하여 모의하였으며, 모형 구축을 위한 유역특성인자는 Q-GIS를 활용하여 수치표고모형(DEM)을 바탕으로 산출하였다. 호우사상은 국가수자원관리종합정보시스템에서 제공하는 수문기상자료를 이용하여 5개의 호우사상을 선정하였다. 모형구동에 필요한 도달시간(Tc)과 저류상수(K)는 홍수량산정 표준지침에서 제시하는 서경대 공식과 강우-유출모형의 최적화를 통해 각각 산정하였다. 모의한 호우사상을 비교한 결과 연구유역인 소규모 산지유역의 경우 서경대 공식으로 산출한 매개변수보다 최적화된 매개변수로 산출된 홍수량의 목적함수 값이 높은 것을 확인하였다. 또한, 최적화된 매개변수를 바탕으로 비도교 유역의 설계홍수량을 산정하여 전국하천유역 홍수량 산정보고서의 결과와 비교한 결과, 보고서에서 산정한 값과 최적화 매개변수로 산정한 값이 -10.7%~17.3% 차이로 산정되었다. 소규모 산지 유역인 비도교 유역에 두 매개변수로 산출된 홍수량을 관측값과 비교했을 때, 최적화된 매개변수로 산출된 값이 관측값과 더 유사한 것으로 보아, 홍수량산정 표준지침에서 권장하는 서경대 공식을 국내 모든 유역에 일괄적으로 적용하기에는 한계점이 존재한다고 판단된다. 추가적인 연구를 통해 국내 소규모 산지유역에 적합한 매개변수 산정기법을 개발하고자 한다.

주요어 : 유역특성인자, 설계홍수량, HEC-HMS, 산지유역, 유출량

1. 서론

우리나라는 최근 급변하는 이상기후로 인해 집중호우의 발생빈도와 강우강도가 급격하게 증가하고 있다. 2019년에는 한반도에 7건의 태풍이 상륙하여 인명과 재산 피해가 발생하였고, 2020년에는 장마가 54일 동안 지속되어 최장기간 장마를 기록하였다(ME, 2020). 2022년 8월에는 시간당 141.5mm

의 강우가 발생하여 최고 강우강도 기록을 갱신하였고(ME, 2022), 2023년 7월 14일에는 483mm/day라는 강우가 발생하여 지역별 일 최대강우량으로 기록되었다. 2019년부터 2023년까지 최근 5년간 한반도에서 발생한 강우의 모든 기록이 갱신되었다(Jeong, 2023).

우리나라는 전체 국토의 70% 이상이 산지로 구성되어 있으며, 동쪽이 높고 서쪽이 낮은 지형으로 이루어져 있다. 또한,

1) Graduate Student, School of Civil Engineering, Chungbuk National University

† Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University (Corresponding Author : hojinlee@cbnu.ac.kr)

강수량의 계절적 변화가 크고, 하천의 평균 경사도가 비교적 크기 때문에 강우가 빠르게 하천으로 집중되는 경향이 있다. 이러한 특징으로 효과적인 치수대책을 마련해야 하며, 이를 위해서는 지역적 특성을 고려한 신뢰도 높은 수문분석이 필요하다.

수문분석의 신뢰도를 높이기 위해서는 강수량, 유출량, 증발산량 등과 같은 관측자료가 필요하지만, 대부분의 중·소규모 유역은 관측시설의 미비로 인해 관측자료 확보가 어려운 실정이다. 이에 국지성 집중호우가 산지유역에 발생하였을 때, 돌발홍수로 인한 재산과 인명 피해가 발생하고 있다.

수재해는 피하기는 쉽지 않지만, 원인을 정확하게 파악하고 이에 대한 방재계획을 효과적으로 수립한다면 피해를 경감시킬 수 있다. 이에 산지 유역에 국지성 집중호우로 인한 돌발홍수에 대비하기 위해서 산지 유역 돌발홍수 대응체계 조사 분석 연구(NDMI, 2009)가 이루어졌으며, 국립재난연구원에서는 2016년에 AWS 및 RADAR를 활용하여 관측된 빅데이터를 통해 돌발홍수 예·경보 시스템 고도화기획연구를 수행하여, 예·경보체계의 신뢰할 수 있는 개선 방향을 제시하였다. 또한, 홍수대응 골든타임 확보 연구단은 도심 저지대, 친수공간 등에서 발생할 수 있는 돌발홍수, 침수, 하수도 및 도시하천의 범람 등과 같은 다양한 홍수피해를 예방하기 위하여 돌발홍수예보시스템 개선 등에 관한 연구를 수행하였으며, 통합홍수예보 플랫폼을 개발하였다.

Kim et al.(2019)은 한강의 산지 소하천 유역을 대상으로 돌발홍수 재현기간 분석을 통해 돌발홍수의 발생 주기를 정량적으로 제시하였으며, Chang et al.(2023)은 충북 단양 1교 유역을 대상으로 소규모 산지 유역의 도달시간 매개변수의 범위를 0.8~3.4로 제시하였다.

Yoon et al.(2020)은 수도권 지역을 대상으로 X밴드 이중편파 레이더로 돌발홍수 감시를 위한 기반 및 적용성을 평가하였다. 레이더를 활용한 강수량 산정결과 강우강도가 높으면 강우가 과소 추정되는 경향이 있으나, 정확도 부분은 우수한 결과를 나타내어 활용 가능성이 있다고 분석하였다.

Yu et al.(2022)은 다중 강우사상을 반영한 DDS 알고리즘 기반 단일사상 강우-유출모형 매개변수 최적화 기법을 연구하였다. 개별 강우-유출 사상을 대상으로 최적 매개변수를 산정하는 경우 사상별로 매개변수가 서로 다르며, 물리적인 범위를 중심으로 변동성이 커 유역 대표 매개변수를 결정하는 것에 어려움이 있다. 매개변수 추정 시 변동성 증가는 강우의 시공간적 변동성과 함께, 유역 내 일부 홍수량 산정지점을 기준으로 강우-유출자료만 활용이 가능하여 매개변수의 식별성이 낮은 문제가 발생한다. 이를 개선하기 위해 다수의 사상들을 동시에 고려하여 NSE를 목적함수로 매개변

수 최적화 방법을 제안하였다.

Lee et al.(2023)은 산악지형에 위치한 삼척오십천 유역을 대상으로 홍수량을 산정하였다. 표준지침에서 제시한 서경대 공식을 사용하여 저류상수와 도달시간을 산정한 뒤, HEC-HMS를 활용하여 관측수문곡선과 모의수문곡선을 비교한 결과 R^2 (Coefficient of Determination) 및 NSE와 같은 통계성능이 우수한 결과를 도출하였다.

Kim et al.(2020)은 경사가 매우 급한 산지부 소하천이 많은 강원영동지역을 대상으로 설계홍수량을 산정하였다. 저류상수 및 도달시간은 설계홍수량 표준지침에서 제시한 Kraven, Sabol 공식을 사용하여 홍수량을 산정한 결과, 유역면적 5km^2 이하에서는 합리식을 활용하여 홍수량을 적용하는 것이 타당하다고 판단하였다.

Ministry of Environment(2019) 홍수량산정 표준지침에서는 Clark 단위도법을 적용함에 있어 도달시간과 저류상수에 대하여 서경대 공식을 적용하라고 제시되어 있다. 서경대 공식을 이용하여 도달시간 산정 시 활용되는 인자는 경사 및 고도차이며, 저류상수는 하천경사에 따라 계수값이 일괄적으로 적용하도록 되어있다. 이에, Chang et al.(2022)은 지리산의 소하천 유역인 유평유역에 대해 홍수량 산정 표준지침을 바탕으로 매개변수를 산정한 뒤, WMS모형을 적용하여 유역 유출량을 산정하였다. 연구 결과 지자체 방재성능목표 강수량과 이와 비슷한 50년 빈도의 확률강우량을 바탕으로 산정한 홍수량이 유사하게 모의됨을 확인하였다.

위와 같은 노력에도 소규모 산지 유역에 국지성 집중호우로 인한 돌발홍수는 여전히 사전 대비가 어렵다는 문제점이 있다. 홍수량 산정 표준지침에서 제안된 홍수량 산정절차는 크게 빈도해석 방법과 강우-유출관계에 따른 방법으로 구분되어 있다. 홍수량 빈도해석에 의한 방법은 홍수량 자료의 부족으로 인해서 실질적으로는 강우-유출모형 방법이 활용되고 있다. 단일 홍수사상에 대하여 모의가 가능한 미국 육군 공병단의 HEC-HMS를 활용하였으며, 매개변수인 도달시간과 저류상수는 홍수량 산정 표준지침에서 제시하는 서경대 공식을 사용했다. 위와 같은 과정을 통해 산정된 비도교 유역의 모의 유출량과 수위유량관계곡선식을 바탕으로 계산된 실측 유량자료로 최적화 모의를 수행하여 유역의 유출특성을 반영한 매개변수를 산정하였다. 최적화 모의를 통해 산정된 매개변수를 활용하여 설계홍수량을 산출하였고, 이를 통해 소규모 산지유역인 비도교 유역의 유출특성에 적합한 유출량 산정방법을 제시하였다.

본 연구에서는 비도교 유역을 대상으로 소규모 산지 유역의 유출 특성을 반영한 표준화된 매개변수를 산출하여 정확한 홍수량을 산정하고자 한다.

2. 연구구역

2.1 연구대상구역 선정

본 연구에서는 충청북도 괴산군 칠성면 비도리에 위치한 비도교를 유역 유출구로 하여 연구유역을 선정하였다. 연구 유역인 비도교 유역은 한강수계에 속해있으며, 유역면적은 167.14km²이며, 유로연장은 28.40km이다. 2014년부터 2023년까지 최근 10년 연평균 기온은 11.2°C, 가장 기온이 높은 달인 8월의 월평균기온 25.2°C, 가장 낮은 달인 1월의 월평균기온 -4.3°C로 최난월과 최한월의 기온차가 29.5°C의 뚜렷한 대륙성기후의 특성을 가지고 있다. 연평균 강수량은 1,198.4 mm이고, 2014년 이후 일 최대 강우량은 2021년 7월 11일 발생한 42mm로 집중호우로 인한 홍수 위험성이 높은 지역으로 판단된다(KMA, 2024). 비도교 유역의 유역도는 Fig. 1에 나타내었다.

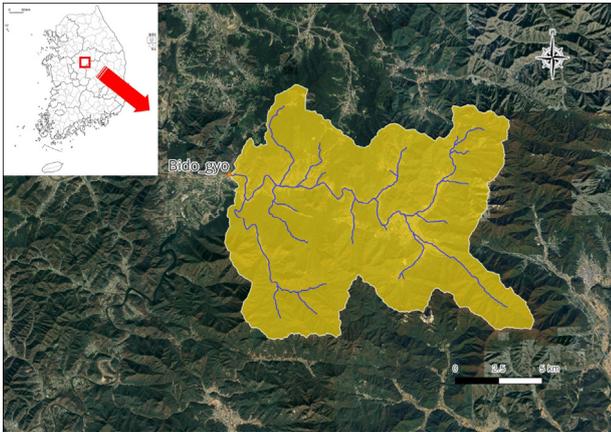


Fig. 1. Study catchment in Bidogyo

2.2 유역 특성인자

유역유출에 직접적인 영향을 미치는 특성인자들로는 유역면적, 유로연장, 유역평균폭, 형상계수, 유역경사 등이 있다. 강우-유출모형 해석을 위한 유역 특성인자는 수치표고모형(DEM)을 바탕으로 Q-GIS(Quantum GIS)를 활용하여 분석 및 산출하였다(Kang et al., 2001; Kim et al., 2006).

홍수량 산정 표준지침에서는 대상 유역면적이 250km² 이상인 경우에는 소유역을 분할하도록 제시하고 있다. 그러나 비도교 유역의 유역면적은 167.14km²이기에 별도의 소유역 분할없이 단일 유역으로 특성인자를 산출하여 홍수량을 산정하였다. 본 연구에서 활용한 유역 특성인자는 유역면적(Area), 최원유로연장(L), 유역평균폭(Mean width of catchment), 형상계수(Form Factor, FF), 미국 토양보존국 유출곡선 번호(Soil conservation service-curve number, SCS-CN)이다.

도달시간(Tc)은 Eq. (1), 저류상수(K)는 Eq. (2)와 같이 홍수량 산정 표준지침에서 권장하고 있는 서경대 공식을 활용하였다.

$$Tc = 0.214LH^{-0.144} \quad (1)$$

여기서, Tc는 도달시간(hr), L은 유로연장(km), H는 고도차(m, 유역 최원점 표고와 홍수량 산정지점 표고의 고도차)이다.

$$K = \alpha \left(\frac{A}{L^2} \right)^{0.02} Tc \quad (2)$$

여기서, K는 저류상수(hr), α 는 일반적인 하천유역은 1.45(기준값), 산지 등 하천경사가 급하고 저류능력이 적은 유역면적이 지배적인 유역은 1.20, 평지 등 하천경사가 완만하고 저류능력이 큰 유역면적이 지배적인 유역은 1.70을 적용하는 계수, A는 유역면적(km²), L은 유로연장(km), Tc는 도달시간(hr)이다.

합성단위도는 홍수량 산정 표준지침(ME, 2019)에서 제시하고 있는 Clark 단위도법을 적용하였으며, 비도교의 유역 특성인자는 Table 1과 같다.

Table 1. Catchment characteristics in Bidogyo

Area [km ²]	L [km]	Mean width of catchment [km]	FF [-]	SCS-CN (AMC-III)[-]	TC [hr]	K [hr]
167.14	28.40	5.88	0.21	78.3	2.28	2.65

2.3 수문자료구축

2.3.1 유량자료

연구유역에서 활용한 수위관측소는 충청북도 괴산군 칠성면 비도리에 위치하고 있는 괴산군(비도교)이며, 환경부 한강홍수통제소에서 관리하고 있다. 괴산군(비도교)의 수위관측소 제원은 Table 2와 같다.

본 연구에서는 수위-유량관계곡선식이 존재하는 비도교 유역을 대상으로 하여 강우-유출모형의 모의결과와 실측유량

Table 2. Water-level observatory in Bidogyo

Catchment	Coordinate		Observation start date	Competent authority
	Latitude	Longitude		
Bidogyo	36-47-24	127-52-41	2011-12-14	Meteorological Administration

의 비교·분석을 수행하였다. 신뢰도 높은 분석을 위해 한국 수문조사연보의 괴산군(비도교) 수위관측소 수위유량관계식(2014년도, 2018년도, 2019년도, 2022년도)을 활용하여 관측 시단위 수위 값을 유량 값으로 환산하여 획득하였다. 괴산군(비도교) 수위관측소의 수위-유량 관계곡선식은 Table 3과 같다.

2.3.2 강우자료

비도교 유역의 강우-유출 모의를 위한 입력자료는 강우

자료는 홍수량 산정 표준지침에서 제시하는 유역과의 거리, 시우량 관측년수, 관측소의 밀도 및 분포 등을 종합적으로 고려하여 유역 인근의 강우관측소 5곳을 선정하였다. 선정된 강우관측소를 바탕으로 티센가중법을 활용해 강우관측소의 지배면적을 가중치로 이용해 평균강우량 자료를 산출하였다. 각 강우관측소의 제원과 티센계수는 Table 4에 나타내었다.

또한 신뢰성 높은 유출량 산정을 위해서 유역의 유출특성이 반영된 단기 호우사상 선정이 중요하다. 본 연구에서는 비도교 유역의 수위-유량관계 곡선식이 개발된 2014년부터

Table 3. Rating curve equation in Bidogyo

Year	Application level (m)	Rating curve equation	Note	
2014	$0.91 \leq h \leq 1.15$	$62.937 \cdot (h - 0.910)^{2.950}$	0.98m B.E.	14.01.01. 00:10 ~ 14.01.01. 00:00
	$1.15 < h \leq 1.54$	$186.474 \cdot (h - 0.990)^{2.890}$		
	$1.54 < h \leq 5.93$	$63.207 \cdot (h - 0.800)^{2.145}$	1.96m A.E.	
2018	$0.62 \leq h \leq 0.90$	$58.312 \cdot (h - 0.620)^{2.425}$	0.64m B.E.	18.01.01. 00:10 ~ 18.07.21. 16:40
	$0.90 < h \leq 1.43$	$117.058 \cdot (h - 0.700)^{2.351}$		
	$0.58 \leq h \leq 0.90$	$32.568 \cdot (h - 0.580)^{2.198}$	0.63m B.E.	18.07.21. 16:50 ~ 18.08.10. 09:40
	$0.90 < h \leq 1.43$	$117.058 \cdot (h - 0.700)^{2.351}$		
	$0.62 \leq h \leq 0.90$	$58.312 \cdot (h - 0.620)^{2.425}$	0.64m B.E.	18.08.10. 9:50 ~ 18.09.04. 02:40
	$0.90 < h \leq 1.43$	$117.058 \cdot (h - 0.700)^{2.351}$		
	$0.68 \leq h \leq 0.97$	$180.151 \cdot (h - 0.680)^{2.835}$	0.80m B.E.	18.09.04. 02:50 ~ 19.01.01. 00:00
	$0.97 < h \leq 1.43$	$117.058 \cdot (h - 0.700)^{2.351}$		
	$1.43 < h \leq 1.95$	$157.905 \cdot (h - 0.770)^{2.501}$		18.01.01. 00:10 ~ 19.01.01. 00:00
	$1.95 < h \leq 5.57$	$201.510 \cdot (h - 0.830)^{1.501}$	2.96m A.E.	
2019	$0.56 \leq h \leq 0.83$	$290.711 \cdot (h - 0.560)^{4.496}$	0.67m B.E.	19.01.01. 00:10 ~ 20.01.01. 00:00
	$0.83 < h \leq 1.01$	$54.352 \cdot (h - 0.680)^{2.219}$		
	$1.01 < h \leq 1.43$	$144.638 \cdot (h - 0.720)^{2.778}$		
	$1.43 < h \leq 1.95$	$157.905 \cdot (h - 0.770)^{2.501}$	2.96m A.E.	
2022	$0.55 \leq h \leq 0.84$	$70.274 \cdot (h - 0.550)^{3.493}$	0.66m B.E.	22.01.01. 00:10 ~ 23.01.01. 00:00
	$0.84 < h \leq 1.01$	$54.352 \cdot (h - 0.680)^{2.219}$		
	$1.01 < h \leq 1.43$	$144.638 \cdot (h - 0.720)^{2.778}$		
	$1.43 < h \leq 1.95$	$157.905 \cdot (h - 0.770)^{2.501}$		
	$1.95 < h \leq 5.57$	$201.510 \cdot (h - 0.830)^{1.501}$	2.96m A.E.	

* B.E. : Below extrapolation, A.E. : Above extrapolation

Table 4. Rainfall station

Rainfall station	Coordinate		Observation start date	Thiessen coefficient	Competent authority
	Latitude	Longitude			
Mungyeong-si (Jinanri)	128-04-55	36-44-33	1984-04-01	0.0540	Ministry of Environment
Goesangun (Songmyeonjoonggyo)	127-52-29	36-39-36	1996-12-01	0.0683	Ministry of Environment
Goesangun (Yeonpungchogyo)	127-59-51	36-45-43	1962-07-01	0.4869	Ministry of Environment
Goesangun (Ogari)	127-57-13	36-48-37	1991-07-01	0.3514	Korea Water Resources Corporation
Chungjusi (Suanbomyeonsamuso)	127-59-39	36-50-50	1962-07-01	0.0394	Ministry of Environment

Table 5. Rainfall characteristics for storm events of Bidogyo

Events	Period	Duration (hr)	Rainfall (mm)
E1	2019-07-25 ~ 2019-07-26	48	105
E2	2019-11-17 ~ 2019-11-20	96	55.2
E3	2020-02-25 ~ 2020-02-27	72	39.2
E4	2020-05-18 ~ 2020-05-20	72	41.2
E5	2020-06-29 ~ 2020-07-02	96	68.4

2023년에 발생한 호우사상 중 유출모의에 적합한 자료 5개를 Table 5와 같이 선정하였다.

3. 연구방법

3.1 HEC-HMS 모형 이론

본 연구에서는 미 육군 공병단에서 개발한 HEC-HMS 모형으로 강우-유출 모의를 수행하였다. HEC-HMS 모형은 수문학적 요소를 고려한 유역모형(Basin model), 기상학적 데이터를 처리하는 기상모형(Meteorologic model), 시간적 요소를 조정하는 제어지정모형(Control specification model)으로 구성된다. HEC-HMS 강우-유출모형은 강우 발생 시 손실을 산정하여 유효우량으로 변환하고, 기저유출과 합하여 소유역별 유출량을 구하고, 각 소유역의 총 유출량을 합류점에서 합한 후 하도추적을 통해 유역 출구점에서 강우-유출수문곡선을 모의할 수 있도록 개발된 모형이다(Hwang & Yang, 2018).

3.2 HEC-HMS 모형 구축

홍수량 산정 표준지침(ME, 2019)에서는 대상 유역면적이 250km² 이상인 경우에는 소유역을 분할하도록 제시하였다. 그러나 비도교 유역의 유역면적은 167.14km²로 괴산군(비도교) 수위관측소가 유출구인 단일 유역으로 HEC-HMS 모형을 구축하였고 모형 구축 개략도는 Fig. 2와 같다.

유효우량 산정을 위한 미국자연자원보호청(Natural Resources Conservation Service, NRCS)의 유출곡선지수(Curve Number, CN) 값은 환경부의 수치토지피복도와 국립농업과학원의 수치정밀토양도를 활용해 Q-GIS(Quantum GIS) 소프트웨어로 수문학적 토양군으로 분류하여 산출하였다. 유역의 직접 유출 산정은 강우-유출 관계를 이용한 합성단위도 방법 중 홍수량 산정 표준지침(ME, 2019)에서 제안하는 Clark 단위도법을 사용하였다.

Clark 단위도법은 순간단위도 원리를 활용한 유역추적방법이며, 매개변수인 도달시간과 저류상수로 단위도를 합성

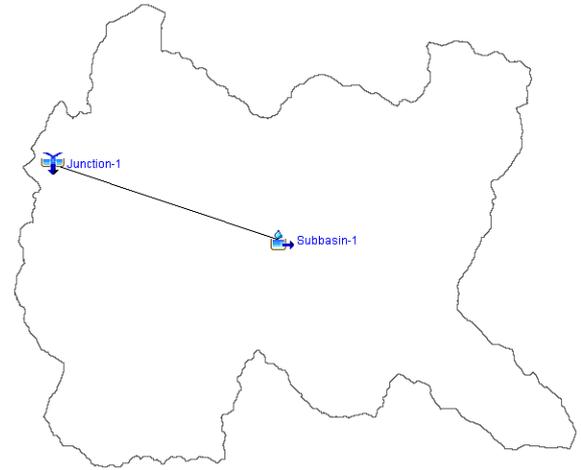


Fig. 2. HEC-HMS Model construction in Bidogyo

할 수 있는 객관적 방법이다. 하도 홍수추적은 Muskingum 방법을 사용했으며, 하도저류상수 K값은 추적구간의 홍수와 통과시간을 사용해 산정하였으며, 홍수와 저류효과 정도를 결정하는 무차원 상수인 X값은 민감도가 낮으며, 범위는 0.1부터 0.5이다. 홍수량 산정 표준지침에서 권장하는 값인 0.2를 채택하였다(ME, 2019).

3.3 매개변수 최적화

HEC-HMS는 관측된 강우자료와 유출자료로 매개변수를 자동 추정할 수 있는 기능이 있다. 매개변수 추정은 특정 지점의 관측자료와 모의 값의 최적화를 통해 매개변수의 자동 보정을 수행하며 진행된다(Shi & Song, 2009).

최적화되는 매개변수는 손실, 단위도, 기저유량, 하도추적에 관련된 매개변수 등이다(Yoon et al., 2009). 최적화 양적인 정도는 목적함수의 값으로 대표되며, 계산된 값과 관측자료 사이의 편차의 정도에 기초한다. 계산된 값과 관측값이 일치하면 목적함수의 값은 0이 된다. 자동적인 매개변수의 추정에서 중요한 사항 중 하나는 매개변수를 최적화시키기 위해 수행되는 탐색절차이다. 제약조건은 논리적으로 타당하지 않은 매개변수 값이 선택되지 않도록 설정되는 조건이다.

강우-유출모형의 보정을 위해 유역 출구점인 괴산군(비도교) 수위 관측소지점을 대상으로 HEC-HMS의 최적화 기법을 활용하여 매개변수를 산출하였다.

본 연구에서는 관측값과 모의값의 차이를 RMSE(Root Mean Square Error), NSE(Nash-Sutcliffe Efficiency), VE (Volumetric Efficiency)의 3가지 목적함수(Objective Function)를 통해 수문곡선을 분석하였다. 해당 목적함수의 식은 Eq. (3)~Eq. (5)와 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2} \quad (3)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{mean})^2} \quad (4)$$

$$VE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Q_i^{sim} - Q_i^{obs}|}{\sum_{i=1}^n Q_i^{obs}} \quad (5)$$

여기서, Q_i^{obs} 는 관측 유량값, Q_i^{sim} 는 모의된 유량값, Q_i^{mean} 은 관측유량의 평균값이며, n 은 샘플의 개수이다.

RMSE와 NSE는 관측유량값과 모의된 유량값의 차이를 제공하는 형태로 나타내는 목적함수로서, 첨두유량과 같은 오차가 크게 발생하는 값을 강조하는데 적합한 목적함수이다. RMSE는 값이 0에 가까울수록 모형의 성능이 우수하며, NSE 목적함수의 경우 평가지수가 무차원으로 활용도가 높고, 모의된 결과의 정확도가 가장 높을 때 1의 값을 나타낸다. 하지만, Q_i^{mean} 과 Q_i^{sim} 이 매우 비슷할 때, Q_i^{obs} 와 Q_i^{sim} 의 차이가 클 때와 같이 NSE의 값이 큰 음수를 나타내게 되어, Eq. (5)와 같은 새로운 목적함수를 제안하였다(Criss & Winston, 2008).

3.4 설계홍수량 산정

환경부에서 발간한 홍수량산정 표준지침은 하천과 수자원, 이에 관련된 계획·설계에 필요한 홍수량 산정방법에 대한 기술을 체계화 하고 객관적이고 표준화된 절차를 제시한다(ME, 2019).

표준지침에서는 홍수량 산정방법을 홍수량 빈도분석 방법과 강우-유출관계 모형에 의한 방법으로 구분했다. 이 중 우리나라에서 주로 실무에서는 강우-유출관계 모형에 의한 방법을 사용한다. 이는 확률강우량을 산정한 후 유출 모형을 통해 확률홍수량을 산출하는 방법이다. 또한 확률강우량 산정은 지점빈도 해석과 지역빈도 해석으로 나누어지는데 표준지침에서 권장하는 지역빈도분석 방법을 적용했다.

한국형 수문량 분석 선진화 기술 개발의 연구에서는 국내 실정에 맞는 지역빈도분석 방법을 제시했다. 전국에 설치된 강우관측소(기상청, 환경부, 한국수자원공사, 한국농어촌공사 관할)의 강우자료 중 5개 년도(L-moment 분석 최소 기준) 이상 관측자료를 보유한 지점의 시강우자료를 구축하고 검·보정을 실시하였다. 지역구분 및 최적분포형 선정, 확률수문량 추정 및 정확성 검증 등의 과정을 통해 일부관측소

(L-moment 계산 불가지역, 백령도, 울릉도 등)를 제외한 강우관측소 615개를 선정하고, 26개의 군집지역으로 구분하였으며, 최적확률분포형을 GEV 분포로 제시하였다(ME, 2019).

비도교 유역의 확률강우량 산정은 환경부에서 개발한 수문자료빈도해석프로그램(Regional Frequency Analysis of Hydrological Data, RFAHD)를 활용하였다. 연구유역인 비도교 유역은 21번 지역에 위치하여 해당 지역에 위치한 30개의 강우관측소의 강우자료로 확률강우량을 산정하였다. 기본적으로 2017년도까지 강우량만 기입되어 있어, 최근 자료를 반영하기 위해 2018년부터 2023년도까지 강우자료를 추가하여 확률강우량 산정에 활용했다.

확률강우량은 지점확률강우량과 면적확률강우량으로 구분되며, 유역면적이 25.9km^2 이상인 경우에는 면적확률강우량을 적용한다. 비도교 유역의 유역면적은 167.14km^2 이기 때문에 면적확률강우량을 적용했다. 면적확률강우량산정은 유역유출구인 비도교 수위관측소를 기준으로 유역에 대해 채택된 각 강우관측소의 확률강우량을 티센가중법을 이용해서 유역평균강우량으로 계산한 후 면적유량환산계수(Areal Reduction Factor, ARF)를 곱하여 면적확률강우량을 산정했다.

$$ARF(A) = 1 - M \cdot \exp[-(\alpha A^b)^{-1}] \quad (6)$$

여기서, $ARF(A)$ 는 유역면적 $A(\text{km}^2)$ 에 따른 면적유량환산계수이며, M , α , b 는 면적유량환산계수 회귀식의 회귀상수이다.

면적확률강우량 산정 후 강우의 시간적 변화를 반영하고, 유출모형에 적용하여 홍수량을 산정하기 위해서는 관측홍수와 같이 지속기간 내 시간적 분포를 고려한 강우주상도 작성이 필요하다. 표준지침에 따라 비도교 유역에 대한 강우의 시간적 양적 특성을 고려할 수 있도록 집중호우 기준으로 작성된 수정 Huff 방법을 적용했다. Huff 분위별 9가지 형태(확률 10~90%)의 무차원 누가곡선식 중에서 일반적으로 첨두강우강도가 해당분위 가운데에 발생하는 50%를 채택하였고, Huff 방법 분위 선정은 확률강우량도 개선 및 보완 연구(MLTMA, 2011)에 의거하여 최빈분위(2, 3분위) 중 3분위를 안정적으로 채택했다.

해당 과정을 통해 산정한 강우자료와 유역특성인자로 HEC-HMS 프로그램을 활용하여 강우-유출모의를 수행하였다. 그 결과 재현기간(2년, 10년, 30년, 50년, 80년, 100년, 200년, 500년)에 따른 지속시간(1시간~72시간) 별 홍수량을 산출하였고, 각 재현기간의 지속시간 중 최대치의 첨두유량을 보이는 값들을 설계홍수량으로 산정했다.

4. 결 과

4.1 비도교 유역의 단기 유출 특성

비도교 유역의 관측 침투홍수량과 홍수량 산정지침에서 제시된 서경대 공식의 매개변수를 활용하여 산출된 5개 호우사상의 침투홍수량을 비교한 결과 18.9%~30.0%의 차이가 나타났으며, 침투홍수량이 발생한 시간은 -2시간~0시간으로 관측값과 유사하게 모의되었다. 비도교 유역의 관측 침투홍수량과 모의를 통해 산출된 침투홍수량 결과 비교는 Table 6에 나타내었고, 수문곡선은 Fig. 3에 도시하였다. 침투홍수량 비율이 크게 산정된 것을 보았을 때, 강우-유출 모의에 활용되는 서경대 공식의 매개변수는 소규모 산지 유역인 비도교 유역에 적용하기에 한계점이 있다고 판단하여 HEC-HMS 매개변수 최적화를 통한 강우-유출 모의를 수행하였다.

비도교 유역의 관측수문곡선과 모의된 수문곡선의 정확도 분석을 위해 3가지 목적함수를 적용하였고 그 결과는 Table 7에 나타내었다. RMSE의 경우 E1이 가장 크게 산정되었는데, 이는 절대적인 유량 수치값이 다른 사상에 비해 크기 때문으로 사료된다. 수치값이 비슷한 다른 사상의 경우 각 시간대별 유량값의 차이가 적을수록 목적함수값도 작게 산정됨을 확인하였다. NSE와 VE는 비슷한 양상을 보였는데, 전체적인 형상과 침투시점이 비슷한 E1이 가장 큰 값을 보였고, 그 다음으로 E4, E5가 그 다음 큰 값을 보였다. 상승 및

Table 6. Results of flood simulation by seokyeong parameter

Events	Observation flow		Simulation flow		Peak flow rate (%)	Peak time (hr)
	Peak flow (m ³ /s)	Peak Occurrence	Peak flow (m ³ /s)	Peak Occurrence		
E1	178.40	2019-07-25 19:00	228.60	2019.07.25. 18:00	28.1	-1
E2	53.70	2019-11-18 06:00	65.30	2019.11.18. 04:00	21.6	-2
E3	67.05	2020-02-26 18:00	79.70	2020.02.25. 18:00	18.9	0
E4	43.71	2020-05-19 04:00	56.80	2020.05.19. 03:00	30.0	-1
E5	58.00	2020-06-30 10:00	70.90	2020.06.30. 09:00	22.2	-1

Table 7. Results of objective function by seokyeong parameter

Events	RMSE	NSE	VE
E1	29.0676	0.6253	0.5901
E2	13.1040	0.1162	0.1844
E3	17.7424	0.0178	0.2884
E4	8.2286	0.4229	0.3825
E5	15.6168	0.3062	0.3835

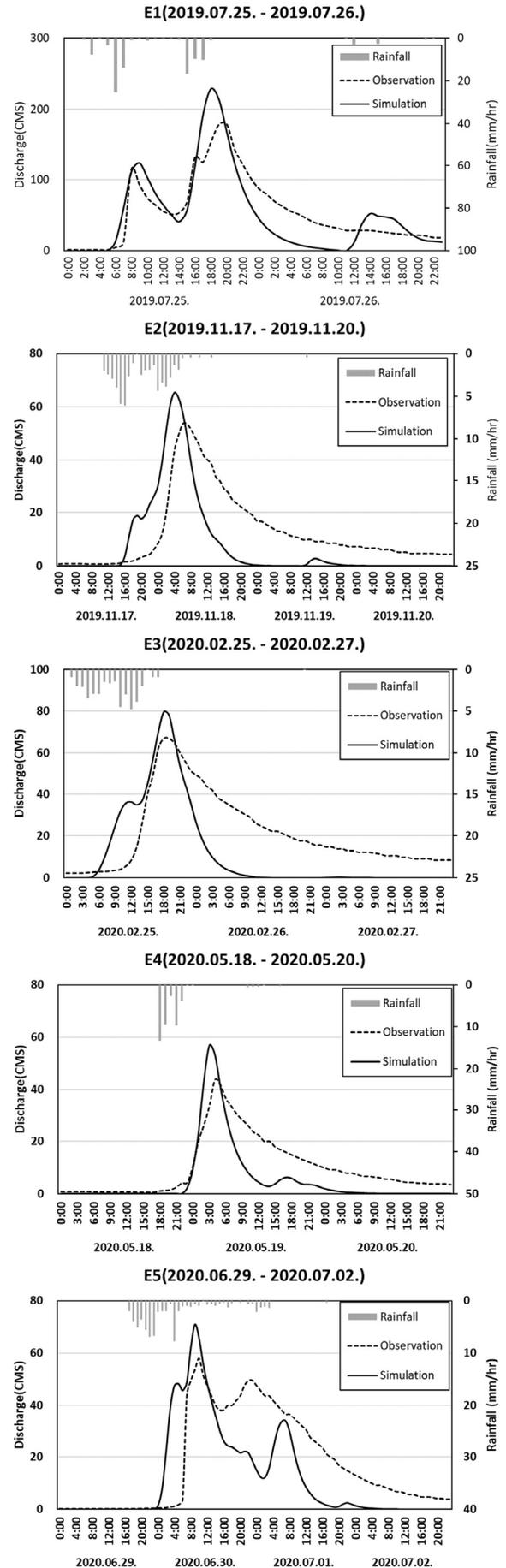


Fig. 3. Comparison of calculated and observed results

하강곡선에서 상대적으로 차이가 많이 발생하는 E2, E3는 가장 작은 값을 나타냈다.

4.2 매개변수 최적화를 활용한 모의 결과

비도교 유역의 HEC-HMS의 매개변수 최적화 결과는 Table 8과 Fig. 4와 같으며, 5개 호우사상의 침투홍수량을 비교한 결과 -0.5%~4.5%차이가 나타났으며, 침투홍수량이 발생한 시간은 -1시간~1시간으로 서경대 공식으로 모의된 결과와 큰 차이를 보이지는 않았다. 관측 침투홍수량과 모의 침투홍수량의 오차율(18.9%~30.0%)보다 관측 침투홍수량과 최적화된 매개변수를 활용하여 산출된 침투홍수량의 차이가 적어진 것을 보여준다.

최적화된 매개변수를 활용하여 산출된 수문곡선 또한 3가지 목적함수를 적용하여 분석하였으며, 목적함수 결과값은 Table 9에 나타내었다. 5개의 사상 모두 목적함수 값이 RMSE는 감소하여 0에 가까워지고, NSE와 VE는 증가하여 1에 가까워짐에 따라 결과가 개선됨을 확인하였다. 특히, 하강부 곡선의 차이가 컸던 E2, E3, E4의 경우 관측곡선과 유사한 양상을 보이며, NSE의 값이 1.6배~16.9배 상승하였으며, E1은 침투홍수량 값과 상승, 하강 양상이 매우 비슷하여 NSE 0.86의 높은 값을 나타내었다.

Table 8. Results of flood simulation by optimization parameter

Events	Observation flow		Simulation flow		Peak flow rate (%)	Peak time (hr)
	Peak flow (m ³ /s)	Peak Occurrence	Peak flow (m ³ /s)	Peak Occurrence		
E1	178.40	2019-07-25 19:00	178.20	2019.07.25. 19:00	-0.1	0
E2	53.70	2019-11-18 06:00	56.10	2019.11.18. 05:00	4.5	-1
E3	67.05	2020-02-25 18:00	68.90	2020.02.25. 19:00	2.8	1
E4	43.71	2020-05-19 04:00	43.50	2020.05.19. 04:00	-0.5	0
E5	58.00	2020-06-30 10:00	60.50	2020.06.30. 09:00	4.3	-1

Table 9. Results of objective function

Events	RMSE		NSE		VE	
	sim	opt	sim	opt	sim	opt
E1	29.0676	17.6904	0.6253	0.8612	0.5901	0.7687
E2	13.1040	10.5971	0.1162	0.4220	0.1844	0.3132
E3	17.7424	14.9818	0.0178	0.2996	0.2884	0.3990
E4	8.2286	6.3142	0.4229	0.6602	0.3825	0.4906
E5	15.6168	13.1702	0.3062	0.5065	0.3835	0.4788

sim : 서경대 공식 매개변수

opt : 최적화 매개변수

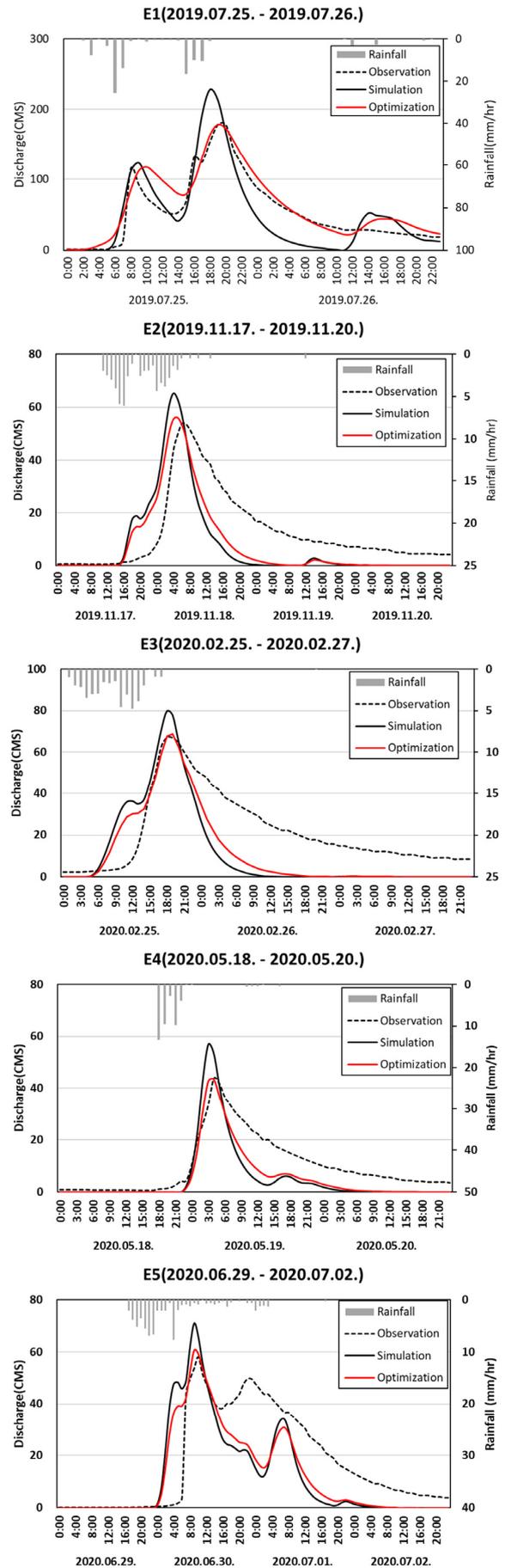


Fig. 4. Comparison of optimized and observed results

최적화된 매개변수인 도달시간(Tc)과 저류상수(K)는 Table 10과 같이 산출되었다. 각 매개변수를 평균한 값은 도달시간 2.7337, 저류상수 4.7370이며, 이는 서경대 공식으로 산정되었던 도달시간 2.68, 저류상수 3.10과 비교했을 때 HEC-HMS를 활용한 소규모 산지 유역의 강우-유출 모의 시에는 도달시간보다 저류상수가 더 큰 영향을 끼치는 것으로 보인다.

Table 10. Parameter calculated after optimization

Events	Tc	K
E1	2.7350	4.7340
E2	2.7297	4.7396
E3	2.7330	4.7368
E4	2.7358	4.7402
E5	2.7322	4.7346
Average	2.7337	4.7370

4.3 설계홍수량 산정결과

HEC-HMS의 강우-유출모의를 통해 본 연구에서 산출한 확률강우와 유역특성인자 그리고 최적화된 매개변수인 도달시간(Tc) 2.7337과 저류상수(K) 4.737을 반영하여 설계홍수량을 산출하였다. 재현기간(2년, 10년, 30년, 50년, 80년, 100년, 200년, 500년)에 따른 지속시간(1시간~72시간) 별 홍수량을 산출하였고, 각 재현기간의 지속시간 중 최대치의 침투유량을 보이는 값들을 설계홍수량으로 산정했다.

기존의 전국 하천유역 홍수량산정 보고서에서 제시된 매개변수 값을 사용하여 산정된 설계홍수량과 본 연구에서 도출한 최적화된 매개변수를 사용하여 산정된 설계홍수량을 비교하였다. 재현기간이 작을수록 보고서에서 제시된 매개변수로 산정한 결과보다 작게 산정(-10.7%)되고, 재현기간이 커질수록 홍수량 차이도 커지는 결과(17.34%)를 나타내었다. 산정된 결과값은 Table 11에 나타내었다.

Table 11. Design floods calculation result of Bidogyo

Recurrence period	Design floods calculated by report parameters (m ³ /s)	Design floods calculated by optimization parameters (m ³ /s) (%)
2yr	164.5	146.9 (-10.7)
10yr	284.2	254.9 (-10.3)
30yr	350.2	330.1 (-5.7)
50yr	379.0	368.7 (-2.7)
80yr	404.5	406.6 (0.5)
100yr	416.4	425.6 (2.2)
200yr	452.1	488.8 (8.1)
500yr	497.1	583.3 (17.3)

5. 결 론

본 연구에서는 국내 소규모 산지 유역의 홍수량 산정 시 활용되는 매개변수의 정확도를 확인하고, 홍수 위험지역에 대한 예·경보 시스템을 구축하고자 연구유역으로 선정한 비도교, 유역을 대상으로 5개의 호우사상에 대한 홍수량을 산정하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 비도교 유역의 5개 호우사상에 대해 관측 수문곡선과 모의를 통해 산출된 수문곡선을 비교한 결과 침투홍수량 값은 18.9%~30.0%의 차이가 나타났으며, 침투홍수량 발생시간은 -2~0시간의 차이를 나타냈다. 침투홍수량 값이 비교적 큰 차이를 보이기 때문에, 국내 강우-유출 모의에 활용되는 서경대 공식을 비도교 유역과 같은 소규모 산지 유역에 적용하기에는 한계점이 있다고 판단하였다.

둘째, 비도교 유역을 대상으로 HEC-HMS의 매개변수 최적화를 반영한 수문곡선과 관측 수문곡선을 비교한 결과 침투홍수량은 -0.5%~4.5%의 차이가 나타났으며, 침투홍수량 발생시간은 -1~+1시간의 차이를 나타냈다. 이는 서경대 공식을 활용한 홍수량보다 최적화된 매개변수를 활용하여 산출된 홍수량이 실제 홍수량을 더 잘 모의하는 것으로 판단된다. 서경대 공식으로 산정된 도달시간(Tc)은 2.68, 저류상수(K)는 3.10이며, 최적화를 통해 산출된 매개변수는 도달시간(Tc) 2.7337, 저류상수(K) 4.7370이다. 이를 바탕으로 결과를 분석했을 때, 도달시간 매개변수 값이 비슷하여 침투홍수량 발생시간 또한 큰 차이가 없는 것으로 생각되며, 비도교 유역과 같은 소규모 산지 유역의 침투홍수량 산정에 더 큰 영향을 미치는 매개변수는 저류상수(K)로 판단된다.

셋째, HEC-HMS의 강우-유출모의를 통해 본 연구에서 산출한 확률강우와 유역특성인자 그리고 최적화된 매개변수인 도달시간(Tc) 2.7337과 저류상수(K) 4.7370을 반영하여 설계홍수량을 산출하였다. 재현기간(2년, 10년, 30년, 50년, 80년, 100년, 200년, 500년)에 따른 지속시간(1시간~72시간) 별 홍수량을 산출하였고, 각 재현기간의 지속시간 중 최대치의 침투유량을 보이는 값들을 설계홍수량으로 산정하였다.

본 연구를 통해 산정된 설계홍수량과 기존의 전국 하천유역 홍수량 산정보고서에서 제시된 매개변수 값을 사용하여 산정된 홍수량 결과를 비교하였을 때, 본 연구에서 산정한 설계홍수량 값들이 재현기간의 기간에 비례하여 -10.7%~17.3% 차이로 산정된 것으로 확인하였다.

이는 매개변수의 차이일 수도 있지만 확률강우량을 산정할 때, 기존 전국 하천유역 홍수량 산정보고서에는 2017년까지 강우자료를 반영하였고, 본 연구에서는 2018년~2023년까지의 강우자료를 추가로 반영하였는데, 홍수량 차이

비율과 확률강우량 차이 비율의 상관관계를 분석했을 때 $R^2=0.9988$ 의 값으로 보아 최근 증가한 집중호우의 영향으로 확률강우량 값이 증가하였기 때문에 홍수량 또한 증가한 것으로 판단된다.

홍수량 산정 표준지침에서는 국내 하천의 설계홍수량 산정 시 강우-유출 관계 분석 방법에 의한 다양한 합성단위도 방법 중 일관성과 객관성이 대체로 입증되어 온 Clark 단위도법을 채택하도록 하였다. Clark 단위도법은 도달시간(T_c)과 저류상수(K) 등을 매개변수로 하며, 표준지침에서는 서경대 공식을 적용하도록 권장하고 있다. 해당 공식을 소규모 산지 유역인 비도교 유역에 적용하여 산출한 홍수량과 최적화된 매개변수로 산출한 홍수량을 비교하였을 때 최적화된 매개변수로 산출한 홍수량이 관측유량 값과 더 유사하게 산출된 것을 확인하였다. 이를 통해 홍수량 산정 표준지침에서 권장하는 서경대 공식을 국내 모든 유역에 일괄적으로 적용하기에는 한계점이 존재한다고 판단된다.

본 연구는 소규모 산지 유역의 특성이 반영된 매개변수 산정기법 개발을 위한 기초연구로 의미가 있을 것으로 보이며, 추가적인 연구를 통해 국내 소규모 산지 유역에 적합한 매개변수 산정기법을 개발하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No.NRF-2021R1I1A3054408).

References

1. Chang, H. J., Lee, H. J., Park, K. S. and Kim, S. G. (2023), Analysis of the runoff characteristics of small mountain basins using rainfall-runoff Model_DanyangIgyo in Chungbuk, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 24, No. 12, pp. 31~38.
2. Chang, H. J., Kim, S. G., Yoon, Y. H. and Kim, M. H. (2022), A study on the estimation of the design flood for small catchment in Jirisan, Journal of Korean Society Disaster Security, Vol. 15, No. 3, pp. 23~29.
3. Criss, R. E. and Winston, W. E. (2008), Do Nash Values Have Value? Discussion and Alternate Proposals. Hydrological Processes: An International Journal, Vol. 22, No. 14, pp. 2723~2725.
4. Hwang, B. G. and Yang, S. B. (2018), Analysis of stormwater and runoff characteristics in Anseongcun basin using HEC-HMS, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 19, No. 4, pp. 17~24.

5. Jeong, C. S. (2023), 2023 Flooding Status and Countermeasures, Water Journal, 2023. 09. 08., <https://www.waterjournal.co.kr/news/articleView.html?idxno=70313>
6. Kang, I. J., Choi, H. and Lee, B. G. (2001), The analysis of basin parameters using digital map. Korean Society of Subveying Geodecy, Photogrammetry And Cartography, Vol. 19, No. 3, pp. 229~236.
7. Kim, H. Y., Kim, J. B. and Bae, D. H. (2019), Estimation and evaluation on the return period of flash flood for small mountainous watersheds in the Han River basin, Journal of Korea Water Reources Association, Vol. 52, No. 4, pp. 245~253.
8. Kim, S. H., Park, M. J., Kang, S. M. and Kim, S. J. (2006), Modeling Rainfall-Runoff Simulation System of JinWie Watershed using GIS based HEC-HMS Model, Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, Vol. 9, No. 4, pp. 119~129.
9. Kim, Y. J., Kang, D. H. and Kim, B. S. (2020), A consideration of the estimation of the design flood for small basin in Gangwon Yeongdong Region, Journal of the Korean Society of Harard Mitigation, Vol. 20, No. 5, pp. 33~45.
10. Korea Meteorological Administration (KMA) (2024), Meteorological Data Opening Portal, <https://data.kma.go.kr>.
11. Lee, H. J., Shin, Y. S., Kang, D. H. and Kim, B. S. (2023), Effect of Areal Mean Rainfall Estimation Technique and Rainfall-Runoff Models on Flood Simulation in Samcheok Osipcheon (Riv.) Basin, KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research, Vol. 43, No. 6, pp. 775~784.
12. Ministry of Environment (ME) (2019), Standard Guidelines for the Flood, pp. 38-42.
13. Ministry of Environment (ME) (2020), Korea Annual Hydrological Report, p. 355.
14. Ministry of Environment (ME) (2022), Korea Annual Hydrological Report, p. 284.
15. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA) (2011), A Study on the Improvement and Complementation of Probability Rainfall, p. 178.
16. National Disaster Management Research Institute (NDMI) (2009), A Study on Flash Flood Warning System in Small Mountainous Catchments, pp. 1~135.
17. Shi, Q. and Song, K. H. (2009), Floods analysis to decision of parameters in rainfall-runoff model, Journal of Korean Association for Crisis and Emergency Management, Vol. 1, pp. 140~148.
18. Yoon, G. H., Park, M. K., Choi, B. M. and Kim, Y. J. (2009), Study on Parameter Optimization in Daegok · Sayun Dam Basins Using HEC-HMS, Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference, pp. 1103~1107.
19. Yoon, J. S., Hwang, S. H., Lee, D. R. and Kang, N. R. (2020), Operation techniques and hydrological applications of X-band dual-polarization radar for monitoring flash flood in metropolitan area, Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 20, No. 2, pp. 25~33.
20. Yu, J. U., Oh, S. C., Lee, B. and Kwon, H. H. (2022), Multi parameter optimization framework of an event-based rainfall-runoff model with the use of multiple rainfall events based on DDS algorithm, Journal of Korea Water Reources Association, Vol. 55, No. 11, pp. 887~901.