

기후변화에 따른 미래 강우유출량 예측을 위한 HEC-HMS 모델 활용 가능성 검토 연구 - 금강 대청댐 유역을 대상으로 -

김윤지* · 유지은** · 이경일* · 성현찬*** · 전성우****†

*고려대학교 환경생태공학과 박사과정학생, **고려대학교 환경생태공학과 석사과정학생,
고려대학교 오정리질리언스연구원 연구교수, *고려대학교 환경생태공학부 교수

Application of the HEC-HMS Model for Prediction of Future Rainfall Runoff in the Daecheong Dam Basin of the Geum River

Kim, Yoonji* · Yu, Jieun**, Lee, Kyungil* · Sung, Hyun Chan*** and Jeon, Seongwoo****†

*Ph.D. Student, Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

**Master Student, Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

***Research Professor, Ojeong Resilience Institute, Korea University, Seoul, Korea

****Professor, Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

ABSTRACT

In Korea, where more than half of annual precipitation (55%, 653.9mm) occurs during the rainy season (June-September), it is difficult to efficiently store and manage water resources. These challenges are likely to be exacerbated by climate change, the impact of which was demonstrated in the summer of 2020 in the form of an unprecedented long rainy season. The purpose of this study is to help establish efficient future water resource management and water-related disaster prevention measures in response to climate change. Application of the HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System) model was evaluated for simulation of rainfall runoff for the Daecheong Dam basin. During model set-up, parameter values for loss, transform and routing methods were calculated based on land cover/land use status and soil type. The calibration results for rainfall runoff at Junction-22 for the year of 2008 showed an excellent Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) value of 0.732, proving the high accuracy of the model. Simulation results for runoff volume at the same junction in 2017 using calibrated parameter values showed an acceptable NSE value of 0.535. Thus, the overall model efficiency of HEC-HMS was validated. The results of a pilot simulation of the impact of climate change on runoff volume under RCP scenarios 4.5 and 8.5 for the year 2050 forecast potential exacerbation of the seasonality in precipitation, in addition to showing a dissimilar pattern from the present, suggesting potential water management issues. Since future management methods should take into account the intensity and frequency of precipitation during the dry and rainy seasons, which vary due to climate change, validation of the HEC-HMS as a tool for predicting runoff volume in the mid- to long-term future is important.

Key words: Hydrologic Modeling, Climate Change Impact, Rainfall Runoff

†Corresponding author : eepps_korea@korea.ac.kr (02841, 145, Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, Republic of Korea. Tel. +82-2-3290-3043)

ORCID 김윤지 0000-0003-1490-0782
유지은 0000-0001-9264-1806
이경일 0000-0002-9752-1130

성현찬 0000-0003-4862-7980
전성우 0000-0001-5928-8510

1. 서론

동아시아 몬순기후의 영향으로 1981~2010년 기준 우리나라의 연평균 강수량 1,307.7 mm의 55.3%인 723.2 mm가 6월에서 8월로 정의되는 여름에 집중되었다(KMA, 2018; Park et al., 2008). 이러한 계절성 때문에 우리나라에서는 수자원 관리를 위해 우기에 댐과 저수지 내 유량을 확보하고 이를 건기에 사용하고 있다. 하지만, 강수량이 평년 대비 적어 비워둔 댐의 용수를 다 채우지 못하면 이듬해 물 부족 또는 가뭄의 원인이 될 수도 있다(Lee et al., 2019). 이는 반대로 강수량이 평년 대비 증가하거나 장마 기간이 길어질 경우, 댐의 범람 또는 홍수 발생의 원인이 될 수도 있음을 의미한다. 이와 같은 이유로 우리나라는 연평균 강수량이 세계평균 약 1.4배에 달함에도 불구하고 수자원관리의 어려움을 겪고 있다(Lee et al., 2011).

국내 수자원관리의 어려움은 기후변화로 악화될 것으로 전망되고 있는데, 실제로 1981~2010년 30년 동안 여름철 장마와 집중호우로 인해 남한의 연강수량이 증가(+54.28 mm/10년)하였다(Bae et al., 2008; Choi 2015; Jung et al., 2011; KMA, 2018). 이러한 기후변화로 인하여 유출량의 계절성이 더욱 극심해질 것이라는 전망을 한 다수의 연구결과가 발표되고 있다(Jung et al., 2013; Kim and Choi., 2013; Lee et al., 2011; Yang, 2007). KMA (2020)에 따르면 2020년 여름 장마 기간이 6월 24일을 시작으로 8월 16일 종료되었는데 이는 1973년 이후 가장 긴 장마로 기록되었다. 또한, 동년 8월 9일 발생한 태풍 ‘장미’로 인한 집중호우로 부산광역시에서는 시간당 87 mm, 대전광역시에서는 시간당 79 mm의 폭우가 발생하였다. NABO (2019)는 국내 전체 평균 자연재난 피해액의 88.4%가 태풍·호우에 해당하며, 우리나라에서는 태풍·호우 등으로 인한 홍수가 가장 큰 피해를 유발하는 재난관리 정책의 주요 대상임을 나타냈다.

이러한 기후변화로 인한 과거 관측치를 초과하는 강수량과 증가하는 불확실성으로 인해 거대규모의 홍수와 같은 자연재난 발생 가능성 또한 증가하는 실정이다. 이에 대비하고 피해를 최소화하기 위해 하천의 미래 강우유출량 모의가 필수적이다(Jin et al., 2015; Kim and Kim, 2011; Knebl et al., 2005). 예를 들어 2020년 여름과 같이 연속적인 강우 사상이 발생하게 되면 토양의 수분함유량이 포화되어 손실량이 감소하고 유효우량이 증가하게 된다(Kim et al., 2018). 유효우량의 증가는 직접유출량의 증가로 이어지게 되어 연속 강우사상의 피해는 단일 강우사

상의 피해보다 더욱 심각해질 수 있다. 결과적으로 기후변화로 인한 자연재난 발생가능성 예측을 위해선 연속 또는 극한 강우로 인해 증가하는 하천유출량에 대한 모의가 우선적으로 수행되어야 한다(Bae et al., 2011; Jeong et al., 2008; Kim et al., 2018; Kim et al., 2013; Kim et al., 2004).

강우유출량을 모의하는 연구 및 모델은 PRMS (Precipitation-Runoff Modeling System), HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modelling System), SWAT (Soil & Water Assessment Tool), ReFH (Revitalised Flood Hydrograph), SLURP (Semi-distributed Land Use-based Runoff Processes) 등이 있으며, 그 중 HEC-HMS 모델은 높은 정확도와 사용하기 편한 GUI 등의 장점을 가지고 있어 널리 사용되는 모델이다. HEC-HMS 모델을 활용하여 강우유출량을 모의한 국외연구들이 다수 존재하고 그 적합성을 인정받았다(Chu and Steinman, 2009; Emam et al., 2016; Meenu et al., 2013; Nyaupane et al., 2018; Vaze et al., 2010). 하지만 국내의 경우 대부분 모델을 현 기후체계에서 발생하는 단일강우 사상에 대한 모의에 활용하는 것에 그치고 있다(Hwang and Yang, 2018; Joo et al., 2014). 따라서 본 연구의 목표는 미래 기후변화 시나리오의 강수량 변동에 따른 강우유출량 변화를 예측하기 위해 HEC-HMS 모델을 국내 대상지에 적용하고 활용 가능성을 검토하는 것이다. 이를 통하여 HEC-HMS 모델의 국내 적용과 활용 가능성이 검증될 경우, 향후 단일강우사상에 대한 모의에 그치지 않고, 중·장기 미래의 하천유출량을 모의하여 장기기간에 걸친 변화 추세를 분석하는 연구에 쓰일 유용한 도구가 될 것이라 기대된다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 연구 대상지

본 연구의 대상지로 선정된 대청댐 유역은 대한민국 3대 강 중 하나인 금강의 중상류를 포함하는 유역이다(Fig. 1). 대청댐 유역의 면적은 2,608 km²로 금강 유역 전체 면적 9,914 km² 중 약 1/4 이상을 차지하며, 10개 행정구역(대전광역시 대덕구, 동구, 유성구; 충청북도 청주시, 보은군, 옥천군; 충청남도 금산군, 영동군; 경상북도 상주시; 전라북도 무주군)에 걸쳐있다. 또한, 이 지역은 2020년 여름철 최장 장마의 최대 피해지역 중 하나로 추후 기후변화로 인한 피해가 악화될 수 있을 것으로 판단된다(KMA,

2020). 특히 해당 유역의 하류에 위치하는 대청호는 상류 지역의 하천 주변부 지면에서 유입되는 부영양염으로 인한 녹조 발생 등의 수질 문제를 지속적으로 겪고 있어 인근 지역의 식수원 확보에 어려움을 주고 있으며, 홍수발생 시 비점오염원 다량 유입의 문제를 겪어 강우유출량에 대한 모의와 관리의 필요성이 두드러지는 지역이라 할 수 있다 (Jung et al., 2002; Kwon et al., 2002).

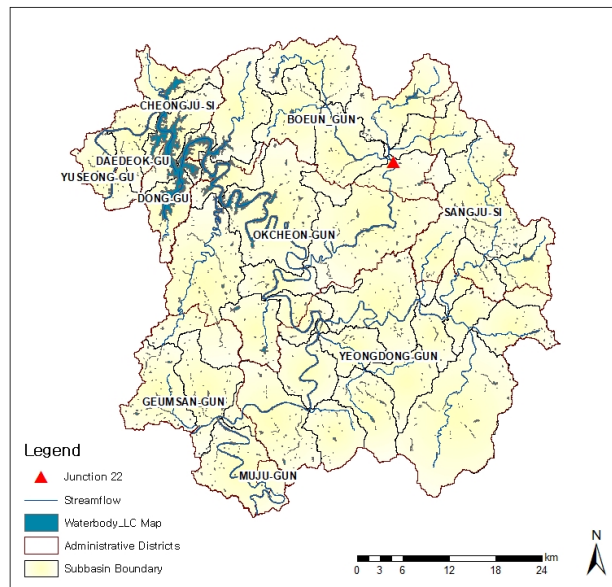


Fig. 1. Study site

2.2 HEC-HMS 모델

HEC-HMS 모델은 미국 육군공병단 수문연구소(U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, HEC)에서 유역 시스템 전체의 수문 과정을 모의하도록 개발된 모델로 단위도 계산 및 수문학적 홍수추적이 가능한 모델이다(Hydrologic Engineering Center, 2018).

HEC-HMS에서 고려하는 기본 수문학적 요소에는 유역 출구에서 유출 수문곡선을 갖는 소유역(sub-basin)과 상류 단의 유입 수문곡선으로부터 하류단의 유출 수문곡선을 도출해주는 하도구간(reach), 둘 이상의 유입 수문곡선이 합쳐져 하나의 유출 수문곡선을 도출하는 합류점(junction), 유입은 있으나 유출이 없는 함몰점(sink) 등이 있다. 이러한 수문학적 요소들을 연결하는 유역모델(Basin Model)과 기상자료를 입력 및 처리하는 기상모델(Meteorologic Model),

모의 기간 및 간격을 설정 및 조정하는 제어지정모델(Control Specifications Model)을 통하여 유역의 강우유출량을 모의한다.

본 연구에서는 HEC-HMS 4.5버전을 사용하였으며, 이 버전은 관측된 강우와 유량자료가 존재할 때 선택된 유출 매개변수 값들에 대한 최적화(Optimization) 기능을 제공한다. 최적화 기능을 이용하면 목표지점의 수문곡선 계산을 위한 최적의 매개변수 값들의 조합을 도출할 수 있다.

2.3 강우유출량 모의 방법 및 자료

강우유출 모의를 위한 HEC-HMS 초기 설정을 위해 대상유역을 수치표고모델(DEM)을 활용하여 총 38개의 소유역으로 구분하고 20개의 합류점과 19개의 하도구간으로 연결하여 유역모델을 구축하였다. 구축된 유역모델의 강우손실, 유역추적, 하도추적을 위한 매개변수 계산법을 선정하고, 그에 따라 소유역별 매개변수 값을 산출하였다.

본 연구에서는 강우사상 발생시의 초기손실을 계산을 위해 토양의 피복상태와 토지이용상태 및 선행강수량에 따라 유출을 결정짓는 SCS-CN 방법을 적용하였다(Lee and Bae, 2004). 이를 위해 환경부가 제공하는 2019 세분류 토지피복지도와 국립농업과학원에서 제공하는 수치정밀토양도 자료를 기본 자료로 활용하여 「홍수량 산정 표준지침」의 산정방법에 따라 소유역별 면적 가중치를 둔 평균 유출곡선지수와 MOE(2013)의 기준에 따른 불투수 면적률을 산정하였다.

강우손실 분석에서 산정된 유효우량을 직접유출로 변환하는 과정은 홍수유출 분석에 있어 가장 중요한 요소이며, 이를 유역추적에 활용한다(Hydrologic Engineering Center, 2018). 소유역별 직접유출량 산정의 경우 Clark 단위도법을 채택하였는데, 이는 순간단위도 원리를 이용한 유역추적방법으로 유역의 도달시간(T_c)과 유역의 저류 능력을 나타내는 저류상수(K) 2개의 매개변수만으로 단위도를 합성할 수 있는 객관적인 방법이다(MOE, 2019). 도달시간과 저류상수를 산출하는 다양한 공식 중 우리나라 하천유역의 유출특성을 대변하기 위해 국내 수문관측자료를 이용하여 개발된 서경대 도달시간공식(식 1)과 저류상수공식(식 2)을 이용하였다.

$$T_c = 0.339 A^{0.282} \frac{L^{0.318}}{H^{0.078}} \quad (1)$$

여기서 T_c 는 도달시간(hr), A 는 유역면적(km^2), L 은 유로연장(km), H 는 고도차(m, 유역 최원점 표고와 홍수량 산정지점 표고의 차)을 의미하며,

$$K = 1.075 \frac{L^{0.472}}{A^{0.188}} T_c^{0.655} \quad (2)$$

여기서 A 는 유역면적(km^2), L 은 유로연장(km), T_c 는 도달시간(hr)을 의미한다(MOE, 2019).

하도구간으로 들어오는 유입수문곡선을 하도구간에서 나가는 유출수문곡선으로 전환시키는 절차인 하도추적은 Muskingum 방법을 통해 수행하였다(Hydrologic Engineering Center 2018). Muskingum 방법은 하천의 한 구간을 통과하는 동안 그 구간내 하천 저류량에 의해 침투유량의 크기가 얼마나 감소되며 시간이 얼마나 지체되는지를 밝혀내는 방법이다. 이때 매개변수는 하도저류상수 K 와 저류효과 정도를 결정하는 가중계수 x 이며, x 값은 민감도가 낮으므로 본 연구에서는 0~0.5의 범위 중 중간값인 0.2로 채택하였다(MOE, 2019).

채택된 산정방법들을 통한 매개변수별 값 산출을 위해 ArcGIS 10.5 프로그램을 활용하였고, 국가수자원관리종합정보시스템에서 제공하는 2007-2009년 하천 유량 관측자료를 기반으로 모델을 보정하였다. 모델 보정의 경우 목적 함수점의 유출량에 대하여 실측치에 가장 근사한 값을 도출하는 최적 매개변수 조합 추정방법인 모델 탐색 최적화 기능을 병행하였다. 이때 매개변수 최적화는 매개변수별 최소 및 최대 경계값을 절대 제약조건으로 설정하였고, 보정 후 2017년 강우 유출량 모의결과를 실제 관측자료와의 비교하여 검정함으로써 미래 강우유출량 모의를 위한 HEC-HMS 모델 활용 가능성을 확인하였다. 보정과 검정의 정확도는 모델 효율지수인 Nash-Sutcliffe Efficiency(NSE)를 계산하는 것으로 확인하였다(식 3).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{mean})^2} \quad (3)$$

여기서 Y_{obs} 는 하천유량 관측값, Y_{sim} 는 모델의 하천유량 예측값, Y_{mean} 는 하천유량 관측값의 평균을 의미한다(Moriasi et al., 2007).

모델 보정과 검정에 활용된 NSE는 모델 예측값과 관측값을 비교하여 상대적 편차 정도를 결정하는 정규화된 통계 기법이다(Gupta and Kling, 2011; Moriasi et al., 2007). 편차 정도 결정을 위해 표본공분산행렬에 모형공분산행렬이 들어맞는 정도를 나타내는 적합도 지수를 이용한다. NSE는 $-\infty$ 와 1.0 사이의 값으로 1.0에 가까워질수록 예측값과 관측값의 차이가 작다. 일반적으로 0.0에서 1.0 사이의 양의 값은 허용 가능한 수준으로 간주되지만, 모델의 효율 범위와 신뢰구간에 대한 정의는 연구에 따라 상이한 것으로 나타난다. 본 연구에서는 그중 가장 최신의 연구를 기준으로 하여 모의 효율성을 검증할 신뢰구간을 Table 1과 같이 정리하였다(Moriasi et al., 2007).

Table 1. Criteria for evaluating model performance based on Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) values

Reference	Criteria for performance ratings			
	Poor	Fair	Good	Very good
Moriasi et al., 2007	≤ 0.50	$0.50 < \text{NSE} \leq 0.65$	$0.65 < \text{NSE} \leq 0.75$	$0.75 < \text{NSE} \leq 1.00$

마지막으로 기후변화가 미래 강우유출량에 미치는 영향을 확인하기 위해서 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에 따른 2050년의 강우유출량을 시범적으로 모의하였고 이를 위해 기상청에서 제공하는 미래 기후 시나리오인 MME5s의 일별 강수량 자료를 사용하였다. MME5s는 한반도 기후변화 대응 지원을 위해 개발된 1km 공간해상도를 지닌 상세 지역 기후변화 시나리오이며 5개의 지역기후모델(HadGEM3-RA, RegCM4, SNURCM, GRIMs, WRF)을 통계적으로 상세화하여 재생산함으로써 하나의 기후변화 모델이 가지는 불확실성을 낮추고 신뢰수준을 높인 자료이기 때문에 선택되었다(Kim et al., 2019). 격자자료로 제공되는 MME5s RCP4.5와 RCP8.5 시나리오의 일별 강수량을 ArcGIS 10.5 프로그램을 이용, 모델에서 도출된 38개 소유역별 평균값을 계산하여 입력자료로 활용하였다. Fig. 2는 본 연구의 결과로서 도출되는 미래 강우유출량의 주요 인자가 되는 시나리오별 2050년 강수량의 변화를 나타낸 것이며, Table 2는 이를 3개월씩 나누어 계절별로 나타낸 것이다. 여기서는 대상지 전역의 강수량 변화 추세에 대한 이해를 돕기 위해 모델의 입력자료로 활용된 38개 소유역별 강수량이 아닌 대상지 전역에 대한 평균 일별 강수량으로 표시하였으며, 이를 모의결과에 대한 분석에 활용하였다.

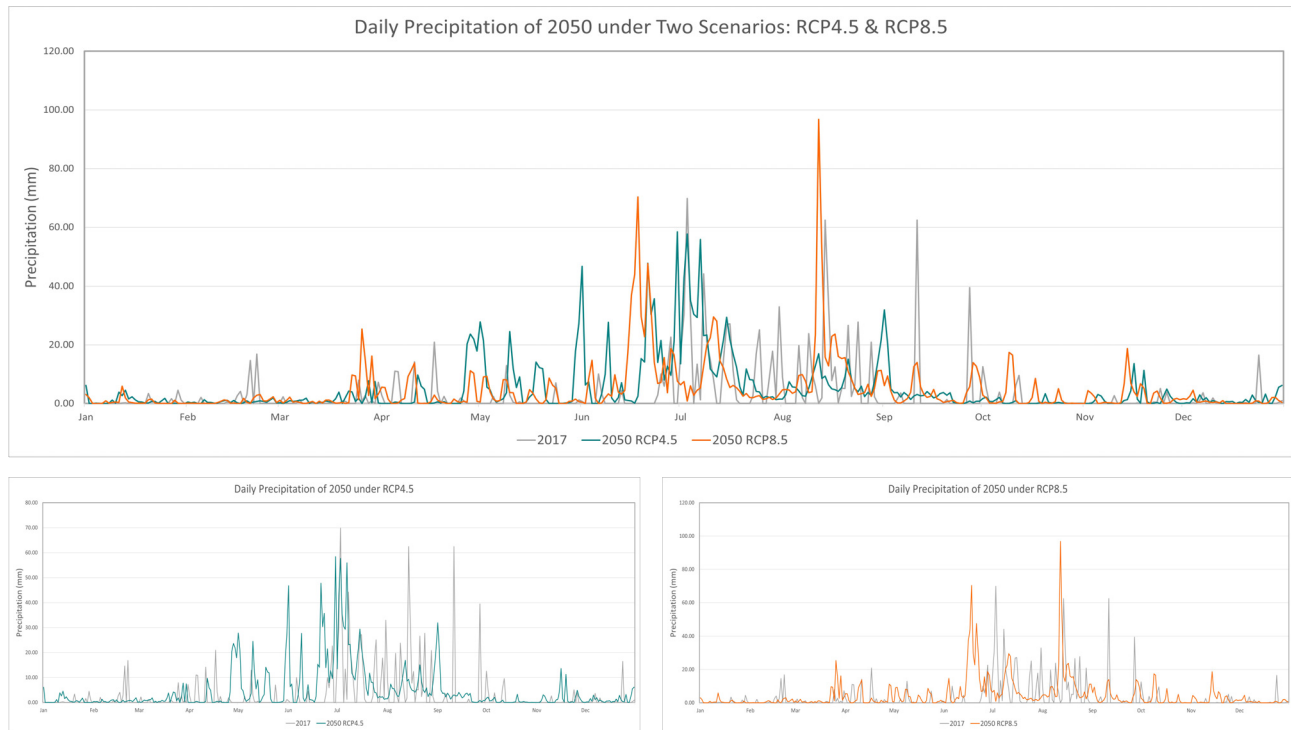


Fig. 2. Daily precipitation of 2050 under two scenarios RCP4.5 and RCP8.5

Table 2. Seasonal average precipitation (mm) for each time period

	Spring Mar - May	Summer Jun - Aug	Fall Sep - Nov	Winter Dec - Feb	All Year
2017	1.32	8.65	1.75	0.91	3.18
2050 - RCP4.5	4.01	12.41	2.01	0.91	4.87
2050 - RCP8.5	2.86	11.91	2.90	0.70	4.62

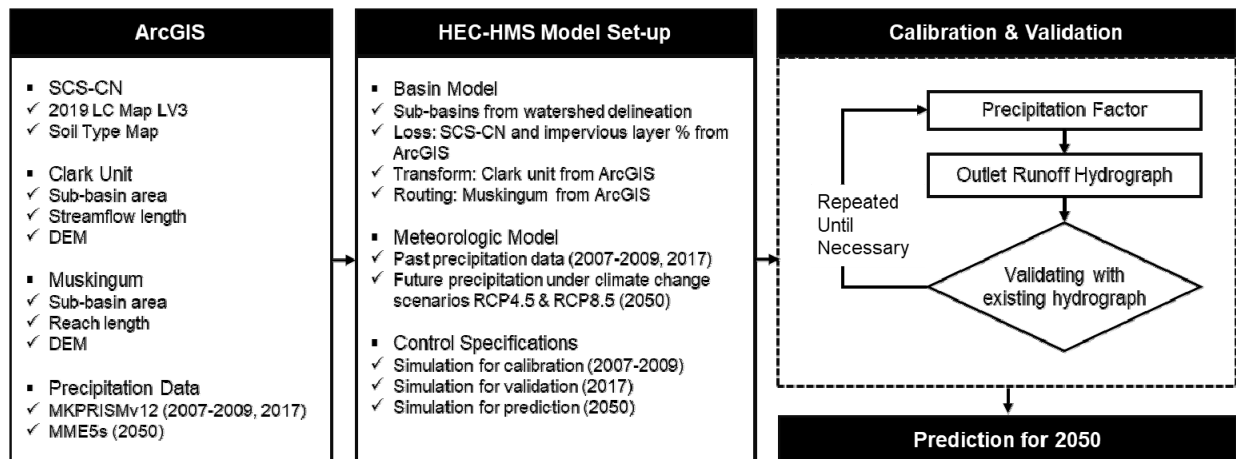


Fig. 3. Research flow using HEC-HMS model

Fig. 3은 HEC-HMS 모델 구축에서부터 보정 및 검정 단계를 거쳐 미래 강우유출량을 시범 모의하는 본 연구의 전체 흐름도를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1 모델의 보정 및 검정 결과

대상지 내 충청북도 보은군에 위치한 수위-유량관측소 보은군(기대교)와 가장 근접한 지점의 합류점인 J-22 (Fig. 1의 Junction 22)를 기준으로 2007-2009년에 대하여 1년 단위로 자동 최적화 기능을 병행하여 보정한 결과, 2008년의 모의 값이 가장 우수한 최적화 값을 나타냈다. Fig. 4는 보정된 HEC-HMS 모델이 모의한 2008년 강우유출량을 나타낸 것으로, 자동 최적화 기능을 통해 보정된 변수는 합류점 J-22 주변 유역의 SCS-CN와 Muskingum의 지연상수 K였다. Table 1에 정리된 신뢰구간 기준에 따르면, 2008년 하천유출량 모의결과 보정값의 NSE는 0.732로 우수한 신뢰성을 나타내는 것으로 확인되었다(Table 3).

Fig. 5는 2008년 자료를 기반으로 보정된 매개변수들을 반영하여 2017년 하천유출량을 모의한 결과를 나타낸 것으로, NSE 값이 0.535로 양호하게 나타났다(Table 3). 보정 및 검정 단계에서 도출된 NSE 값($NSE_{calibration} = 0.732$; $NSE_{validation} = 0.535$)을 기준으로 본 연구를 통해 구축된 모델이 미래의 하천유출량을 유사하게 모의할 수 있을 것이라는 가능성을 확인하였다.

본 연구에서는 기후변화에 따른 중·장기 미래의 하천유출량 모의를 위한 HEC-HMS 활용성 검증을 최종 목표로 하여, 최적화 단계에서의 기준을 첨두유량(peak discharge)이 아닌 전체 유량(discharge volume)으로 설정하여 수행하였다. 따라서, 전체 유량에 대한 모의결과와 NSE 값이 양호하게 도출되었으나, 첨두유량을 더 정확하게 모의하는 데에는 한계가 존재했다. 향후 단일강우사상에 의한 하천유출량 모의 연구를 진행할 경우, 최적화 기능의 기준을 고도화하여 재설정할 필요가 있다. 또한, 본 연구에서는 모델 매개변수인 SCS-CN을 최적화하는 과정에서 대상지 전역을 대상으로 일괄 최적화하도록 설정하였으나 추후 소유역별 최적의 매개변수 조합을 도출하여 NSE 값을 보완하는 추가적 연구를 수행할 예정이다.

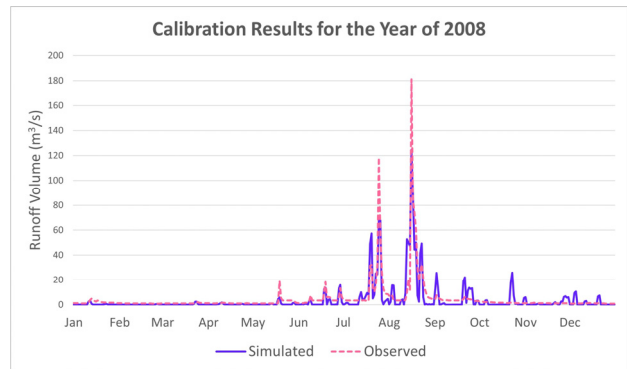


Fig. 4. Calibration results for the year of 2008: simulated and observed runoff volume

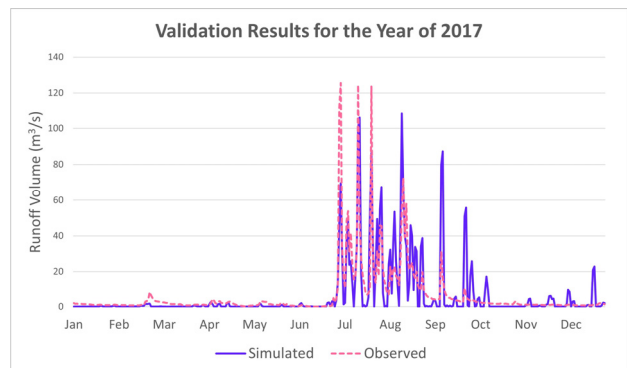


Fig. 5. Validation results for the year of 2017: simulated and observed runoff volume

Table 3. Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) values and ratings for calibration and validation results

	Period	NSE	Performance rating
			(Moriasi et al., 2007)
Calibration	2008	0.732	Good
Validation	2017	0.535	Fair

3.2 미래 강우유출량 모의 결과 및 고찰

보정 및 검정 단계를 거친 HEC-HMS 모델로 합류점 J-22에 대하여 RCP4.5와 RCP8.5에 따른 2050년 한해의 일평균 하천유출량(m^3/s)을 모의한 결과는 다음과 같다

(Fig. 6). 모의 기간에 대한 일별 유출량의 평균값은 2017년 관측값($6.53 \text{ m}^3/\text{s}$) 대비 RCP4.5에서는 $4.24 \text{ m}^3/\text{s}$ 증가한 $10.78 \text{ m}^3/\text{s}$ 로, RCP8.5에서는 $2.83 \text{ m}^3/\text{s}$ 증가한 $9.35 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 나타났다. 기후변화로 악화될 것으로 전망되고 있는 계절성에 따른 하천유출량 변동 분석을 위하여 2050년 한해의 기간에 대해 모의된 일평균 유출량을 3개월씩 계절별로 나누어 분석해 본 결과는 Table 4과 같다.

전반적으로 겨울(12~2월)과 봄(3~5월)의 건기 동안 하천유출량이 2017년 관측값 대비 감소할 것으로 나타났는데, 특히 RCP4.5 시나리오에서 나타난 결과보다 RCP8.5 시나리오에서 더욱 이러한 현상이 극심할 것으로 예측되었다. 반면 우리나라의 우기로 분류되는 6~8월의 경우 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에서 각각 일별 유출량의 평균값이 $12.60 \text{ m}^3/\text{s}$, $6.05 \text{ m}^3/\text{s}$ 증가하는 추세를 나타냈다. 가장 주목할만한 차이점은 우기 이후 가을에 해당하는 9~11월에서 발견되었다. 2017년의 경우 9월부터 11월은 우기 이후 장마가 어느 정도 잦아들고 이에 따라 강우유출량이 감소하는 시기로 나타났음에도 불구하고 2050년 모의결과는 여전히 높은 유출량을 보여 현재와 다른 경향을 보였다. 가을 유출량 증가의 변화는 RCP8.5에서 RCP4.5보다 더 극심하게 나타날 것으로 예측되었다(Fig. 7). RCP 시나

리오별 2050년 강수량의 변화를 나타낸 Fig. 2와 계절별로 분석한 Table 2와 비교하여 분석하면, RCP4.5와 RCP8.5에서 모두 증가할 것으로 전망된 강수량이 Fig. 6과 Table 4가 나타내는 2050년 가을 강우유출량 증가의 원인임을 확인할 수 있다.

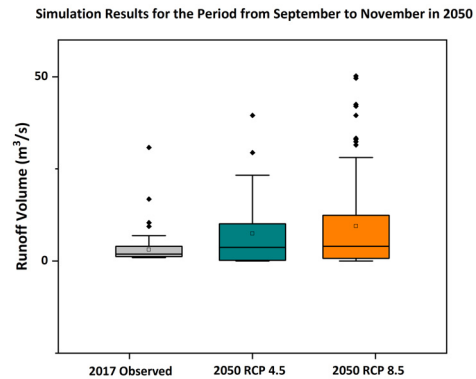


Fig. 7. Simulation results of runoff volume for 2050 September to November under RCP scenarios 4.5 and 8.5, in comparison to the observed values of 2017.

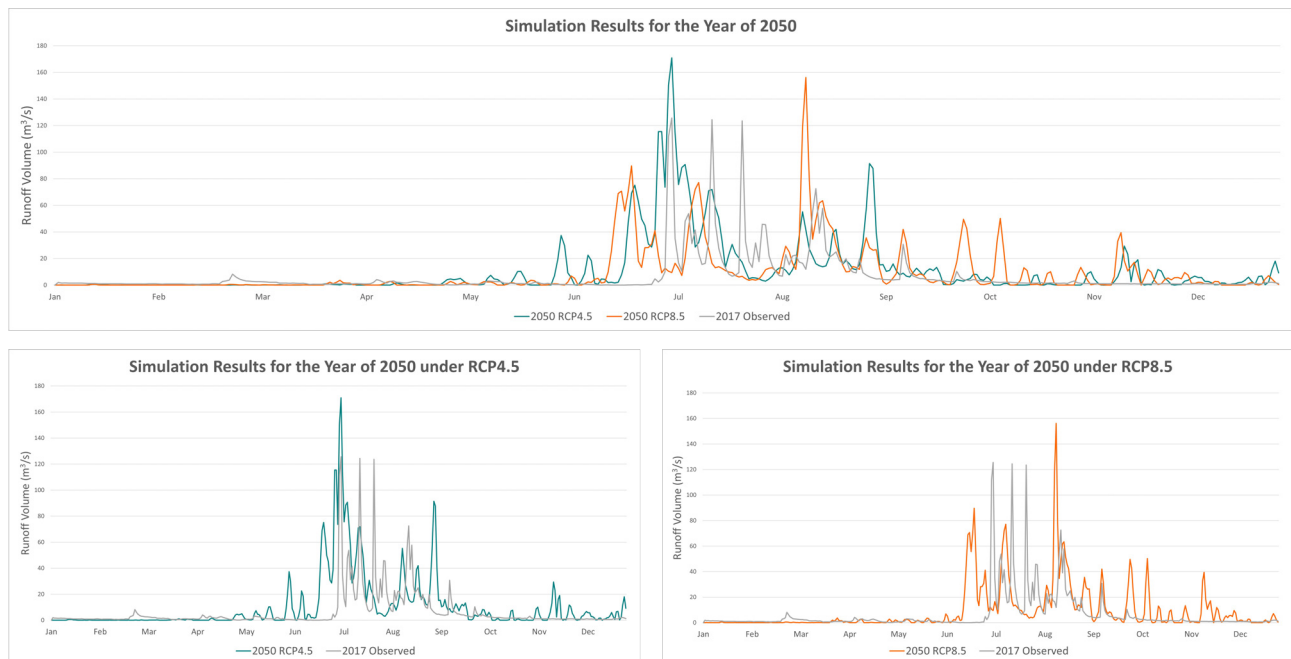


Fig. 6. Simulation results of runoff volume for the year of 2050 under RCP4.5 and RCP8.5 – compared to the observed values in 2017.

Table 4. Seasonal average daily runoff volume (m³/s) for each time period

	Spring	Summer	Fall	Winter	All Year
	Mar - May	Jun - Aug	Sep - Nov	Dec - Feb	
2017	1.48	20.05	3.09	1.35	6.53
2050 - RCP4.5	1.45	32.65	7.46	1.28	10.77
2050 - RCP8.5	0.79	26.10	9.47	0.88	9.36

3.3 미래 수자원 관리 활용방안

HEC-HMS 모델을 활용하여 도출된 2050년 한 해에 대한 RCP 시나리오별 강우유출량 모의결과를 종합적으로 분석한 결과, 현재에도 나타나는 건기 및 우기의 계절성이 기후변화로 인하여 추후 더 악화될 가능성과 현재와 다른 강우 패턴의 발생으로 인한 하천유출량 변동이 일어날 가능성이 확인되었다. 특히 가을(9~11월)의 강우유출량 대 폭 증가가 예측되었기 때문에, 방류량과 하천 유량이 만나 홍수 또는 범람이 발생 될 수 있으므로 댐에 저장된 물을 하천으로 방류하는 시기와 양을 조정해야 할 것이다. 이와 더불어 겨울(12~2월)과 봄(3~5월)의 강우유출량이 더욱 감소할 것으로 예측된 바, 적정 방류량을 늘리는 등 하천 건천화 방지를 위한 댐관리 및 운영 방안을 고려할 필요가 있다.

결과적으로 기후변화를 고려한 미래 수자원관리 및 수재해 예방대책 수립을 위해서는 우선적으로 기후변화의 영향으로 증가하는 홍수량과 감소하는 갈수량에 따른 하천유량 변화의 사전 예측이 중요하다고 할 수 있다. 다만, 정책 수립을 위해서는 단일시점을 기준으로 하기보다 장기간의 변화를 예측할 경우, 결과를 하천지류 건천화, 상습침수피해 및 수자원 공급능력 저하 등에 대비하는 재해 예방형 도시계획 수립, 자연재해위험개선지구 지정·관리, 식수 및 용수 확보대책 등의 정책 및 제도마련에 활용할 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 효율적인 미래 수자원관리 및 수재해 예방대책 수립에 도움을 주기 위하여 금강 대청댐 유역을 대상으로 강우유출량 모의를 위한 HEC-HMS 모델 활용 가능성을 평가하였다. 강우유출량 모의를 위하여 대상지 내 토지피복 및 이용 현황과 토양도 등을 기반으로 강우손실, 유역추적, 하도추적 계산을 위한 매개변수 값을 산출하여

모델에 적용하였다. 2008년을 기준으로 모델 매개변수 값들을 보정한 결과, 최종적으로 모의된 합류점 J-22의 강우유출량은 2008년 관측값과 비교했을 때 0.732의 우수한 NSE 값을 나타내며 모델의 높은 신뢰성을 증명했다. 보정된 매개변수 값을 적용하여 동일지점에 대해 2017년의 강우유출량을 모의한 결과, NSE=0.535로 양호한 예측도를 나타냈다. 양호한 예측도를 나타내는 모델을 활용하여 2050년 한 해에 대해 RCP4.5와 RCP8.5에 따른 영향을 시범 모의해본 결과, 현재의 계절성이 악화되는 기간과 현재와 다른 양상을 보이며 현재 기준에 맞춰 우기에 댐과 저수지에 물을 저장하고 건기에 방류하는 수자원관리 방식을 유지했을 경우 발생할 수 있는 다양한 문제들을 암시하는 하천유량의 변동 추세를 확인할 수 있었다. 미래 수자원관리 방식은 기후변화의 영향으로 변화하는 건기 및 우기와 강수량 강도 및 빈도에 맞춰 변화하여야 할 것이다.

본 연구는 기후변화에 대응하는 수자원관리 대책 수립을 위한 도구로써 HEC-HMS 모델의 정확도 검증 및 미래의 강우유출량 예측을 위한 활용 가능성을 평가하였다는 것에 의의가 있다. 연구결과를 통해 미래 강우량예측을 위한 유의미한 결과가 도출되었지만 일괄최적화 및 단일시점 분석을 통한 시범연구로서, 2050년 단일시점에 대해 강우유출량을 모의하였기 때문에 장기간의 정량적인 수치가 고려되어야 하는 미래의 수자원 관리정책에 활용하는 데는 한계가 있다. 추후 개별 변수 최적화를 통한 최적의 매개변수 조합 도출 및 중기(2041~2070) 및 장기(2071~2100) 미래를 포함한 다중시점 모의를 수행할 경우 미래의 댐 관리 및 운영 방안 등에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2019년도 대한민국 정부(미래창조과학부)의 재원으로 시행하는 한국연구재단 국제협력사업의 지원으로 수행된 연구결과임(과제번호: 2018K1A3A7A0308984212).

References

- Abushandi E, Merkel B. 2013. Modelling rainfall runoff relations using HEC-HMS and IHACRES for a single rain event in an arid region of Jordan. *Water Resources Management* 27: 2391-2409.
- Ahearn DS, Sheibley RW, Dahlgren RA, Anderson M, Johnson J, Tate KW. 2005. Land use and land cover influence on water quality in the last free-flowing river draining in the western Sierra Nevada, California. *Journal of Hydrology* 313: 234-247.
- Bae DH, Jung IW, Lee BJ, Lee MH. 2011. Future Korean water resources projection considering uncertainty of GCMs and hydrological models. *Journal of Korea Water Resources Association* 44(5): 389-406. (In Korean)
- Bae DH, Jung IW, Chang HJ. 2008. Potential changes in Korean water resources estimated by high-resolution climate simulation. *Climate Research* 35: 213-226.
- Choi GY. 2015. Spatio-temporal changes in seasonal multi-day cumulative extreme precipitation events in the Republic of Korea. *Journal of the Korean Association of Regional Geographers* 21(1): 98-113. (In Korean)
- Chu X, Steinman A. 2009. Event and continuous hydrologic modeling with HEC-HMS. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 135(1): 119-124.
- Emam AR, Mishra BK, Kumar P, Masago Y, Fukushi K. 2016. Impact assessment of climate and land-use changes on flooding behavior in the upper Ciliwung River, Jakarta, Indonesia. *Water* 8(12): 559.
- Gyawali R, Watkins DW. 2013. Continuous hydrologic modeling of snow-affected watersheds in the Great Lakes basin using HEC-HMS. *Journal of Hydrologic Engineering* 18(1): 29-39.
- Gupta and Kling. 2011. On typical range, sensitivity, and normalization of mean squared error and Nash-Sutcliffe Efficiency type metrics. *Water Resources Research* 47(10). doi:10.1029/2011WR010962, 2011.
- Halwatura D, Najim MMM. 2013. Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. *Environmental Modelling & Software* 46: 155-162.
- Hwang BG, Yang SB. 2018. Analysis of stormwater and runoff characteristics in Anseong basin using HEC-HMS. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society* 19(4): 17-24. (In Korean)
- Hydrologic Engineering Center. 2018. Hydrologic Modeling System; HEC-HMS, User's Manual. U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center. Davis, California.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. IPCC. Geneva, Switzerland.
- Jeong SM, Seo HD, Kim HS, Han KH. 2008. Sensitivity Assessment on Daecheong Dam basin streamflows according to the change of climate components - based on the 4th IPCC report. *Journal of Korea Water Resources Association* 41(11): 1095-1106. (In Korean)
- Jin H, Liang R, Wang Y, Tumula P. 2015. Flood-runoff in semi-arid and sub-humid regions, a case study: a simultaion of Jianghe watershed in Northern China. *Water* 7(9): 5155-5172.
- Joo JW, Kjeldsen T, Kim HJ, Lee HS. 2013. A comparison of two event-based flood models (ReFH-rainfall runoff model and HEC-HMS) at two Korean catchments, Bukil and Jeungpyeong. *KSCE Journal of Civil Engineering* 18(1): 330-343
- Jung IW, Bae DH, Lee BJ. 2013. Possible change in Korean streamflow seasonality based on multi-model climate projections. *Hydrological Processes* 27: 1033-1045.
- Jung IW, Bae DH, Kim G. 2011. Recent trends of mean and extreme precipitation in Korea. *International Journal of Climatology* 31(3): 359-370
- Jung TS, Hwang JH, KIM TS, LEE HG. 2002. Three-dimensional modeling of water circulation of Lake Daechung during flood event. *Proceedings of KSCE 2002 Convention. Korean Society of Civil Engineers*. p.1597-1600

- Kim DH, Han DG, Kim HS. 2018. Analysis of cases and prospects of continuous heavy rain on the Korean Peninsula. Water for future published by Korea Water Resources Association 51(10): 38-43 (In Korean)
- Kim JS, Choi JS, Choi CU, Park SY. 2013. Impacts of changes in climate and land use/land cover under IPCC RCP scenarios on streamflow in the Hoeya River Basin, Korea. Science of Total Environment 452-453: 181-195.
- Kim JS, Choi CU. 2013. Impacts of changes in climate and land use/land cover change under climate change scenario on streamflow in the basin. Journal of the Korean Society for Geospatial Information System 21(2): 107-116. (In Korean)
- Kim JP, Kim GW. 2011. The impact of climate change on the trends of precipitation effectiveness ratio and runoff data in South Korea. Journal of Korea Water Resources Association 44(8): 683-694. (In Korean)
- Kim SH, Lee JH, KIM HB, Heo JH. 2019. A study on estimation of rainfall quantile for Hangang river basin using climate change ensemble scenarios (MME5s) for South Korea. Proceedings of KSCE 2019 Convention. Korean Society of Civil Engineers. p.232-234. (In Korean)
- Knebl MR, Yang ZL, Hutchison K, Maidment DR. 2005. Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. 2005. Journal of Environmental Management (75): 325-336.
- Korea Meteorological Administration. 2020 Sept 09. Weather Characteristics in Summer 2020. (In Korean)
- Korea Meteorological Administration. 2018 Dec. Climate Change Forecast Analysis Report for Korean Peninsula. (In Korean)
- Kwon YH, Han SI, Lee JB. 2002. Pollution loadings in DaeChungHo watershed. Journal of Korean Society of Water and Wastewater 16(5): 581-595. (In Korean)
- Lee MH, Im ES, Bae DH. 2019. Future prediction in inflow of major multi-purpose dams in South Korea. Journal of Wetlands Research 21(5): 107-116. (In Korean)
- Lee SH, Kim EK, Heo IH. 2011. A Study on variability of extreme precipitation by basin in South Korea. Journal of the Korean Association of Regional Geographers 17(5): 505-520. (In Korean)
- Lee SH, Bae SK. 2004. Estimation of precipitation recharge in the Pyungchang river basin using SCS-CN method. Journal of the Environmental Sciences 13(12): 1033-1039. (In Korean)
- Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. American Society of Agricultural and Biological Engineers 50(3): 885-900.
- Meenu R, Rehana S, Mujumdar PP. 2012. Assessment of hydrologic impacts of climate change in Tunga-Bhadra river basin, India with HEC-HMS and SDSM. Hydrologic Processes. doi: 10.1002/hyp.9220
- Ministry of Environment. 2019. Standard Guidelines for Calculating Flood Volume.
- Ministry of Environment. 2013. Research for national impervious area rate survey and its improvement.
- National Assembly Budget Office. 2019. Disaster damage support system status and analysis of financial needs. (In Korean)
- Nyaupane N, Mote SR, Bhandari M, Kalra A, Ahmad S. 2018. Rainfall-runoff simulation using climate change based prediction in HEC-HMS model for Irwin Creek, Charlotte, North Carolina. World Environmental and Water Resources 2018.
- Oleyiblo JO, Li Z. 2010. Application of HEC-HMS for flood forecasting in Misai and Wan'an catchments in China. 2010. Water Science and Engineering 3(1): 14-22.
- Park CY, Moon JY, Cha EJ, Yun WT, Choi YE. 2008. Recent changes in summer precipitation characteristics over South Korea. Journal of Korean Geographical Society 43(3): 324-336. (In Korean)
- Vaze J, Poast DA, Chiew FHS, Perraud JM, Viney NR, Teng J. 2010. Climate non-stationarity - validity of calibrated rainfall-runoff models for use in climate change studies. Journal of Hydrology 394: 447-457.

- Verma AK, Jha MK, Mahana RK. 2010. Evaluation of HEC-HMS and WEPP for simulating watershed runoff using remote sensing and geographical information system. *Paddy Water Environment* 8: 131-144.
- Yang HK, 2007. Water balance change of watershed by climate change. *The Korean Geographical Society* 42(3): 405-420.
- Zema DA, Labate A, Martino D, Zimbone SM. 2017. Comparing different infiltration methods of the HEC-HMS model: the case study of the Mesima Torrent (Southern Italy). *Land Degradation & Development* 28: 294-308.