

기후변화와 강우분포 및 CN에 따른 미래 홍수량 평가

Assessment of Future Flood According to Climate Change, Rainfall Distribution and CN

곽지혜^a · 김지혜^b · 전상민^c · 황순호^d · 이성학^e · 이재남^f · 강문성^{g,†}

Kwak, Jihye · Kim, Jihye · Jun, Sang Min · Hwang, Soonho · Lee, Sunghack · Lee, Jae Nam · Kang, Moon Seong

ABSTRACT

According to the standard guidelines of design flood (MLTM, 2012; MOE, 2019), the design flood is calculated based on past precipitation. However, due to climate change, the frequency of extreme rainfall events is increasing. Therefore, it is necessary to analyze future floods' volume by using climate change scenarios. Meanwhile, the standard guideline was revised by MOE (Ministry of Environment) recently. MOE proposed modified Huff distribution and new CN (Curve Number) value of forest and paddy. The objective of this study was to analyze the change of flood volume by applying the modified Huff and newly proposed CN to the probabilistic precipitation based on SSP and RCP scenarios. The probabilistic rainfall under climate change was calculated through RCP 4.5/8.5 scenarios and SSP 245/585 scenarios. HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) was simulated for evaluating the flood volume. When RCP 4.5/8.5 scenario was changed to SSP 245/585 scenario, the average flood volume increased by 627 m³/s (15%) and 523 m³/s (13%), respectively. By the modified Huff distribution, the flood volume increased by 139 m³/s (3.76%) on a 200-yr frequency and 171 m³/s (4.05%) on a 500-yr frequency. The newly proposed CN made the future flood value increase by 9.5 m³/s (0.30%) on a 200-yr frequency and 8.5 m³/s (0.25%) on a 500-yr frequency. The selection of climate change scenario was the biggest factor that made the flood volume to transform. Also, the impact of change in Huff was larger than that of CN about 13-16 times.

Keywords: Climate change; RCP scenarios; SSP scenarios; CMIP5; CMIP6; design flood; HEC-HMS

1. 서론

우리나라는 일관적인 설계홍수량의 산정 방법을 구축하기 위해 표준지침 (MLTM, 2012; MOE, 2019)을 따르고 있으며, 현재 저수지 용량 및 제방 높이 결정 시 설계홍수량 개념을

이용하고 있다. 표준지침에 따르면 과거 강수를 토대로 설계 홍수량을 산정한다. 그러나 최근 기후변화로 인해 극한 강우 사상의 빈도가 잦아지고 있으며, 설계홍수량을 초과하는 극한 강우 사상이 발생하는 경우 수공구조물의 안전성을 저해시킬 수 있다 (Kim and Ryu, 2011). 특히 농업용 저수지는 전국에 17,240개소가 분포하고 있어 기후변화로 인한 폭우 등의 자연재해로 제방이 무너질 경우 재산 및 인명 피해가 발생할 우려가 있다 (MAFRA, 2019). 실제로 2020년 여름 전례 없는 폭우로 인해 산양 저수지 등의 제방이 파괴된 바 있다.

한편, 설계홍수량 산정요령 (MLTM, 2012)을 개정한 홍수량 산정 표준지침 (MOE, 2019)이 신규 간행되며 Huff 분포 및 토지이용 형태에 따른 유출곡선지수 (Curve Number, CN)가 수정되었다. Huff 분포 (MLTM, 2011)는 총 강우 25.4 mm 이상의 사상을, 수정 Huff 분포 (MOE, 2019)는 시강우량 30 mm 이상이거나 일강우량 80 mm 이상의 사상을 사용하여 작성되어 본질적인 산정 방법에 차이가 있다. 또한, CN값의 경우 농업용 저수지 유역의 대부분을 차지하는 논과 산림의 CN III값이 새롭게 제안되었다. 따라서 준공된 저수지들의 설계홍수량과 새로운 표준지침에 의한 설계홍수량이 상이할 수 있으며, 이는 과거 저수지들의 안전성 및 설계의 타당성의 관점에서 문제가 될 수 있다.

기후변화에 따른 홍수량 변화에 관하여 많은 연구가 이루

^a MS Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

^b Ph.D. Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

^c Ph.D. Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

^d Research Professor, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

^e Senior Researcher, Convergence Center for Watershed Management, Integrated Watershed Management Institute

^f Associate Researcher, Water Resources & Environment Research Group, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

^g Professor, Department of Rural Systems Engineering, Research Institute of Agriculture and Life sciences, Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4582 Fax.: +82-2-873-2087

E-mail: mshkang@snu.ac.kr

Received: September 24, 2020

Revised: October 26, 2020

Accepted: October 26, 2020

어지고 있다. Park et al. (2013)은 우리나라 30개 저수지에 RCP (Representative Concentration Pathways) 4.5 시나리오를 적용하여 미래 확률강수량 값을 산정하였으며, 미래에 한강, 금강, 영산강 유역의 강우 강도가 급증하여 저수지 설계 기준을 초과하는 것을 확인하였다. Ryu et al. (2015)은 분위 사상법 (Quantile Mapping)을 통해 미래 기상자료를 편의 보정한 후 확률분포형 매개변수가 변화하는 비정상성 빈도해석을 수행하여 확률강수량을 산정하였다. Kim et al. (2016)은 RCP 시나리오 및 토지이용변화 시나리오와 HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) 모델을 활용하여 미래 홍수량 변화에 대한 기후변화 및 토지이용변화의 기여율을 분석하였고 기후변화로 인해 첨두홍수량 값이 1.5-2.7배 증가한 것으로 나타났다. Lee and Lee (2018)은 한강 본류 서울시 내 위치한 제방에 대하여 미래 홍수량을 산정한 후 제방홍수취약성지수 인자들을 도출하였으며, 하류의 제방 취약성이 높은 것으로 나타났다. Lim et al. (2018)은 세계 각국에 RCP 시나리오를 적용하여 미래 홍수 발생 빈도에 따른 나라별 홍수 방어 지수 (Flood defense level)을 산정하였다. Nyaupane et al. (2018)는 Carson City의 미래 홍수량을 산정하였으며 현재 100년 빈도 홍수량의 2배 이상의 값을 보였다. Bai et al. (2019)은 Nippersink Creek 유역에 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)를 적용하여 재현기간별 홍수량을 산정하였다.

또한, 확률강수량의 시간 분포가 홍수량 값에 주는 영향을 평가한 연구로는 Lee and Lee (2003)이 시화호를 대상으로 Huff 외 5가지 방법을 이용해 강수 분포를 결정하였으며, 분포 방법에 따라 지속시간 24시간을 기준으로 첨두홍수량 값에서 최대 1,914 m³/s의 차이가 발생하였다. Joo et al. (2007)은 유역별로 무차원누가우량곡선을 도출한 바 있으며, 이를 이용해 산출된 홍수량과 Huff 분포를 이용한 홍수량을 비교한 결과 11-15% 차이가 발생한 바 있다. CN에 따른 유출 및 홍수량의 차이를 분석한 연구로는 Park et al. (2017)이 HEC-HMS에서 CN만을 조정하여 강우-유출 수문곡선의 최적화를 시도한 결과 초기 CN값과 보정 후 CN값의 차이가 5-6 정도 발생하는 것으로 나타났으며, 초기 CN값을 사용할 경우 모형 모의 값이 실제 유출량과 상이하다고 보고한 바 있다.

홍수량의 미래 변동성을 고려한 연구들은 많이 수행되어왔으며, 거의 모든 연구에서 당시 최신 기후변화 시나리오였던 CMIP5의 RCP 시나리오를 이용하였다. 그러나 2020년 CMIP6 모델의 구축이 일부 완료되었고 새로운 기후변화 시나리오 (Shared Socioeconomic Pathways, SSP)는 미래에 대한 가정이 RCP 시나리오와 상이하다. SSP 시나리오에 대한 자료 접근이 가능해진 상황에서 기존 기후변화 연구들은 불가피하

게 한계점을 지니게 되며, SSP 시나리오를 이용한 미래 홍수량 평가 연구가 필수적이다. 다만, 기후변화 연구의 특성상 절대적인 미래 시나리오는 없으며, SSP 시나리오와 RCP 시나리오를 비교하여 미래 홍수량 특성을 분석할 필요가 있다. 또한, 설계 강우의 시간적 분포 및 CN값의 변화가 수문모형의 유출 결과에 큰 영향을 미친다는 선행 연구들에 따라 수정된 설계홍수량 산정 방법, 특히 Huff 분포와 산림 및 논외 CN 변화가 미래 홍수량 값에 미치는 영향 정도를 파악할 필요가 있다.

본 연구의 목적은 CMIP6 모델의 SSP 시나리오 및 CMIP5 모델의 RCP 시나리오를 기반으로 산정된 확률강수량 값에 수정된 Huff 및 새롭게 제안된 산림 및 논외 CN를 적용하여 홍수량을 산정함으로써 이들 요소가 미래 홍수량에 미치는 영향을 평가하는 데 있다.

II. 재료 및 방법

본 연구에서는 CMIP5 기후모델 29개, CMIP6 기후모델 16개를 이용하여 RCP 4.5/8.5 시나리오와 SSP 245/585 시나리오의 일별 기후변화 자료를 구축하였으며, 미래 기후변화에 따른 확률강수량을 분석하였다. 또한, 최근 홍수량 산정 방법이 수정됨에 따라 Huff 분포 및 논, 산림의 CN값이 새로이 제시 되었으므로 이들이 홍수량 값에 미치는 영향도 함께 고려하였다. 기후변화 시나리오 및 강우분포와 CN에 따른 미래 홍

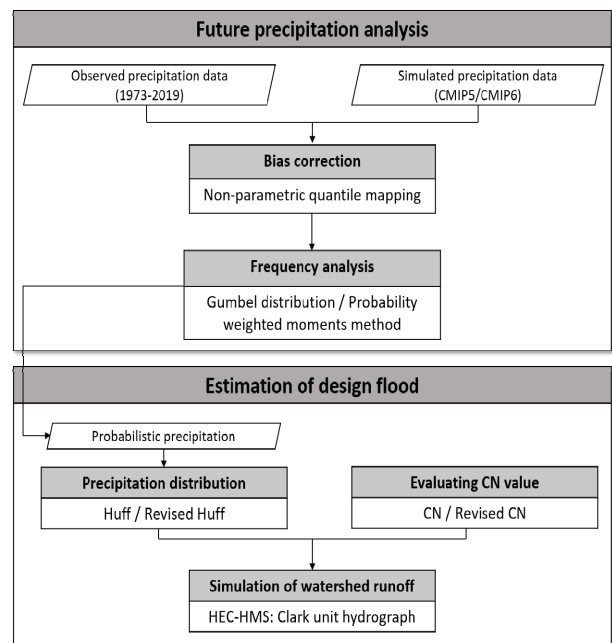


Fig. 1 Flow chart of this study

수량 특성을 분석하기 위하여 기후변화 시나리오를 토대로 산정된 확률강수량과 강우분포 및 CN을 HEC-HMS 모형에 입력하여 구동하였다. RCP 4.5/8.5 및 SSP 245/585 시나리오의 일 단위 강수량 자료를 수집하고, 이를 비모수적 분위 사상법을 이용하여 편의보정한 후 빈도분석을 통해 24시간 확률 강수량을 산정하였다. 미래 기간별로 산정된 지속시간 24시간 확률강수량 값을 Huff/수정 Huff를 이용하여 1분 단위 강수량으로 나누었으며, 기존 CN/수정 CN 별로 HEC-HMS 모형의 매개변수 값을 달리하였다. Fig. 1은 본 연구의 흐름도를 나타내고 있다.

1. 연구대상지

본 연구의 대상지는 충청남도 예산군 광시면에 위치한 예당 저수지 유역으로 금강 권역의 삽교호 수계이며, 본 유역 출구 지점인 예당 저수지에서 무한천과 신양천이 합류한다. 대상 유역의 면적은 373.6 km², 유로연장은 31.6 km, 유역 평균 경사는 20.5%이다. 유역의 토지이용 형태는 산림 54%, 농업지역 24%로 유역 대부분을 차지해 본 연구 목적 중 하나인 산림 및 논외의 CNⅢ값이 홍수량 결과에 미치는 영향 파악에 적합하다고 판단하였다. Fig. 2는 예당지 유역의 위치 및 ArcGIS를 통해 구축한 예당지 유역의 토지이용도를 나타낸 것이다.

2. 기후변화 모의 시나리오

기후변화 시나리오 모의 시 CMIP5 모형의 RCP 시나리오

와 CMIP6 모형의 SSP 시나리오를 활용하였으며, 사용된 기후모형의 구체적인 종류 및 기관은 Table 1과 같다.

가. RCP 시나리오

RCP 시나리오는 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 5차 기후변화 평가 보고서 (The Fifth Assessment Report, AR5)에서 제시한 표준 온실가스 시나리오로, CMIP5 모형에 적용된다. RCP 시나리오는 대표적인 (Representative) 복사강제력에 따라 기후변화 시나리오 및 사회·경제 시나리오가 산출되며, RCP 시나리오는 복사강제력에 따라 RCP 2.6/4.0/6.0/8.5의 네 종류로 구분된다. RCP 뒤에 붙는 숫자는 2100년에 도달하는 복사강제력을 의미하며, 2.6은 지구가 최대의 회복력을 가지는 시나리오, RCP 4.5 및 6.0은 온실가스 저감 정책이 실현되는 시나리오, 8.5는 현재 추세로 온실가스가 배출되는 시나리오를 의미한다.

나. SSP 시나리오

SSP 시나리오는 IPCC의 6차 기후변화 평가 보고서에서 제시한 표준 온실가스 시나리오로, CMIP6 모형에 적용된다. SSP 시나리오는 기존 RCP 시나리오의 개념인 복사강제력 강도와 함께 미래 사회·경제 변화를 기준으로 기후변화에 대한 미래 적응 노력에 따라 5개의 시나리오로 구별되며, 인구통계/경제발달/복지/생태계/자원/제도/기술발달/사회적 인자/정책에 따라 기후변화를 모의한다. SSP126는 재생에너지 기술발달로 화석연료 사용이 최소화되고 친환경적으로 지속 가

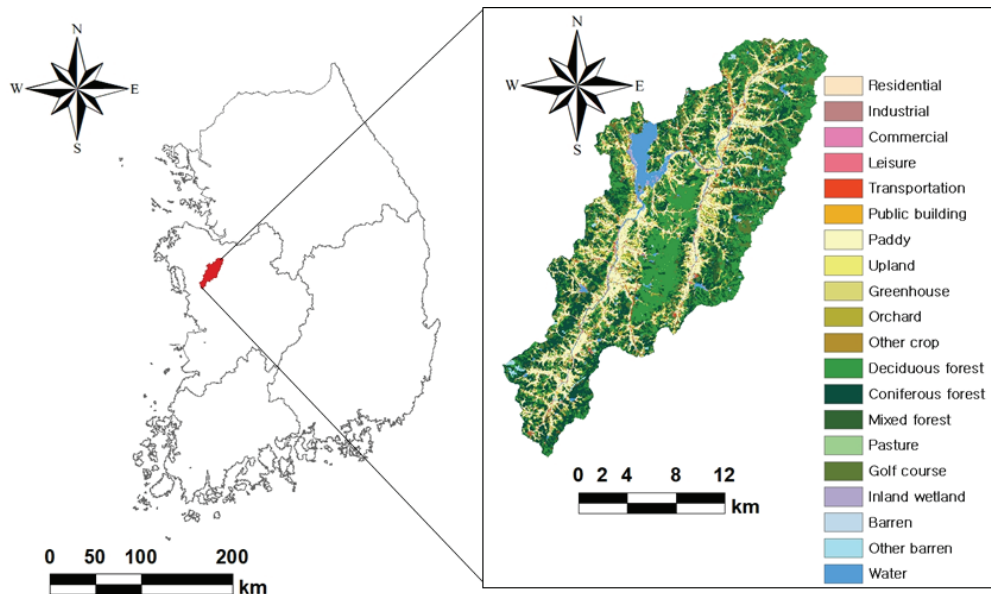


Fig. 2 Location and landuse map of Yedang watershed

Table 1 Names and institutes of selected GCMs

Institution	CMIP5	CMIP6
Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	BCC-CSM1-1 BCC-CSM1-1-m	BCC-CSM2-MR
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	CanESM2	CanESM5
National Center for Atmospheric Research	CESM1-BGC CESM1-CAM5	-
Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	CMCC-CM CMCC-CMS	-
Centre National de Recherches Meteorologiques	CNRM-CM5	CNRM-CM6-1 CNRM-ESM2-1
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence	CSIRO-Mk3-6-0	ACCESS-CM2 ACCESS-ESM1-5
LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences	FGOALS-g2 FGOALS-s2	-
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	GFDL-CM3 GFDL-ESM2G GFDL-ESM2M	GFDL-ESM4
Met Office Hadley Centre	HadGEM2-AO HadGEM2-CC HadGEM2-ES	UKESM1-0-LL
Institute for Numerical Mathematics	INM-CM4	INM-CM4-8 INM-CM5-0
Institut Pierre-Simon Laplace	IPSL-CM5A-LR IPSL-CM5A-MR IPSL-CM5B-LR	IPSL-CM6A-LR
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute and National Institute for Environmental Studies	MIROC-ESM-CHEM MIROC-ESM MIROC5	MIROC6
Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	MPI-ESM-LR MPI-ESM-MR	MPI-ESM1-2-HR MPI-ESM1-2-LR
Meteorological Research Institute	MRI-CGCM3	MRI-ESM2-0
Norwegian Climate Centre	NorESM1-M	NorESM2-LM

능한 경제성장을 이룰 것으로 가정하는 경우, SSP245는 기후 변화 완화 및 사회경제 발전 정도가 중간 단계를 가정하는 경우, SSP370는 기후변화 완화 정책에 소극적이며 기술개발이 늦어 기후변화에 취약한 사회구조를 가정하는 경우, SSP585는 산업기술의 빠른 발전에 중점을 두어 화석연료 사용이 높고 도시 위주의 무분별한 개발이 확대될 것으로 가정하는 경우를 의미한다. SSP 뒤에 붙는 첫 번째 숫자는 SSP 시나리오 번호, 뒤의 두 숫자는 RCP 시나리오와 같이 2100년에 도달하는 복사강제력을 의미한다.

다. 상세화 및 편이 보정

기후모델을 통해 산출된 기후변화 자료는 해상도가 낮아

유역과 같이 작은 규모의 지역을 대상으로 적용하기 어렵다. 또한, 기후모델별 특성 및 경향의 차이가 있어 과거 기상 관측 자료를 기반으로 기후변화 자료가 가진 편이를 보정해야 한다. 본 연구에서는 APCC (Cho, 2013)에서 적용된 방법을 통해 관측소 지점별 상세화 및 편이 보정을 수행하였다. 작업 순서는 다음과 같다. (1) Earth System Grid Federation (<http://pcmdi9.llnl.gov/esgf-web-fe/>)의 GCMs 일 자료 자동추출, (2) 사용자가 입력한 위경도 지역에 해당하는 NetCDF 그리드 추출, (3) NetCDF포맷의 그리드 상에 존재하는 관측점의 좌표 지점별로 텍스트 포맷의 CMIP5, CMIP6 시계열 자료 추출, (4) 지점별 관측자료와 R 프로그램의 qmap 패키지 (<ftp://ftp.gr.vim.org/mirrors/CRAN/web/packages/qmap/qmap.p>

df)를 통한 지점별 상세화/편의 보정의 완료 순서로 기후변화 자료를 획득하였다. 편의 보정의 경우 비모수적 분위 사상법을 활용하였다.

3. 확률강수량의 산정

미래 확률강수량 자료 구축을 위해 사용한 기후모델은 CMIP5에서 29개, CMIP6에서 16개이며, 미래 확률강수량 자료의 구축 전에 각 기후변화 시나리오의 미래 일 강수량 모의 자료에 대하여 기상관측소별 상세화 및 편의 보정을 진행하였다. 이후 지속시간 24시간의 연 최대 강우 사상을 수집하였으며, Gumbel 분포와 확률가중모멘트법을 이용하여 확률강수량 값을 산정하였다. 기후변화에 따른 홍수량 변화를 살펴 보기 위하여 2025s (2010-2039), 2055s (2040-2069), 2085s (2070-2099)으로 구간을 나누어 30년별 확률강수량을 산정하였다. 기후변화 시나리오별로 최대/최소 확률강수량을 보이는 기후모델을 채택함으로써 CMIP5와 CMIP6의 전반적인 확률강수량 및 홍수량 값의 경향을 확인하고자 하였다. 미래 일 단위 강수량 모의 자료를 통해 구축한 확률강수량의 지속시간은 24시간이며 재현 기간 200년과 500년에 대하여 산정하였다.

4. 강우 분포의 유형

확률강수량의 경우 시간 분포를 파악하기 어려우며, 적절하게 강수를 분포시킬 필요가 있다. 강우의 시간 분포 방법으로는 Mononobe 방법, Huff 방법, 교호블럭 방법 등이 존재하며, 현재 표준지침에서는 Huff (1967)가 제시한 Huff 무차원 누가 곡선의 개념을 활용하여 설계홍수량을 산정할 것을 제안하고 있다. MLTM (2012) 및 MOE (2019)에서는 Huff 분포의 여러 가지 호우 형태 중 3분위 초과확률 50%를 채택하는 것을 권장하고 있다.

가. Huff 분포

본 연구에서는 MLTM (2011)에 의해 제시된 Huff 분포 값을 이용하였다. Huff 분포의 경우 3시간 이상의 강우 사상 중

총 강우 25.4 mm 이상에 대하여 지점 빈도해석을 이용하여 산정되었으며, 이때 독립 강우 사상의 분리기준은 무강우 6시간이다. 본 연구에서는 해당 저수지 유역 내 종관 기상관측소 (Automated Synoptic Observing System, ASOS)별 Huff 분포를 Thiessen망 면적으로 가중평균한 값을 이용하였다. Table 2는 유역 내 종관 기상관측소별 Thiessen망 면적비율 값을 나타내고 있다.

나. 수정 Huff 분포

수정 Huff 분포의 경우 MOE (2019)에 의해 제시된 값을 이용하였다. 수정 Huff 분포는 기존 Huff와 달리 지점 빈도 분석이 아닌 지역 빈도 분석을 통해 산정되었으며 집중호우 기준으로 작성되었다. 따라서 수정 Huff 분포 작성 시 시간우량 30 mm 이상이거나 일강우량 80 mm 이상, 혹은 일강우량이 연강우량의 10%를 상회하는 강우 사상만이 이용되었다.

Table 3은 해당 저수지 유역에서 3분위 호우 (초과확률 50%) 발생 시 기존 Huff 분포와 수정 후 Huff 분포의 값을 나타내고 있다.

Table 3 Time distribution of rainfall in third-quartile storms at 50% probability levels (%)

Cumulative percent of storm time	Cumulative percent of storm rainfall	
	Huff	Revised Huff
0	0.0	0.0
10	3.1	1.5
20	8.0	4.7
30	15.3	9.4
40	24.3	20.2
50	39.6	32.9
60	61.8	52.0
70	81.8	77.2
80	92.5	91.4
90	97.3	97.2
100	100.0	100.0

Table 2 The percentage of Thiessen polygon area for each ASOS

Station number	Station name	Percentage (%)
129	Seosan	8.7
232	Cheonan	40.8
235	Boryeong	29.5
236	Buyeo	21.0

5. 유출 곡선 지수의 산정

설계홍수량 산정지침에 의하면 유효우량 산정 시 SCS (U.S. Soil Conservation Service)방법을 채택한다. 따라서 토양 및 토지이용에 따른 유역의 CN을 계산하여야 한다. 선행 토양 함수 조건 (Antecedent Moisture Condition, AMC)은 AMC-Ⅲ 조건을 적용하였으며 CNⅢ를 통해 홍수량을 산정하였다.

가. 기존 산림 및 논 CN 값

MLTM (2012)에서는 산림 및 논 CNⅢ값이 따로 제시되어 있지 않으며, Eq. 1을 통해 CNⅡ를 CNⅢ으로 변환하여 산정할 수 있다. 논 CNⅡ 값은 79이며, 산림의 수문학적 토양 타입별 CNⅡ 값은 A, B, C, D 순서대로 48, 69, 79, 85이다.

$$CN\ III = \frac{23 \times CN\ II}{(10 + 0.13 \times CN\ II)} \quad (1)$$

나. 수정된 산림 및 논 CN 값

MOE (2019)에서는 미국과 우리나라 산림 토양의 차이점 및 논이라는 특수한 작물 재배형태를 고려하여 산림의 CNⅡ 값 및 논 CNⅢ값을 새로 제시하였다. 논은 경우 논 하단부 토양의 특성에 구애받지 않고 CNⅡ은 79, CNⅢ은 89로 고정된다. 산림의 경우 수문학적 토양군에 따라 CN 값이 달라지게 되며, A인 경우 55, B인 경우 72, C인 경우 82, D인 경우 85를 채택한다.

Table 4와 5는 각각 논과 산림의 수정 전/후 토양 선행함수 조건에 따른 CN 값을 나타내고 있다.

Table 4 Comparison of CN value (paddy)

Standard	Antecedent moisture condition (AMC)		
	CN I	CN II	CN III
MLTM (2012)	-	79	-
MOE (2019)	70	79	89

Table 5 Comparison of CN value (forest)

Standard	Hydrologic soil type			
	A	B	C	D
MLTM (2012)	48	69	79	85
MOE (2019)	55	72	82	85

6. HEC-HMS 모형

HEC-HMS 모형은 미 육군 공병단에서 개발한 강우-유출 모형으로 대규모 유역의 홍수추적 및 도시 소유역, 농촌 유역의 유출량 추적이 가능하다. HEC-HMS 모형은 유역 모델 (Basin model), 기상 모델 (Meteorologic model), 제어 설정 (Control specifications)으로 이루어진다. 본 연구에서는 SCS (Soil Conservation Service) CN 방법과 Clark 단위도법을 이용하여 미래 200년, 500년 빈도의 홍수량 값을 산정하였다. 연구 대상 유역의 면적이 373.6 km²으로 홍수 추적이 필요하다고

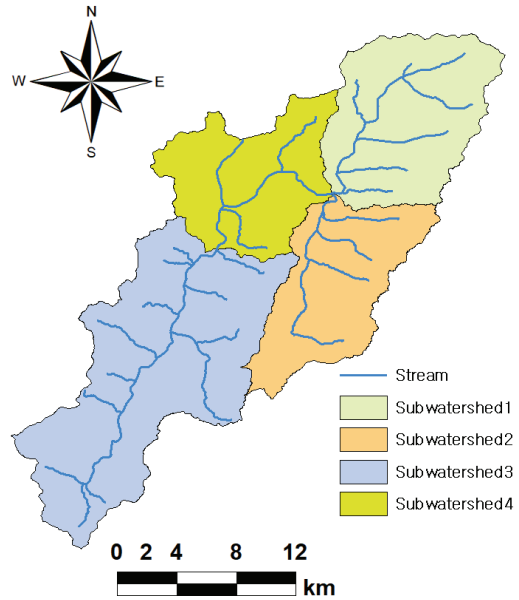


Fig. 3 The drainage network and the location of four subwatershed

사료되어 유역을 4개의 소유역으로 나누어 홍수량을 산정하였다. 4개 소유역 및 유역의 하도망은 Fig. 3과 같다.

III. 결과 및 고찰

1. 미래 확률강수량 자료 구축 결과

CMIP5의 경우 RCP 4.5에서는 GFDL-ESM2M, INM-CM4가, RCP 8.5에서는 CanESM2, INM-CM4가 각각 사용된 기후 모델 중 최대 확률강수량과 최소 확률강수량을 보였다. CMIP6의 경우 SSP 245 및 SSP 585 모두 UKESM-1-0-LL과 INM-CM-5.0이 각각 사용된 기후모델 중 최대 확률강수량과 최소 확률강수량을 보였다. Table 6은 각 시나리오 및 모델별 최대 확률강수량 값과 최소 확률강수량 값을 나타내고 있다.

2. 미래 홍수량 변화 분석

기후변화 시나리오별로 최대 및 최소 확률강수량 값을 보이는 기후모델에 대하여 HEC-HMS를 구동함으로써 유역의 미래 홍수량을 산정하였다. 홍수량은 2025s, 2055s, 2085s의 세 가지 구간별로 산정된 확률강수량 값에 기존 Huff 및 수정 Huff, CN 및 수정 CN을 적용하여 HEC-HMS를 구동함으로써 산출되었다.

기후변화 시나리오의 복사강제력이 같은 경우, 기후변화 시나리오를 RCP 시나리오에서 SSP 시나리오로 바꿈에 따라

Table 6 Maximum and minimum probabilistic precipitation

Value	Scenario	Model name	Probabilistic precipitation (mm)					
			200 yrs			500 yrs		
			2025s	2055s	2085s	2025s	2055s	2085s
Maximum	RCP 4.5	GFDL-ESM2M	503.9	557.4	424.6	567.3	628.1	475.7
	RCP 8.5	CanESM2	439.4	521.9	606.0	491.9	586.3	680.1
	SSP 245	UKESM-1-0-LL	752.4	533.9	641.9	857.6	600.3	724.9
	SSP 585		556.2	568.0	762.3	627.9	640.0	863.8
Minimum	RCP 4.5	MIROC-ESM	346.3	306.1	308.7	384.0	338.2	340.0
	RCP 8.5	INM-CM4	347.6	348.9	266.6	389.1	388.9	292.7
	SSP 245	INM-CM5-0	239.8	370.3	327.0	265.0	418.0	367.8
	SSP 585		300.2	282.5	403.2	336.5	315.9	453.5

Table 7 Maximum design flood (m³/s)

Return period	Scenario	2010-2039				2040-2069				2070-2099			
		HUFF		Revised HUFF		HUFF		Revised HUFF		HUFF		Revised HUFF	
		CN	CN'	CN	CN'	CN	CN'	CN	CN'	CN	CN'	CN	CN'
200 yrs	RCP 4.5	4,015	4,023	4,181	4,190	4,454	4,461	4,636	4,645	3,362	3,371	3,501	3,511
	RCP 8.5	3,485	3,494	3,628	3,638	4,164	4,172	4,330	4,339	4,849	4,857	5,051	5,059
	SSP 245	6,045	6,052	6,295	6,302	4,261	4,269	4,436	4,445	5,145	5,152	5,356	5,365
	SSP 585	4,444	4,452	4,626	4,634	4,541	4,549	4,727	4,735	6,128	6,134	6,382	6,389
500 yrs	RCP4.5	4,535	4,543	4,721	4,730	5,031	5,038	5,239	5,247	3,785	3,794	3,938	3,947
	RCP8.5	3,917	3,923	4,077	4,087	4,690	4,697	4,883	4,891	5,454	5,461	5,682	5,689
	SSP245	6,904	6,910	7,192	7,198	4,803	4,811	5,002	5,011	5,821	5,828	6,063	6,070
	SSP585	5,031	5,038	5,238	5,246	5,126	5,133	5,341	5,349	6,955	6,961	7,245	7,251

*CN' = Revised CN

Table 8 Minimum design flood (m³/s)

Return period	Scenario	2010-2039				2040-2069				2070-2099			
		HUFF		Revised HUFF		HUFF		Revised HUFF		HUFF		Revised HUFF	
		CN	CN'	CN	CN'	CN	CN'	CN	CN'	CN	CN'	CN	CN'
200 yrs	RCP 4.5	2,721	2,731	2,829	2,840	2,388	2,399	2,483	2,494	2,411	2,421	2,505	2,517
	RCP 8.5	2,732	2,742	2,840	2,851	2,742	2,752	2,848	2,859	2,062	2,073	2,142	2,154
	SSP 245	1,840	1,851	1,906	1,919	2,916	2,926	2,916	2,926	2,562	2,572	2,664	2,675
	SSP 585	2,340	2,351	2,433	2,444	2,193	2,204	2,281	2,292	3,188	3,197	3,318	3,329
500 yrs	RCP4.5	3,029	3,039	3,153	3,164	2,650	2,660	2,759	2,770	2,670	2,680	2,775	2,786
	RCP8.5	3,074	3,084	3,197	3,207	3,072	3,082	3,195	3,205	2,278	2,288	2,368	2,380
	SSP245	2,045	2,056	2,128	2,140	3,308	3,317	3,309	3,319	2,899	2,909	3,011	3,022
	SSP585	2,639	2,649	2,743	2,754	2,469	2,479	2,566	2,577	3,603	3,611	3,750	3,760

*CN' = Revised CN

미래 홍수량 값은 (-)33% - (+)54% 변화하였다. RCP 4.5 시나리오에서 SSP 245 시나리오로 변경할 경우 미래 홍수량 값은 200년 빈도에서 (-)923 m³/s (33.8%) - (+)2,114 m³/s (52.5%)

변화하였으며, 500년 빈도에서 (-)1,025 m³/s (33.7%) - (+)2,471 m³/s (54.4%) 변화하였다. RCP 8.5 시나리오에서 SSP 585 시나리오로 변경할 경우 미래 홍수량 값은 200년 빈도에

Table 9 The kinds of scenarios for each return period

Number	HUFF	CN	GCM	Scenario
1	NEW	NEW	MAX	HN-CN-MAX
2	NEW	OLD		HN-CO-MAX
3	OLD	OLD		HO-CO-MAX
4	OLD	NEW		HO-CN-MAX
5	NEW	NEW	MIN	HN-CN-MIN
6	NEW	OLD		HN-CO-MIN
7	OLD	OLD		HO-CO-MIN
8	OLD	NEW		HO-CN-MIN

서 (-)567 m³/s (20.6%) - (+)1,331 m³/s (27.4%) 변화하였으며, 500년 빈도에서 (-)629 m³/s (20.4%) - (+)1,563 m³/s (28.6%) 변화하였다. 다만, 기후모델의 종류에 따라 홍수량 값의 변화 방향이 다른 것으로 나타났다. 최대 확률강수량 값을 보인 CanESM2에서 UKESM-1-0-LL로 기후모델이 바뀐 경우, 2055s를 제외한 나머지 구간에서 모두 홍수량이 증가하였다. 그러나 최소 확률강수량 값을 보인 INM-CM4에서 INM-CM5-0으로 기후모델이 바뀐 경우, 2085s를 제외한 나머지 구간에서 모두 홍수량이 감소하였다.

Huff 분포 변화에 따라 미래 홍수량 값은 평균적으로 200년 빈도 기준 90 m³/s (3.50%) - 188 m³/s (4.03%), 500년 빈도 기준 102 m³/s (3.56%) - 239 m³/s (4.53%) 상승하였다. 또한,

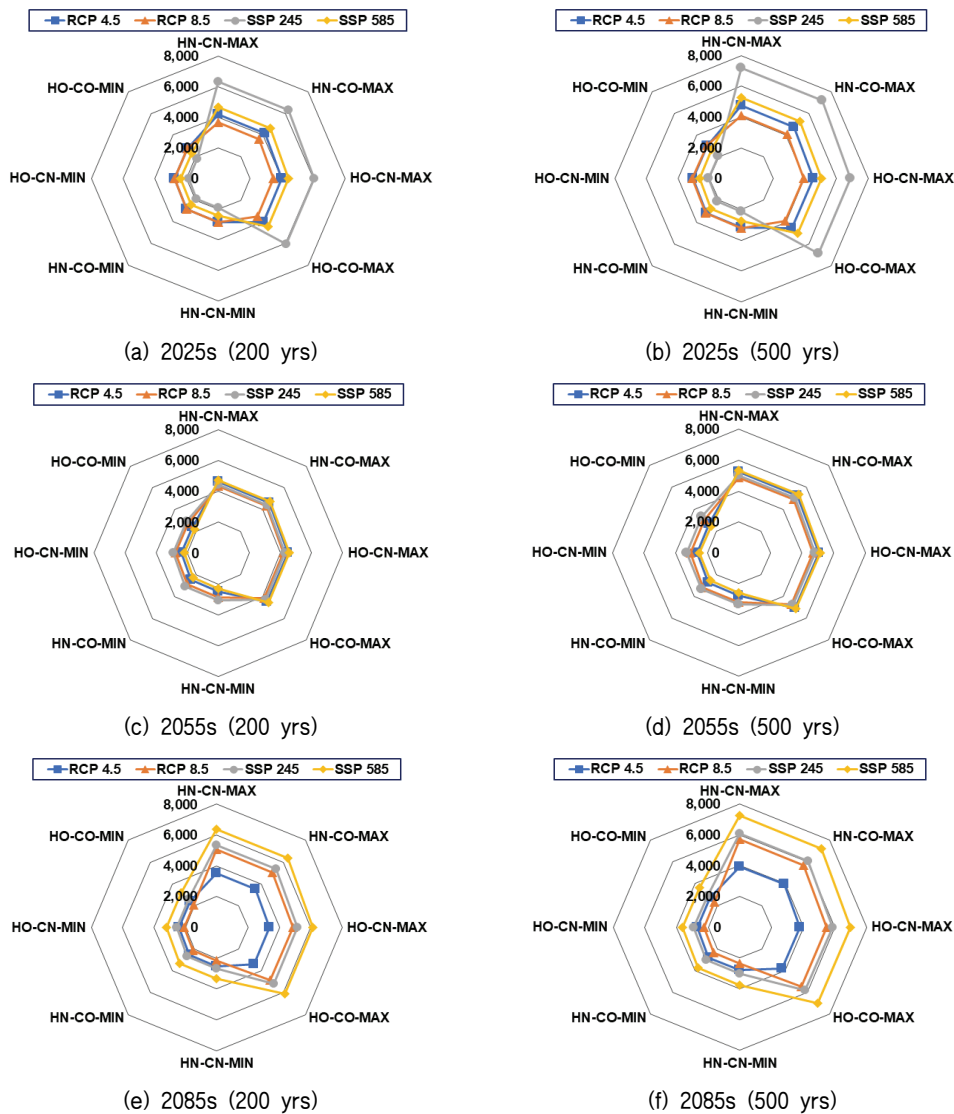


Fig. 4 Flood volume (m³/s) for each scenario

CN값의 변화에 따라 평균적으로 200년 빈도 기준 8 m³/s (0.18%) - 11 m³/s (0.42%), 500년 빈도 기준 7 m³/s (0.14%) - 10 m³/s (0.36%) 증가하였다. Huff 분포의 수정이 CN 값에 비해 유역 홍수량 값에 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났으며, 재현 기간이 길수록 Huff 분포 변화 영향이 커졌다. Table 7-8 은 최대 및 최소 확률강수량 값에 대한 미래 홍수량 결과의 값을 나타내고 있다.

기후변화 시나리오의 종류와 Huff 분포 및 CN의 변화에 따른 홍수량 값을 한눈에 살펴보기 위하여 홍수량 산정 절차를 8개의 시나리오로 구분하였으며, 시나리오 구분 기준 및 시나리오별 이름은 Table 9와 같다. Fig. 4는 전체 모의 기간 중 최대 홍수량을 보인 2085s에서 기후모델 UKESM1-0-LL과 CanESM2의 강수 분포와 수문곡선을 함께 나타내고 있으며, Table 9에 제시된 시나리오 1과 3을 비교한 것이다. Fig. 4에 의하면 수정 Huff 방법을 적용하여 확률강수량을 분포시킬 경우 첨두홍수량 발생 시점이 뒤로 늦춰지는 것으로 나타난다. 이는 수정 Huff 분포 방법의 경우 기존 Huff에 비해 강우 후반부에서 강우량이 급격하게 누적되기 때문으로 보인다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 RCP 4.5/8.5 시나리오와 SSP 245/585 시나리오를 통해 미래 기후변화에 따른 확률강수량을 분석하였다. 또한, 최근 홍수량 산정 방법이 수정됨에 따라 Huff 분포 및 논, 산림의 CN값이 새로이 제시되었으므로 이들이 홍수량 값에 미치는 영향도 함께 고려하였다. HEC-HMS 모형의 구동에 필요한 매개변수 산정을 위하여 예당 저수지 유역의 DEM, 토양도, 토지이용도 자료를 이용하였다. 유역의 면적이 250 km² 이상으로 홍수 추적이 필요하여 유역을 4개의 소유역으로 분할 후 홍수 모의를 수행하였다.

기후변화 시나리오가 미래 홍수량 값에 미치는 영향을 살펴보면, RCP 4.5/8.5 시나리오에서 SSP 245/585 시나리오로 변경될 경우 홍수량이 각각 평균 627 m³/s (15%), 523 m³/s (13%) 증가하였다. 2025s, 2055s, 2085s별 홍수량 값의 변화를 살펴보면, 2025s에서는 SSP 245 시나리오가 기후변화 시나리오 중 최대 홍수량 값과 최소 홍수량 값을 동시에 보임으로서 홍수량 값에 있어 편차가 가장 컸다. 2055s에서는 기후변화 시나리오 종류에 따른 홍수량 값의 차이가 줄었으며 전체적으로 홍수량 값 또한 작아지는 경향을 보였다. 2085s에서는 SSP 585 시나리오가 평균 5,392 m³/s로 가장 큰 홍수량 값을

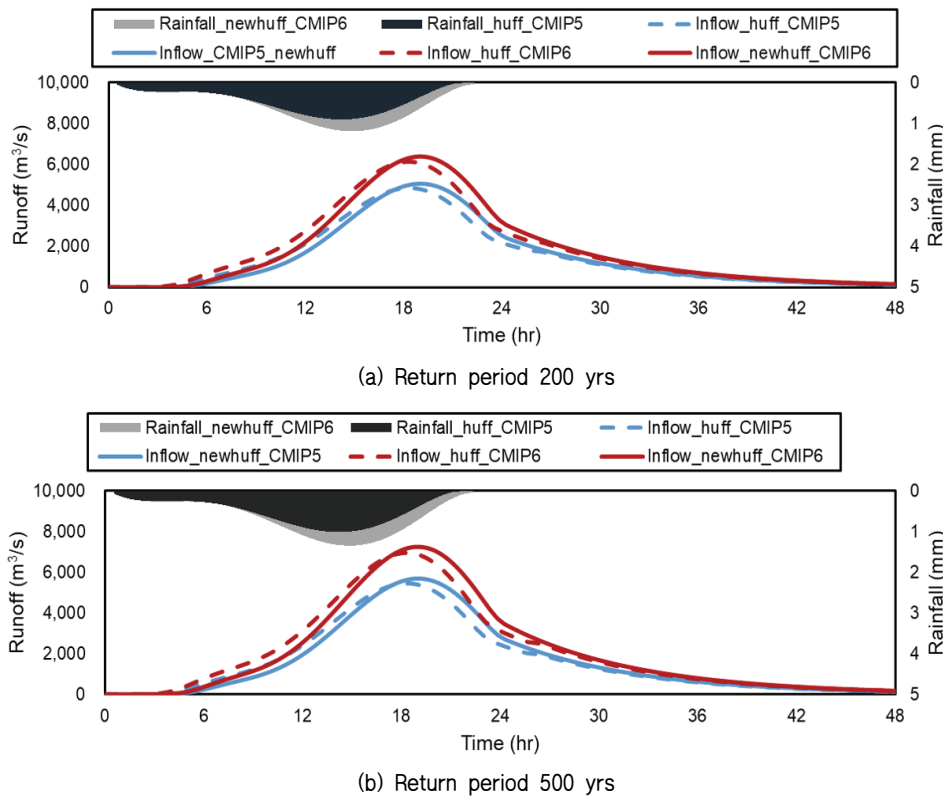


Fig. 5 Comparison of inflow by CMIP5 and CMIP6

보였다.

Huff 분포가 미래 홍수량 값에 미치는 영향을 살펴보면, 수정 Huff 분포를 사용하여 홍수량을 산정할 경우 홍수량이 증가하였다. Huff 분포 변화에 따라 미래 홍수량 값은 200년 빈도 기준으로 평균 139 m³/s (3.76%), 500년 빈도 기준으로 171 m³/s (4.05%) 증가하였으며, 확률강수량의 재현 기간이 길수록 Huff 분포에 의한 홍수량 증가율이 늘어나는 경향을 보였다. 이는 수정 Huff 분포의 경우 기존 Huff 분포에 비해 강우 사상의 뒷부분에서 많은 강우가 발생하기 때문에 사료된다.

CN의 변화가 미래 홍수량 값에 미치는 영향을 살펴보면, CN의 변화에 따라 홍수량은 200년 빈도 기준으로 평균 9.5 m³/s (0.30%), 500년 빈도 기준으로 평균 8.5 m³/s (0.25%) 상승하였다. Huff 분포가 홍수량에 미치는 영향은 CN값 변화와 비교하였을 때 약 13-16배 컸으며, CN이 미치는 영향은 상대적으로 미미하였다. 이는 유역 전체의 관점에서는 CNⅢ의 증가 폭이 크지 않기 때문에, 산림이 대부분을 차지하는 상류 유역이나 논·밭의 비율이 높은 농업 유역의 경우 CN값의 영향이 증가할 것으로 사료된다. 따라서 추후 CN값 변화의 영향이 더욱 큰 유역에 적용하여 CN의 영향을 면밀하게 검토할 필요가 있다.

본 연구 결과는 기후변화 및 강우 분포, CN의 변화에 따른 유역 단위에서의 홍수량 변화를 분석함으로써 농업용 저수지의 방재 계획 수립 및 미래 극한 홍수 대비 정책 수립 및 실증적 현장 적용에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 농업기반 및 재해대응기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음 (320046-5).

REFERENCES

- Bai, Y., Z. Zhang, and W. Zhao, 2019. Assessing the impact of climate change on flood events using HEC-HMS and CMIP5. *Water, Air, and Soil Pollution* 230(5): 119. doi:10.1007/s11270-019-4159-0.
- Cho, J. P., 2013. Impact assessment of climate change for agricultural reservoirs considering uncertainty. Research Report 2013-05. APEC Climate Center (in Korean).
- Huff, F. A., 1967. Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water resources Research* 3(4): 1007-1019.
- Joo, J. G., J. H. Lee, D. J. Jo, H. D. Jun, and J. H. Kim, 2007. Development of a rainfall time distribution model for urban watersheds. *Journal of Korea Water Resources Association* 40(8): 655-663 (in Korean).
- Kim, J. H., J. H. Park, J. H. Song, S. M. Jun, and M. S. Kang, 2016. Design flood estimation in the Hwangguji River watershed under climate and land use changes scenario. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 58(1): 30-51 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2016.58.1.039.
- Kim, W. G., and T. S. Ryu, 2011. Strategy of flood control capacity enhancement on existing multipurpose dams to the effect of climate change. *Journal of the Korean Professional Engineers Association* 44(2): 23-28 (in Korean).
- Lee, J. K., and J. H. Lee, 2003. Effect of temporal distribution of rainfall on water-surface level of Sihwa Lake. *Journal of Korea Water Resources Association* 36(2): 325-343 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2003.36.2.325.
- Lee, H. S., and J. J. Lee, 2018. Application of flood vulnerability index for analyzing safety change of levee according to climate change. *Journal of Korea Water Resources Association* 51(4): 293-299 (in Korean). doi: 10.3741/JKWRA.2018.51.4.293.
- Lim, W. H., D. Yamazaki, S. Koirala, Y. Hirabayashi, S. Kanae, S. J. Dadson, J. W. Hall, and F. Sun, 2018. Long-term changes in global socioeconomic benefits of flood defenses and residual risk based on CMIP5 climate models. *Earth's Future* 6: 938-954. doi:10.1002/2017EF000671.
- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs), 2019. Statistical yearbook of land and water development for agriculture. 11-1380000-000014-10. Gyeonggi-do, Korea (in Korean).
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs), 2011. A study on the improvement and complementation of probabilistic rainfall 11-1511000-001995-01 (in Korean).
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs), 2012. Design flood estimation methods (in Korean).
- MOE (Ministry of Environment), 2019. Standard guidelines for estimating flood volumes 11-148000-001604-14 (in

- Korean).
14. Nyaupane, N., B. Thakur, A. Karlra, and S. Ahmad, 2018. Evaluating future flood scenarios using CMIP5 climate projections. *Water* 10(12): 1866. doi: 10.3390/w10121866.
 15. Park, D. H., J. S. Yu, J. H. Ahn, and T. W. Kim, 2017. Redetermining the curve number of Korean forest according to hydrologic condition class. *Journal of Korea Water Resources Association* 50(10): 653-660 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2017.50.10.653.
 16. Park, J. H., M. S. Kang, I. H. Song, S. H. Hwang, and J. H. Song, 2013. Development of IDF curves based on RCP 4.5 scenario for 30-reservoirs in South Korea. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 13(6): 145-159 (in Korean). doi:10.9798/KOSHAM.2013.13.6.145.
 17. Ryu, J. H., M. S. Kang, J. H. Park, S. M. Jun, J. H. Song, K. U. Kim, and K. D. Lee, 2015. Estimation of future design flood under non-stationarity for Wonpyeongcheon watershed. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(5): 139-152 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2015.57.5.139.