



농촌 유역 저수지 상·하류 통합 홍수 모의 시스템 구축 및 적용

An Integrated Flood Simulation System for Upstream and Downstream of the Agricultural Reservoir Watershed

곽지혜^a · 김지혜^b · 이현지^c · 이준혁^d · 조재필^e · 강문성^{ff}

Kwak, Jihye · Kim, Jihye · Lee, Hyunji · Lee, Junhyuk · Cho, Jaepil · Kang, Moon Seong

ABSTRACT

To utilize the hydraulic and hydrological models when simulating floods in agricultural watersheds, it is necessary to consider agricultural reservoirs, farmland, and farmland drainage system, which are characteristics of agricultural watersheds. However, most of them are developed individually by different researchers, also, each model has a different simulation scope, so it is hard to use them integrally. As a result, there is a need to link each hydraulic and hydrological model. Therefore, this study established an integrated flood simulation system for the comprehensive flood simulation of agricultural reservoir watersheds. The system can be applied easily to various watersheds because historical weather data and the SSP (Shared Socio-economic Pathways) climate change scenario database of ninety weather stations were built-in. Individual hydraulic and hydrological models were coded and coupled through Python. The system consists of multiplicative random cascade model, Clark unit hydrograph model, frequency analysis model, HEC-5 (Hydrologic Engineering Center-5), HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center-River Analysis System), and farmland drainage simulation model. In the case of external models with limitations in conceptualization, such as HEC-5 and HEC-RAS, the python interpreter approaches the operating system and gives commands to run the models. All models except two are built based on the logical concept.

Keywords: Flood simulation system; hydraulic and hydrological linkage model; shared socio-economic pathways scenario

1. 서론

우리나라는 자연재해로 인한 피해액 중 50% 이상이 호우로 인한 피해로 발생하며 (MOIS, 2020), 특히 농촌 유역은 도시에 비해 유역 내 위치한 수리 구조물들의 설계빈도 기준이 낮아 홍수에 노출될 위험이 크다 (MOLIT, 2018; Park, 2016). 최근 기후변화에 의해 호우 빈도가 증가하면서 농촌

유역의 홍수 및 침수 피해가 증가하고 있어 농촌의 홍수 문제는 더욱 심각해질 것으로 예측된다 (Jun et al., 2019). 이에 농촌 유역의 적절한 홍수 대책 수립이 필요하다.

홍수 대책 수립의 마련을 위해 대부분의 연구에서는 수리·수문 모형을 활용한 홍수 모의를 적용하고 있다 (Park et al., 2013; Ryu et al., 2015; Lim et al., 2018). 수리·수문 모형이란 수리·수문학적 이론을 통해 유역의 유입량·유출량, 저수지 수위, 물넘이 월류량, 농경지 수위, 펌프 배제량 등의 요소를 개념적으로 모의하거나 수문 현상의 재현이 가능한 모형을 말한다 (Her, 2014). 현재 HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System), SWAT (Soil and Water Assessment Tool), 물수지 모형 등의 다양한 수리·수문 모형이 존재하며 모형별 모의 목적과 모의 가능한 범위는 서로 다르다.

농촌 유역의 홍수 모의 시 수리·수문 모형을 활용하기 위해서는 농촌 유역의 특징인 농업용 저수지와 농경지, 농경지 배수장 등을 고려해야 한다. 농촌 유역의 경우 대다수 유역에 농업용수의 공급을 위한 농업용 저수지가 존재하며, 저수지 하류부에는 농경지가 위치한다는 특징이 있기 때문이다. 농촌 유역의 홍수는 저수지의 저류 및 치수 능력, 농경지 배수시설물 등 농업 수리구조물의 저류 및 배수 능력, 농촌 유역 전

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

^b Researcher, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

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

^d CEO, Notesquare Inc.

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

^f 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.: +81-2-880-4582, Fax: +81-2-873-2087

E-mail: mस्कang@snu.ac.kr

Received: September 14, 2022

Revised: October 19, 2022

Accepted: November 03, 2022

체에 걸쳐 분포하는 하천 제방의 치수 능력의 영향을 종합적으로 받아 홍수 여부가 결정된다. 이 때문에 같은 크기나 형태의 강우가 발생하더라도 농촌 유역 내 수리구조물의 설계빈도 및 홍수 통제 능력에 따라 홍수 여부가 달라지게 된다. 따라서 농촌 유역의 홍수 모의를 진행할 때는 저수지 특성 및 운영기법을 고려해 저수지 상류와 하류를 연계하여 순차적으로 모의하면서도, 상·하류에 걸쳐 분포하는 농업 수리구조물들의 특성을 반영하여야 한다.

농촌 유역의 특징을 반영한 홍수 모의를 위해서는 유역 유입량 모의, 저수지 운영 모의, 하천 유량 모의, 농경지 펌프 및 배수갑문 모의 등 다양한 범위에 대해 수문 모의가 선행되어야 한다. 그러나 각각의 수리·수문 모형은 대부분 서로 다른 연구자에 의해 개별적으로 개발되어 모의 가능한 범위가 서로 다르며 통합적으로 활용되기 어렵다 (Song, 2017). 이에 수리·수문 모형의 연계 필요성이 대두된다. 그러나 수리·수문 모형을 연계를 수행한 기존의 연구들은 농촌 유역을 대상으로 연구를 수행하지 않았거나, 농촌 유역을 대상으로 연구를 수행했다더라도 농촌 유역의 저수지 상·하류를 통합적으로 다룰 수 있는 연계 모형을 구축하지 않았다는 한계가 존재한다 (Andrysiak and Maidment, 2000; Knebl et al., 2005; Shin, 2007; Yoon et al., 2008; Lee, 2018; Jun et al., 2019). 따라서 농촌 유역의 저수지 상·하류 통합 홍수 모의를 위한 시스템의 구축이 필요하며, 시스템은 다수의 모의 모형을 독립적으로 모듈화하여 연계한 수리·수문 연계 모형을 기반으로 이루어져야 한다.

본 연구의 목적은 다양한 수리·수문 해석 모형을 연계함으로써 기후변화를 고려한 농촌 유역의 저수지 상·하류 통

합 홍수 모의 시스템을 개발하고, 본 연구에서 개발한 통합 홍수 모의 시스템을 농촌 유역에 적용함으로써 모의 시스템의 적용성을 평가하는 데에 있다.

II. 농촌 유역 저수지 상·하류 통합 홍수 모의 시스템

1. 농촌 유역 저수지 상·하류 통합 홍수 모의 시스템의 구성

본 연구에서 개발한 농촌 유역의 저수지 상·하류 통합 홍수 모의 시스템은 다음과 같이 구성된다. 1) 전국 종관관측소의 강수량 데이터베이스 (DB) (1973-2100), 2) 시스템 구동에 필요한 대상지구의 측량 자료 입력 폴더, 3) 사용자 기반 초기 조건 설정 파일, 4) 시스템을 이루는 수리·수문 모형 모듈들의 입출력 파일 구조 및 지배방정식을 다루는 라이브러리 폴더, 5) 수리·수문 모형 모듈들의 실질적인 구동을 다루는 작업 (task) 폴더, 6) 수리·수문 모형 모듈의 결과 출력 폴더의 순서로 시스템이 구성된다. 시스템은 Python 기반으로 구축되었다. Fig. 1은 농촌 유역 저수지 상·하류 통합 홍수 모의 시스템의 구성요소 및 요소별 역할에 대해 나타낸다.

가. 강수량 DB

강수량 데이터베이스는 과거 자료 (1973-2021)와 미래 자료 (2022-2100)으로 이루어진다. 미래 자료는 SSP (Shared Socio-economic Pathways) 기후변화 시나리오의 일 강수 자료 추출물을 의미한다.

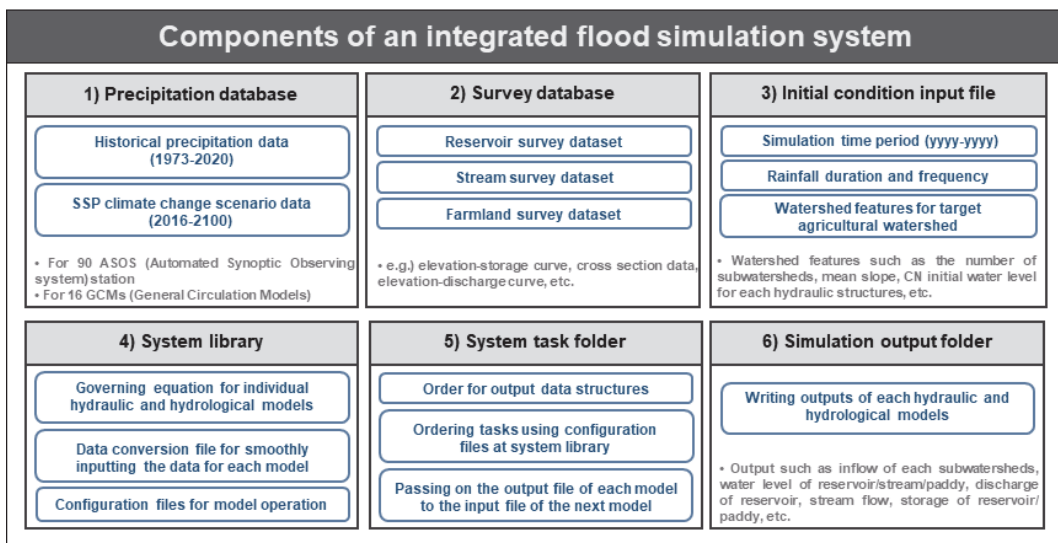


Fig. 1 Components of an integrated flood simulation system

SSP 기후변화 시나리오는 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)의 6차 기후변화 평가 보고서에서 제시한 표준 온실가스 시나리오로서 기존 RCP (Representative Concentration Pathways) 기후변화 시나리오의 복사강제력 개념을 포함하여 기후변화에 대한 미래 적응 노력에 따라 5개의 시나리오로 구별된다. SSP 기후변화 시나리오는 인구통계/경제발달/복지/생태계/자원/제도/기술발달/사회적 인자/정책에 따라 기후변화를 모의한다.

GCM (General Circulation Model)을 통해 산출된 기후변화 자료는 해상도가 낮아 유역과 같이 작은 규모의 지역을 대상으로 적용하기 어려우며 GCM별 특성 및 경향의 차이가 있다. 따라서, 과거 관측자료를 바탕으로 기후변화 자료의 상세화 및 편의 보정이 이루어져야 한다. 본 연구에서는 Cho (2013)에서 적용된 방법을 통해 관측소 지점별 상세화 및 편의 보정이 완료된 기후변화 자료를 강수량 DB에 탑재하였다.

Table 1은 본 연구의 홍수 모의 시스템에서 선택가능한 GCM의 종류를 나타내고 있다. 시스템 내 강우 데이터베이스를 통해 총 12개 기관의 16개 GCM 일별 기상자료가 홍수 모의 및 수문 분석에 활용될 수 있다. 구축된 16개 GCM 일별 기상자료는 CMIP6 홈페이지를 통해 다운로드 가능한 전체 GCM 자료에 해당한다.

나. 측량 자료 DB

본 연구는 농촌 지역의 저수지 상·하류 통합 홍수 모의

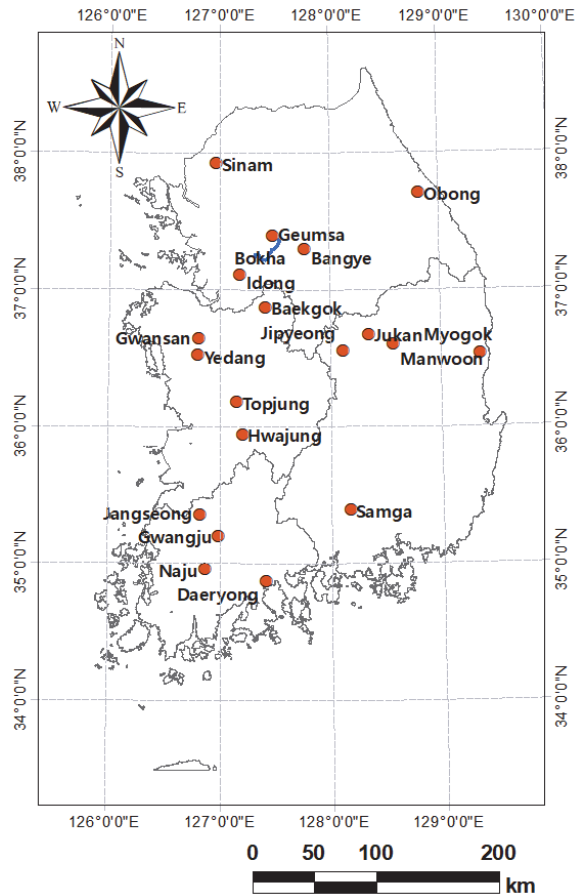


Fig. 2 Name and location of agricultural watersheds of survey database

Table 1 Name and institution of GCMs

Institution	GCM
Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	BCC-CSM2-MR
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	CanESM5
Centre National de Recherches Meteorologiques	CNRM-CM6-1 CNRM-ESM2-1
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence	ACCESS-CM2 ACCESS-ESM1-5
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	GFDL-ESM4
Met Office Hadley Centre	UKESM1-0-LL
Institute for Numerical Mathematics	INM-CM4-8 INM-CM5-0
Institut Pierre-Simon Laplace	IPSL-CM6A-LR
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute and National Institute for Environmental Studies	MIROC6
Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	MPI-ESM1-2-HR MPI-ESM1-2-LR
Meteorological Research Institute	MRI-ESM2-0
Norwegian Climate Centre	NorESM2-LM

시스템을 구축하는 것을 목적으로 한다. 농촌 유역에는 치수 및 이수를 위한 다양한 수리구조물이 존재하고, 농경지가 큰 비중을 차지한다는 특징이 있다. 따라서 저수지, 하천 제방, 농경지 배수시설물 등의 수리구조물 및 농경지의 측량 자료 데이터베이스가 구축될 필요가 있다. Fig. 2는 본 연구에서 구축 완료 및 구축 예정인 20개의 대상지구의 위치 및 대상지구명을 나타내고 있다.

측량 자료는 크게 1) 상류의 농업용 저수지 측량 자료, 2) 하천 측량 자료, 3) 하류의 농경지 및 배수 지구 측량 자료로 나뉜다.

농업용 저수지 측량 자료로는 저수지 수위-내용적 자료와 수위-방류량 자료가 있으며, 하천 측량 자료로는 하천 단면자료 및 단면 특성 자료가 있다. 농경지 및 배수 지구 측량 자료로는 농경지 표고-내용적 자료 및 배수시설물 특성 자료가 있다.

다. 초기 조건 입력 파일

시스템의 구동 전에 모의 기간, 사용하고자 하는 GCM, 강수 지속시간 및 재현기간, 대상지구의 수정 Huff 분포 적용을 위한 지역 코드, 유역 내 총 소유역 개수 및 소유역별 유역특성, 저수지 및 하천 그리고 배수장의 초기 수위와 흐름 특성 지정이 가능하다. 유역특성에는 면적, 유로장, 평균 경사(%), 최고점과 최하점의 표고차, 저수지 존재 여부가 있다. 본 연구에서는 시간 단위 강우를 1분 단위 강우로 분해하기 위하여 홍수량 산정 표준지침 (ME, 2019)에 따라 수정 Huff 분포를 활용하였으며 지역 빈도 해석을 기준으로 수정 Huff 분포가 산정되었으므로 지역 코드로 대상지구별 수정 Huff 분포를 분류하여 적용하였다.

라. 시스템 라이브러리

시스템 라이브러리는 시스템을 이루는 하위 수리·수문 모형별 지배방정식, 입력자료의 형식에 따라 데이터를 모형에 입력하기 위한 함수, 모형 구동에 편리한 형식으로 데이터 구조를 변환하기 위해 사용되는 함수 등으로 이루어져 있다.

마. 시스템 작업 폴더

시스템 작업 폴더의 경우, 수리·수문 모형의 출력 파일 구조 및 라이브러리 함수들을 활용하여 실질적으로 모형을 구동하는 역할을 수행한다. 시스템은 수리·수문 모형 간 연계 및 모형 구동 병렬화 작업으로 인해 다양한 강우 지속시간 및 강우 빈도에 대하여 반복적으로 모형을 구동하는 것이 가능하다.

바. 홍수 모의 결과 출력 폴더

작업 폴더의 함수들이 결과 출력 폴더에 각 모형의 홍수 모의 결과를 출력하게 된다.

2. 농촌 유역 저수지 상·하류 통합 홍수 모의 시스템의 내부 구조

농촌 유역 상·하류 홍수 모의 시스템의 홍수 모의는 다음과 같은 순서로 진행된다.

먼저, 사용자가 SSP 기후변화 시나리오를 활용하여 홍수 모의를 진행하기를 원하는 경우, 24시간 단위의 SSP 기후변화 시나리오의 기상산출물을 홍수 모의 자료로 활용하기 위하여 MRC (Multiplicative Random Cascade) 모형을 통해 1시간 단위 강우 자료로 시간 상세화를 수행한다. 기후변화 시나리오를 활용하지 않는 경우, 강수량 DB에 존재하는 종관 기상관측소별 1시간 단위 강우 자료를 활용하여 모의를 진행한다.

1시간 단위 강우 자료를 바탕으로 빈도 해석 프로그램을 활용하여 확률강수량을 산정하고, 이때 확률 밀도 함수 추정 시 Gumbel 분포, GEV (General Extreme Value) 분포 등 다양한 형태의 확률 밀도 함수를 지정할 수 있다. 빈도해석을 마친 후에는 수정 Huff 분포 (ME, 2019)를 활용하여 강우를 1분 단위로 분해한다. 본 연구에서 Python 코드로 구현한 유역 유입량 산정 모형 (Clark 모형), 저수지 수위 및 방류량 산정 모형 (HEC-5 모형), 하천 유량 모의 모형 (HEC-RAS 모형), 농경지 배수 모의 모형이 연계되어 구동된다. 이 중 저수지 수위 및 방류량 산정 모형과 하천 유량 모의 모형은 통합 홍수 모의 시스템이 Python 환경에서 입력 파일을 HEC-5 및 HEC-RAS 모형에 전달하고 구동을 명령하면 아웃소싱하여 모형이 구동되는 구조이다. 그 외 모든 모형은 모형의 지배방정식을 바탕으로 Python 환경에 구현되었다.

유역 유입량 산정 모형의 경우 저수지 상류 유역의 유입량 및 저수지 하류 하천이 위치한 하류 소유역들의 측방 유입량을 산정하는 데에 활용되며 저수지 수위 및 방류량 산정 모형을 통해 저수지 방류량 및 수위를, 하천 유량 모의 모형을 통해 저수지 하류 하천 유량을 모의한다. 농경지 배수 모의 모형을 통해 농경지 수위를 모의한다. Fig. 3은 농촌 유역 저수지 상·하류 통합 홍수 모의 시스템을 구성하는 모형 간 흐름도이다. 농촌 유역 저수지 상·하류 통합 홍수 모의 시스템을 구성하는 유입량 산정 모형과 농경지 배수 모의 모형은 타 모형과의 비교를 통해 검증되었다 (Kim et al., 2021).

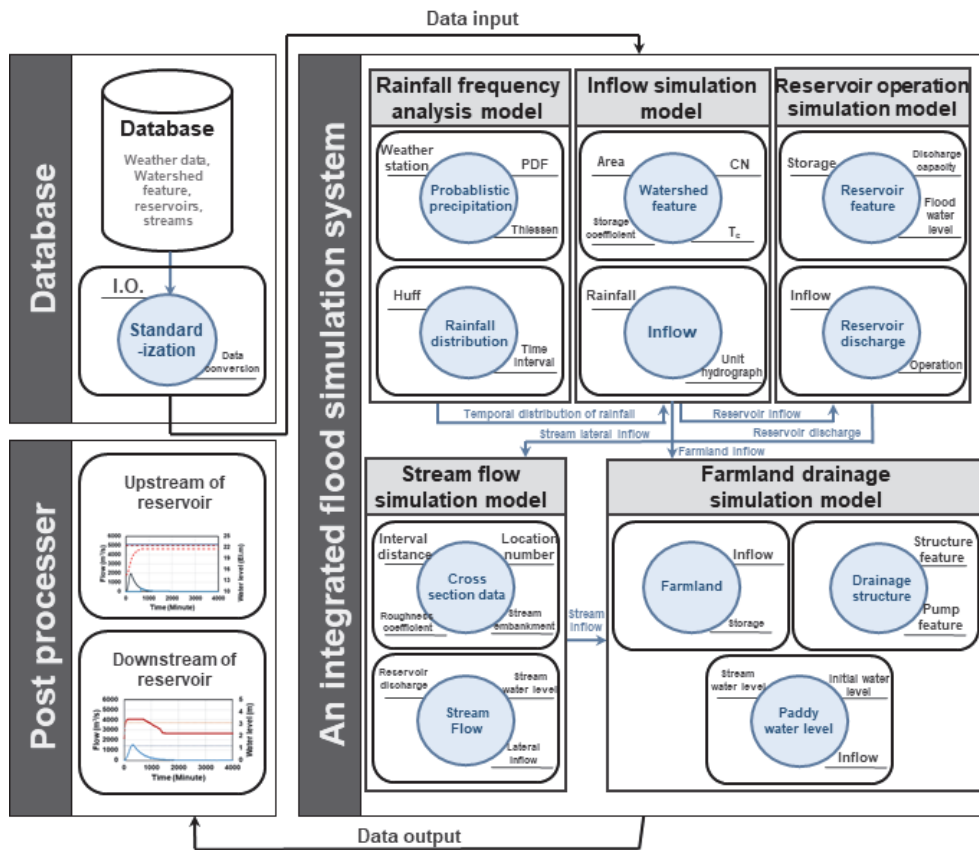


Fig. 3 Structure of an integrated flood simulation system for upstream and downstream of the agricultural reservoir watershed

가. 시간 상세화 모형

MRC 모형은 강우의 시간 상세화를 위해 수행된다. MRC 모형은 기후변화 자료를 통해 홍수 모의를 수행하는 경우에만 활용되며 기후변화 자료의 시간 상세화를 수행함으로써 확률강수량의 지속시간을 24시간 이내로 설정하기 위해 사용된다. MRC 모형은 강우의 시간 분해를 위해 과거 강우 형태를 분석하여 매개변수를 추출하고 강우의 시간 상세화를 진행한다. MRC 모형의 적용 시마다 과거 강우의 패턴에 따라 확률적으로 강우 형태가 변경되며 매번 다른 값의 확률강수량이 산정된다. 본 연구에서는 Lisniak et al. (2013), Müller and Haberlandt (2015), Kim et al. (2016) 및 Lee (2019)의 연구에서 채택한 Microcanonical cascade model의 개념을 코드로 구현하였다.

나. 강우 빈도 해석 모형

강우 빈도 해석 모형은 연 최대치 강우량을 확률분포 매개변수 추정식에 입력하여 빈도별 확률강수량을 산정한다. 본 연구에서는 Python의 lmoments3 package를 활용하여 Gamma

분포, GEV 분포, Exponential 분포 등의 다양한 확률분포 매개변수 추정식을 마련하였으며, 이를 강우 빈도 해석 모형에 연결하여 확률강수량을 산정하도록 강우 빈도 해석 모형을 구축하였다.

다. 유역 유입량 산정 모형

Clark 단위도 모형은 합성 단위도 방법에 해당하며, 순간단위도 원리를 이용하여 유역의 유출량을 산정한다. 1cm 단위의 유효우량이 내린 것으로 가정한 순간단위도를 바탕으로 유역의 유입량을 계산하며, Δt 시간 동안 유입되는 유량에 관한 관계식은 식 (1)과 같다.

$$I_t = \frac{A_t \times 10^6}{\Delta t \times 3600 \times 100} \quad (1)$$

여기서, I_t는 유입 유량, A_t는 i번째 등시간구간에 포함되는 유역면적을 의미한다.

첨두유출량의 특성에 영향을 주는 주요 매개변수로는 도달

시간과 저류상수가 있으며, 자연 하천 유역, 저수지 상류 유역의 경우에는 경험식을 통해 도달시간과 저류상수를 산정한다. 도달시간 및 저류상수를 산정하기 위한 다양한 경험식들이 존재하므로 본 연구에서는 Sabol 공식, 수정 Sabol 공식, 서경대 공식, Kirpich 공식, Kraven 공식, 연속 Kraven 공식 등 다양한 공식들을 활용할 수 있도록 코드로 구현하였다.

라. 저수지 수위 및 방류량 모의 모형

Clark 단위도 모형을 통해 산정한 저수지 배후 유역의 유입량을 바탕으로 저수지의 방류량을 산정하기 위하여 HEC-5 모형을 활용하였다. HEC-5 모형은 저수지의 홍수 조절 능력을 평가하기 위해 미 육군 공병단 수문공학 연구소 (Hydrologic Engineering Center, HEC)에서 개발된 프로그램으로, 유역 내에서 발생한 홍수량의 시간적 변화에 의한 저수지의 수위 및 방류량을 모의할 수 있다.

마. 하천 유량 모의 모형

HEC-5 모형을 통해 산출된 상류 유역의 저수지 방류량과 Clark 단위도 모형을 통해 산출된 하류 유역의 측방유입량, 그리고 하천 단면자료를 입력자료로 활용하여 HEC-RAS 모형을 구동하며, HEC-RAS 모의 결과를 통해 해당저수지 하류 유역의 하천 유량 및 수위를 모의하였다.

바. 농경지 배수 모의 모형

HEC-RAS 모형에서 모의한 하천 유량 및 수위를 농경지 배수 모의 모형에 입력하여 농경지 침수를 모의한다. 한국농어촌공사의 배수갑문 능력검토 시스템 모형 알고리즘을 바탕으로 Python 환경에 모형을 구현하였다.

III. 농촌 유역 저수지 상·하류 통합 홍수 모의 시스템의 적용

1. 농촌 유역 저수지 상·하류 통합 홍수 모의 시스템 적용 대상지구

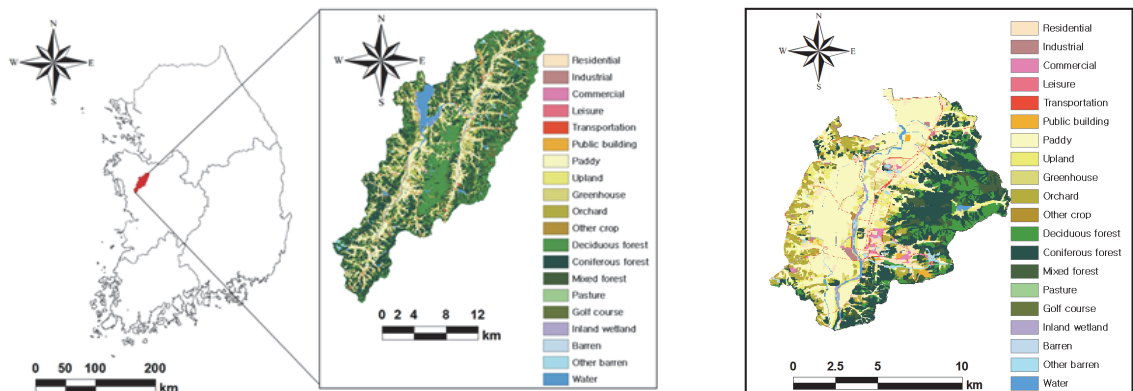
본 연구에서 구축한 홍수 모의 시스템의 적용성을 평가하기 위한 대상지구는 20개 대상지구 중 금강 권역 삼교천 수계의 해당저수지 상·하류 유역이다. 해당저수지 상류 유역은 충청남도 예산군, 청양군, 홍성군 등의 행정구역에 위치한다. 저수지 상류 유역면적은 373.6 km², 유로연장은 31.6 km이다. 해당저수지는 총 Radial Gate 형식의 수문을 11련 탑재하고 있으며, 여수로의 길이는 165 m, 깊이는 5.9 m에 해당한다.

해당저수지 하류 유역에는 무한천이 위치하고 있다. 무한천은 충청남도 청양군 화성면에서 발원하여 이후 삼교천으로 합류된다. 하류 유역면적은 92.19 km², 유로연장은 15.22 km이다. 무한천 인근에는 탄중지구가 위치하며 탄중지구의 유역면적은 1,482 ha으로 유역의 토지이용은 논이 672 ha (45%)로 가장 많다. Fig. 4는 해당저수지 상류 유역 및 탄중배수장이 위치한 해당저수지 하류 유역의 토지이용도를 나타낸다.

해당저수지 상·하류 유역의 지배관측소는 천안, 부여, 보령, 서산 관측소가 있다. 해당저수지 상류 유역의 Thiessen 비율은 천안 41%, 부여 21%, 보령 29%, 서산 9%이며 해당저수지 하류 유역의 Thiessen 비율은 천안 82%, 서산 18%이다.

2. 농촌 유역 저수지 상·하류 통합 홍수 모의 시스템의 적용 결과

본 연구에서 구축한 농촌 유역 저수지 상·하류 홍수 모의 시스템을 해당저수지 유역에 적용하였다. 홍수 모의 시스템의 적용을 위하여 시스템 내 ACCESS-CM2의 SSP 기후변화



(a) Location and landuse of the Yedang reservoir watershed

(b) Downstream landuse of the Yedang reservoir

Fig. 4 Location and landuse of the Yedang reservoir watershed

시나리오 산출물을 활용하였다. 모의 기간은 2021년부터 2050년까지로 설정하였으며, 100년 빈도 강우에 대해 홍수 모의를 진행하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 홍수 모의 시스템의 단기 미래 (2021-2050년)에 대한 단일 모의 수행 결과를 나타낸다. Fig. 5는 상류 유입량과 유입량에 따른 저수지 방류량 및

저수지 수위 모의 결과를 100년 빈도 지속시간 1/12/24/48시간 강우에 대해 나타내고 있다. 유입량 산정 결과, 첨두 유입량의 크기는 12시간에서 가장 컸으며 저수지의 최고 수위 및 최고 방류량 또한 지속시간 12시간에서 발생하였다. 100년 빈도 1시간 강우가 발생한 경우 저수지 방류가 거의 발생하지

* F.W.L = Flood Water Level

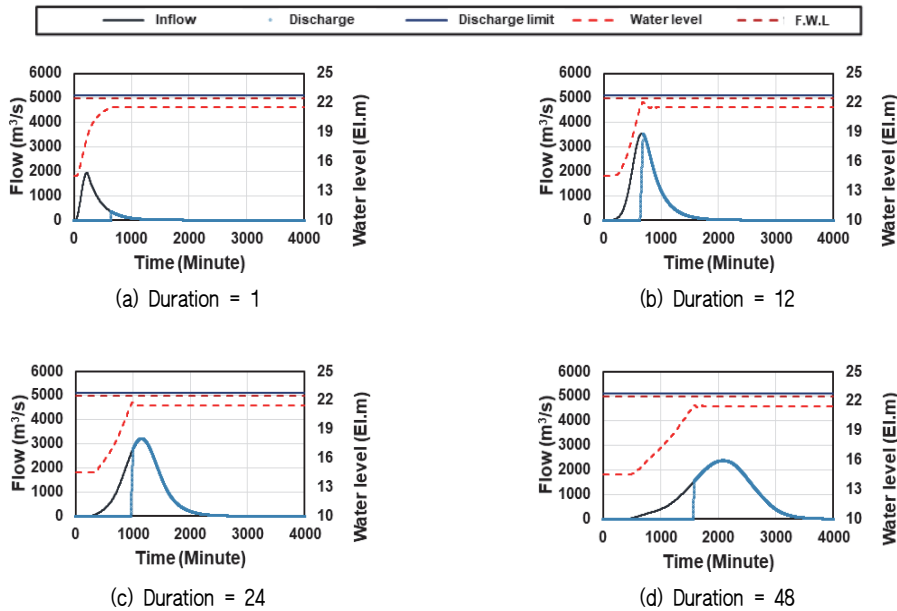


Fig. 5 Hydrograph of inflow and reservoir discharge with water level of the Yedang reservoir by 100-year frequency design flood

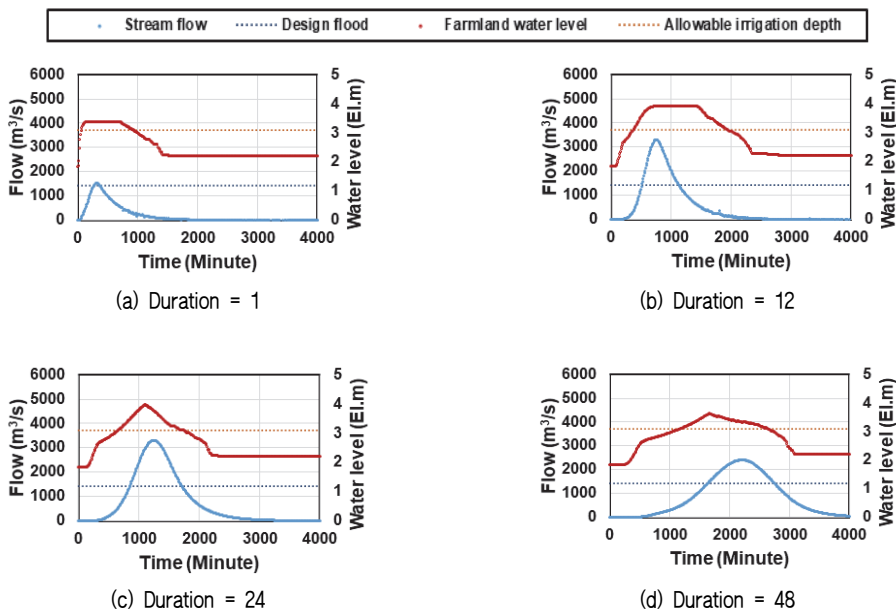


Fig. 6 Hydrograph of stream flow with ponding depth of paddy fields by 100-year frequency design flood

않았다. 모의를 수행한 모든 강우 지속시간에 대해 최대 방류량을 초과하는 유입량이 발생하지 않았으며, 저수지 수위 또한 홍수위에 도달하지 않아 100년 빈도 강우에 대하여 예상저수지는 홍수 통제가 가능한 것으로 판단된다. Fig. 6은 100년 빈도 강우 발생 시 지속시간 1/12/24/48시간에 대해 수문 방류지점 하류부 하천 유량 및 하류 농경지의 수위를 나타낸다. 100년 빈도의 모든 강우 지속시간에 대하여 하천 침투유량이 최대 허용 유량인 1,426 m³/s를 초과하였으며 하류에 위치한 농경지 수위 또한 허용 담수심 및 관수심을 초과하였다. 따라서 예상저수지 하류 하천 및 농경지는 100년 빈도 강우에 대하여 충분한 홍수 통제 능력이 마련되지 않은 것으로 판단된다. 이러한 결과는 예상저수지 하류 하천 제방의 설계빈도가 2012년에 마련된 이후 재산출되지 않았으며 농경지의 침수 시설이 20년 빈도 48시간 강우를 배제할 수 있는 수준으로 설계되었다는 사실과 대응한다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 농촌 유역의 종합적인 홍수 모의를 위하여 농촌 유역 저수지 상·하류 통합 홍수 모의 시스템을 구축하였다. 기후변화를 고려한 농촌 유역의 통합 홍수 모의 시스템 마련을 위하여 시스템 내 SSP 기후변화 시나리오 데이터베이스를 구축하였다. 또한, 본 연구에서 개발한 통합 홍수 모의 시스템을 예상저수지 유역에 적용하였다. 그 결과, 저수지 상류에서 발생한 100년 빈도의 유입량이 저수지 수위 및 방류량 관점에서 저수지에 의해 성공적으로 통제되고 있음이 확인되었다. 그러나 저수지 하류부 하천의 경우 모든 지속시간에서 설계 홍수량을 초과한 유량이 발생하는 것으로 나타났으며, 농경지 또한 허용 담수심 및 관수심을 초과한 수위가 나타났다. 따라서 미래 기후변화 고려 시 하류 하천 제방 및 농경지 배수시설의 정비가 필요할 것으로 사료된다.

농촌 유역 저수지 상·하류 통합 홍수 모의 시스템은 기존의 개별적인 수문 모의 모형을 하나로 통합함으로써 유역의 수문 모의를 연속적으로 수행할 수 있다는 의의가 있다. 또한, 기존 모형들이 코드에 접근할 수 없거나 접근할 수 있다 하더라도 수정이 어려운 환경에서 개발된 것과 달리 Python 환경에서 개발되어 접근성과 활용성이 높다. 동시에 기후변화를 고려한 홍수 모의가 가능하다는 장점이 있다. 그러나 기후변화 시나리오 산출물의 특성상 미래에 확정적으로 일어난다는 보장이 없으며, 홍수 모의 시 기후변화 시나리오의 불확실성을 고려하여야 한다. 이에 농촌 유역 저수지 상·하류 통합 홍수 모의 시스템은 병렬화를 통한 반복 작업이 가능하도록 설계되었으며 MRC 모형을 통해 확률론적인 시간 상세화를

수행할 수 있도록 구축되었다. 따라서 기존의 수문 모의 모형들이 수행하던 단발적인 홍수 모의에서 벗어나 확률로서 홍수 모의 결과를 도출할 수 있다는 의의가 있다. 본고에서는 연구의 목적이 농촌 유역의 저수지 상·하류 모의 시스템의 구축에 있음에 따라 간결한 단일 홍수 모의 적용 결과를 나타내고 있으나, 추후 연구에서는 시스템을 활용해 농촌 유역에 내재되어 있는 홍수 위험도 평가를 정량적으로 진행하고자 한다.

본 연구의 결과는 기존의 개별 수리구조물 단위로 이루어졌던 홍수 모의에서 벗어나 유역에 분포한 유역 구성 요소들을 연계하여 홍수 모의를 진행할 수 있는 통합 홍수 모의 시스템을 구축하여 활용함으로써 추후 기후변화에 따른 유역의 홍수 안전성 평가 및 홍수 방재 대책 마련에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 농업기반및재해대응기술개발사업의 지원을 받아 수행되었음(320046-5).

REFERENCES

1. Andrysiak, P. B., and D. Maidment, 2000. Visual floodplain modeling with geographic information systems. The University of Texas at Austin.
2. Cho, J. P., 2013. Impact assessment of climate change for agricultural reservoirs considering uncertainty. Research Report 2013-05. APEC Climate Center (in Korean).
3. Her, Y. G., 2014. Research trends and application of distributed hydrological model (in Korean). *Rural Resources* 56(2): 43-51.
4. Jun, S. M., H. J. Lee, S. H. Hwang, J. H. Song, S. K. Choi, and M. S. Kang, 2019. General inundation modeling of paddy field districts considering drainage delay. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 61(4): 87-96. (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2019.61.4.087.
5. Kim, D. H., S. K. Yoon, M. S. Kang, and K. D. Lee, 2016. Applicability of a multiplicative random cascade model for disaggregation of forecasted rainfalls. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 58(5): 91-99. (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2016.58.5.091.
6. Kim, J. H., J. H. Kwak, S. M. Jun, S. H. Lee, J. N. Lee,

- and M. S. Kang, 2021. Development of technology for simulating flood of agricultural hydraulic structures. *Rural Resources* 63(2): 44-56. (in Korean).
7. Knebl, M. R., Z. L. Yang, K. Hutchison, and D. R. Maidment, 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. *Journal of Environmental Management* 75(4): 325-336. doi:10.1016/j.jenvman.2004.11.024.
 8. Lee, D. G., 2018. Integrating the Mechanisms of Agricultural Reservoir and Paddy Cultivation to the HSPF-CREAMS-PADDY system. Seoul National University.
 9. Lee, H. J., 2019. Estimation of farmland inundation probability based on temporal distribution of forecasted-rainfall. Seoul National University.
 10. Lisniak, D., J. Franke, and C. Bernhofer, 2013. Circulation pattern based parameterization of a multiplicative random cascade for disaggregation of observed and projected daily rainfall time series. *Hydrology and Earth System Sciences* 17: 2487-2500.
 11. 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.
 12. Ministry of Environment (ME), 2019. Standard guidelines for flood design. (in Korean).
 13. Ministry Of the Interior and Safety (MOIS), 2020. Disaster annual reports. (in Korean).
 14. Ministry Of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), 2018. Korean design standard (KDS 51 00 00) (in Korean).
 15. Müller, H., and U. Haberlandt, 2016. Temporal rainfall disaggregation using a multiplicative cascade model for spatial application in urban hydrology. *Journal of Hydrology*, In press.
 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. Park, J. H., 2016. Reliability-based flood risk assessment methodology and its application to climate change for agricultural reservoirs. Ph.D. diss., Seoul: Seoul national university.
 18. 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.
 19. Shin, H. S., Y. W. Park, and I. P. Hong, 2007. The study on the development of flood prediction and warning system at ungated coastal urban area -On-cheon stream in Busan-. *Journal of Korea Water Resources Association* 40(6): 447-458. (in Korean). doi: 10.3741/JKWRA.2007.40.6.447.
 20. Song, J. H., 2017. Hydrologic analysis system with multi-objective optimization for agricultural watersheds. Ph.D. diss., Seoul: Seoul national university.
 21. Yoon, S.S., C. K. Choi, and D. H. Bae, 2008. Connection of hydrologic and hydraulic models for flood forecasting in a large urban watershed. *Journal of Korea Water Resources Association* 41(9): 929-941. (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2008.41.9.929.