



## SSP 기후변화 시나리오에 따른 농업용 저수지 홍수조절능력 분석

### Analysis of Flood Control Capacity of Agricultural Reservoir Based on SSP Climate Change Scenario

김지혜<sup>a</sup> · Kwak, Jihye<sup>b</sup> · 황순호<sup>c</sup> · 전상민<sup>d</sup> · 이성학<sup>e</sup> · 이재남<sup>f</sup> · 강문성<sup>g,†</sup>

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

#### ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the flood control capacity of the agricultural reservoir based on state-of-the-art climate change scenario - SSP (Shared Socioeconomic Pathways). 18 agricultural reservoirs were selected as the study sites, and future rainfall data based on SSP scenario provided by CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project 6) was applied to analyze the impact of climate change. The frequency analysis module, the rainfall-runoff module, the reservoir operation module, and their linkage system were built and applied to simulate probable rainfall, maximum inflow, maximum outflow, and maximum water level of the reservoirs. And the maximum values were compared with the design values, such as design flood of reservoirs, design flood of direct downstream, and top of dam elevation, respectively. According to whether or not the maximum values exceed each design value, cases were divided into eight categories; I-O-H, I-O, I-H, I, O-H, O, H, X. Probable rainfall (200-yr frequency, 12-h duration) for observed data (1973~2020) was a maximum of 445.2 mm and increased to 619.1~1,359.7 mm in the future (2011~2100). For the present, 61.1% of the reservoirs corresponded to I-O, which means the reservoirs have sufficient capacity to discharge large inflow; however, there is a risk of overflowing downstream due to excessive outflow. For the future, six reservoirs (Idong, Baegkok, Yedang, Tapjung, Naju, Jangsung) were changed from I-O to I-O-H, which means inflow increases beyond the discharge capacity due to climate change, and there is a risk of collapse due to dam overflow.

Keywords: Climate change; agricultural reservoir; flood control; SSP; CMIP6

#### 1. 서론

기후변화로 인해 극한 강우의 빈도와 강도가 증가함에 따라 홍수 재해의 위험이 증가하고 있다. 특히 농촌지역의 경우 집중호우로 인해 2002~2020년 동안 17개 농업용 저수지가 붕괴되었고, 2020년에는 기록적인 호우로 인해 18개 농업용 저수

지의 제방이 유실 또는 붕괴되는 등 큰 홍수피해가 발생하고 있다 (KRC, 2020). 그러나 농촌지역은 도시 지역과 비교하여 홍수피해 대책이 상대적으로 미흡한 실정므로, 기후변화에 따른 홍수 위험의 예측과 이에 대한 방재 대책의 마련이 시급한 상황이다.

우리나라 대부분 농촌지역에 설치되어 있는 농업용 저수지는 홍수기에 상류로부터 홍수 유입량을 저류하여 하류로의 도달을 지연시킴으로써 농촌지역 홍수조절의 핵심적인 기능을 수행한다. 그러나 현재 농업용 저수지는 전국 17,240개 중에서 50년 이상 경과한 것이 84%를 차지하여 구조물 노후화로 인한 문제가 심각한 상황이다 (ME, 2020). 또한, 대부분의 농업용 저수지가 과거 기준 설계홍수량으로 건설되었기 때문에 최근 빈발하는 극한 강우 또는 미래 기후변화에 따른 극한 강우에 대응하지 못할 위험이 있다. 따라서 농촌지역의 홍수피해에 대비하기 위해서는, 기후변화에 따른 농업용 저수지의 홍수조절능력을 평가하고 대책을 수립할 필요가 있다.

저수지의 홍수조절능력은 주로 저수지의 저류 기능에 따른 수문곡선 또는 첨두유량의 감쇠 (attenuation) 정도로 평가한다. Shim et al. (1998)은 평화의 댐 건설 전후에 첨두유량의 감소 효과를 비교하였고, Montaldo et al. (2004)은 저수지의 유무 또는 초기 수위 조건에 따른 첨두유량의 감소 효과를 분석하였고, Jun et al. (2013)은 농업용 저수지의 독농업 사업에 따른 첨두유량의 저감 효과를 분석하였으며, Volpi et al. (2018)은

<sup>a</sup> Ph.D. Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

<sup>b</sup> MS Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

<sup>c</sup> Research Professor, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

<sup>d</sup> Research Professor, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

<sup>e</sup> Senior Researcher, Convergence Center for Watershed Management, Integrated Watershed Management Institute

<sup>f</sup> Associate Researcher, Water Resources & Environment Research Group, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

<sup>g</sup> Professor, Department of Rural Systems Engineering, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Institutes 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](mailto:mshkang@snu.ac.kr)

Received: September 03, 2021

Revised: September 13, 2021

Accepted: September 13, 2021

저수지로 인한 수문곡선의 감쇠 효과를 분석하였다. 그러나 이와 같은 방법은 유입 수문곡선에 변화가 없을 때 저수지 제원 또는 운영의 변화로 인한 유출 수문곡선의 변화를 분석하는 데에 적합하며, 방류량을 낮추어 하류 홍수를 저감하는 데에 초점이 맞춰져 있으므로 저수위 상승에 따른 위험을 반영할 수 없는 한계가 있다.

기후변화로 인해 유입 수문곡선이 변화하는 경우에는, 수문곡선의 감쇠 정도가 아닌 미래 극한 강우에 대해 현재의 설계제원이 대응할 수 있는지를 평가할 필요가 있다. 이와 관련하여 Park (2016)의 연구에서 농업용 저수지의 유입 및 물넘이 설계홍수량을 기준으로 기후변화에 따른 홍수 위험도를 평가한 바 있다. 그러나 제체와 하류 영향에 대한 통합적인 분석을 위해서는 설계홍수량을 비롯하여 저수위와 방류 지점 하천에 대한 분석이 추가로 이루어질 필요가 있다.

기후변화에 따른 영향 분석은 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)의 기후변화 시나리오를 기반으로 한다. IPCC의 5차 평가보고서와 함께 RCP (Representative Concentration Pathway) 시나리오가 제시된 이후, 최근 6차 평가보고서와 함께 SSP (Shared Socioeconomic Pathways) 시나리오가 새롭게 제시되었다 (IPCC, 2014; IPCC, 2021). 그동안 RCP 시나리오에 따른 미래 기상자료가 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project 5)를 통해 제공되어 기후변화의 영향 분석에 다양하게 적용되어 왔으나, 최근 CMIP6를 통해 SSP 시나리오에 따른 미래 기상자료가 제공되고 있어서 이에 대한 새로운 분석이 필요한 상황이다.

새로운 기후변화 시나리오는 기존 시나리오의 개념을 포함하여 수정 및 발전되어 왔다. SSP 시나리오는 기존 RCP의 대표 농도 개념에 미래의 사회·경제적 변화를 추가로 반영하고

있어서 (O'Neill, 2016), 동일한 복사강제력에 대하여 RCP와 전혀 다른 미래 경로를 나타낸다. Kwak et al. (2020)에 따르면, 복사강제력이 같을 때 SSP 기반의 확률강우량이 RCP와 비교하여 최대 51.2%만큼 크고 최소 30.7%만큼 작은 것으로 나타나 두 자료가 극한 강우 사상에 매우 큰 차이가 있음을 확인할 수 있다. 그러나 그동안 기후변화에 따른 홍수 위험을 분석한 국내의 연구는 대부분 RCP 시나리오를 기반으로 이루어졌다. Kim et al. (2016)이 RCP 시나리오를 적용하여 기후변화와 토지이용변화에 따른 홍수량 변화를 분석하였고, Shrestha & Lohpaisankrit (2017)이 RCP 시나리오에 따른 양강 유역의 침수 위험을 분석하였고, Garijo & Mediero (2018)이 RCP 시나리오에 따른 홍수량과 계절성을 분석하는 등 많은 연구가 이루어졌다. 반면 SSP 시나리오에 따른 홍수 위험을 분석한 연구는 미흡한 실정으로, Kwak et al. (2020)이 RCP, SSP 시나리오에 따른 홍수량을 비교하였고, Jun et al. (2020)이 RCP, SSP 시나리오에 따른 농경지 침수 위험을 분석한 바 있으나, 이 외에도 많은 연구가 필요한 상황이다. 따라서 농업용 저수지 홍수조절능력의 평가에 새롭게 제시된 SSP 시나리오를 적용하여 미래의 홍수 위험을 예측하고 이에 대해 대비할 필요가 있다.

본 연구에서는 SSP 시나리오 기반의 CMIP6 미래 기상자료를 이용하여 기후변화에 따른 농업용 저수지의 홍수조절능력을 분석하고자 한다. 전국의 18개 농업용 저수지를 연구대상지로 선정하고 현재 및 미래의 극한 강우에 대한 홍수 유입량, 방류량, 저수위 모의를 통해 홍수조절능력을 평가하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

연구의 전체 흐름도는 Fig. 1과 같다. 강우 빈도 분석 모듈,

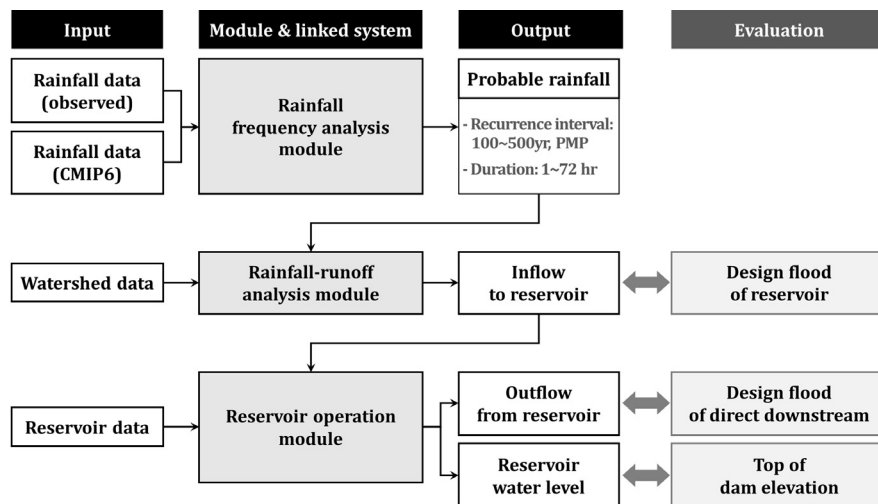


Fig. 1 Study flow diagram

강우-유출 분석 모듈, 저수지 운영 모듈을 구성하여 일련의 모의 시스템을 구축하고, 18개 연구대상지와 다양한 기후변화 자료에 대한 반복 모의에 적용하였다. 관측 및 SSP 시나리오 기반의 미래 강우 자료를 이용하여 빈도별 확률강우량을 산정하고, 홍수 유입량을 모의하고, 저수지 운영을 모의하여 방류량과 저수위를 산정하고, 이를 설계 제원과 비교하여 현재 및 미래 시점에서 농업용 저수지의 홍수조절능력을 평가하였다.

### 1. 연구대상지

기후변화에 따른 농업용 저수지의 홍수조절능력을 분석하기 위하여 전국 18개의 농업용 저수지를 연구대상지로 선정하였다. 연구대상지를 수계별로 다양하게 구성하기 위하여 한강 수계에서 5개, 금강 수계에서 4개, 낙동강 수계에서 5개, 영산강 수계에서 4개 저수지를 선정하였으며, 각 저수지의 위치는 Fig. 2와 같다. 저수지의 최초 준공년도는 1944~2013년으로 아주 오래 경과된 것부터 최근에 건설된 것까지 포함하였고, 총저수량은 994~107,809 천 m<sup>3</sup>으로 규모가 작은 저수지부터 큰 저수지까지 포함되도록 하였다.

확률강우량, 홍수유입량, 저수지 운영을 모의하기 위하여 각 연구대상지의 기상자료, 유역특성 자료, 저수지 제원 자료를 수집 및 분석하였다 (Table 1). 지형자료를 분석하여 유로

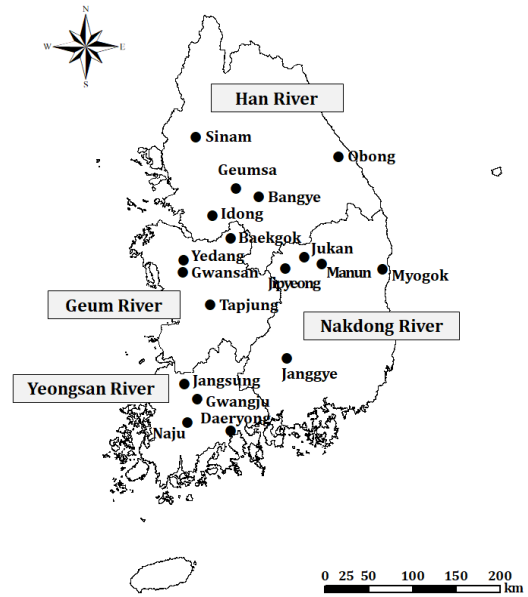


Fig. 2 Location map of the study sites

장, 경사, 고도차 등의 유역특성 값을 추출하였고, 저수지의 물넘이 제원으로부터 수위별 방류능을 산정하였다. 최초 준공 이후 독농임, 물넘이확장 등의 개보수 사업이 이루어진 경우 사업 후의 최신 제원을 적용하였다.

Table 1 Reservoir and watershed data

	River	Reservoir	Reservoir				Watershed	
			Storage (1,000 m <sup>3</sup> )	Top of dam elevation (EL. m)	Flood water level (EL. m)	Outflow structure	Watershed area (km <sup>2</sup> )	Stream length (km)
1	Han	Geumsa	3,754	137.4	135.2	spillway, gate	8.4	8.3
2		Bangye	2,840	83.0	81.0	gate	25.0	11.3
3		Sinam	470	193.0	189.0	spillway, gate	2.2	1.7
4		Obong	17,332	126.3	123.3	gate	109.0	16.8
5		Idong	20,949	46.0	44.1	gate	93.0	20.3
6	Geum	Gwansan	1,170	109.4	108.1	spillway, gate	2.5	2.3
7		Baekgok	26,619	105.2	102.1	gate	84.8	15.7
8		Yedang	47,103	25.5	22.5	gate	373.6	31.6
9		Tapjung	38,423	33.9	30.4	gate	218.8	37.5
10	Nakdong	Manun	3,587	106.2	104.2	spillway	23.1	8.9
11		Myogok	8,671	55.1	53.1	spillway	35.3	16.4
12		Janggye	2,728	136.4	134.5	spillway	14.1	5.9
13		Jukan	994	149.0	146.7	spillway	6.7	3.5
14		Jipyeong	3,812	95.8	93.8	spillway, gate	25.6	8.3
15	Yeongsan	Gwangju	23,256	82.9	79.9	gate	41.3	11.7
16		Naju	107,809	71.6	68.0	gate	84.6	16.3
17		Daeryong	2,456	74.7	71.9	spillway, gate	13.2	4.9
18		Jangsung	103,890	95.0	91.0	gate	122.8	23.2

## 2. SSP 시나리오 기반 확률강우량 산정

### 가. CMIP6 기후변화 자료

IPCC에서 최근 새롭게 제시한 SSP 기후변화 시나리오는 기존 RCP 시나리오와 동일하게 2100년의 온실가스 대표 농도(복사강제력)를 설정하고 이에 따른 2100년까지의 전개 경로를 제시하며, 여기에 기후변화에 대한 적응·대처 능력 등 사회·경제적 요소를 추가로 반영한다(O'Neill, 2016). SSP 시나리오는 기후변화 완화 또는 적응을 위한 사회·경제적 노력에 따라 SSP1~5로 구분되며, 각 시나리오는 복사강제력(2.6, 4.5, 7.0, 8.5 W/m<sup>2</sup>)에 따라 세분화된다. 이 중 IPCC (2021)에서는 SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5를 대표적인(illustrative) 시나리오로 정하고 있다(Table 2). 본 연구에서는 최악의 상황을 가정하기 위하여 사회가 발전되었으나 온실가스 감축에 실패하고 복사강제력은 8.5 W/m<sup>2</sup>로 가장 높은 SSP5-8.5 시나리오를 적용하였다.

현재 CMIP6를 통해 SSP 시나리오를 기반으로 하는 GCM(Global Circulation Model) 모의 자료가 제공되고 있으며, 이 중 ACCESS-CM2, CNRM-CM6-1, CNRM-ESM2-1, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0 등 6개 GCM으로부터 3시간 단위 강우 자료가 제공되고 있다. 본 연구에서는 이들 6개 GCM을 대상으로 APCC(Cho, 2013)의 방법을 적용하여, 통계적 상세화(downscaling) 기법인 SQM(Simple Quantile Mapping) 기법에 따라 30년 이상의 관측 자료가 존재하는 60개 종관기상관측소를 기준으로 상세화하였다. 한편, CMIP6 강우 자료의 최소 단위가 3시간인 반면, 홍수량 예측을 위해서는 적어도 1시간 단위의 강우 자료가 필요하기 때문에 3시간 단위의 강우 자료를 1시간 단위로 분해할 필요가 있다. 본 연구에서는 확률강우량으로부터 홍수량을 산정하는 것이 목표이므로 원 자료를 1시간 단위로 분해하기보다는 3시간 단위 확률강우량으로부터 확률강우강도식을 도출하여 1시간 단위의 확률강우량을 산정하였다.

### 나. 분석 대상 GCM의 선정

기후변화 자료는 그 자체로 불확실성을 지니기 때문에 동일한 기후변화 시나리오를 기반으로 하더라도 GCM 종류에 따라 다양한 모의 결과가 산출될 수 있다. 따라서 기후변화 자료를 활용하기에 앞서, 각 GCM의 과거 재현성과 예측의 불확실성을 평가하여 연구 대상 지역에 적합한 GCM을 선정할 필요가 있다(Hwang et al., 2018).

GCM의 재현성 평가는 일반적으로 강수량, 기온 등에 대한 다양한 지표를 분석하여 이루어지나, 본 연구에서는 3시간 강우 자료를 산출하는 GCM을 대상으로 하므로 강수량 관련 지표만을 적용하였다. 평가 항목으로는 Zhang et al. (2011)이 제시한 극한기후지수 중에서 연강수량에 관련된 PRCPTOT(1 mm 이상 강수일에 대한 연강수량, mm)와 SDII(PRCPTOT/1 mm 이상 강수일 수)를 선정하였다. 또한, 이 외의 강수량 관련 극한기후지수가 대부분 일 강수량을 기준으로 하고 있으나, 본 연구에서 적용하는 GCM 강우 자료가 3시간 간격임을 고려하여 일 강수량이 아닌 지속시간 3, 6, 9, 12, 24시간에 대한 연최대강우량을 평가 항목으로 정하였다. 각 항목별 평가 지표는 Jung et al. (2018)의 방법을 참고하여 평균과 표준편차의 관측값 대비 변화율에 대한 유클리디안 거리(Euclidean distance)로 산정하였다. 관측 자료와 각 GCM의 과거 모의 자료(historical)를 적용하여 Table 3와 같이 평가 지표를 산정하였고, 7개 항목 중 5개 항목에서 가장 성능이 낮게 나온 'CNRM-CM6-1'를 분석에서 제외하였다.

여러 GCM으로부터 산출된 다양한 미래 기상자료에 대하여, 최소한 어느 정도의 홍수 위험에 대비해야 하는지, 그리고 최대 어느 정도까지 위험할 수 있는지를 분석할 필요가 있다. 따라서 CMIP6의 3시간 단위 자료를 제공하는 6개 GCM 중에서 'CNRM-CM6-1'를 제외한 5개 GCM에 대해 최대 또는 최소의 확률강우량을 나타내는 GCM을 분석 대상으로 선정하였다. 모든 관측소(60개), 모든 시대(2011~2100년), 모든 지속시간(3, 6, ..., 72시간)에 대해 최대 또는 최소의 확률강우량을

**Table 2** Five illustrative scenarios of Shared Socioeconomic Pathways (SSP) in the Sixth Assessment Report (AR 6) of Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Riahi, 2017; IPCC, 2021)

Scenarios	SSP narratives	Radiative forcing	Green house gas emissions
SSP1-1.9	SSP1: Sustainability – Taking the green road (low challenges to mitigation and adaptation)	1.9 W/m <sup>2</sup>	Very low
SSP1-2.6		2.6 W/m <sup>2</sup>	Low
SSP2-4.5	SSP2: Middle of the road (medium challenges to mitigation and adaptation)	4.5 W/m <sup>2</sup>	Intermediate
SSP3-7.0	SSP3: Middle of the road (medium challenges to mitigation and adaptation)	7.0 W/m <sup>2</sup>	High
SSP5-8.5	SSP5: Fossil-fueled development – taking the highway (high challenges to mitigation, low challenges to adaptation)	8.5 W/m <sup>2</sup>	Very high

\* SSP4: Inequality – a road divided (low challenges to mitigation, high challenges to adaptation)

나타내는 GCM을 분석하였고, 대부분의 경우에서 최대 또는 최소 확률강우량을 나타낸 ‘ACCESS-CM2’와 ‘MPI-ESM1-2-HR’을 각각 최대 및 최소 GCM으로 선정하였다 (SSP5-8.5 기준).

다. 확률강우강도식을 이용한 확률강우량 산정

확률강우량의 산정에는 직접 작성한 강우 빈도 분석 모듈을 적용하였다 (Kim et al., 2021). 강우 빈도 분석 모듈은 Python의 Imoment3 라이브러리를 기반으로 코딩하였으며, Gumbel, GEV 등 12개 확률분포에 대해 지속시간별/재현기간별 빈도 분석이 가능하도록 구성하였다. 확률강우량 산정을 위하여 확률분포로는 Gumbel 분포를, 매개변수 추정방법으로는 확률가중모멘트법을 적용하였다. 현재 기준 확률강우량은 종관기상관측소의 1973~2020년 1시간 단위 강우 자료로부터 재현기간 100년, 200년, 500년 및 지속시간 1~72시간에 대해 산정하였다. 미래 기준 확률강우량은 2011~2040년 (2025s), 2041~2070년 (2055s), 2071~2100년 (2085s)으로 시대를 구분하였고 종관기상관측소 지점에 대해 상세화한 CMIP6의 3시간 단위 강우 자료로부터 지속시간 3, 6, ..., 72시간에 대해 산정하였다.

CMIP6 기반 3시간 단위 확률강우량으로부터 1시간 단위 확률강우량을 구하기 위하여 확률강우강도식을 도출하였다.

확률강우강도식은 「홍수량 산정 표준지침 (ME, 2019)」(이하 ‘홍수량 지침’)에 따라 전대수 다항식형을 적용하였다 (Eq. 1). 곡선의 형태를 고려하여 1~6시간과 7~72시간으로 구간을 분리하여 분석하였고, 모든 GCM과 모든 관측소에 대해  $R^2 = 1.0$ 을 만족하도록 곡선을 도출하였다. Fig. 3은 CMIP6의 3시간 단위 강우 자료를 제공하는 GCM 중에서 최대 및 최소 GCM인 ‘ACCESS-CM2’와 ‘MPI-ESM1-2-HR’에 대해 확률강우강도식을 도출한 결과를 나타낸다. 이와 같이 도출한 CMIP6의 확률강우강도식으로부터 지속시간 1~72시간에 대한 미래 확률강우량을 산정하였다.

$$\ln(I) = a + b\ln(t_h) + c(\ln(t_h))^2 + d(\ln(t_h))^3 + e(\ln(t_h))^4 + f(\ln(t_h))^5 + g(\ln(t_h))^6 \quad (1)$$

여기서,  $I$ 는 지속시간별 강우강도 (mm/hr),  $t_h$ 는 강우 지속시간 (hr),  $a \sim g$ 는 회귀상수를 의미한다.

가능최대강수량 (Probable Maximum Precipitation, PMP)은 수문기상학적 방법에 따라 가능최대강수량도 (PMP도)를 이용하여 구하는 것이 일반적이나, 국내의 경우 가장 최근에 제작된 PMP도가 2004년에 제작된 것 (MCT, 2004)으로 최근의 극치 사상 및 미래 기후변화를 고려하기에 한계가 있다고 판단

Table 3 Evaluation of reproducibility of CMIP6 GCMs for Korean climate

Indicator*		CMIP6 GCM (providing 3-h precipitation data)					
		ACCESS-CM2	CNRM-CM6-1	CNRM-ESM2-1	IPSL-CM6A-LR	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0
PRCPTOT (mm)		0.015	0.028	0.090	0.050	0.030	0.016
				worst			best
SDII (mm/day)		0.023	0.157	0.019	0.118	0.102	0.080
		best	worst				
Yearly max. (mm)	3hr	0.582	0.793	0.766	0.389	0.626	0.682
			worst		best		
	6hr	0.352	0.590	0.549	0.131	0.418	0.438
			worst		best		
	9hr	0.196	0.451	0.395	0.035	0.312	0.287
			worst		best		
	12hr	0.091	0.339	0.277	0.081	0.244	0.176
			worst		best		
	24hr	0.072	0.086	0.032	0.086	0.052	0.071
				best	worst		

\* PRCPTOT: Annual total precipitation in wet days (daily precipitation  $\geq 1$  mm)

SDII: Annual precipitation divided by the number of wet days

\*\* The evaluation values were calculated by  $D = \sqrt{\mu_e^2 + \sigma_e^2}$  (distance of RMSEs from the perfect value), where  $\mu_e = (\mu_s - \mu_o) / \mu_o$  and  $\sigma_e = (\sigma_s - \sigma_o) / \sigma_o$  (relative changes from the average and the standard deviation of observed data) (Jung et al., 2018).

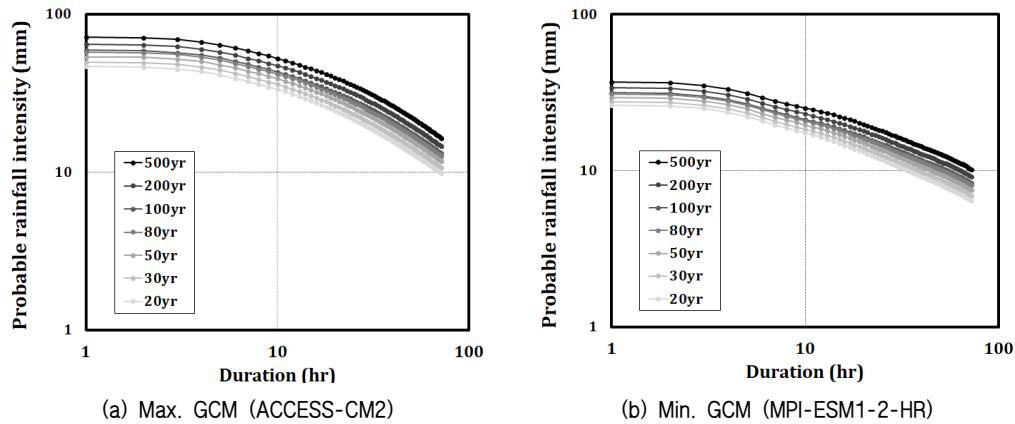


Fig. 3 Derivation of probable rainfall intensity formula using 3-hour rainfall data from CMIP6 GCMs (station: Sokcho, period: 2085s)

하였다. 통계학적 방법의 경우 연최대치계열로부터 도출한 매개변수를 이용하면 간단한 계산으로 PMP를 산정할 수 있으나, 모든 관측소/지속시간/GCM에 대한 매개변수 자료가 구축되어 있지 않아 적용이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 MLTMA (2009)에서 전국 관측소에 대해 분석한 100년 빈도 확률강우량에 대한 PMP의 비율을 적용하여 PMP를 산정하였다.

#### 라. 강우분포

강우분포형으로는 ‘홍수량 지침’에서 제시하는 수정 Huff 분포 (3분위, 50% 확률)를 적용하였다. 수정 Huff 분포는 MLTMA (2011)에서 제시하였던 기존의 Huff 분포를 수정한 것으로, 시간우량이 30 mm 이상이거나, 일강우량이 80 mm 이상이거나, 일강우량이 연강우량의 10% 이상인 ‘집중호우’를 기준으로 작성하여 강우의 시간적 및 양적 특성을 고려하였다.

### 3. 저수지 홍수 유입량 및 운영 모의

#### 가. 저수지 홍수 유입량 모의

저수지 홍수 유입량의 모의에는 직접 작성한 강우-유출 분석 모듈을 적용하였다 (Kim et al., 2021). 강우-유출 분석 모듈은 Python을 기반으로 코딩하였으며, 유효우량의 산정과 강우-유출 분석 방법으로는 ‘홍수량 지침’에서 채택하고 있는 NRCS (Natural Resources Conservation Service) CN (Curve Number) 방법과 Clark 단위도법을 각각 적용하였다.

유효우량의 산정을 위해 연구대상지의 토지이용도와 토양도를 이용하여 CN(3) 값을 산정하였다. 논과 산림에 대해서는 ‘홍수량 지침’에서 제시하는 조정된 값을 적용하였다.

Clark 단위도법의 매개변수 산정방법으로는 우리나라 하천의 유역특성을 반영한 서경대 공식을 ‘홍수량 지침’에서 채택

하고 있다. 그러나 서경대 공식은 면적이 60~1,000 km<sup>2</sup>인 유역을 대상으로 개발되었기 때문에 유역면적 1,000 km<sup>2</sup> 이상인 대유역이나 60 km<sup>2</sup> 이하인 소유역 등 공식의 적용 범위를 벗어난 유역에서는 적용을 지양할 필요가 있다 (KWRA & KRA, 2019). 따라서 본 연구에서는 서경대 공식을 기본적으로 적용하되, 유역면적이 60 km<sup>2</sup> 이하인 유역에 대해서는 연속형 Kraven 공식과 Sabol 공식을 도달시간과 저류상수 산정에 각각 적용하였다.

현재 (1973~2020년) 및 미래 (2025s, 2055s, 2085s) 시점에 대해 빈도별/지속시간별 확률강우량으로부터 홍수 유입량을 산정하고, 저수지 운영 모의에 입력자료로 적용하였다.

#### 나. 저수지 운영 모의

저수지 운영 모의에는 미 육군공병단 수공학센터 (Hydrologic Engineering Center, HEC)의 HEC-5 모델을 기반으로 구축한 저수지 운영 모듈을 적용하였다. HEC-5 모델은 저수지에서 홍수 유입량의 시간적 변화에 따른 방류량과 저수위 등을 모의하는 모형으로 텍스트 파일 기반의 입출력 구조를 지닌다 (USACE, 1998). HEC-5 모델은 현재 사용자 인터페이스를 갖춘 HEC-ResSim 모형으로 업데이트되었으나, 본 연구에서는 모듈 간의 연계에 용이한 HEC-5 모형을 적용하였다.

농업용 저수지의 운영은 일반적으로 홍수기 제한수위를 설정하여 홍수 시에 제한수위까지는 수량을 보존하고 그 이상의 수량은 배제하도록 정하고 있다. 따라서 제한수위는 홍수기에 관리되는 최고 수위이며, 본 연구에서는 가장 위험한 상태를 가정하기 위해 제한수위를 초기 수위로 설정하여 저수지 운영을 모의하였다. 모형 상에 저수지 운영 규칙으로는 Auto-ROM (Automatic Reservoir Operation Method)을 적용하여 제한수위 이상에서는 유입량 전량 또는 수위별 방류능력

에 따른 최대량을 방류시켜서 제한수위를 유지하도록 하였다. 제한수위 값으로는 연구대상지 중에서 수문이 있는 14개 저수지의 경우 홍수기 제한수위를 적용하고, 수문이 없는 4개 저수지의 경우 만수위를 적용하였다.

강우-유출 분석 모듈에서 모의한 빈도별/지속시간별 홍수 유입량을 저수지 운영 모듈에 적용하여 현재 (1973~2020년) 및 미래 (2025s, 2055s, 2085s) 시점에서 저수지 방류량과 저수위를 모의하고 홍수조절능력의 분석에 활용하였다.

#### 4. 저수지 홍수조절능력 분석

농업용 저수지가 현재의 제원을 유지할 경우 미래 기후변화에 따른 극한 강우에 대응할 수 있는지를 분석하기 위하여, 설계 제원의 초과 여부를 통해 홍수조절능력을 평가하였다. 저수지 홍수조절능력에 대한 설계 제원으로는 상류 유입량에 대한 설계홍수량 ( $I_{design}$ ), 저수지 방류지점의 하천 계획홍수량 ( $O_{design}$ ), 저수지 자체의 홍수위 ( $H_{flood}$ ) 또는 제당 표고 ( $H_{dam}$ ) 등이 있다.  $I_{design}$ 은 저수지의 내용적과 방류 능력으로 대응이 가능한 상류 유입량의 최댓값으로, 기후변화에 따라 유입량이 증가할 경우 대응이 불가능할 수 있다.  $O_{design}$ 은 방류지점의 하천이 범람하지 않기 위한 최대 유량으로, 극한 강우로 인해 저수지의 유입량이 과다하여 방류량이 증가할 경우 하류 하천에 범람 위험이 있다.  $H_{flood}$ 는 저수지 홍수조절의 한계선으로 저수위가 이를 초과하더라도 당장 안전상의 문제가 발생하지는 않으나,  $H_{dam}$ 을 초과할 경우 제당 월류로 인해

붕괴 위험이 증가할 수 있다. 따라서 설계 제원 중  $I_{design}$ ,  $O_{design}$ ,  $H_{dam}$ 을 기준으로 저수지 홍수조절능력을 평가하였다.

미래 기상자료로부터 유입량, 방류량, 저수위를 모의하여 각각의 최댓값인 최대 유입량 ( $I_{max}$ ), 최대 방류량 ( $O_{max}$ ), 최고 저수위 ( $H_{max}$ )를 산정하고 저수지의 설계 제원과 비교하였다. 저수지별로 100년~PMF 등 각각의 설계 빈도에 해당하는 모의 결과를 이용하였으며, 하류 하천의 경우 설계 빈도가 30~100년으로 저수지보다 낮지만 저수지 설계 빈도에 해당하는 극한 강우에 대한 방류량의 영향을 확인하고자 하였다. 지속시간별 모의 결과에 대해 첨두 유입량, 첨두 방류량, 첨두 저수위가 최대가 되는 지속시간이 각각 다르므로 임계지속시간 개념을 적용하지 않고 각각이 최대가 되는 값을  $I_{max}$ ,  $O_{max}$ ,  $H_{max}$  값으로 선택하였다.

Table 4는  $I_{max}$ ,  $O_{max}$ ,  $H_{max}$ 의 모의 결과를  $I_{design}$ ,  $O_{design}$ ,  $H_{dam}$ 과 비교하여 경우를 8가지로 구분한 것이다.  $I_{max}$ ,  $O_{max}$ ,  $H_{max}$ 가 모두 기준을 초과하는 경우 (I-O-H)는 기후변화로 인해 유입량이 너무 과다한 결과 저수지의 내용적과 방류 능력으로 대응이 불가능하여, 방류량과 저수위가 모두 기준을 초과하고 하류 하천과 저수지가 모두 위험해지는 상황을 의미한다.  $I_{max}$ ,  $O_{max}$ 가 기준을 초과하는 경우 (I-O)는 과다한 유입량에 대해 저수지의 충분한 방류 능력으로 제당 월류 위험을 막은 반면, 하류 하천에는 범람이 발생하는 상황을 의미한다.  $I_{max}$ ,  $H_{max}$ 가 기준을 초과하는 경우 (I-H)는 과다한 유입량에 대해 저수지의 방류 능력 부족으로 제당 월류가 발생

Table 4 Evaluation criteria for flood control capacity of the reservoir using the design values

$I_{max}$	$O_{max}$	$H_{max}$	Symbol	Description	Downstream	Reservoir
$> I_{design}$	$> O_{design}$	$> H_{dam}$	I-O-H	Extreme inflow due to climate change	Danger	Danger
		$\leq H_{dam}$	I-O	Sufficient discharge capacity	Danger	Safe
	$\leq O_{design}$	$> H_{dam}$	I-H	Insufficient discharge capacity	Safe → Danger	Danger
		$\leq H_{dam}$	I	Appropriate flood control	Safe	Safe
$\leq I_{design}$	$> O_{design}$	$> H_{dam}$	O-H	Insufficient design	Danger	Danger
		$\leq H_{dam}$	O	Excessive discharge	Danger	Safe
	$\leq O_{design}$	$> H_{dam}$	H	Insufficient discharge capacity	Safe → Danger	Danger
		$\leq H_{dam}$	X	Appropriate flood control	Safe	Safe

$I_{max}$ : maximum inflow for all durations  
 $O_{max}$ : maximum outflow for all durations  
 $H_{max}$ : maximum water level for all durations  
 $I_{design}$ : design flood of the reservoir  
 $O_{design}$ : design flood of direct downstream of the reservoir  
 $H_{dam}$ : top of dam elevation

상황으로, 당장은 방류량이 적어서 하루 하천의 범람 위험이 없으나 제당 월류 및 붕괴로 인해 추후 위험이 발생할 수 있는 상황이다.  $I_{max}$ 가 기준을 초과하는 경우 (I)는 유입량이 기준을 초과하였으나 저수지의 홍수 대응이 적절하게 이루어져서 하루 하천의 범람 위험도, 저수지의 제당 월류 위험도 없는 상황이다.  $O_{max}$ ,  $H_{max}$ 가 기준을 초과하는 경우 (O-H)는 유입량이 기준 이하임에도 불구하고 저수지가 홍수에 대응하지 못한 것으로 설계 자체에 문제가 있음을 의미한다.  $O_{max}$ 가 기준을 초과하는 경우 (O)는 유입량이 기준 이하이지만 방류량이 필요 이상으로 커서, 저수위는 적절하게 낮추었으나 하루에는 범람 위험이 발생하는 상황이다.  $H_{max}$ 가 기준을 초과하는 경우 (H)는 유입량이 기준 이하임에도 불구하고 저수지의 방류 능력 부족으로 제당 월류가 발생한 상황으로, I-H와 동일하게 당장은 하루 하천의 범람 위험이 없으나 제당 월류 및 붕괴로 인한 위험이 발생할 수 있다.  $I_{max}$ ,  $O_{max}$ ,  $H_{max}$ 가 모두 기준 이하인 경우 (X)는 기후변화에도 불구하고 유입량이 기준 이하를 유지하며, 이에 대해 저수지의 홍수 대응이 적절하게 이루어지는 상황을 의미한다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. SSP 기반 확률강우량

SSP 시나리오 기반의 3시간 단위 강우자료로부터 확률강우 강도식을 도출하여 지속시간 1~72시간에 대한 확률강우량을 산정하였다. Fig. 4는 60개 종관기상관측소에 대해 200년 빈도 및 PMP 확률강우량 (지속시간 12시간)을 시대별, GCM별로 산정한 결과를 보여주고 있다. CMIP6의 3시간 단위 자료를 제공하는 6개 GCM 중에서 재현성이 떨어지는 ‘CNRM-CM6-1’를 제외한 5개 GCM에 대해 SSP5-8.5에 대한 결과를 제시하였으며, 같은 시나리오와 시대 안에서도 GCM마다 모의 결과의 차이가 큰 것으로 나타났다. 최대 및 최소 GCM을 분석한 결과, 전반적으로 ‘ACCESS-CM2’의 확률강우량이 가장 큰 값의 분포를 보이고 ‘MPI-ESM1-2-HR’의 확률강우량이 가장 작은 값의 분포를 보이는 것으로 나타났다.

Fig. 4 (a)에서 200년 빈도의 지속시간 12시간 확률강우량은 현재 (1973~2020년) 시점에서 평균이 310.0 mm이고 최댓값이 445.2 mm이었으나, 미래에는 최대 GCM (ACCESS-CM2)을 적용할 경우 평균이 404.6 mm, 최댓값이 1,359.7 mm (2085s)

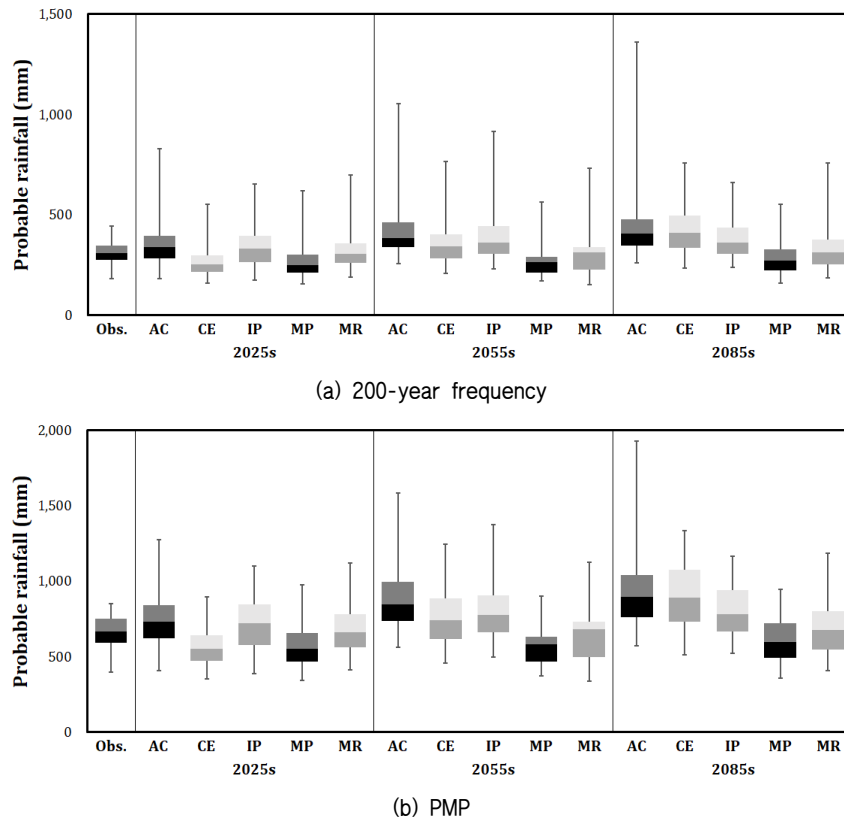


Fig. 4 Probable rainfall for 12-h duration based on the observed and CMIP6 SSP5-8.5 data (AC: ACCESS-CM2, CE: CNRM-ESM2-1, IP: IPSL-CM6A-LR, MP: MPI-ESM1-2-HR, MR: MRI-ESM2-0)



로 큰 폭으로 증가하는 것으로 나타났다. 미래에 최소 GCM (MPI-ESM1-2-HR)에 대해서도 평균은 274.4 mm으로 현재보다 낮으나 최댓값이 619.1 mm (2025s)로 현재 시점보다 극한 강우량이 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 4 (b)에서 PMP의 경우, 현재 시점에서 평균이 673.2 mm이고 최댓값이 958.5 mm로 산정되었다. 미래 기후변화에 따른 PMP의 최댓값은 최대 GCM 기준으로 2,885.4 mm (2085s), 최소 GCM 기준으로 1,331.2 mm (2025s)으로 현재 PMP 최댓

값과 비교할 때 각각 3.0배, 1.4배인 것으로 나타났다.

## 2. 저수지 유입량, 방류량, 저수위

연구대상지인 18개 농업용 저수지에 대해 최대 유입량 ( $I_{max}$ ), 최대 방류량 ( $O_{max}$ ), 최고 저수위 ( $H_{max}$ )를 모의한 결과를 Table 5에 제시하였다.

현재 시점에서 최대 유입량 ( $I_{max}$ )을 설계홍수량 ( $I_{design}$ )과 비교한 결과, 18개 저수지 중 12개 저수지 (금사, 오봉, 이동,

**Table 5** Simulation result of the maximum inflow ( $I_{max}$ ), maximum outflow ( $O_{max}$ ), and maximum water level ( $H_{max}$ ) and the design values

Reservoir		Design value*	Observed	Max. GCM**			Min. GCM***			
			1973~2020	2025s	2055s	2085s	2025s	2055s	2085s	
1	Geum-sa	$I_{max}$ (200yr)	154.9	191.7	166.3	181.6	202.0	141.9	114.8	133.6
		$O_{max}$	115.0	151.1	154.9	178.8	196.4	121.0	102.1	121.0
		$H_{max}$	137.4	135.1	135.1	135.2	135.3	134.9	134.8	134.9
2	Bangye	$I_{max}$ (200yr)	411.1	408.4	527.8	493.4	411.6	250.6	204.7	227.3
		$O_{max}$	290.0	366.8	504.7	481.5	388.7	228.0	198.4	217.6
		$H_{max}$	83.0	79.6	80.2	80.1	79.7	79.0	78.8	78.9
3	Sinam	$I_{max}$ (200yr)	75.0	71.8	32.0	36.5	51.8	52.6	45.3	49.4
		$O_{max}$	35.0	54.2	31.2	33.8	50.5	49.6	43.3	47.4
		$H_{max}$	193.0	188.5	188.1	188.1	188.4	188.4	188.3	188.4
4	Obong	$I_{max}$ (PMF)	2,735.0	4,150.6	7,382.7	9,369.1	12,692	4,184.8	3,959.5	4,745.2
		$O_{max}$	785.0	3,523.0	6,659.1	8,396.2	10,581	3,581.5	3,737.4	4,137.9
		$H_{max}$	126.3	127.6	144.9	154.5	166.6	128.0	128.8	131.0
5	Idong	$I_{max}$ (200yr)	1,149.0	1,284.9	1,236.9	1,536.4	1,559.4	954.6	946.2	873.5
		$O_{max}$	515.0	645.4	768.2	936.8	818.3	610.7	628.9	608.9
		$H_{max}$	46.0	45.4	46.2	47.9	46.7	45.0	45.2	45.0
6	Gwan-san	$I_{max}$ (100yr)	102.0	90.6	46.4	56.4	76.1	40.2	72.7	59.8
		$O_{max}$	50.0	30.8	37.2	51.0	64.4	26.0	64.0	48.4
		$H_{max}$	109.4	107.6	107.7	107.9	108.1	107.4	108.1	107.9
7	Baek-gok	$I_{max}$ (PMF)	2,042.0	2,503.7	2,225.2	2,868.9	2,664.3	1,550.6	1,623.8	1,678.1
		$O_{max}$	624.0	1,727.2	1,897.8	2,412.4	2,044.8	1,441.1	1,501.4	1,542.8
		$H_{max}$	105.2	102.7	103.6	106.0	104.2	101.4	101.6	101.7
8	Yedang	$I_{max}$ (PMF)	5,202.0	6,868.1	8,621.1	11,040	9,907.9	6,289.8	7,835.7	6,905.2
		$O_{max}$	2,528.0	5,618.6	6,929.0	8,464.5	7,508.2	5,618.8	6,477.8	5,868.6
		$H_{max}$	25.5	23.5	25.3	27.3	25.9	23.2	24.6	23.9
9	Tap-jung	$I_{max}$ (PMF)	2,227.0	3,933.8	5,574.4	7,308.8	7,425.5	3,714.8	7,663.4	5,503.9
		$O_{max}$	1,600.0	2,812.8	4,242.3	5,384.5	5,217.4	2,802.6	5,609.0	4,001.0
		$H_{max}$	33.9	33.6	37.3	41.5	40.9	33.6	42.4	36.5

\* Design value

design flood of the reservoir ( $I_{design}$ ,  $m^3/s$ )

design flood of direct downstream of the reservoir ( $O_{design}$ ,  $m^3/s$ )

top of dam elevation ( $H_{dam}$ , EL. m)

\*\* ACCESS-CM2, \*\*\* MPI-ESM1-2-HR

**Table 5** Simulation result of the maximum inflow ( $I_{max}$ ), maximum outflow ( $O_{max}$ ), and maximum water level ( $H_{max}$ ) and the design values (continued)

Reservoir		Design value*	Observed	Max. GCM			Min. GCM			
			1973~2020	2025s	2055s	2085s	2025s	2055s	2085s	
10	Manun	$I_{max}$ (200yr)	379.2	250.8	338.4	295.2	267.0	170.1	232.4	165.3
		$O_{max}$	155.0	181.3	307.7	280.5	237.4	152.5	190.0	152.4
		$H_{max}$	106.2	103.6	104.2	104.0	103.9	103.5	103.7	103.5
11	Myo-gok	$I_{max}$ (500yr)	483.3	398.1	689.3	761.9	549.2	216.2	235.5	283.6
		$O_{max}$	250.0	374.6	665.5	753.0	531.7	209.0	218.3	278.7
		$H_{max}$	55.1	53.1	53.7	53.8	53.4	52.5	52.6	52.8
12	Jang-gye	$I_{max}$ (200yr)	202.0	271.4	151.8	225.0	258.4	141.5	191.0	126.7
		$O_{max}$	186.0	225.0	141.6	216.3	246.2	132.8	167.0	121.0
		$H_{max}$	134.5	134.6	134.1	134.6	134.7	134.1	134.3	134.0
13	Jukan	$I_{max}$ (200yr)	115.0	107.6	91.9	84.2	94.1	56.7	72.3	60.7
		$O_{max}$	95.0	82.7	89.3	80.1	89.5	54.4	68.7	56.3
		$H_{max}$	149.0	146.6	146.6	146.6	146.6	146.4	146.5	146.4
14	Ji-pyeong	$I_{max}$ (200yr)	284.3	317.4	348.0	311.5	348.0	213.4	267.7	219.6
		$O_{max}$	130.0	240.0	324.8	282.7	308.4	193.8	232.6	186.3
		$H_{max}$	95.8	93.5	93.8	93.7	93.7	93.4	93.5	93.3
15	Gwang-ju	$I_{max}$ (PMP)	1,688.0	1,846.5	1,553.0	1,873.5	2,072.2	1,658.4	1,379.5	1,848.1
		$O_{max}$	285.0	1,092.7	1,123.0	1,242.8	1,384.1	1,064.9	924.4	1,142.7
		$H_{max}$	82.9	80.2	80.6	81.6	82.6	79.9	79.4	80.9
16	Naju	$I_{max}$ (PMP)	2,346.0	2,644.4	2,810.1	3,543.5	3,903.2	2,535.8	2,107.3	2,802.6
		$O_{max}$	340.0	1,415.4	1,732.5	2,366.3	2,033.5	1,214.3	1,271.7	1,536.4
		$H_{max}$	71.6	67.9	69.7	71.7	71.5	67.3	67.5	68.5
17	Dae-ryong	$I_{max}$ (200yr)	318.7	568.9	389.3	460.3	560.1	285.3	224.4	260.7
		$O_{max}$	230.0	500.1	380.6	455.9	553.1	270.4	214.9	249.5
		$H_{max}$	74.7	72.4	72.0	72.3	72.5	71.7	71.4	71.6
18	Jang-sung	$I_{max}$ (PMP)	2,912.0	3,141.2	3,248.2	4,103.0	4,557.7	2,787.2	2,529.9	3,329.3
		$O_{max}$	940.0	1,904.5	2,108.9	2,755.9	2,908.4	1,663.9	1,819.6	2,026.2
		$H_{max}$	95.0	91.7	93.1	95.3	96.2	90.6	91.2	92.5

\* Design value

design flood of the reservoir ( $I_{design}$ ,  $m^3/s$ )design flood of direct downstream of the reservoir ( $O_{design}$ ,  $m^3/s$ )top of dam elevation ( $H_{dam}$ , EL. m)

\*\* ACCESS-CM2, \*\*\* MPI-ESM1-2-HR

백곡, 예당, 탑정, 장계, 지평, 광주, 나주, 대룡, 장성)에서 설계 홍수량을 초과하는 것으로 나타났다. 12개 저수지 모두 최근 10년 내에 최초 준공 또는 개보수 사업이 이루어진 바 있고 각 사업 당시 설정한 설계홍수량으로 비교하였음에도 이러한 차이가 나타났다. 이는 기본적으로 PMP 산정 방법의 차이 또는 강우-유출 분석 시 매개변수 산정 방법의 차이 등에 의한

것으로 판단되며, 사업 이후 최근 몇 년 동안 발생한 극한 강우에 의해 확률강우량이 증가한 것 역시 하나의 요인으로 판단된다. 미래의 최대 유입량은 오봉, 예당, 탑정, 장계, 광주, 나주, 장성 등 7개 저수지의 경우 최대/최소 GCM 모두에 대해 설계홍수량을 초과하였고, 금사, 반계, 이동, 백곡, 묘곡, 지평, 대룡 등 7개 저수지의 경우 최대 GCM에 대해서만 설계홍수량

을 초과하였으며, 신암, 관산, 만운, 죽안 등 4개 저수지의 경우 최대/최소 GCM 모두에 대해 설계홍수량을 초과하지 않는 것으로 나타났다.

저수지 방류지점의 하천 계획홍수량 ( $O_{design}$ )은 저수지보다 낮은 빈도로 설계되었기 때문에, 저수지 설계 빈도에 해당하는 큰 규모의 강우에 대해서는 대부분 최대 방류량 ( $O_{max}$ )이 계획홍수량을 초과하는 것으로 나타났다. 다만, 관산저수지는 현재 시점에서 최대 방류량이 계획홍수량을 초과하지 않으며, 죽안 저수지는 현재와 미래의 최대/최소 GCM 모두에 대해 계획홍수량을 초과하지 않는 것으로 나타났다.

최고 저수위 ( $H_{max}$ )를 제당 표고 ( $H_{dam}$ )와 비교한 결과, 오봉 저수지와 탐정 저수지의 경우 현재와 미래의 최대/최소 GCM 모두에 대해 제당 표고를 초과하는 것으로 나타났다. 다만, 두 저수지 모두 PMP를 기준으로 설계되었으며, PMP 산정 방법에 따라 설계 당시보다 유입량이 과다하게 산정되었을 수 있다. 이동, 백곡, 예당, 장성 등 4개 저수지의 경우 미래의 최대 GCM에 대해서만 제당 표고를 초과하였고, 그 외 12개 저수지의 경우 현재와 미래의 최대/최소 GCM 모두에 대해 제당 표고를 초과하지 않는 것으로 나타났다.

### 3. 저수지 홍수조절능력 평가

현재와 미래 시점에서 최대 유입량 ( $I_{max}$ ), 최대 방류량 ( $O_{max}$ ), 최고 저수위 ( $H_{max}$ )의 모의 결과를 토대로 농업용 저수지의 홍수조절능력을 평가하였다. Table 4에서 제시한 8가지 경우 (I-O-H, I-O, I-H, I, O-H, O, H, X)로 모의 결과를 구분

하고,  $O_{max}$ ,  $H_{max}$ 가  $O_{design}$ ,  $H_{dam}$ 을 초과하는 정도를 산정하여 Fig. 5에 제시하였다.  $O_{max}$ 와  $H_{max}$ 의 초과 여부를 통해 저수지의 제원이 홍수조절능력을 갖추고 있는지를 확인할 수 있으므로 각각의 초과 정도인  $\Delta O_{max}$ ,  $\Delta H_{max}$ 를 가로축과 세로축에 나타냈으며,  $I_{max}$ 의 초과 여부는 저수지 제원과 무관하게 기후변화에 따른 결과이므로 평면상에 표식을 달리하여 나타내었다.

Fig. 5 (a)는 현재 시점에서 18개 농업용 저수지의 홍수조절능력을 나타낸다. 전체 저수지 중 61.1%가 I-O의 경우로 설계홍수량을 초과한 유입량을 충분히 방류하여 저수위를 낮출 수 있는 능력이 있으나 하류에 범람 위험이 있으며, 22.2%가 O의 경우에 해당하여 필요 이상의 방류로 인한 하류의 범람 위험이 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 수문의 일부 개방 등을 고려하지 않고 수위별 방류능력을 전량 발휘하도록 하였기 때문에 방류량이 필요 이상으로 크게 산정될 수 있으며, O에 해당하는 저수지에 대해 수문 운영 규칙을 보다 세부적으로 조정하면 하류의 범람 위험 없이 저수위를 낮출 수 있을 것으로 판단된다. 현재 시점에서 오봉 저수지가 유일하게 I-O-H에 해당하여 홍수 위험이 가장 크고, 관산 저수지와 죽안 저수지는 X에 해당하여 위험이 가장 작은 것으로 나타났다.

Fig. 5 (b)는 미래 시점에서 저수지의 홍수조절능력을 나타내며, 최대/최소 GCM과 시대별 (2025s, 2055, 2085s) 결과를 한 번에 보여주고 있다. Fig. 5 (a)의 그래프에는 이상단 ( $\Delta O_{max} > 0$ ,  $\Delta H_{max} > 0$ )에 자료가 거의 없는 반면에 Fig. 5 (b)의 그래프에는 이상단에 I-O-H에 해당하는 자료가 크게

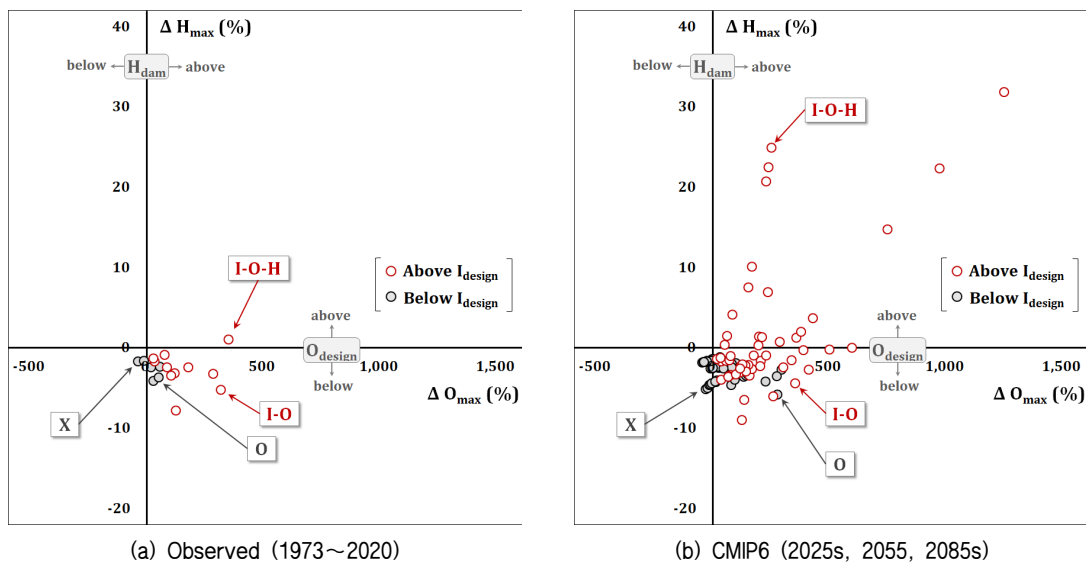


Fig. 5 Comparison between maximum inflow ( $I_{max}$ ), maximum outflow ( $O_{max}$ ), and maximum water level ( $H_{max}$ ) and the design values ( $\Delta O_{max} = (O_{max} - O_{design}) \times 100(\%)$ ,  $\Delta H_{max} = (H_{max} - H_{design}) \times 100(\%)$ )

늘어난 것으로 나타났다. 현재와 비교할 때 I-O의 비율이 61.1%에서 30.6%로 감소한 대신, I-O-H의 비율이 5.6%에서 18.5%로 증가하고 O의 비율이 22.2%에서 28.7%로 증가하였으며, X의 비율이 11.1%에서 22.2%로 증가하였다. 현재 I-O 상태에서 미래에 I-O-H 상태로 변화한 저수지는 이동, 백곡, 예당, 예당, 탑정, 나주, 장성 저수지로, 현재에는 유입량이 크더라도 저수지의 방류 능력이 충분한 반면 미래에는 유입량이 급증함에 따라 최대한 방류를 하더라도 제당 월류로 인한 붕괴의 위험이 있는 것으로 나타났다. 반계, 신암, 만운, 모곡, 장계 저수지는 현재 IO 또는 O 상태에서 미래의 일부 시대 및 GCM에 대해 X 상태로 변화하였으며 현재 시점보다  $I_{max}$ 가 감소함에 따라  $O_{max}$ 가 함께 감소한 것으로 나타났다.

#### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 SSP 시나리오 기반의 미래 기상자료를 이용하여 기후변화에 따른 농업용 저수지의 홍수조절능력을 분석하였다. 전국 18개 농업용 저수지를 연구 대상으로 선정하였고, CMIP6 GCM의 3시간 단위 강우 자료를 이용하여 현재 (1973~2020년)와 미래 (2025s, 2055s, 2085s) 기간에 대해 확률강우량, 홍수 유입량, 저수지 방류량, 저수위 등을 모의하였다. 최대 유입량 ( $I_{max}$ ), 최대 방류량 ( $O_{max}$ ), 최고 저수위 ( $H_{max}$ )를 저수지 및 하천의 제원과 비교하여 농업용 저수지가 현재의 제원으로 유지될 경우 미래 기후변화에 따른 홍수에 대응이 가능한지를 평가하였다. 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) CMIP6의 3시간 단위 강우 자료를 제공하는 GCM에 대해 재현성을 평가하였고, 확률강우량을 기준으로 최대 및 최소 GCM을 선정하여 분석에 적용하였다. 전국 60개 종관기상관측소에 대해 확률강우량을 산정한 결과, 지속시간 12시간에 대한 200년 빈도 확률강우량은 현재 기준으로 최댓값이 445.2 mm이었으나 미래에는 619.1~1,359.7 mm까지 증가하는 것으로 나타났다. PMP의 경우 현재 시점의 최댓값 958.5 mm를 기준으로 미래에는 1.4~3.0배만큼 매우 큰 폭으로 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 현재 기준으로 12개 저수지에서 최대 유입량 ( $I_{max}$ )이 설계홍수량 ( $I_{design}$ )을 초과하고, 오봉, 탑정 저수지에서 최고 저수위 ( $H_{max}$ )가 제당고 ( $H_{dam}$ )를 초과하는 것으로 나타났다. 이는 PMP 산정 또는 강우-유출 분석 과정의 불확실성, 그리고 최근 극한 강우로 인한 확률강우량의 증가 등이 원인인 것으로 판단된다. 미래 기준으로는

14개 저수지에서  $I_{max}$ 가  $I_{design}$ 을 초과하며, 17개 저수지에서  $O_{max}$ 가  $O_{design}$ 을 초과하고, 이동, 백곡, 예당, 장성 저수지에서 최대 GCM에 대해  $H_{max}$ 가  $H_{dam}$ 을 초과하는 것으로 나타나 미래의 홍수 위험에 대비가 필요한 것으로 판단된다.

- 3)  $I_{max}$ ,  $O_{max}$ ,  $H_{max}$  각각의 초과 여부에 따라 경우를 구분한 결과, 현재 시점에서는 전체 저수지의 61.1%가 I-O에 해당하고, 오봉 저수지가 유일하게 I-O-H에 해당하는 것으로 나타났다. 미래 시점에서는 I-O의 비율이 30.6%로 감소한 대신, I-O-H의 비율이 5.6%에서 18.5%로 증가하였다. 현재 I-O 상태에서 미래 I-O-H로 변화한 저수지는 이동, 백곡, 예당, 탑정, 나주, 장성 저수지로, 미래 기후변화로 인해 유입량이 급증함에 따라 최대한 방류를 하더라도 저수위가 제당을 월류하여 붕괴의 위험이 있는 것으로 나타났다.

SSP 시나리오는 이전의 시나리오로부터 발전을 거듭하는 과정에서 다양한 요인들을 보다 현실적으로 고려하기 위한 노력을 반영하고 있으므로, 현재 시점에서 미래의 홍수 위험을 평가할 수 있는 가장 적합한 도구라고 판단된다. 단, 기후변화 자료가 내포하는 불확실성으로 인하여 본 연구에서 제시한 분석 결과가 미래에 반드시 발생할 것이라고 볼 수는 없다. 그러나 본 연구는 미래에 발생할 수 있는 홍수 위험의 정도를 정량적으로 예측하고 최대 위험의 수준을 파악함으로써 현실에서 구조적/비구조적 대책을 마련하고 피해를 저감하는 것에 의미가 있다.

본 연구에서 홍수조절능력 평가에 활용한 최대 유입량, 최대 방류량, 최고 저수위 등의 변수들 역시 불확실성을 지니며, 기초 자료가 동일하더라도 자료의 활용 방식 또는 모의 조건에 따라 다양하게 산정될 수 있다. 따라서 추후 연구를 통해 확정론적이지 아닌 확률론적 방법에 따른 홍수조절능력의 평가가 이루어질 필요가 있다.

#### 감사의 글

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

#### REFERENCES

1. Cho, J. P., 2013. Impact assessment of climate change for

- agricultural reservoirs considering uncertainty. *Research Report* 2013-05. APEC Climate Center (in Korean).
2. Garijo, C., and L. Mediero, 2018. Influence of climate change on flood magnitude and seasonality in the Arga River catchment in Spain. *Acta Geophysica* 66(4): 769-790. doi:10.1007/s11600-018-0143-0.
  3. Hwang, S., J. Cho, and K. S. Yoon, 2018. Assessing the skills of CMIP5 GCMs in reproducing spatial climatology of precipitation over the coastal area in East Asia. *Journal of Korea Water Resources Association* 51(8): 629-642 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2018.51.8.629.
  4. Hwang, S. H., 2012. Impacts of reservoir dam heightening on downstream flood alleviation. Master diss., Seoul National University (in Korean).
  5. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland.
  6. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
  7. Jun, S. M., M. S. Kang, I. Song, S. H. Hwang, K. Kim, and J. Park, 2013. Effects of agricultural reservoir rehabilitation on their flood control capacities. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(6): 57-68 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2013.55.6.057.
  8. Jun, S. M., S. Hwang, J. Kim, J. Kwak, K. Kim, H. J. Lee, and M. S. Kang, 2020. Future inundation risk evaluation of farmland in the Moohan stream watershed based on CMIP5 and CMIP6 GCMs. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 62(6): 131-142 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2020.62.6.131.
  9. Jung, I., H. I. Eum, E. J. Lee, J. Park, and J. Cho, 2018. Development of representative GCMs selection technique for uncertainty in climate change scenario. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 60(5): 149-162 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2018.60.5.149.
  10. Kim, J., J. 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): 39-51 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2016.58.1.039.
  11. Kim, J. H., J. H. Gwak, S. M. Jeon, S. H. Lee, J. N. Lee, and M. S. Kang, 2021. Development of linkage methods for flood and inundation simulation of agricultural hydraulic structures. *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers* 63(2): 44-56 (in Korean).
  12. Korea Rural Community Corporation, 2020. Implementation of flood capacity expansion project in small and medium-sized reservoirs (Press Release). Released 19 Jan. 2020 (in Korean).
  13. Korea Water Resources Association and Korea River Association, 2019. Explanation of national river design criteria (in Korean).
  14. Kwak, J., J. Kim, S. M. Jun, S. Hwang, S. Lee, J. N. Lee, and M. S. Kang, 2020. Assessment of future flood according to climate change, rainfall distribution and CN. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 62(6): 85-95 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2020.62.6.085.
  15. Ministry of Construction and Transportation, 2004. Renewable report of PMP map in Korea (in Korean).
  16. Ministry of Environment, 2019. Standard guidelines for flood estimation (in Korean).
  17. Ministry of Environment, 2020. Master plan of national water management I (in Korean).
  18. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2009. Analysis of the trend of extreme flood events (in Korean).
  19. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011. Improvement and supplement of probability rainfall in South Korea (in Korean).
  20. Miotto, F., P. Claps, F. Laio, and D. Poggi, 2007. An analytical index for flood attenuation due to reservoirs. *In 32nd Congress of IAHR*, Venice, Italy.
  21. Montaldo, N., M. Mancini, and R. Rosso, 2004. Flood hydrograph attenuation induced by a reservoir system: analysis with a distributed rainfall-runoff model. *Hydrological processes* 18(3): 545-563. doi:10.1002/hyp.1337.
  22. O'Neill, B. C., C. Tebaldi, D. P. V. Vuuren, V. Eyring, P. Friedlingstein, G. Hurtt, and B. M. Sanderson, 2016. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development* 9(9): 3461-3482. doi:10.5194/gmd-9-3461-2016.
  23. Park, J., 2016. Reliability-based flood risk assessment methodology and its application to climate change for agricultural reservoirs. Ph.D. diss., Seoul National University (in Korean).
  24. Riahi, K., D. P. van Vuuren, E. Kriegler, J. Edmonds, B.

- C. O'Neill, S. Fujimori, and M. Tavoni, 2017. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global environmental change* 42: 153-168. doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009.
25. Shim, M. P., O. I. Kwon, and K. T. Kim, 1998. Flood control effects of Hwacheon dam in connection with Peace dam 1; A review of flood control capacity of Hwacheon dam. *Journal of The Korean Society of Civil Engineers* 18(2-2): 163-172 (in Korean).
26. Shrestha, S., and W. Lohpaisankrit, 2017. Flood hazard assessment under climate change scenarios in the Yang River Basin, Thailand. *International Journal of Sustainable Built Environment* 6(2): 285-298. doi:10.1016/j.ijbsbe.2016.09.006.
27. U.S. Army Corps of Engineers, 1998. HEC-5 simulation of flood control and conservation systems - User's manual, version 8.0.
28. Volpi, E., M. Di Lazzaro, M. Bertola, A. Viglione, and A. Fiori, 2018. Reservoir effects on flood peak discharge at the catchment scale. *Water Resources Research* 54(11): 9623-9636. doi:10.1029/2018WR023866.
29. Zhang, X., L. Alexander, G. C. Hegerl, P. Jones, A. K. Tank, T. C. Peterson, B. Trewin, and F. W. Zwiers, 2011. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 2(6): 851-870. doi:10.1002/wcc.147.