

## 미래 기후변화 시나리오를 반영한 댐의 안정성 분석

김미은\* · 장수형\*\* · 이기호\*\*\* · 손예주\*\*\*\*†

\*한국수자원공사 수자원환경연구소 선임연구원, \*\*한국수자원공사 수자원환경연구소 수석연구원,  
\*\*\*한국수자원공사 물관리기획처 차장, \*\*\*\*한국수자원공사 물관리기획처 대리

### Analysis of dam stability based on future climate change scenarios

Kim, Mieun\* · Jang, Suhyeong\*\* · Lee, Giho\*\*\* and Son, Yeju\*\*\*\*†

\*Senior Researcher, Water Resources & Environmental Research Center, K-water Research Institute, Korea Water Resources Corporation (K-water), Daejeon, Korea

\*\*Head Researcher, Water Resources & Environmental Research Center, K-water Research Institute, Korea Water Resources Corporation (K-water), Daejeon, Korea

\*\*\*Senior Manager, Water Resources Management Research & Planning Dept., K-water, Daejeon, Korea

\*\*\*\*Manager, Water Resources Management Research & Planning Dept., K-water, Daejeon, Korea

### ABSTRACT

In Korea, the frequency of extreme rainfall during summer has increased over the past 30 years. The average annual precipitation is predicted to increase by at least 4% and up to 16% in the second half of the 21st century due to climate change. When designing dam construction and flood control capacity improvement projects, the probable maximum precipitation (PMP) and probable maximum flood (PMF) are estimated through the hydrological analysis process to ensure the stability of the dam. In this study, considering recent extreme precipitation patterns, the impact of climate change on dams was analyzed and evaluated. Projected PMPs were calculated and compared for 37 dams under K-water's management. Also, the study examined temporal and spatial changes in PMP by dividing the entire period into three periods (P1: 2021 ~ 2040, P2: 2041 ~ 2070, P3: 2071 ~ 2100) and applying the spatial interpolation method. A hydrological stability review of four dams (Soyang, Choongju, Hoengsung, Pyeonghwa) on the Han River was conducted through comparing existing PMF (based on dam construction, design, and flood control capacity improvement projects) with projected PMF from climate change scenarios for the three periods. The rate of change in PMF over time, overflow of the dam, and whether it was possible to improve the capacity of the dam were evaluated. This hydrological stability assessment of PMP and PMF is noteworthy when considering the timing of dam construction and the recent extreme rainfall pattern.

*Key words: Climate Change, Probable Maximum Precipitation (PMP), Probable Maximum Flood (PMF), Dam Stability*

### 1. 서론

IPCC (2023) 보고서에 따르면, 미래 기후변화의 영향과 리스크는 점점 더 복잡해지고 관리가 어려워질 것으로 전망하고 있다. 특히, 가뭄, 폭염, 홍수 등 지구온난화로 많은 지역에서 복합적인 재해가 증가하고 있다(IPCC,

2023). 기후변화는 폭염, 폭우 등과 같은 극한 기상 사상의 발생빈도와 규모를 증가시키고 이러한 현상은 더 분명해지고 있다는 추세이다(UNESCO and UN-Water, 2020). 특히, 우리나라는 전 세계 평균보다 더 빠른 온난화 속도를 보이고 있으며 최근 10년간(2012 ~ 2021년) 기후변화와 연관된 자연재해로 막대한 경제적 손실이 발생하고 있

†Corresponding author : yejop@kwater.or.kr (34350, Korea Water Resources Corporation, 200, Sintanjin-ro, Daedeok-gu, Daejeon, Korea. Tel. +82-42-629-3126)

ORCID 김미은 0009-0003-4845-2196  
장수형 0009-0005-5997-1017

이기호 0009-0000-4352-6027  
손예주 0009-0001-2082-8759

다(Yonhap News, 2023). 실제 우리나라에 내린 강우 패턴을 보면 거의 매년 시간당 100 mm 이상의 호우가 발생하고 있다. 2024년 7월의 지역별 시간당 강우를 보면, 의정부 103 mm, 파주 101 mm, 군산 145 mm, 2022년 8월에는 군산에 시간당 145.5 mm, 서울에는 141 mm 등 짧은 기간에 발생하는 강한 강우가 이제는 우리나라의 여름철 강우의 일반적인 패턴이 되고 있다(e-nara index, 2024). 전 세계적으로 가속화되고 있는 기후변화는 많은 분야에 영향을 미치고 있으며, 가장 취약한 부분으로 강수패턴의 변화와 가용 수자원의 감소를 언급하고 있다(IPCC, 2023). 이러한 변화와 함께 미래 기후변화 시나리오를 보면 미래의 기온은 현재에 비해 점진적으로 증가할 것으로 전망하고 있고 극한 강우사상의 발생으로 수공구조물의 설계기준의 재평가 및 재설계 등의 필요함을 시사한다. 특히, 생활, 공업, 농업용수의 공급 및 전력 생산 등 인간이 살아가는데 필요한 수자원의 효율적 이용과 홍수와 같은 물의 재해로부터 안전을 보장하기 위해 댐을 건설하여 운영하고 있다. 하지만 최근의 이상기후 발생 빈도의 증가와 시간 경과에 따른 댐의 열화 및 노후화는 댐의 재해 위험도를 높이고 있어 국가 차원에서 이를 위한 대책 마련이 요구되는 현실이다(Kim et al., 2006). MLTM (2008)의 댐의 가능최대강수량(Probable Maximum Precipitation, PMP) 및 가능최대홍수량(Probable Maximum Flood, PMF)의 산정 절차에 따라 최근 강우사상 및 기후변화 영향 등을 반영하여 PMP와 PMF를 재산정하고 댐의 안전을 확보할 필요가 있다(Kim, 2003).

기존 연구를 살펴보면, 기후변화의 영향을 고려한 PMP의 산정과 수자원시설의 계획 및 설계 시 반영에 대한 필요성을 언급하고 있다. 기후변화 영향을 고려한 설계 기준 수립 시 PMP의 재산정이 중요하며 수자원시설의 계획 및 설계에 이를 반영할 필요성을 강조하고 있다(Clavet-Gaumont et al., 2017; Sarkar and Maity, 2020). 기후변화의 영향을 고려한 PMP 추정 연구에서도 먼 미래로 갈수록 20~30% 증가하는 것으로 전망하였고 댐과 같은 수공구조물의 안전 리스크에 대한 평가의 필요성을 강조하고 있다(Kunkel et al., 2013). 실제 이상기후 발생 시의 기상자료를 반영하여 PMP를 재산정한 연구에서 설계 당시 PMP 보다 약 30% 정도 증가한 것으로 나타났다(Kim et al., 2006). 또한 RCP 시나리오에 따른 충주댐 유역의 PMP를 산정한 결과, 2070년 기준으로 약 15% 이상 증가할 것으로 분석한 바 있다(Lee et al., 2017). 이외에도 국내외에서 기후변화의 잠재적인 영향 평가를 위해 PMP

및 PMF 추정 연구가 수행되어 오고 있다(Jang et al., 2014; Lagos-Tuniga and Vargas, 2014; Park et al., 2019). 하지만 주요 수공구조물의 설계 시 미래 기후변화 시나리오를 반영한 PMP의 전망 결과는 미래로 갈수록 시간 및 공간적 불확실성이 증가하는 것으로 나타났다(Choi et al., 2015; Lee and Kim, 2016; Lee et al., 2016; Sim et al., 2015). 댐의 안정성 평가와 관련한 국내 연구에서는 기후변화를 고려한 PMP 전망과 관련한 연구는 다수 있으나 현재 대비 PMP의 변화와 PMF 산정을 통한 댐의 안정성 평가 분석 연구는 전무하다.

본 연구에서는 댐에 대한 기후변화의 잠재적인 영향 평가를 위해 미래 기후변화 시나리오에 의한 PMP의 시·공간적 변화 및 PMF 재산정을 통한 댐의 안정성 평가를 실시하였다. 이를 위해, 미래 기후변화 시나리오(RCP 2.6/4.5/6.0/8.5)의 PMP 결과는 기후변화 대비 수자원적응 기술 연구단(Climate Change Adaptation for Water Resources, CCAW) 연구단의 연구 결과를 활용하였다(Kim and Lee, 2020). 남한 전체에 대한 미래 PMP 분석 결과를 토대로 기후변화 시나리오별 전망 기간별(전기: 2021~2040, 중기: 2041~2070, 후기: 2071~2100)로 시간적 및 공간적 변화를 분석하였고, 한국수자원공사(K-water) 관리하고 있는 37개 댐의 위치를 토대로 PMP 변화를 지역적으로 살펴보았다. 실제 37개 댐에 대한 기존 PMP와 기후변화 시나리오별, 전망 기간별로 산정된 미래 PMP와의 비교·분석을 실시하였다. 마지막으로 댐의 수문학적 안정성인 PMP 및 PMF에 대한 댐체의 붕괴 가능성을 평가하기 위하여, 댐별로 산정된 미래 PMP를 한강권역 내 위치한 4개 댐(소양강, 충주, 횡성, 평화)에 적용함으로써 댐별로 PMF 재평가를 실시하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 연구대상유역

본 연구는 K-water 관리 하의 전체 37개 댐(다목적댐 20개, 용수댐 14개, 홍수조절댐 3개)을 대상으로 하였다(Fig. 1). K-water 37개 댐의 용도, 형식, 면적 등 댐별 기본 현황은 Table 1과 같다(K-water, 2023). 댐은 주요 축조 재료에 따라 필댐과 콘크리트댐으로 분류되고, 필댐은 주재료에 따라 흙댐(Earthfill dam)과 록필댐(Rockfill dam)으로 구분한다. K-water의 37개 댐은 주재료에 따라 Table 1과 같이 중앙차수벽식사력댐(Earth Core Rock Fill

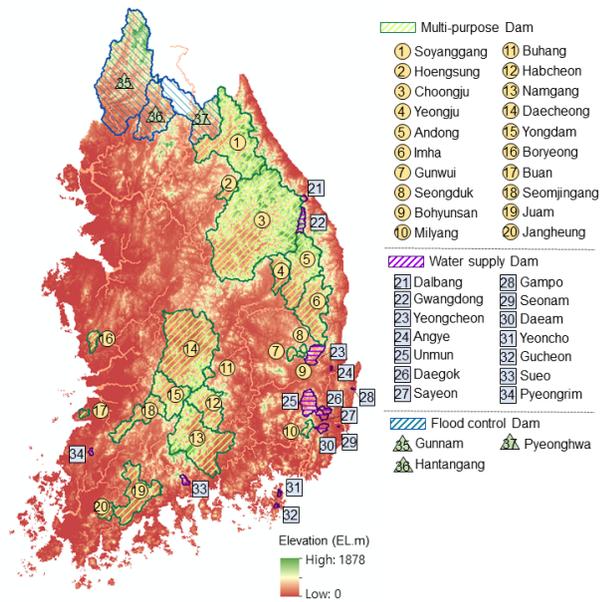


Fig. 1. Location map of a total 37 dams by use (multi purpose, water supply, flood control) under K-water management

Dam, E.C.R.D), 콘크리트표면차수벽석괴댐(Concrete Faced Rock Fill Dam, C.F.R.D), 중력식콘크리트댐 (Concrete Gravity Dam, C.G.D), 흙댐(Earth Fill Dam, E.F)으로 구성되어 있다(K-water, 2023). 2004년부터 빈번하게 발생하는 이상홍수에 대한 댐의 적극적인 대응 방안을 검토하기 위해 댐 유역의 PMP와 PMF를 산정하고 수문학적 안정성 평가를 실시하고 있다(MOCT, 2004a). 전 댐을 대상으로 치수능력증대사업을 완료한 댐은 다목적 댐 19개소, 용수댐 11개소, 홍수조절댐 1개소이며, 현재 공사가 진행 중인 댐은 2개소(충주댐, 안계댐), 행정절차가 진행 중인 댐은 1개소(남강댐), 설계 완료 댐은 2개소(선암댐, 사연댐)이다(K-water, 2023). 현재까지 치수능력 증대사업을 추진하고 있으며 수문 분석 결과에 따라 구조적 대책(보조여수로 신설, 파라펫 월 설치, 기존 여수로 개선, 사면보강 등) 및 비구조적 대책(저수지 운영 방식 및 기준 변경 등)을 적절하게 적용하여 관리하고 있다.

Table 1. Current status of 37 dams under K-water management

Use	Dam	Type of dam	Area (km <sup>2</sup> )	Use	Dam	Type of dam	Area (km <sup>2</sup> )	
Multi purpose	Soyang	E.C.R.D	2,703	Water supply	Gwangdong	E.C.R.D	125.0	
	Choongju	C.G.D	6,648		Dalbang	E.C.R.D	29.4	
	Hoengseong	E.C.R.D	209		Yeongcheon	E.C.R.D	235.0	
	Andong	E.C.R.D	1,584		Angye	E.F	6.7	
	Imha	E.C.R.D	1,361		Gampo	E.C.R.D	3.67	
	Seongduk	C.G.D	41.3		Unmun	E.C.R.D	301.3	
	Yeongju	C.G.D/C.F.R.D	500		Daegok	C.F.R.D	57.5	
	Gunwui	C.F.R.D	87.5		Sayeon	E.C.R.D	67.0	
	Buhang	C.F.R.D	82.0		Daeam	E.C.R.D	77.0	
	Bohyeon	C.G.D	32.61		Seonam	E.F	1.2	
	Habcheon	C.G.D	925		Yeoncho	E.C.R.D	11.7	
	Namgang	C.F.R.D	2,285		Gucheon	E.C.R.D	12.7	
	Milyang	C.F.R.D	95.4		Sueo	E.C.R.D	49.0	
	Yongdam	C.F.R.D	930		Pyeonggrim	E.C.R.D	19.9	
	Daecheong	C.G.D/E.C.R.D	4,134		Flood control	Pyeonghwa	C.F.R.D	3,208
	Seomjin	C.G.D	763			Gunnam	C.G.D	4,191
	Juam (main)	E.C.R.D	1,010			Hantangang	C.G.D	1,279
Juam (control)	E.C.R.D	134.6						
Buan	C.F.R.D	59						
Boryeong	E.C.R.D	163.6						
Jangheung	C.F.R.D	193.0						

### 2.2. 미래 PMP의 시·공간 분석

미래 기후변화 시나리오를 반영한 PMP 자료는 Kim and Lee (2020)의 결과를 이용하였다. Kim and Lee (2020)의 분석 결과는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 5차 평가보고서(Fifth Assessment Report, AR5) 온실가스 시나리오인 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP)를 기반으로 분석되었다. PMP 추정 절차는 WMO (2009)의 수문기상학적 방법 중 중위도 비산악적 방법의 절차를 기반으로 하였다(Fig. 2).

PMP 추정을 위한 대상 유역이 전 지형이 평평하다고 가정하고 비산악 PMP를 산정한 후, 지형 및 산악이 강우에 미치는 영향을 고려하는 산정방법이다(Kim and Lee, 2020). 한반도를 대상으로 Hedgem2-AO GCM에서 생산된 미래 기상변수를 Hadgem3-RA RCM을 이용하여 RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5 시나리오별 격자(12.5 km) 단위로, 9개의 영향면적별(25, 100, 225, 400, 900, 2,025, 4,900, 10,000, 19,600 km<sup>2</sup>), 10개의 지속기간별(1, 2, 4, 6, 8, 12, 18, 24, 48, 72 hr)로 미래 80년(2021 ~ 2100)의 연도별로 산정된 결과이다(Fig. 3). 미래 기후변화에 의한 남한 전체의 시간

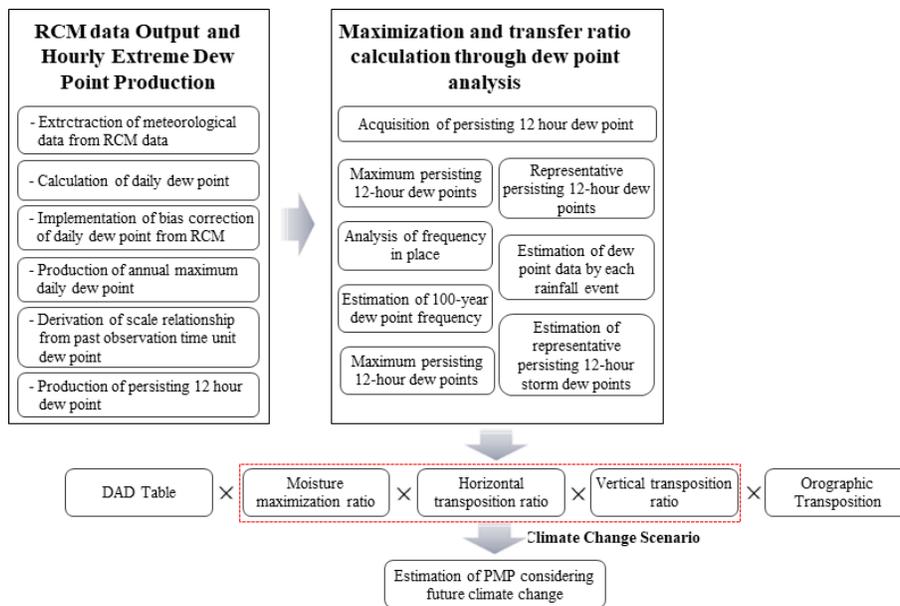


Fig. 2. Procedure of PMP estimation considering climate change (Kim and Lee, 2020)

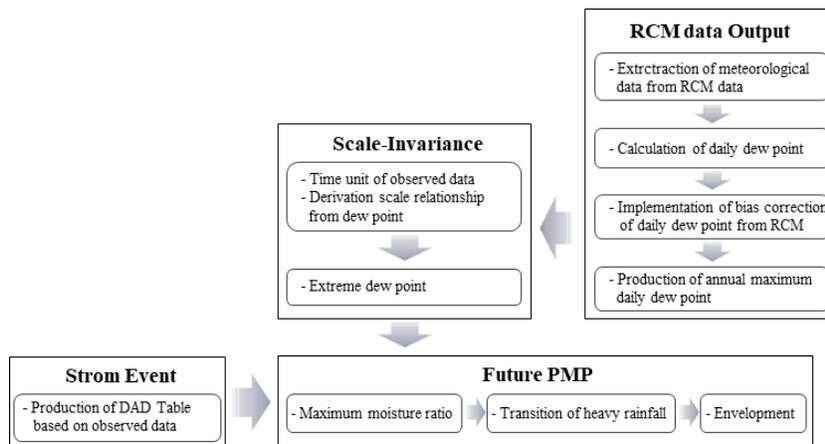


Fig. 3. Procedure of future PMP estimation from future meteorological data produced by RCMs (Kim and Lee, 2020)

적, 공간적 변화를 살펴보기 위하여 기후변화 시나리오(RCP 2.6/4.5/6.0/8.5)별로 가장 일반적인 지속시간 24시간, 영향면적 900 km<sup>2</sup>에 해당하는 PMP를 이용하였다(Choi et al., 2015). AR5 RCP 4가지 시나리오별로 미래 80년의 PMP 전망 자료를 전기(P1: 2021~2040), 중기(P2: 2041~2070), 후기(P3: 2071~2100)로 구분하고 댐별 유역도를 토대로 PMP의 전망기간에 따른 변화를 시각화하였다. 또한 PMP의 지역적 공간 변동성을 검토하기 위하여 Kernel Smoothing 기법을 적용하였다. Kernel 보간기법은 데이터의 노이즈를 완화하거나 데이터의 경향성을 부드럽게 만들어 데이터의 전반적인 추세를 뚜렷하게 보여준다. Kernel 보간법의 대표적인 함수는 Exponential, Gaussian, Quartic, Epanechnikov, PolynomialOrder5, Constant가 있다. 본 연구에서는 12.5 km×12.5 km 격자 단위의 자료를 기반으로 데이터의 지역적 추세를 분석하기 위하여 식 (1)과 같은 Gaussian 함수를 적용하였다.

$$\text{Gaussianfunction} : -3\left(\frac{r}{h}\right) \quad (1)$$

여기서, r (radius)은 반경, h (bandwidth)는 대역폭

### 2.3. 댐별 PMP 도출 및 분석

PMP 산정은 MLTM (2008)의 표준화된 지침에 따라 임계지속시간을 산정하여 제시해야 한다. 하지만 본 연구의 목적은 댐을 대상으로 설계, 시공, 관리 측면에서 안전성에 관한 설계 기준(PMP 및 PMF)의 재평가 및 재설정 등의 필요성을 도출하기 위함이다. 이러한 이유로 댐별 PMP의 임계지속시간은 댐 설계 및 치수능력증대사업, 댐의 수문학적 안정성 검토 시 결과를 준용하였다. K-water (2023)의 댐 설계홍수량 및 수문학적 안정성 검토 현황 등의 자료를 기반으로 37개 댐의 기존 PMP 및 지속시간에 대해 자료의 현황 조사를 실시하였다. 37개 댐의 미래 기

후변화 시나리오를 반영한 PMP 산정은 기후변화 시나리오(RCP 2.6/4.5/6.0/8.5)에 대한 전망 기간별(P1, P2, P3) 최대값으로 하였다. 이때, Kim and Lee (2020)의 9개의 영향면적과 10개의 지속시간별 남한 전체의 80년(2021~2100)의 연도별 PMP의 결과는 Matlab과 ArcGIS 프로그램을 이용하여 각 댐별 유역도의 쉐이프 파일의 FID를 기반으로 댐별 미래 기후변화 시나리오별 PMP 결과를 추출하였다. 미래 PMP 결과는 실제 댐의 유역면적 및 임계지속시간에 해당하는 PMP를 추출하기 위하여 영향면적과 지속시간은 기존 댐의 검토 결과를 토대로 미래 PMP 결과와 선형보간하여 산정하였다. IPCC 보고에 따르면, 미래 기후변화 시나리오에 따라 극한 강우사상의 발생으로 수공구조물의 설계 기준의 재평가 및 재설정 등이 필요함을 시사하고 있다(IPCC, 2023). 본 절에서는 기존 댐별로 제시된 PMP와 미래 기후변화 시나리오별 전망기간별 산정 PMP와의 비교·분석을 통해 지속적인 댐의 안전 확보의 필요성을 도출하고자 하였다.

### 2.4. 댐 수문학적 안정성 평가

국내 가능최대홍수량 산정은 댐 설계 기준(K-water, 2022), PMP 및 PMF 산정절차 지침수립(MLTM, 2008) 등에 따라 크게 PMP의 시·공간적 분포, 최고수위 도달 임계지속시간 결정, 유효우량 산정, 기저유출 결정 및 적용, 유출량 산정 순으로 분석된다. 현재 다목적댐의 치수능력증대사업 및 댐 안정성 평가에서 PMF 산정 시 강우의 시간분포는 Huff 4분위법, 지속시간은 최대 홍수량을 도출(댐 최고수위)하기 위한 임계지속시간 개념 적용, 유효우량은 NRCS-CN방법, 기저유량은 지하갑수곡선법, 강우-유출모형은 Clark 단위도법을 적용하고 있다. 본 절에서는 미래 기후변화 시나리오 기반 추정 PMP를 강우-유출모형에 적용하여 댐유역의 가능최대홍수량을 산정하였다. 분석 대상 댐은 한강권역 내 4개 댐(충주, 소양강, 횡성, 평화)을 대상으로 하였다. 본 연구에서는 미래 기후변화에 대해 기존

Table 2. Status of PMP and PMF for four dams (Soyang, Choonju, Hoengsung, Pyeonghwa) in Han River watershed

Dam	Crest height (EL.m)	Flood Water Level (EL.m)	Existing PMP (mm)	PMF (m <sup>3</sup> /s)	Max. Water Level (EL.m)	Free Board (m)
Soyang	203	198.0	810	20,715	200.5	2.01
Choongju	147.5	145.0	605	32,727	145.7	1.0
Hoengseong	184	180.0	687	2,720	182.24	1.75
Pyeonghwa	270	264.6	712	23,622	273.77	1.6

댐의 안정성 평가를 위한 것으로 기존 댐별 치수능력증대 사업 보고서에서 사용한 시간단위분포 및 임계지속시간을 동일하게 적용하여 기존값과의 비교 분석을 실시하였다(K-water and Daerim Industry, 2015; MLTM, 2012; MOCT, 2004a, 2004b). 강우-유출모형은 K-water에서 구

축하여 실제 댐 운영 시 사용하고 있는 홍수분석 모형인 홍수조절연계운영시스템(COSFIM)을 적용하였다. 기존 치수능력증대사업에서 산정된 PMP를 동일하게 적용하여 기존 댐별 PMF 유입량 및 저수지 운영률에 따라 최고수위를 재현하는 매개변수를 설정하여 모형을 검증하고 미

Table 3. Results of PMP estimation based on climate change scenarios compared to existing PMP for 37 dams under K-water ((a) Han River, (b) Nakdong River, (c) Geum River/Yeongsan River/Seomjin River) (Unit: %)

Dam	Duration (hr)	PMP (mm)	P1 (2021 ~ 2040)				P2 (2041 ~ 2070)				P3 (2071 ~ 2100)				
			26	45	60	85	26	45	60	85	26	45	60	85	
(a)	Soyang	48	810	-13.9	-12.2	-16.4	-11.3	-11.9	-6.6	-10.5	1.2	-12.6	-4.3	-0.7	19.6
	Choongju	38	605	-11.0	-8.8	-13.0	-7.5	-7.8	-3.1	-6.9	6.3	-9.7	-1.3	3.4	22.2
	Hoengseong	18	687	12.4	14.0	10.4	13.4	14.8	21.0	15.7	30.4	13.0	24.3	27.8	55.5
	Pyeonghwa	36	712	-8.3	-5.7	-10.0	-5.6	-5.7	0.4	-3.5	8.9	-5.3	3.0	7.5	30.5
	Gwangdong	24	878	6.1	4.1	5.4	3.2	7.2	6.6	6.0	14.6	4.2	8.1	11.0	28.6
	Dalbang	8	564.7	23.3	19.2	21.3	18.9	23.6	20.3	21.3	18.7	17.4	20.2	13.0	31.4
	Gunnam	48	845	-18.6	-16.6	-22.2	-16.3	-16.3	-11.3	-15.7	-3.3	-17.9	-9.4	-5.8	16.6
	Hantangang	24	879	-11.8	-9.4	-13.4	-10.8	-9.4	-3.8	-7.3	3.9	-9.5	-1.4	1.6	25.9
(b)	Andong	24	580	22.5	25.5	19.3	25.2	27.4	32.8	28.2	44.5	26.5	35.1	39.1	64.2
	Imha	24	561	34.3	37.1	29.9	38.2	40.9	46.3	41.6	57.3	38.2	48.3	54.0	79.8
	Seongduk	12	519	17.4	17.9	13.6	19.1	21.4	26.2	22.8	38.4	17.8	27.1	30.9	57.5
	Yeongu	24	636	27.0	28.9	22.7	29.6	31.8	37.0	31.8	49.4	27.9	38.5	42.2	68.4
	Gunwui	48	773	9.9	12.1	7.3	17.4	15.3	20.1	15.8	37.4	12.1	22.2	23.5	58.3
	Buhang	24	798	11.0	14.4	6.7	12.6	16.6	21.4	17.2	30.9	10.7	18.8	25.5	49.9
	Bohyunsan	9	767	-33.0	-33.6	-34.8	-32.8	-32.7	-29.0	-30.5	-23.5	-34.0	-27.5	-27.5	-12.8
	Habcheon	24	608	29.9	33.1	24.9	31.4	35.8	41.4	36.7	62.7	29.9	38.4	46.6	76.0
	Namgang	34	653	4.7	7.8	0.9	6.3	9.4	14.3	9.8	22.9	5.3	12.9	19.0	42.4
	Milyang	13	732	-1.6	-0.4	-3.3	0.3	1.2	4.3	2.2	12.9	0.7	5.7	9.3	23.3
	Yeongcheon	18	715	6.5	8.9	3.4	8.9	11.6	15.6	11.9	26.6	9.2	18.1	20.6	45.3
	Angye	30	908	4.8	8.8	1.0	7.5	9.9	15.4	10.8	24.5	8.4	17.6	22.7	47.3
	Gampo	24	535	73.6	80.7	67.6	78.7	80.9	92.3	84.8	106.5	79.3	95.3	103.7	149.8
	Unmun	13	602	3.8	6.0	2.1	5.3	7.3	11.5	7.9	19.6	6.2	13.5	17.1	39.0
	Daegok	24	895	2.3	5.3	0.1	4.7	5.7	12.0	7.2	20.6	5.0	13.9	18.5	42.2
	Sayeon	10	645	-6.4	-5.4	-7.3	-6.3	-4.1	-3.4	-4.5	2.8	-4.6	-3.3	-0.4	19.9
Daeam	12	689	0.1	1.7	-1.4	0.7	2.6	4.4	2.8	11.2	2.1	4.8	8.5	29.1	
Seonam	20	930	2.1	2.2	1.5	0.2	4.0	2.7	2.0	10.6	3.5	4.2	10.1	33.2	
Yeoncho	10	816	-7.2	-8.2	-9.7	-7.3	-7.3	-7.1	-7.3	0.3	-10.6	-1.0	-5.0	15.3	
Gucheon	8	693	5.8	4.5	2.9	5.4	5.6	6.8	5.4	13.0	1.4	15.2	7.3	34.6	
(c)	Yongdam	24	578	-22.5	-20.4	-25.0	-20.2	-19.6	-15.2	-18.9	-7.2	-22.0	-14.3	-12.1	3.7
	Daecheong	48	591	9.5	12.9	6.5	12.4	13.8	19.9	14.1	30.4	11.7	22.0	24.2	49.5
	Seomjin	18	559	25.8	31.2	23.5	29.8	29.1	38.3	31.4	48.7	27.7	39.6	41.4	73.5
	Juam (main)	30	846	2.3	4.4	0.0	4.1	4.8	9.0	5.5	19.7	2.1	9.9	14.3	33.0
	Juam (control)	24	992	-3.4	0.5	-7.1	0.0	1.6	7.1	3.3	18.1	-2.2	8.9	12.4	26.2
	Buan	18	805	22.6	24.4	19.7	24.8	27.2	30.9	27.3	42.0	23.1	31.8	37.0	56.8
	Boryeong	18	718	18.1	21.9	12.3	23.9	23.5	29.4	24.0	44.7	22.2	31.6	36.2	60.3
	Jangheung	18	674	42.4	41.0	41.6	42.4	42.4	42.9	42.4	53.2	41.8	42.4	46.5	70.0
	Sueo	18	1,135	-24.5	-21.3	-27.0	-22.6	-22.0	-16.5	-20.4	-10.0	-23.4	-16.0	-11.9	1.1
	Pyeongrim	24	1,040	-7.5	-3.6	-9.8	-4.9	-5.5	2.8	-3.8	9.4	-6.9	3.5	5.4	28.5

래 PMP에 의한 댐의 안정성 검토를 실시하였다. 분석 대상 댐 중 평화의댐은 홍수조절용댐으로 상류 유역에 임남댐이 위치하고 있어 PMF 검토 시 임남댐 붕괴를 반영 (Dam Break 모형 결과 적용)하여 기존 치수능력증대사업 예서와 같이 동일 조건으로 모형을 검토하였다(Table 2). 미래 기후변화에 따른 한강수계 4개 댐의 수문학적 안정성 평가를 위해 기존 관측자료 기반 전국 PMP도 재작성

보고서(MLTM, 2004)를 이용하여 분석된 기존 보고서(치수능력증대사업 등)의 PMP 대비 AR5 RCP 기후변화 시나리오(2.6/4.5/6.0/8.5)에 따라 전기(P1), 중기(P2), 후기(P3)로 구분하여 산정된 PMP, PMF, 최고수위 등을 비교·검토하여 댐별 여유고 확보 및 월류 여부를 평가하였다.

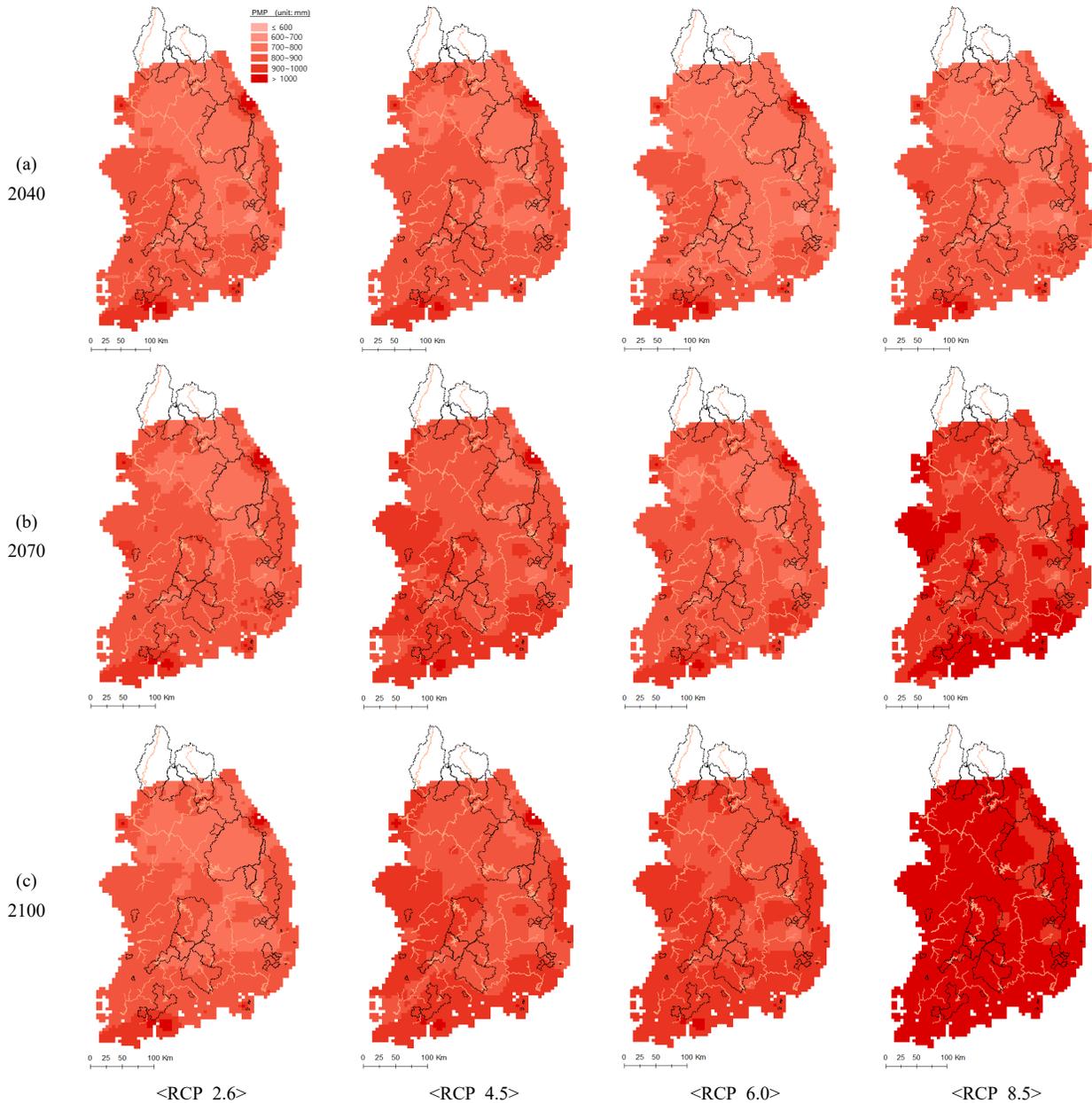


Fig. 4. Result of PMP with duration 24 hr and area 900 km<sup>2</sup> in Korea by AR5 RCP scenario and period as (a) 2040, (b) 2070, (c) 2100

### 3. 연구결과

#### 3.1. 미래 기후변화 시나리오 반영 PMP 분석 결과

본 절에서는 미래 기후변화 시나리오 반영 시 시·공간적으로 댐 유역 및 주변 지역의 PMP 변화 정도를 분석하고 그 결과를 시각화하여 나타냈다. 미래 기후변화 시나리오별로 산정된 PMP 결과 중 지속시간 24시간 및 영향면적 900 km<sup>2</sup>에 대한 PMP 결과를 활용하였다(Lagos-Tuniga and Vargas, 2014; Sim et al., 2015). Fig. 4와 같이, RCP 2.6/4.5/6.0/8.5 시나리오별로 전기(P1), 중기(P2), 후기(P3)에 대한 남한 전체의 격자별 PMP를 도시하였다. 그 결과, 공간적으로 PMP의 변화를 살펴보면 RCP 8.5

P3(남한 전체 PMP 큰 값을 나타냄)를 제외하고 대부분의 분석 케이스에서 내륙지역보다 연안지역에서 더 큰 값을 나타냈다(Lee et al., 2016). 미래 기후변화 시나리오별 전기, 중기, 후기의 시점으로 PMP 변화를 살펴보면, RCP 6.0과 RCP 8.5에서 먼 미래로 갈수록 PMP 값이 커지는 것을 알 수 있다. 또한 각 기후변화 시나리오별로 시간적 변화에 따른 PMP 값의 변화를 살펴보면, 먼 미래로 갈수록 지역적으로 PMP 값의 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 특히, RCP 8.5 시나리오의 결과를 보면 2100년으로 갈수록 남한 대부분의 지역에 900 mm 이상의 큰 PMP가 발생하여 공간적 변동성이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 남한 전체 지속시간 24 hr과 영향면적 900 km<sup>2</sup>의 PMP 결과를 Gaussian Kernel 보간기법으로 분석한 결

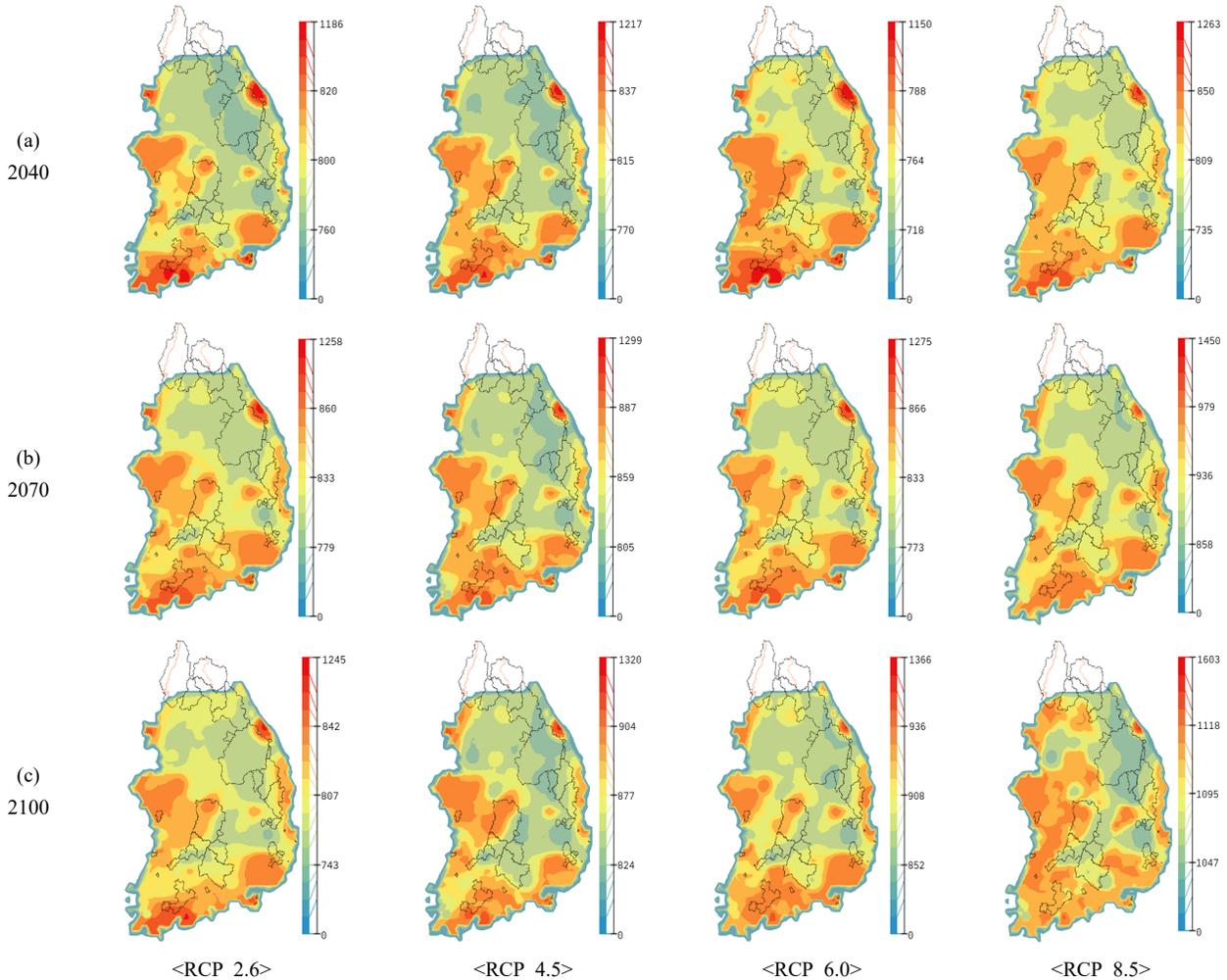


Fig. 5. Spatial interpolation results of PMP with duration 24 hr and area 900 km<sup>2</sup> in Korea by AR5 RCP scenario and period as (a) 2040, (b) 2070, and (c) 2100

과이다. 각 기후변화 시나리오별 기간별 모든 분석 케이스에서 PMP의 공간적 패턴 분석 결과, 기간별로는 기후변화 시나리오가 RCP 2.6에서 RCP 8.5로 갈수록 PMP가 커지고 동 기후변화 시나리오에서는 먼 미래로 갈수록 서해안권과 남해안권인 해안과 중부 및 남부의 경기, 호서, 호남 지역에 PMP의 뚜렷한 증가가 나타났다. 댐 위치를 중심으로 분석 결과를 살펴보면, 중부내륙에 위치한 대청댐, 남해안권에 위치한 주암댐 및 장흥댐, 서해안권에 위치한 보령댐의 경우 기간별 시나리오별로 PMP의 증가가 뚜렷하게 나타났다.

**3.2. 댐별 미래 기후변화 PMP 전망 결과**

댐별 기존 PMP 대비 분석 케이스별(12가지: RCP 시나리오 4×전망 기간 3)로 산정한 PMP의 증감정도를 비교·분석하였다. 각 권역별로는 한강의 경우 최소 -22.2%에서 최대 55.5%, 낙동강은 최소 -34%에서 최대 149.8%, 금영섬 권역은 최소 -27.0%에서 최대 73.5%의 증감 정도를 보였다(Table 3). 37개 대부분의 댐에서 기존 PMP 대비 미래 전망 PMP가 증가하는 것으로 분석되었고, 이 중 최소 1.1%에서 최대 149.8%가 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 치수능력증대사업을 실시한 댐을 대상으로 기후변화 시나리오별 전망 기간별로 기존 PMP 대비 증감률을 보면, 최소 1.1%(수어댐), 최대 79.8%(임하댐) 증가하는 것으로 분석되었다. 댐별 기후변화 시나리오에 따른 기간별 PMP 증가 패턴을 보면, PMP가 P1 기간에서 P3 기간으로 갈수록 증가 폭이 크고, 특히 RCP 8.5 시나리오에

대한 전망 기간별 PMP의 증가 폭은 P2 기간에서 P3 기간으로 갈수록 더 커지는 것으로 나타났다.

**3.3. 댐의 수문학적 안정성 평가 결과**

미래 기후변화 시나리오를 반영한 한강권역 내 4개(소양강댐, 충주댐, 횡성댐, 평화댐) 댐의 안정성 평가 결과는 Table 4에 제시하였다.

소양강댐은 댐 마루고 EL.203.0 m이고 여유고는 2.01 m로, 기존 치수능력증대사업 검토 시 PMP는 810 mm, PMF는 20,715 m<sup>3</sup>/s, 최고수위는 EL.203.9 m로 0.9 m 초과하여 월류가 발생하였고, 사업시행 후 최고수위 EL.200.5 m로 안정성을 확보하고 있다. 본 연구의 AR5 RCP 기후변화 시나리오를 기반으로 전기, 중기, 후기별 12가지 케이스에 대해 댐 안정성 분석을 실시한 결과, 기존 치수능력증대사업 대비 P3 기간에서 PMP는 969 mm로 19.6%가 증가하였고 최고수위는 EL.203.5 m로 0.5 m 월류되며, 그 외 모든 분석 케이스에서 여유고를 만족하는 것으로 분석되었다.

충주댐은 댐 마루고 EL.147.5 m이고 여유고는 1.0 m로, 기존 치수능력증대사업 검토 시 PMP는 605 mm, PMF는 32,727 m<sup>3</sup>/s, 최고수위는 EL.149.85 m로 2.35 m 월류가 발생하였고, 사업시행 후 최고수위 EL.145.70 m로 안정성을 확보하고 있다. AR5 RCP 기후변화 시나리오를 기반으로 전기, 중기, 후기별 12가지 케이스를 적용하여 분석한 결과, P3 기간에서 PMP는 739 mm로 기존 치수능력증대사업 대비 22.2% 증가되어 댐 마루고를 1.47 m 월류되며,

Table. 4. Results of hydrological stability assessment for each forecast period (P1, P2, P3) of four dams in the Han River based on future climate change scenarios

Projection Period	Dam	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
P1 (2021 ~ 2040)	Soyang	Satisfied	Satisfied	Satisfied	Satisfied
	Choongju	Satisfied	Satisfied	Satisfied	Satisfied
	Hoengseong	Not enough	Not enough	Not enough	Not enough
	Pyeonghwa	-	-	-	-
P2 (2041 ~ 2070)	Soyang	Satisfied	Satisfied	Satisfied	Satisfied
	Choongju	Satisfied	Satisfied	Satisfied	Not enough
	Hoengseong	Not enough	Overflow	Not enough	Overflow
	Pyeonghwa	-	-	-	Overflow
P3 (2071 ~ 2100)	Soyang	Satisfied	Satisfied	Satisfied	Overflow
	Choongju	Satisfied	Satisfied	Satisfied	Overflow
	Hoengseong	Not enough	Overflow	Overflow	Overflow
	Pyeonghwa	-	Overflow	Overflow	Overflow

P2 기간에서 0.2 m 여유고 부족이 발생하였고, 이외 모든 분석케이스에서는 안전한 것으로 분석되었다.

횡성댐은 댐 마루고 EL.184.0 m이고 여유고는 1.75 m로, 기존 수문안정성 검토 시 PMP는 687 mm, PMF는 3,610 m<sup>3</sup>/s, 최고수위는 EL.182.25 m로 여유고 부족이 발생하였고, 비구조적 대책 방안 적용 후 최고수위 EL.182.24 m로 안정성을 확보하였다. AR5 RCP 기후변화 시나리오를 기반으로 전기, 중기, 후기별 12가지 케이스를 분석한 결과, 7가지 케이스에서 여유고 부족(최대 1.47 m), 5가지 케이스에서 월류(최대 3.07 m)가 발생하는 것으로 분석되었다.

한강수계 다른 댐과는 달리, 평화의댐은 홍수조절댐으로 상류 임남댐의 방류에 대응 목적을 포함하고 있다. 따라서, 기존 치수능력사업과 같이 임남댐의 붕괴를 반영(Dam Break 모형)하여 검토하였다. 또한, 평화의댐은 하류사면 보강을 통해 댐 월류시에도 수문학적안정성을 확보하도록 치수능력증대사업을 시행하여 댐 마루고 월류수위가 3.77 m 이하일 경우 댐의 안정성이 확보된다. 댐 마루고 EL.270.0 m이고 여유고는 1.6 m로, 기존 치수능력증대사업 검토 시 PMP는 712 mm, PMF는 23,662 m<sup>3</sup>/s, 최고수위는 EL.273.77 m로 3.77 m 월류가 발생하였고, 댐 체 사면 보강 사업시행 후 최고수위 EL.273.77 m로 안정성을 확보하였다. AR5 RCP 기후변화 시나리오를 기반으로 전기, 중기, 후기별 12가지 케이스를 분석한 결과, 4가지 케이스에서 3.77 m를 초과하는 월류(최대 4.36 m)가 발생하는 것으로 분석되었다.

#### 4. 결론

Kim and Lee (2020)의 지속시간별, 영향면적별 PMP 결과를 이용하여, K-water 관리 하 37개 댐의 기존 PMP 대비 미래 PMP를 전망하고 댐의 수문학적 안정성 평가를 실시하였다.

(1) AR5 RCP 시나리오(2.6/4.5/6.0/8.5) 기반 전기(P1), 중기(P2), 후기(P3) 기간별로 PMP의 시간적, 공간적 변동성을 살펴보았다. 기후변화 시나리오별 시간적 변동성을 보면, 온실가스 감축정책에 따라 먼 미래로 갈수록 미래 PMP의 값의 증가 폭이 큰 것을 확인하였다. 이러한 결과는 기후변화의 영향을 고려 시 먼 미래로 갈수록 전망 결과의 불확실성이 크고 미래 기후변화를 반영한 수공구조물의 계획 및 설계 시 적절하고 합리적인 기준 마련이 중요하다.

(2) 37개 댐을 대상으로 기존 PMP 대비 기후변화 시나

리오별 기간별 전망한 PMP 결과를 보면, 36개 댐에서 RCP 8.5 P3 기간에 PMP가 증가하는 것으로 분석되었다. 이외 기후변화 시나리오의 기간별 전망 PMP 결과에서도 전체 37개 댐 중 약 60%의 댐에서 PMP가 증가하는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 치수사업완료 31개 댐의 당시 PMP 산정 시점을 고려하면 최근 발생한 극한 호우 및 최신 기후변화 시나리오를 고려한 주기적인 PMP 재산정의 필요성이 있음을 보여준다.

(3) 미래 기후변화 시나리오(RCP 2.6/4.5/6.0/8.5)별 전망기간(전기/중기/후기)별 댐의 PMP 변화를 공간적으로 분석하고 한강수계 4개 댐(소양강, 충주, 횡성, 평화)에 대해 안정성 평가를 실시하였다. 기존 치수능력증대사업 대비 소양강댐과 충주댐은 각각 1개 케이스, 횡성댐은 5개 케이스에서 월류하였으며, 평화의댐은 사면 보강에 따라 월류 가능 기준 수위를 초과하는 케이스는 4개인 것으로 분석되었다. 최근 발생하는 강우 패턴을 고려할 때 댐의 안정성 확보를 위하여 미래 기후변화 시나리오의 분석을 위한 기준 마련과 실제 강우를 반영한 PMP 및 PMF의 주기적인 검토가 필요할 것으로 판단된다. 특히, 댐의 잠재적인 위험성과 동시에 댐의 경제성을 고려한다면 댐의 재평가 및 설계 시 미래 기후변화 반영을 위한 적절하고 합리적인 기준 마련이 필요할 것이다.

본 연구에서는 Kim and Lee (2020) 연구단의 AR5 RCP 시나리오 기반의 PMP 결과를 토대로 미래 PMP를 시·공간적으로 검토하였고 37개 댐의 기존 PMP와의 비교를 통해 주기적인 댐의 안정성 평가의 필요성을 도출했다. 이와 함께 각 댐의 기존 PMP 산정 시 적용한 지속시간 및 치수능력증대사업 등의 보고서를 준용하여 PMF를 검토하였으나 향후 최신 기후변화 시나리오(AR6 SSP) 및 최근 극한 호우사상을 반영한 PMP 및 PMF 산정 연구가 필요할 것으로 판단된다. 이 때, MLTM (2008)의 지침에 따른 댐별 PMP 및 PMF 재산정 평가 연구 시 본 연구에서 전망한 PMP 및 PMF 경향은 달라질 수 있다. 하지만 댐의 설계 및 치수사업 등을 위한 PMP의 산정 시점 등을 고려할 때 댐에 의한 재해 방지를 위하여 주기적인 댐의 안정성 평가와 미래 기후변화의 반영을 위한 기준 마련 연구가 필요할 것으로 사료된다.

#### References

Choi YJ, Sim KB, Kim SD, Kim ES. 2015. Trend analysis of 1-day Probable Maximum Precipitation (in

- Korean with English abstract). *J Korean Soc Hazard Mitig* 15(1): 369-375. doi: 10.9798/KOSHAM.2015.15.1.369
- Clavet-Gaumont J, Huard D, Frigon A, Koenig K, Slota P, Rousseau A, Klein I, Thiemonge N, Houdre F, Perdikaris J, et al. 2017. Probable maximum flood in a changing climate: An overview for Canadian basins. *J Hydrol Reg Stud* 13: 11-25. doi: 10.1016/j.ejrh.2017.07.003
- e-nara index. 2024. Trend of precipitation. [accessed 2024 Aug 28]. [https://www.index.go.kr/unity/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx\\_cd=1401](https://www.index.go.kr/unity/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1401)
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2023. Climate change 2023 synthesis Report. Geneva, Switzerland: Author. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- Jang SH, Oh JH, Choo JH, Ihm NJ. 2014. Downstream inundation analysis due to dam breach with PMP condition considering climate change (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Environ Technol* 15(3): 243-253.
- Kim BJ, Shin DH, Park HG, Im HD. 2006. Dam disasters and countermeasures. *Geotech Eng* 22(4): 50-62.
- Kim KS. 2003. Measures and directions to improve the safety of dams and embankments in Korea. *Disaster Prevent Inf* 15: 1-23.
- Kim SD, Lee OJ. 2020. Method for estimating Probable Maximum Precipitation (PMP) considering climate change. Seoul, Korea: Climate Change Adaptation for Water Resources. Technical Report.
- Kunkel KE, Karl TR, Easterling DR, Redmond K, Young J, Yin X, Hennon P. 2013. Probable Maximum Precipitation (PMP) and climate change. *Geophys Res Lett* 40(7): 1402-1408. doi: 10.1002/grl.50334
- K-water, Daerim Industry. 2015. Choongju dam flood control capacity enhancement construction detailed design report.
- K-water. 2022. Dam design standard. Sejong, Korea: Ministry of Environment. KDS 54 10 15 : 2022.
- K-water. 2023. Water management practice manual. Daejeon, Korea: Author.
- Lagos-Tuniga MA, Vargas MX. 2014. PMP and PMF estimations in sparsely-gauged Andean basins and climate change projections. *Hydrol Sci J* 59(11): 2027-2042. doi: 10.1080/02626667.2013.877588
- Lee OJ, Jo DJ, Kim SD. 2017. Future PMPs estimation of Chungjudam watershed under KMA climate change scenarios (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Hazard Mitig* 17(1): 365-373. doi: 10.9798/KOSHAM.2017.17.1.365
- Lee OJ, Kim SD. 2016. Future PMPs projection under future dew point temperature variation of RCP 8.5 climate change scenario (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Hazard Mitig* 16(2): 505-514. doi: 10.9798/KOSHAM.2016.16.2.505
- Lee OJ, Park MW, Lee JH, Kim SD. 2016. Future PMPs projection according to precipitation variation under RCP 8.5 climate change scenarios (in Korean with English abstract). *J Korea Water Resour Assoc* 49(2): 107-119. doi: 10.3741/JKWRA.2016.49.2.107
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). 2004. Renewable Report of PMP Map in Korea. Gwacheon, Korea: Author.
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). 2008. PMP and PMF calculation procedure guidelines. Gwacheon, Korea: Author.
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). 2012. Pyeonghwa dam flood control capacity enhancement project basic plan report. Gwacheon, Korea: Author.
- MOCT (Ministry of Construction and Transportation). 2004a. Dam hydrological stability review and flood control capacity improvement basic plan establishment report. Seoul, Korea: Author.
- MOCT (Ministry of Construction and Transportation). 2004b. Detailed design report for Soyang river dam auxiliary spillway installation construction. Seoul, Korea: Author.
- Park JY, Jung IW, Kwon JH, Kim KW. 2019. Climate change impacts and adaptation on hydrological safety perspectives of existing dams (in Korean with English

- abstract). *J Wetlands Res* 21(s-1): 149-156. doi: 10.17663/JWR.2019.21.s-1.149
- Sarkar S, Maity R. 2020. Increase in Probable Maximum Precipitation in a changing climate over India. *J Hydrol* 585: 124806. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124806
- Sim KB, Lee OJ, Kim SD, Kim ES. 2015. 1-day Probable Maximum Precipitation in accordance with AR5 RCPs in Korea (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Hazard Mitig* 15(4): 273-280. doi: 10.9798/KOSHAM.2015.15.4.273
- UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization), UN-Water (United Nations Water). 2020. The United Nations world water development report 2020: Water and climate change. Paris, France: UNESCO.
- WMO (World Meteorological Organization). 2009. Manual on estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP). Geneva, Switzerland: Author.
- Yonhap News. 2023 Apr 18. Korea's warming is faster than the world average, 3.7 trillion won loss over 10 years. [accessed 2024 Aug 28]. [https://www.keei.re.kr/board.es?mid=a10202010000&bid=0007&act=view&list\\_no=48276&tag=&nPage=152](https://www.keei.re.kr/board.es?mid=a10202010000&bid=0007&act=view&list_no=48276&tag=&nPage=152)