



기후변화 시나리오에 따른 소규모 저수지의 홍수 취약성 평가 - 경기도 내 저수지를 중심으로 -

Assessment of Flood Vulnerability for Small Reservoir according to Climate Change Scenario - Reservoir in Gyeonggi-do -

허준^a · 봉태호^{b†} · 김성필^c · 전상민^d

Heo, Joon · Bong, Tae-Ho · Kim, Seong-Pil · Jun, Sang-Min

ABSTRACT

Most of the reservoirs managed by the city and county are small and it is difficult to respond to climate change because the drainage area is small and the inflow increases rapidly when a heavy rain occurs. In this study, the current status of reservoirs managed by city and county in Gyeonggi-do was reviewed and flood vulnerability due to climate change was analyzed. In order to analyze the impact of climate change, CMIP6-based future climate scenario provided by IPCC was used, and future rainfall data was established through downscaling of climate scenario (SSP8-8.5). The flood vulnerability of reservoirs due to climate change was evaluated using the concept provided by the IPCC. The future annual precipitation at six weather stations appeared a gradual increase and the fluctuation range of the annual precipitation was also found to increase. As a result of calculating the flood vulnerability index, it was analyzed that the flood vulnerability was the largest in the 2055s period and the lowest in the 2025s period. In the past period (2000s), the number of D and E grade reservoirs was 58, but it was found to increase to 107 in the 2055s period. In 2085s, there were 17 E grade reservoirs, which was more than in the past. Therefore, it is necessary to take measures against the increasing risk of flooding in the future.

Keywords: Small reservoir; flood vulnerability; climate change; SSP scenario

1. 서론

전 세계적으로 기후변화에 의한 홍수, 가뭄, 태풍, 폭염 등 자연재해는 꾸준히 증가하고 있으며 이로 인한 재산 및 인명 피해도 증가하고 있다. 유엔 재난위험경감사무국 (UNDRR) 에서 발표한 ‘2000~2019 세계 재해 보고서 (UNDRR, 2020)’ 에 따르면 최근 20년 동안 세계적으로 기후변화에 의한 자연 재해는 1.7배 증가한 것으로 보고되었다. 우리나라에서 자연 재해로 인한 피해 중 가장 높은 비중을 차지하는 원인은 여름

철에 집중적으로 발생하는 호우이다. 우리나라 연 강수량 중 50~60%는 여름철에 집중적으로 발생하며 이에 따라 매년 강우로 인한 인명 및 재산 피해가 발생하고 있다. 우리나라 주요 농업수리시설 구조물 중 하나는 저수지로 갈수시 안정적인 관개용수 공급과 하류 생활용수 공급을 목적으로 축조 되었다. 하지만 대부분의 저수지는 1945년 이전에 준공되었으며 공용연수가 50년을 넘긴 저수지가 약 86%를 차지하고 있어 노후화가 심각한 상태이다 (KRC, 2020). 노후화된 저수지는 시공 당시 축조 기술 낙후와 적절한 설계 및 시공기준의 부재, 시공재료의 품질이 보증되지 않아 안전관리에 취약하며, 노후화에 따라 안정성은 저하되어 붕괴위험에 노출되어 있다 (Kim et al., 2014). 이에 따라 전국적으로 제방 붕괴나 누수, 구조물의 파괴 등 저수지 붕괴사례가 지속적으로 발생하고 있으며 2020년에도 경기도 이천 산양저수지, 경기도 안성 북좌저수지가 붕괴되어 하류부 침수 피해를 야기한 바 있다. 최근 발생한 전국 저수지 붕괴사례를 살펴보면 대규모 저수지보다는 노후화된 소규모 저수지가 붕괴되는 사례가 대부분인 것으로 나타났다. 「농어촌정비법」1종 시설물에 해당하는 저수지의 경우 관련 법령에 따라 안전점검 및 유지관리가 이루어지고 있으며 대부분 한국농어촌공사에서 관리하고 있

^a Researcher, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

^b Associate Professor, Department of Forest Science, Chungbuk National University

^c Senior Researcher, Institutes of Green Bio Science and Technology, Seoul National University

^d Post-doc., Convergence Major in Global Smart Farm, Seoul National University

† Corresponding author

Tel.: +82-43-261-2533, Fax: +82-43-272-5921

E-mail: tbong@cbnu.ac.kr

Received: August 12, 2022

Revised: September 05, 2022

Accepted: September 07, 2022

어 체계적이고 전문적인 관리가 이루어짐에 따라 노후화된 저수지라 하더라도 내구연한보다 높은 기대수명이 기대할 수 있다. 하지만 2종 시설물에 해당하는 소규모 저수지는 시·군에서 관리하고 있는 경우가 많으며 재정 여건 부족, 전문인력 부족, 관리체계 미흡 등으로 인하여 제대로 된 관리가 이루어지지 않아 여름철 집중호우가 내릴 경우 매우 취약할 수 있다 (Bong et al., 2021). 특히, 공용연수가 오래된 저수지들은 설계자료가 거의 보관되고 있지 않은 경우가 많아 안전관리에도 어려움이 있다. 저수지의 안정성이 저하되는 이유는 현재와 비교하여 상대적으로 낮았던 설계기준과 노후화에 따른 기능 및 시설 안전성 저하, 시간 경과에 따른 토사 유입·퇴적으로 인한 저수지 저수용량의 감소 등이다. 소규모 저수지의 경우 유역면적이 작고 집중호우 발생 시 유입량이 급격히 증가하는 형태로 국지성 집중호우에 매우 취약하다. 특히, 기후변화에 따라 집중호우의 빈도 및 강도 증가로 기상 여건은 열악해지고 있어 붕괴위험은 더욱 높아지고 있다. 또한, 과거 농업용 저수지 하류부는 인구가 밀집되거나 개발되어 있지 않은 경우가 많았으나 산업화와 도시화의 영향으로 하류부가 개발되는 경우가 많아 재해 발생 시 피해 규모가 증가한 경우가 많다. 이에 따라 과거 저수지는 농업용수 공급을 위한 단일 목적으로 축조되었으나 경제발전과 함께 사회기반시설로서 기능이 요구되고 있으며 수재해에 대응하기 위한 치수기능 또한 강조되고 있다. 과거 저수지 설계기준은 관개용수 공급의 단일 목적을 위한 것으로 「토지개발사업 계획설계기준」(1968년)에 따라 100년 빈도의 확률홍수량을 고려하여 설계되었다. 이후 「농지개발사업 계획설계기준」(1982년)에서는 관개용수 공급뿐만 아니라 저수지의 홍수조절 능력을 고려하여 200년 빈도의 확률홍수량을 고려하여 설계되었으나 대부분 저수지는 1982년 이전에 준공된 것으로 100년 빈도의 과거 낮은 홍수량 설계기준이 적용되었으며 이후 변경된 200년 빈도의 설계 홍수량이 적용되었더라도 기후변화에 따른 설계기준을 넘어서는 잦은 기상이변으로 기상 여건은 점차 열악해지는 것에 비하여 저수지는 노후화된 상태로 운영되고 있다. 따라서 노후화된 소규모 저수지에 대한 전반적인 점검과 함께 유지관리를 위한 방안 마련이 필요한 시점이라 할 수 있다. 기후변화에 따른 취약성을 분석하기 위하여 취약성 지표 개발 및 유역의 취약성 평가에 대한 다양한 연구들이 이루어져 왔다. 저수지에 대하여 Lee와 Lee (2019)는 기후변화에 따른 제체 안정성에 대한 홍수 취약성 지수를 분석한 바 있다. 하지만 저수지 붕괴에 따른 취약성을 고려한 연구는 미흡한 실정이며 특히, 소규모 저수지의 경우 예산 및 전문인력 부족 등의 이유로 유지관리가 제대로 이루어지지 않는 경우가 많아 붕괴위험에 노출되어 있다. 정부는 「농업분야 기후변화 실태조

사 및 영향·취약성평가 기준」에 따라 기후변화 실태조사를 통하여 농업분야에 미치는 영향 및 취약성 평가 계획을 5년마다 수립하도록 하고 있다. 이에 따라 시·군 저수지의 기후변화에 따른 홍수 대응능력 강화 및 효율적인 개보수사업을 수행하기 위한 우선순위를 결정하기 위해서는 기후변화에 따른 저수지의 홍수 취약성을 평가할 필요가 있다.

본 연구에서는 경기도 내 시·군 저수지의 통계자료를 분석함으로써 시·군에서 관리하고 있는 소규모 저수지 현황을 파악하였으며 기후변화에 따른 수문환경 변화 및 소규모 저수지의 홍수 취약성을 평가하고자 하였다. 기후변화에 따른 영향을 정량적으로 분석하기 위하여 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 제공하는 최신 기후변화 시나리오인 CMIP6 모델의 SSP5-8.5 시나리오를 활용하였으며, 경기도 내 관측소 지점별 미래 기후자료는 지역별 강우 자료의 통계적 특성을 고려한 상세화 및 편의 보정을 수행하여 시나리오별 미래 강우자료를 구축하였다. 미래 기후자료는 미래 기간별 영향을 파악하기 위하여 30년 간격으로 2011년~2040년 (2025s), 2041년~2070년 (2055s) 및 2071년~2100년 (2085s)에 대한 자료를 구축하였다. 이를 활용하여 IPCC에서 제공한 취약성 개념에 따른 홍수 취약성 평가를 수행하였다. 취약성 평가는 기후노출, 민감도 및 적응능력에 대한 지표를 산정하고 이에 대한 경기도 내 소규모 저수지의 상대적 취약성을 도출하였다.

II. 재료 및 방법

1. 경기도 시·군 저수지 현황

우리나라 농업용 저수지의 관리는 한국농어촌공사와 지자체가 관리하고 있으며 일반적으로 중규모 이상의 저수지는 한국농어촌공사가, 소규모 저수지는 지자체가 관리하고 있다. 경기도 내 농업용 저수지는 총 337개소로 관리주체가 한국농어촌공사인 저수지가 94개소이며 시·군 관리 저수지는 243개소로 약 72%는 지자체에서 관리하고 있다. 본 연구에서는 경기도 내 저수지 중 시·군에서 관리하고 있는 저수지 243개소를 대상으로 분석을 수행하였다.

경기도 내 시·군 저수지 243개소에 대한 준공연도 현황을 살펴보면 약 42%의 저수지가 1950년대 이전에 축조되었으며, 저수지의 일반적인 내구연한 기준을 60년이라고 하였을 때 243개소 중 144개소 (59.3%)는 내구연한을 초과한 것으로 나타났다. 또한, 공용연수가 50년 이상 60년 미만인 저수지도 23.9%를 차지하고 있어 저수지 노후화가 지속적으로 발생할 것으로 나타났다.

특히, 농업용 저수지의 홍수 대비 설계기준을 살펴보면 현재 농업용 필답 설계기준인 「KDS 67 10 20」(MAFRA, 2019)에서는 기본적으로 200년 빈도의 강우에 따른 홍수량을 고려하고 있으나 1982년 이전에 준공된 저수지 224개소는 과거 100년 빈도 홍수량의 1.2배를 적용하고 있어 시·군 저수지의 92%는 기후변화로 인한 이상기후에 따른 홍수 대비 능력이 매우 취약할 수 있는 것으로 나타났다. 경기도 내 저수지에 대한 총 유효저수용량은 14,588만 m^3 이며 한국농어촌공사 관할 저수지 94개소의 유효저수용량 13,608만 m^3 , 시·군 저수지 243개소의 유효저수용량 980만 m^3 으로 각각 93.3%와 6.7%를 차지하고 있다. 저수지 총 유효저수용량 중 가장 많은 비율을 차지하는 지역은 안성시로 경기도 내 저수지 총 유효저수용량의 30.7% (4,472만 m^3)를 차지하고 있으며 다음으로 용인시가 26.1% (3,811만 m^3)을 차지하고 있다. 경기도 시·군에서 관리하고 있는 저수지 243개소의 경우 저수용량이 모두 40만 m^3 이하이며 대부분 10만 m^3 미만으로 소규모인 것으로 나타났다. 특히, 5만 m^3 이하의 소규모 저수지는 188개소로 77.4%를 차지하고 있다. 따라서 시·군 저수지의 안전관리는 「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법」보다는 「농어촌정비법」에 의하여 안전관리를 수행하게 되며 저수용량 30만 m^3 을 기준으로 제1종 시설물 저수지 4개소를 제외한 나머지 239개소는 제2종 시설물에 해당하는 것으로 나타났다.

저수지에 대한 유역면적은 저수율에 영향을 미치는 요인 중 하나로 저수지로 물이 집수할 수 있는 면적을 의미한다. Lee (2019)에 따른 유효저수량 30만 m^3 이하인 전국 저수지 15,965개소에 대한 통계 결과를 살펴보면 유역면적 범위는 0.1~7,182 ha인 것으로 나타났다. 경기도 시·군 저수지의 유역면적은 100 ha 미만이 약 73%, 100 ha 이상 200 ha 미만이 약 21%로 전국 저수지와 비교하여 대부분 소규모 유역면적을 갖는 것으로 나타났다. 특히, 유역면적 10 ha 미만인 저수지도 19개소인 것으로 나타났다.

2. 기후변화에 따른 수문환경

가. 미래 기후시나리오

IPCC의 AR5 보고서에는 Coupled model intercomparison project phase 5 (CMIP5)를 통해 제공된 미래 전망 자료가 사용되었으나 최근에는 IPCC AR6에 활용된 CMIP6 자료가 공개되고 있다. 이에 따라 최근 공개된 CMIP6 기반의 미래 기상 자료를 활용한 미래 홍수/침수 위험도 관련 연구가 이루어지고 있다 (Kwak et al., 2020; Jun et al., 2020). 본 연구에서도 기후변화에 따른 영향을 분석하기 위하여 최신 기후변화 시나리오인 CMIP6 기반의 미래 기상자료를 사용하였다. 사회

경제적 조건을 고려한 Shared socioeconomic reference pathway (SSP) 시나리오는 기존 RCP (Representative concentration pathway) 시나리오의 대표 농도 경로 개념과 더불어 미래 기후변화에 대한 적응 노력 및 미래 사회의 기후변화 대처 능력 정도에 따라 5개의 시나리오로 구별되며 본 연구에서는 기후변화가 가장 급속하게 발생하는 SSP5-8.5 (산업

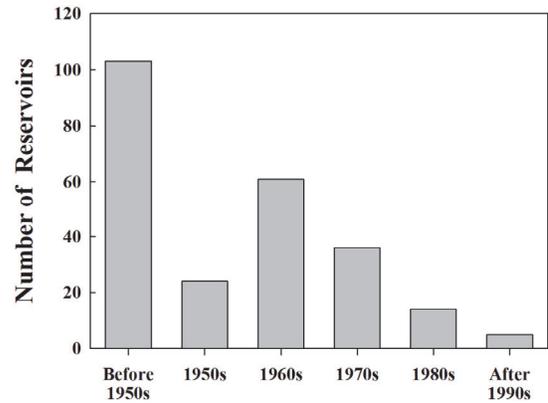


Fig. 1 Number of reservoirs in Gyeonggi-do by completion period

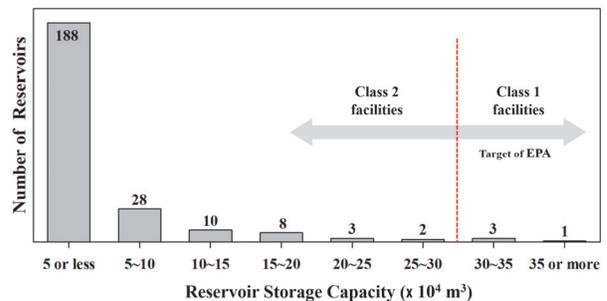


Fig. 2 Storage capacity of reservoirs (Gyeonggi-do)

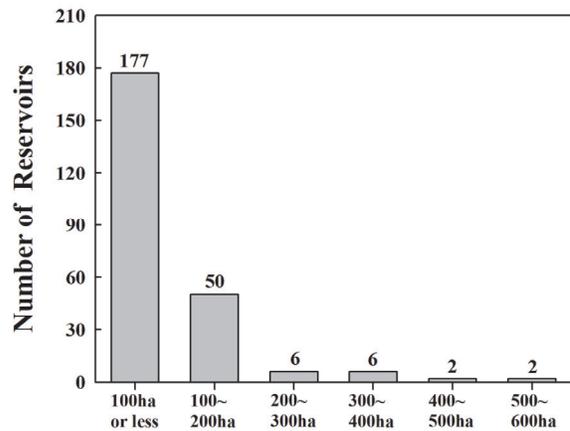


Fig. 3 Drainage area of reservoirs (Gyeonggi-do)

기술의 빠른 발전에 중심을 두어 화석연료 사용이 높고 도시 위주의 무분별한 개발이 확대될 것으로 가정하는 경우에 대한 시나리오를 적용하였다.

나. 경기도 기상자료 구축

경기도 기상자료를 구축하기 위하여 30년 (1976년~2005년) 이상의 관측자료가 존재하는 60개 중관기상관측소 지점 중 경기도, 서울 및 인천에 위치한 6개 지점 (수원, 양평, 이천, 서울, 인천, 강화)에 대한 강우자료를 구축하였다. 파주 및 동두천 기상관측소의 경우 경기도 내에 위치하고 있으나 관측 기간이 짧아 통계적 보정이 어려워 제외하였다. 경기도 인근 기상관측소 위치 및 이에 따른 티센망은 Fig. 4와 같으며 본 연구에서 분석한 6개의 관측소 중 거리가 가장 가까운 관측소를 행정구역별 지배관측소로 선정하였다.

CMIP6 기반의 미래기상자료를 구축하기 위해 일 단위 자료를 제공하는 14개 GCM (Global climate model)과 3시간 단위 자료를 제공하는 6개 GCM에 대해 기후변화 자료를 수집하였다. 본 연구에서는 CMIP6의 3시간 단위 GCM 중에서 최대 확률강우량을 나타내는 GCM을 선정하되, 모든 대상관측소에 동일한 GCM을 적용하였으며 SSP5-8.5 시나리오를 기준으로 대부분 경우에서 최대 확률강우량을 나타낸 ‘ACCESS-CM2’을 본 연구의 GCM으로 선정하였다. 본 연구에서 사용된 SSP 시나리오에 따른 GCM 종류는 Table 1에 정리하였다. 기상자료는 총 4개의 기간으로 나누어 분석을 수행하였다. 과거 기상자료는 1981년~2020년 자료를 사용하였으며 미래 기

상자료는 2011년~2100년 자료를 사용하였다. 이에 따라 기상자료는 1981년~2020년 (2020s), 2011년~2040년 (2025s), 2041년~2070년 (2055s) 및 2071년~2100년 (2085s)으로 구분된다.

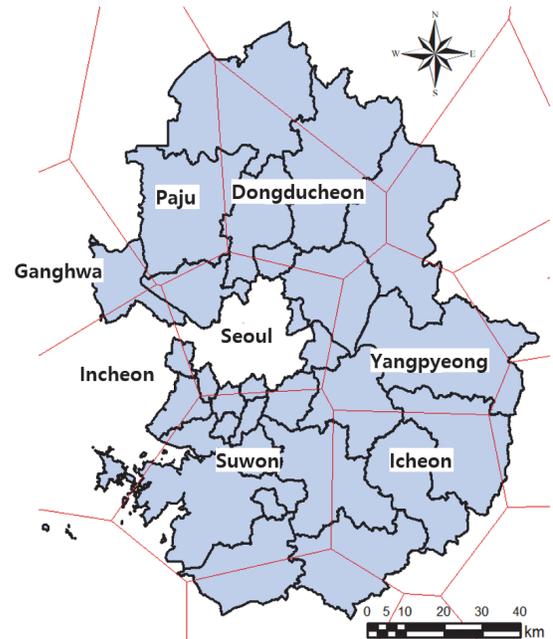


Fig. 4 Thiessen polygons based on the locations of weather stations in Gyeonggi-do

Table 1 SSP (Shared Socioeconomic Pathways) scenario data

CMIP6 data source	CMIP6 GCM	
	Daily	3 hours
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	CanESM5	-
Centre National de Recherches Meteorologiques	CNRM-CM6-1, CNRM-ESM2-1	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	ACCESS-CM2
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	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	MPI-ESM1-2-LR
Meteorological Research Institute	MRI-ESM2-0	MRI-ESM2-0

다. 기후변화 시나리오 상세화

GCM의 공간분해능은 점차 발전하고 있으나, 아직 대부분의 GCM의 공간해상도가 100 km 이상으로 유역 규모의 대상지에 기후변화 시나리오를 적용하기에는 무리가 있다. 따라서 지역 규모의 기후변화 분석 시에는 GCM의 격자를 최소화하기 위한 상세화를 적용할 필요가 있다. 상세화 기법은 크게 동적 상세화 (Dynamic downscaling) 기법과 통계적 상세화 (Statistical downscaling) 기법으로 구분할 수 있다 (Mearns et al., 1999). 이중 통계적 상세화 기법은 지역 기후 요소와 GCM의 모의 결과 간에 통계적 분석을 수행하여 관측값의 통계적 특성에 맞춰 GCM 결과를 보정함과 동시에 지역 기후특성을 보존하는 방법으로 동적 상세화 기법과 비교하여 경제적이며, 여러 GCM의 출력자료에 쉽게 응용할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 통계적 상세화 기법 중 하나인 SQM (Simple quantile mapping) 기법을 이용하여 기후변화 시나리오에 대한 상세화를 수행하였다. SQM 방법은 공간적으로는 특정 관측지점에 해당되는 GCM 격자의 값을 바로 사용하며, 시간적으로는 월별로 관측자료와 원시 GCM의 값을 경험적 분위사상법 (Empirical quantile mapping)을 이용하여 일단위 GCM 자료에 포함되어있는 GCM별 시스템 오차 (bias, 편의)를 보정하는 방법이다 (Cho et al., 2018).

3. 저수지 홍수 취약성 평가

가. 분석개요

저수지 재해대응능력 평가는 일반적으로 수문학적 모델링

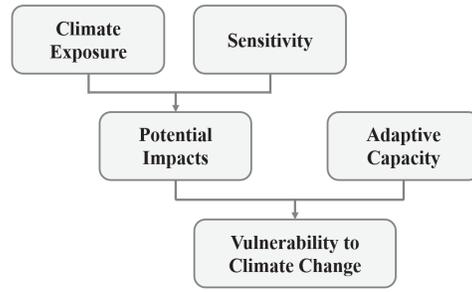


Fig. 5 Framework for vulnerability assessment

을 통해서 이루어지며, 저수지 내용적, 목표수위, 관리수위, 제체 및 수문 등 저수지의 다양한 세부 제한 자료를 수집하여 저수지 특성자료를 구축하고, 홍수 유입에 따른 저수지의 수위 변화 및 방류량을 계산하여 저수지의 홍수방어능력을 평가할 수 있다. 하지만 시·군 저수지의 경우 저수지의 수문학적 모델링을 위한 기초자료가 구축되어 있지 않은 경우가 대부분이다. 따라서, 본 연구에서는 IPCC (2007)에서 제안한 취약성 개념을 이용하여 경기도 내 시·군 저수지의 홍수 취약성을 평가하였다. IPCC는 Fig. 5와 같이 기후변화 취약성을 기후변동에 따른 시스템의 노출이라는 외부적인 요인과 이러한 외부요인에 대한 민감도, 적응 능력이라는 내부적인 요인을 포함하는 개념으로 정의된다 (Park et al., 2013).

홍수 취약성 지수산정을 위하여 선행연구를 바탕으로 기후노출, 민감도 및 적응능력에 대한 지표를 선정하였으며 이를 Table 2에 나타내었다. 기후노출 지표의 경우 선행연구를 참고하여 지표를 선정하였고, 민감도 및 적응능력 지표는 자료

Table 2 Selection of indices for reservoir flood vulnerability assessment

Index		Description	References
Climate exposure	CX3h	Maximum rainfall amounts for 3 hour (mm)	Park et al. (2016) Jun et al. (2020)
	CP3h100yr	3-hour rainfall for 100-year return period (mm)	Park et al. (2016) Jun et al. (2020)
	CX24h	Maximum rainfall amounts for 24 hour (mm)	ME (2012) Park et al. (2016) Jun et al. (2020)
	CP24h100yr	24-hour rainfall for 100-year return period (mm)	ME (2012) Park et al. (2016) Jun et al. (2020)
	CN80	Average number of days of rainfall over 80 mm/day	Koh (2009) Park et al. (2016) Jun et al. (2020)
Sensitivity	SDRH	separation distance of reservoir-house (m)	
	SP	Number of people who needed to be evacuated	
Adaptive capacity	FARL	Flood Attenuation by Reservoir and Lakes index	

가 부족한 시군관리 소규모 저수지의 특성을 고려하여 취득이 가능한 자료 중 민감도 및 적응능력 정도를 나타낼 수 있는 자료들로 선정하였다.

취약성 평가와 관련된 선행연구를 참고하여 3시간 최대강우량 (CX3h), 24시간 최대강우량 (CX24h), 100년 빈도 3시간 확률강우량 (CP3h100yr), 100년 빈도 24시간 확률강우량 (CP24h100yr) 및 연도별 80 mm 이상 평균 강우일수 (CN80)를 선정하였다. 민감도 지표는 저수지별 하류 유역의 자료가 부족한 시군관리 소규모 저수지의 특성을 고려하여, 수집이 가능한 자료로 저수지별 제방-가옥 이격거리 (m) 및 대피필요 주민수 (명)을 선정하였다. 적응능력 지표의 경우 선행연구에서 주로 사용하는 지표를 산정하기 위한 세부 제원 자료는 대부분의 시·군 관리 저수지에서 존재하지 않아, 저수지의 표면면적 및 유역면적을 이용해 산정할 수 있는 홍수저감지수 (FARL)를 선정하였다.

나. 대상 저수지 선정

경기도 내 시·군 저수지 243개소 중 재해대응능력 평가를 위한 유역면적 (ha), 만수면적 (ha), 제방-가옥 이격거리 (m), 대피필요 주민수 (명) 등의 자료가 구축된 229개 저수지를 대상 저수지로 선정하였다. 행정구역별 대상 저수지 수는 Table 3과 같다.

다. 홍수 취약성 평가 자료 구축

기후노출 지표로 3시간 최대강우량 (CX3h), 24시간 최대강우량 (CX24h), 100년 빈도 3시간 확률강우량 (CP3h100yr), 100년 빈도 24시간 확률강우량 (CP24h100yr) 및 연도별 80 mm 이상 평균 강우일수 (CN80)를 선정하였다. 앞서 구축한 SSP5-8.5 시나리오의 ACCESS-CM2 GCM 자료를 이용하여 저수지별 과거 및 미래기간별 기후자료에 대한 지역별 상세

화를 수행하였다.

민감도 지표로 선정된 제방-가옥의 이격거리 (SDRH)와 대피필요 주민수 (SP)는 저수지 홍수재해 발생 시 피해 정도에 큰 영향을 미친다. 인명 피해뿐만 아니라 저수지 하류부의 시설물이나 과수원, 논, 밭 등 다양한 경제적 피해도 발생하지만 이에 대한 세부적인 자료가 구축되지 않아 본 연구에서는 고려 대상에서 제외하였으나 추후 이에 대한 자료를 구축하고 반영할 필요가 있다. 경기도 내 시·군별로 각 저수지의 민감도 지표 평균값을 Table 4에 나타냈다. 평균 이격거리는 하남시가 50.0 m로 가장 짧은 것으로 나타났고, 군포시가 800.0 m로 가장 긴 것으로 나타났다. 하남시와 군포시에는 본 연구의 분석대상 저수지가 하나씩만 위치하였으며, 5개 이상 위치한 지자체 중에는 남양주시가 127.6 m로 가장 짧고 김포시가 354.0 m로 가장 길었다. 대피필요 주민수의 경우 성남시가 30,000명으로 가장 많은 것으로 나타났고, 하남시와 파주시는 0명으로 가장 작은 것으로 나타났다. 저수지가 5개 이상 존재하는 지자체 중에서는 양평군이 540.4명, 양주시가 5.2명으로 각각 최댓값과 최솟값을 기록했다. 산출된 민감도 지표는 표준화를 통하여 홍수 취약성 분석에 사용하였다.

저수지의 적응능력 지표로는 저수지의 표면면적 및 유역면적을 이용해 산정할 수 있는 홍수저감지수 (FARL)를 활용하였다. 영국의 FEH (Flood Estimation Handbook)는 대상 유역 내 모든 저수지 및 호수의 홍수저감효과를 평가하고, 유역 내 저수지의 위치에 따른 홍수저감효과를 반영하기 위하여 FARL을 제안하였으며 (Scarrott et al., 1999) 이를 통하여 유역별 지수산정을 신속하게 수행하고, 정확도를 높이며 일관성을 확보하도록 하였다. FARL를 산정하기 위해서는 우선 저수지의 크기 및 위치, 유역의 면적을 고려한 홍수저감인자 (α)를 식 (1)을 통하여 산정할 수 있다.

Table 3 Number of target reservoirs by city and country

City	No. of reservoirs	City	No. of reservoirs	City	No. of reservoirs
Suwon	1	Guri	0	Gimpo	5
Seongnam	1	Namyangju	7	Hwaseong	31
Uijeongbu	0	Osan	4	Gwangju	7
Anyang	0	Siheung	2	Yangju	6
Bucheon	0	Gunpo	1	Pocheon	16
Gwangmyeong	1	Uiwang	1	Yeoju	6
Pyeongtaek	10	Hanam	1	Yeoncheon	1
Dongducheon	0	Yongin	44	Gapyeong	2
Ansan	3	Paju	1	Yangpyeong	19
Goyang	0	Icheon	13	Total	229
Gwacheon	1	Anseong	45		

$$\alpha = (1 - \sqrt{\gamma})^\omega \quad (1)$$

여기서, γ 는 저수지의 표면면적 (A_{sf})과 저수지에 의한 소유역의 면적 (A_{sc})의 비 ($\gamma = A_{sf}/A_{sc}$)로 정의되며 이는 저수지의 크기와 위치의 관계를 나타낸다. 지수 ω 는 유역에서 홍수발생 동안 저수지의 중요성을 반영하는 비중을 나타내며

저수지에 의한 소유역의 면적 (A_{sc})과 전체유역면적 (A_c)의 비 ($\omega = A_{sc}/A_c$)로 정의된다. 저수지에 의한 소유역면적은 저수지가 하천상의 어디에 위치하는가에 따라 달라지며 저수지가 하류에 가까울수록 소유역면적은 커진다. 유역 내 저수지의 홍수저감 효과를 나타내는 FARL은 개개의 저수지의 홍수저감영향을 나타내는 공간지수 값들의 곱으로 이루어지며 식

Table 4 Results of sensitivity index by city and country

City	No. of reservoirs	Sensitivity Index		City	No. of Reservoirs	Sensitivity Index	
		SDRH	SP			SDRH	SP
Suwon	1	250.0	50.0	Uiwang	1	200.0	15.0
Seongnam	1	500.0	30,000.0	Hanam	1	50.0	0.0
Uijeongbu	-	-	-	Yongin	44	173.6	22.7
Anyang	-	-	-	Paju	1	123.0	0.0
Bucheon	-	-	-	Icheon	13	276.9	29.3
Gwangmyeong	1	350.0	1,000.0	Anseong	45	138.2	25.7
Pyeongtaek	10	263.7	21.4	Gimpo	5	354.0	116.0
Dongducheon	-	-	-	Hwaseong	31	248.4	481.1
Ansan	3	333.3	11.7	Gwangju	7	125.7	97.1
Goyang	-	-	-	Yangju	6	223.3	5.2
Gwacheon	1	57.0	30.0	Pocheon	16	204.4	72.5
Guri	-	-	-	Yeoju	6	141.2	11.5
Namyangju	7	127.6	12.1	Yeoncheon	1	250.0	100.0
Osan	4	185.0	11.3	Gapyeong	2	170.0	21.5
Siheung	2	625.0	75.0	Yangpyeong	19	187.9	540.4
Gunpo	1	800.0	15.0	Average	229	254.3	1,310.6

Table 5 Results of adaptive capacity by city and country

City	No. of reservoirs	Adaptive capacity	City	No. of reservoirs	Adaptive capacity
		FARL			FARL
Suwon	1	0.23	Uiwang	1	0.88
Seongnam	1	0.83	Hanam	1	0.80
Uijeongbu	-	-	Yongin	44	0.86
Anyang	-	-	Paju	1	0.96
Bucheon	-	-	Icheon	13	0.83
Gwangmyeong	1	0.77	Anseong	45	0.84
Pyeongtaek	10	0.56	Gimpo	5	0.84
Dongducheon	-	-	Hwaseong	31	0.77
Ansan	3	0.87	Gwangju	7	0.73
Goyang	-	-	Yangju	6	0.78
Gwacheon	1	0.94	Pocheon	16	0.84
Guri	-	-	Yeoju	6	0.88
Namyangju	7	-0.20	Yeoncheon	1	0.85
Osan	4	0.80	Gapyeong	2	0.87
Siheung	2	0.71	Yangpyeong	19	0.90
Gunpo	1	0.73	Average	229	0.76

(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$FARL = \Pi \alpha_i \quad (2)$$

홍수나 저수지로 인하여 홍수저감효과가 작을수록 FARL 지수값은 1에 가까우며, 홍수저감효과가 클수록 지수의 값은 감소한다. 따라서 저수지의 개수가 증가함에 따라 홍수저감 효과가 증가하므로 지수값은 저수지의 개수에 비례하여 감소하는 것으로 알려져 있다 (Ko and Lee, 2011; Scarrott et al., 1999). 홍수저감지수 산정 결과는 Table 5에 정리하였으며 각 지자체에 위치한 저수지들의 평균 홍수저감지수는 남양주시가 -0.20으로 가장 낮은 것으로 나타나 홍수저감효과가 큰 것으로 분석되었다. 파주시에서는 홍수저감지수가 0.96으로 가장 높은 것으로 나타났으며, 5개 이상의 저수지가 분포된 지자체 중에서는 양평군이 0.90으로 가장 높은 것으로 나타났다.

라. 홍수 취약성 지수 산정

홍수 취약성 지수를 이용하여 경기도 내 시·군 저수지의 수재해 대응능력을 평가하기 위하여 기후노출, 민감도, 적응능력지표에 대하여 표준화를 실시하고 통합하여 홍수 취약성 지수를 산정하였다. 홍수 취약성 지수 산정식은 식 (3.1)~(3.4)와 같다. 홍수 취약성 지수 산정 시 AHP 기법이나 통계적인 기법을 적용해 지표별 가중치를 산정하거나 연구자의 주관적인 판단을 최대한 배제하기 위해 동일한 지표별 가중치를 적용하기도 한다 (Cendrero et al., 1997; Peduzzi et al., 2001; Balica et al., 2009; balica et al., 2013). 본 연구에서는 자료가 부족한 소규모 저수지의 특성을 고려하여 각 지수에 대한 가중치인 α , β , γ 는 모두 1로 동일하게 적용하여 홍수 취약성 지수를 산정하였다.

$$\begin{aligned} \text{Flood Vulnerability Index} \\ = \alpha \text{Climate Exposure} + \beta \text{Sensitivity} - \gamma \text{Adaptive Capacity} \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\text{Climate exposure index} = a_1 \times \text{indicator}_1 + a_2 \times \text{indicator}_2 + \dots \quad (3.2)$$

$$\text{Sensitivity index} = b_1 \times \text{indicator}_1 + b_2 \times \text{indicator}_2 + \dots \quad (3.3)$$

$$\text{Adaptive capacity index} = c_1 \times \text{indicator}_1 + c_2 \times \text{indicator}_2 + \dots \quad (3.4)$$

기후노출 지표는 CX3h, CX24h, CP3h100yr, CP24h100yr 및 CN80 다섯 가지로, 표준화된 지표에 0.2의 가중치를 동일하게 적용하여 기후노출 지수를 산정하였다. 민감도 지표는 제방-가옥 이격거리 (m), 대피필요 주민수 (명) 두 가지로 표

준화된 지표에 각각 -0.5와 0.5의 가중치를 적용하여 민감도 지수를 산정하였다. 이격거리의 경우 거리가 짧을수록 홍수에 위험하므로 음의 가중치를 적용하였다. 적응능력 지표는 홍수저감지수로 지수의 값이 클수록 홍수에 취약해 음의 가중치를 적용하여 홍수취약지수 산정에 사용하였다. 마지막으로 저수지별로 산정된 기후노출, 민감도 및 적응능력 지표를 식 (3.1)에 적용하여 경기도 내 시·군 저수지별 홍수취약지수를 산정하였다. 홍수 취약성 지수 산정 결과를 이용하여 경기도 내 시·군 저수지의 재해대응능력을 그룹화하였다. 홍수 취약지수는 -7.71에서 8.30의 범위를 나타냈으며, 본 연구에서는 -1.5, -0.5, 0.5 및 1.5를 기준으로 5개 등급으로 취약성을 분류하였으며 Table 6과 같다.

Table 6 Vulnerability rating classification for flood

Range	Vulnerability grade
> -1.5	A (Very safe)
-1.5~-0.5	B (Safe)
-0.5~0.5	C (Moderate)
0.5~1.5	D (Vulnerable)
1.5 <	E (Very vulnerable)

III. 결과 및 고찰

1. 경기도 수문환경 변화

경기도 내 및 인접 6개 관측소에 대한 미래 기후변화 자료를 분석하였으며 관측소별 연강수량 변화는 Fig. 6과 같다.

연강수량은 6개 관측소 모두 미래에 점진적으로 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났으며 대부분의 관측소에서 2040년~2070년 사이에 연강수량의 최대치를 기록했으며, 서울관측소에서는 2080년경 최댓값을 기록하는 것으로 나타났다. 또한, 그래프를 통하여 과거기간에 비해 미래기간에 연강수량의 변화가 큰 것을 확인할 수 있었으며 미래 연강수량의 변동성도 증가하는 것으로 나타났다. 저수지 홍수취약지수 산정을 위한 기후노출인자로 선정한 CX3h, CX24h, CP3h100yr, CP24h100yr 및 CN80에 대한 6개 관측소의 미래기간별 변화는 Table 7에 정리하였다.

서울관측소와 강화관측소의 경우 미래기간으로 갈수록 CX24h, CP24h100yr 및 CN80은 점진적으로 증가하는 경향을 보였으며 나머지 4개 관측소의 CX24h와 CP24h100yr는 2055s에 최댓값을 나타냈다. CX3h 및 CP3h100yr의 경우 양평관측소를 제외하고 모두 과거기간 (2000s)에서 최댓값을 기록했다. 이는 경기도에 위치한 관측소의 특징으로 파악되며, 과거

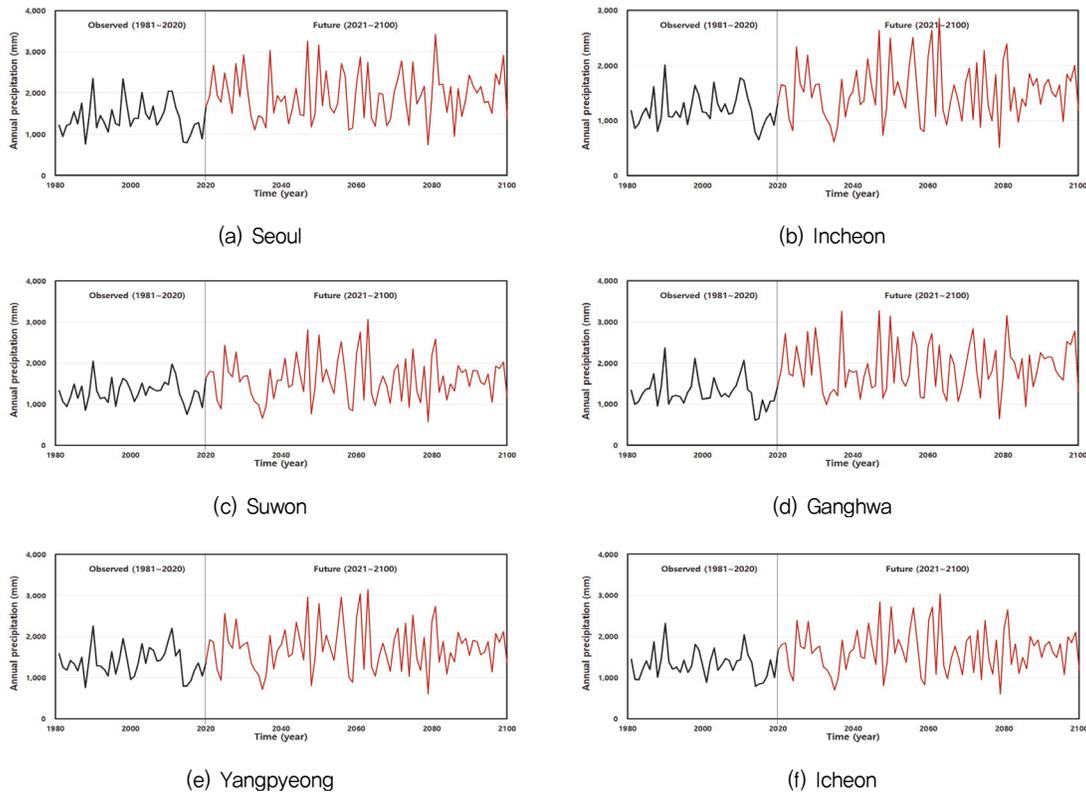


Fig. 6 Change in future annual precipitation by weather station

기간에 특징적으로 큰 3시간 강우강도를 가진 강우가 기록된 적이 있는 것으로 판단된다. CX3h, CX24h, CP3h100yr, CP24h100yr 및 CN80을 분석한 결과, 연강수량과 마찬가지로 미래에는 극한 강우의 발생이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 경기도 내 시·군 저수지의 90% 이상은 100년 빈도 설계 강우량을 기준으로 건설되었다. 기후변화 시나리오에 따르면 100년 빈도 강우량은 증가할 것으로 예상되며, 이에 따른 노후화 저수지의 홍수조절능력 정밀 분석 및 대책 마련이 필요할 것으로 나타났다. 특히, 기후변화에 대응하여 저수지 설계 시 기후변화 시나리오 기반의 미래 강수량 자료를 활용하는 등 설계강수량 산정 방법에 대한 논의도 필요할 것으로 판단된다. 또한, 대부분 시·군 저수지는 수위조절 기능이 없어 홍수기 만수위 상태를 유지하는 방식으로 운영되고 있다. 미래에 증가하는 극한 강우사상에 대비하여 저수지의 홍수조절 능력을 극대화하기 위해서는 홍수기 펌프, 취수탑 (농업용수 공급 능력이 있는 경우) 등 이용하여 저수지 수위를 선행적으로 하강시키는 등의 비구조적인 홍수대응기법도 적극적으로 활용할 필요가 있을 것이다.

2. 홍수 취약성 지수

경기도 내 시·군 관리 저수지별 홍수 취약성 지수 산정 결과에 대한 통계적 특성은 Table 8에 나타내었으며 기간별 홍수 취약성 지수의 박스플롯은 Fig.7과 같다.

홍수 취약성 지수 산정 결과, 2055s 기간에 홍수 취약성이 가장 큰 것으로 나타났으며, 2025s 기간이 가장 낮은 것으로 분석되었다. 이는 기후노출 인자 분석 결과와 동일한 패턴으로, 미래기간에 극한강우의 강도 및 빈도 증가로 시·군 관리 저수지의 홍수 취약성이 증가하는 것을 의미한다. 홍수 취약 등급 분류 결과는 Table 9 및 Fig. 8에 나타내었으며, 지수산정 결과와 마찬가지로 2055s 기간에 취약 및 매우 취약 등급에 해당하는 저수지가 증가하는 것으로 분석되었다. 과거기간 (2000s)에는 D 및 E 등급의 저수지 합이 58개소였으나, 2055s 기간에 107개소까지 증가하는 것으로 분석되었다. 2085s에도 E등급이 17개소로 매우 취약한 저수지 개소수가 과거에 비해 많은 것으로 나타났다. 따라서, 미래에 증가하는 홍수 위험도에 대한 대비책이 필요할 것으로 판단된다.

앞서 언급한 바와 같이 저수지 재해대응능력 증대 사업을 위해서는 정밀한 수문모델링이 필요하며, 이를 위해서는 저수지의 상세한 제원 자료의 확보가 우선되어야 한다. 하지만

Table 7 Changes in climate exposure indices for six weather stations

Station	Index	2000s (1981~2020)	2025s (2011~2040)	2055s (2041~2070)	2085s (2071~2100)
Seoul	CX3h (mm)	201.4	83.7	110.7	117.9
	CX24h (mm)	433.2	491.7	431.1	612.1
	CP3h100yr (mm)	204.4	97.5	120.5	141.1
	CP24h100yr (mm)	453.0	504.6	507.4	685.7
	CN80 (day)	3.1	5.3	5.5	6.2
Incheon	CX3h (mm)	173.2	91.4	88.8	110.7
	CX24h (mm)	370.7	424.9	598.1	397.6
	CP3h100yr (mm)	185.5	101.7	109.2	129.7
	CP24h100yr (mm)	391.1	459.8	598.7	493.2
	CN80 (day)	2.5	3.1	4.4	4.4
Suwon	CX3h (mm)	179.8	93.2	90.1	114.1
	CX24h (mm)	450.8	428.1	539.4	369.8
	CP3h100yr (mm)	175.7	104.0	113.1	130.8
	CP24h100yr (mm)	403.1	469.0	595.7	490.3
	CN80 (day)	2.8	3.6	4.6	4.6
Ganghwa	CX3h (mm)	285.5	92.8	119.7	138.9
	CX24h (mm)	619.5	634.0	511.5	762.3
	CP3h100yr (mm)	231.7	105.0	136.1	147.1
	CP24h100yr (mm)	498.1	543.9	595.1	792.0
	CN80 (day)	2.7	5.2	5.6	6.1
Yangpyeong	CX3h (mm)	120.0	100.7	108.2	121.0
	CX24h (mm)	367.5	445.0	747.4	484.1
	CP3h100yr (mm)	157.9	112.0	114.4	130.7
	CP24h100yr (mm)	431.4	489.9	640.9	490.5
	CN80 (day)	3.0	4.2	5.5	5.3
Icheon	CX3h (mm)	161.0	92.6	92.9	112.8
	CX24h (mm)	415.5	434.5	630.0	405.2
	CP3h100yr (mm)	150.3	103.4	112.8	126.4
	CP24h100yr (mm)	407.4	464.6	624.5	490.3
	CN80 (day)	2.6	3.8	4.8	4.9

Table 8 Statistical characteristics of flood vulnerability index

Index	2000s (1981~2020)	2025s (2011~2040)	2055s (2041~2070)	2085s (2071~2100)
Average	0.01	-0.51	0.45	0.08
Standard Deviation	1.36	1.26	1.24	1.33
Maximum	8.29	7.49	8.30	7.97
Minimum	-7.71	-7.63	-6.32	-7.06

시·군 관리 저수지의 경우 대부분 내용적, 목표수위 등의 자료가 확보되지 않았으며, 향후 기후변화에 대응한 재해대응 능력 증대를 위해서는 시·군 관리 저수지의 기초자료 확보를 위한 연구가 선행될 필요가 있을 것으로 판단된다. 각 지자체에서는 우선적으로 과거 또는 미래에 매우 취약 (E) 또는 취약 등급 (D)을 기록한 저수지들을 대상으로 미래 저수지

홍수대응능력 정밀 분석을 위한 추가 연구를 수행하고, 저수지 증고 및 보강 등의 구조적인 대책 또는 저수지 운영 방안 고도화 등의 비구조적 대책의 효율성을 각각 분석하여 미래 기후변화에 의한 시·군 저수지 홍수위험도 증가에 대한 대책을 마련할 필요가 있다.

Table 9 Number of reservoirs by flood vulnerability grade

Vulnerability grade	2000s (1981~2020)	2025s (2011~2040)	2055s (2041~2070)	2085s (2071~2100)
A	12	16	12	13
B	30	87	6	25
C	129	107	94	128
D	47	15	95	46
E	11	4	22	17

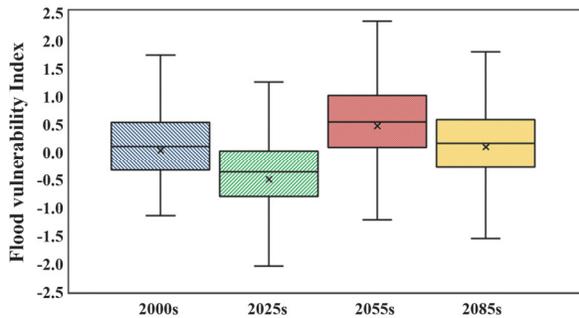


Fig. 7 Box plot of flood vulnerability index for four period

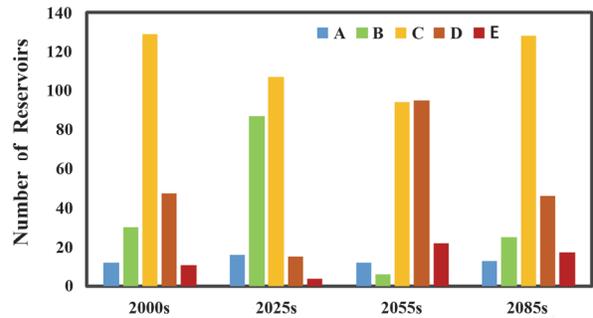


Fig. 8 Flood vulnerability grade for four period

IV. 요약 및 결론

전국적으로 지자체에서 관리하고 있는 저수지는 약 80%이며 대부분 30만³ 미만의 소규모 저수지이다. 소규모 저수지의 경우 유역면적이 작고 집중호우 발생 시 유입량이 급격히 증가하는 형태로 국지성 집중호우에 매우 취약할 수 있으며 기후변화에 따라 집중호우의 빈도 및 강도 증가로 기상 여건은 열악해지고 있다. 본 연구에서는 경기도 내 시·군에서 관리하고 있는 저수지를 대상으로 기후변화에 따른 수재해 대응능력을 분석하기 위하여 경기도의 기후변화에 따른 수문환경 변화를 분석하고 이에 따른 저수지의 홍수 취약성을 평가하였다. 이에 따른 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 경기도 내 시·군 관리 저수지 243개소를 대상으로 현황을 분석하였으며 144개소 (59.3%)는 60년 기준 저수지 내구연한을 초과하였으며 지속적인 노후화가 진행중인 것으로 나타났다. 또한, 총저수용량은 대부분 10만³ 미만의 소규모 저수지이며 5만³ 이하의 소규모 저수지가 77.4%를 차지하는 것으로 나타났다.
2. 기후변화에 따른 기상 여건 변화가 저수지 재해대응능력에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 SSP5-8.5 시나리오에 따른 미래기상자료를 수집하였으며 시·공간 상세화를 통한 경기도 시·군별 미래강우자료를 구축하였다.
3. 기후시나리오에 따른 연강수량은 미래기간으로 갈수록 증가하는 경향을 보였으며 극한 강우의 발생도 증가하

는 것으로 나타났다. 또한, 과거기간에 비해 미래기간에 연강수량의 변동폭이 큰 것으로 나타났다. 취약성 평가를 위하여 선정된 5개의 기후노출인자의 경우도 증가하는 경향을 보임에 따라 기후변화에 따른 저수지의 기상 여건은 열악해지고 있음을 확인할 수 있었다.

4. 취약성 평가는 기후노출, 민감도 및 적응능력에 대한 지표를 산정하고 이에 대한 경기도 내 저수지의 상대적 취약성을 도출하였다. 홍수 취약성은 저수지별 편차가 큰 것으로 나타났으며 상대적 취약등급을 5등급 (A~E 등급)으로 분류하여 미래기간별 취약등급을 산정하였다.
5. 과거기간 (2000s)에는 취약 및 매우 취약에 해당하는 D 및 E 등급의 저수지 합이 58개소였으나, 2055s 기간에는 107개소까지 증가하는 것으로 나타났다. 2085s에도 E등급이 17개소로 매우 취약한 저수지 개소수가 과거에 비해 많은 것으로 나타나 기후변화에 대응하기 위한 대책을 마련할 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 결과물은 경기연구원 (정책연구 2021-35)과 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 농업기반및재해 대응기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음 (321068-04).

REFERENCES

- Balica, S. F., I. Popescu, L. Beevers, and N. G. Wright, 2013. Parametric and physically based modelling techniques for flood risk and vulnerability assessment: A comparison. *Environmental Modelling and Software* 41: 84-92. doi: 10.1016/j.envsoft.2012.11.002.
- Balica, S. F., N. Douben, and N. G. Wright, 2009. Flood vulnerability indices at varying spatial scales. *Water Science and Technology* 60(10): 2571-2580. doi:10.2166/wst.2009.183.
- Bong, T. H., B. S. Jeong, and S. M. Jun, 2021. Evaluation of Reservoir Disaster Response Capability and Operation Plan for Small Reservoir in Gyeonggi-Do. Gyeonggi Research Institute (in Korean).
- Cendrero, A., and D. W. Fischer, 1997. A procedure for assessing the environmental quality of coastal areas for planning and management. *Journal of Coastal Research* 13: 732-744.
- Cho, J. P., I. G. Jung, W. I. Cho, and S. W. Hwang, 2018. User-centered climate change scenarios technique development and application of Korean peninsula. *Journal of Climate Change Research* 9(1): 13-29 (in Korean). doi: 10.15531/KSCCR.2018.9.1.13.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007. *Climate Change 2007: Impacts, Adaption and Vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Jun, S. M., M. S. Kang, S. Hwang, J. Park, and J. H. Song, 2020. Flood vulnerability assessment for prioritizing and evaluating rehabilitation of ungauged reservoirs considering climate change. *Water* 12(7): 1901. doi:10.3390/w12071901.
- Jun, S. M., S. H. Hwang, J. H. Kim, J. H. Kwak, K. U. Kim, H. J. Lee, S. H., Kim, J. P. Cho, J. N. 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.
- Kim, J. S., S. M. Hong, and J. S. Song, 2014. Study on Deterioration Status and Repairing & Reinforcing Method on Facility of Reservoir (I). Rural Research Institute (in Korean).
- Ko A. R., and H. S. Lee, 2011. Estimation of the reservoirs flood attenuation index in upper geumgang catchment. *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation* 11(5): 273-280 (in Korean).
- Koh, K. J., 2009. A Study on Vulnerability Assessment to Climate Change in Gyeonggi-Do; Gyeonggi Research Institute: Suwon, Korea.
- KRC (Korea Rural Community Corporation), 2020. Statistical yearbook of land and water development for agriculture. KRC (in Korean).
- Kwak, J. H., J. H. Kim, S. M. Jun, S. H. Hwang, S. H. 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.
- Lee, H. S., and J. J. Lee, 2018. Sensitivity analysis of flood vulnerability index of levee according to climate change. *Journal of Korea Water Resources Association* 51(11): 1161-1169 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2018.51.S-1.1161.
- Lee, Y. K. 2019. A risk analysis by the ratio of basin area to capacity based on the reservoir failures in South Korea. *Crisisonomy* 15(11): 101-114 (in Korean). doi:10.14251/crisisonomy.2019.15.11.101.
- MAFRA, 2019. Design of Agricultural infrastructure fill dam: KDS 67 10 20. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (in Korean).
- Mearns L. O., I. Bogardi, F. Giorgi, I. Matyasovszky, and M. Palecki, 1999. Comparison of climate change scenarios generated from regional climate model experiments and statistical downscaling. *Journal of Geophysical Research* 104: 6603-6621. doi:10.1029/1998JD200042.
- Ministry of Environment, 2012. Vulnerability Map by Sector to Climate Change; Ministry of Environment: Sejong, Korea.
- Park J. H., M. S. Kang, and I. H. Song, 2013. Flood risk assessment based on bias-corrected RCP scenarios with quantile mapping at a Si-Gun level. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(4): 73-82 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2013.55.4.073.
- Park, J., M. S. Kang, I. Song, 2015. Assessment of flood vulnerability based on CMIP5 climate projections in South Korea. *Journal of American Water Resources Association* (51): 859-876. doi: 10.1111/jawr.12283.
- Peduzzi, P., H. Dao, C. Herold, D. Rochette, and H. Sanahuja, 2001. Feasibility Study Report e on Global Risk and Vulnerability Index eTrends per Year (GRAVITY).

- United Nations Development Programme Emergency Response Division UNDP / ERD, Geneva.
22. Scarrott R., D. Reed, and A. Bayliss, 1999. Indexing the attenuation effect attributable to reservoirs and lakes. Flood Estimation Handbook, Vol. 4-5. Institute of Hydrology, Wallingford.
 23. UNDRR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction), 2020. Human cost of disasters: an overview of the last 20 years (2000-2019). UNDRR, Switzerland, Geneva.