농업용 저수지 독 높이기에 따른 홍수조절효과 분석

Effects of Agricultural Reservoir Rehabilitation on their Flood Control Capacities

전상민* · 강문성**† · 송인홍*** · 황순호* · 김계웅* · 박지훈*

Jun, Sang Min · Kang, Moon Seong · Song, Inhong · Hwang, Soon Ho · Kim, Kyeung · Park, Jihoon

ABSTRACT

About 74 % of reservoirs in Korea are older than 40 years and their storage capacities have been decreased substantially. As part of reservoir reinforcement, the dam heightening project has been ongoing for about 110 reservoirs. The main purpose of the dam heightening project is to secure additional environmental water, while improving flood control capacity by gaining additional storage volume. The objective of this study was to evaluate reservoir flood control capacity changes of dam heightening reservoirs for effective management of additional storage volume. In this study, 13 reservoirs were selected for reservoir simulation of 200 year return period floods. Rainfall data of 1981-2100 were collected and divided into 4 periods (1981-2010; 1995s, 2011-2040; 2025s, 2041-2070; 2055s, 2071-2100; 2085s). Probability rainfalls and 200yr design floods of each period were calculated using FARD2006 and HEC-HMS. Design floods were used as inputs of each reservoir simulation using HEC-5. Overall, future probability rainfalls and design floods tend to increase above the past 1995s. Control ratios were calculated to evaluate flood control capacities of reservoirs. As a result, average flood control ratios were increased from 32.6 % to 44.2 % after dam heightening. Control ratios were increased by 12.7 % (1995s), 12.4 % (2025s), 10.3 % (2055s) and 10.9 % (2085s). The result of this study can be used as a basis for establishing the reservoir management structure in the future.

Keywords: Dam heightening; Climate change; Probability rainfall; Design flood; Flood control ratio

1. 서 론

최근 기후변화로 인해 국지성 호우 등 이상기후의 발생이 증가하고 있으며 이에 따른 홍수피해 역시 증가하고 있다. 우리나라에서도 연 강수량의 30 % 이상의 강우가 하루에 집중되어 내리는 등 집중호우의 발생이 빈번이 일어나고 있으며 이로 인한 홍수 피해에서 자유롭지 못한 실정이다. 특히 농촌 지역은 최근 10년간 연평균 약 790억원의 농경지 침수피해가 발생하였고, 도시 지역에 비해 홍수에 대한 적절한 대비가 이루어지지 못해 매년 큰 피해가 발생하고 있다 (NEMA, 2012). 따라서 농촌 지역의 홍수 피해에 대한 대책이 시급한 실정이며 이를 위해서는 우리나라 대부분의 농촌지역에 존재하는 농업용 저수지의 적절한 활

용이 필수적이다.

우리나라에는 현재 약 18,000 여개의 농업용 저수지가 있으며 이중 대부분의 저수지는 농업용수 공급에 중점을 두고 설치 및 운영되고 있다. 또한 약 74 %의 저수지가 설치 후 40년 이상이 경과되는 등 (KRC, 2010) 노후화로 인해 본래의 기능을 다하지 못하고 있다. 이에 따라 정부에서는 현재 전국의 110여개 농업용 저수지에 대하여 독 높이기 사업을 진행하고 있다. 저수지 독 높이기 사업은 노후화로 붕괴 위험성이 있거나 홍수나 가뭄 피해가 우려되는 저수지를 대상으로 기존제당 덧쌓기 등 독 높이기와 여수로 확장, 전동식 수문 및 소수력발전시설을 설치하는 사업으로서 가뭄피해 예방, 수질개선 및 수변 생태계 복원 등에 기여, 홍수 등 재해 예방, 청정에너지 생산의 효과가 기대되고 있다 (Kim et al., 2011).

독 높이기로 추가 확보된 홍수조절공간을 효율적으로 활용하여 홍수방어능력을 증대시키기 위해서는 우선적으로 독 높이기 전후 저수지 홍수저감효과에 대한 정량적인 평가가 이루어져야 한다. 또한 기후변화에 따른 강우량 증가에 대한 홍수피해 대책을 수립하기 위해서는 미래 강우에 대한 저수지 홍수조절능력의 분석이 필요하다.

저수지의 홍수조절능력에 대한 연구로 Kwun et al. (2003)은

* 서울대학교 농업생명과학대학 생태조경·지역시스템공학부 대학원

** 서울대학교 농업생명과학대학 조경·지역시스템공학부 교수, 농업생명과학연구원 겸무연구원

*** 서울대학교 농업생명과학연구원 연구교수

† Corresponding author Tel.: +82-2-880-4582

Fax: +02-2-873-2087

E-mail: mskang@snu.ac.kr

2013년 8월 14일 투고

2013년 10월 7일 심사완료

2013년 10월 10일 게재확정

성주댐 유역을 대상으로 설계홍수량, 태풍 루사에 의한 홍수량, 가능최대홍수량 (PMF) 등에 대하여 level-pool 방법과 Runge-Kutta 방법을 이용하여 저수지 추적을 실시해 홍수조절 기능을 분석하였고, Choi et al. (2007)은 댐의 홍수조절에 의한 경제적 효과에 초점을 맞추어 홍수피해 절감량이 얼마나 발생하였는지를 정량화할 수 있는 방법론을 개발하고 남한강 유역의 2006년 7월 집중호우를 대상으로 충주댐의 홍수조절에 의한 여주지점에서의 홍수조절효과와 그에 따른 경제적 효과를 분석하였으며, Ko et al. (2011)은 금강 대청댐 상류 및 미호천의 15개 유역을 대상으로 영국에서 개발된 홍수 저감지수인 FARL (Flood Attenuation by Reservoir and Lakes index)을 산정하였다.

뚝 높이기 저수지에 대한 연구로 Noh (2010)는 백곡저수지에 대하여 기존저수지와 2 m 증고 저수지에 대해 정상운영과 방류제한운영으로 구분하여 홍수제한수위가 있는 경우와 없는 경우에 대해 용수공급량 및 이수안전도 변화, 연말 저수량 확보 변화에 대해 분석하였고, Kim et al. (2011)은 전국 110여개의 뚝 높이기 사업지구에 대해 농촌마을 친수공간조성과 관련된 특성 및 주변지역의 현황자료를 수집하고 통계적인 기법으로 분류하여 유형별 특성을 파악하고 지역 및 공간적인 분포를 제시하였다. Yoo et al. (2012)은 뚝 높이기 저수지 중 운암, 장치 및 탐정 저수지에 대하여 농업용수 공급능력을 유지하는 동시에 하류하천에 환경용수를 공급할 수 있도록 방류기준을 수립하였고, Hwang et al. (2012)은 황룡강 유역 내 뚝 높이기 저수지를 대상으로 하류하천에 대한 영향을 평가하였다. 하지만 현재까지의 연구에서는 뚝 높이기 사업에 의한 홍수조절효과 향상에 대한 정량적인 분석이 이루어지지 않았으며, 뚝 높이기 사업이 기후변화에 적절하게 대처하는지에 대한 평가도 이루어지지 않은 실정

이다.

따라서 본 연구에서는 뚝 높이기 저수지를 대상으로 현재 및 미래 강우에 대한 설계강우량 및 저수지 유입량을 산정하고, 이를 바탕으로 저수지 모의 운영을 통해 기후변화에 따른 뚝 높이기 전후 저수지 홍수저감효과 변화를 분석하고자 한다.

II. 재료 및 방법

전체 연구의 흐름도는 아래 Fig. 1과 같다. 과거 및 미래 강우량 자료를 수집하여 빈도분석을 통해 설계강우량을 산정하였고, 산정된 설계강우량을 유역에 적용해 설계홍수량을 분석하였다. 그리고 설계홍수량을 저수지 모의운영에 적용하여 기후변화 및 뚝 높이기 사업에 따른 저수지의 홍수조절효과를 분석하였다.

Fig. 1 Flow chart of the reservoir simulation procedure

* 1995s: 1981 ~ 2010, 2025s: 2011 ~ 2040, 2055s: 2041 ~ 2070, 2085s: 2071 ~ 2100

Table 1 Characteristics for the selected reservoirs

Stream	Reservoir	Weather station	Watershed area (ha)	Total water storage volume (10 ⁴ m ³)		
				Before dam heightening	After dam heightening	Rate of increase (%)
Han_river	Bangye	Wonju	2,500	174.6	283.4	62.3
Geum_river	Tapjung	Geumsan	21,880	3,192.7	3,664.7	14.8
	Baegkok	Chungju	8,479	2,175.0	2,661.8	22.4
	Jangchan	Chupung-ryung	513	425.6	539	26.6
Nakdong_river	Samga	Youngju	2,425	408.6	529.3	29.5
	Jipyung	Moonkyung	2,556	275.8	381.2	38.2
	Sooyang	Gwangju	3,300	747.2	1,192.6	59.6
Youngsan_river	Jangsung	Gwangju	12,280	9,006.5	9,989.8	10.9
	Naju	Gwangju	8,460	9,132.0	10,756.0	17.8
	Gwangju	Gwangju	4,130	1,737.0	2,326.0	33.9
	Damyang	Gwangju	6,560	6,667.6	7,506.8	12.6
	Baekyong	Gwangju	2,730	248.0	380.4	53.4
	Daedong	Mokpo	4,390	638.9	719.5	12.6

1. 연구 대상지

본 연구의 대상 저수지로 독 높이기 저수지들 중 가능최대홍수량 대상저수지 (유역면적 2500 ha 이상, 총 저수량 500만 톤 이상)이거나 홍수조절기능을 가지는 치수구조물 (수문 등)이 설치된 저수지 13곳을 선정하였다. 수계별로 한강 1곳 (반계), 금강 3곳 (탐정, 백곡, 장찬), 낙동강 2곳 (삼가, 지평), 영산강 7곳 (수양, 장성, 나주, 광주, 담양, 백용, 대동)을 선정하였다. Table 1은 연구대상 저수지의 수계, 대상관측소, 유역면적 및 총 저수량 변화를 나타내고 있으며, Fig. 2는 각 저수지의 위치를 나타내고 있다. 총 저수량은 반계저수지에서 62.3 %로 가장 높은 증가율을 보였고, 장성저수지에서 10.9 %로 가장 낮은 증가율을 보였다.

각 저수지 유역의 유역특성인자를 추출하기 위해 DEM (수치표고모델), 토양도, 토지이용도, 하천도 등의 자료를 수집하였다. 수집된 자료를 바탕으로 GIS를 이용해 유역특성인자를 추출하였으며, 예시로 장성저수지 유역의 DEM (수치표고모델)과 토지이용도를 Fig. 3에 나타내었다. 또한 저수지 모의 운영을 위해 독 높이기 사업 기초보고서·실시설계보고서 등의 보고서 조사 및 현장조사를 통해 독 높이기 전/후 저수지 제원과 특성 변화를 분석하였고, 이를 바탕으로 현황 자료를 구축하였으며 이를 Table 2에 나타내었다.

Fig. 2 Location map of the 13 study reservoirs

Fig. 3 DEM and landuse maps of the Jangsung reservoir watershed

Table 2 Characteristics changes of the study reservoirs

Reservoir	Before dam heightening				After dam heightening			
	Flood water level (El.m)	Normal water level (El.m)	Restricted water level (El.m)	Flood gate	Flood water level (El.m)	Normal water level (El.m)	Restricted water level (El.m)	Flood gate
Bangye	77.5	76.0	76.0	X	80.5	79.0	79.0	X
Tapjung	30.4	28.3	28.3	O	31.1	29.3	29.3	O
Baekgok	100.1	100.1	100.1	O	102.1	102.1	102.1	O
Jangchan	164.0	162.7	162.7	X	167.0	166.0	166.0	X
Samga	305.0	303.4	303.4	X	307.8	306.7	306.7	X
Jipyung	92.1	90.6	90.6	X	93.8	92.6	92.6	X
Sooyang	48.41	47.16	47.16	X	48.41	48.41	47.16	O
Jangsung	86.5	86.5	86.5	O	88.0	88.0	88.0	O
Naju	63.9	63.9	63.9	O	65.9	65.9	65.9	O
Gwangju	78.75	76.95	76.95	X	79.85	79.85	76.95	O
Damyang	121.1	119.5	119.5	O	123.5	121.5	121.5	O
Baekyong	40.0	38.5	38.5	X	42.0	40.6	40.6	X
Daedong	36.2	35.0	35.0	X	36.2	35.6	35.6	O

2. 설계강우량

저수지 유입량 산정을 위해 현재 및 미래 설계강우량을 산정하였다. 각 저수지의 주요 기상관측소를 선정하고 과거 강우량 자료를 수집하였으며 미래 강우자료는 기상청 국가표준 기후변화 시나리오에서 제공하는 자료를 보정하여 사용하였다.

가. 강우자료

연구대상 저수지의 기상자료를 취득하기 위해 각 저수지와 가장 가까운 곳에 위치하고 있는 기상관측소를 선정하였고, 확률강우량의 산정을 위해 과거 및 미래 기상자료를 수집하였다. 과거 기상자료는 1981년~2010년 (1995s) 자료를 사용하였고, 미래 기상자료는 2011년~2100년 자료를 수집하여 2011년~2040년 (2025s), 2041년~2070년 (2055s), 2071년~2100년 (2085s)으로 구분하여 사용하였다.

기상청 국가표준 기후변화 시나리오에서 제공하는 미래 기상자료는 IPCC 4차 기후변화 평가보고서 (IPCC, 2007)에서 사용된 대표 온실가스 시나리오에 근거하여 생성된 자료로 미래 강수모의자료 (2006~2100년)과 과거강수모의자료 (1950~2005년)를 함께 제공하고 있다. 이때 과거강수모의자료와 실제 관측치는 어느 정도의 편의를 보이며, Park et al. (2012)은 GEV (Generalized Extreme Value) 분포를 적용한 분위사상법 (Quantile Mapping) 기법을 이용하여 편의보정을 실시하였으며, 본 연구에서는 같은 방법으로 편의보정된 RCP 4.5 기반의 미래 기상자료를 이용하였다.

나. 확률강우량

확률강우량의 산정을 위해 국립방재연구원에서 제공하는 FARD

2006 (Frequency Analysis of Rainfall Data 2006)을 사용하였다. FARD2006은 모멘트법, 최우도법, 확률가중모멘트법에 따라 다양한 분포형의 추정이 가능하며 각각의 추정 방법에 따른 분포형의 다양한 적합도 검정 결과를 쉽게 확인할 수 있고 사용이 편리하여 강우빈도해석 시 많이 이용되고 있다 (Hwang et al., 2012).

본 연구에서는 매개변수 추정에 확률가중모멘트법을 사용하였고, 확률분포형은 Gumbel 분포형을 사용하였다. 설계빈도는 일반적인 저수지 설계 기준인 200년 빈도를 적용하여 시기별 (1995s, 2025s, 2055s, 2085s) 확률강우량을 각각 산정하였다.

다. 강우의 시간분포

설계강우량은 강우량의 총 합으로 설계홍수량 산정 및 저수지 모의운영에 이용하기 위해서는 강우의 시간적 분포를 고려해야 한다. 일반적으로 Huff 분포형이 강우의 시간 분포형으로 많이 이용되고 있다. 본 연구에서는 건설교통부 (2000)가 발표한 각 기상관측소별 Huff 분포 강우백분위 자료를 이용해 설계강우량에 시간적 분포를 적용하였다.

3. 저수지 유입량 산정

저수지 운영 모의에 사용될 저수지 유입량을 산정하기 위해 HEC-HMS 모형을 이용해 현재 및 미래 저수지 상류 유역의 설계홍수량을 산정하였다. HEC-HMS 모형은 미 육군공병단에서 개발한 강우-유출 모형으로 홍수량 산정에 널리 이용되고 있다.

초기손실량 산정에는 Initial and Constant Loss, NRCS Curve Number (CN) Method, Green and Ampt Method, Deficit and Constant Loss 등의 방법을 제공하고 있으며, 직접유출량

산정에는 Clark 단위도법 (Clark unit hydrograph transform), ModClark 단위도법 (ModClark transform), Snyder 단위도법 (Snyder unit hydrograph transform), SCS 단위도법 (SCS unit hydrograph transform), Kinematic wave 방법 등이 있다. 국토해양부 (2012)는 설계홍수량 산정에 대한 객관적으로 표준적인 기준 제시를 목적으로 『설계홍수량 산정요령』을 제안하였으며 본 연구에서는 이에 근거하여 설계홍수량을 산정하였다. 초기손실량 산정에는 NRCS CN 방법을 적용하였으며, 직접유출량 산정에는 Clark 단위도법을 이용하였다. 유역의 도달시간은 연속형 Kraven 공식을 적용하여 계산하였으며, 저류상수는 Sabol 공식을 적용하였다. 기저유량 모의에는 지수감수모형을 적용하였고, 하도구간 흐름은 모의하지 않았다. 증발산, 융설 등은 매우 소량이거나 존재하지 않으므로, 홍수량 산정에 영향을 미치지 않을 것으로 사료되어 고려하지 않았다.

이와 같이 산정된 시기별 (1995s, 2025s, 2055s, 2085s) 200년 빈도 설계홍수량은 저수지 모의 운영의 유입량 자료로 사용되었다.

4. 저수지 운영 모의

둑 높이기 전후 저수지의 홍수조절효과를 분석하기 위해 시기별, 빈도별 설계홍수량을 저수지 유입량으로 사용하여 저수지 운영을 모의하였다. 저수지 운영 모의에는 HEC-5 모형을 이용하였다.

HEC-5 모형은 미육군 수공학센터 (Hydrologic Engineering

Center in Army Corps of Engineers)에서 개발된 저수지 모의 운영 프로그램으로, 각각의 저수지에 대한 홍수조절 및 필요 저수량, 유역 내 유출의 공간적/시간적 분포에 대한 저수지 시스템의 영향, 저수지 시스템 운영을 위한 홍수 조절 및 이수 목적 기준 평가, 최대홍수 조절 편익을 위한 기존의 저수지 및 건립 예정 저수지 혹은 비구조적 포함하는 시스템의 모의 운영 등을 결정하는데 주로 이용된다 (USACE, 1998).

HEC-5 모형의 구동을 위해서는 시간별 유입량, 저수지 수위별 방류량, 저수지 수위별 저류량, 저수지 목표수위 등의 값이 필요하며, Auto ROM (Automatic Reservoir Operation Method), Rigid ROM (Rigid Reservoir Operation Method), Technical ROM (Technical Reservoir Operation Method) 등의 저수지 운영 방식 중 하나를 결정하여 모의할 수 있다. 본 연구에서는 저수지 수위가 제한수위가 될 때 까지는 모든 저수지 유입량을 저류하며 제한수위 이상이 되는 순간부터 모든 유입량을 방류하는 Auto ROM 방식을 사용하였다.

저수지 운영 모의 시 초기수위의 설정이 매우 중요하다. 본 연구에서는 둑 높이기 이전 초기수위로 제한수위 혹은 상시만수위를 적용하였고, 둑 높이기 이후의 초기수위로도 기존의 제한수위 혹은 상시만수위를 적용하여 둑 높이기 사업에 의해 추가 확보된 홍수조절용량의 효과를 분석할 수 있도록 하였다. 저수지 모의 운영의 결과를 통해 둑 높이기 전후 시기별, 빈도별 저수지 홍수 유입 및 방류량 곡선을 산정하였고 저수지 홍수조절효과와 변화를 분석하였다.

Table 3 Probability rainfalls for a 200 year return period based on RCP 4.5 scenario (mm)

Station	Period	3 hr	6 hr	9 hr	12 hr	15 hr	18 hr	24 hr	Station	Period	3 hr	6 hr	9 hr	12 hr	15 hr	18 hr	24 hr
Wonju	1995s	165.2	232.3	287.8	327.5	360.6	390.7	428.3	Youngju	1995s	146.8	217.1	254.9	293.5	331.6	350.6	410.5
	2025s	103.8	165.4	199.2	231.8	264.7	298.1	329.0		2025s	157.1	252.8	297.9	330.7	347.7	358.1	379.6
	2055s	127.2	199.6	234.2	256.1	277.1	296.0	324.7		2055s	207.1	313.9	379.8	416.9	446.8	474.6	533.8
	2085s	157.0	236.3	276.6	302.3	333.6	358.9	419.5		2085s	213.2	374.6	463.0	554.2	644.4	708.3	756.8
Geumsan	1995s	154.6	202.9	233.8	256.8	283.8	305.1	327.5	Moonkyung	1995s	117.8	152.8	181.3	207.5	223.9	235.7	286.9
	2025s	105.7	176.3	209.6	222.6	239.3	248.8	264.9		2025s	177.0	256.8	313.2	344.9	369.2	381.1	393.8
	2055s	175.5	271.3	336.3	380.7	399.4	412.2	435.5		2055s	145.0	216.9	261.2	289.4	302.9	319.6	382.8
	2085s	147.4	209.5	239.8	272.1	321.8	354.1	394.4		2085s	131.6	213.2	273.3	315.7	346.4	372.0	413.8
Chungju	1995s	177.1	227.5	259.0	301.2	333.0	341.2	354.6	Gwangju	1995s	192.5	279.1	335.4	362.3	385.0	410.1	445.7
	2025s	202.0	322.8	365.9	387.8	403.9	417.1	436.4		2025s	147.6	220.9	247.2	274.9	294.6	310.0	331.8
	2055s	83.2	129.1	152.3	175.9	201.9	227.2	264.8		2055s	155.1	224.1	268.9	296.5	319.8	337.8	368.5
	2085s	202.6	351.9	429.2	492.4	555.6	605.3	655.9		2085s	192.0	264.2	264.2	312.1	333.3	347.3	374.8
Chupung-ryung	1995s	124.9	197.1	252.7	277.9	305.3	329.0	366.1	Mokpo	1995s	151.2	204.5	263.5	313.1	339.8	365.6	407.6
	2025s	159.2	432.1	215.1	300.4	298.4	296.6	298.9		2025s	135.0	217.0	237.9	254.2	268.6	278.5	300.8
	2055s	191.5	294.3	346.1	372.5	391.1	403.0	434.0		2055s	168.9	257.5	278.9	299.4	308.2	316.9	333.3
	2085s	186.5	240.9	281.6	303.0	313.5	331.7	354.1		2085s	202.4	304.3	352.4	377.1	397.3	417.3	434.1

* 1995s: 1981~2010, 2025s: 2011~2040, 2055s: 2041~2070, 2085s: 2071~2100

5. 저수지 홍수조절효과 분석

각 저수지의 뚝 높이기 전후 홍수조절효과의 변화를 정량적으로 분석하기 위해 여러 가지 지표 중 홍수조절률을 활용하였다. 홍수조절률은 첨두유입량과 최대방류량의 차이를 첨두유입량으로 나눈 비율로 저수지로 유입된 홍수량이 방류될 때 얼마나 완화되었는지를 나타낸다.

$$\text{홍수조절률} = \frac{\text{첨두유입량} - \text{최대방류량}}{\text{첨두유입량}} \times 100(\%) \quad (1)$$

III. 결과 및 고찰

1. 확률강우량 및 저수지 유입량

본 연구에 적용되는 8개 기상관측소에 대하여 과거 및 미래

Fig. 4 Average probability rainfalls for a 200 year return period based on RCP 4.5 scenario

* 1995s: 1981~2010, 2025s: 2011~2040, 2055s: 2041~2070, 2085s: 2071~2100

Table 4 Design floods of a 200-year frequency based on RCP 4.5 scenario (m³/s)

Reservoir	Period	3 hr	6 hr	9 hr	12 hr	15 hr	18 hr	24 hr	Reservoir	Period	3 hr	6 hr	9 hr	12 hr	15 hr	18 hr	24 hr
Bangye	1995s	515.1	535.3	500.5	459.5	410.2	371.3	340.7	Jangsung	1995s	2444.1	2599.9	2645.4	2429.6	2094.1	1840.9	1668.2
	2025s	257.1	303.7	274.8	253.6	239.0	228.7	192.8		2025s	1812.7	2064.4	1769.5	1575.6	1399.9	1253.9	1030.2
	2055s	332.6	376.2	328.2	282.3	250.9	227.0	190.1		2055s	1918.1	2096.4	1932.2	1704.0	1523.0	1369.1	1146.5
	2085s	429.3	453.7	392.7	336.6	305.0	277.6	247.9		2085s	2437.1	2496.9	1897.0	1796.6	1588.9	1408.5	1166.5
Tapjung	1995s	966.8	1149.8	1255.1	1350.7	1360.8	1377.7	1356.9	Naju	1995s	1803.3	1900.9	1899.3	1711.9	1456.3	1271.5	1147.5
	2025s	581.2	1057.2	1187.8	1154.2	1136.1	1080.2	975.1		2025s	1289.7	1454.3	1220.1	1079.1	953.3	850.9	696.5
	2055s	1135.2	1767.3	2042.2	2109.9	2005.6	1881.6	1671.4		2055s	1375.1	1478.8	1341.4	1172.7	1042.3	933.5	779.1
	2085s	909.2	1304.3	1391.1	1453.3	1584.3	1597.2	1504.1		2085s	1797.5	1785.5	1315.1	1240.1	1089.9	961.7	793.2
Baekgok	1995s	1556.1	1595.1	1410.9	1193.1	1103.6	1006.8	870.3	Gwangju	1995s	959.2	989.7	966.7	860.4	728.6	634.7	571.6
	2025s	1850.6	2138.0	1775.3	1467.2	1247.1	1086.7	864.7		2025s	713.9	756.0	627.2	549.0	482.8	429.8	350.6
	2055s	493.8	663.5	610.2	575.2	558.1	543.0	493.8		2055s	754.9	767.6	684.7	593.4	525.2	469.2	390.2
	2085s	1857.7	2359.1	2119.3	1902.5	1758.3	1618.0	1332.5		2085s	956.5	912.8	672.2	625.5	547.9	482.7	397.0
Jangchan	1995s	111.2	103.7	96.7	84.8	70.5	62.3	56.2	Damyang	1995s	2250.1	2090.5	1831.9	1506.4	1232.2	1052.5	937.1
	2025s	127.1	102.8	81.9	67.5	56.5	48.6	38.1		2025s	1697.3	1440.4	1103.2	930.5	802.1	705.7	568.3
	2055s	290.8	235.9	187.5	152.0	127.9	110.0	89.1		2055s	1789.9	1462.0	1202.6	1005.2	872.0	770.0	632.1
	2085s	178.1	120.3	95.2	77.3	64.1	56.7	45.5		2085s	2243.9	1731.8	1181.1	1059.1	909.4	792.0	643.0
Samga	1995s	436.4	441.4	405.1	336.3	299.1	275.2	244.4	Baekyong	1995s	664.8	679.4	655.5	571.8	479.6	415.1	372.9
	2025s	476.1	483.5	400.2	341.0	289.8	250.1	200.4		2025s	474.3	499.4	406.7	353.9	310.0	275.4	224.3
	2055s	669.4	616.9	521.3	437.5	378.9	337.5	287.2		2055s	506.0	508.0	447.5	385.1	339.4	302.6	251.3
	2085s	693.0	748.5	644.1	589.8	554.9	511.3	411.7		2085s	662.7	615.6	438.7	407.5	355.1	311.9	255.9
Jipyung	1995s	446.1	418.8	339.0	279.4	244.1	212.5	187.3	Daedong	1995s	740.6	780.0	695.3	666.7	622.2	552.4	502.1
	2025s	696.2	582.1	490.4	410.6	354.0	305.7	237.8		2025s	645.6	742.6	596.9	498.7	431.3	377.5	310.6
	2055s	561.3	489.1	407.5	343.5	289.6	255.7	231.0		2055s	844.7	895.5	708.5	593.5	498.8	432.5	345.8
	2085s	504.6	480.5	426.8	375.3	331.9	298.3	250.0		2085s	1041.7	1071.5	907.4	755.9	649.8	575.6	454.6
Sooyang	1995s	836.0	848.6	810.4	702.6	587.7	508.1	455.9		1995s							
	2025s	605.6	623.2	504.2	437.1	382.1	339.0	275.5		2025s							
	2055s	644.0	633.5	553.1	474.5	417.3	371.5	307.9		2055s							
	2085s	833.4	762.6	542.5	501.4	436.2	382.6	313.5		2085s							

* 1995s: 1981~2010, 2025s: 2011~2040, 2055s: 2041~2070, 2085s: 2071~2100

강우량을 기반으로 200년 빈도 확률강우량을 산정하였다. 미래 기상자료가 3시간 단위로 제공되기 때문에 강우지속시간 3시간, 6시간, 9시간, 12시간, 15시간, 18시간, 그리고 24시간에 대하여 각각 확률강우량을 산정하였으며 그 결과는 Table 3과 같다. 확률강우량은 관측소 및 지속시간별로 다양한 경향을 나타냈으며 광주관측소를 제외한 모든 관측소에서 현재 (1995s)에 비해 미래 (2025s, 2055s, 2085s)에 더 큰 값을 가지는 것으로 분석되었다. 시기별 확률강우량의 증가 경향을 분석하기 위해 모든 관측소에 대한 확률강우량의 평균값을 시기별로 도시하여 Fig. 4에 나타내었다. 이를 살펴보면 미래에 확률강우량이 일정한 증가 추세를 보이지는 않지만 모든 관측소에서 2085s에 가장 큰 값을 가지는 것으로 나타났다. 청주관측소 2055s의 경우 2041년에서 2070년 사이에 청주지역에 비교적 큰 강우가 발생하지 않아서 상대적으로 작은 확률강우량을 나타냈다.

Table 4는 대상저수지의 200년 빈도 설계홍수량 산정 결과를 나타내고 있다. 확률강우량과 마찬가지로 강우지속시간 3시간, 6시간, 9시간, 12시간, 15시간, 18시간 그리고 24시간에 대하여 각각 홍수량을 산정하였다. 설계홍수량은 기존에 발표된 연구 보고서 등에 수록된 결과와 비교해 대체로 크게 산정되었다. 이

는 『설계홍수량 산정요령』에서 제안하는 연속형 Kraven 공식으로 산정한 도달시간이 기존 보고서에서 적용된 다른 공식으로 산정한 도달시간에 비해 작은 값을 나타냈으며, 『설계홍수량 산정요령』에 제시된 CN 값이 기존의 보고서에서 사용한 CN 값보다 큰 값을 나타냈기 때문인 것으로 사료된다. 미래 강우량 및 미래 설계홍수량은 일정한 증가 추세를 나타내지는 않았으나, 대부분의 지역에서 현재 (1995s)에 비해 미래 확률강우량 및 설계홍수량의 최댓값이 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 백곡저수지의 경우 2055s에서 상대적으로 작은 설계홍수량을 기록했는데, 이는 대상관측소인 청주관측소의 2055s에서의 확률강우량이 작은 값을 가지기 때문인 것으로 사료된다. 지속시간별로 분석된 설계홍수량 중 시기별 가장 큰 값을 추출하여 시계열 자료를 구축한 후 저수지 모의운영의 유입량 자료로 사용하였다.

2. 저수지 모의 운영

저수지별 200년 빈도 홍수유입량을 적용하여 저수지 모의 운영을 실시하였다. 구축된 자료를 바탕으로 시기별로 독 높이기 전후 각 저수지의 제원 및 목표수위를 적용하여 모의를 실시하

Table 5 Peak runoff o a 200-year frequency based on RCP 4.5 scenario

Reservoir		Peak runoff (m ³ /s)				Reservoir		Peak runoff (m ³ /s)			
		1995s	2025s	2055s	2085s			1995s	2025s	2055s	2085s
Bangye	Inflow	456.0	257.1	332.6	429.3	Jangsung	Inflow	2444.1	1812.7	1918.1	2437.1
	Outflow (before)	396.2	223.2	290.1	373.7		Outflow (before)	1252.6	1148.9	1166.4	1255.0
	Outflow (after)	327.2	103.9	191.8	300.7		Outflow (after)	1214.3	1080.9	1102.1	1212.8
Tapjung	Inflow	1255.1	1187.8	2042.2	1304.3	Naju	Inflow	1803.3	1289.7	1375.1	1797.5
	Outflow (before)	1254.2	1186.7	1702.9	1303.3		Outflow (before)	1088.4	1020.8	1030.7	1087.5
	Outflow (after)	1194.1	1180.0	1611.9	1209.4		Outflow (after)	641.5	566.3	578.0	640.6
Baegkok	Inflow	1556.1	2138.0	663.5	2359.1	Gwangju	Inflow	959.2	713.9	754.9	956.5
	Outflow (before)	1545.2	2043.4	662.1	2166.4		Outflow (before)	381.5	255.0	275.6	380.1
	Outflow (after)	1350.0	1823.1	662.1	1998.1		Outflow (after)	643.3	552.4	565.8	642.2
Jangchan	Inflow	111.2	127.1	183.5	178.1	Damyang	Inflow	2250.1	1697.3	1789.9	2243.9
	Outflow (before)	68.4	81.0	127.3	122.8		Outflow (before)	448.4	313.9	335.6	446.9
	Outflow (after)	0.0	0.0	0.0	0.0		Outflow (after)	318.3	238.2	250.6	317.3
Samga	Inflow	436.4	476.1	669.4	693.0	Baekyong	Inflow	664.8	474.3	506.0	662.7
	Outflow (before)	370.3	405.4	575.4	595.9		Outflow (before)	498.6	334.9	361.1	496.7
	Outflow (after)	202.1	251.2	471.3	495.5		Outflow (after)	362.3	179.1	208.8	360.3
Jipyung	Inflow	446.1	696.2	561.3	504.6	Daedong	Inflow	740.6	645.6	844.7	1041.7
	Outflow (before)	343.6	561.3	444.1	394.4		Outflow (before)	443.5	376.9	516.9	662.8
	Outflow (after)	212.3	450.9	325.3	268.5		Outflow (after)	436.0	364.8	514.0	667.8
Sooyang	Inflow	836.0	605.6	644.0	833.4						
	Outflow (before)	443.3	292.1	317.7	441.5						
	Outflow (after)	629.2	558.9	567.2	628.2						

* 1995s: 1981~2010, 2025s: 2011~2040, 2055s: 2041~2070, 2085s: 2071~2100

Fig. 5 Computed hydrographs for the Bangye reservoir based on RCP 4.5 scenario (Han_river)

*1995s: 1981~2010, 2025s: 2011~2040, 2055s: 2041~2070, 2085s: 2071~2100

Fig. 6 Computed hydrographs for the Jangchan reservoir based on RCP 4.5 scenario (Geum_river)

*1995s: 1981~2010, 2025s: 2011~2040, 2055s: 2041~2070, 2085s: 2071~2100

Fig. 7 Computed hydrographs for the Jipyung reservoir based on RCP 4.5 scenario (Nakdong_river)

*1995s: 1981~2010, 2025s: 2011~2040, 2055s: 2041~2070, 2085s: 2071~2100

Fig. 8 Computed hydrographs for the the Sooyang reservoir based on RCP 4.5 scenario (Yongsan_river)

*1995s: 1981~2010, 2025s: 2011~2040, 2055s: 2041~2070, 2085s: 2071~2100

였고, 저수지별 유입 및 유출곡선을 산정하여 침투유입량, 최대 방류량, 총유입량, 총저류량 등을 추출하였다. Table 5는 각 저수지별 침투유입량과 뚝 높이기 전/후 침투방류량을 나타내고 있고, Fig. 5~Fig. 8은 수계별 저수지 1곳의 유입, 유출 수문곡선을 나타내고 있다.

Fig. 9 Average flood control ratio for a 200-year frequency based on RCP 4.5 scenario

*1995s: 1981~2010, 2025s: 2011~2040, 2055s: 2041~2070, 2085s: 2071~2100

Table 5를 살펴보면 수양저수지와 광주저수지를 제외한 모든 저수지에서 뚝 높이기 사업 이후 침투방류량의 크기가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 수양저수지와 광주저수지의 경우 뚝 높이기 사업을 시행하면서 수문을 추가 건설하였기 때문에 방류능력이 사업 이전에 비해 증대되어 침투방류량이 증가하는 것으로 나타났으며, Fig. 8에서 뚝 높이기 사업 전/후 수양저수지의 방류곡선을 확인할 수 있다. 대동저수지의 경우에도 마찬가지로 수문이 추가로 건설되었으나, 그 규모가 크지 않아 수양저수지와 광주저수지처럼 침투방류량이 크게 증가하지는 않는 것으로 나타났다. 또한 장찬저수지의 경우 뚝 높이기 사업으로 추가 확보된 홍수조절공간이 다른 지역에 비해 작은 크기의 홍수량을 모두 수용하는 것으로 분석되어, Fig. 6에서와 같이 뚝 높이기 사업 이후에는 200년 빈도 홍수량 유입시 방류량이 없는 것으로 나타났다.

3. 홍수조절효과 변화 분석

저수지 모의운영 결과를 토대로 홍수조절률을 산정하였고, Fig. 9와 Table 6에 결과를 나타내었다. 평균 홍수조절률은 뚝 높이기 이전 32.6 %, 이후 44.2 %로 11.6 % 증가하였고, 1995s에

Table 6 Control ratio changes of the study reservoirs before and after reservoir rehabilitation

Reservoir	Period	Control ratio (%)		Reservoir	Period	Control ratio (%)		Reservoir	Period	Control ratio (%)		Reservoir	Period	Control ratio (%)	
		Before	After			Before	After			Before	After			Before	After
Bangye	1995s	13.1	28.2	Jangsung	1995s	48.8	50.3	Samga	1995s	15.2	53.7	Baekyong	1995s	25.0	45.5
	2025s	13.2	59.6		2025s	36.6	40.4		2025s	14.8	47.2		2025s	29.4	62.2
	2055s	12.8	42.3		2055s	39.2	42.5		2055s	14.0	29.6		2055s	28.6	58.7
	2085s	12.9	30.0		2085s	48.5	50.2		2085s	14.0	28.5		2085s	25.1	45.6
	Average	13.0	40.0		Average	43.3	45.9		Average	14.5	39.8		Average	27.0	53.0
Tapijung	1995s	0.1	4.9	Naju	1995s	39.6	64.4	Jipyung	1995s	23.0	52.4	Daedong	1995s	40.1	41.1
	2025s	0.1	0.7		2025s	20.9	56.1		2025s	19.4	35.2		2025s	41.6	43.5
	2055s	16.6	21.1		2055s	25.0	58.0		2055s	20.9	42.1		2055s	38.8	39.2
	2085s	0.1	7.3		2085s	39.5	64.4		2085s	21.8	46.8		2085s	36.4	35.9
	Average	4.2	8.5		Average	31.3	60.7		Average	21.3	44.1		Average	39.2	39.9
Baekgok	1995s	0.7	13.2	Gwangju	1995s	60.2	32.9	Sooyang	1995s	47.0	24.7	Average	1995s	33.2	45.9
	2025s	4.4	14.7		2025s	64.3	22.6		2025s	51.8	7.7		2025s	31.9	44.3
	2055s	0.2	0.2		2055s	63.5	25.0		2055s	50.7	11.9		2055s	32.5	42.8
	2085s	8.2	15.3		2085s	60.3	32.9		2085s	47.0	24.6		2085s	32.7	43.6
	Average	3.4	10.9		Average	62.1	28.4		Average	49.1	17.2		Average	32.6	44.2
Jangchan	1995s	38.5	100.0	Damyang	1995s	80.1	85.9								
	2025s	36.2	100.0		2025s	81.5	86.0								
	2055s	30.6	100.0		2055s	81.2	86.0								
	2085s	31.0	100.0		2085s	80.1	85.9								
	Average	34.1	100.0		Average	80.7	85.9								

* 1995s: 1981~2010, 2025s: 2011~2040, 2055s: 2041~2070, 2085s: 2071~2100

서 뚝 높이기 이전 33.2 %, 이후 45.9 %로 12.7 % 증가, 2025s에서 뚝 높이기 이전 31.9 %, 이후 44.3 %로 12.4 % 증가, 2055s에서 뚝 높이기 이전 32.5 %, 이후 42.8 %로 10.3 % 증가, 2085s에서 뚝 높이기 이전 32.7 %, 이후 44.2 %로 10.9 % 증가하였다. Table 6을 살펴보면 수문이 새롭게 설치된 수양저수지와 광주저수지를 제외하고는 모든 저수지에서 뚝 높이기 사업 이후 홍수조절률이 증가함을 확인할 수 있으며, 장찬 저수지의 경우는 뚝 높이기 사업 이후 200년 빈도 홍수량 유입 시 유출이 발생하지 않아 홍수조절률이 100 %로 나타났다. 뚝 높이기 사업으로 인한 홍수조절률의 증가는 시기별로는 큰 차이를 보이지 않았다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 뚝 높이기 저수지 중 13개의 저수지에 대하여 과거 및 미래 강우량을 통해 산정한 200년 빈도 홍수량이 유입되었을 때 뚝 높이기 전후의 저수지 모의 운영을 실시하였고, 이를 바탕으로 홍수조절률을 통해 뚝 높이기 사업에 따른 저수지의 홍수조절효과를 분석하였다.

1. 저수지별, 시기별로 강우지속시간 3시간, 6시간, 9시간, 12시간, 15시간, 18시간 그리고 24시간에 대하여 각각 200년 빈도 확률강우량과 설계홍수량을 산정한 결과, 미래 강우량 및 미래 설계홍수량은 일정한 증가 추세를 나타내지는 않았으나 대부분의 지역에서 현재 (1995s)에 비해 미래 확률강우량 및 설계홍수량의 최댓값이 크게 나타나는 것으로 분석되었다.

2. 저수지별 200년 빈도 홍수유입량을 바탕으로, 시기별 뚝 높이기 전후 각 저수지의 제원을 적용하여 저수지 모의 운영을 실시한 결과, 수양저수지와 광주저수지를 제외한 모든 저수지에서 뚝 높이기 사업 이후 침투방류량의 크기가 작아지는 것으로 나타났다. 수양저수지와 광주저수지의 경우 뚝 높이기 사업을 시행하면서 수문을 추가 건설하였기 때문에 방류능력이 사업 이전에 비해 증대되어 침투방류량이 증가하는 것으로 나타났다.

3. 저수지 모의운영 결과를 토대로 홍수조절률을 산정한 결과, 평균값은 뚝 높이기 이전 32.6 %, 이후 44.2 %로 11.6 % 증가하였고, 1995s에서 뚝 높이기 이전 33.2 %, 이후 45.9 %로 12.7 % 증가, 2025s에서 뚝 높이기 이전 31.9 %, 이후 44.3 %로 12.4 % 증가, 2055s에서 뚝 높이기 이전 32.5 %, 이후 42.8 %로 10.3 % 증가, 2085s에서 뚝 높이기 이전 32.7 %, 이후 44.2 %로 10.9 % 증가하였으며, 시기별로는 큰 차이를 보이지 않았다.

본 연구의 결과 뚝 높이기 사업으로 대상저수지의 홍수조절 능력은 대부분 상승하는 것으로 분석되었다. 하지만 홍수조절률은 유입수문곡선과 유출수문곡선의 침투값만을 고려해 계산하기

때문에 홍수조절률 하나의 지표만으로는 저수지의 홍수조절능력을 정확히 설명할 수 없어 추가적으로 여러 지표를 활용해 저수지의 홍수조절효과를 분석할 필요성이 있는 것으로 사료된다. 또한 초기수위를 낮게 조절해 홍수조절용량을 과도하게 확보할 경우 농업용수 및 환경유지용수 공급의 측면에서 문제가 발생할 수 있다. 따라서 평시와 홍수기의 제한수위를 다르게 운영하는 등 용수공급, 홍수방어 등을 종합적으로 고려한 저수지 운영방안이 필수적으로 마련되어야 할 것이며, 본 연구의 결과는 이러한 운영방안 수립의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

이 논문은 2013년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2012R1A1A2009313).

REFERENCES

1. Choi, S. A., C. S. Yi, M. P. Shim, and H. S. Kim, 2007. Analysis of economic effectiveness for flood control of dam. *Journal of Korea Water Resources Association* 40(5): 383-396 (in Korean).
2. Hwang, S. H., M. S. Kang, J. H. Kim, J. H. Song, S. M. Jun, S. H. Lee, and J. Y. Choi, 2012. Assessment of flood impact on downstream of reservoir group at Hwangryong river watershed. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(3): 103-111 (in Korean).
3. IPCC, 2007. *Climate Change 2007: Impacts, adaption and vulnerability*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
4. Kim, H. D., K. Y. Lee, I. K. Jung, K. W. Jung, and J. W. Kwon, 2011. The classification of dam heightening reservoir using factor and cluster analysis. *KCID (Korean National Committee on Irrigation and Drainage) Journal* 18(2): 66-75 (in Korean).
5. Ko, A. R., and H. S. Lee, 2011. Estimation of the reservoirs flood attenuation index in upper Geumgang catchment. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 11(5): 273-280 (in Korean).
6. Korea Rural Community Corporation (KRC), 2010. Annual statistics report of agricultural infrastructure project (in Korean).
7. Kwun, S. K., K. Y. Han, S. D. Choi, and H. J. Choi,

2003. Evaluation of flood control capacity for Seongju dam against extreme floods. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 45(6): 109-118 (in Korean).
8. Ministry of Construction & Transportation, 2000. Research report of the development of water resources management approach (in Korean).
9. Ministry of Construction & Transportation, 2012. The methods of calculating design flood (in Korean).
10. National Emergency Management Agency, 2012. Annual report of disaster, pp. 880-930, Korea.
11. Noh, J. K., 2010. Affecting water supply capacity followed by allocating flood control volume in heightening reservoir. *KCID (Korean National Committee on Irrigation and Drainage) Journal* 17(2): 57-70 (in Korean).
12. Park, J. H., M. S. Kang, and I. H. Song, 2012, Bias correction of RCP-based future extreme precipitation using a quantile mapping method; For 20-weather stations of South Korea. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(6): 133-142 (in Korean).
13. U. S. Army Corps of Engineers (USACE), 1998. HEC-5, Simulation of flood control and conservation systems user's manual version 8.0.
14. Yoo, S. H., S. H. Lee, J. Y. Choi, and T. S. Park, 2012. Optimizing Rules for Releasing Environmental Water in Enlarged Agricultural Reservoirs. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(5): 17-24 (in Korean).