



A study on the feasibility analysis of the current flood season: a case study of the Yongdam Dam

Lee, Jae Hwang^a · Kim, Gi Joo^b · Kim, Young-Oh^{c*}

^aPh.D Student, Department of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

^bPostdoctoral Scholar, Department of Civil & Environmental Engineering, Tufts University, Medford, MA, USA

^cProfessor, Department of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

Paper number: 23-073

Received: 4 October 2023; Revised: 6 May 2024; Accepted: 13 May 2024

Abstract

Korea prepares for potential floods by designating June 21st to September 20th as the flood season. However, many dams in Korea have suffered from extreme floods caused by different climate patterns, as in the case of the longest consecutive rain of 54 days in the 2020's flood season. In this context, various studies have tried to develop novel methodologies to reduce flood damage, but no study has ever dealt with the validity of the current statutory flood season thus far. This study first checked the validity of the current flood season through the observation data in the 21st century and proved that the current flood season does not consider the effects of increasing precipitation trends and the changing regional rainfall characteristics. In order to deal with these limitations, this study suggested seven new alternative flood seasons in the research area. The rigid reservoir operation method (ROM) was used for reservoir simulation, and the long short-term memory (LSTM) model was used to derive predicted inflow. Finally, all alternatives were evaluated based on whether if they exceeded the design discharge of the dam and the design flood of the river. As a result, the floods in the shifted period were reduced by 0.068% and 0.33% in terms of frequency and duration, and the magnitude also decreased by 24.6%, respectively. During this period, the second evaluation method also demonstrated that flood decreased from four to two occurrences. As the result of this study, the authors expect a formal reassessment of the flood season to take place, which will ultimately lead to the preemptive flood response to changing precipitation patterns.

Keywords: Flood season, Climate change, Reservoir operation method, Flood control

현행 법정홍수기 타당성 검토 및 개선에 관한 연구: 용담댐 사례

이재황^a · 김기주^b · 김영오^{c*}

^a서울대학교 공과대학 건설환경공학부 박사과정, ^bTufts University 건설환경공학부 박사후연구원, ^c서울대학교 공과대학 건설환경공학부 교수

요지

한국은 6월 21일부터 9월 20일까지를 법정홍수기로 지정하여 잠재적 홍수에 대비하여왔다. 하지만 2020년 54일의 역대 최장 장마 사례와 같이 과거와 다른 기후상으로 인한 극한 홍수로 피해를 겪고 있다. 그동안 홍수 피해 저감을 위한 연구는 매우 많았지만, 법정홍수기가 앞으로도 유효할지에 대한 연구는 시도된 적이 없었다. 따라서 본 연구는 21세기 관측 자료를 통해 현행 법정홍수기의 타당성을 통계적으로 검토하였으며, 이를 통해 현행 법정홍수기가 강수량 증가 추세와 지역별 강수 특성의 강화를 고려하지 못하고 있음을 확인하였다. 이러한 한계점의 해결을 위해 본 연구에서는 대상 유역에 대한 7개의 새로운 홍수기 후보군을 제안하였고, 이의 타당성을 모의 운영을 통해 분석하였다. 모의 운영 시 댐 운영을 rigid operation method를, 댐 유입량 예측에는 long short-term memory model을 적용하였다. 제안한 홍수기 각 후보는 댐의 계획방류량과 하천의 계획홍수량을 초과하느냐를 기준으로 평가하였다. 첫 번째 기준으로 평가한 결과, 본 연구에서 제안한 홍수기 적용 시 초과 빈도와 지속시간이 각각 0.068%와 0.33% 감소되었으며, 크기 또한 24.6% 감소하였다. 두 번째 평가 기준으로 평가한 결과 역시, 홍수피해 발생 구간이 기존의 4회에서 2회로 감소하였다. 본 연구 결과를 계기로 법정홍수기 재검토가 공식적으로 이루어져 새로운 양상으로 변화하고 있는 강우 양상에 적극적으로 대비하길 기대한다.

핵심용어: 법정홍수기, 기후변화, 저수지 운영, 홍수 조절

*Corresponding Author. Tel: +82-2-880-8916
E-mail: yokim05@snu.ac.kr (Kim, Young-Oh)

1. 서론

대한민국은 여름철 강수량 평년값이 연강수량의 약 55%에서 64%에 달하는 독특한 강수 패턴을 보인다. 또한 여름철 강수는 짧은 시간에 국지적으로 내리는 경우가 많아 돌발홍수를 야기하는 주요 원인이 된다. 이러한 기후특성을 고려하여 6월 21일부터 9월 20일까지를 ‘법정홍수기’라는 기간으로 지정하여 댐 운영을 달리함으로써 홍수에 대비하여 왔다(K-water, 2015). 그러나 21세기 들어서도 전국적으로 막대한 홍수 피해를 겪고 있는데(KMA, 2011a; Cha, 2006), 2002년 태풍 ‘루사’에 의한 일 최대 강우와 2020년 최장 장마일수 기록에 의한 피해가 대표적 사례이다(MOPAS, 2020).

이에 이상기후로 인한 홍수기 강수 특성의 변화에 대한 연구가 활발히 이어지고 있다. Lee *et al.* (2011)은 최근 10년의 홍수기 강수량 증가가 86.7 mm로 매우 높다는 것을 보였으며, 그 중 7월의 강수강도가 크게 증가함을 확인함으로써, Ko *et al.* (2005)에서 보인 7월 하순부터 8월 초순의 강수량이 21세기에 크게 증가하는 경향을 뒷받침하였다. Ha *et al.* (2007)은 이러한 7월과 8월 강수량의 증가의 원인이 기상학적으로 북태평양 고기압의 위치가 서쪽으로 확장한 현상에 기인함을 증명하였고, Park *et al.* (2008)은 60개의 기상관측소에 대하여 시·공간적으로 분석한 결과 장마 및 장마 후 강수기간 모두 최근 10년의 강수량이 크게 증가하였고 홍수기 강수량의 증가 특성이 지점별로 달라졌음을 확인하였다.

한편 이상강수 특성을 고려한 홍수기 댐 운영에 관한 연구를 살펴보면, 대표적인 사례로 Sim *et al.* (1995)이 홍수기 가변제한수위의 적용을 제안하였지만 한정된 저수용량에서의 제한수위 조절은 기후변화의 불확실성이 커지는 현재의 상황을 고려하였을 때 이수 측면에서 불리하다는 한계점을 극복하지 못하였다. 또한 Kang *et al.* (2015)은 기존 댐의 홍수조절용량의 부족에 대한 연구를 진행하였으며, 댐 홍수조절을 위한

목표수위를 유입 대비 저류체적비를 활용하여 개선한 연구도 진행되었다(Kwak, 2021).

이상강수나 홍수기 댐 운영 연구에도 불구하고 법정홍수기 그 자체의 타당성과 효용성 검토에 대한 연구는 거의 없었다. 법정홍수기는 1974년 「소양강댐 관리규정」에서 최초로 명시된 것으로 파악되고 있기에, 50년 가까이 지난 현재 재평가가 필요한 시점임에는 틀림없다. 왜냐하면 그동안 수십 년에 걸친 자료가 축적되었음은 물론이고 21세기 들어 기후 자체가 변화하고 있다고 많은 전문가들이 우려하고 있기 때문이다.

따라서 본 연구의 궁극적인 목적은 대상 유역에 새로운 홍수기를 제안하는 것이다. 이를 위해서 첫 번째로 21세기 관측 자료를 활용하여 현행 법정홍수기의 한계점을 파악하고자 한다. 즉, 기후변화로 인한 강수량 추세와 현 법정홍수기가 홍수 대비에 고려하지 못한 한계점을 확인하는 단계이다. 이후 두 번째로 대상 유역에 새로운 홍수기 후보군을 문헌조사 및 전문가 자문 그리고 통계 분석을 통해 제안하고자 한다. 마지막으로 저수지 운영 모의 및 홍수조절능력 평가를 통해 대상 유역에 가장 적합한 새로운 홍수기를 최종적으로 선정하고자 한다.

2. 현행 법정홍수기

법정홍수기는 홍수피해가 발생할 가능성이 있는 6월 21일부터 9월 20일까지로 정의되는데(K-water, 2015) 이 시기에는 댐 제한수위를 상시만수위(Normal High Water Level, NHWL)에서 홍수기제한수위(Restricted Water Level, RWL)로 낮추어 운영하며 이러한 제한수위와 계획홍수위(Flood Water Level, FWL) 사이의 용량을 홍수조절용량으로 활용한다. 즉, Fig. 1의 점선과 같이 추가적으로 확보한 홍수조절용량을 활용하여 홍수에 대비한다.

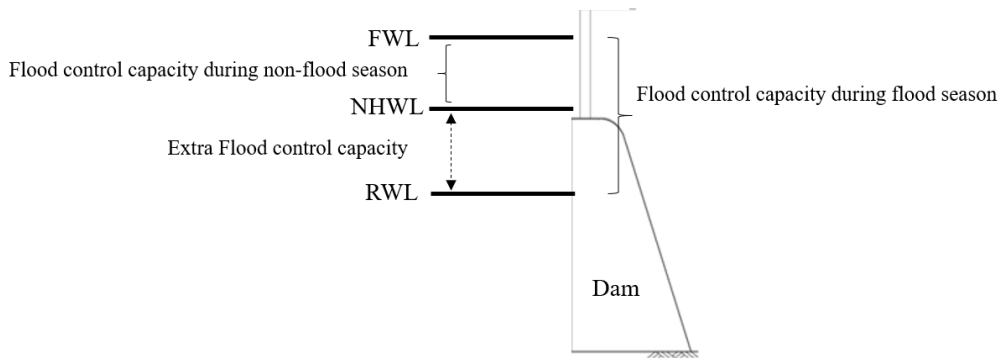


Fig. 1. Dam flood control capacity

또한, 홍수기에는 홍수조절용량을 이용하여 댐에 유입되는 홍수량의 전부 또는 일부를 저류시켜 방류량을 최소화하는 홍수조절이 다른 용도에 우선한다. 다만 발전의 경우 연간 및 월간 댐 운영 계획에 따라 발전을 실시하되, 상시발전은 지속할 수 있게 운영된다. 이외의 부분은 댐 관리자가 변동되는 수문상황에 대해 탄력적인 판단을 통해 댐의 수위를 적정하게 유지해야 한다. 이 때 고려 요소로는 댐의 상류와 하류의 기상 및 수문자료, 댐 상류 수위 및 강수량 등의 수문자료, 그리고 홍수 수문분석 검토 결과 등이 있다(K-water, 2015).

본 장에서는 현행 법정홍수기의 관련 문헌이 미흡하고 선형 연구가 거의 없다는 점을 감안하여 제정 방법론에 대해 유추를 진행하였으며, 20세기와 21세기의 홍수기 연 누적 강수량의 통계량 변화를 통해 한계점을 검토하였다.

2.1 현행 법정홍수기 제정 방법론

현행 법정홍수기 제정 방법론을 유추하기 위해 주로 문헌 조사와 전문가 인터뷰를 활용하였다. 참고한 문헌으로는 K-water (2015, 2019), ME (2018) 등이 있다. 이 문헌들에서의 핵심 내용은 홍수 피해가 발생할 가능성이 있는 기간이라는 것과 피해 분석에 기상 및 수문자료를 활용한다는 것을 명시하고 있었다. 또한 기상학적으로 대한민국의 홍수는 여름철 북태평양 고기압의 영향에 따른 장마와 폭우를 동반하는 태풍으로 인한 집중호우로 인해 발생한다는 점이다. 전문가 인터뷰를 통해서 ‘평년값을 기준으로 장마 시작 시점부터 태풍의 종료 시점으로 정했을 것’과 ‘이러한 기간이 방재업무 매뉴얼을 기준으로 1970년 이전에 제정되었을 것’ 등을 들을 수 있었다. 앞선 문헌 조사와 전문가 인터뷰를 근거로 현행 법정홍수기의 시작은 장마 전선의 국내 진입 시점이며, 종료는 국내에 영향을 미치는 마지막 태풍의 소멸 시점으로 유추할 수 있었다.

유추한 결과를 정량적으로 검증하기 위해 과거 자료 분석을 실시하였는데, 시작 시점의 경우 1961년부터 1973년까지의 장마전선의 국내진입 시점(KMA, 1995)을, 종료 시점의 경우 1941년부터 1970년까지 국내에 영향을 미친 마지막 태풍의 소멸 시점(KMA, 2011b)을 매년 확인하였다. 그 결과 장마의 시작은 6월 14일부터 7월 1일까지 2주 정도의 변동 폭을 가지고 있지만 그 평균은 6월 24일이었으며, 마지막 태풍은 8월 초에서 10월 중순까지 변동 폭이 더 컸지만 9월 중순임을 알 수 있었다. 현행 법정홍수기는 이 기간보다 길기 때문에 제정 당시 관측 자료로의 결과보다 더욱 보수적으로 설정하였음을 추론할 수 있었다.

2.2 현행 법정홍수기 한계점

본 장에서는 20세기와 21세기 홍수기 동안의 강수량의 통계량을 비교하였다. 강수량 전체 자료를 1971년부터 2000년까지와 2001년부터 2020년까지의 두 그룹으로 나누어 홍수기의 누적 강수량으로 비교를 진행하였으며, 기상청 기상자료개방포털의 강수량 자료를 이용하였다. 한반도 전체를 비교한 Fig. 2에서 직관적으로 알 수 있는 바와 같이 여러 가지 통계량이 21세기 들어 미세하게 증가하고 있음이 보이지만 변화의 가장 큰 특징은 box와 수염의 폭, 즉 편차가 커졌다는 점이다. 세부적으로는 중앙값의 경우 650.7 mm에서 737.5 mm로 86.8 mm의 증가를 보였으며, 하위 1분위와 상위 3분위의 값 역시 21세기가 20세기에 비해 각각 13.3 mm와 141.1 mm 만큼 증가하였다.

홍수기의 누적 강수량을 국내 18개의 다목적댐에 대해 각각 분석한 결과를 Fig. 3에 도시하였다. 전체적으로는 보령댐을 제외하고 21세기에 모두 증가하는 결과를 나타내었는데, 특히 주암댐 유역에서는 400 mm가 증가한 반면 보령댐은 약 80 mm가 감소하여 지역별 강수량 변화의 차이가 크다는 점을 확인하였다.

다음으로, 시각적으로 확인한 추세를 통계적으로 검증해 보고자 가설검정을 실시하였다. 다목적댐 강수량 전체 자료를 앞과 유사하게 1973년부터 2000년까지의 20세기 그룹과 2001년부터 2020년까지의 21세기 그룹으로 나누어 홍수기 누적 강수량에 대해서 분석하였다. 검정의 귀무가설은 $\mu_0 = \mu_1$ 으로 여기서 μ_0 은 20세기 홍수기 누적 강수량의 평균이며, μ_1 은 21세기 홍수기 누적 강수량의 평균이다.

가설검정을 진행하기 위해서 가정조건인 성립을 확인하였다. 각 댐의 데이터는 모두 독립성을 만족하였고, 정규성은 Shapiro-Wilk 테스트와 QQ-plot을 이용하였으며, 등분산성의 경우 F-test를 통해 확인하였다. 군위댐을 제외한 17개의

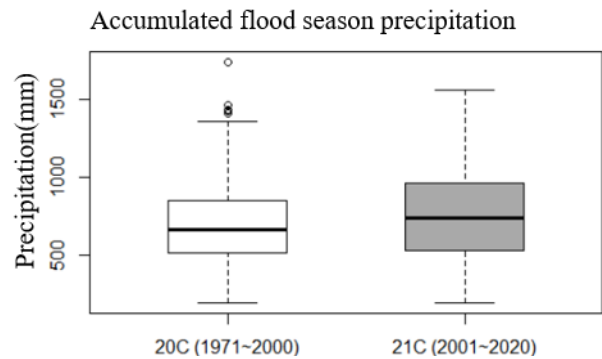


Fig. 2. Accumulated flood season precipitation between 20th and 21st centuries for the South Korean peninsula

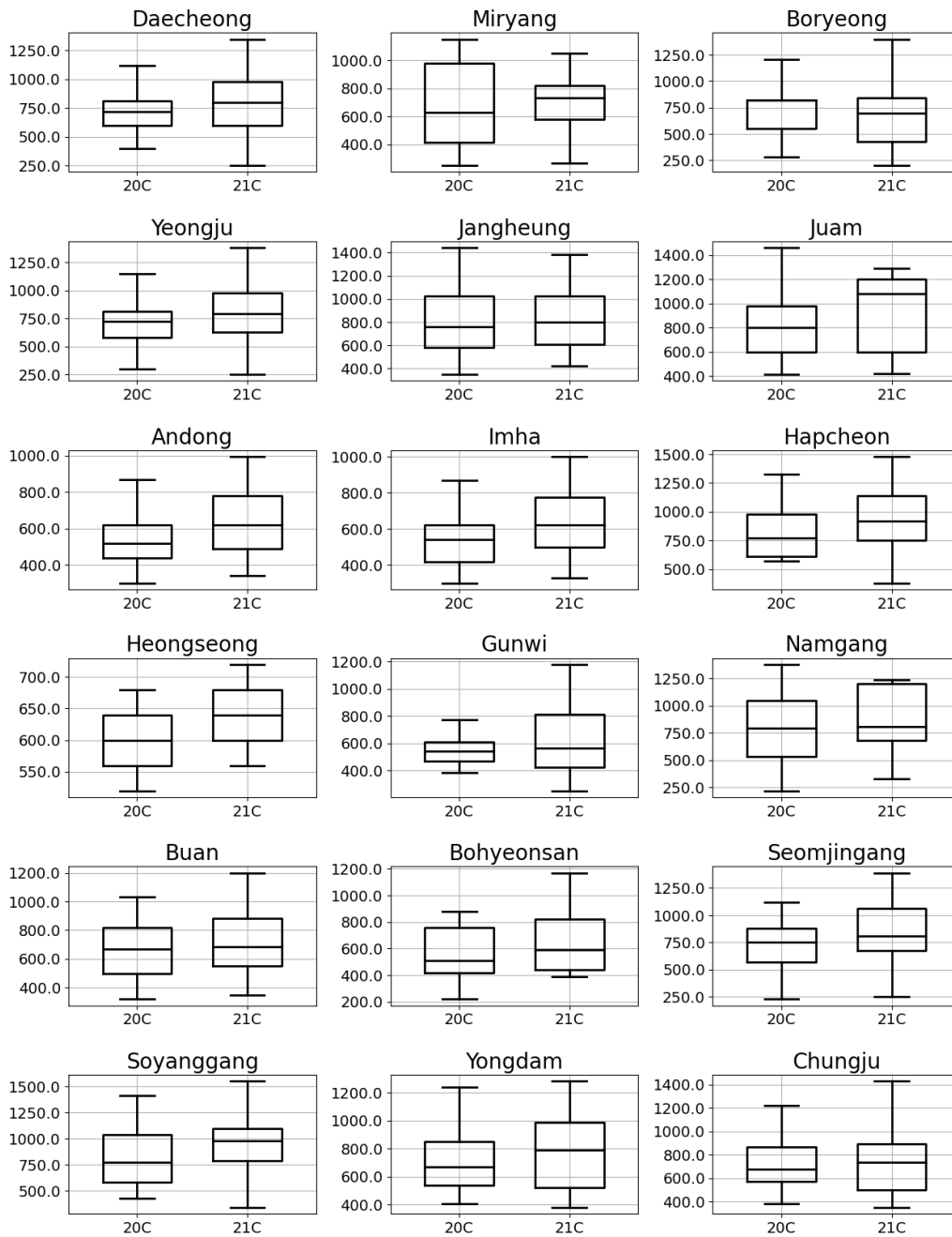


Fig. 3. Accumulated flood season precipitation between 20th and 21st centuries for 18 multipurpose dams sites in Korea

다목적댐이 모두 독립표본 t 검정 사용 가정조건을 충족하여 17개의 댐에 대해서 t 검정을 실시하였다. 사용된 검정통계량 계산식은 Eq.(1)과 같다.

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{S}{\sqrt{n}}} \quad (1)$$

여기서 \bar{X} 는 유역별 20세기와 21세기 홍수기 누적 강수량 차이의 평균을, μ 는 모집단의 평균을, n 은 표본의 수, 그리고 S 는 두 집단 차이의 표준편차를 나타낸다. 가설검정의 결과로 나온 p-value의 순위를 매겨 Table 1에 나타내었다. P-value를 확인하면, 섬진강댐과 같은 경우는 0.038로 두 기간 사이에 큰 변화를 보이는 것을 확인할 수 있지만, 반면 대청댐의 경우 0.3으로 변화가 없다고 볼 수 있다. 유의수준을 어떻게 설정하

느냐에 따라 가설검정의 결정이 다르게 날 수 있기에, 유의수준 10%에서 통계적으로 유의한 변화를 보이는 댐 유역은 5개 미만이라 할 수 있다. 하지만, Table 1은 물론 Fig. 3에서 알 수 있듯이 댐 유역별 강수 변화의 공간적 차이가 크다는 것을 확인할 수 있었다.

Table 1. Ranks based on the p-value of the hypothesis test for the average change between 20th and 21st centuries

Rank	Dam	Null hypothesis p-value
1	Seomjingang	0.038
2	Hapcheon	0.059
3	Bohyeonsan	0.083
4	Soyanggang	0.096
5	Andong, Imha	0.101
7	Yongdam	0.130
8	Juam	0.133
9	Buan	0.138
10	Yeongju	0.144
11	Namgang	0.200
12	Jangheung	0.206
13	Hoengseong	0.215
14	Boryeong	0.221
15	Chungju	0.281
16	Miryang	0.289
17	Daecheong	0.300

3. 새로운 법정홍수기 제안, 모의 및 평가

3.1 새로운 법정홍수기 제안

새로운 법정홍수기 제안을 위해 2.1절에서 실시한 장마 시작 시점과 마지막 태풍 시점에 대한 분석을 최근 30년, 즉 1991년부터 2020년까지의 자료로 실시하였다. 그 결과 시작은 5일 앞당겨지는 반면 종료는 10일 늦춰짐을 확인하였다. 따라서 현행법정홍수기(이하 with0)에 장마와 태풍의 시점의 통계량 변화를 고려하여 홍수기 기간의 증가인 extension과 기간의 이동인 shift의 방법으로 새로운 홍수기 후보군을 제안하였다.

현행 법정홍수기에 15일의 변화를 준 6월 16일부터 9월 30일을 첫 후보로 제안하였으며, 이를 EX1(6월 16일부터 9월 30일)으로 명명하였다. 또한 홍수 저감 효과는 종료 시점에 더 민감할 것이라는 자문 의견을 반영하여 태풍의 변화량인 10일을 기준으로 가장 큰 차이를 볼 수 있는 1일, 5일, 10일을 확장시킨 기간을 제안하였고, 이름을 각각 EX2(6월 21일부터 9월 21일), EX3(6월 21일부터 9월 25일), EX4(6월 21일부터 9월 30일)로 명명하였다. 마지막으로 시작 시점을 포함하여 극단적으로 최대한 확장시킨 EX5(6월 1일부터 9월 30일)도 포함하였다. 장마전선 진입 기간의 통계량 변화만을 고려하여 길이의 변화 없이 기간을 이동만 시킨 후보를 SH1(6월 16일부터 9월 15일)으로 명명하였으며, 태풍 시점의 변화만을 이동한 후보 SH2(7월 1일부터 9월 30일)도 포함하였다. 앞선 방법으로 제안한 총 7개의 홍수기 후보군을 Fig. 4에 나타냈다.

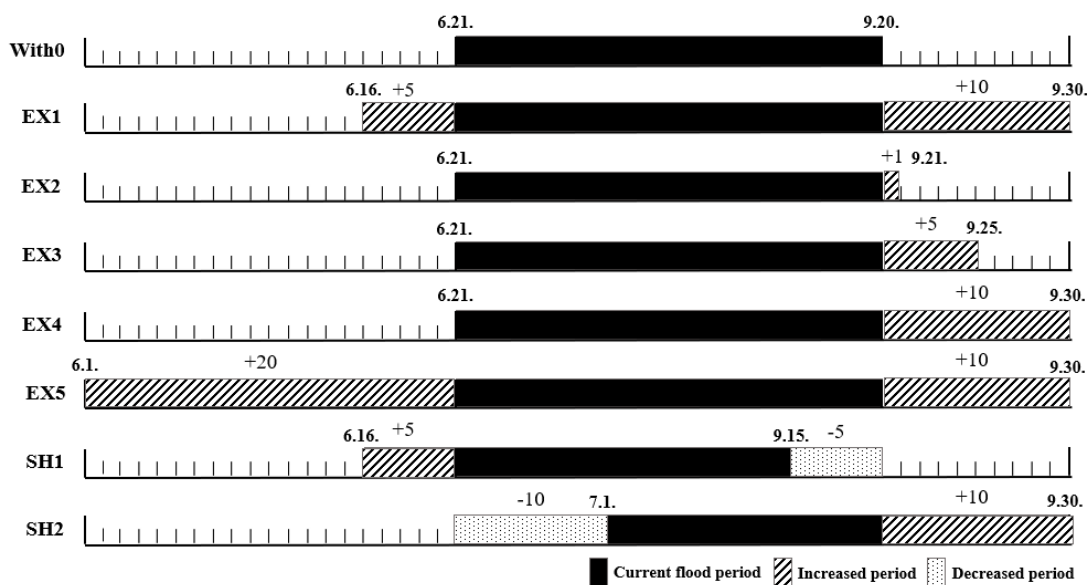


Fig. 4. The current flood season (With0) and seven alternative flood season candidates proposed in this study (EX1-5, SH1-2)

3.2 모의 운영률

3.1절에서 제안한 7개의 홍수기 후보들을 댐 운영에 적용하여 평가하기 위해서는 댐의 방류량 계산이 필요하다. 국내에서 홍수기 기간 동안의 댐 운영은 댐 관리규정에서 정하고 있는 저수지 운영 방식(reservoir operation method, ROM)에 의하여 시행되는데 auto ROM, spillway rule curve (SRC) ROM, technical ROM, 그리고 rigid ROM 모의 기법으로 널리 사용되어 왔다. 본 연구에서는 실무에서 홍수 조절 시 가장 빈번하게 사용되고 있는 rigid ROM을 채택하여 모의를 진행하였다.

Rigid ROM은 일정률-일정량 방식의 저수지 운영 기법이다. 수문조작 당시의 유입량 관측치, 예측유입량, 저수위 등을 고려하여 방류량을 결정하는 방법이다. 홍수 조절을 위한 경우, 예측한 유입수문곡선의 유입량이 최대에 도달할 때까지는 일정률로 방류를 하고, 최대유입량 도달 이후부터는 일정량을 방류한다. 이 기법의 홍수조절용량의 식은 Eq. (2)와 같다.

$$V(t) = (1 - \alpha) \int_{t_0}^{t_p} I(t) dt + \int_{t_0}^{t_e} I(t) dt - I(t_e)(t_e - t_p) \quad (2)$$

위의 식에서 $V(t)$ 는 홍수예측 시점에서의 홍수조절용량이고 $I(t)$ 는 t 시점에서의 유입량이다. t_0 는 홍수예측시점, t_p 는 최대 홍수량 유입시점, t_e 는 홍수유입량과 방류량이 일치되는 시점이며 α 는 유입량과 방류량의 비율이다. 유입량이 예측된 최대유입량에 도달할 때까지는 방류량의 유입량에 대한 비율 α 이 되도록 방류하는 방식이며 이는 위의 식을 통해 값을 도출할 수 있고 이를 그래프로 나타내면 Fig. 5과 같다.

본 연구에서는 댐관리규정 등의 규정과 안동댐, 용담댐, 대청댐, 그리고 보현산댐 등의 국내 다목적댐의 세부 수문조작 방법을 참조하여 다음 순서와 같이 댐 방류량을 모의하였다.

- ① 댐 운영 시 전제조건은 댐의 기본적인 운영률을 적용한다.
- ② 제한수위(홍수기의 경우 홍수기제한수위, 갈수기의 경우 상시만수위) 이하에서는 발전, 용수공급량을 제외한 전량 저수한다.
- ③ 제한수위 이상이고, 계획홍수위 이하에서는 유입량의 크기에 따라 다르게 운영한다. 유입량이 무피해방류량 이하인 경우 유입량만큼 방류를 진행하고, 유입량이 무피해방류량 이상이고 계획방류량 이하이면 Rigid ROM을 통해서 방류량을 결정하며, 마지막으로 유입량이 계획방류량 이상에서는 계획방류량만큼 방류를 진행한다.
- ④ 수위가 계획홍수위 이상으로 갈 경우 댐의 방류능력에서 가능한 최대 방류를 진행한다.

Rigid ROM을 적용하기 위해서는 입력 자료로 예측 유입량이 필요하다. 본 연구에서는 예측 유입량의 값을 도출하기 위해서 딥러닝 기반의 long short-term memory (LSTM)을 사용하였다. LSTM은 Hochreiter and Schmidhuber (1997)이 제시한 모델로, 딥러닝에서 시계열 데이터 예측에 가장 많이 사용되는 recurrent neural network (RNN)의 장기의존성 문제를 해결하여 제시한 기법이다.

본 연구에서는 2001년부터 2020년까지의 시 단위 관측 유입량과 강수량을 입력 자료로 이용하였으며, MyWater와 국가수자원정보시스템에서 각각 수집하였다. 가용한 자료를 세 그룹으로 구분하였으며, 각각 학습(train)을 2001년부터 2016년까지, 보정(validation)을 2017년부터 2019년까지, 그리고 검증(test)은 역사적인 홍수가 발생한 2020년 자료로 사용하였다. 본 연구에서 구축한 모형은 구글에서 제공하는 오픈소스 소프트웨어 라이브러리 텐서플로우와 파이썬 언어를 통하여 생성하였다.

선행시간에 대한 예측 유입량을 선정하기 이전에 모델의 정확도 향상을 위해 모델의 보정을 선행하였다. 보정의 경우 전처리 과정, 입력 자료와 하이퍼파라미터(hyperparameter)의 변화를 통해서 진행하였다. 입력 자료의 경우 두 가지 경우로 나누어 비교하였는데, Model 1의 경우 유량의 자기상관성을 반영하기 위해 관측 유입량을 입력 자료로 사용하여 예측을 한 모델이며, Model 2의 경우 선행 강수로 인한 토양수분을 고려하기 위해 Model 1에 관측 강수량을 추가하였다(Mok *et al.*, 2020). 이를 식으로 나타내면 각각 Eq. (3)과 Eq. (4)와 같다.

$$\text{Model 1: } \hat{Q}(t+l) = f[Q(t), Q(t-1), \dots, Q(t-r)] \quad (3)$$

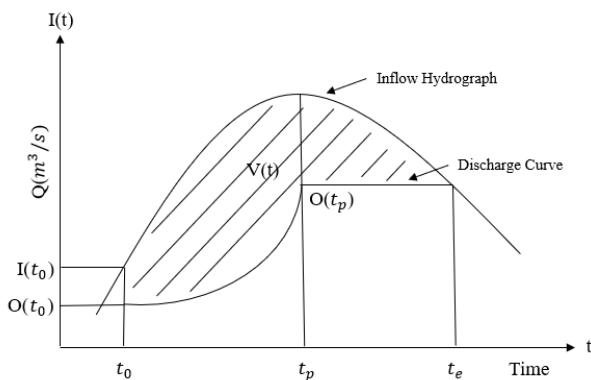


Fig. 5. Graphical illustration for rigid ROM

$$\text{Model 2: } \hat{Q}(t+l) = f[Q(t), Q(t-1), \dots, Q(t-r); R(t), R(t-1), \dots, R(t-r)] \quad (4)$$

여기서 t 는 현재 시점을, l 은 선행예측시간을, 그리고 r 은 시퀀스 길이를 의미한다. Q_t 는 t 시점에서의 관측 유입량이며, $R(t)$ 의 경우 t 시점에서의 관측 강수량을 의미한다. 이후 정규화를 통한 전처리도 진행하였다.

또한 모델의 정확도 향상을 위해 하이퍼파라미터 중 시퀀스 길이의 변화를 통해 보정하였다. 시퀀스 길이는 홍수 사상의 평균값인 7시간을 적용한 Model 1-1과 Model 2-1, 중앙값인 15시간을 적용한 Model 1-2와 Model 2-2, 그리고 최대값인 24시간을 적용한 Model 1-3과 Model 2-3으로 나누었다..

기존의 1시간 간격으로 예측유입량 산정 방식과는 다르게, 선행예측시간의 경우 댐 방류 승인에 이르기까지 최소 시간과 대상 유역의 홍수 사상의 평균 시간 등을 고려하여 3시간, 7시간, 그리고 12시간으로 지정하였다. 이에 대한 평가 지표로는 모형 정확도의 정량화가 가능하고, 계통오차와 우연오차를 모두 고려할 수 있는 relative root mean square error (rRMSE)와 계통오차만을 확인할 수 있는 relative bias (rbias)를 적용했다. rRMSE를 네 구간으로 나누어 선행예측시간에 대하여 평가한 결과는 Table 2와 같으며, 각 선행예측시간과 입력 자료에서 가장 낮은 rbias를 비교한 결과는 Fig. 6과 같다.

결과적으로 입력 자료가 관측 유입량인 Model 1의 선행예측시간이 7시간이며 시퀀스 길이가 7시간인 모델을 선정하여 예측 유입량을 도출하였다.

3.3 평가 방법

Hashimoto *et al.* (1982)은 신뢰도(reliability)와, 시스템에서 불만족이 발생하였을 때 얼마나 빨리 복구를 하는가를 복원도(resiliency), 그리고 시스템에 발생한 불만족의 크기가 어느 정도인가를 취약도(vulnerability)로 나누어 수자원시스템의 거동을 평가한 바 있다. 이를 바탕으로 Kim *et al.* (2019)은 Hashimoto *et al.* (1982)이 제안한 신뢰도, 복원도, 취약도를 보다 이해하기 쉽게 실패의 빈도(frequency), 지속시간(duration), 그리고 양적 크기(magnitude, 이하 크기)라는 세 지표로 갈수기의 용수 공급을 평가하였다. 본 연구에서는 이를 하류 피해에 적용하여 고려하였는데 두 가지 기준으로 나누어 평가를 진행하였다.

첫 번째는 댐의 무피해방류량과 계획방류량을 기준으로 적용하여 평가하였다. 빈도는 전체 기간 동안 계획방류량을 초과한 횟수를 비율(%)로 나타내었고, 지속시간 또한 계획방류량을 기준으로 평균적으로 한 번 초과할 때 지속되는 초과시간을 나타내었으며, 크기는 무피해방류량을 기준으로 기준을 초과하여 방류한 경우 평균 기준 대비 방류량을 비율(%)

Table 2. rRMSE of tested LSTM models according to the forecasting lead time

	Model 1-1	Model 1-2	Model 1-3	Model 2-1	Model 2-2	Model 2-3
T+3	Good	Good	Good	Good	Good	Good
T+7	Good	Good	Good	Good	Good	Good
T+12	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	Poor

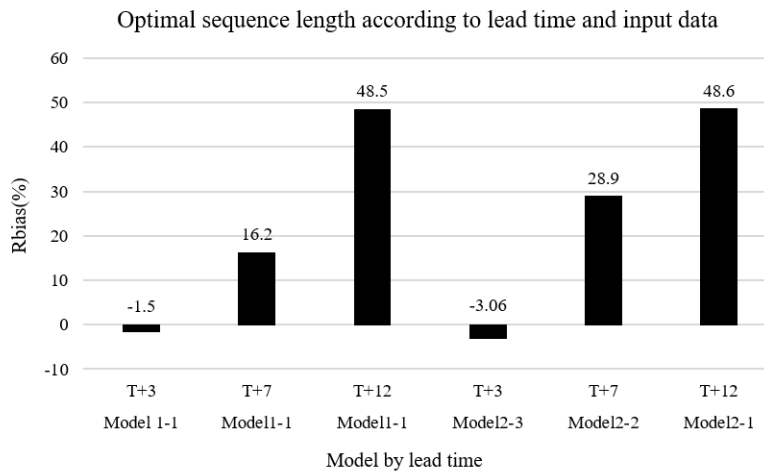


Fig. 6. rbias values of tested LSTM models

Table 3. Formulas of frequency, duration, and magnitude metrics

Number	Performance index	Definition	Classification
1	Average exceed frequency	$F = \frac{\sum_{t=1}^T X_t \in F}{T} \times 100(\%)$	Frequency
2	Average exceed duration	$D = \frac{\sum_{t=1}^T X_t \in F}{\sum_{t=1}^T X_t \in F \text{ and } X_{t+1} \in S} (hr)$	Duration
3	Average exceed magnitude	$M = \frac{\sum_{t=1}^T \max(0, D_t - N)}{N \times \sum_{t=1}^T X_t \in F} \times 100(\%)$	Magnitude

로 나타내었다. 이를 수식으로 나타내면 Table 3과 같다.

두 번째는 K-water에서 실무에 적용하고 있는 평가 방법으로, 기준은 하천의 계획홍수량과 200년 빈도의 댐 계획방류량이다. 이는 댐에서 홍수조절한 후의 방류량을 하천의 계획홍수량과 댐 계획방류량을 기준으로 안전(safe), 홍수피해 발생(flood), 그리고 재난발생(disaster)의 세 가지 지표로 나누어 평가하는 방식이다. 이때의 기본 가정은 제방축조, 재내지 배수시설 등의 하천 정비 계획대로 정비가 되어 있어 댐에서 하천 계획홍수량 규모 방류에도 피해가 발생하지 않아야 하며, 댐 지점 기본홍수량을 댐에서 홍수조절을 할 수 있는 조건에 부합해야 한다.

4. 적용 및 결과

4.1 대상 유역 선정 기준 및 개요

본 연구에서는 댐 유역별 기후변화의 정도, rigid ROM 적용 여부, 홍수기제한수위 적용 여부, 하천의 상류에 위치한 댐의 네 가지 대상 유역 선정 기준을 고려하여 최종적으로 본 연구에서는 금강 수계의 용담댐을 대상 유역으로 선정하였다. 용담댐은 1990년에 착공하여 2001년에 준공된 총 저수량 8억 1500만 t의 콘크리트 차수벽형 석괴댐이다. 홍수 시 1억3천7백만 t의 물을 저류함으로써 금강 중·하류 지역의 홍수피해 경감을 시키는 홍수조절 역할을 하며, 전주·익산 등 전북지역에 연간 4억9천3백만 t의 용수를 공급하며, 친환경 무공해 전기 생산 등의 발전 사업도 진행중인 다목적댐이다. 용담댐은 홍수기제한수위, 상시만수위, 그리고 계획홍수위의 저수용량이 각각 695.8백만 m³, 762.6백만 m³, 그리고 833.3백만 m³이다. 또한 시 단위로 환산하였을 때의 계획방류량은 11.56백만 m³/hr이고, 무피해방류량은 1.08백만 m³/hr이다.

4.2 평가 결과

본 연구에서는 시작 시점의 변화에 따른 영향과 종료 시점

의 변화에 따른 영향의 두 그룹으로 나누어 현행 법정홍수기와 제한한 홍수기 후보군의 홍수 저감 효과를 비교하고 평가하였다. 평가에는 3.3절에서 언급한 두 가지 기준을 이용하였다.

먼저 시작 시점의 변화에 따른 영향 평가를 진행하였다. 비교에 사용된 후보군은 종료 시점이 9월 30일로 동일하고 시작 시점이 다른 EX1(6/16-9/30), EX4(6/21-9/30), EX5(6/1-9/30), SH2(7/1-9/30)이다. 첫 번째 평가 방법의 결과와 같다. 빈도와 지속 시간 지표의 경우 네 개의 후보군이 동일한 결과를 보였으며, 크기 역시 SH2(7/1-9/30)를 제외한 다른 후보군들은 모두 동일한 결과를 보였다. 두 번째 평가 기준에서도 네 후보군 모두 홍수 피해 발생 구간이 2회로 앞선 결과와 동일한 추세를 보였다. 이를 통해 자문 의견과 동일하게 시작 시점의 변화는 홍수 대비에 대한 영향이 미미하다는 것으로 판단되며 이는 홍수 시작 시점 이전에 저류할 수 있는 물의 용량이 충분하기 때문이라고 해석된다.

다음으로 종료 시점의 변화에 따른 영향 평가이며 이 때 사용된 후보군은 시작 시점에 따라 두 그룹으로 나누어 비교하였다. 각각 6월 21일을 시작 시점으로 하는 With0(6/21-9/20), EX2(6/21-9/21), EX3(6/21-9/25), EX4(6/21-9/30)와 6월 16일을 시작 시점으로 하는 EX1(6/16-9/30), SH1(6/16-9/15)이다. Fig. 7과 Fig. 8는 앞선 두 그룹의 세 가지 지표에 대한 결과를 나타낸 그래프이다.

빈도의 경우 With0(6/21-9/20) 대비 종료 시점의 기간을 1일 늘린 EX2(6/21-9/21)의 빈도의 결과 값이 약 0.03% 감소하였고, 종료 시점의 기간을 각각 5일과 10일 늘린 EX3(6/21-9/25)와 EX4(6/21-9/30)의 경우 약 0.07% 감소하였다. 이는 빈도가 반으로 감소한 것으로, 계획방류량 만큼 방류하는 홍수의 횟수가 크게 줄어들었다 해석된다. With0(6/21-9/20)에 비해 EX3(6/21-9/25)와 EX4(6/21-9/30)의 값이 각각 8.0%와 5.6% 증가함을 확인할 수 있다. 이 결과를 통해 빈도가 줄어들면 평균적인 홍수의 크기는 증가한다고 해석할 수 있어 두 지표가 trade-off 관계임을 확인하였다. 두 번째 평가 기준의 결과 역시 각 후보군의 홍수 피해 발생 구간 해당 횟수가 각각

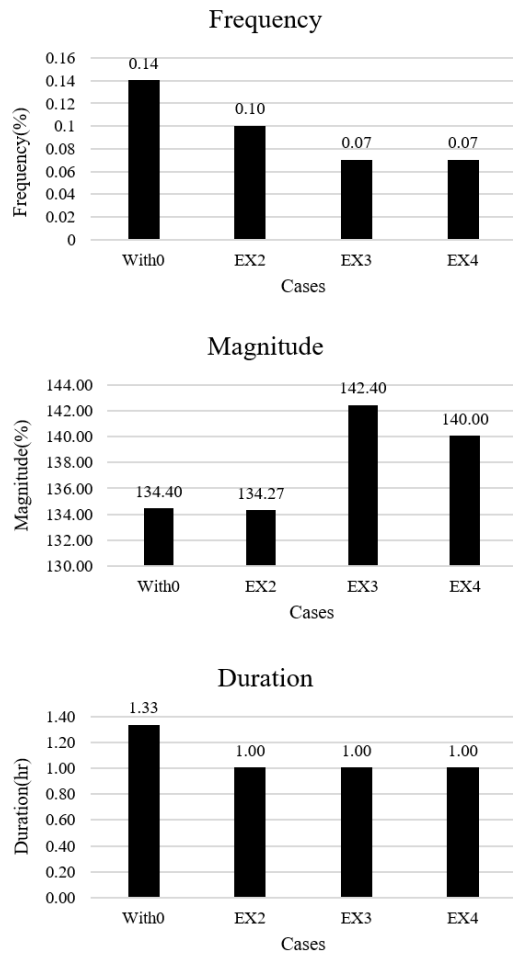


Fig. 7. Assessment of tested flood season period candidates which share the beginning date of June 21st (I)

With0(6/21-9/20) 4회, EX2(6/21-9/21) 3회, EX3(6/21-9/25) 2회, EX4(6/21-9/30) 2회로 앞선 결과와 동일한 추세를 보임을 확인하였다.

두 번째 그룹 역시 빈도에서 종료 시점을 늘린 EX1(6/16-9/30)이 SH1(6/16-9/15)에 비해 0.07% 감소하였고, 반대로 크기의 경우 5.4% 증가하였다. 두 번째 평가 기준의 결과 또한 EX1(6/16-9/30) 2회, SH1(6/16-9/15) 4회로 종료 시점 증가로 인한 홍수 피해 발생 횟수 감소 경향을 보였다.

이는 종료 시점의 변화가 큰 홍수 대비 능력을 증가시키는 것으로 해석된다. 하지만 EX3(6/21-9/25)와 EX4(6/21-9/30)의 경우 차이가 없는 것으로 보아 특정 일수 이상으로 기간을 증가시키는 경우 큰 홍수 대비 능력의 증가가 되지 않는 것으로 나타난다. 크기 지표의 경우에는 With0(6/21-9/20)에 비해 EX3(6/21-9/25)와 EX4(6/21-9/30)의 값이 각각 8.0%와 5.6% 증가하는 것으로 무피해방류량 이상의 작은 홍수에 대한 대비

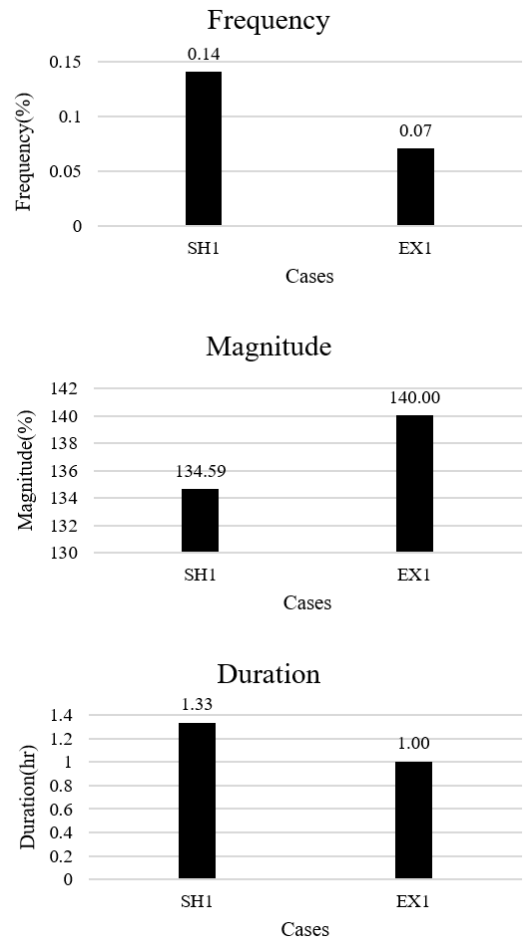


Fig. 8. Assessment of tested flood season period candidates which share the ending date of September 20th (II)

능력이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

최종적으로 앞선 첫 번째 평가 기준의 크기, 빈도, 그리고 지속 시간과 두 번째 평가 기준의 홍수 피해 발생 구간의 빈도에 대해서 제한한 각 홍수기의 결과를 최종적으로 비교하였다(Fig. 9). 각 지표에 대해서 결과 값을 0에서 1사이의 값으로 스케일링 하여 비교하였으며, 이를 각각 크기는 R^{Mag} , 빈도는 $R^{Freq-design}$, 지속시간은 R^{Dur} , 홍수 피해 발생 구간의 빈도는 $R^{Freq-K-water}$ 으로 나타냈다. 각 지표에서의 홍수 대비에 효과적인 공동을 포함한 상위 3개의 기간을 선정하면 R^{Mag} 의 경우 SH1(6/16-9/15), SH2(7/1-9/30), EX2(6/21-9/21)이며, $R^{Freq-design}$ 의 경우 EX1(6/16-9/30), EX3(6/21-9/25), EX4(6/21-9/30), EX5(6/1-9/30), SH2(7/1-9/30)이다. R^{Dur} 의 경우는 EX1(6/16-9/30), EX2(6/21-9/21), EX3(6/21-9/25), EX4(6/21-9/30), EX5(6/1-9/30), SH2(7/1-9/30)이며, $R^{Freq-K-water}$ 의 경우에는 EX1(6/16-9/30), EX3(6/21-9/25), EX4(6/21-9/30), EX5

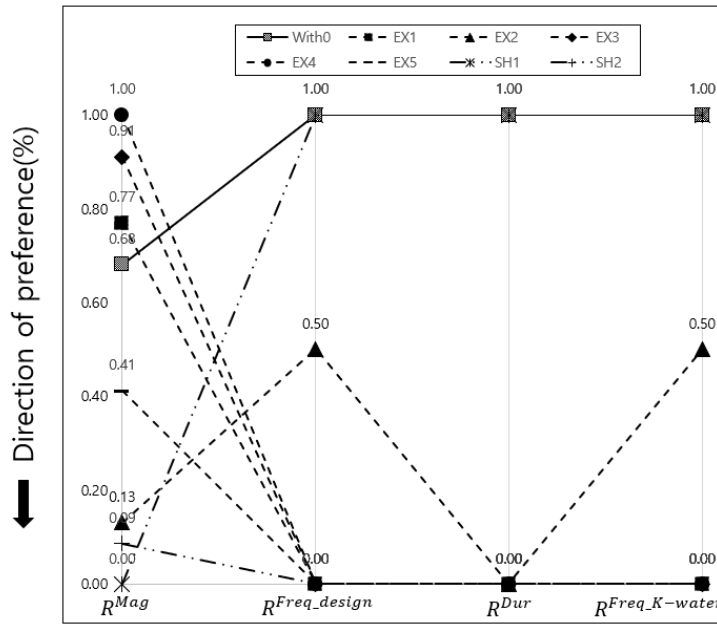


Fig. 9. Comparison by case using four indicators of two evaluation standards

(6/1-9/30), SH2(7/1-9/30)이다. 이를 통해 최종적으로 본 연구는 모든 지표에서 상위 3개의 기간에 해당하는 SH2(7/1-9/30)를 대상 유역인 용담댐의 새로운 홍수기 후보로 제안한다.

5. 요약 및 결론

본 연구는 대상 유역으로 선정된 용담댐의 새로운 홍수기의 제안을 궁극적인 목표로 진행하였다. 우선 현행 법정홍수기의 관련 연구가 미흡한 점을 고려하여 통계를 활용하여 한계점을 파악하고, 문헌 조사와 전문가 인터뷰를 통하여 제정 방법론을 유추하였다. 이후 유추한 결과와 자문 의견을 통해 extension과 shift 방법으로 7개의 대상 유역에 대한 새로운 홍수기 후보군을 제안하였다. 각 홍수기의 홍수저감 효과를 확인하기 위해서 rigid ROM을 활용한 모의 방법으로 방류량 도출을 진행하였고, 이때 입력 자료로 필요한 예측 유입량의 경우 덤러닝 모델인 LSTM을 활용하여 도출하였다. 모의 결과로 얻은 각 홍수기에서의 방류량을 본 연구에서는 하루 피해에 대해 빈도, 크기, 그리고 지속시간에 대해서로 다른 기준의 두 가지 평가 방법을 통해 얻은 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 현행 법정홍수기의 제정 방법론에 관한 문헌이나 선행 연구가 미흡한 점을 고려하여 본 연구에서는 전문가인

터뷰와 문헌조사를 통해서 유추를 진행하였다. 유추 결과 현행 법정홍수기의 시작 시점은 장마전선의 국내 진입 시점을 근거로, 종료 시점은 국내에 영향을 미치는 마지막 태풍의 시점을 근거로 제정되었다고 유추하였다.

- ② 현행 법정홍수기 한계점 파악은 통계 기법을 통해 20세기와 21세기 자료의 비교로 진행하였다. 국내 전체의 홍수기 연누적 강수량은 20세기 대비 86.7 mm가 증가하였다. 또한 이를 18개의 다목적댐에 대해서 비교한 결과 전체적으로 증가 추세를 보임을 확인하였지만, 지역별 강수량 변화 차이가 상당히 컸다. 추가적으로 진행한 가설검정 결과를 통해 p-value의 범위가 0.3부터 0.038까지의 큰 차이를 보여 지역별 강수 특성이 강화되고 있음을 확인하였고, 현 홍수기가 이러한 두 변화를 고려하지 못한다고 판단되었다.
- ③ 본 연구에서는 하루 피해에 대한 평가에 빈도, 지속시간, 그리고 크기의 지표를 적용하여 댐의 계획방류량과 하천의 계획홍수량을 각각 고려한 기준이 다른 두 방법을 평가에 사용하였다. 시작 시점의 변화를 주었던 후보군 중 SH2(7/1-9/30)를 제외한 나머지의 결과가 두 평가 기준에서 동일하게 도출되었다. 유일하게 시작 시점을 늦춘 SH2(7/1-9/30)는 크기 지표에서의 결과가 낮아짐을 보였으며, 이는 홍수 시작 시점 이전의 저류 가능 용량이 충분하기 때문으로 해석된다. 반면 종료 시점의 변화에 따른 영향은 후보군 별 차이가 나타났다. 현 법

정홍수기에서 각각 5일과 10일을 증가시킨 EX3(6/21-9/25)와 EX4(6/21-9/30)의 경우 빈도와 지속시간 지표에서 0.068%와 0.33%만큼 감소하였으며, 두 번째 평가 기준 역시 홍수피해 발생 구간이 4회에서 2회로 감소하는 것으로 나타났다. 이는 종료 시점을 10일 늘린 SH2(7/1-9/30)와 EX5(6/1-9/30)에도 동일한 결과가 도출되었다. 이를 통해 종료 시점의 변화가 홍수 저감에 영향을 미치는 것으로 판단하였다. 최종적으로 후보군들의 두 평가 기준에 대한 결과를 스케일링하여 비교한 결과, 본 연구에서는 홍수 저감 효과가 가장 뛰어난 후보군 SH2(7/1-9/30)를 대상 유역인 용담댐의 새로운 홍수기로 제안하였다.

향후 연구로는 본 연구에서 제안한 7개의 홍수기 후보군 뿐 아니라 더욱 다양한 기간에 대한 평가를 통해 최적의 기간을 제안하고, 이를 본 연구의 대상 유역인 금강 수계의 용담댐에서 전국의 다목적댐으로 확장시켜 각 유역 별 적정 홍수기를 확인하고자 한다. 또한, 이수를 포함한 이·치수 측면에서의 효과를 모두 고려한다면 더욱 진일보된 법정홍수기 대안이 도출될 수 있을 것이다. 향후 본 연구를 계기로 향후 환경부에서 법정홍수기 개선 방법론의 공론화를 추진하여, 수문 자료가 상당히 축적된 댐부터 법정홍수기 업데이트가 기후적응의 일환으로 하나하나 이루어지길 기대한다.

감사의 글

본 연구는 한국수자원공사(K-water)의 개방형 혁신 R&D (20-D-W-005) 사업의 일환으로 수행되었습니다.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Cha, E.J. (2006). "The meaning of the rainy season." *Water and Future: Journal of the Korean Society of Water Resources*, Vol. 39, No. 7, pp. 69-72.
- Ha, K.J., Yun, K.S., and Lee, S.S. (2007). "August mode in precipitation and its association with circulations." *Proceedings of the Korea Meteorological Society Conference*, pp. 478-479.
- Hashimoto, T., Stedinger, J.R., and Loucks, D.P. (1982). "Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation." *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 1, pp. 14-20.
- Hochreiter, S., and Schmidhuber, J. (1997). "Long short-term memory." *Neural Computation*, Vol. 9, No. 8, pp. 1735-1780.
- Kang, T., Lee, S., and Kang, S. (2015). "A study for flood control of a dam using flood guide curves and release determination method in accordance with reservoir water level." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 6, pp. 129-136.
- Kim, G.J., Seo, S.B., and Kim, Y.O. (2019). "Elicitation of drought alternatives based on water policy council and the role of shared vision model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, No. 6, pp. 429-440.
- Ko, J.W., Baek, H.J., and Kwon, W.T. (2005). "The characteristics of precipitation and regionalization during rainy season in Korea." *Journal of the Korean Meteorological Society*, Vol. 41, pp. 101-114.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (1995). *Rainy season white paper*. Report 11-1360000-000085-14.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2011a). *Korea climate change white paper*. Report 11-1360000-000813-12.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2011b). *Typhoon white paper*. Report 11-1360016-000001-01.
- Korea Water Resources Corporation (K-water) (2015). *Dam management regulations*.
- Korea Water Resources Corporation (K-water) (2019). *Multi-purpose dam operation practical manual*.
- Kwak, J. (2021). "A study for the target water level of the dam for flood control." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 54, No. 7, pp. 545-552.
- Lee, K.M., Cho, C.H., and Kwon, W.T. (2011). "The recent (2001-2010) changes on temperature and precipitation related to normals (1971-2000) in the Republic of Korea." *Korean Geographical Society Conference Materials*, pp. 75-75.
- Ministry of Environment (ME) (2018). *Regulations on the coordination of dams and weirs*.
- Ministry of Public Administration and Security (MOPAS) (2020). *Disaster safety situation analysis results and disaster safety accidents subject to priority management*. Report 11-1741000-000002-10.
- Mok, J.Y., Choi, J.H., and Moon, Y.I. (2020). "Prediction of multi-purpose dam inflow using deep learning." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 53, No. 2, pp. 97-105.
- Park, C., Moon, J., Cha, E.J., Yun, W.T., and Choi, Y. (2008). "Recent changes in summer precipitation characteristics over South Korea." *Journal of the Korean Geographical Society*, Vol. 43, No. 3, pp. 324-336.
- Sim, M.P., Gwon, O.I., and Lee, H.G. (1995). "Reservoir operation by variable restricted water level during flood period." *Water for Future*, Vol. 28, No. 6, pp. 217-228.