J. Korea Water Resour. Assoc. Vol. 57, No. 4 (2024), pp. 249-261
doi: 10.3741/JKWRA.2024.57.4.249
pISSN 2799-8746
eISSN 2799-8754

A study for flood control method of Sumjingang Dam considering dam operation constraints

Lee, Yongtaek[a]* · Jung, Kwansue[b]

[a]Master's Course, Program in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea
[b]Professor, Department of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea

Paper number: 24-013
Received: 5 March 2024; Revised: 22 March 2024; Accepted: 22 March 2024

Abstract

Climate change has intensified the severity of extreme floods, presenting substantial challenges to dam management and operation. Traditionally, flood control strategies for dam operations have been based on theoretical scenarios, such as designed floods, without taking into account downstream conditions. However, in practice, managing floods involves operating dams based on climate forecasts. This strategy encounters challenges due to the limited predictability of climate forecasts, which in turn leads to uncertainty in decision-making among dam managers. This study proposes a flood control approach for dam operations that involves gradually increasing the outflow, considering the operational constraints and potential downstream damage, based on inflow data. The effectiveness of this method was assessed through simulation, employing both a designed flood and data from the most significant historical flood. The dam operation strategy for flood control presented in this study provides a framework for dam operators, facilitating consistent decision-making in flood management by integrating realistic dam operational conditions.

Keywords: Dam operation in flood season, flood control method, simulation of dam operation, Dam operation constraints

댐 운영 제약사항을 고려한 섬진강댐 홍수조절방식에 관한 연구

이용택[a]* · 정관수[b]

[a]충남대학교 토목공학과 석사과정, [b]충남대학교 토목공학과 교수

요 지

최근 기후변화로 인해 극한홍수가 증가하여 댐 운영에 큰 어려움으로 작용하고 있다. 그간 댐 설계 시 제시되는 홍수조절방식은 하류 상황에 대한 고려 없이 계획홍수량이라는 특정 홍수상황을 가정하여 수립된 것으로, 실제 상황에는 기상예보를 기반으로 저수지 모의운영을 통해 홍수조절을 실시한다. 하지만 기상예보의 불확실성과 댐 관리자마다 달라지는 의사결정 등 한계가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 섬진강댐에 대해 댐 유입량을 기준으로 댐 운영 제약사항을 고려한 단계적 방류량 증량을 실시하는 홍수조절방식을 제시하고, 계획홍수량 및 역대 최대홍수사상을 적용한 저수지 모의운영을 통해 효과를 평가하였다. 본 연구에서 제시한 홍수조절방식은 다양한 댐 운영자가 현실적 댐 운영 여건을 반영하여 일관성 있는 홍수조절 의사결정에 활용 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어: 홍수기 댐 운영, 홍수조절방식, 저수지 모의운영, 댐 운영 제약사항

***Corresponding Author.** Tel: +82-42-629-3127
E-mail: mcytaek@kwater.or.kr (Lee, Yongtaek)

© 2024 Korea Water Resources Association. All rights reserved.

1. 서 론

산업화 이후 지구온도 상승 등에 의한 기후변화 현상이 가속화됨에 따라 과거에 비해 홍수피해 위험성도 증가하고 있다. Fig. 1은 우리나라의 연도별 집중호우(50 mm/hr) 횟수 및 지역별 과거 대비 현재의 집중호우 횟수의 비율을 나타낸 것으로 최근 10년간(2010~2019년) 우리나라의 집중호우 사상(시간당 50 mm이상)은 1973년부터 2009년까지 발생한 횟수의 약 1.5배 증가 경향을 보이고 있으며, 일부 지역에서는 감소를 나타내지만, 전반적으로 과거 대비 0~2배 증가, 최대 6.4배의 집중호우 발생횟수 증가를 나타내고 있다(Kim *et al.*, 2020).

집중호우 빈도의 증가와 더불어 여름철 강우량도 과거에 비해 증가 경향이 뚜렷하게 나타나고 있다. 기상청에 따르면 1912~2017년의 가을철과 봄철의 강수량 증가 경향은 각각 +3.9 mm/10년, +1.9 mm/년으로 관측되었으며, 겨울철은 -0.9 mm/10년으로 증가 경향이 뚜렷하지 않지만, 여름철 강수량 증가 경향은 +11.6 mm/10년으로 관측되었다.

이러한 강우패턴의 변화는 기상예측 불확실성의 증가를 야기하였으며, 하천 홍수조절의 가장 중요한 수단인 댐 운영에도 영향을 미치고 있다.

국내 다목적댐의 건설 시 제시된 홍수조절방식은 통상적으로 댐의 설계빈도에 해당하는 홍수량 등 특정 홍수사상 유입을 가정하여, Fig. 2와 같이 댐 설계기준에 제시된 홍수조절기법 중 하나의 방식을 채택하여 수립되고 있다. 만수위 도달 시 수문을 완전 개방하는 Auto ROM (Automatic Reservoir Operation Method), 댐 수위가 계획홍수위에 도달하도록 방류량을 조정하는 Technical ROM (Technical Reservoir Operation Method), 댐 유입량의 일정 비율로 방류하다가, 첨두유량 도달 시 일정량으로 방류하는 Rigid ROM (Rigid Reservoir Operation Method), 댐 수위에 따라 미리 결정된 방류량으로 홍수조절을 하는 SRC ROM (Spillway Rule Curve Reservoir Operation Method) 등이 있다. 다만 댐 설계기준에 제시된 홍수조절방식은 홍수조절용량, 기준수위, 계획방류량 등 댐의 최적규모를 산정하기 위한 것으로 실제 댐의 홍수조절에서 활용하기에는 많은 현실적 제약이 있다.

댐 설계 시에는 댐 초기수위를 홍수기제한수위로 가정하고 댐 설계빈도 홍수유입 조건에서 홍수 조절을 하지만 실제 상황에서는 강우의 규모, 분포, 지속시간, 유출율, 댐 수위 등이 다양하게 발생하기 때문에 설계 시 제시된 홍수조절 방식을 획일적으로 적용하기에는 한계가 있다.

또한, 설계 시 홍수조절방식은 댐 방류에 따른 하류 하천 영향은 고려하지 않으나, 실제 상황에서는 하천의 홍수상황, 하도정비 상태, 제약사항 등을 종합적으로 고려한 의사결정이 필요하다. 실제 하천에서는 미완성 제방, 무제부 구간 등 다양

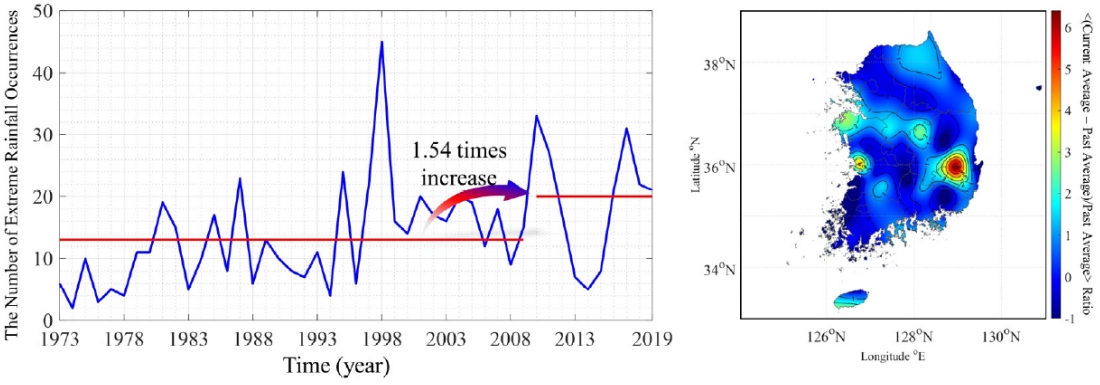

Fig. 1. Changes in the heavy rainfall (50 mm/hr) of domestic

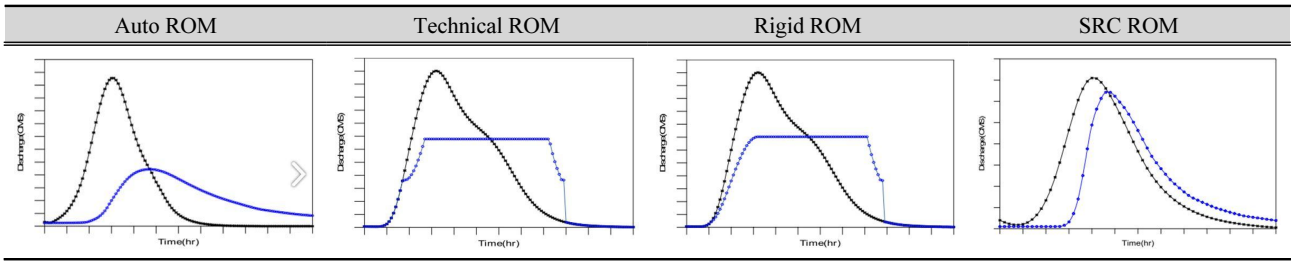

Fig. 2. Type of reservoir flood control method presented in Dam design standard

Table 1. A number of constraints on multipurpose Dam operation (K-water)

Total (ea)	Inundation vulnerable areas	Drainage facilities	Hindrance	Weak bank	Construction site	etc.
557	85	100	200	66	42	64

한 방류제약이 존재하기 때문에 하천의 홍수소통에 문제 없도록 방류제약 사항이 정비되기 전에 댐의 계획방류량까지 방류할 경우에는 하류지역의 홍수피해는 불가피한 실정이다. K-water에 따르면 전국 20개 다목적댐 하류에 존재하는 침수취약지역, 취양수시설, 미완성제방 등 방류 제약사항은 Table 1과 같이 총 557개소가 존치하는 것으로 조사되었다(K-water, 2023a).

한편, 실무에서는 설계 시 제시된 홍수조절 방식의 최대방류량(계획방류량) 이내에서 강우예보에 기반하여 지속적인 댐과 하천의 모의운영을 통해 탄력적으로 방류량 및 방류 일정을 결정하는 방식으로 댐을 운영하고 있다. 다만 이러한 방식은 상황에 따라 유연한 대응이 가능한 장점은 있으나, 기상예보의 불확실성을 감안할 때, 예보강우량과 실적강우 간 차이가 클 경우에 적정한 댐 수위 관리가 어렵다. 또한, 탄력적인 의사결정이 실시되는 만큼 댐 운영자마다 의사결정이 달라지는 한계도 존재한다. 이에 따라 기후변화 등 변화된 물관리 여건에 대응하기 위해 다양한 홍수조절방식에 대한 연구가 진행되고 있다.

Jung (2020)은 기후변화에 따른 엘니뇨 및 라니냐 발생기간의 기후변동성을 고려한 모형을 개발하고 대청댐의 미래 유입량을 모의·적용하여, 홍수기말 목표저수량을 충족할 수 있는 홍수기(6~9월) 댐 운영방안을 제안하였으나, 홍수기말 안정적인 저수량을 확보하는데 주안점을 두고 있다. 한편, 단기 홍수사상에 대해 안정적인 댐 홍수조절을 위한 방안도 활발히 연구되었다. Kang *et al*. (2014)는 남강댐을 대상으로 과거 주요 14개 홍수사상에 대해 홍수추적을 실시하여 안정적인 홍수조절을 위한 댐 상·하한 수위를 설정하고, 댐 수위가 상·하한 수위 범위 내에 있으면 현 방류를 유지, 하한수위 이하일 경우 방류 억제, 상한수위 이상일 경우 방류를 증가하는 방식을 제안하였다. 하지만 댐 수위에 의한 방류량 조절방식은 하류 하천 상황에 대한 고려 없이 홍수조절을 해야 하는 한계가 있다. 따라서 현재는 기후변화로 인한 예측 불가능한 기상예보와 하류의 하천 상황을 동시에 고려하면서, 댐을 관리하는 실무 현장에서 적용가능한 홍수조절 방식이 필요한 실정이다.

Kwak (2021)은 과거 댐의 유입량 방류량 계열에 빈도대응법을 적용하여 홍수피해가 없던 예년 수준으로 댐 홍수조절을 하기위한 홍수유입 대비 저류 체적비를 설정하고, 이에 따라 댐에 홍수 저류가 가능한 초기수위를 목표수위로 설정하는 방법을 연구하였다. 이러한 방식은 댐 관리자가 별도의 분석 없이 목표수위를 간단히 추정할 수 있으나, 기상예보와 예상강우량에 크게 의존하고 있어 실제 강수량이 예보와 다를 경우 댐의 효율적인 홍수조절이 어려워질 수 있다.

이에 본 연구에서는 댐 운영실무 여건을 감안하여 불확실한 기상 예보의 의존도를 최소화하고 댐 유입량을 기준으로 하류하천의 제약을 고려하며 단계적 방류량 증량을 실시하는 홍수조절방식을 제시하고자 한다. 대상유역은 섬진강댐으로 선정하였고, 저류함수모형인 COSFIM (cordinate operation system for flood control in multi-reservoir)으로 홍수분석모형을 구축하고, 댐 준공('65) 이후 유입량 시계열 자료를 분석하여 역대 최대홍수가 발생했던 '20.8월 홍수사상에 대해 모형의 성능평가를 실시하였다. 또한 계획홍수량 및 '20.8월 홍수유입사상에 본 연구에서 제시한 홍수조절방식에 적용하여 댐 영향분석을 실시하였다.

2. 연구방법

2.1. 대상유역

국내의 다목적댐 중 홍수대응에 구조적으로 취약하고, 과거 대규모 홍수피해가 발생했던 섬진강댐으로 선정하였다. 섬진강댐은 국내에서 가장 오래된 다목적댐으로, 구 댐인 운암댐은 1928년 관개용 댐으로 준공되었고, 1965년 신 댐이 준공되었다. 섬진강댐은 Fig. 3과 같이 본류 상류 지역인 임실군에 위치하고 있으며, 하류 하천은 제1 지류인 보성강과 합류하여 광양만으로 흘러 나간다. 유역면적은 763.0 km^2, 총저수용량 466백만 m^3, 홍수조절용량은 30.3백만 m^3이다. 댐 정상고는 EL.200.0 m, 계획홍수위는 EL.197.7 m, 홍수기제한수위는 EL.196.5 m, 저수위는 EL.163.0 m이다(K-water, 2023b). Table 2는 섬진강댐과 유역면적이 유사한 합천댐, 용담댐의 제원을 나타낸 것으로 섬진강댐은 100년 빈도 홍수에 대응토록 설계되어 있어 통상적으로 200년 빈도로 설계되는 다목적댐에 비해 홍수조절용량이 적다. 유역면적이 유사한 합천댐, 용담댐 홍수조절용량은 섬진강댐의 2배 이상이다.

댐의 홍수조절능력의 부족, 댐·하천의 설계빈도를 초과하는 집중호우 및 하천 정비 부족 등으로 인해 2020.8월 섬진강댐 하류 지역에 대규모 집중호우 피해가 발생하였다. 이후 개

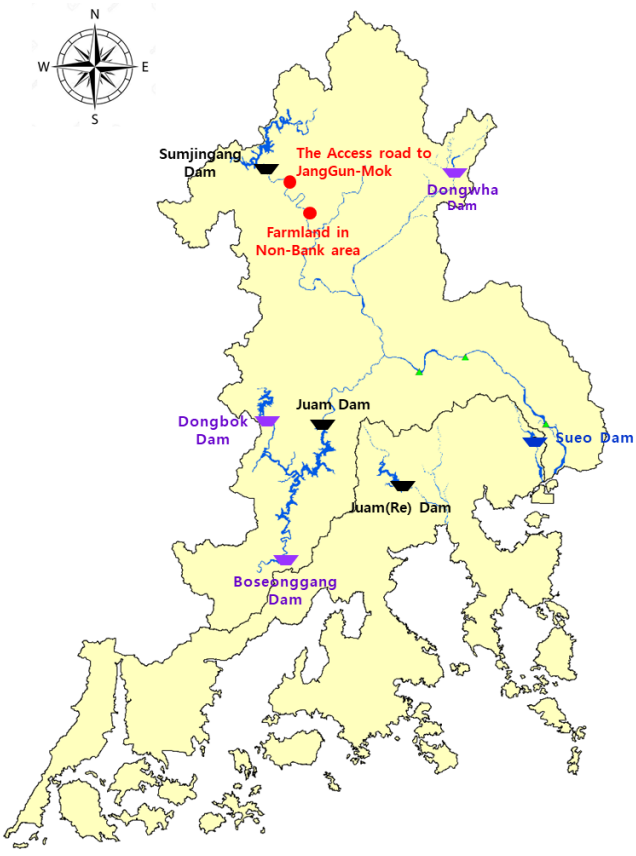

Fig. 3. Current status of the Sumjin River Basin

Table 2. Facility specifications of Yongdam, Hapcheon, Sumjingang Dam

Description	Yongdam Dam	Hapcheon Dam	Sumjingang Dam
Catchment Area (km^2)	925	930	763
Total Capacity (10^6 m^3)	815	790	466
Capacity of Flood Control (10^6 m^3)	80	137	30.3

선대책으로 용수공급에 문제 없는 범위 내에서 섬진강댐 홍수기제한수위를 하향 조정(EL 196.5 m → EL.194.0 m)하여 홍수조절용량을 추가 확보(30.3백만 m^3 → 90.2백만 m^3)하는 방안을 2021년부터 시범운영 중에 있다.

2.2. 댐 설계 시 홍수조절방식

섬진강댐 운영 및 유지관리지침서(보완) 보고서에 따르면, 섬진강댐의 계획홍수량에 대한 홍수조절방식은 Fig. 4와 같이 일정량 방식으로 제시되어 있다(K-water, 2012). 댐 유입량이 댐 계획방류량(1,868 m^3/초)보다 적을 때는 유입량 전량을 방류하고, 댐 유입량이 계획방류량에 도달한 후에는 일정량 방류를 지속하며, 계획홍수위(EL.197.7 m) 도달시에는 수문을 완전히 개방한다. 일정량 방식은 댐의 유입량 변화에 따라 별도의 의사결정 없이 단순하게 방류량을 결정할 수 있는 장점이 있으나, 강우예보보다 실적강우가 많으면 계획홍수위를 초과할 우려가 있으며, 실무현장에서는 급격히 변동하는 유입량에 정확히 맞추어 수문을 조작하기엔 한계가 있다. 또한 하류 하천의 홍수 상황을 고려치 않고 방류량을 증가할 경우 하류 피해가 가중될 수 있는 문제점이 있다.

2.3. 댐 제약방류량 및 최대방류량 설정

본 연구에서는 홍수기제한수위 하향으로 확보된 홍수조절용량을 최대한 활용하면서 실무에서 적용가능한, 일관성있는 홍수조절방식을 제시하고자 한다. 불확실성이 강한 강우예보 의존을 최소화하고 댐 상류와 하류의 홍수상황을 고려한 홍수조절을 위해서는 하류의 제약사항과 하천의 계획홍수량

에 대한 조사가 선행되어야 한다.

수자원공사는 매년 댐 운영에 제약이 되는 무제부, 하천 내 경작지, 공사현장 등 댐 운영 제약사항 조사를 시행하고, 그 결과를 바탕으로 댐 방류 시 침수피해가 유발되지 않은 댐의 제약방류량을 설정하여 운영하고 있다(K-water, 2023c). Fig. 5는 섬진강댐 하류 20 km 지점의 좌안에 위치한 장군목유원지 진입도로이며, 섬진강댐 제약방류량의 기준지점이다. 댐 방류량이 400 m^3/초 초과 시 진입도로 저지대의 침수되어 통행 고립이 예상된다.

본 연구에서는 하류를 고려한 단계적 방류량 증량 기준을 수립하고자 하므로, 제약방류량을 더욱 세분화하여 다양하게 설정해야 한다. 따라서 통행 고립을 고려한 기존의 제약방류량인 400 m^3/초를 1단계 제약방류량으로 설정하고, 실질적인 침수피해가 발생하는 800 m^3/초를 2단계 제약방류량으로 설정하였다. Fig. 6은 하류 4.3 km 지점의 우안에 위치한 임실군 덕치면의 무제부 경작지로 800 m^3/초 이상 방류 시 침수가 예상된다.

하류 하천을 고려한 댐 운영 시 댐과 하천의 설계된 홍수대응능력에 대한 검토도 필요하다. 섬진강댐의 계획홍수량은

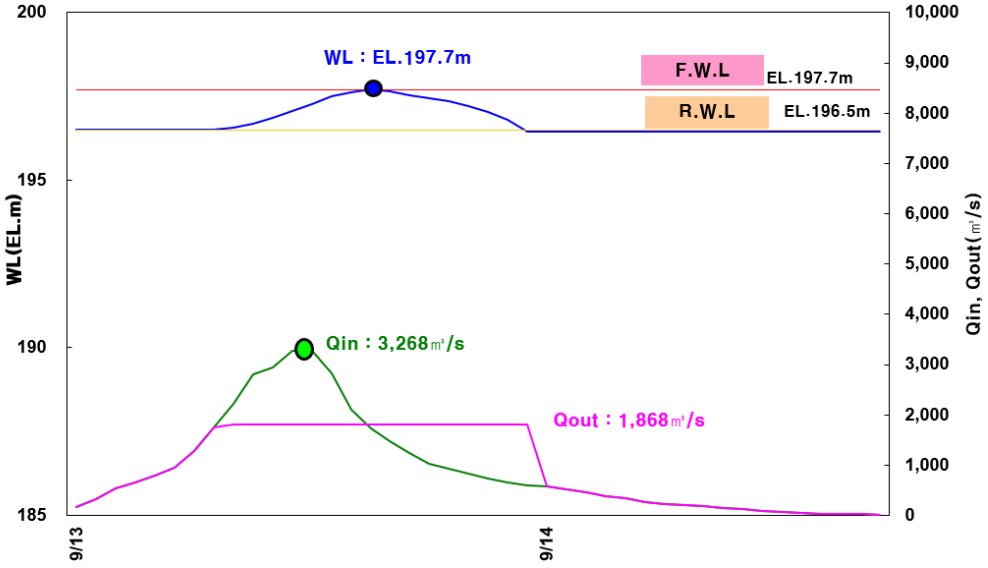

Fig. 4. Designed flood hydrograph of Sumjingang Dam

Fig. 5. The access road to JangGun-Mok (Operational constraint)

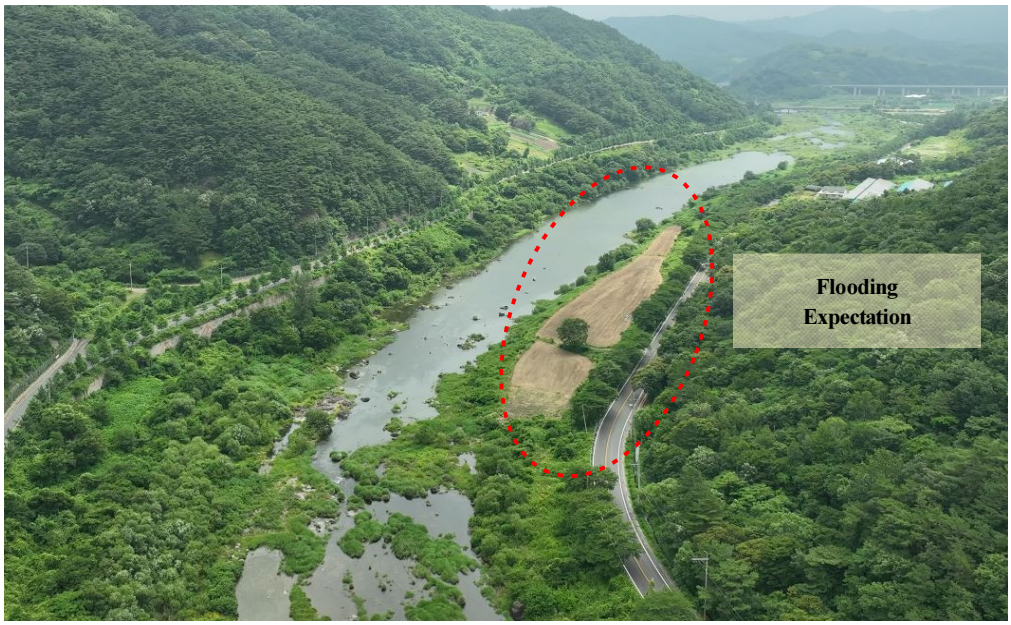

Fig. 6. Farmland in non-bank area (Operational constraint)

Table 3. Flood control approach for dam operations that involves gradually increasing the outflow

Description	Water level	Inflow	Outflow
Preliminary Release	lower than R.W.L (EL.194.0 m)	-	~400 m^3/s
Flood control Release	(observed) higher than R.W.L (EL.194.0 m) (predicted) lower than F.W.L (EL. 197.7 m)	~800 m^3/s (observed or predicted)	~400 m^3/s
		800~2,675 m^3/s (observed or predicted)	① ~800 m^3/s ② ~50% of predicted peak inflow
		2,675 m^3/s~ (observed or predicted)	~1,810 m^3/s
	(observed) higher than R.W.L (EL.194.0 m) (predicted) lower than F.W.L (EL. 197.7 m)	3,268 m^3/s ~ (observed or predicted)	1,810 m^3/s~Full open

3,268 m^3/초, 계획방류량은 1,868 m^3/초이다(K-water, 2023b). 한편, 섬진강 하천기본계획 상 섬진강댐 지점의 홍수량은 2,675 m^3/초, 댐 최대방류량은 1,810 m^3/초, 댐 직하류 하천 계획홍수량은 1,880 m^3/초로 산정되어 있다(IRO, 2021). 따라서 댐의 계획방류량 1,880 m^3/초 전량을 방류하면 하천기본계획 상의 댐 방류량 1,810 m^3/초를 초과하므로 하천의 설계 홍수조절능력을 초과하게 된다. 따라서 댐의 능력을 초과하는 홍수가 발생하는 경우를 제외하고는 댐의 최대방류량은 하천기본계획 상의 댐 방류량인 1,810 m^3/초 이내로 제한하는 것이 필요하다.

2.4. 단계별 홍수조절방식 결정

홍수조절은 댐 수위가 홍수기제한수위 이하일 경우 강우 발생 전 홍수조절용량 확보를 위한 예비방류와 댐 유역으로 홍수가 유입되고 댐 수위가 홍수기제한수위를 초과한 이후 시행하는 홍수조절방류 단계로 구분된다. 예비방류 단계에서는 강우 발생 전이므로 유입량 예측은 기상청 강우예보를 기준으로 하되, 방류량은 하류지역의 인위적인 홍수피해를 유발하지 않기 위해 댐 1단계 제약방류량인 400 m^3/초 이내로 실시한다.

홍수조절방류 단계는 댐 유역으로 홍수가 유입 중인 상황인 만큼 관측된 유입량 데이터와 향후 예상 유입량을 기준으로 하천의 제약사항까지 고려하여 점진적인 증량을 시행해야 한다. 이때 예상유입량은 기상예보의 불확실성을 최소화하기 위해 분석시점 까지의 실적 강우량을 기반으로 분석한다. 댐의 관측 또는 예측유입량이 2단계 제약방류량인 800 m^3/초 이내인 경우에는 예비방류와 마찬가지로 400 m^3/초 이내에서 방류를 실

시한다. 댐의 관측 또는 예측 유입량이 800 m^3/초~2,675 m^3/초(하천기본계획의 댐 지점 홍수량) 범위 이내에서는 관측유입량의 50%와 2단계 제약방류량 800 m^3/초 중 작은 값 이내로 우선 방류량을 증량하고, 유입량이 지속적으로 증가하면 홍수기제한수위 초과 시점의 실적강우를 기반으로 첨두유입량을 예측하고, 첨두유입량의 50% 이내로 방류량을 증가한다. 관측 또는 예측유입량이 2,675 m^3/초를 초과할 경우에는 하천기본계획에 반영된 댐 방류량인 1,810 m^3/초 이내로 방류량을 증가한다. 다만 댐의 계획홍수량을 초과한 홍수유입 등으로 인해 댐 수위가 계획홍수위가 초과할 것으로 예상되는 경우에는 댐의 안전 확보를 위해 필요시에는 1,810 m^3/초 이상으로 단계적으로 방류 증량을 실시한다. Table 3는 댐 수위 및 유입량에 따른 단계적 방류량 증량 프로세스를 나타내었다.

3. 분석 및 결과

3.1 적용모형

본 연구에서는 홍수조절방식에 대한 검증을 위해 COSFIM (cordinate operation system for flood control in multi-reservoir)모형을 이용하여 섬진강댐 홍수분석 모형을 구축하였고, 각각의 홍수사상에 대하여 모형을 보정하였다. COSFIM모형은 K-water가 개발하여 저수지 운영 실무에 활용 중인 수문학적 홍수추적 모형으로서 저류함수법에 근간을 둔 모형이다. 저류함수법과 같은 수문학적 모형은 비교적 단순하기 때문에 운영이 간편하고 복잡한 계산을 필요로 하지 않으며, 계산의 안정성이 뛰어나서 오래전부터 많이 이용되고 있으며, 댐 운영 실무자가 적용할 수 있도록 여러 연구들을 통해 지속적으로 발전되어 왔다(Shin *et al*., 2004; Kim *et al*., 2006; Sung *et al*., 2008).

저류함수모형은 1961년 기무라에 의해 처음으로 제안된 것으로 유출해석에 필요한 계수를 과거의 홍수자료에서 쉽게 유추할 수 있다. 그래서 실제 홍수 흐름의 특성인 변화가 늦은 부정류의 홍수유출 특성이 반영되어 있으며, 경사가 심한 지형과 집중호우에 의한 유역계의 유입과 유출의 비선형성이 고려된 유역의 유출을 용이하게 구할 수 있다. 이러한 장점으로 인해 일본 및 우리나라에서 댐의 계획, 설계, 운영을 위한 유출해석에도 널리 적용되고 있다.

3.2 적용모형의 이론적 배경

3.2.1 유역 홍수추적

저류함수를 이용한 소유역 유출을 모의하기 위한 개념도는 Fig. 7과 같다. 여기서 R_{ave}은 강우량(Rainfall), A는 대상유역 면적(km^2), f_{sa}는 대상유역 중 유출에 기여하는 면적비, f_1은 대상유역에 대한 유출역(Runoff Area) 면적비, $f_{sa}-f_1$는 유출기여 면적에 대한 침투역(Infiltration Area) 비율, $1-(f_{sa}-f_1)$는 대상유역에 대한 침루역(Percolation Area) 면적비, $R_{sa}(H)$는 지표면하 침투역에 대한 포화우량(Saturation Rainfall), L은 하도의 길이, S_l은 하도저류량, Q_i는

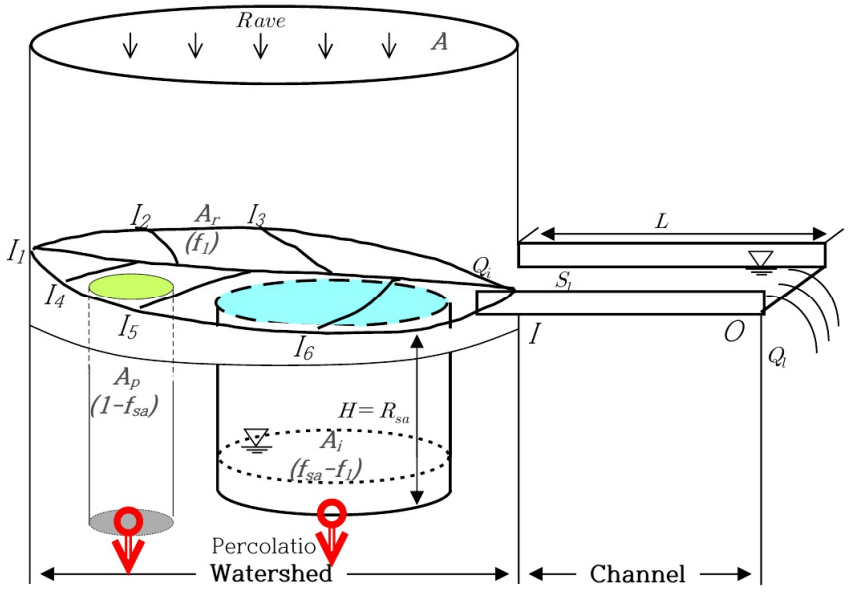

Fig. 7. Conceptual watershed of rainfall-runoff in a storage fuction model

하도유입량(소유역 유출량), Q_l는 하도의 유출량이다.

유역의 자연현상에 대한 강우-유출 모의를 위하여 몇 가지 가정이 필요하다. 유역의 하도구간(I~ O)은 아래로 경사져 있으며, 유역 전체에 균등하게 강우량 R_{ave}이 발생하고, 소유역에서의 초과강우에 대한 지체시간을 고려하여 얻어지는 유출량은 하천에 유입된 후, 하도 형상에 따른 저류과정을 거쳐 출구로 배출된다고 가정한다. 또한 유역은 유출 특성에 따라 3가지로 분류하였는데, 강우에 대하여 유출 초기부터 유출에 기여하는 불투수지역인 유출역이 존재하며, 초기 강우에 대하여 지표면하로 침투된 후 일정량의 토양 포화우량을 만족시킨 후 유출에 기여하는 침투역을 두었고, 침루역을 설정하여 하천 유출에 직접적으로 기여하지 않고 바로 지하수로 유입되는 지역을 개념적으로 분류 하였다. 실제 유역 유출 계산에 있어서는 유역저류와 유출에 관한 단위를 강우량 단위(mm/hr)와 같이 단위저류고(mm), 단위유출고(mm/hr)를 사용한다. 이에 따라 유역의 저류함수식은 Eq. (1) 및 Eq. (2)로 표시한다.

$$Re(t) - q_l(t) = dS_l(t)/dt \tag{1}$$

$$S_l(t) = kq_l(t)^p \tag{2}$$

여기서, t 시간의 유역출구에서의 유출량 $q(t)$는 $q_l(t-\triangle t)$의 개념이며,

Re : 유효강우(mm/ $\triangle t$)

k : 저류상수 ($mm^{(1-p)}/\triangle t^{(-p)}$)

p : 저류상수(무차원)

T_l : 지체시간 ($\triangle t$)

S_l : 저류고(지체)(mm)

q_l : 유출고(지체)(mm/ $\triangle t$)

q : 유출고(출구)(mm/ $\triangle t$)

$\triangle t$: 계산단위시간(여기서는 1시간)

Eq. (2)을 차분식으로 표시하면, Eq. (3)과 같다

$$Re(t) = \frac{(q_l(t-\Delta t) + q_l(t))}{2} + \frac{(S_l(t) - S_l(t-\Delta t))}{\Delta t} \tag{3}$$

Eq. (3)를 다시 정리하면 Eq. (4)와 같다.

$$\frac{S_l(t)}{\Delta t} + \frac{q_l(t)}{2} = \frac{S_l(t-\Delta t)}{\Delta t} - \frac{q_l(t-\Delta t)}{2} + Re(t) \tag{4}$$

Eq. (2)를 Eq. (4)에 대입하면 Eq. (5)와 같다.

$$\frac{kq_l(t)^p}{\Delta t} + \frac{q_l(t)}{2} = \frac{kq_l(t-\Delta t)^p}{\Delta t} - \frac{q_l(t-\Delta t)}{2} + Re(t) \tag{5}$$

Eq. (5)에서 우변항은 기지의 값이므로 Eq. (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$a \cdot q_l(t)^p + b \cdot q_l(t) = Constant(a, b: 일정) \tag{6}$$

Eq. (6)은 포함된 여러개의 미지수 때문에 직접적으로 해를 구할 수 없으므로, 변수 초기치를 가정하여 반복 수행함으로써 해를 얻을 수 있는 Newton-Raphson법에 의하여 $q_l(t+\triangle t)$, $q_l(t+2\triangle t)$, ……, $q_l(t+n\triangle t)$의 값을 구한다.

상기 계산과정을 유출역과 침투역별로 각각 행하면 전체 유역의 단위유출고 q'는 유출역의 단위 유출고 q_f(mm/day)와 침투역의 단위 유출고 q_s(mm/day)로 Eq. (4)와 같이 표시하며, 이때 유출에 직접적으로 기여하지 못하고 지하수로 바로 침투하는 침루역[$1-(f_{sa}-f_1)$]의 단위유출고에 대하여는 계산에서 제외한다.

$$q' = f_1 \cdot q_f + (f_{sa} - f_1) \cdot q_s \tag{7}$$

여기서, f_1 : 1차유출률(무차원)

유역의 총 유출 Q_T는 기저유량을 포함하여 m^3/s 단위로 고쳐 쓰면 Eq. (8)과 같으며, 여기에 Eq. (7)을 대입하면 Eq. (9)와 같다(MOCT and K-water, 2006).

$$Q_T = \frac{1}{3.6} \cdot q' \cdot A + q_b \tag{8}$$

$$Q_T = \frac{1}{3.6} \cdot f_1 \cdot A \cdot q_f + \frac{1}{3.6} \cdot (f_{sa} - f_1) \cdot A \cdot q_s + q_b \tag{9}$$

여기서, q_b : 기저유출(m^3/s), A : 전체 유역면적(km^2)

3.2.2 하도 홍수추적

저수지에서의 저류량이 유출량에 의해 결정될 수 있는 것과는 달리 자연 하도의 경우에는 저류량이 수문곡선의 상승부분 또는 하강부분인가에 따라 달라진다. 수문학적 하도 추적의 방법에는 Eqs. (10)~(12)과 같이 하천의 연속방정식과 저류함수를 사용하여 나타낸다.

$$I(t) - Q_l(t) = \frac{dS_l(t)}{dt} \tag{10}$$

$$S_l(t) = k' \; Q_l(t)^{p'} - T_l' \; Q_l(t) \tag{11}$$

$$Q(t) = Q_l(t - T_l') \tag{12}$$

여기서, $I(t)$: 유입량(m^3/s),

k' : 저류상수 ($m^{3(1-p')}/\sec^{(-p')}$),

p' : 저류상수(무차원),

T_l' : 지체시간(hr),

$S_l(t)$: 저류량($m^3/s \cdot hr$),

$Q_l(t)$: 지체된 유출량(m^3/s),

dt 및 Δt : 계산 단위시간(hr),

$Q(t)$: 출구에서의 유출량(m^3/s),

저류함수법은 하천 유역이나 하도에 대한 저류량과 유출량 사이의 관계를 나타내는 저류함수를 연속방정식과 조합하여 홍수유출량을 산정하는 방법이다. 유출현상의 비선형성을 나타내기 위하여 강우-유출의 변환과정에 유역의 저류과정을 도입하고, 그것을 매개변수로 하여 저류량과 유출량의 관계식을 성립시켜 저류량의 물수지를 계산하여 유출을 해석하게 된다. 하도에서의 매개변수는 하도저류상수 k', p' 및 지체시간 Tl' 등이 있으며, 이들은 홍수수문곡선 자료만 있으면 확정적으로 추정할 수 있으므로, 모형의 적용이 용이한 장점이 있다. Eq. (10)의 연속방정식을 차분식으로 표시하면 Eq. (13)이 되며,

$$\frac{I(t-\Delta t) + I(t)}{2} - \frac{Q_l(t-\Delta t) + Q_l(t)}{2} = \frac{S_l(t) - S_l(t-\Delta t)}{\Delta t} \tag{13}$$

Eq. (13)을 정리하면 Eq. (14)와 같다.

$$\frac{S_l(t)}{\Delta t} + \frac{Q_l(t)}{2} = \frac{S_l(t-\Delta t)}{\Delta t} - \frac{Q_l(t-\Delta t)}{2} + \frac{I(t) + I(t-\Delta t)}{2} \tag{14}$$

Eq. (11)을 Eq. (14)에 대입·정리하면 Eq. (15)가 성립한다.

$$\frac{k' Q_l(t)^{p'}}{\Delta t} + \frac{Q_l(t)}{2} - \frac{T_l' Q_l(t)}{\Delta t} = \frac{k' Q_l(t-\Delta t)^{p'}}{\Delta t} - \frac{Q_l(t-\Delta t)}{2} - \frac{T_l' Q_l(t-\Delta t)}{\Delta t} + \frac{I(t) + I(t-\Delta t)}{2} \tag{15}$$

상기 Eq. (15)는 Eq. (16)으로 나타낼 수 있다.

$$A' Q_l(t)^{p'} + B' Q_l(t) = Constant(A', B' : 일정) \tag{16}$$

이는 비선형의 수식을 포함하기 때문에 직접적으로 해를 구할 수 없으므로 수치해석 기법인 Newton-Raphson 방법을 이용하여 현재 시각의 $Q_l(t)$를 계산한다.

3.3. 홍수분석모형의 적용성 검증

분석 모형의 적용성 검증을 위해 과거 홍수사상을 선택하여 관측유입량과 모의 유입량을 비교·분석하였다. 20년 8월 7~8일 홍수사상을 적용하였으며, 매개변수를 조정하여 검보정한 결과, Fig. 8과 같이 모의 유입량이 관측 유입량과 매우 유사하게 재현되는 것을 확인하였다. 관측과 모의결과 간 첨두유량 비교시에도 관측치는 3,401 m^3/초이며, 모의값은 3,264 m^3/초로 차이는 4% 수준으로 미미하였다.

또한 유출분석의 정확도 평가를 위해 Moriasi *et al*. (2007)이 제시한 유출모형의 성능평가 기법을 적용하였다(Moriasi *et al*., 2007). 평가항목은 NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient), PBIAS (Percent Bias), RSR (RMSE observations Standard-deviation Ratio)로 구성되어 있다. NSE는 모형의 모의성능을 표현한 무차원 지수로서 1 이하의 값을 가지며 1에 가까울수록 모의성능이 우수한 것으로 평가된다. PBIAS는 평균적으로 모의치가 실측치 보다 크거나 작은 경향을 나타내는 지수이다. RSR은 평균제곱근 오차와 관측값 표준오차 편차비율의 의미이며 오차 통계치로서 널리 사용되는 RMSE (Root Mean Square Error)를 보완하기 위해 고안된 오차 통계치이다. 각 평가항목에 대한 산출식은 Eqs. (17)~(19)와 같다.

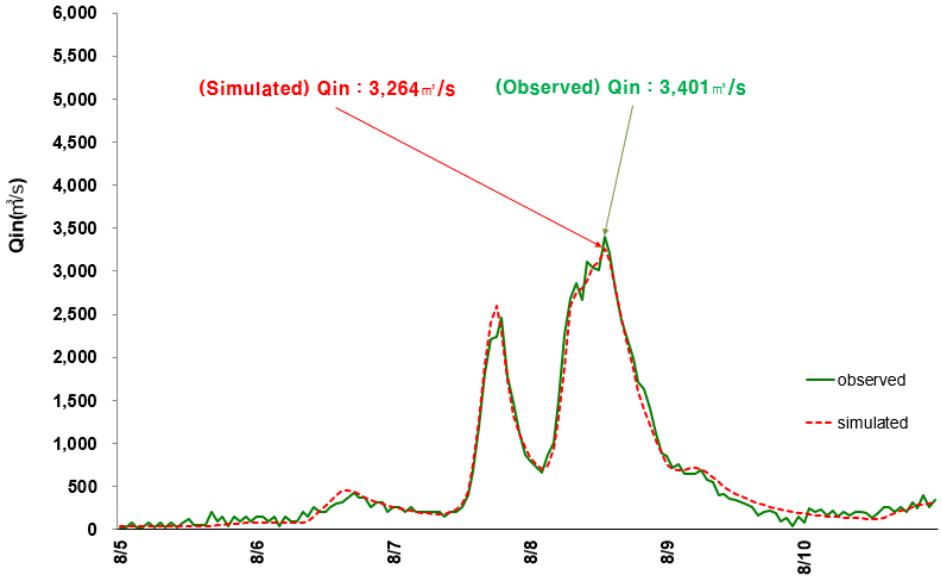

Fig. 8. Simulation result of Dam inflow (2020. 8. 7.~8.8)

Table 4. Performance evaluation standard

Performance Rating	NSE	PBIAS (%)		RSR
		Streamflow	Sediment	
Very good	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 10$	$PBIAS < \pm 15$	$0.00 < RSR \leq 0.50$
Good	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 30$	$0.50 < RSR \leq 0.60$
Satisfactory	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	$\pm 30 \leq PBIAS < \pm 55$	$0.60 < RSR \leq 0.70$
Unsatisfactory	$NSE \leq 0.50$	$\pm 25 \leq PBIAS$	$\pm 55 \leq PBIAS$	$0.70 < RSR$

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_o - Q_f)^2}{\sum(Q_o - Q_{ave})^2} \quad (17)$$

$$PBIAS = \frac{\sum(Q_o - Q_f) \times 100}{\sum Q_o} \quad (18)$$

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV(Q_o)} = \frac{\sqrt{\sum(Q_o - Q_f)^2}}{\sqrt{\sum(Q_o - Q_{ave})^2}} \quad (19)$$

여기서, Q_o는 관측유입량(m^3/s), Q_f는 모의유입량(m^3/s), Q_{ave}는 평균 관측유입량(m^3/s), $\overline{Q_f}$는 평균 모의유입량(m^3/s)이다.

각 항목별 평가 결과는 Table 4와 같이 4단계인 매우 좋음(Very good), 좋음(Good), 충분함(Satisfactory), 불충분함(Unsatisfactory) 4단계로 구성되어 있다.

Table 5. Evaluation result of simulation

NSE	PBIAS (%)	RSR
0.9878 (Very good)	1.2221 (Very good)	0.1100 (Very good)

홍수분석모형을 통한 유출분석 결과, Table 5와 같이 NSE는 0.9878, PBIAS는 1.2221, RSR은 0.1100으로 3 항목 모두 매우 좋음(Very good) 등급으로 나타내는 등 모형의 정확도는 우수한 것으로 확인되었다.

3.4 홍수조절방식을 적용한 영향분석

홍수조절방식에 대한 영향분석을 위해서 댐의 설계 홍수조건인 계획홍수량의 시계열 유입량 자료와 역대 최대홍수시의 시간단위 관측유입량을 적용하였다. 섬진강댐의 계획홍수량은 100년 빈도 홍수량에 해당하는 3,268 m^3/초이며 지속시간은 24시간이다. 역대 최대 홍수사상은 2020년 8.7~8일

에 발생하였으며 최대유입량은 3,401 m^3/초이다(K-water, 2024).

Fig. 9는 본 연구에서 제시한 홍수조절방식을 계획홍수량 유입사상에 적용한 모의운영 결과이다. 초기수위는 변경된 홍수기제한수위인 EL.194.0 m, 예비방류량은 보수적 조건에서의 기준의 적정성 검토를 위해 미반영하였다. 방류량은 최초 1단계 제약방류량 400 m^3/초로 시작하여 2단계 제약방류량 800 m^3/초로 증량하고, 첨두유입시에는 하천기본계획의 댐 첨두방류량인 1,810 m^3/초까지 단계적으로 증량하였다. 댐의 설계 제원과 모의운영 결과를 비교하면, Table 6와 같이 최고수위는 계획홍수위(EL.197.7 m) 대비 1.9m 낮게 유지되어 홍수조절용량은 35.4백만 m^3의 여유공간이 확보되었

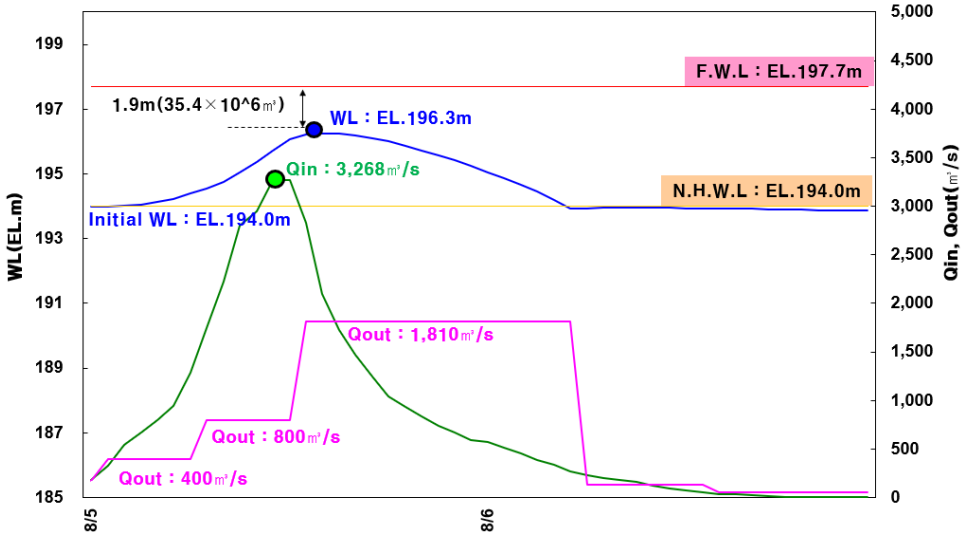

Fig. 9. Simulation result of Dam operation employing design flood

Table 6. A comparison between dam spec. and simulation result

	Peak WL	Peak Qin	Peak Qout
Dam Spec. (Designed flood)	EL.197.7 m	3,268 m^3/s	1,868 m^3/s
Simulation result	EL. 196.3 m	3,268 m^3/s	1,810 m^3/s

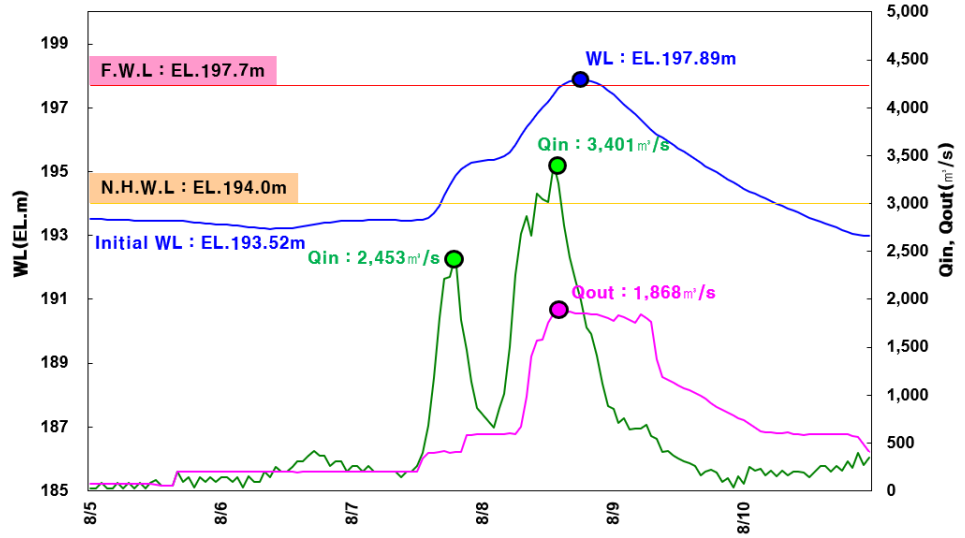

Fig. 10. Hydrograph of observed data (2020.8.7.~8.8)

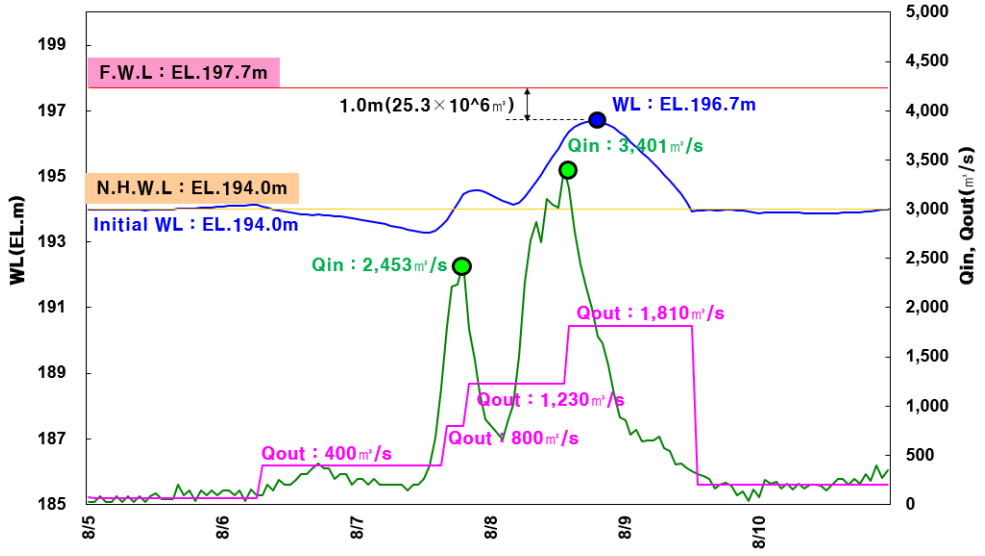

Fig. 11. simulation result employing the most significant historical flood (2020.8.7.~8.8)

Table 7. A comparison between observed data and simulation result

	Peak WL	Peak Qin	Peak Qout
Observed data	EL.197.89 m	3,401 m^3/s	1,868 m^3/s
Simulation result	EL. 196.7 m	3,401 m^3/s	1,810 m^3/s

다. 이는 첨두방류량(1,810 m^3/초) 기준으로 5.4시간 방류를 중단하고 저류가능한 수준으로 하천의 예측불가능한 상황이 위기상황이 발생하더라고 탄력적으로 대응할 수 있는 시간적 여유를 확보할 수 있다.

역대 최대홍수사상은 2020년 8월 7일부터 8일까지 발생하였다. Fig. 10과 같이 Double Peak 형태로 첨두유량이 발생하였으며 계획홍수위 대비 댐 수위는 0.19 m 초과하였다. 실무에서는 홍수유입의 예측이 어려운 만큼 연속된 2개의 사상에 홍수조절방식을 각각 적용하는 형태로 모의운영을 실시하였다. Fig. 11과 같이 초기수위는 EL.194.0 m, 예비방류는 야간시간대를 피하여 8.6 7시부터 400 m^3/초로 실시하였고, 방류량 조정은 홍수기 제한수위 초과 시 800 m^3/초로 증량하고, 1차 첨두유입량(2,453 m^3/초)의 50%인 1,230 m^3/초로 증량한 후, 2차 첨두유량(3,410 m^3/초) 유입 시 1,810 m^3/초로 단계적으로 증량하였다. 댐의 실제 데이터와 모의운영 결과를 비교하면, Table 7과 같이 모의 첨두수위는 EL.196.7 m로 계획홍수위 대비 1.0 m 낮았고 계획홍수위 대비 홍수조절 여유용량은 25.3백만 m^3으로 첨두방류량 기준 최대 3.9시간 방류를 중단하고 저류가능한 수준이다.

4. 결 론

본 연구에서는 댐 관리자가 불확실한 기상예보에 의존을 최소화하고, 댐과 하류 하천을 동시에 고려하며 일관성 있는 홍수대응을 할 수 있는 홍수조절방식을 제안하였다. 구조적으로 홍수조절용량이 부족하여 홍수대응능력이 취약하고 2020년 대규모 홍수가 발생하였던 섬진강댐을 대상으로 연구를 실시하였다. 댐 하류 하천 제약사항과 하천기본계획을 고려한 제약방류량과 최대방류량을 설정하고, 댐 수위와 유입량에 따라 제약방류량, 첨두유입의 50%, 하천기본계획상 댐 최대방류량 순으로 단계적 증량하는 홍수조절방식을 개발하였다. 제안된 홍수조절방식은 섬진강댐의 계획홍수량과 역대 최대홍수사상에 대해 댐 운영 실무에서 활용 중인 COSFIM 모형으로 저수지 홍수분석을 통해 검증한 결과, 계획홍수위 및 실적 최고수위보다 더 낮은 첨두수위가 발생하여 더욱 안정적인 홍수조절이 가능한 것으로 나타났다. 제안된 홍수조절방식은 수위 및 유입량 기준에 따른 방류량 조정 프로세스가 구체적이고 명확하게 제시되어 있으므로, 실무에 손쉽게 적용가능하며, 각각 다른 댐 관리 실무자가 활용하더라도 일관성 있는 홍수대응이 가능할 것으로 보인다. 다만 본 연구에서 제시한 방법론은 하류 하천의 제약사항과 하천기본

계획의 홍수량이 변경될 경우 그에 따라 홍수조절방식을 보완할 필요가 있으며, 타 댐에 적용할 경우에는 해당 댐의 홍수조절특성 등을 고려해야 할 것으로 보인다.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Iksan Regional Office of Construction and Management (IRO) (2021). *Basic plan of Sumjin River (Revised)*. pp. 3-14-3-16.

Jung, J.W. (2020). *A seasonal climate prediction reflecting climate variability and flexible operation plan of a multi-purpose dam in flood season*. Ph. D. Dissertation, University of Inha University, pp. 122-126.

Kang, T.U., Lee, S.J., and Choi S.H. (2014) "A study for flood control of Namgnng Dam with flood guide curve in flood event." *Journal of the Crisis and Emergency Management: Theory and Praxis*, Vol. 54, No. 7. pp. 545-552.

Kim, J.R., Kim, J.C., Jeong, D.K., and Kim, J.H. (2006). "The optimal parameter estimation of storage function model based on the dynamic effect." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 7, pp. 593-598.

Kim, Y.T., Park, M..H., and Kwon, H.H. (2020). "Spatio-temporal summer rainfall pattern in 2020 from a rainfall frequency perspective." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KSDS, Vol. 13, No. 4, pp. 93-104.

Kwak, J.W. (2021) "A study for the target water level of the dam for flood control." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 10, No. 12, pp. 77-92.

K-water (2012). *Report on the Dam operation and management of Sumjingang-Dam (revised)*. pp. 4.7-4.8.

K-water (2023a). *Report on the results of Dam&wier opreation constraints investigation*. Water Resources Operation Department-1939, pp. 1-2.

K-water (2023b). *Working-lwvel hand book of water management*. pp. I-179.

K-water (2023c). *Dam operation plan in 2023 flood season*. Water Resources Operation Department-2073, p. 16.

K-water (2024). My water, accessed on 28 February 2024, <https://www.kwater.or.kr>.

Ministry of construction and transportation (MOCT) and K-water (2006). *Report on the establishment of a flood control connected operation system in the han river Dams*. pp. 208-225.

Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., and Veith, T.L. (2007). "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy iv watershed simulations." *Journal of American Society of Agricultural and Biological Engineers*, Vol. 50, No. 3, pp. 885-895.

Shin, C.K., Cho, H.S., Jung, K.S., and Kim, J.H. (2004). "Grid based rainfall-runoff modeling using storage function method." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 11, pp. 969-972.

Sung, Y.D., Chong, K.Y., Shin, C.K., and Park, J.H. (2008). "Long term rainfall-runoff modeling using storage function method." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 7, pp. 737-742.