

## 회복탄력성을 고려한 발전용댐의 성능평가 방법론 제안

김동현<sup>1</sup> · 유형주<sup>1</sup> · 신희준<sup>2</sup> · 이승오<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>홍익대학교 토목공학과 박사수료, <sup>2</sup>한국수력원자력(주) 수력처 수력기술부 선임전문원, <sup>3</sup>홍익대학교 토목공학과 교수

# Proposal of Performance Evaluation Methodology for Hydropower Reservoirs with Resilience Index

Dong Hyun Kim<sup>1</sup>, Hyung Ju Yoo<sup>1</sup>, Hong-Joon Shin<sup>2</sup>, and Seung Oh Lee<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Ph.D Candidate, Dept. of Civil Engineering, Hongik Univ.

<sup>2</sup>Senior Research Engineer, Hydropower Research and Training Center, KHNP

<sup>3</sup>Professor, Dept. of Civil Engineering, Hongik Univ.

### 요약

통합물관리, 탄소중립 등 수자원 및 에너지 정책이 급변하는 가운데 모두 연관성이 있는 발전용댐의 가치를 재평가해야한다는 의견이 제기되고 있다. 발전용댐은 홍수기에 제한수위를 두어 운영을 하는 등 과거부터 전력생산 외에도 홍수조절 등에 기여해왔으나 이러한 운영방식은 전력손실이 불가피하다. 이에 본 연구는 발전용댐의 전력손실을 최소화하기 위하여 수력발전의 전력생산 시스템에 회복탄력성의 개념을 도입하고 전력판매액의 최대화를 발전성능으로 정의하여 발전용댐의 발전성능을 평가할 수 있는 프레임워크를 제시하였다. 현행 연계운영계획 수립 절차를 기반으로 댐 모의 운영 시나리오를 구축하고 HEC-5를 활용하여 댐 모의 운영을 수행하였다. 수행된 결과자료를 활용하여 제시된 프레임워크에 적용하여 각 시나리오에 따른 발전성능이 중요한 요소로 평가됨을 확인되었고 부가적으로 이 치수 성능도 평가할 수 있음을 확인하였다. 향후 다양한 시나리오를 기반으로 경제성 분석이 수반되어 비용과 편익이 산정된다면 시나리오별 경제적 효과 및 기회비용 등을 명확히 비교할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어: 회복탄력성, 발전용댐, 연계운영, 발전성능

### ABSTRACT

Recently, water resources and energy policies such as integrated water management and carbon neutrality are changing rapidly. There is an opinion that the value of hydropower reservoirs related to these policies should be re-evaluated. In the past, they have contributed to flood control in addition to electricity generation, such as operating at a limited water level during the flood season, but loss of power generation is inevitable with this operation. Therefore, this study introduced the concept of resilience to the hydropower generation system to minimize the power loss. A framework for evaluating the power generation performance of them was presented by defining the maximization of electricity sales as performance. Based on the current procedure of multiple operation plan, a scenario was established and simulation was performed using HEC-5. As a result of applying to the framework, it was confirmed that the power generation performance according to each scenario was evaluated as an important factor. And it was confirmed that the performance of flood control and water use could also be evaluated.

**Keywords:** Resilience, Hydropower reservoir, Multiple reservoir operation, Power generation

\*Corresponding author: Seung Oh Lee, seungoh.lee@hongik.ac.kr

Received: 5 March 2022, Revised: 17 March 2022, Accepted: 21 March 2022



## 1. 서론

수자원, 에너지, 유지관리 분야에서 발생한 대·내외 여건변화에 따라 발전용댐의 위상도 새롭게 재평가 되어야 한다는 목소리가 높다. 댐은 국민의 삶의 질과 관련된 전기, 수도, 수재해 방지 등과 직접적으로 연관된 구조물이며, 다양하고 복잡한 이해관계로 인해 운영 및 관리가 어렵지만 중요하다. 최근의 급격한 여건변화는 발전용댐의 가치를 재고하고 변화에 맞는 댐 운영 및 관리가 수행되어야 할 것이다.

수자원 관리 측면에서 발전용댐의 다목적화 활용은 1980년대 이후로 지속적으로 제기되어 왔다. 결정적으로 2018년 6월 정부조직법이 개정되고 물관리기본법, 물기술산업법을 차례로 제·개정함에 따라 본격적으로 환경부가 수량과 수질을 통합 관리하게 되었다. 이 같은 구조개편은 국내 물 관리 정책이 수질·환경 관리로 전환되었음을 의미하는 것이다. 한강수계 내 댐 군을 형성하고 있는 발전용댐도 통합물관리체계의 대상으로 포함되었다. 이에 산업부도 환경부와의 협약을 통해 2020년 6월 발전용댐 다목적활용을 선포함으로써 발전용댐 관리자의 유역자원 수계관리에 대한 역할을 강조하였다. 따라서, 발전용댐은 주 기능인 전력생산 외의 홍수 및 가뭄조절에 기여하게 되었다. 이는 결국 전력생산의 손실을 피할 수 없으며 이를 최소화하기 위해서는 수자원의 활용과 사용 효율성에 대한 측면을 더욱 강조해야 되는 상황에 이르렀다. 더불어 기후변화 전망에 의하면 한반도 강우량의 시간적 공간적 편차가 더욱 커지고 있고 댐 방류량의 연도별 변동 폭도 확대되고 있어 댐의 운영과 수자원의 효율적 활용에 대한 중요성은 더욱 강조되고 있다. 일례로 2020년 장마로 인한 홍수피해는 기후변화의 현실화를 경험한 사례였으며 현존하는 댐의 바람직한 운영과 운영에 대한 신뢰성·객관성·수익성 등 대대적인 운영방안의 재검토가 및 대응이 절실하다.

발전용댐의 운영은 법령상 전기시설물로 전력수급체계 및 전력생산과도 직접적인 연관이 있어 국내의 에너지 정책 및 규정에도 부합해야 하기 때문에 타 수자원 시설물보다 복잡하다. 앞서 언급한 것처럼 기후변화에 대응하여 수자원 측면에서의 발전용댐의 기여가 강조되고 있고, 에너지원으로는 비상발전원으로서의 중요한 역할을 수행하고 있다. 그러나 근래에는 전력 생산을 위한 수력발전댐의 역할은 감소하고 있다는 의견도 제기되어왔다. 수력발전은 1960년대 산업화 초기에는 총 생산 발전량의 35%를 차지하였지만 근래에 들어 화력과 원자력과 같은 고효율 에너지원으로 인해 총 생산 발전량의 0.4%만을 담당하고 있을 정도로 에너지 분야에서의 수력발전댐의 역할은 축소되어 왔다. 그러나 최근 화력과 원자력의 위험성, 자원고갈, 환경오염 등으로 인해 전세계적으로 신재생에너지에 대한 관심이 뜨겁다. 2020년 7월 정부는 국가 프로젝트 ‘한국형 뉴딜’을 시작으로 2020년 10월에는 석탄발전을 재생에너지로 대체하는 2050년 탄소중립을 선언하였다. 2020년 12월에는 탄소중립 추진전략을 마련함에 따라 에너지 주공급원을 화석연료에서 신·재생에너지로의 전환을 공표하였다. 수력발전은 대표적인 신·재생에너지로 2050 탄소중립의 목표달성을 위해 필요한 에너지원이 될 것으로 기대된다. 2020년에 생산된 발전량 기준(EPIS) 수력발전은 전체의 1.3%를 차지하고 있지만 전체의 62.4%를 차지하고 있는 화력발전의 가동중단에 따라 수력발전의 신재생에너지로의 역할의 필요성은 자명하다. 또한, 원전가동의 중단에 따라 한수원에서 생산하는 전력의 19.6% (과거 약 2~3%)을 수력발전이 차지하고 있을 정도로 발전용댐을 관리하는 한수원 내에서 위상의 변화도 크다고 할 수 있다. 이러한 에너지 정책의 변화속에 2021년에는 10년만의 ‘대정전’의 위기를 겪게 되었고 비상발전원으로서의 수력발전의 중요성도 재차 강조되었다.

발전용댐은 다목적댐보다 적고 제한된 공간을 활용하여 댐에 유입되는 수량만큼 방류하여 수위를 확보함에 따라 홍수대응효과가 미비하고 다목적 활용을 위해 발전단가와는 관계없이 하천 및 하류 수량에 따라 불규칙하게 방류함에 따라 전력생산에 많은 손실을 초래하는 운영을 수행해왔다. 기존의 운영관점은 단순히 용량확보를 위한 수위저하를 통한 대응이었고, 수위저하 이후 기간의 손실에 대한 고려는 사실상 무시되었다. 따라서, 본 연구에서는 본래의 기능을 수행할 수 있는 회복관점의 운영이 홍수조절기능을 수행하면서 본래의 기능인 전력생산을 최대화할 수 있다고 판단하였다. 즉, 인위적 방류로 인한 단순한 발전수량 손실이 아닌 회복탄력성(Resilience)를 고려한 회복관점에서 손실을 평가하고 저수지 운영을 할 필요가 있

다. 이를 통해 장단기 전력수급계획과 댐 연계운영 계획 수립 시 필요한 운영 기준을 회복탄력성 관점에서 재산정하여 계획의 신뢰도를 높이고 수익성을 높이는 것이 목적이며, 댐의 기능별 운영관리에 대해 회복탄력성의 개념을 도입하여 객관적 평가지표를 제시하고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 발전용댐의 회복탄력성(Resilience)

#### 2.1.1 회복탄력성 개념과 정량화

회복탄력성은 Holling(1973)에 의해 처음 정의 되었으며, 개념적 특성은 총 3단계로 발전되어왔다(Kim et al., 2016). 초기의 회복탄력성은 외부의 교란으로 인해 시스템의 평형상태가 깨졌을 때 얼마나 빠르게 시스템이 평형상태로 다시 회복할 수 있는지에 중점을 두었다(Pimm, 1991). 이처럼 회복속도에 초점을 둔 개념은 단순한 기능중심 시스템에 적합하며, 공학적 회복탄력성(Engineering resilience)라 분류한다(Folke, 2006). 이후 회복탄력성은 복잡한 시스템에 적용되면서 개념도 확장되었다. 초기 회복탄력성은 원래의 상태로의 복구의 개념이라면 확장된 개념은 기능 유지에 중점을 두었다. 이는 원상태로 복구되는 개념이 아닌 시스템의 기능을 유지할 수 있는 상태라면 다른 평형상태도 가능하다는 것을 의미한다. 시스템 상에 새로운 동적 균형을 형성한다는 것을 의미하며 이를 ‘균형레짐의 변화(Equilibrium regime shift)’라고도 한다(Folke et al., 2004). 이같은 개념은 생태적 회복탄력성(Ecological resilience)라고도 한다(Peterson and Holling, 1998). 최근에는 보다 융합적인 관점으로 적응적 복잡계에서의 회복탄력성의 개념이 확장되었다(Folke et al., 2010). 이에 대해 사회경제-생태 통합적 회복탄력성(Socio-ecological resilience)의 개념이 제시되었다(Gunderson and Holling, 2002). 그러나 다양한 연구자들이 이 외부 교란에 대응하기 위한 시스템의 성능 평가에 회복탄력성 개념을 활용하고 있으나, 이를 정량적으로 평가한 연구는 매우 한정적이다.

회복탄력성을 정량화 하는 연구는 대표적으로 Bruneau et al.(2003)이 기반시설이 가진 상태를 0에서 100으로 나타내었고, 성능의 저하로부터 회복까지 소요된 시간을 적분하여 기반시설의 회복탄력성을 나타내었다. 회복탄력성 삼각형이라고 부르는 이 같은 개념은 도시 방재 분야에서도 재난으로 인해 손상을 입은 후의 가동능력을 도식화하여 나타내었다. Kim (2012)는 손상으로 인한 가동능력의 손실과 시간에 따른 회복 및 복구의 관계를 보여주었으며, 세로축을 기반시설의 가동률, 회복에 소요되는 시간을 가로축으로 하여 회복탄력성 삼각형을 정의하였다. 즉, 삼각형의 크기를 줄일수록 회복탄력성이 강화되는 것이다. Rose(2007)는 정적 회복탄력성과 동적 회복탄력성을 각각 생산성 변화율의 변동비와 최대와 최소 복구소요 노력에 대한 생산성의 차이로 표현하였다. Yu et al.(2012)은 비용으로 회복탄력성을 정량화하였다. 피해비용과 복구비용의 합을 회복탄력성 비용으로 정의하여 그 비용이 낮을수록 회복탄력성이 높음을 나타내었다. 하지만, 정량적 평가를 위해 제시된 식들도 시스템의 성능과 시간의 상관관계에 대한 정보의 부재, 상대적인 시설의 상태 표현 등 정량적인 평가 기준의 실제 적용에 어려움을 겪고 있다. 본 연구에서는 발전용댐의 전력생산 성능평가를 위해 Kim et al.(2021)이 제시한 발전용댐의 회복탄력성을 적용하였다. 전력생산을 위한 적정 수위를 발전용댐 전력생산 시스템의 평형상태로 보고 운영에 따라 변화하는 저수위가 적정 수위로 신속하게 회복되는지를 평가한다. 해당 회복탄력성을 정량화하기 위해서 Bruneau et al.(2003)이 제시한 회복탄력성 삼각형을 도입하였다. 시나리오별 발전용댐의 회복탄력성을 하나의 값으로 표현하기 때문에 비교를 손쉽게 할 수 있다.

#### 2.1.2 발전용댐 회복탄력성

발전용댐의 회복탄력성은 본래 성질에 가해진 손상을 복구하는데 소요되는 복구시간에 초점을 두어 접근하는 공학적 회

복탄력성을 근간으로 정의하였다(Folke, 2006). 발전용댐의 운영적 측면에서 주 목적은 전력생산이므로 이를 기준으로 내구성(Robustness), 신속성(Rapidity)의 구성요소를 도출하였다. 내구성은 발전용댐의 저수위, 신속성은 전력생산을 위한 적정수위로 회복되는 시간으로 정의하였다(Fig. 1). 발전용댐에서 전력생산은 댐 저수위로 인한 유효낙차, 발전에 사용되는 사용수량으로 정의된다. 전력생산을 최대화 하기 위해서는 저수위를 높게 유지하여 유효낙차를 크게하고 발전수량을 증가시키면 된다. 그러나 댐에 저장되어 있는 수자원은 한정적이기 때문에 사용수량을 증가시키면 저수위가 감소하여 유효낙차가 감소되기 때문에 적절한 사용수량과 수위유지가 필수적이다. 따라서 Fig. 1(a)와 같이 세로축을 저수위로 하여 회복탄력성을 정의하였다. 이 같은 개념적인 접근으로 Fig. 1에서 점선으로 둘러싸인 면적 B를 회복탄력성, 면적 A를 총 손실로 정의하였다. 발전용댐의 회복탄력성을 정의한 수식은 다음과 같다.

$$R = \int_{t_0}^{t_b} W(t) - W_{lowest} dt \tag{1}$$

$$\begin{cases} W_d(t) & t_0 < t < t_a \\ W_r(t) & t_a < t < t_b \end{cases}$$

여기서,  $R$ 은 회복탄력성,  $t_a$ 는 회복 시점,  $t_b$ 는 발전 적정수위 회복완료 시점,  $t_0$ 는 발전 손실 발생시점,  $W(t)$ 는 시간에 따른 저수위,  $W_d(t)$ 는 운영함수,  $W_r(t)$ 는 회복함수,  $W_{lowest}$ 는 댐의 저수위(LWL, Low Water Level)이다.

발전용댐의 회복탄력성을 적용한 개념예시는 Fig. 1(b)와 Fig. 1(c)로 구분할 수 있다. Fig. 1(b)는 회복시간이 다른 예시로 동일한 시간 간격에서 회복시간이 빠른  $T_1$ 이  $T_2$ 보다 회복탄력성이 크다( $R_1 > R_2$ ). 이는  $T_1$ 의 경우가 전력 생산시 유효낙차가 더 큰 상태로 운영되기 때문에 전력생산량이 더 많다. Fig. 1(c)은 회복시간은 동일하나 회복함수가 다른 경우로  $F_1$ 이  $F_2$ 와  $F_3$ 보다 회복탄력성이 큰 것이라 할 수 있다( $R_1 > R_2 > R_3$ ). 따라서 R이 클수록 발전용댐의 전력 생산 성능측면에서 바람직한 경우라 할 수 있다. 이러한 회복탄력성 개념을 활용하여 발전용댐의 발전성능 평가 방법론을 제시할 수 있다.

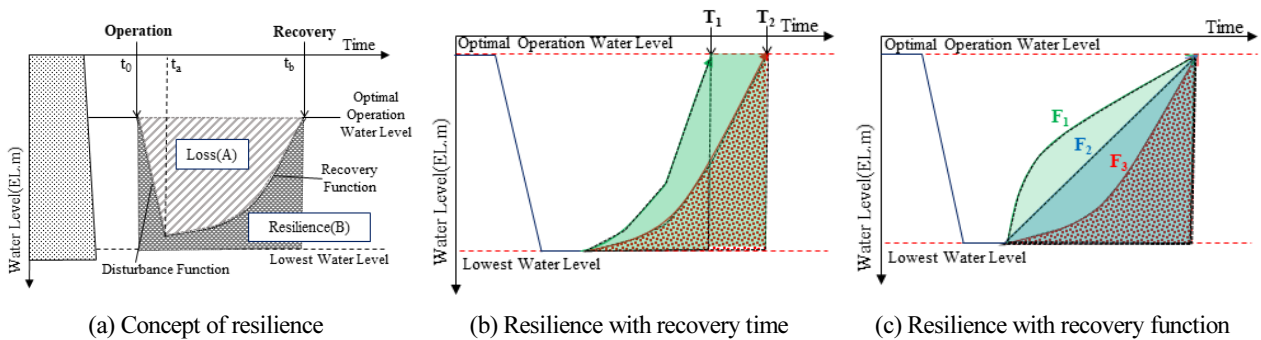


Fig. 1. Resilience of Hydropower Reservoir

### 2.1.3 발전용댐 회복탄력성 사례분석

발전용댐의 회복탄력성 개념을 적용하기 위하여 과거 실적을 바탕으로 사례분석을 실시하였다. 사례분석 대상댐은 강원도 화천군 북한강에 있는 높이 81.5 m, 길이 435 m의 중력식 콘크리트댐이다. 국내 발전용댐 중 최대의 규모로 홍수기에는 홍수기 제한수위 EL.175 m로 비홍수기에는 상시만수위 EL.181 m, 저수위 EL.156.8 m로 댐을 운영한다. 해당 댐은 1973년부터 홍수기 제한수위를 설정하여 운영중에 있는데 수위를 낮추어 운영하게 되는 홍수기에는 전력생산측면에서는 전력 손실을 유발할 수 밖에 없다. 이럴 경우 앞선 발전용댐의 회복탄력성 정의에 의하여 회복탄력성의 값이 낮게 나타난다. 이를 확



인하기 위하여 홍수기 제한수위를 설정한 1973년 이전·이후의 발전용댐 운영에 회복탄력성을 적용하였다. 유사한 수문상황을 고려하기 위하여 연평균 유입량이 유사한 1971년과 1986년을 비교하였다. Table 1은 각 기간별 연평균 유입량, 저수위, 방류량, 여수로방류량, 발전량을 비교한 결과이며 홍수기와 전체기간에 대한 회복탄력성 값도 비교하였다. Table 1에 의하면 1971년과 1986년에는 연평균 유입량과 연평균 방류량은 유사하나 홍수기 제한수위가 설정되어 있지 않아 1971년 연평균 저수위가 2 m 가량 높게 나타났다. 따라서 연평균 발전량은 1971년에 422,421 MWh로 1986년보다 약 12.3%로 증가한 것을 확인할 수 있었다. 발전용댐 회복탄력성의 정의에 의거 회복탄력성은 더 높은 수위를 유지하여 운영한 1971년이 1986년보다 0.1이 높은 것으로 나타났다. 특히 홍수기 기간에는 약 0.24로 차이가 더 큰 것을 확인할 수 있었다. 이처럼 홍수기 제한수위로 인해 회복탄력성이 낮은 운영이 이루어졌고 이로 인해 전력손실이 발생함을 확인하였다.

**Table 1.** Comparison of Resilience by year

Contents	1971	1986
Annual Mean Water Level (EL.m)	171.6	169.3
Annual Mean Inflow (m <sup>3</sup> /s)	100.91	98.13
Annual Mean Outflow (m <sup>3</sup> /s)	88.84	85.35
Spillway Discharge (m <sup>3</sup> /s)	6,329	7,666
Power Generation (MWh)	422,421	376,201
Resilience (All Season)	0.6100	0.5153
Resilience (Flood Season)	0.7741	0.5354

## 2.2 발전용댐의 회복탄력성을 고려한 성능평가 방법론

### 2.2.1 회복탄력성의 프레임워크

회복탄력성 이론에서는 비유나 다이어그램, 그래프, 사례 등을 주로 사용하여 관련된 현상과 개념을 직관적으로 이해하려 한다. 기본적으로 복잡한 시스템을 다루고 있어 수식이나 모형이 오히려 오류를 일으킬 수 있다고 생각하기 때문이다(Ludwig et al., 2002). 따라서 회복탄력성을 다루는 문헌들에서는 시스템의 구성 요소 사이의 동적인 관계를 설명하는 다양한 이론적 프레임워크를 확인할 수 있다(Holling and Gunderson, 2002). 이와 같은 이론적 프레임워크는 어떤 현상이나 문제에 대해서 이해하기 위한 노력이다. 또한, 시스템의 여러 구성 요소와 요소들간의 새로운 관계에 대해 정의를 내리기 위한 과정이라고 볼 수도 있다. 이를 위해, 이론적 프레임워크를 기반으로 하는 많은 경험적, 실증적 연구가 필요하다.

### 2.2.2 발전용댐 성능평가 방법론

발전용댐의 전력생산 성능의 회복탄력성은 저수위로 산정이 가능한데, 저수위는 댐의 유입량과 방류량, 현재 저수량으로 표현 가능하다. 전력생산량은 저수위와 방류량과 관계가 있으므로 수위와 방류량이 중요한 고려대상이 된다. 회복탄력성이 높으면 전력생산량은 증가시킬 수 있으나 수재해 위험도가 커지기 때문에 회복탄력성으로 최적의 운영률을 제시하기 위해서는 여수로 방류량, 홍수 위험일수, 가뭄 위험일수를 추가적으로 고려하여 적용방법론을 구성하여야 한다(Fig. 2). 발전용댐의 전력생산 성능을 평가하기 위하여 Fig. 2와 같은 절차를 제안하였다.

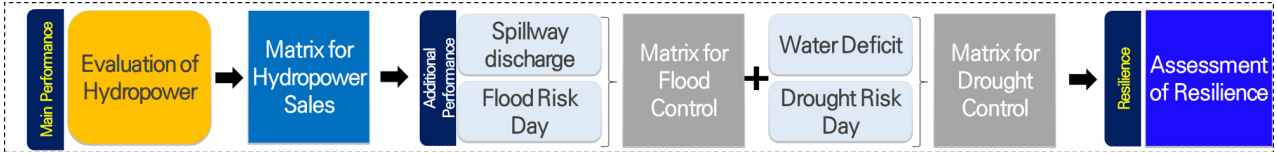


Fig. 2. Performance Evaluation of Hydropower Reservoir

첫 번째 단계는 발전용댐의 주요기능인 전력생산량을 평가하는 것이다. 그러나 기존의 발전용댐 운영 평가방식인 발전량을 최대화하는 것이 아니라 전력판매액을 최대화 하는 것으로 운영률을 정의하였다. Fig. 3에 나타나 있듯이 저수위가 가장 높은 달이 8~10월에 전력판매단가인 SMP 단가가 가장 낮은 것을 확인하였다. 이는 저수위가 높은 8~10월에 전력생산량이 제일 많다고 하더라도 전력판매액이 최대가 아닐 수도 있는 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 전력생산량이 최대가 아닌 전력판매액이 최대가 되는 것을 발전성능으로 정의하여 평가방법론을 제시하였다.

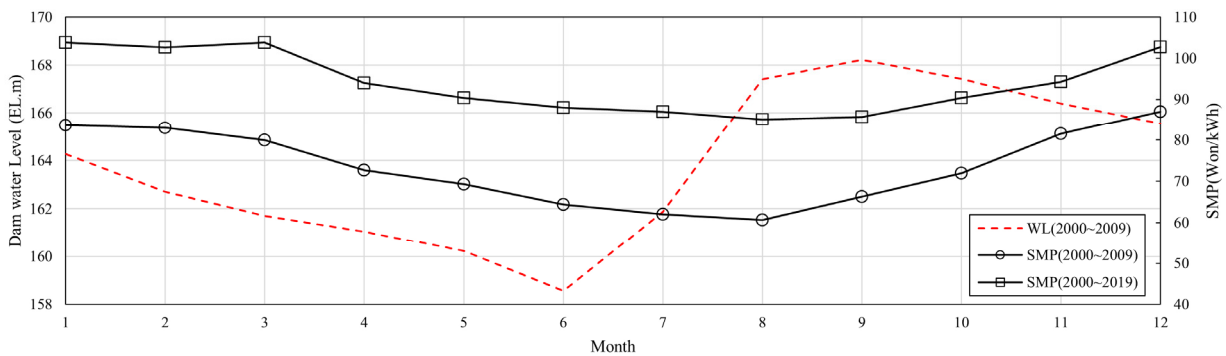


Fig. 3. Comparison of monthly SMP price and water level at Hwachoeng reservoir (2000~2019)

두 번째 단계에서는 발전용댐의 부가기능을 평가하는 단계로 치수성과 이수성을 평가한다. 첫 번째 단계에서 전력판매액을 기준으로 최적 운영률을 선정하나 발전 성능의 점수가 유사한 경우에는 부가기능인 치수성과 이수성을 기준으로 최적 운영률을 선정하게된다. 또한 전력판매액을 극대화 하기 위하여 과도한 저류 및 방류를 수행할 경우 극심한 홍수와 가뭄의 피해를 유발할 수 있기 때문에 이를 방지하기 위해 최소한의 치수성과 이수성을 제한 값을 지정하였다. 세 번째 단계는 시나리오별 회복탄력성을 산정하고 시나리오별 발전성능, 치수성능, 이수성능을 정량화하고 비교우위를 결정할 수 있다.

기본적으로 운영결과를 통해 발전성능, 치수성능, 이수성능을 평가한다. 발전성능은 산출된 발전량과 월별 전력판매단가를 활용하여 전력판매액을 산출하고 최대값과 최소값을 이용하여 발전성능 값을 0~1로 정규화한다. 치수성능은 수위가 상시만수위를 넘어서는 홍수위험일수(FSD, Flood Risk Day)와 여수로 방류량(SD, Spillway Dishcharge)를 사용하였고, 이수기능은 운영수위가 저수위 아래로 떨어져 일정한 방류를 진행할 수 없는 가뭄위험일수(DRD, Drought Risk Day)와 물 부족량(WD, Water Deficit)(Lee et al., 2013)을 사용하였다. 발전성능과 마찬가지로 해당 값들은 차원이 다르기 때문에 정규화하여 데이터 범위를 0~1사이의 값으로 변환하였다. 과거 10개년의 실적 자료를 활용하여 동일한 방법으로 치수성능과 이수성능 값을 산정하고 이를 각각의 제한 범위로 설정하였다.

$$PI = (PC - PC_{min}) / (PC_{max} - PC_{min}) \tag{2}$$

$$FI = ((FSD - FSD_{min}) / (FSD_{max} - FSD_{min}) + (SD - SD_{min}) / (SD_{max} - SD_{min})) / 2 \tag{3}$$

$$DI = ((DRD - DRD_{min}) / (DRD_{max} - DRD_{min}) + (WD - WD_{min}) / (WD_{max} - WD_{min})) / 2 \quad (4)$$

여기서,  $PI$ 는 발전성능 평가지수,  $FI$ 는 치수성능 평가지수,  $DI$ 는 이수기능 평가지수이다.  $PC$ 는 해당 시나리오의 전력판매액,  $FSD$ 는 홍수위험일수,  $SD$ 는 연평균 여수로 방류량,  $DRD$ 는 연평균 이수위험일수,  $WD$ 는 물 부족량을 의미하며  $X_{max}$ 는 지표의 최대값,  $X_{min}$ 는 지표의 최소값을 의미한다.

### 2.3. 댐 운영 시나리오 적용결과

#### 2.3.1 댐 모의운영 개요

발전용댐 회복탄력성 성능평가 방법론을 적용하기 위하여 미공병단에서 개발한 HEC-5를 이용한 댐 모의운영을 수행하였다. 댐 모의운영을 적용할 대상은 북한강수계에 위치한 화천댐, 춘천댐, 의암댐, 청평댐을 대상으로 하였다. 해당 댐들은 모두 직렬로 연결되어 있으며 상류댐의 방류량은 하류댐의 유입량의 영향을 준다. 성능평가에 중요한 영향을 미치는 유입량은 2006~2013년으로 약 8개년의 일자료 유입량을 사용하였다. 해당 기간은 임남댐 건설로 인한 한강수계의 유입량 패턴이 변화한 이후 충분한 시간이 경과한 이후이며 극심한 가뭄이 발생한 2014~2015년 이전이다. 한강수계의 일반적인 상황을 고려하기 위하여 비교적 유입량 패턴이 일정한 기간을 대상으로 하였다.

댐 모의 운영 시나리오를 구축하기 위하여 국내 발전용댐의 운영기준을 조사·검토하였다. 국내 발전용댐은 상시발전형식으로 수위별 발전방류량이 정해져 있지 않으나 하천법 및 댐과 보 연계운영기준에 의거하여 발전용댐도 운영계획을 수립하여야 한다. 발전용댐의 연계운영 수립과정은 과거 실적데이터를 근거로 월별 예상유입량을 산정한 후 월별 목표수위와 방류계획을 설정한다. 기본원칙은 갈수 및 홍수피해가 발생하지 않도록 설정하며 최종적으로 기타 전력수급계획, 발전정지계획 등을 참고하여 방류계획을 설정한다. 따라서 발전용댐은 운영계획 수립시 정확한 예측 유입량과 동시에 목표수위 설정이 방류량을 결정한다고 할 수 있다. 목표수위는 일반적으로 홍수기 전·후인 6월과 9월을 기준으로 선정하는데 이 값은 과거 실적 평균값으로 산출한다. 따라서 본 연구에서는 각 발전용댐의 월평균 저수위와 방류량을 기준으로 목표 저수위와 목표방류량을 조정해가며 운영하는 시나리오를 구축하였다. Fig. 4는 목표수위와 목표방류량의 시나리오를 나타내는 그림이며, 두 값 모두 평균값을 기준으로 일정비율로 조정된다. 목표수위와 목표방류량 모두 최저와 최고 변동량 사이를 15단계로 나누어 시나리오를 구성하였다.

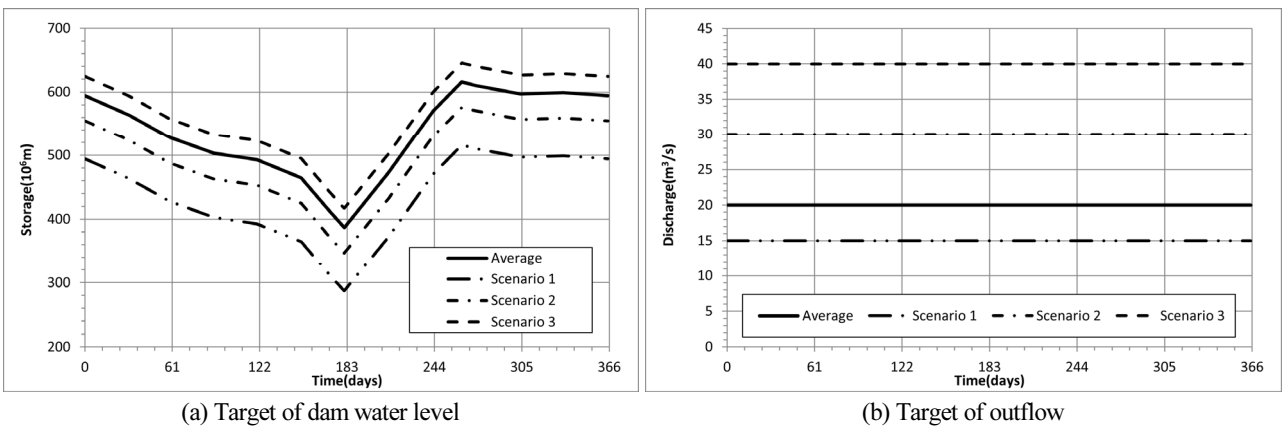


Fig. 4. Scenario of dam operation

### 2.3.2 댐 모의운영 결과

목표수위 및 목표방류량에 따른 발전성을 재평가하기 위하여 한강수계 내 발전용댐들을 대상으로 댐 모의운영을 수행하였다. 발전용댐 제원은 한국수력원자력에서 제공하는 자료를 사용하였으며, 시나리오별 생산된 발전량으로 전력판매단가를 곱하여 전력판매액을 산출하였다. 전력판매액이 최대가 되는 시나리오를 도출한 뒤 치수성과 이수성을 각각 도출하였으며 부가적인 성능에 대한 지표 값을 산정한 후 최종적으로 시나리오별 회복탄력성을 도출하였다.

목표저수위와 목표방류량을 변화시켜가며 댐 모의운영한 결과 Fig. 5와 같이 매트릭스 형태로 최적 운영방안을 도출하였다. Fig. 5에 나타난 각 매트릭스 형태는 가로축이 목표저수위 변화, 세로축이 목표방류량의 따른 결과이다. 즉 매트릭스에서 오른쪽으로 갈수록 목표저수위를 상향조정한 것이고, 아래로 갈수록 목표방류량을 증가시킨 것을 의미한다. 0~1까지의 값을 갖는 매트릭스이며 1에 가까울수록 성능이 좋다는 것을 의미한다. 화천댐의 경우 목표수위를 낮추고 방류량을 증가시키는 방안이 가장 많은 전력판매액을 도출할 수 있는 것으로 나타났다. Fig. 5(b)는 치수성능으로 앞서 설명한 것처럼 일방류량을 증가시키고 목표 저수위를 낮춰 운영할수록 치수성능이 좋은 것으로 나타나며 반대로 Fig. 5(c)에 나타난 것처럼 목표 방류량을 적절히 유지하면서 목표수위를 상향 조정하여 운영할수록 이수성능이 좋은 것으로 나타났다. 화천댐의 결과 일정을 조정방식으로는 목표 저수위를 감소시키고 목표방류량을 증가시키는 것이 전력판매액이 최대가 되는 결과로 나타났다. Table 2에는 각 댐별 최대 전력판매액 발생 시나리오와 그에 따른 성능 결과를 나타낸 것이다. 전력판매액을 최대치로 운영할 경우 의암댐과 청평댐은 회복탄력성 측면에서 더 우수한 운영을 수행하며 전력판매액과 더불어 치수성능과 이수성능도 확보할 수 있다. 화천댐과 춘천댐의 경우 전력판매액은 증가시킬 수 있으나, 이수 성능은 상대적으로 낮은 값을 갖으며 회복탄력성 측면에서도 낮은 결과를 나타내는 것이 확인되었다. 이는 화천댐과 춘천댐의 방류량의 증가가 의암댐과 청평댐에 적정수위를 유지시켜주며 발전을 수행가능하도록 운영된 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서는 단순히 실적 저수위와 방류량을 일정 비율대로 증가·감소시켜 운영한 것으로 다양한 운영률을 반영하였다고 할 수 없기 때문에 향후 무작위 시나리오에 대한 연구가 추가된다면 전력판매액의 최대 운영률을 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

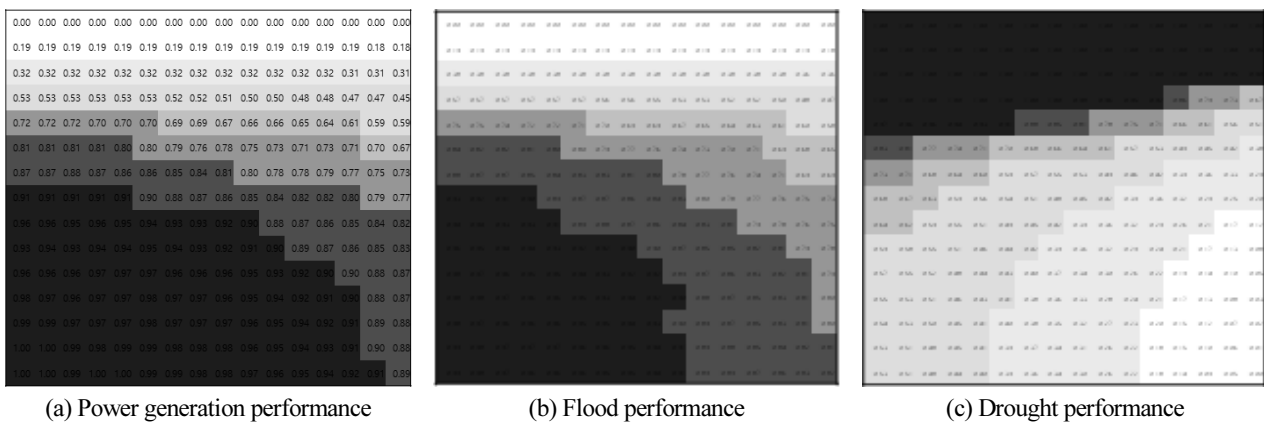


Fig. 5. Performance matrix for Hwacheon dam

Table 2. Performance Results of Hydropower Dam with Scenario

Dam	Scenario (WaterLevel/Outflow)	Power Generation (MWh)	Flood Performance	Drought Performance	Resilience
Hwacheon	-120000/+30	204,942	0.94	0.64	0.350
Chuncheon	+20000/+60	120,451	0.93	0.74	0.300
Uiam	+10000/+60	174,531	0.92	0.77	0.729
Cheongpyeong	-70000/+60	416,556	1.00	0.94	0.858



### 3. 결론

수력발전의 발전용댐은 통합물관리체계의 한 축으로써, 국가 주요 관심 분야인 에너지와 수자원과 직접적으로 관련 있는 신·재생에너지로써 그 위상이나 가치가 재평가될 필요가 있다. 그간 다양한 산업기술이 발전해왔음에도 불구하고 댐 운영 및 평가에 대해서는 기존의 방법론을 고수하고 있는 실정이며, 특히 전력생산이 주목적이자 이익인 발전용댐 관리자의 경우 수자원 연계운을 위해 전력손실을 감수하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 발전용댐의 전력생산 시스템에 회복탄력성 개념을 도입하여 발전용댐의 회복탄력성을 정의하고 주기능인 발전성능을 최대화하는 운영 기준을 마련하고자 성능평가 방법론을 도입하였다. 발전용댐의 전력생산능력을 평가하기 위하여 Kim et al.(2021)은 회복탄력성(Resilience) 지표를 도입한 바 있고 해당 정의를 바탕으로 발전용댐의 주기능의 발전성능인 전력생산능력과 부가기능인 치수성능과 이수성능을 평가하는 방법론을 제안하였다.

북한강 수계에서 직렬로 연결되어 있는 4개의 발전용댐을 대상으로 댐 운영 방식을 변화시켜 가며 운영하는 시나리오를 구축하였다. 댐 운영 시나리오는 실제로 연계운영계획 수립 시 설정하는 목표수위와 목표방류량을 조건으로 하였다. 과거 실적 평균값을 기준으로 일정을 증가시키거나 감소시키는 운영을 수행하여 전력판매액이 최대가 되는 운영률을 산정하였다. 댐 모의 운영은 미공병단에서 개발한 HEC-5를 활용하였고, 모의결과를 활용하여 발전성능(전력판매액), 치수성능(홍수위험일수, 여수로방류량), 이수성능(가뭄위험일수, 용수부족량)으로 평가하였으며 최적안은 발전성능으로만 산정한다. 치수성능과 이수성능은 과거 실적자료를 토대로 산정한 성능 점수 범위 이내로만 구성되도록 제한하였다.

본 연구는 과거 유입량을 사용하여 운영 시나리오별 회복탄력성을 평가하는 체계를 제시하였다. 시나리오 기반의 발전용댐별 회복탄력성 관점에서 최적의 목표수위 및 방류조건을 도출하였다. 발전용댐의 연계운영 과정에서 주 성능인 전력생산을 최대화하기 위해서 회복탄력성 관점에서 발전용댐의 운영이 수행되어야 함을 확인할 수 있었다. 그러나 현재 시나리오는 일정을 증가로 수행되었기 때문에 다양한 시나리오가 반영되었다고 볼 수 없다. 따라서 향후 연구를 통해 이러한 한계점이 극복된다면 발전용댐의 운영 계획을 회복탄력성 관점에서 합리적으로 산정하는 체계를 구축할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 홍수조절과 용수공급효과는 매트릭스 평가 형태로 시나리오별 상대적인 비교를 통한 정규화 값을 점수로 산정하기 때문에 향후 홍수조절편익, 용수공급편익 등을 산출하여 정량적인 결과를 도출한다면 발전손실에 따른 부가적인 경제적 효과를 창출할 수 있을 것이다.

### Acknowledgment

본 논문은 한국수력원자력(주)에서 재원을 부담하여 홍익대학교에서 수행한 연구결과입니다(No. 2019-기술-11호).

### References

- Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., and Von Winterfeldt, D. (2003). A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. *Earthquake Spectra*. 19(4): 733-752.
- Folke, C. (2006). Resilience: The Emergence of a Perspective for Social – Ecological Systems Analyses. *Global Environmental Change*. 16(3): 253-267.
- Folke, C., Carpenter, S., Walker, B., Scheffer, M., Elmqvist, T., Gunderson, L., and Holling, C. S. (2004). Regime Shifts, Resilience, and Biodiversity in Ecosystem Management. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 35: 557-581.
- Folke, C., Carpenter, S. R., Walker, B., Scheffer, M., Chapin, T., and Rockström, J. (2010). Resilience Thinking: Integrating Resilience, Adaptability and Transformability. *Ecology and Society*. 15(4): 20.

- Holling, C. S. (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 4(1): 1-23.
- Holling, C. S. and Gunderson, L. H. (2002). Resilience and Adaptive Cycles. In: *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*. pp. 25-62.
- Kim, D. H., Yoo, H. J., Shin, H. J., and Lee, S. O. (2021). Application Study of Resilience for Evaluating Performances of Hydropower Dam. *Journal of Korea Water Resources Association*. 54(4): 279-287.
- Kim, H. J. (2012). *Development of Community Resilience Framework*. Seoul: NDMI.
- Kim, J. G., Lim, J. H., and Lee, S. H. (2016). *A Research on Urban Resilience for Urban Regeneration*. Daejeon: LHI.
- Peterson, G., Allen, C. R., and Holling, C. S. (1998). Ecological Resilience, Biodiversity, and Scale *Ecosystems*. 1(1): 6-18.
- Rose, A. (2007). Economic Resilience to Natural and Man-made Disasters: Multidisciplinary Origins and Contextual Dimensions. *Environmental Hazards*. 7(4): 383-398.
- Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S. R., and Kinzig, A. (2004). Resilience, Adaptability and Transformability in Social – Ecological Systems. *Ecology and Society*. 9(2): 5.
- Yu, S., Kim, S. W., Park, K. H., Oh, C. W., Park, D. K., and Kim, C. Y. (2012). Quantitative Resilience Analysis of Fiji to Cyclones. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. 12(2): 55-63.

#### **Korean References Translated from the English**

- 김동현, 유형주, 신흥준, 이승오 (2021). 발전용댐의 성능 평가를 위한 회복탄력성 적용방안 제시. *한국수자원학회*. 54(4): 279-287.
- 김정곤, 임주호, 이성희 (2016). 리질리언스 (Resilience) 도시재생 모델에 관한 연구. 대전: LHI.
- 김현주 (2012). *지역사회 방재리질리언스 프레임워크 개발*. 국립방재연구원. 서울: NDMI.
- 유순영, 김성욱, 박경호, 오창환, 박덕근, 김창용 (2012). 사이클론에 대한 피지의 방재력 정량화 연구. *한국방재학회 논문집*. 12: 55-64.