



Application study of resilience for evaluating performances of hydropower dam

Kim, Dong Hyun^a · Yoo, Hyung Ju^b · Shin, Hong-Joon^c · Lee, Seung Oh^{d*}

^aPh.D Candidate, Department of Civil Engineering, Hongik University, Seoul, Korea

^bPh.D Candidate, Department of Civil Engineering, Hongik University, Seoul, Korea

^cSenior Research Engineer, Hydropower Design & Technology Group Equipment Engineering Lab. KHNP Central Research Institute, Daejeon, Korea

^dProfessor, Department of Civil Engineering, Hongik University, Seoul, Korea

Paper number: 21-011

Received: 19 February 2021; Revised: 22 March 2021; Accepted: 22 March 2021

Abstract

Hydropower dams in Korea were built for power generation at the time of construction, but they have been operated with the additional purposes of supplying water, controlling floods, and environmental improvement through an agreement with the Han River Flood Control Office. However, these operations will result in losses of power generation, and may adversely affect the energy utilization. Therefore, it is the time to re-evaluate diversification of the dam operation method. In this study, the concept of resilience is introduced to evaluate the multi-function of hydropower dams. The resilience of the hydropower dams was defined as the recovery capacity of the dam water level, and framework was proposed to evaluate water supply and flood control performance. The applicability of resilience in hydropower dam was reviewed as a simulation result using historical data. In the future, if the economic feasibility of the dam performance such as power generation, water supply, flood control, and environmental improvement is evaluated, it can be utilized in establishing the operation standards for hydropower dams in line with the policy.

Keywords: Hydropower reservoir, Resilience, Performance evaluation, Power, Dam operation

발전용댐의 성능 평가를 위한 회복탄력성 적용방안 제시

김동현^a · 유형주^b · 신희준^c · 이승오^{d*}

^a홍익대학교 토목공학과 박사과정, ^b홍익대학교 토목공학과 박사과정, ^c한국수력원자력(주) 중앙연구원 선임전문원, ^d홍익대 토목공학과 교수

요 지

국내 발전용댐은 건설 당시 발전을 목적으로 지어졌으나, 최근 한강홍수통제소와 협약을 통해 일부 용수공급, 홍수조절, 환경개선 등을 부가목적으로 운영되고 있다. 그러나 이러한 운영은 주목적인 발전량에 손실을 가져올 것으로 예상되므로, 에너지 활용 측면에서도 부정적 영향을 끼칠 수 있다. 따라서 현시점이 운영방식에 대한 다각적인 측면의 재평가가 필요한 시점이며, 본 연구에서는 회복탄력성 개념을 도입하여 발전용댐의 다양한 성능을 평가하고자 한다. 댐의 수위 회복력을 발전용댐의 회복탄력성으로 정의하였고 이-치수 성능을 평가하기 위한 회복탄력성 프레임워크를 제시하였다. 과거 유입량 자료를 활용한 댐 모의운영 결과로 적용가능성을 검토하였다. 향후 발전, 환경개선, 홍수조절 등 수자원 활용에 대한 경제성 평가가 병행된다면 변화된 정책에서의 발전용댐 운영 기준을 수립하는데 활용 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어: 발전용댐, 회복탄력성, 성능평가, 발전량, 댐 운영

*Corresponding Author. Tel: +82-2-320-3046
E-mail: seungoh.lee@hongik.ac.kr (S. O. Lee)

1. 서론

국내 발전용댐은 1931년 운암수력을 시작으로 약 90여년을 거쳐 건설·운영·관리되어 왔다. 전력이 부족하던 1960년대까지 발전용댐은 전력계통의 기저부하 전원으로 운영되었고, 1980년대 이후에는 양수발전소 등의 신규 전원개발로 수력 분야를 발전시켜 왔으며 최근까지 전력의 품질을 담당하는 첨두부하 전원으로 역할을 수행하였다. 발전용댐은 발전가동과 정지시간이 짧아 신속한 전기 생산이 가능하므로 갑작스러운 정전사태 등과 같은 유사시에 비상발전원의 중요한 역할을 수행한다. 이렇게 발전용댐은 ‘발전’이라는 단일목적으로 그 역할을 충실히 수행하였으나, 전력원으로 수자원을 활용한다는 특수성으로 인해 발전 이상의 기대치가 부여되어 왔다. 즉, 발전용댐은 발전과 함께 수자원의 가치와도 그 맥을 같이 한다고 볼 수 있다. 국내의 경우 계절별 강수량의 편차가 크고 지역별로도 활용수자원이 다르기 때문에 수자원의 관리 및 배분의 갈등이 지속되어 왔다. 최근에는 기후변화 및 기후변동성으로 인한 홍수 및 가뭄 등의 재해발생 빈도가 높아짐에 따라 수자원의 사용에 대한 효율성은 더욱 강조되고 있다(Kim *et al.*, 2020). 이러한 상황에서 국내에서 가장 큰 권역인 한강수계 내에 존재하는 다수의 발전용댐의 역할은 수자원 측면에서 무시할 수 없는 것이 현실이다. 또한, 최근 국내 정책기조를 고려하였을 때 발전용댐은 수자원 관리 측면에서 중요한 위치를 차지하고 있음을 알 수 있으며 발전용댐의 가치가 새롭게 평가되어야 할 필요성이 있다.

2018년 6월 정부조직법 개정을 시작으로 물관리기본법, 물기술산업법을 제·개정함에 따라 수량과 수질을 통합 관리하는 업무를 환경부로 일괄적으로 통합하였다. 이같은 구조개편은 국내 물 관리 정책이 수질·환경 관리로 전환되었음을 의미하는 것이며 수량·수질·수해에 대응을 일원화된 체계로 관리하고자 하는 것이다. 한강수계 내 위치하고 있는 한국수력원자력의 발전용댐도 통합물관리체계의 대상으로 포함되어 있으며 통합물관리체계 기반 마련, 물안전 확보를 위한 신속 대응체계 구축, 깨끗한 먹는 물 공급, 새로운 물 가치 창출 등의 주요 핵심성과에 기여하는 바가 크다고 할 수 있다. 이러한 정책기조에 발전용댐의 역할을 명확하게 제시할 필요가 있다. 이에 2020년 6월 한국수력원자력은 발전용댐의 다목적활용을 선포하여 발전용댐 관리자의 유역차원 수계관리에 대한 역할을 강조하였다(Kim *et al.*, 2020).

또한 2020년 7월 정부는 국가 프로젝트 ‘한국형 뉴딜’을 제안하였으며 이 중 가장 주목하는 것이 지속가능한 성장을 도모하는 ‘그린뉴딜’ 정책이다. 수력발전은 한국형 ‘그린뉴딜’의 그린 에너지 분야와 깨끗하고 안전한 물 관리체계 구축의 인

프라 녹색전환 분야 모두와 밀접한 관련이 있다. 즉, 수력발전의 역할은 한국판 그린 뉴딜에 부합한다고 할 수 있다. 한편, 정부는 2020년 10월, 석탄발전을 재생에너지로 대체하는 2050년 탄소중립을 선언하였다. 탄소중립은 배출되는 탄소와 흡수되는 탄소량을 같게하여 탄소 ‘순배출이 0’이 되게 하는 것으로 정부는 기후위기 문제 대응에 대해서 세계적 흐름에 적극 동참하게 되었다. 2020년 12월에는 탄소중립 추진전략을 마련하였고 3대 정책중 하나가 에너지 주공급원을 화석연료에서 신·재생에너지로 전환하는 것이다. 수력발전은 대표적인 신·재생에너지로 2050 탄소중립의 목표달성을 위해 필요한 에너지원이 될 것으로 보인다.

이같은 정책기조에 따라 수력분야는 새로운 발전 계기의 틀이 마련되었으나, 그간 지속되어 온 사회적 분쟁 및 객관적 가치평가 부재 등으로 인해 오히려 정책 기조에 따라가지 못하는 어려움이 발생하고 있다. 특히, 탄소중립이라는 목표에는 에너지자원의 효율적 활용이 중요할 것으로 보이나, 수자원의 경우 사용효율이 구축되어 있는 인프라 수준에 비해 저조한 수준이다. 2017년 기준 최근 5년간 허가량 대비 하천수 평균 사용률이 약 60.9%로 조사되었다(Lee *et al.*, 2017). 국내는 한정되어있는 수자원의 활용성, 즉 댐 운영 측면에서 기술적·제도적 개선의 여지가 많은 실정이다. 예를 들어, 기술적 측면에서 댐 운영의 경우 선형계획법(Linear Programming, LP), 동적계획법(Dynamic Programming, DP), 추계학적 동적계획법(Stochastic Dynamic Programming, SDP) 등 다양한 최적화방법이 연구되어 왔으나 주로 이수를 목적으로 최적운영률이 제시된 경우가 대부분이다(Yoon, 2018). 그러므로 주목적이 ‘발전’인 발전용댐에 적용하기는 적합하지 못하다. 현재 국내 발전용댐은 주목적인 ‘발전’을 최우선으로 하되 수계 내 수해에 대응하기 위한 이·치수 측면을 고려하여 운영하는 것을 요구하고 있다. 이와 같은 발전용댐의 운영여건의 변화에 따라 다양한 측면에서 지속가능하게 발전용댐을 유지·관리하기 위한 방안과 이를 평가하는 방법에 대한 필요성이 높아지고 있다.

이에 본 연구는 최적운영을 제시하기 위해 댐의 발전기능 평가 시 회복탄력성(resilience)이라는 개념을 도입하고자 한다. 공학분야에서 회복탄력성은 일반적으로 어떤 시스템에 교란이 발생한 후 시스템이 원래되는 회복되는 것을 말하는 데, 이 때 회복의 정도, 회복시간 등으로 회복탄력성을 정의한다(Holling, 1996). 이러한 정의는 발전용댐의 발전기능에 적용할 수 있다. 댐의 발전량은 수위와 수량의 함수이고 수위와 수량은 반비례 관계에 있다. 발전량을 최대화하기 위해서는 적정수위를 유지하는 것이 필요하고 이를 위해서는 수량을 확보해야 한다. 그러나, 이·치수 기능을 위해서는 필요수량을 사

용해야하므로 이·치수의 기여도에 따라 발전을 위한 적정수위로 회복되는 시간이 달라진다. 이러한 특성은 회복탄력성 정의에 대입할 수 있으며 본 연구에서 발전용댐의 회복탄력성 정의, 회복탄력성 평가 방안을 제시하고자 한다.

2. 회복탄력성(Resilience)

2.1 회복탄력성 관련 연구사례

회복탄력성(Resilience)이라는 개념은 생태학 분야에서 처음 사용되었는데 생태시스템이 내·외부 교란에 의해 본래의 기능을 상실한 후 다시 평형상태로 회복되는 것을 말한다(Holling, 1973). 이후 다양한 분야에서 각 분야의 목적에 따라 회복탄력성의 개념이 정립되었고 Walker *et al.* (2004)는 사회-생태시스템(Social Ecological System, SES)을 설명하기 위하여 3가지 특성(resilience, adaptability, transformability)과 그 관계를 제시하기도 하였다. 또한 일부 연구자들은 회복탄력성을 생태적 회복탄력성과 공학적 회복탄력성으로 구분하여 설명하기도 하였다(Folke, 2006).

생태적 회복탄력성은 시스템의 구조와 기능의 근본적 변화가 일어나기 전까지 흡수할 수 있는 교란의 크기로 정의하며 안정적인 영역을 복수로 정의할 수 있다. 이러한 생태적 회복탄력성은 지속성(persistence), 변화성, 비예측성에 관심을 기울인다(Holling, 1996). 반면에 공학적 회복탄력성은 교란에 대한 저항과 회복 속도로 정의하였고 안정적인 영역은 오직 평형점 인근으로 정의하였다. 이러한 공학적 회복탄력성은 시스템 기능의 효율성, 불변성, 단일 안정상태 유지에 초점을 두고 있다(Pisano, 2012). 즉, 공학적 회복탄력성은 오직 시스템의 보존을 위한 저항(강건성)과 손상을 대체하는데 소요되는 복구시간(신속성)으로 정의된다.

공학적 회복탄력성은 대표적으로 기반시설의 회복탄력성으로 NIAC (2009)는 재해의 크기 및 지속시간을 감소시키는 능력으로 정의하고 회복탄력성이 높은 기반시설은 각종 재해의 피해와 규모를 경감시키며 복구(회복)에 발생하는 시간을 줄여 손실을 최소화한다고 하였다. 이는 재난 분야에서 송전 시설, 급수시설 등 다양한 시설을 대상으로 활용되었고, 개별 시설마다 시설특성에 따른 회복탄력성 개념이 정립되었다.

국내의 경우에도 재해에 의한 피해를 줄이는 구조적 대안, 재해에 대한 복구 시간을 줄이는 비구조적 대안의 수립을 회복탄력성의 개념을 가지고 설명하기도 하였다(Kim *et al.*, 2011). 본 연구의 대상 기반시설인 발전용댐과 유사한 다목적댐과 농업용저수지에서도 회복탄력성을 적용한 사례가 있다. Kim

et al. (2014)는 회복탄력성의 개념을 도입하여 다목적댐의 홍수조절기능을 평가하였으며, 댐의 안전성 강화 대안을 평가하는 방법을 제시하였다. 이후 Park *et al.* (2018)는 나주호를 대상으로 회복탄력성을 고려한 가상 시나리오별 가뭄 용수공급방안을 도출하였다. 회복탄력성 개념이 다양한 댐 분야에서 활용되었으나 발전용댐에서의 활용이 미미한 실정이다. 본 연구에서는 회복탄력성의 특성 중 외부 교란에 대한 저항(강건성), 평형상태로 회복되는 시간(신속성) 속성으로 발전용댐의 발전기능을 평가하고자 한다.

2.2 발전용댐의 회복탄력성 정의

Bruneau *et al.* (2003)은 회복탄력성의 여러 속성을 하나의 값으로 표현하기 위하여 시스템 기능의 총 손실을 시간과 기능수준으로 정의하였다. 이 정의는 시나리오별 회복탄력성을 하나의 값으로 표현하기 때문에 비교우위를 손쉽게 파악할 수 있다. 이러한 해석적 정의를 활용하여 발전용댐의 회복탄력성을 정의하였다. 발전용댐의 회복탄력성은 강건성을 댐의 수위, 신속성을 회복시간으로 정의하였다(Fig. 1). 발전용댐에서 발전량을 결정하는 인자는 수위와 발전수량이다. 발전수량은 댐의 수위와도 관계가 있기 때문에 수위와 수량을 대표하는 값으로 저수위를 세로축으로 정의하였다. 또한 회복시간이 짧을수록 발전 적정수위에 빠르게 도달할 수 있으며, 더 많은 발전량을 확보할 수 있다. 이 같은 개념적인 접근으로 Fig. 1에서 점선으로 둘러싸인 면적 B를 회복탄력성, 면적 A를 총 손실로 정의하였다. Eq. (1)은 해당 정의를 수식화한 것이다.

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

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

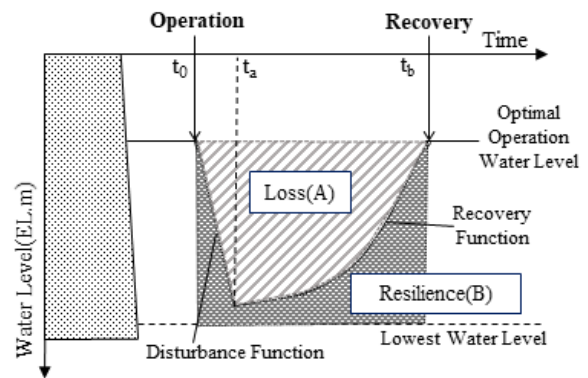


Fig. 1. Resilience of hydro-power reservoir

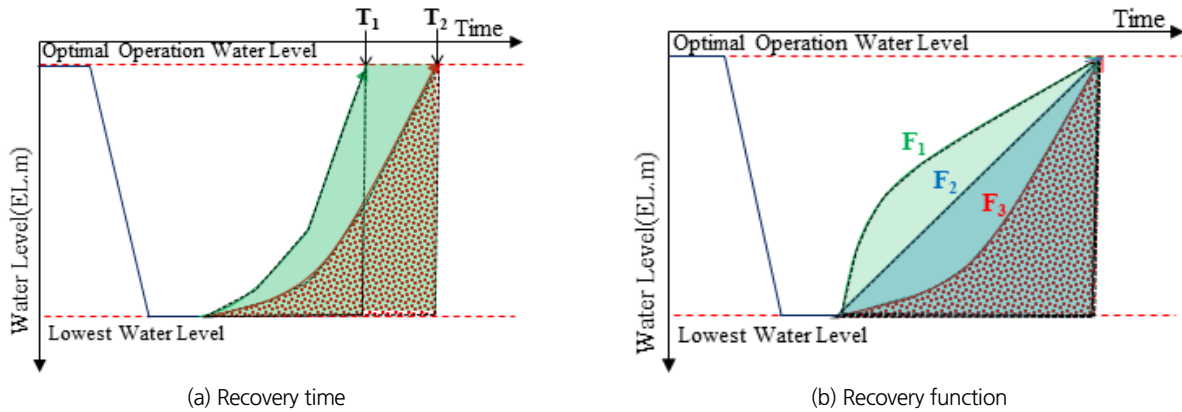


Fig. 2. Examples of resilience at hydropower dam

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(Low Water Level, LWL)이다.

Fig. 2(a)는 회복시간이 다른 예시로 회복시간이 빠른 T_1 이 T_2 보다 회복탄력성이 크다($R_1 > R_2$). Fig. 2(b)는 회복시간이 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 R 이 클수록 발전용댐의 발전기능측면에서 바람직한 경우라 할 수 있다. 이러한 회복탄력성 개념을 활용하여 발전용댐의 발전 성능 평가방안을 제시할 수 있다.

2.3 발전용댐 회복탄력성 개념 적용예시

발전용댐의 회복탄력성 개념과 평가방법론을 적용하기 위하여 시범지역을 선정하였다. 시범지역은 강원도 화천군 북한강에 있는 높이 81.5 m, 길이 435 m의 중력식 콘크리트댐이다. 국내 발전용댐 중 최대의 규모로 타 발전용댐과는 달리 용수 공급능력과, 홍수조절능력을 보유한 것으로 알려져 있다. 해당 댐은 홍수기에는 홍수기 제한수위 EL.175 m로 비홍수기에는 상시만수위 EL.181 m, 저수위 EL.156.8 m로 댐을 운영한다.

본 연구에서 정의한 회복탄력성을 실제 발전용댐 과거실적에 대입하였다. 대상 댐은 1973년부터 홍수기 제한수위를 설정하여 홍수조절에 기여하고 있다. 발전에 있어 홍수기 제한수위 운영은 손실에 해당하기 때문에 해당 댐을 대상으로 1973년 이전과 이후 과거실적에 회복탄력성을 적용하였다. 홍수기 제한수위 운영 전인 1971년과 연평균 유입량이 유사한 1981년, 1986년에 회복탄력성 개념을 적용하였다. Table 1에 연도별 발전용댐 수문자료 및 운영자료, 회복탄력성을 산정하여 나타내었고 Fig. 3은 해당연도의 저수위 실적을 비교한 것이다.

Table 1. Comparison of resilience by year

Contents	1971	1981	1986
Annual Mean Water Level (EL.m)	171.6	171.1	169.3
Annual Mean Inflow (m ³ /s)	100.91	116.64	98.13
Annual Mean Outflow (m ³ /s)	88.84	81.82	85.35
Spillway Discharge (m ³ /s)	6,329	14,556	7,666
Power Generation (MWh)	422,421	385,426	376,201
Resilience (All Season)	0.6100	0.5901	0.5153
Resilience (Flood Season)	0.7741	0.7464	0.5354

Fig. 3에서 홍수기 제한수위가 없던 1971년에는 댐의 수위가 가장 빠르게 상시만수위로 회복(홍수기 기준 25일)한 것으로 나타났다(Point A). 1981년과 1986년에는 홍수기 제한수위로 인해 홍수기 때 댐의 수위를 EL.175 m로 운영하였고(Point B & C), 홍수기가 끝날 무렵 수위를 상시만수위로 회복(홍수기 기준 약 74일)시켜 발전용댐을 운영하였다(Point D). 해당 실적자료를 활용하여 본 연구에서 정의한 회복탄력성을 산정한 결과 홍수기 제한수위 없이 운영하던 1971년의 회복탄력성 값이 더 큰 것으로 나타났다. 해당 연도 전체구간보다 홍수기 기간 동안의 회복탄력성이 연도별 차이를 확연히 확인할 수 있게 한다.

연도별 발전량, 발전방류량, 회복탄력성의 값을 비교해보면 발전측면에서 수위의 회복의 중요성을 확인할 수 있다. 이론적으로 발전량을 증가시키기 위해서는 낙차확보를 위해 댐 수위를 상시만수위로 회복시키는 것이 필요하다. 따라서, 가장 빠르게 회복시킨 1971년에 회복탄력성이 0.61(전 구간)로 가장 높게 나타났다. 이 때 발전량 실적도 비교하여 보면 연간 총 발전량이 422,421 MWh로 1971년에 가장 많은 전력을 생산하였다. 이에 반해 1981년과 1986년은 홍수기 때 제한수위 이하로 운영되었고, 회복탄력성이 각각 0.59, 0.51로 나타났

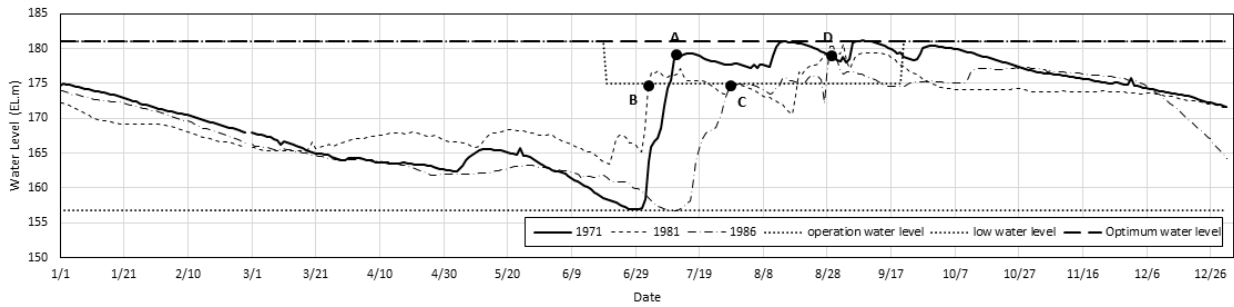


Fig. 3. Comparison of water level in Hwacheon dam

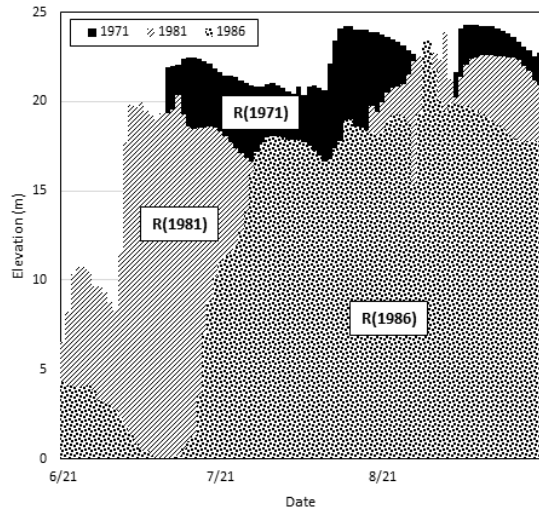


Fig. 4. Comparison of resilience in flood season

다(Fig. 4). 발전량도 각각 385,426 MWh (91.2%), 376,201 MWh (89.1%)로 감소하였다.

1981년의 연평균 발전방류량은 1986년에 비해 적지만 연평균발전량은 더 많다. 이 원인은 연평균 저수위로 확인 할 수 있는데 1981년에는 홍수기에 더 빠르게 제한수위로 회복시켜 수위를 유지시킨 것으로 확인되었다. 실제로 각 연도의 6월의 발전량을 비교하면 1981년 6월 전력생산량이 38,547 MWh로, 1986년 20,826 MWh보다 약 2배 가까이 높게 나타났다. 이는 전력생산 측면에서 수위확보의 중요성을 보여주고 있으며, 회복탄력성이 이를 반영하는 지표임을 확인할 수 있다. 결국, 발전용댐의 다기능 운영에 있어 발전 손실을 최소화하기 위해서는 회복탄력성과 같은 발전 적정수위의 회복 관점에서의 댐 운영이 필요하다. 따라서, 이 치수 기능을 고려하면서 발전 손실을 최소화하는 운영을 위해서는 회복탄력성을 적용한 발전용댐 평가방법론이 필요하며 이를 본 연구에서 제시하고자 한다.

2.4 발전용댐 회복탄력성 평가방법론

발전용댐의 발전기능은 생산된 전력량을 통해 평가하였고 발전량은 발전용댐에 유입되는 유입량과 운영률에 따른 방류량에 의한 저수위와 발전수량에 의해 결정된다. 발전량 측면에서는 유입량이 크고 초기 방류량을 줄여 고수위를 유지하는 것이 유리하나, 고수위를 유지하는 것은 홍수피해에 취약하며 방류량을 줄이는 것은 가뭄 대응에 불리하다. 즉, 회복탄력성이 높으면 발전측면에는 손실을 줄일 수 있으나 수재해 위험도가 커지기 때문에 회복탄력성으로 최적의 운영률을 제시하기 위해서는 여수로 방류량, 홍수 위험지수, 가뭄 위험지수를 함께 고려하여 적용방법론을 구성하여야 한다(Fig. 5).

첫 번째 단계는 댐의 유입량 예측과 발전용댐의 운영률을 정의하는 것이다. 댐의 유입량은 과거자료를 기반으로 사용하는 방법과 LSTM 등 기계학습을 활용한 유입량을 예측하여 사용하는 방법 등을 통해 산정할 수 있으나 금회 분석에서는 과거 유입량 실적을 사용하였다. 댐 운영률은 제한수위, 수위별 방류량, 기간별 방류량 등으로 규정할 수 있고, 해당 기준은 댐과 보 등의 연계운영규정 등의 관련 법령 및 규정 등을 참고하였다(MLTMA, 2011). 해당 자료를 입력값으로 발전용댐 모의운영까지 수행하는 것이 1단계이다. 모의결과로 저수위, 방류량, 발전량 등을 산출하며, 댐 모의운영에 사용되는 프로그램은 미공병단에서 개발한 HEC-ResSim을 사용하였다.

2단계에서는 1단계에서 산출된 운영 결과로 발전기능, 이수기능, 치수기능을 평가한다. 발전기능은 발전량(Power Generation, *PG*), 이수기능은 운영수위가 저수위 아래로 떨어져 일정한 방류를 진행할 수 없는 가뭄위험일수(Drought Risk Day, *DRD*)와 물 부족량(Water Deficit, *WD*)(Lee et al., 2013), 치수기능은 수위가상시만수위를 넘어서는 홍수위험일수(Flood Risk Day, *FSD*)와 여수로 방류량(Spillway Discharge, *SD*)을 사용하였다. 해당 값들은 차원이 다르기 때문에 정규화하여 데이터 범위를 0~1사이의 값으로 변환하였다. 3단계에서는 각 운영률별 회복탄력성을 평가하고 평가인자별 회복탄력

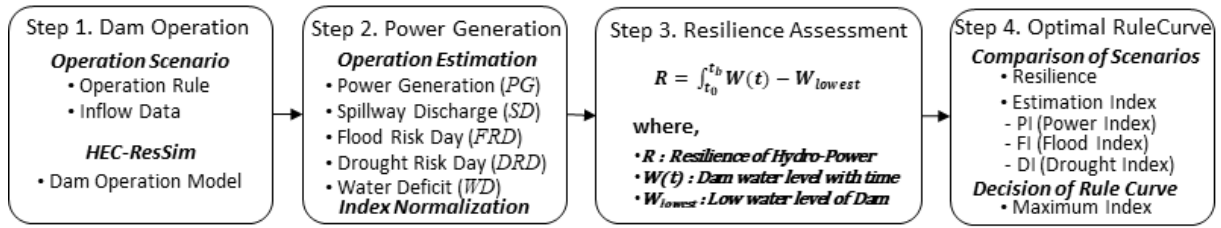


Fig. 5. Resilience assessment method

성과의 관계를 제시한다. 마지막으로 4단계에는 회복탄력성과 종합평가지수(Estimation Index)의 관계를 도출하고 이치수 기능을 고려한 해당 발전용댐의 최적 회복탄력성 값을 도출한다. 해당 회복탄력성 값은 최종적으로 발전용댐의 목표 회복탄력성 값으로 사용되며 종합평가지수(EI)는 각 평가인자의 중요도에 따라 달라질 수 있다(Eq. (5)). 본 연구에서는 종합평가지수 산정 시 가중치를 동일하게 적용하는 것으로 가정하였다.

$$PI = PG / PG_0 \tag{2}$$

$$FI = 1 - FR / FR_{max}, FR = SD / FRD \tag{3}$$

$$DI = 1 - DR / DR_{max}, DR = DRD / 365 \tag{4}$$

$$EI = w_1 PI + w_2 FI + w_3 DI \tag{5}$$

여기서 PI 는 발전기능 평가지수, PG_0 는 해당기간의 실적발전량, FI 는 치수기능 평가지수, FR 는 치수위험도, FR_{max} 는 치수위험도 최대값, SD 는 연평균 여수로방류량, FRD 는 치수위험일수, DI 는 이수기능 평가지수, DR 은 이수위험도, DR_{max} 는 이수위험도 최대값, DRD 는 연평균 이수위험일수, $w_i (i=1,2,3)$ 는 각 평가인자의 가중치이다.

3. 회복탄력성 적용결과

3.1 시나리오 구축

회복탄력성을 적용하기 위해 모의운영을 수행하였고, HEC-ResSim을 이용한 모의운영 기간은 1992~2011년으로 약 20개년 유입량 일자료를 사용하였다.

시나리오를 구축하기 위하여 국내 발전 운영기준을 조사·검토하였다. 국내의 경우 상시발전형식으로 수위별 발전방

류량이 정해져 있지 않으며, 댐이 용수공급능력을 가지기 위해서는 일정량의 방류량을 꾸준히 방류할 수 있는 능력이 필요하다. 이 두 가지 조건을 만족시키기 위하여 댐 운영 시나리오는 운영수위(상시만수위~저수위 혹은 홍수기 제한수위~저수위) 내에서 매 모의 시간간격마다 일정한 방류를 수행하는 것으로 구축하였다. 시나리오는 크게 3가지로 구성하였으며, 저수위별 가능한 최소방류부터 최대방류를 수행하는 Case A (Table 2), 홍수기에 최대방류를 수행하는 Case B, 홍수기에 최대방류량의 50%를 방류하는 Case C이다(Table 3).

3.2 시나리오별 발전용댐 회복탄력성 평가

발전용댐의 각 기능을 평가하기 위하여 시나리오별 모의운영을 수행하였다. Case A의 경우 수위별 최대발전방류량을 기준으로 최소방류량과 최대방류량 사이를 100개의 시나리오로 나누어 결과를 도출하였다(Table 2). 예를 들어, Table 2에서 댐 수위가 EL.156.8 m인 경우 최대방류량은 145.0 m³/s이고 α 값에 따라 $\alpha = 0.5$ 이면 최대방류량의 50% 방류인 72.5 m³/s를 방류하는 조건으로 시나리오를 구성하였다. Case A 결과를 토대로 Case B는 36개 시나리오, Case C는 22개의 시나리오로 구성하였다(Table 3).

그 결과, 방류량을 증가시킴에 따라 초기에는 댐 수위가 저하되어 발전량이 감소하는 경향(Zone A)을 보이나, 어느 지점 이후부터는 댐 수위는 낮아지지만 발전방류량의 증가로 인해 발전량이 증가하는 것(Zone B)으로 나타났다(Fig. 6(a)). 상대적으로 높은 수위를 유지하는 것이 전력생산에 더 유리한 것으로 나타났다. 치수측면에서는 방류량의 증가는 치수의 안전성을 가져오고 최대방류량의 약 60%이상의 방류조건(Zone C)에서는 치수위험도가 없는 것으로 나타났다(Fig. 6(b)). 이수측면에서는 방류량의 증가가 물부족일수와 물부족량의 증가를 초래하는 것으로 나타났다(Fig. 6(c)).

Fig. 6(d)은 PI, FI, DI를 도출한 뒤 가중치를 동일하게 적용하여 종합 평가지수 EI를 산정한 결과이다. 이 때 PI는 평균 0.886, FI는 0.850, DI는 0.428로 나타났으며, 분산 값은 DI가 가장 큰 0.13으로 나타났다. 발전기능, 치수기능, 이수기능이

Table 2. Outflow discharge conditions of scenario A (α is ratio to maximum outflow)

Case A							
Water Level (EL.m)	All Season	Outflow (m ³ /s)					
		α					
		0.01	0.02	0.03	...	0.99	1.00
146.1	$\alpha \times 0.0$	0.00	0.00	0.00	...	0.00	0.0
156.8	$\alpha \times 145.0$	1.45	2.90	4.35		143.55	145.0
173.0	$\alpha \times 165.0$	1.65	3.30	4.95		163.35	165.0
175.0	$\alpha \times 401.0$	4.01	8.02	12.03		396.99	401.0
179.0	$\alpha \times 3619.0$	36.19	72.38	108.57		3582.81	3619.0
181.0	$\alpha \times 6283.0$	62.83	125.66	188.49		6220.17	6283.0
182.5	$\alpha \times 8595.0$	85.95	171.90	257.85		8509.05	8595.0
184.5	$\alpha \times 11929.0$	119.29	238.58	357.87		11809.71	11929.0
Note	$\alpha = 0.01 \sim 1.00, (100 \text{ cases})$						

Table 3. Outflow discharge conditions of scenario B and C (β and γ are ratio to maximum outflow)

Case	Case B		Case C	
	Outflow (m ³ /s)		Outflow (m ³ /s)	
	Dry Season	Flood Season	Dry Season	Flood Season
146.1	$\beta \times 0.0$	0.0	$\gamma \times 0.0$	0.0
156.8	$\beta \times 145.0$	145.0	$\gamma \times 145.0$	72.5
173.0	$\beta \times 165.0$	165.0	$\gamma \times 165.0$	82.5
175.0	$\beta \times 401.0$	401.0	$\gamma \times 401.0$	200.5
179.0	$\beta \times 3619.0$	3619.0	$\gamma \times 3619.0$	1809.5
181.0	$\beta \times 6283.0$	6283.0	$\gamma \times 6283.0$	3141.5
182.5	$\beta \times 8595.0$	8595.0	$\gamma \times 8595.0$	4297.5
184.5	$\beta \times 11929.0$	11929.0	$\gamma \times 11929.0$	5964.5
Note	$\beta = 0.01 \sim 1.00$ 36 cases	Maximum Outflow	$\gamma = 0.01 \sim 0.25$ 22 cases	50% of Maximum Outflow

동일한 중요도일 때, 대상댐의 최적의 회복탄력성 값은 0.899이다. 다시 말해 회복탄력성 관점에서 1년 동안 최대방류량의 14%로 방류량을 일정하게 방류하는 것이 상대적으로 최적의 운영이라 할 수 있다. 또한 종합평가지수는 주요인자의 영향 정도에 따라 3가지 영역으로 구분할 수 있다. Zone 1은 홍수기 능력지수, Zone 2는 발전기 능력지수와 이수기 능력지수, Zone 3은 발전기 능력지수와 홍수기 능력지수가 지배적인 역할을 한다.

Table 4는 각 운영률별 최적 방류구간 결과를 정리한 것으로 Case A의 경우 최대방류량의 14%, Case B의 경우 홍수기 최대방류, 비홍수기에는 최대방류량의 약 1% 방류, Case C의 경우 홍수 최대방류의 50% 방류, 비홍수기에는 약 3%의 방류를 수행하는 것이다. Table 4의 Past Data의 경우는 경우는 실적자료로 이수기능을 고려하지 않은 채 상시 침투 발전으로 댐을 운영한 결과이다. 따라서 발전량은 모의운영보다 크게 나타

나지만 위험일수도 상대적으로 크게 나타났다. Case B와 Case C의 경우 여수로 방류량(혹은 수문방류량)이 많은 홍수기에 최대방류량의 50%, 100%로 방류를 수행하기 때문에 이·치수 측면에서 더 효율적인 수량 사용이 이루어졌다고 판단된다. 발전량과 위험일수로만 최적 시나리오를 선택하였을 때는 홍수기의 최대방류량을 진행하는 Case B의 시나리오가 가장 최적 운영방안이라 할 수 있다. 홍수기 때 최대방류량으로 운영하기 때문에 홍수기 능력지수가 상대적으로 영향이 적은 것으로 나타났다. Fig. 7에서 나타난 것처럼 Zone II와 Zone III로 2개의 영역으로 구분할 수 있다.

향후 일정한 방류의 운영 외에도 다양한 시나리오를 구성한 후 회복탄력성 및 발전용댐의 이·치수 기능을 평가한다면 다른 최적 운영률을 얻을 수 있는 것으로 예상된다.

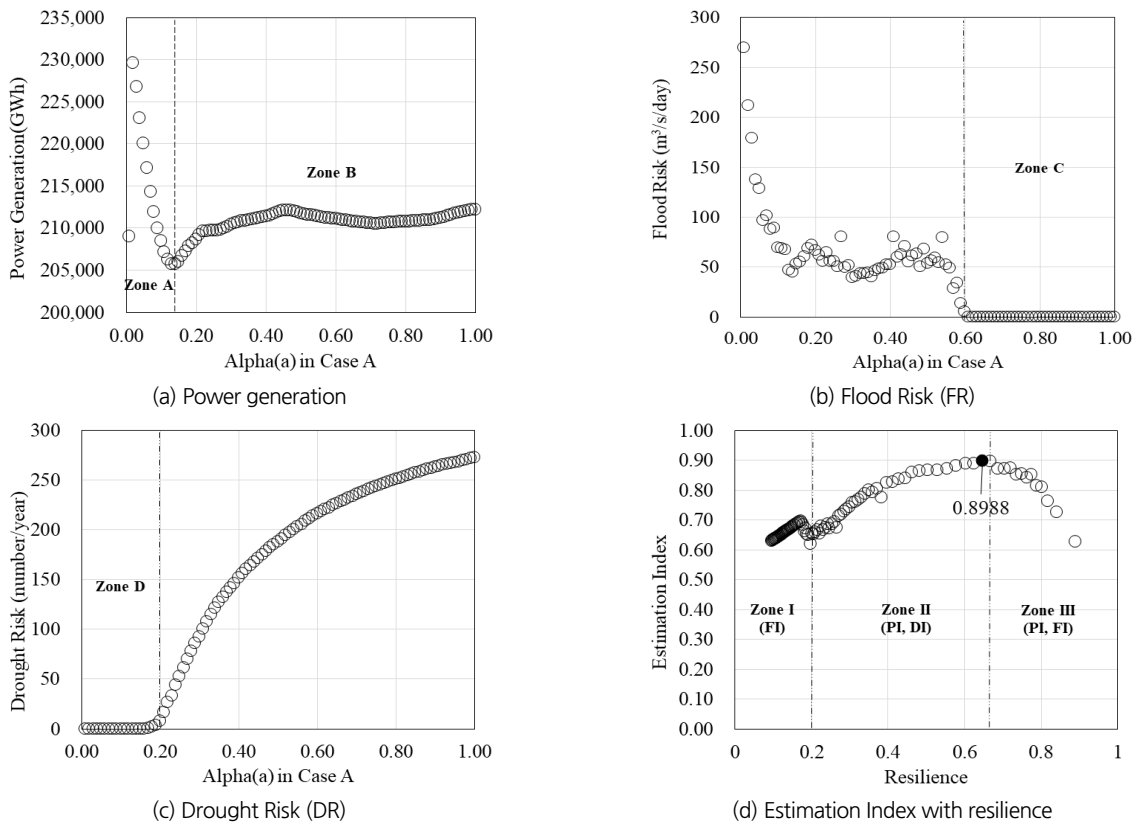


Fig. 6. Results of performances (Case A)

Table 4. Comparison of results

Case	Past Data	A	B	C
Resilience	0.4330	0.6473	0.6193	0.7526
Power Generation (MWh)	238,431.7	205,714.0	217,316.4	214,728.0
Risk Day (day, %)	960(13.1%)	939(12.9%)	290(4.0%)	485(6.6%)
Out Flow Rate (%)	Firm peak discharge	14.0% (All Season)	1% (Dry Season) 100% (Flood Season)	3% (Dry Season) 50% (Flood Season)

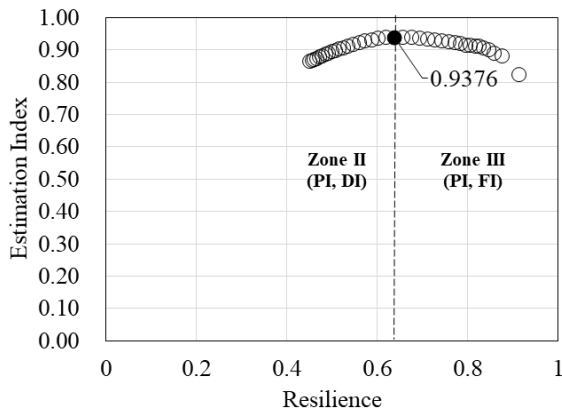


Fig. 7. Result of estimation index (Case B)

4. 결론

최근 정책기조로 보았을 때 수력발전의 발전용댐은 통합 물관리체계의 한 축으로써, 탄소제로 실현을 위한 신·재생에너지로서 그 위상이나 가치가 재평가될 필요가 있다. 그러나 발전용댐 관련기술이 많은 발전을 이뤘음에도 불구하고 댐 운영 및 평가에 대해서는 기존의 방법론을 이용하여 수행하고 있는 실정이다. 발전용댐의 위상을 높이고 한강수계에 기여하는 수자원 관리자의 역할 증대 등을 고려할 때 용수공급, 홍수조절 등을 포함한 유역관리 차원의 댐 운영 효율성 확보방안 수립이 시급하다고 판단하였다. 따라서, 본 연구에서는 회복탄력성 개념을 발전용댐 운영에 적용하였고, 이를 평가할

수 있는 방법론을 제시하였다. 이를 활용한 본 연구의 최종적인 목표는 회복탄력성 관점에서 발전손실의 최소화 및 이·치수 기능을 확보할 수 있는 발전용댐의 최적 운영률을 제시하는 것이다.

북한강 수계의 다목적댐의 규모에 준하는 발전용댐을 대상으로 총 3가지 시나리오에 대한 모의운영을 실시하였고, 해당 모의결과를 활용하여, 회복탄력성, 발전 평가지수, 치수 평가지수, 이수 평가지수를 도출하였다. 평가지수를 동일한 가중치로 종합적으로 고려한 종합 평가지수에 의해 각 시나리오별로 회복탄력성 관점에서 최적의 방류조건을 도출하였다. 평가인자에 여수로방류량, 홍수 위험일수, 이수 위험일수 등을 포함하여 발전성능 뿐만 아니라 이수 및 치수적 측면도 동시에 고려하여, 최종적으로 상대적인 발전용댐 최적운영률을 도출하였다. 본 연구는 발전용댐의 다기능화 과정에서 주목적인 발전 손실을 최소화하기 위해서 회복탄력성 관점에서 발전용댐의 운영이 수행되어야 함을 확인할 수 있었다. 이에 본 연구의 결과는 댐 운영자에게 최적의 운영률을 제시할 수 있고, 더 나아가 댐 운영 계획 수립시 근거자료로 활용될 수 있을 것이다.

향후 운영률 수립 시 회복탄력성까지 고려한다면 더 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있을 것이라 기대된다. 또한 다양한 환경 변화에 따른 종합평가지수 산정에 필요한 가중치 산정에 대한 연구가 필요하며, 시나리오별 각 기능에 대한 경제적 편익을 산정하는 연구가 수행되면 댐 운영률 수립시 더 경제적이고 합리적으로 기준을 수립할 수 있는 체계를 구축할 수 있을 것이라 기대된다.

감사의 글

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*, Vol. 19, No. 4, pp. 733-752.
- Folke, C. (2006). "Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses." *Global Environmental Change*, Vol. 16, No. 3, pp. 253-267.
- Holling, C.S. (1973). "Resilience and stability of ecological systems." *Annual Review of Ecology and Systematics*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-23.
- Holling, C.S. (1996). "Engineering resilience versus ecological resilience." *Engineering Within Ecological Constraints*, Vol. 31, p. 32.
- Kim, B.I., Shin, S.C., and Kim, D.Y. (2014). "Resilience assessment of dams' flood-control service." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 34, No. 6, pp. 1919-1924.
- Kim, D.H., Kim, T.S., Jung H.C., Chung, E.S., Lee, S.O., and Jeong, C.S. (2020). "A benchmarking of electricity industry for improving the integrated water resources management (IWRM) policy." *Journal of Korea Water Resource Association*, Vol. 53, No. 341, S-1, pp. 785-795.
- Kim, T.H., Kim, H.J., and Lee, K.J. (2011). "The concept and functional objectives of the urban resilience for disaster management." *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 26, pp. 65-70.
- Kim, Y.T., Park, M., and Kwon, H.H. (2020). "Spatio-temporal summer rainfall pattern in 2020 from a rainfall frequency perspective." *Journal of Korean Society of Disaster and Security*, Vol. 13, No. 4, pp. 93-104.
- Lee, B.S., Hong, S.H., and Park, S.G. (2017). "Analysis of the characteristics of river water use and the efficient management of the permitted quantity." *Water for Future*, Vol. 50, No. 7, pp. 27-36.
- Lee, G.M., Cha, G.U., and Yi, J.E. (2013). "Analysis of non-monotonic phenomena of resilience and vulnerability in water resources systems." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 2, pp. 183-193.
- Minister of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA) (2011). *Regulations for the operation of dams and beams, etc.*
- National Infrastructure Advisory Council (NIAC) (2009). *Critical infrastructure resilience: Final report and recommendations*. U.S., pp.1-54.
- Park, J.H., Go, J.H., Jo, Y.J., Jung, K.H., Sung, M.H., Jung, H.M., Park, H.K., Yoo, S.H., and Yoon, K.S. (2018). "Water supply alternatives for drought by weather scenarios considering resilience : Focusing on Naju reservoir." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 60, No. 5, pp. 115-124.
- Pisano, U. (2012). "Resilience and sustainable development: Theory of resilience, systems thinking." *European Sustainable Development Network (ESDN)*, Vol. 26, p. 50.
- Walker, B., Holling, C.S., Carpenter, S.R., and Kinzig, A. (2004). "Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems." *Ecology and Society*, Vol. 9, No. 2, pp. 1-9.
- Yoon, H.N. (2018). *Improvement of dam operation against climate change nonstationary*. Master Thesis, Seoul National University, pp.26-54.