

다목적댐 수력발전 데이터를 통한 가뭄 리질리언스 분석 연구

허다솜*, 정승권**

Drought Resilience Analysis Study using Multipurpose Dam Hydroelectric Power Generation Data

Dasom Hur*, Seung Kwon Jung**

본 원고는 행정안전부 재난안전 공동연구 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구
(2022-MOIS63-001(RS-2022-ND641011))의 내용을 기반으로 작성되었습니다

요약

본 연구는 가뭄에 따른 다목적댐 수력발전 전력 생산량의 리질리언스(Resilience)를 분석하기 위하여 다목적 댐(소양강, 충주, 대청, 합천) 4개소를 대상으로 계획발전량 대비 실제 전력 생산량을 분석하였다. 각 댐의 월간 전력 발전 부족량 계산 후 평균 전력발전 부족률(SR, Shortage Ratio) 면적을 산출하여 전력발전 부족률(SR)과 상관분석을 진행하였다. 분석 결과, 소양강, 충주, 대청댐의 경우 전력발전 부족률은 장기간 가뭄 발생에 따라 유의미한 변화를 보였다. 이는 단기 가뭄에 대한 리질리언스는 높지만, 장기적인 가뭄에 대한 리질리언스가 낮음을 시사하였다. 반면, 합천댐은 총 저수량과 유입량이 작아 단기, 장기 모두 가뭄에 대한 리질리언스가 낮은 것으로 분석되었다. 이를 통해 가뭄기간 강수량의 변화가 실제 전력발전량에 큰 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

Abstract

This study analyzed the resilience of hydroelectric power generation in response to droughts by comparing planned and actual power generation across four multipurpose dams (Soyanggang, Chungju, Daechung, and Hapcheon). After calculating the monthly power generation shortages for each dam, the average power generation Shortage Ratio (SR) was derived, followed by a correlation analysis of the SR. The results showed that Soyanggang, Chungju, and Daechung dams exhibited significant changes in power generation shortages during prolonged drought periods. This suggests that while their resilience to short-term droughts is high, their resilience to long-term droughts is relatively low. On the other hand, Hapcheon Dam, with its smaller total storage capacity and inflow, demonstrated low resilience to both short- and long-term droughts. These findings confirm that changes in rainfall during drought periods can significantly impact actual power generation.

Keywords

drought, resilience, multipurpose dam, hydroelectric power

* (재)국제도시물정보과학연구원 연구원

- ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1290-8841>

** (재)국제도시물정보과학연구원 연구위원(교신저자)

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3961-0570>

· Received: Jul. 01, 2024, Revised: Oct. 14, 2024, Accepted: Oct. 17, 2024

· Corresponding Author: Seung Kwon Jung

International Center for Urban Water Hydroinformatics Research & Innovation

Tel.: +82-32-852-5731, Email: skjung6779@gmail.com

I. 서 론

기후변화로 인해 국내 가뭄 발생 횟수가 증가하고 있으며, 그로 인한 피해도 점차 커지고 있다. 이러한 상황에서, 시대별 가뭄에 따른 다목적댐 수력발전 전력 생산량의 동향을 파악하고 재해 대응 및 재해 위험 감소 기술을 개발하는 데 대한 요구가 증대되고 있다. 특히, 발전용 댐의 성능을 평가와 댐별 가뭄 시 댐별 발전량을 최대화하는 최적 저수지 운영 모형 개발 등 계획 대비 실제발전량의 변동성을 분석하여 재난 관리 관점에서 가뭄 피해를 이해하는 것이 필요하다[1][2]. 에너지 시스템 중단으로 인한 불확실성과 잠재적인 사회적 비용이 증가함에 따라, 에너지 시스템의 설계 및 운영에서 탄력성이 중요한 고려 사항으로 부각되고 있다[3]. 탄력성은 에너지 시스템이 외부 충격에 대해 얼마나 잘 대응하고 복구할 수 있는지를 평가하는 중요한 지표이다. 따라서 본 연구는 가뭄에 따른 다목적댐 수력발전 전력 생산량의 리질리언스를 분석하는 방법론의 적용 가능성을 확인하고자 한다.

본 연구의 목적은 다목적댐별 가뭄 시 계획 대비 실제 발전량의 변동성을 분석하고, 이를 통해 가뭄 피해 동향을 파악하여 수력발전 전력 생산량의 가뭄 피해 예방을 위한 연구 방향성을 제시하는 것이다. 이를 위해 다목적댐별 월간 계획 대비 실제 발전량의 차이를 구하고, 가뭄 기간 동안의 전력발전 부족량을 계산하여 전력발전 부족률과 SPI 간의 상관관계를 연구하였다. 이 분석을 통해 가뭄 대응 전략을 마련하고, 댐별로 차별화된 대응 방안을 제시하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 이론적 배경을 다루며, 수력발전 가뭄 복원력, 상관분석, 피어슨 상관 계수, 선행연구 고찰 등을 포함한다. 또한, 기존 관련 연구의 한계점과 본 연구의 목적 및 차별성을 기술한다. 3장에서는 본 논문에서 제안하는 다목적댐 수력발전 복원력 분석 방법론에 대해 자세히 기술한다. 4장에서는 다목적댐 수력발전 물량계획 및 물량실적(MWh) 전력 생산량의 시계열 분석 결과와 전력발전 부족률과 SPI 비교 분석 결과를 논한다. 마지막으로 5장에서는 결론을 제시하고 본 연구의 한계점 및 향후 연구 방향에 대해 기술한다.

II. 이론적 배경

2.1 수력발전 가뭄 복원력

복원력(Resilience)이라는 용어는 라틴어 “resilire”에서 기원하며, “재도약”을 의미한다. 이는 시스템이 외부 저항으로 인해 일시적으로 기능을 상실하였을 때, 충격을 최대한 흡수하고 재정비를 통해 원래의 상태(또는 그와 유사한 상태)로 회복하여 본래의 기능을 수행할 수 있는 능력을 의미한다. 미국 NSF(National Science Foundation)의 RESIN(Resilient and Sustainable Infrastructure) 프로그램에서는 복원력이 우수한 사회기반시설을 “자연적, 인위적 외부 요인에 신속히 대응하여 원래의 상태로 빠르게 복원되는 시설”로 정의하고 있다.

M. Bruneau et al.(2003)[4]은 “복원력이 강한 시스템은 외부 저항에 의한 기능 상실 확률이 낮고, 기능을 상실하더라도 연쇄적인 파급이 적으며 복구 시간이 짧은 시스템”으로 정의하였으며, T. Hashimoto et al.(1982)[5]은 “시스템의 복원력은 내·외부 변화 요인에 의해 시스템이 제 기능을 발휘하지 못할 때, 얼마나 빠른 속도로 정상 상태로 복원 가능한가를 정량화한 지표”로 설명하였다. 복원력은 다양한 내외부 요인에 의해 시스템이 제 기능을 발휘하지 못할 때, 효과적으로 재가동되어 서비스를 지속할 수 있는 능력에 초점을 맞추고 있다.

내외부로부터 다목적댐에 작용하는 방해 요인을 살펴본다면 다목적댐은 인적 요소(운영자의 통제), 자연재해(가뭄, 홍수, 지진 등), 기계 결함 등 여러 방해 요인에 의해 일부 기능을 상실하고 목표 전력 생산량에 영향을 받을 수 있다. 방해 요인에 따른 기능 상실 및 복원의 단계는 다음과 같이 여덟 단계로 구분된다. 준비 단계, 방해 요인의 발생 및 작용 단계, 초기 반응 단계, 초기 영향 단계, 전체 영향 단계, 회복을 위한 준비 단계, 회복 단계, 장기적인 영향 구간으로 구분된다[6].

본 연구에서는 그림 1과 같이 정상 상황에서의 댐의 발전량을 100으로 표시하였을 때 비정상 상황에서는 기능 수행 능력이 100 이하로 감소할 것으로 예상하였다. 실제 발전량이 계획발전량에 미치지

못하는 상황을 비정상 상황으로 정의하여 복원력 곡선식을 유추하였으며 기능의 저하정도를 수치로 정량화하였다.

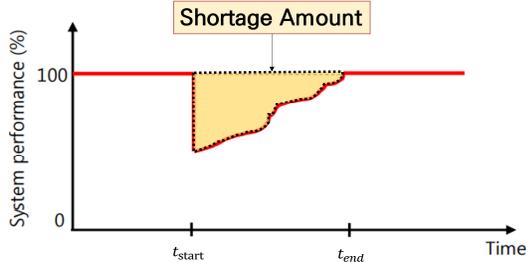


그림 1. 다목적댐 전력발전 시스템의 복원력 곡선
Fig. 1. Resilience curve of multi-purpose dam power generation system

2.2 표준강수지수

T. B. McKee et al.(1993)[7]에 의해 개발된 SPI (Standardized Precipitation Index)는 강수량만을 이용하여 가뭄 심도를 산정하며 각 시간 단위에 따른 강수량의 과잉 혹은 부족을 나타내기 때문에 시간 단위에 따라 장·단기 가뭄을 유연하게 나타낼 수 있다. SPI는 가뭄지수를 산정하며 다른 PDSI, SWSI와 달리 강우 자료만을 이용하기에 제약조건이 적으며 시간단위에 따라 강수 부족량을 산정하여 개개의 강수량이 가뭄에 미치는 영향을 산정할 수 있다[8]. 시간 단위를 선택하여 산정이 가능하고 가뭄 초기 인지가 가능하며, 전 세계적인 보편적인 가뭄지수로 활용성이 높다. 단기간의 농업분야와 장기간의 수문분야에 모두 적용 가능하며, SPI는 WMO(World Meteorological Organization)에 의해 기상학적 가뭄을 나타내는 대표 가뭄지수로 권고되고 있다.

2.3 상관분석

상관 분석은 두 변수 간의 선형적 관계를 분석하는 통계적 방법이다. 상관 분석에서는 두 변수 간의 관계의 강도를 상관관계(Correlation)라고 하며, 이를 측정하기 위해 모상관계수(ρ)와 표본 상관 계수(r)를 사용한다. 상관 계수는 두 변수 간의 연관 정도를 나타내지만, 인과관계를 설명하지는 않는다. 인과관

계는 회귀분석을 통해 방향과 정도를 수학적으로 모델링할 수 있다.

2.4 피어슨 상관 계수

피어슨 상관 계수는 변수들 간의 선형적 관련성을 측정하는 데 널리 사용된다. 피어슨 상관 계수(r)는 X와 Y가 함께 변하는 정도를 X와 Y 각각의 변동 정도로 나눈 값이다. 결과 해석은 다음과 같다.

- r 이 -1.0과 -0.7 사이: 강한 음적 선형관계
- r 이 -0.7과 -0.3 사이: 뚜렷한 음적 선형관계
- r 이 -0.3과 -0.1 사이 : 약한 음적 선형관계
- r 이 -0.1과 +0.1 사이: 거의 무시될 수 있는 선형관계
- r 이 +0.1과 +0.3 사이: 약한 양적 선형관계
- r 이 +0.3과 +0.7 사이: 뚜렷한 양적 선형관계
- r 이 +0.7과 +1.0 사이: 강한 양적 선형관계

2.5 선행연구 고찰

D. Młyński et al.(2024)[9]은 1981년부터 2020년까지의 Vistula 강 상류 유역(폴란드)에 위치한 6개 유역을 대상으로 수력 기상 데이터를 활용하여, 가뭄이 강의 수력 발전 잠재력에 얼마나 영향을 미치는지에 대한 연구를 진행하였다. 이 연구에서는 강수량 데이터 및 강의 수력 에너지 잠재력 추세를 분석하고, SPI 지수와 강의 수력 에너지 잠재력 간의 관계를 조사하였다. 그 결과, 기상학적 가뭄과 연구 유역의 이론적 수력 잠재력 사이에 통계적으로 유의미한 관계가 있음을 발견하였다. C. Folke et al.(2010)[10]은 지속성, 적응성 및 변형 가능성으로서 회복탄력성에 중점을 둔 연구를 진행하였다. 이 연구는 지구 시스템 탄력성에 기여하는 유연한 시스템 형성과 변형 가능성을 통합하기 위한 방법을 고려했었다. D. H. Kim et al.(2021)[2]은 회복탄력성 개념을 도입하여 발전용 댐의 성능을 평가하였다. 댐의 수위 회복력을 발전용 댐의 회복탄력성으로 정의하고, 치수 성능을 평가하기 위한 회복탄력성 프레임워크를 제시하였다. 과거 유입량 자료를 활용한 댐 모의 운영 결과를 통해 적용 가능성을 검토하였다.

L. P. Devkota et al.(2021)[11]은 동력의 흐름탄력성이라는 새로운 개념을 도입하여 흐름 변동에 대한 수력발전소의 회복탄력성 이론을 개발하였다. 이 연구는 강의 흐름 변화 측면에서 수력발전소의 회복탄력성을 평가하였다. D. H. Kim et al.(2023)[12]은 국내 에너지 사용량을 예측하기 위하여 지능형 전력 계량 인프라(AMI, Advanced Metering Infrastructure) 데이터와 기상정보를 수집하고 XGBoost, LightGBM, LSTM 등 딥러닝 알고리즘을 기반으로 산업 부문의 전력 사용량 예측 모델을 구축하였으며, E. Lee et al.(2019)[1]은 기존 발전용 댐들의 장기 운영계획을 수립하기 위해 월별 발전량을 최대화하는 최적 저수지 운영 모형을 개발하였다. 모형은 자원 최적화 분야에서 널리 이용되는 선형계획법을 기반으로 구축되었으며, 한강수계에 위치한 5개 발전용 댐을 대상으로 실적자료와 모형 결과를 비교, 분석하였다. 그 결과, 발전용 댐들의 총 최적 발전량이 실적발전량보다 약 10~37% 정도 향상됨을 보였다. N. Voisin et al.(2019)[13]은 복원력을 시스템 지속성, 적응성 및 변형 가능성이라는 세 가지 기능으로 구성하였다. 이 연구는 개별 발전소, 도시 및 그리드 규모의 세 가지 상호 의존성을 통해 미국 수력 시스템의 탄력성 범위를 논의하고, 전력 부문 복원력에 필요한 조건을 결정하기 위한 일관된 기반을 제공하는지에 대한 질적 분석을 수행하였다.

수력발전 가뭄 리질리언스 관련 전반적인 연구 추세는 가뭄의 영향 연구, 회복탄력성 연구, 최적 저수지 운영 모형 개발 연구로 구분되었다. 가뭄의 영향 연구는 가뭄이 강 및 댐에 미치는 영향을 판단하기 위한 연구가 주를 이루었다. 회복탄력성 연구에서는 강의 흐름 변화 측면 및 댐의 수위 회복력, 지속성, 적응성 및 변형 가능성으로서의 회복탄력성에 중점을 둔 연구가 진행되었다. 최적 저수지 운영 모형 개발 연구에서는 개별 발전소, 도시, 그리드 규모의 수력 시스템 탄력성 범위 및 댐의 월별 발전량 최대화를 위한 최적 저수지 운영 모형 개발 연구가 수행되었다.

기존의 연구는 수력발전 시스템의 회복탄력성과 최적 운영 방법을 설명할 수 있음을 보여주었으나, 가뭄이 수력 발전에 미치는 구체적인 기간별 요인

분석이 부족하다는 한계점이 있었다. 따라서 본 연구에서는 1개월, 3개월, 6개월, 9개월, 12개월간 다목적 댐 별 월간 계획 대비 실제 발전량의 차이를 구하여 월간 전력발전 부족량을 계산하였으며 이를 바탕으로 SR1과 SPI1, SR3과 SPI3, SR6과 SPI6, SR9와 SPI9, SR12와 SPI12의 상관분석을 진행하였다. 일정 기간의 평균 전력발전 부족률과 SPI 간의 상관관계를 연구하여 질댓값이 크거나 작은 원인을 분석하였다. 이를 통해 일정기간 강수량의 변화가 전력발전에 미칠 수 있는 영향을 파악하여 각 댐의 가뭄 대응 방향성을 제시하고자 하였다.

III. 연구 설계

3.1 다목적댐 수력발전 리질리언스 분석 방법론

본 연구의 시간적 범위는 2012년 1월 ~ 2023년 9월이다. 공간적 범위는 전국 다목적댐 4개소(소양강, 충주, 대청, 함천)를 대상지로 설정하였으며 댐의 제원정보는 표 1과 같다.

표 1. 다목적댐 제원정보
Table 1. Specification information of multi-purpose dam

Specification information	Soyang river dam	Chungju dam	Daechung dam	Hapcheon dam
Height (m)	123	97.5	72	96
Length (m)	530	447	495	472
Basin area (km ²)	2,703	6,648	3,204	925
Planning flood level (EL.m)	198	145	80	179
Permanent high water level (EL.m)	193.5	141	76.5	176
Low water level (EL.m)	150	110	60	140
Total storage volume (million m ³)	2,900	2,750	1,490	790

다목적댐 4개소(소양강, 충주, 대청, 합천) 인근 표준강수지수(SPI) 관측소 구분은 표 2와 같다.

표 2. 대수력 발전 다목적댐 인근 표준강수지수(SPI) 관측소 매칭

Table 2. Standard Precipitation Index (SPI) observatory matching table near large hydropower multipurpose dam

Region	River name	Power plant name	Standard Precipitation Index (SPI) observatory
Chuncheon	Bukhan river	Soyang river hydropower	Chuncheon(101)
Chungju	Namhan river	Chungju hydropower	Chungju(127)
Daejeon	Geum river	Daecheong hydropower	Daejeon(133)
Hapcheon	Hwang river	Hapcheon hydropower	Hapcheon(285)

계획발전량 대비 실제 전력 생산량을 분석하기 위한 본 연구의 변수 설정은 표 3과 같다.

표 3 평가 지표에 대한 변수 및 기호 구분

Table 3. Description for variables and symbols

Symbols	Description
t	Time
n	Number of months lasted
t_s	Start time
t_e	End time
P_t	Planned power generation
Q_t	Actual power generation
MS	Monthly Shortage Amount
AA	Average Amount
SA	Shortage Amount
SR	Shortage Ratio

계획 발전량(P)은 한국수자원공사에서 제공하는 발전소별 계획 발전량으로 시간 t에서 다목적 댐의 계획 발전량으로 정의하였으며 실적 발전량(Q)은 한국수자원공사에서 제공하는 발전소별 실적 발전량으로 시간 t에서 다목적 댐의 실적 발전량으로 정의하였다.

월간 발전 부족량(MS, Monthly Shortage Amount)은 계획 발전량에서 실적 발전량을 뺀 수치로 시간 t에서 다목적 댐의 월간 발전 부족량으로 정의하였다. 만약 실제발전량이 더 많을 경우, 발전량이 부족하지 않다고 판단하여 0으로 산출하였다.

평균 월간 발전량(AA, Average Amount)은 다목적 댐 별 연간 발전량을 12개월로 나누어 산출하였다. 전력발전 부족량(SA, Shortage Amount)은 월간 발전 부족량을 평균 월간 발전량으로 나누어 산출하였으며, 식은 (1)과 같이 정리하였다.

$$SA = \sum_{t=t_s}^{t_e} MAX\{P_t - Q_t, 0\} \quad (1)$$

전력발전 부족률(SR, Shortage Ratio)은 설정 기간 내 전력발전 부족량(SA)을 더한 뒤 설정 기간으로 나누어 평균 전력발전 부족률(SR) 면적 산출하였으며 식은 (2)와 같이 정리하였다.

$$SR = \frac{SA}{n} \quad (2)$$

예를 들어, 위 수식을 적용하여 산출된 6개월 간 전력발전 부족률 SR6은 Rolling window 기법으로 산출한 6개월 동안의 평균 전력발전 부족률(SR6) 면적이다.

본 연구에서는 전력발전 부족률과 SPI 비교 분석을 위하여 SR1과 SPI1, SR3과 SPI3, SR6과 SPI6, SR9와 SPI9, SR12와 SPI12의 상관분석을 진행하였다.

3.2 사용데이터

본 연구는 다목적댐 수력발전 전력 생산량의 리질리언스(Resilience)를 분석하기 위하여 다목적댐(소양강, 충주, 대청, 합천) 4개소를 대상으로 계획발전량 대비 실제 전력 생산량을 분석하였다. 이를 위해 한국수자원공사 발전소별 운영현황 데이터를 수집하였으며, 대수력 발전소별 물량계획(MWh), 물량실적(MWh), 물량달성률(%) 자료를 구축하였다. 또한 기온정도 수치화 자료를 분석하기 위해 기상청 표준강수지수(SPI) 데이터를 수집하여 표준강수지수(SPI 3,6,9,12) 자료를 구축하였다.

또한 국가수자원관리 종합정보시스템에서 제공하는 일별 댐 수문자료를 수집하였다. 저수위(EL.m), 저수량(m³), 저수율(%), 댐 유역 평균 강우량(m³/s), 유입량(m³/s), 총 방류량(m³/s) 자료를 구축하여 댐별 특성을 분석하고자 하였다.

IV. 연구 결과

4.1 소양강댐 수력발전 전력 생산량 가뭄 리질리언스 분석 결과

소양강댐에서 생산되는 계획발전량과 실제발전량의 차이를 구한 월간발전부족량 추세를 그림 2와 같다. 소양강댐의 월간발전부족량이 급격히 증가하는 시기는 2014년 8월, 2015년 7월과 8월인 것으로 조사되었다.

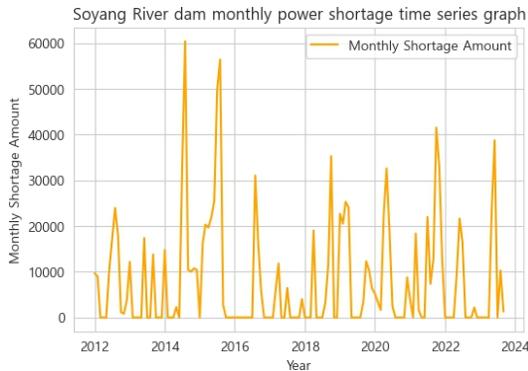


그림 2. 소양강댐 월간발전부족량 시계열 그래프
Fig. 2. Time series graph of Soyang river dam monthly power shortage

2014년 8월의 경우 월간발전부족량은 1,874,291 MWh이며, SPI1: -1.39, SPI3: -1.84, SPI6: -2.31, SPI9: -2.16, SPI12: -1.94, 저수율: 37.87%, 유입량: 111.37m³/s이었으며, 2015년 7월의 경우 월간발전부족량은 1,545,102 MWh이며, SPI1: -1.16, SPI3: -2.17, SPI6: -1.53, SPI9: -1.54, SPI12: -2.20, 저수율: 28.07%, 유입량: 95.29m³/s, 2015년 8월의 경우 월간발전부족량은 1,749,950 MWh이며, SPI1: -0.80, SPI3: -1.53, SPI6: -1.57, SPI9: -1.57, SPI12: -1.79, 저수율: 38.02%, 유입량: 96.88m³/s이었던 것으로 조사되었다.

2014년 8월과 2015년 7월과 8월은 심각한 가뭄으로 SPI6값이 각각 -2.31과 -1.57로 나타났으며 이

로 인해 저수율이 급락하였다. 유입량 또한 크게 감소하면서 저수량이 줄어들어 전력 발전 부족량이 각각 1,874,291 MWh, 1,545,102 MWh, 1,749,950 MWh로 급증한 것으로 분석되었다. 소양강댐은 유역면적이 넓고 총저수량이 큰 대형 댐으로 단기 가뭄의 영향은 크게 받지 않지만 장기 가뭄이 발생하면 저수율이 크게 감소하여 발전부족량이 증가할 가능성이 증가하는 것으로 분석되었다.

소양강댐의 전력발전 부족률과 SPI 간의 상관 분석 결과는 표 4와 같으며, 1개월, 3개월, 6개월, 9개월, 12개월 간 각각의 전력발전 부족률과 SPI 비교 시계열 그래프는 그림 3 ~ 그림 7과 같다.

표 4. 소양강댐 전력발전 부족률과 SPI 비교 상관분석 결과표

Table 4. Result table for comparative correlation of Soyang river dam power generation shortage ratio and SPI

Comparative correlation	Soyang river dam
SR1 and SPI1	-0.16
SR3 and SPI3	-0.31
SR6 and SPI6	-0.49
SR9 and SPI9	-0.65
SR12 and SPI12	-0.69

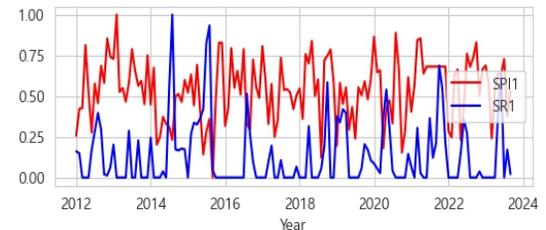


그림 3. 소양강댐 1개월 간 전력발전 부족률과 SPI1 시계열 그래프

Fig. 3. Time series graph of Soyang river dam power generation shortage rate for one month and SPI1

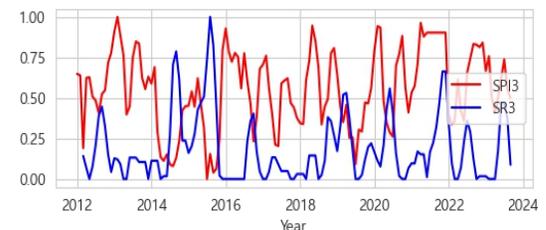


그림 4. 소양강댐 3개월 간 전력발전 부족률과 SPI3 시계열 그래프

Fig. 4. Time series graph of Soyang river dam power generation shortage rate for 3 months and SPI3

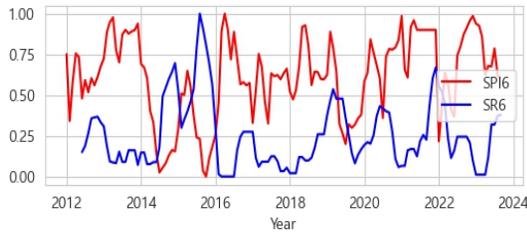


그림 5. 소양강댐 6개월 간 전력발전 부족률과 SPI6 시계열 그래프

Fig. 5. Time series graph of Soyang river dam power generation shortage rate for 6 months and SPI6

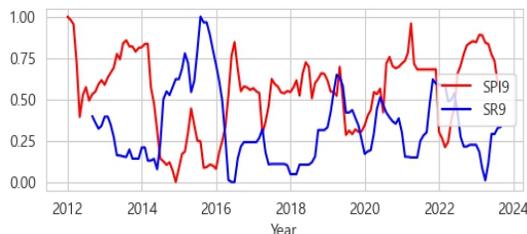


그림 6. 소양강댐 9개월 간 전력발전 부족률과 SPI9 시계열 그래프

Fig. 6. Time series graph of Soyang River dam power generation shortage rate for 9 months and SPI9

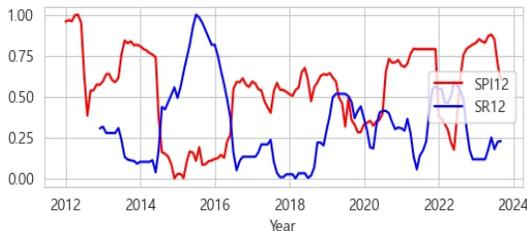


그림 7. 소양강댐 12개월 간 전력발전 부족률과 SPI12 시계열 그래프

Fig. 7. Time series graph of Soyang river dam power generation shortage rate for 12 months and SPI12

소양강댐의 SPI1과 SR1의 상관 계수는 -0.16 이였으며, SPI3과 SR3의 상관 계수는 -0.31 , SPI6과 SR6의 상관 계수는 -0.49 로 중간 정도의 음의 상관 관계를 나타냈다. SPI9와 SR9의 상관 계수는 -0.65 였으며, SPI12와 SR12의 상관 계수는 -0.69 로 강한 음의 상관관계를 나타냈다. 이는 장기간 강수량 감소에 따른 가뭄지수가 증가할 때 전력발전 부족률이 상당히 감소하는 경향이 있으며, 9개월 이상의 강수량 변화는 소양강댐의 전력발전 부족률에 큰 영향을 미칠 수 있는 것으로 분석되었다.

4.2 충주댐 수력발전 전력 생산량 가뭄 리질리언스 분석 결과

충주댐에서 생산되는 계획발전량과 실제발전량의 차이를 구한 월간발전부족량은 그림 8과 같다. 충주댐의 월간발전부족량이 급격히 증가하는 시기는 2014년 8월과 2015년 7월, 8월인 것으로 조사되었다.

2014년 8월의 경우 월간발전부족량은 3,294,835 MWh이며, SPI1: -0.25 , SPI3: -1.40 , SPI6: -2.18 , SPI9: -1.89 , SPI12: -2.15 , 저수율: 34.01%, 유입량: $300.18\text{m}^3/\text{s}$ 이였으며, 2015년 7월의 경우 월간발전부족량은 4,242,753 MWh이며, SPI1: -0.98 , SPI3: -1.87 , SPI6: -1.59 , SPI9: -0.95 , SPI12: -0.66 , 저수율: 25.97%, 유입량: $112.52\text{m}^3/\text{s}$, 2015년 8월의 경우 월간발전부족량은 4,587,907 MWh이며, SPI1: -0.59 , SPI3: -1.62 , SPI6: -1.90 , SPI9: -1.94 , SPI12: -1.12 , 저수율: 35.84%, 유입량: $101.71\text{m}^3/\text{s}$ 이었던 것으로 조사되었다.

2014년 8월과 2015년 7월과 8월은 장기적인 가뭄으로 SPI6이 -2.18 과 -1.9 로 매우 낮아졌으며, 이로 인해 저수율이 하락하였다. 특히 유입량이 급격히 감소하여 월간발전부족량이 급증한 것으로 분석되었다. 충주댐은 소양강댐과 마찬가지로 유역면적이 넓고 총저수량이 큰 대형 댐으로 단기 가뭄의 영향은 크게 받지 않지만 장기 가뭄이 발생하면 저수율이 크게 감소하여 발전부족량이 증가할 가능성이 증가하는 것으로 분석되었다.

Chungju dam monthly power generation shortage time series graph

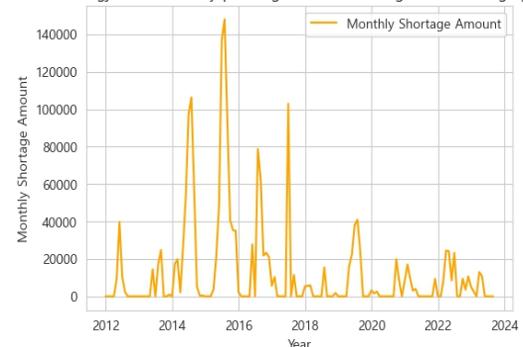


그림 8. 충주댐 월간발전부족량 시계열 그래프

Fig. 8. Time series graph of Chungju dam monthly power generation shortage

충주댐의 전력발전 부족률과 SPI 간의 상관 분석 결과는 표 5와 같으며, 1개월, 3개월, 6개월, 9개월, 12개월 간 각각의 전력발전 부족률과 SPI 비교 시계열 그래프는 그림 9 ~ 그림 13과 같다.

표 5. 충주댐 전력발전 부족률과 SPI 비교 상관분석 결과표

Table 5. Result table for comparative correlation of Chungju dam power generation shortage rate and SPI

Comparative correlation	Chungju dam
SR1 and SPI1	-0.31
SR3 and SPI3	-0.50
SR6 and SPI6	-0.66
SR9 and SPI9	-0.75
SR12 and SPI12	-0.87

충주댐의 SPI1과 SR1의 상관 계수는 -0.31로 약한 음의 상관관계를 나타냈다. SPI3과 SR3의 상관 계수는 -0.50으로 중간 정도의 음의 상관관계를 나타냈다. SPI6과 SR6의 상관 계수는 -0.66이었으며, SPI9와 SR9의 상관 계수는 -0.75, SPI12와 SR12의 상관 계수는 -0.87로 강한 음의 상관관계를 나타냈다. 이는 장기간 강수량 감소에 따른 가뭄지수가 증가할 때 전력발전 부족률이 상당히 감소하는 경향이 있으며, 9개월 이상의 강수량 변화는 충주댐의 전력발전 부족률에 큰 영향을 미칠 수 있는 것으로 분석되었다.

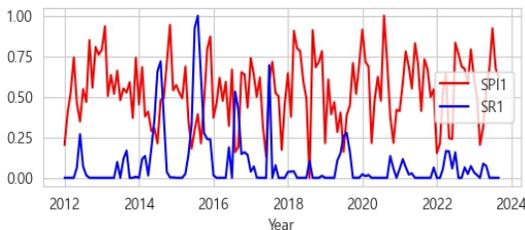


그림 9. 충주댐 1개월 간 전력발전 부족률과 SPI1 시계열 그래프

Fig. 9. Time series graph of Chungju dam power generation shortage rate for one month and SPI1

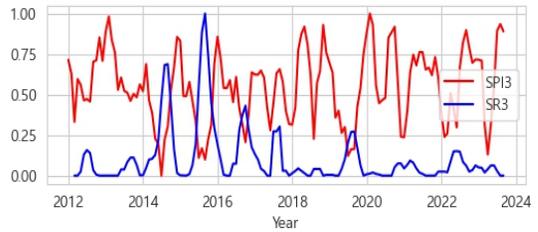


그림 10. 충주댐 3개월 간 전력발전 부족률과 SPI3 시계열 그래프

Fig. 10. Time series graph of Chungju dam power generation shortage rate for 3 months and SPI3

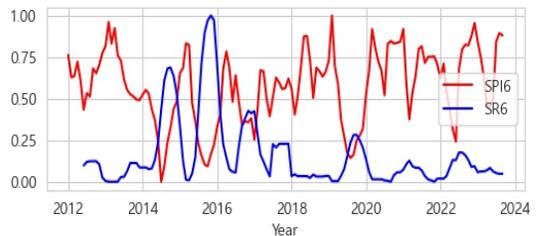


그림 11. 충주댐 6개월 간 전력발전 부족률과 SPI6 시계열 그래프

Fig. 11. Time series graph of Chungju dam power generation shortage rate for 6 months and SPI6

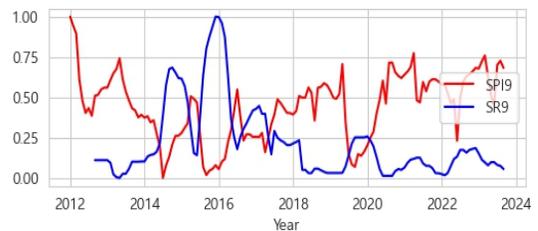


그림 12. 충주댐 9개월 간 전력발전 부족률과 SPI9 시계열 그래프

Fig. 12. Time series graph of Chungju dam power generation shortage rate for 9 months and SPI9

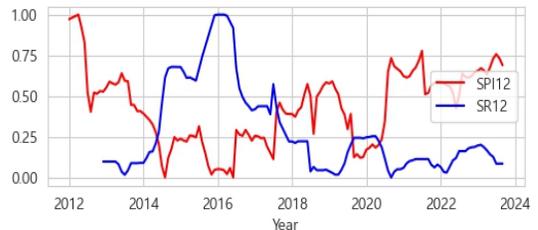


그림 13. 충주댐 12개월 간 전력발전 부족률과 SPI12 시계열 그래프

Fig. 13. Time series graph of Chungju dam power generation shortage rate for 12 months and SPI12

4.3 대청댐 수력발전 전력 생산량 가뭄 리질리언스 분석 결과

대청댐에서 생산되는 계획발전량과 실제발전량의 차이를 구한 월간발전부족량은 그림 14와 같다. 대청댐의 월간발전부족량이 급격히 증가하는 시기는 2015년 7월, 8월, 2016년 8월인 것으로 조사되었다.

2015년 7월의 경우 월간발전부족량은 963,170 MWh이며, SPI1: -0.77, SPI3: -1.36, SPI6: -1.19, SPI9: -0.59, SPI12: -0.72, 저수율: 41.14%, 유입량: 67.15m³/s이었으며, 2015년 8월의 경우 월간발전부족량은 4,587,907 MWh이며, SPI1: -1.79, SPI3: -2.34, SPI6: -2.05, SPI9: -1.88, SPI12: -1.38, SPI18: -1.42, SPI24: -1.68, 저수율: 40.35%, 유입량: 26.02m³/s, 2016년 8월의 경우 월간발전부족량은 853,616 MWh이며, SPI1: -2.54, SPI3: -0.64, SPI6: -0.29, SPI9: -0.23, SPI12: -0.61, SPI18: -1.54, SPI24: -1.41, 저수율: 58.22%, 유입량: 15.19m³/s이었던 것으로 조사되었다.

2015년 8월에는 SPI1이 -1.79로 가뭄이 심각해지며, 저수율은 40.35%로 감소하였고 유입량이 26.02 m³/s로 급감하여 전력 생산 부족이 크게 발생하였다. 이로 인해 월간 발전 부족량이 4,587,907 MWh로 급증하였으며, 2016년 8월에도 저수율이 58.22%로 낮아지고 유입량이 15.19m³/s로 급격히 줄어 월간발전부족량이 급증한 것으로 분석되었다. 대청댐은 소양강댐 총 저수량의 절반정도인 중간 규모의 댐으로, 유입량의 감소는 저수율의 감소로 이어져 전력발전 부족률에 큰 영향을 미칠 수 있는 것으로 분석되었다.

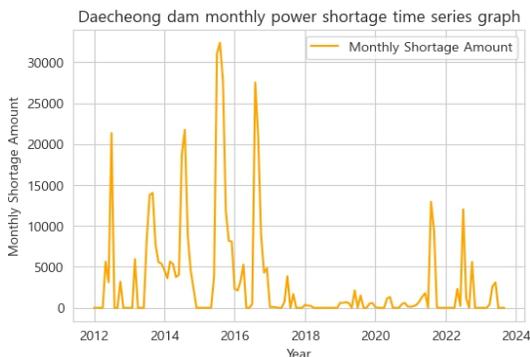


그림 14. 대청댐 월간발전부족량 시계열 그래프
Fig. 14. Time series graph of Daecheong dam monthly power shortage

대청댐의 전력발전 부족률과 SPI 간의 상관 분석 결과는 표 6과 같으며, 1개월, 3개월, 6개월, 9개월, 12개월 간 각각의 전력발전 부족률과 SPI 비교 시계열 그래프는 그림 15 ~ 그림 19와 같다.

표 6. 대청댐 전력발전 부족률과 SPI 비교 상관분석 결과표

Table 6. Result table for comparative correlation of Daecheong dam power generation shortage ratio and SPI

Comparative correlation	Daecheong dam
SR1 and SPI1	-0.26
SR3 and SPI3	-0.33
SR6 and SPI6	-0.45
SR9 and SPI9	-0.57
SR12 and SPI12	-0.61

대청댐의 SPI1과 SR1의 상관 계수는 -0.26이었으며, SPI3과 SR3의 상관 계수는 -0.33으로 약한 음의 상관관계를 나타냈다. SPI6과 SR6의 상관 계수는 -0.45로 중간 정도의 음의 상관관계를 나타냈다. 이는 6개월 이상 지속된 강수량의 감소가 전력발전 부족률에 영향을 미칠 수 있는 것으로 분석되었다. SPI9와 SR9의 상관 계수는 -0.57이었으며, SPI12와 SR12의 상관 계수는 -0.61로 강한 음의 상관관계를 나타냈다. 이는 9개월 이상 지속되는 강수량 감소에 따라 가뭄지수가 증가할 때 전력발전 부족률이 상당히 감소하는 경향이 있으며, 대청댐의 전력발전 부족률에 큰 영향을 미칠 수 있는 것으로 분석되었다.

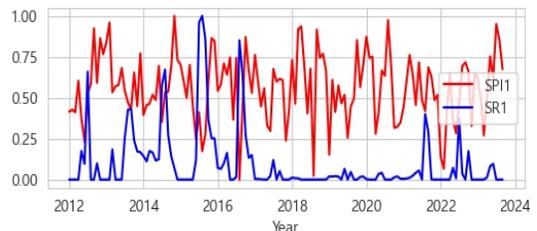


그림 15. 대청댐 1개월 간 전력발전 부족률과 SPI1 시계열 그래프

Fig. 15. Time series graph of Daecheong dam power generation shortage rate for one month and SPI1

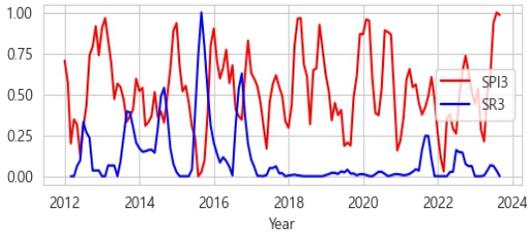


그림 16. 대청댐 3개월 간 전력발전 부족률과 SPI3 시계열 그래프

Fig. 16. Time series graph of Daecheong dam power generation shortage rate for 3 months and SPI3

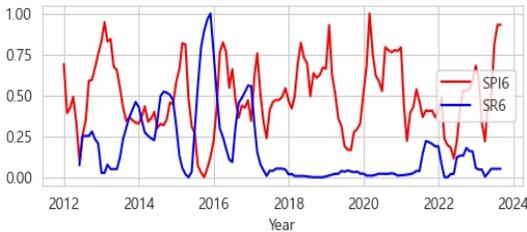


그림 17. 대청댐 6개월 간 전력발전 부족률과 SPI6 시계열 그래프

Fig. 17. Time series graph of Daecheong dam power generation shortage rate for 6 months and SPI6

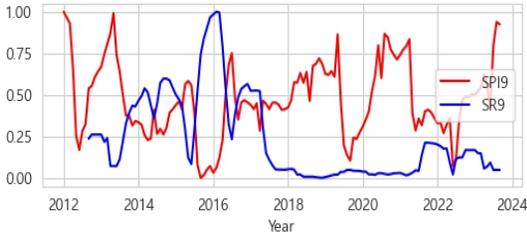


그림 18. 대청댐 9개월 간 전력발전 부족률과 SPI9 시계열 그래프

Fig. 18. Time series graph of Daecheong dam power generation shortage rate for 9 months and SPI9

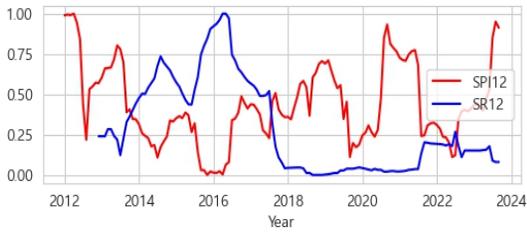


그림 19. 대청댐 12개월 간 전력발전 부족률과 SPI12 시계열 그래프

Fig. 19. Time series graph of Daecheong dam power generation shortage rate for 12 months and SPI12

4.4 합천댐 수력발전 전력 생산량 가뭄 리질리언스 분석 결과

합천댐에서 생산되는 계획발전량과 실제발전량의 차이를 구한 월간발전부족량은 그림 20과 같다. 합천댐의 월간발전부족량이 급격히 증가하는 시기는 2014년 8월, 2015년 9월, 2023년 6월인 것으로 조사되었다.

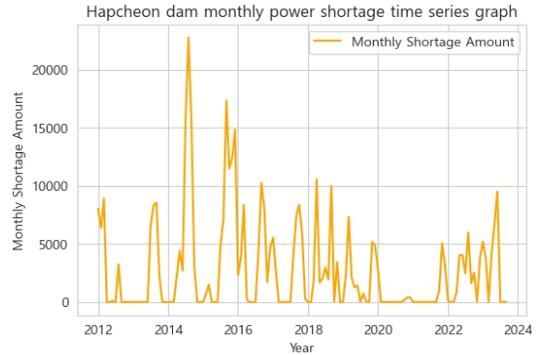


그림 20. 합천댐 월간발전부족량 시계열 그래프

Fig. 20. Time series graph of Hapcheon dam monthly power shortage

2014년 8월의 경우 월간발전부족량은 705,064 MWh이며, SPI1: 0.69, SPI3: -0.45, SPI6: -0.30, SPI9: -0.40, SPI12: -0.15, 저수율: 43.76%, 유입량: 90.09m³/s이었으며, 2015년 9월의 경우 월간발전부족량은 520,320 MWh이며, SPI1: -0.25, SPI3: -0.91, SPI6: -0.85, SPI9: -0.89, SPI12: -0.56, 저수율: 42.34%, 유입량: 6.77m³/s, 2023년 6월의 경우 월간발전부족량은 569,700 MWh이며, SPI1: 0.52, SPI3: 0.45, SPI6: 0.21, SPI9: -0.17, SPI12: -0.78, 저수율: 31.98%, 유입량: 27.38m³/s이었던 것으로 조사되었다.

2014년 8월과 2015년 9월, 2023년 6월에 유입량이 급격히 줄어들었으며, 특히 2015년 9월의 경우 유입량이 6.77m³/s로 매우 낮았던 것으로 조사되었다. 이는 저수율의 감소로 이어져, 2015년 9월 저수율은 42.34%에 머물렀다. 유입량의 급격한 감소와 저수율 하락으로 인해 전력 발전 부족량이 각각 705,064 MWh, 520,320 MWh, 569,700 MWh로 급증한 것으로 분석되었다. 특히 2023년 6월에는 저수율이 31.98%로 매우 낮았으며, 유입량도 27.38m³/s로 발전 부족이 심화되었다.

합천댐은 유역면적이 작고 총저수량이 적어, 다른 대형 댐들처럼 장기 가뭄에 의한 발전 부족량보다는 단기적인 유입량 변동에 더 민감하게 반응하며, 이는 강우 패턴과 유입량의 불규칙성의 원인인 것으로 분석되었다.

합천댐의 전력발전 부족률과 SPI 간의 상관 분석 결과는 표 7과 같으며, 1개월, 3개월, 6개월, 9개월, 12개월 간 각각의 전력발전 부족률과 SPI 비교 시계열 그래프는 그림 21 ~ 그림 25와 같다.

표 7. 합천댐 전력발전 부족률과 SPI 비교 상관분석 결과표

Table 7. Result table for comparative correlation of Hapcheon dam power generation shortage ratio and SPI

Comparative correlation	Hapcheon dam
SR1 and SPI1	0.06
SR3 and SPI3	0.01
SR6 and SPI6	-0.13
SR9 and SPI9	-0.24
SR12 and SPI12	-0.34

합천댐의 SPI1과 SR1의 상관 계수는 0.06, SPI3과 SR3의 상관 계수는 0.01, SPI6과 SR6의 상관 계수는 -0.13이었으며, SPI9와 SR9의 상관 계수는 -0.24로 상관관계가 거의 없는 것으로 나타났다. SPI12와 SR12의 상관 계수는 -0.34로 약한 음의 상관관계를 나타냈다. 합천댐의 전력발전 부족률은 장기간 강수량의 감소가 전력발전 부족률에 큰 영향을 받지 않는 것으로 분석되었다.

합천댐을 제외한 소양강댐, 충주댐, 대청댐은 지속된 강수량의 감소가 전력발전 부족률에 영향을 미칠 수 있는 것으로 분석되었다. 합천댐의 총 저수량은 790백만 m^3 로 소양강댐 총 저수량의 27%, 충주댐 총 저수량의 29%, 대청댐 총 저수량의 53% 수준으로 다른 댐들에 비해 상대적으로 3-4배 정도 작은 규모이다. 또한 합천댐의 유역면적은 925 km^2 로 소양강댐 유역면적의 34%, 충주댐 유역면적의 14%, 대청댐 유역면적의 29% 수준이다. 총 저수량과 유입량 자체가 작은 경우 물을 즉각적으로 방류하거나 전력 생산에 사용하지 않고 댐 내에서 보존해야 하는 상황이 발생할 수 있다. 따라서 유입량이 낮은 시기에는 기상 조건이나 강우량과 발전량 간의 상관관계가 약하게 나타날 수 있을 것이다. 이런 환경에서 강우

량에 따른 유입량 변화가 작아 SPI와 전력 발전 부족률과의 상관관계가 낮았을 것으로 분석되었다.

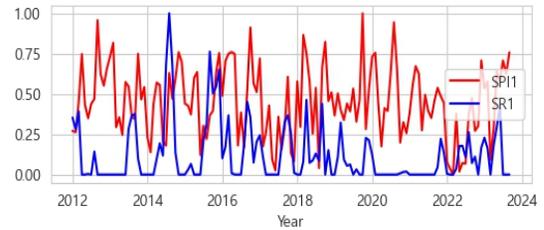


그림 21. 합천댐 1개월 간 전력발전 부족률과 SPI1 시계열 그래프

Fig. 21. Time series graph of Hapcheon dam power generation shortage rate for one month and SPI1

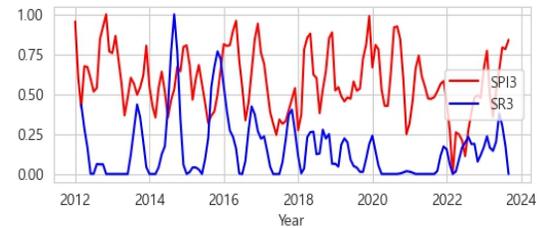


그림 22. 합천댐 3개월 간 전력발전 부족률과 SPI3 시계열 그래프

Fig. 22. Time series graph of Hapcheon dam power generation shortage rate for 3 months and SPI3

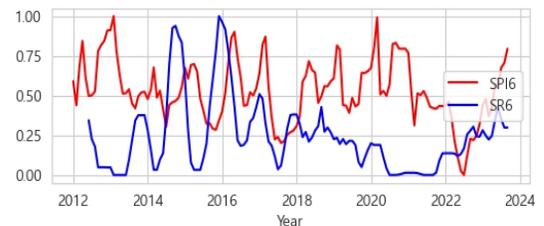


그림 23. 합천댐 6개월 간 전력발전 부족률과 SPI6 시계열 그래프

Fig. 23. Time series graph of Hapcheon dam power generation shortage rate for 6 months and SPI6

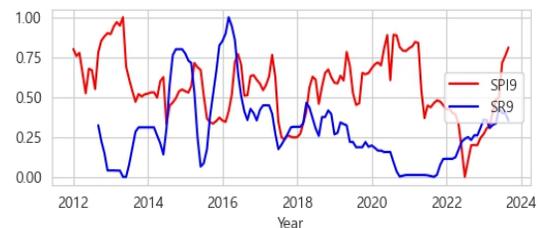


그림 24. 합천댐 9개월 간 전력발전 부족률과 SPI9 시계열 그래프

Fig. 24. Time series graph of Hapcheon dam power generation shortage rate for 9 months and SPI9

24 다목적댐 수력발전 데이터를 통한 가뭄 리질리언스 분석 연구

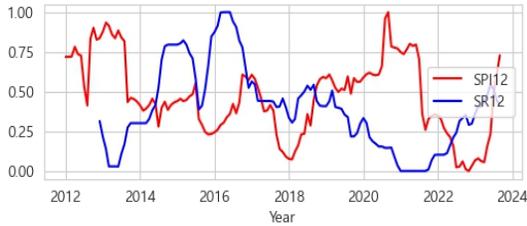


그림 25. 합천댐 12개월 간 전력발전 부족률과 SPI12 시계열 그래프

Fig. 25. Time series graph of Hapcheon dam power generation shortage rate for 12 months and SPI12

V. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 소양강, 충주, 대청, 합천 등 4개 다목적 댐을 대상으로 가뭄에 따른 수력발전 전력 생산량의 리질리언스를 분석하였다. 다목적댐 수력발전 전력 생산량의 리질리언스는 가뭄 시 계획 대비 발전량의 변동성에 따라 결정되며 계획 대비 일정한 실적을 유지할 수 있으면 리질리언스가 높은 것으로 판단하였다.

분석 방법은 각 댐의 월간 전력발전 부족량 계산 후 평균 전력발전 부족률(SR) 면적을 산출하여 SR과 SPI 간 상관분석을 진행하였다.

각 다목적 댐별 월간발전부족량이 급격히 증가하

는 시기를 분석한 결과 소양강댐 2014년 8월, 2015년 7월과 8월, 충주댐 2014년 8월과 2015년 7월, 8월, 대청댐 2015년 7월, 8월, 2016년 8월, 합천댐 2014년 8월, 2015년 9월, 2023년 6월이었으며 해당 시기의 원인을 분석한 결과, 장기적인 가뭄에 따른 저수량 감소와 유입량 부족으로 인한 것으로 분석되었으며, 합천댐의 경우 다른 세 댐과 다르게 유입 면적이 작고 유입량이 불규칙하여 단기간의 기상 조건 변화에 의한 것으로 분석되었다.

전체 다목적댐(소양강댐, 충주댐, 대청댐, 합천댐)의 전력발전 부족률과 SPI 비교 상관분석 결과는 표 8, 그림 26과 같다.

표 8. 전체 다목적댐 4개소(소양강, 충주, 대청, 합천) 전력발전 부족률과 SPI 비교 상관분석 결과표
Table 8. Comparative correlation analysis table of power generation shortage ratio and SPI for total multipurpose dams (Soyounggang, Chungju, Daechung, Hapcheon)

Comparative correlation	Total multipurpose dams
SR1 and SPI1	-0.19
SR3 and SPI3	-0.29
SR6 and SPI6	-0.44
SR9 and SPI9	-0.56
SR12 and SPI12	-0.60



그림 26. 전체 다목적댐 4개소(소양강, 충주, 대청, 합천) 전력발전 부족률과 SPI 비교 상관분석 결과 히트맵
Fig. 26. Comparative correlation analysis heatmap of power generation shortage ratio and SPI for total multipurpose dams (Soyounggang, Chungju, Daechung, Hapcheon)

전체 다목적댐의 전력발전 부족률과 SPI 비교 분석 결과 SPI1과 SR1의 상관 계수는 -0.19 였으며, SPI3과 SR3의 상관 계수는 -0.29 로 단기간의 강수량 변화는 전력발전 부족률에 영향을 거의 미치지 않았다. SPI6과 SR6의 상관 계수는 -0.44 , SPI9와 SR9의 상관 계수는 -0.56 , SPI12와 SR12의 상관 계수는 -0.6 으로 강한 음의 상관관계를 나타냈다. 1, 3개월의 짧은 기간보다 6, 9, 12개월의 긴 기간 강수량 변화가 전력발전 부족률에 더 큰 영향을 미친 것으로 분석되었다.

소양강, 충주, 대청댐의 경우 전력발전 부족량은 장기간 가뭄 발생에 따라 유의미한 변화를 보였다. 이는 단기 가뭄에 대한 리질리언스는 높지만, 장기적인 가뭄에 대한 리질리언스가 낮음을 시사하며, 합천댐의 경우 총 저수량과 유입량 자체가 작아 단기간, 장기간 모두 가뭄에 대한 리질리언스가 낮은 것으로 분석되었다.

본 연구의 한계점으로는 개별 다목적댐을 대상으로 분석하였기 때문에 댐 간의 상호작용이나 개별 발전소와 도시의 지역적인 영향을 고려하지 않았다는 한계점을 가지고 있으며, 인근 SPI 지점과 매칭하여 분석하였기 때문에 실제 댐 유역의 기상상황과 차이가 발생할 수 있다. 또한 발전소별 유지보수와 운영상의 문제로 인한 실적발전량의 변화를 반영하지 못하였다.

향후 연구에서는 인근 발전소의 계획 및 실적발전량의 반영이 필요하며, 발전소의 유지보수 기록과 운영 이슈 등을 조사하여 운영상의 문제를 파악 후 계절성 변동을 반영이 필요하다. 딥러닝을 이용한 예측모델을 구축하여 미래의 전력발전 부족률을 예측한다면 특정 시기의 급격한 변화를 이해하고 목표 대비 전력생산량이 급격히 떨어지는 복원력 한계지점을 예측할 수 있을 것이다. 또한 유사 가뭄 발생 시 대비와 운영 전략을 개선할 수 있을 것이다.

수자원을 이용한 전력 생산으로서 다목적댐의 역할은 점차 중요해질 것으로 예상된다. 가뭄에 따른 다목적댐 수력발전 전력 생산량의 동향을 파악하고 재해 대응 및 재해 위험 감소 기술을 제시한다면, 다목적댐을 활용한 가뭄 대비 전력 생산 관련 연구에 폭넓게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] E. Lee, J. Ji, and J. Yi, "Development of Optimization Model for Long-term Operation Planning of the Hydropower Reservoirs in Han River Basin", *Journal of Wetlands Research*, Vol. 21, No. spc, pp. 69-79, Nov. 2019. <https://doi.org/10.17663/JWR.2019.21.S-1.69>.
- [2] D. H. Kim, H. J. Yoo, H. J. Shin, and S. O. Lee, "Application study of resilience for evaluating performances of hydropower dam", *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 54, No. 4, pp. 279-287, Apr. 2021. <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2021.54.4.279>.
- [3] J. Jasiūnas, P. D. Lund, and J. Mikkola, "Energy system resilience-A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 150, pp. 111476, Oct. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111476>.
- [4] M. Bruneau, et al., "A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities", *Earthquake spectra*, Vol. 19, No. 4, pp. 733-752, Dec. 2003. <https://doi.org/10.1193/1.1623497>.
- [5] T. Hashimoto, J. R. Stedinger, and D. P. Loucks, "Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation", *Water resources research*, Vol. 18, No. 1, pp. 14-20, Feb. 1982. <https://doi.org/10.1029/WR018i001p00014>.
- [6] Y. Sheffi and J. B. Rice, "A supply chain view of the resilient enterprise", *MIT Sloan management review*, Vol. Magazine fall, Oct. 2005. <https://sloanreview.mit.edu/article/a-supply-chain-view-of-the-resilient-enterprise>
- [7] T. B. McKee, N. J. Doesken, and J. Kleist, "The relationship of drought frequency and duration to time scales", In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, Vol. 17, No. 22, pp. 179-183, Jan. 1993. <https://www.colostate.edu>.

- [8] J. Y. Yoo, M. H. Choi, and T. W. Kim, "Spatial analysis of drought characteristics in Korea using cluster analysis", Journal of Korea Water Resources Association, Vol. 43, No. 1, pp. 15-24, Jan. 2010. <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2010.43.1.15>.
- [9] D. Młyński, L. Książek, and A. Bogdał, "Meteorological drought effect for Central Europe's hydropower potential", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 191, pp. 114175, Feb. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114175>.
- [10] C. Folke, S. R. Carpenter, B. Walker, M. Scheffer, T. Chapin, and J. Rockström, "Resilience thinking: integrating resilience, adaptability and transformability", Ecology and society, Vol. 15, No. 4, Dec. 2010. <https://www.jstor.org/stable/26268226>.
- [11] L. P. Devkota, U. Bhattarai, P. Khatri, S. Marahatta, and D. Shrestha, "Resilience of hydropower plants to flow variation through the concept of flow elasticity of power: Theoretical development", Renewable Energy, Vol. 184, pp. 920-932, Jan. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.11.051>
- [12] D. H. Kim and H. J. Lee, "Deep-learning based Predictive Model For Energy Consumption using AMI Data", The Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol. 21, No. 10, pp. 29-35, Oct. 2023. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2023.21.10.29>.
- [13] N. Voisin, V. Tidwell, M. Kintner-Meyer, and F. Boltz, "Planning for sustained water-electricity resilience over the US: Persistence of current water-electricity operations and long-term transformative plans", Water Security, Vol. 7, No. 100035, Jul. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2019.100035>.

저자소개

허 다 슝 (Dasom Hur)



2014년 2월 : 강릉원주대학교
도시계획부동산학과(경제학사)
2021년 8월 : 서울대학교
환경계획학과 수료
(도시계획학석사)
2022년 2월 ~ 현재 :
(재)국제도시물정보과학 연구원

관심분야 : 기후변화, 환경계획, 도시환경

정 승 권 (Seung Kwon Jung)



1998년 2월 : 충북대학교
토목공학과(공학사)
2000년 2월 : 충북대학교
토목공학과(공학석사)
2021년 2월 : 강원대학교
방재전문대학원(공학박사)
2017년 9월 ~ 현재 : (재)국제도시

물정보과학연구원 연구위원

관심분야 : 기후변화, 재난관리, 도시환경