

구조방정식모형을 이용한 기상재해가 수력발전을 통한 전력 생산에 미치는 영향 분석

김지영* · 변성호** · 유지영*** · 김태웅****

Kim, Jiyoung*, Byun, Sung ho**, Yoo, Jiyoung***, Kim, Tae-Woong****

Investigating the Effects of Meteorological Disasters on Hydroelectric Power Generation Using a Structural Equation Modeling

ABSTRACT

Recently, global warming has accelerated climate change, increased extreme weather phenomena, and increased the frequency and intensity of weather disasters, leading to increasing uncertainty about the power production of new and renewable energy that is sensitive to weather. In fact, it has been reported that a number of damage to hydroelectric power generation have occurred due to weather disasters. Therefore, using the hydroelectric power generation performance data of Chungju Dam, meteorological data of Chungju Meteorological Observatory, and operation data of Chungju Dam, this study investigated the effect of meteorological disasters on hydroelectric power generation through structural equation modeling considering the number and intensity of meteorological disasters per month. The results indicated that the increased drought occurrence affected the decreased hydroelectric power generation by about 38.3 %, however the increased hydroelectric power generation could not explained by the increased flood occurrence. In conclusion, an increased drought occurrence in future may significantly influence hydroelectric power generation.

Key words : Meteorological disaster, Drought, Hydroelectric power generation, Structural equation modeling

초 록

최근 지구온난화로 인해 기후변화가 가속화되고, 극한 기상현상으로 인한 기상재해의 발생빈도와 강도 또한 증가하여, 날씨에 민감한 신재생에너지의 전력 생산에 대한 불확실성이 커지고 있다. 실제로 댐을 이용하는 수력발전소에서도 최근 기상재해로 인한 수력발전 피해가 다수 보고되고 있다. 본 연구에서는 충주댐 수력발전 실적 자료와 충주 기상관측소, 충주댐의 운영 자료를 바탕으로 기상재해의 월별 발생 횟수와 강도를 산정하여 구조방정식모형을 통해 가뭄과 홍수가 수력발전을 통한 전력 생산에 미치는 영향을 파악하였다. 이를 위해서는 충주댐 수력발전소 발전 실적 자료를 수집하고, 기상재해 관련 자료를 수집하였으며, 구조방정식모형을 통해 수력발전에 대한 기상재해의 영향을 분석하였다. 그 결과 가뭄 발생의 증가는 수력발전을 통한 전력 생산의 감소에 38.3 %의 영향이 있지만, 홍수 발생의 증가는 수력발전을 통한 전력 생산의 증가를 설명할 수 없었다. 미래에 가뭄 발생이 증가한다면 수력발전을 통한 전력 생산에 대한 영향 또한 커질 것이다.

검색어 : 기상재해, 가뭄, 수력발전, 구조방정식모형

* 정희원 · 한양대학교 대학원 스마트시티공학과 석박사과정 (Hanyang University · jiy117@hanyang.ac.kr)

** 정희원 · 한양대학교 대학원 건설환경시스템공학과 박사과정 (Hanyang University · 2006506799@naver.com)

*** 정희원 · 한양대학교(ERICA) 공학기술연구소 연구교수 (Hanyang University (ERICA) · jyoo84@gmail.com)

**** 종신회원 · 교신저자 · 한양대학교(ERICA) 건설환경공학과 교수

(Corresponding Author · Hanyang University (ERICA) · twkim72@hanyang.ac.kr)

Received June 30, 2022/ revised August 9, 2022/ accepted November 5, 2022

1. 서론

최근 전 세계에서 온실가스 감축을 위한 노력을 하고 있다. 특히 우리나라는 2022년부터 시행되는 탄소중립기본법에 따라, 국가 온실가스 배출량을 2030년까지 2018년의 국가 온실가스 배출량 대비 35 % 이상의 범위에서 대통령령으로 정하는 비율만큼 감축하는 것을 중장기 감축 목표로 설정하였기 때문에 신재생에너지 확대가 필수적이다. 그러나 지구온난화로 인해 기후변화가 가속화되고, 극한 기상현상이 증가하며 기상재해의 발생빈도와 강도 또한 증가하기 때문에 날씨에 민감한 신재생에너지의 전력 생산에 대한 불확실성이 커지고 있다. 우리나라는 여름철 열대야의 발생이 뚜렷이 증가하였고, 봄과 겨울 가뭄도 증가했다. 1.5 °C 상승하는 미래(2091~2100년)에는 동아시아 및 한반도의 극한기온 및 강수의 표준편차가 커져 확률분포함수가 퍼지는 경향을 보이고, 극한기온과 강수는 현재 대비 약 10 % 증가하며, 건기와 우기가 더욱 뚜렷하게 된다(KMA, 2020).

최근 기상재해로 인한 수력발전 피해가 다수 보고되고 있다. 2021년 가뭄으로 인해 미국 캘리포니아 수력발전소가 피해를 입었으며, 수력발전 의존도가 높은 브라질에서 대가뭄으로 발전량이 역대 최저 수준을 기록했다. 우리나라 또한 2015년 충청남도 보령댐에서 가뭄으로 인해 수력발전이 중단되었다. 반면 홍수기에는 홍수기 제한수위를 유지하기 위해 댐 내의 물을 방류하며, 이때 수력발전을 통해 전력을 생산한다. 실제로, 홍수 피해가 있었던 2020년 8월에는 충주수력발전소에서 232,934 MWh의 전력을 생산하여 계획 대비 실적은 471.1 %를 기록했다.

수력발전에 대한 기상재해의 영향에 관한 연구들이 다수 있다. Van Vliet et al.(2016)은 수문-전기 모델링을 통해 하천 흐름을 모의한 결과, 수력발전 이용률은 과거 30년간 평균에 비해 가뭄 기간 동안 5.2 % 감소하였다. Cuartas et al.(2022)은 여러 가지 가뭄지수를 비교 분석한 결과, 브라질에서 발생한 최근 10년간의 가뭄이 다양한 사회-경제 부문에 영향을 주었으며, 특히 수력발전 능력을 증가시켰음에도 불구하고 브라질 북부 지역을 제외한 모든 지역에서 가뭄이 수력발전이 영향을 미친다는 결론을 내렸다. Keophila et al.(2019)은 Hec-ResSim을 이용하여 신규 건설된 수력발전소의 전력 생산 효과를 제시하였으며, 과거 홍수 사례에 신규 수력발전소를 적용하여 시뮬레이션한 결과 기존 전력 생산량보다 10.29 % 증가하였다. Grady and Dennis(2022)은 미래 수력발전은 가뭄, 홍수 및 기후변화로 인해 불확실성이 증가할 것이며, 겨울에는 눈이 녹거나 비가 내리게 되어 수력발전 잠재력이 증가하고, 여름에는 가뭄으로 인해 수력발전 잠재력이 감소할 것이라고 하였다. 그러나 우리나라에서 기상재해가 수력발전이 미치는 영향을 파악한 연구는 거의 없는 실정이다

강수량 및 저수량의 영향이 큰 수력발전의 경우, 가뭄과 홍수를 동시에 고려하여 영향을 파악하는 것이 필요하다. 최근 기상재해의 영향을 파악하는 연구에 적용되는 다변량 통계기법 중 하나는 부분최소제곱 구조방정식(partial least squares-structural equation modeling, PLS-SEM)이다. Yoo et al.(2021)은 PLS-SEM을 이용하여 여름철 폭염에 미치는 계절별 가뭄의 영향정도를 파악하였으며, 여름철 가뭄-폭염 간의 영향이 크게 나타난 강원, 충청 지역은 서울(경기)지역에 비해 가뭄-폭염으로 인한 피해양상이 복합적으로 나타날 가능성이 있다는 것을 보여주었다. Kim et al.(2021)은 PLS-SEM을 활용하여 산불 발생에 영향을 미치는 요인으로 온도, 습도, 풍속, 강수, 가뭄 요인을 선정하고, 기상 및 수문학적 요인으로 분류하여 이들 간의 인과관계를 정량적으로 평가하였다.

본 연구의 목적은 수력발전을 통한 전력 생산의 불확실성을 증가시키는 요인인 가뭄과 홍수의 영향을 정량화하는 것이다. 이를 위해 충주댐에서 관찰하는 충주수력의 수력발전 실적 자료와 충주 기상관측소의 기상 자료, 충주댐의 운영 자료를 바탕으로 기상재해의 월별 발생 횟수와 강도를 분석하고 구조방정식모형을 통해 가뭄과 홍수가 수력발전을 통한 전력 생산에 미치는 영향을 파악하였다.

2. 분석자료 및 연구방법

2.1 대상지역

본 연구의 대상 지역은 충청북도 충주시에 위치한 충주댐 유역이다. 충주댐은 남한강 수계에 위치한 콘크리트 중력식댐이며, 높이는 97.5 m, 길이는 447 m, 유역면적은 6,648 km², 저수용량은 2,750 백만 m³, 연간 용수 공급용량은 3,380백만 m³이다.

국가통계포털(Statistics Korea, 2022)에서 제공하는 전력 생산량을 비교해 보면, 전국적으로 수력에너지가 전력 생산에 차지하는 비율은 0.7 %이지만, 충청북도의 경우 수력에너지가 차지하는 비율은 45.5 %이고, 충청북도의 전체 전력 생산 비율의 85.8 %는 신재생에너지이며, 그중 53 %는 수력에너지이다. 2020년 충청북도에서 생산된 수력발전량은 1,010,026 MWh이며, 이는 인구 10만 명이 1년간 사용할 수 있는 양이다.

충주댐 유역은 가뭄 또는 홍수가 발생할 경우 댐 운영을 통해 저수량을 관리하며, 충주수력을 통한 전력 생산으로 인해 수력에너지 의존도가 높은 지역이기도 하다. 충청북도 지역의 2022년 상반기 강수량은 평년의 절반 수준에 그쳤다. 이는 1973년 이후 기상 관측 이래 역대 최저 수준이었다. 반면 2022년 9월 3일부터 6일까지는 홍수조절을 위해 적게는 초당 1000톤에서 많게는 초당 1500톤을 방류한 사례도 있다. 실제로, 가뭄이 발생한 2015년 7월에는 충주수력에서 계획 대비 최저 실적치를 기록하기도 했고, 홍수가 발생한 2020년 8월에는 계획 대비 최대 실적치를 기록하기도 하였다.

2.2 분석자료

우리나라는 전력거래소에서 운영하는 전력통계정보시스템(KPX, 2022)을 통해 행정구역별, 발전원별 발전 실적을 2002년부터 월단위로 제공하고, K-water에서 관할하는 수력발전소는 K-water 공공데이터개방포털(K-water, 2022)을 통해 다목적댐별 수력발전소 운영현황을 2012년 1월부터 월 단위로 제공한다. 기상청 수문기상가뭄정보시스템(KMA, 2022)에서는 기상가뭄예보를 제공한다. 기상가뭄 예보 단계는 약한가뭄, 보통가뭄, 심한가뭄, 극심한 가뭄 등 4단계이고, 주의보 기준에 해당하는 가뭄 예보 단계는 보통가뭄 단계이다. 홍수통제소에서는 풍수해대책법시행령에 따라 홍수주의보와 경보를 발령하고 있다.

본 연구에서는 홍수와 가뭄에 대한 주의보(가뭄의 경우 보통가뭄) 기준을 활용하여 기상재해 기준을 정의하였다. 본 연구에서 정의한 홍수 기준은 최근 5년의 평균 저수위로부터 계획홍수위까지 100분의 60에 해당하는 수위이고 충주댐의 계획홍수위는 145 m이다. 가뭄 기준은 최근 6개월 누적강수량을 이용한 표준강수지수(SPI) -1.5 이하일 때이다. 본 연구에서는 2012년 1월부터 2021년 12월 기간 내 충주관측소(127)의 일단위 강수량 자료와 충주댐 일단위 저수위 자료를 수집하고, 기상재해를 분류하여 홍수와 가뭄을 나타내는 지표로 활용하였으며, 예상 대비 실적 발전량, 전력거래량, 전력거래금액을 수력발전을 나타내는 지표로 활용하였다.

2.3 연구방법

본 연구에서는 수력발전에 대한 기상재해의 영향을 파악하기 위하여, 기상재해를 설명하는 변수로 월별 재해 발생 일수와 발생 강도를 선정하였다. 구조방정식(SEM)은 독립변수와 종속변수 간의 1차원적 관계만 분석할 수 있다는 한계를 가진 기존 통계기법들을 보완하여, 회귀분석과 요인분석, 경로분석이 결합되어 발전된 다변량 통계기법 중 하나로 다양한 학문 분야에서 사용하고 있다(Hair et al., 2012). 구조방정식은 측정모형과 구조모형으로 구성되며, 측정모형은 Eqs. (1) and (2)와 같이 표현되고, 구조모형은 Eq. (3)과 같이 표현된다(Fornell and Larcker, 1981).

$$y = \Lambda_y \eta + \epsilon \tag{1}$$

$$x = \Lambda_x \xi + \delta \tag{2}$$

$$\eta = B\eta + \Gamma\xi + \zeta \tag{3}$$

여기서, y 와 x 는 각각 η 와 ξ 의 측정변수 행렬이고, Λ_y 와 Λ_x 는 각각 y 와 x 에 대한 요인적재 행렬을, 그리고 ϵ 와 δ 는 각각 y 와 x 에 대한 측정오차 벡터이다. 또한 η 와 ξ 는 내생잠재변수와 외생잠

재변수의 벡터이며, ζ 는 내생잠재변수의 오차 벡터, B 와 Γ 는 각각 η, ξ 의 경로계수 행렬이다.

구조방정식은 공분산 기반 구조방정식모형(covariance based-structural equation modelling, CB-SEM)과 부분최소제곱 구조방정식모형(PLS-SEM)으로 나눌 수 있다. 본 연구에서 사용한 부분최소제곱 구조방정식모형(PLS-SEM)은 이론 개발이나 잠재변수 예측에 적합하고, 정규성 가정에 구애받지 않으며, 자료의 수가 적어도 적용이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 활용가능한 자료가 적고(120건) 수력발전을 통한 전력 생산에 영향을 미치는 요인들이 다양한 상황을 고려하여 PLS-SEM을 사용하였다.

PLS-SEM의 평가는 측정모형(measurement model)과 구조모형(structural model) 평가로 구분된다. 측정모형 평가는 주로 측정변수와 잠재변수 간의 신뢰도와 타당도를 확보하기 위한 것이며, 구조모형 평가는 경로계수의 유의성과 적합성 검증을 위한 것이다. 모형은 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. 측정모형은 반영적 측정모형과 형성적 측정모형으로 구분되며, 잠재변수가 원인이 되고 측정변수가 결과가 되면 반영적 측정모형을 사용하고, 측정변수가 원인이 되고 잠재변수가 결과가 되면 형성적 측정모형을 사용한다. 본 연구에서 사용한 반영적 측정모형은 내적일관성신뢰도(internal consistency reliability), 집중타당도(convergent validity), 판별타당도(discriminant validity)를 통해 평가된다. 내적일관성신뢰도는 크론바흐 알파(Cronbach's alpha)와 Dijkstra-Henseler (D-H) rho, 그리고 CR (composite reliability)로 평가된다. 집중타당도는 외부적재치(outer loadings), AVE (average variance extracted)로 평가된다. 판별타당도는 Fornell-Larcker criterion, 교차적재치(cross loadings) 및 HTMT (Heterotrait-Monotrait) criterion을 이용해 평가된다. 구조모형은 다중공선성 VIF (variance inflation factors), 결정계수(coefficient of determination), 효과크기(effect size), 예측적 적합성(predictive relevance), 경로계수의 유의성(significance of path coefficient)과 적합성(goodness-of-fit)을 통해 평가된다. 세부 기준은 Table 1과 같다.

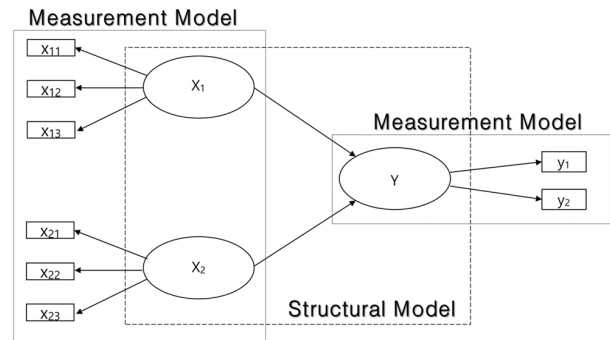


Fig. 1. The Concept of Structural Equation Modeling (Yoo et al., 2021)

Table 1. Assessment Methods and Criteria for PLS-SEM

Model	Assessment method		Acceptance
Reflective measurement model	Internal Consistency Reliability	Cronbach's alpha (α_c)	$\alpha_c \geq 0.6$
		D-H rho (ρ_a)	$\rho_a > 0.7$
		Composite reliability (ρ_c)	$0.6 \leq \rho_c \leq 0.95$
	Convergent Validity	Outer loadings	$ t > 1.96$, value of loadings should be considered
		AVE	AVE > 0.5
	Discriminant Validity	Fornell-Larcker criterion	Square root of each latent variable should be greater than the highest correlation among the latent variables
		Cross loadings	Outer loadings should exceed cross loadings
HTMT criterion		HTMT < 0.85	
Structural model	Multi-collinearity	VIF	Inner VIF < 5.0
	Path Coefficient	Significance of path coefficient	$ t > 1.96$
	Model fit	Coefficient of determination (R^2)	$R^2 > 0.26$: High $0.13 < R^2 < 0.26$: Medium $R^2 < 0.13$: Low
		Effect size (f^2)	$f^2 > 0.35$: High $0.15 < f^2 < 0.35$: Medium $f^2 < 0.15$: Low
		Predictive relevance (Q^2)	$Q^2 > 0$
		Goodness-of-fit	Over 0.36 : High 0.25~0.36 : Medium 0.1~0.25 : Low

2012년 1월부터 2021년 12월까지의 자료를 수집하였으며, 충주관측소(127)의 일 단위 강수량 자료와 충주댐 일 단위 저수위 자료를 활용하여, 본 연구에서 설정한 기상재해 기준을 기반으로 월 단위 재해 발생 일수와 발생 강도를 산정하였다. 기쁨은 기상재해 기준에 따라 SPI 지수를 산정한 뒤 재해를 분류하였으며, 이를 위해 일 단위 강수량 자료를 이용하여 180일 SPI (SPI180)를 산정하였다. 이는 월단위의 경우 6개월 SPI와 동일한 의미를 가진다. 일단위 SPI180 시계열을 대상으로 -1.5 이하일 때의 횟수를 세어 재해 발생 일수를 산정하고, 이때 기준 초과량을 발생 횟수로 나누어 강도를 산정하였다. 구축한 자료를 대상으로 구조방정식 분석 프로그램인 smartPLS3 프로그램을 활용하여 수력발전제에 대한 기상재해의 영향을 파악하였다. smartPLS3 프로그램은 smartPLS 사이트(SmartPLS, 2022)를 통해 제공받을 수 있다.

3. PLS-SEM을 이용한 충주댐 수력발전의 영향요인 평가

3.1 충주댐 수력발전을 통한 전력 생산 특성 분석

2012년 1월부터 2021년 12월까지 10년간의 120건 자료를 통해 수력발전 현황을 파악하였다. K-water 공공데이터 개방포털

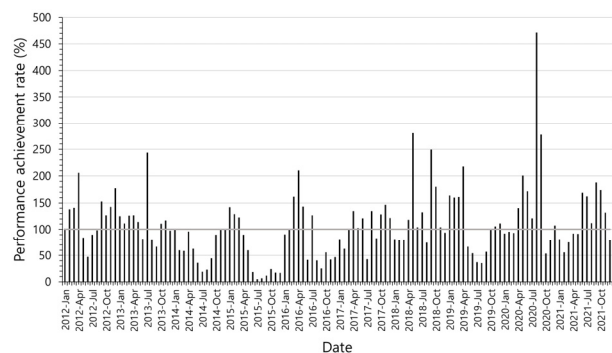


Fig. 2. Power Generation Ratio to Chungju Dam

에서 제공하는 계획 대비 실적 자료를 살펴보면(Fig. 2), 전국적으로 기쁨이 극심했던 2015년 7월 충주수력에서 6,812 MWh의 전력을 생산하여 계획 대비 실적 최저치인 4.7 %를 기록했다. 반면, 홍수 피해가 있었던 2020년도 8월 충주수력에서는 232,934 MWh의 전력을 생산하여 계획 대비 실적 최대치인 471.1 %를 기록했다. 2018년 5월에도 135,725 MWh의 전력을 생산하여 계획 대비 실적 280.7 %를 기록했다.

Fig. 3에 제시한 월별 발전실적은 7월과 8월에 가장 많으며, 11월에서 다음 해 3월 사이 가장 적다. 7월과 8월에 가장 많은

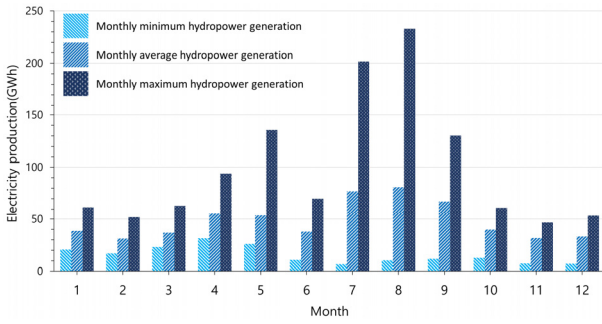


Fig. 3. Monthly Power Generation of Chungju Dam

발전은 하지만, 가뭄과 홍수의 영향으로 12월의 실적과 유사할 만큼 적은 발전 실적을 가지는 경우도 있다.

3.2 수력발전에 대한 기상재해의 영향 분석을 위한 PLS-SEM 개발 및 모형 적합성 검증

서론에서 제시했던 다양한 연구사례들을 근거로 수력발전에 대한 기상재해의 영향 분석을 위한 PLS-SEM을 개발하고 가설을 설정하였다. 수력발전에 영향을 주는 요인은 기상재해뿐만 아니라 전력거래소의 계통한계가격과 운영계획에 미치는 정책 및 경제적 요인 등을 포함해서 다양하다. 하지만, 일반적으로 연구자가 수력발전의 가격 결정과 운영계획에 관한 상세한 정보를 얻는 데 상당히 어렵고, 기상재해 외의 인자들의 영향을 제거하기에는 한계가 있다. 따라서, 본 연구에서는 수력발전에 영향을 미치는 다양한 인자

중 홍수와 가뭄 등 기상재해 인자가 주로 수력발전에 영향을 미칠 것이라는 가정 하에 PLS-SEM을 구성하였다.

[H1] 가뭄은 수력발전에 부(-)의 영향을 미칠 것이다.

[H2] 홍수는 수력발전에 정(+)의 영향을 미칠 것이다.

본 연구에서는 PLS-SEM을 구성하기 위해 가뭄 요인, 홍수 요인, 수력발전 요인으로 분류하고, 이를 잠재변수로 설정하였다. 잠재변수는 측정변수를 통해 간접적으로 측정된다. 본 연구에서 외생 잠재변수와 관련한 측정변수는 가뭄 및 홍수의 영향을 나타내는 지표를 의미한다. Table 2는 PLS-SEM을 구성하는 잠재변수에 대한 측정변수의 통계적 특성을 정리한 것이다.

PLS-SEM의 외부모형 평가를 위해서 먼저 측정변수들에 대한 신뢰도와 타당도 평가를 통해 모형의 적합성을 검증하였다. 반영적 측정모형은 내적 일관성 신뢰도, 집중타당도, 판별타당도 평가를 통해 모형의 적합성을 검증하였다. 내적 일관성 신뢰도 평가는 크론바흐 알파(α_c), D-H rho (ρ_a), 합성신뢰도(ρ_c)를 활용하였으며, Table 3에 나타난 바와 같이 본 연구의 모든 잠재변수들은 수용 범위를 만족하므로, 내적 일관성 신뢰도 검증을 통과하였다. 집중타당도 평가는 외부적제치와 측정변수 신뢰도, AVE를 활용하며 Table 3과 같이 본 연구의 모든 잠재변수들은 수용 범위를 만족하므로 집중타당도 평가를 통과하였다. 외부적제치에 해당하는 값은 Fig. 4에서 잠재변수에서 측정변수로 향하는 화살표 위에

Table 2. Description of Latent Variables and Measurement Index

Latent variable	Explanation	Index in Fig. 4	Mean	Median	Min	Max	Standard Deviation	Excess Kurtosis	Skewness
Flood	Flood occurrence days	Flood_day	18.10	25.00	3.00	31.00	11.36	-2.09	-0.25
	Flood intensity	Flood_int	1.34	1.40	0.14	2.26	0.63	-0.20	-0.53
Drought	Drought occurrence days	Drought_day	23.67	29.00	4.00	31.00	7.79	0.23	-0.94
	Drought intensity	Drought_int	0.36	0.33	0.07	0.82	0.22	-1.02	0.48
Hydro power	Production to Plan Ratio	HY1	106.97	99.20	4.70	471.70	64.55	7.85	1.88
	Power transaction volume	HY2	1.68	1.30	0.19	10.00	1.45	13.55	3.23
	Power transaction amount	HY3	2.17	1.76	0.21	15.62	1.94	18.49	3.28

Table 3. Results of Internal Consistency Reliability and Convergent Validity

Internal consistency reliability					
	Flood	Drought	Heat wave	Cold wave	Hydropower
α_c	0.92	0.96	0.90	0.96	0.79
ρ_a	1.51	0.96	2.27	0.97	0.93
ρ_c	0.96	0.98	0.94	0.98	0.86
Convergent validity					
AVE	0.92	0.96	0.89	0.96	0.68

표현하였다. 판별타당도 평가는 Fornell-Larcker 기준, 교차적재치, HTMT를 활용하며 Table 4에 나타난 바와 같이 본 연구의 모든 잠재변수들은 수용 범위를 만족하므로 판별타당도 평가를 통과하였다.

측정모형의 신뢰도와 타당도가 확인되었으므로, 구조방정식의 평가기준과 수용기준을 활용하여 구조모형을 평가하고, 가설을 검증하였다. 구조모형은 다중공선성, 결정계수(R^2), 효과크기(f^2), 예측적 적합성(Q^2), 경로계수의 유의성 및 적합성 평가를 통해 모형의 적합성을 검증하였다. 잠재변수들 간의 다중공선성 평가를 위해 내부VIF값을 산정하였으며, 그 결과 모두 5 미만으로 잠재변수들 간에는 다중공선성이 없는 것으로 나타났다. 결정계수(R^2)는 수력발전이 0.193으로 중간 설명력을 가진다. 효과크기(f^2)는 가뭄은 0.18, 홍수는 0.039로 가뭄이 홍수보다 높은 효과크기를 가지는 것으로 나타났다. 판별 기준에 따르면, 가뭄은 중간효과크기, 홍수는

낮은효과크기를 가진다. 예측적 적합성(Q^2)은 수력발전이 0.101로 모든 내생잠재변수들이 0보다 크므로 구조모형은 예측적 적합성을 가지고 있는 것으로 평가할 수 있다. 경로계수의 유의성과 적합성 평가 결과는 Table 5와 같다. 가설검증 결과, 가뭄이 수력발전에 부정적인 영향을 미칠 것이라는 가설은 채택되었고, 홍수가 수력발전에 긍정적인 영향을 미칠 것이라는 가설은 기각되었다.

Fig. 4는 수력발전에 영향을 미치는 요인 평가를 위한 PLS-SEM이다. 검은색 선은 가설이 기각된 것을 의미하며, 초록색 선은 가설이 채택된 것을 의미한다. 본 연구에서 가뭄은 수력발전에 38.3%의 부(-)의 영향을 미쳤고, 홍수가 수력발전에 영향이 있을 것이라는 가설은 기각되었다.

3.3 수력발전에 대한 단기 및 장기가뭄의 영향 분석

3.2절에서 수행한 연구 결과를 바탕으로, 수력발전에 영향을 미치는 가뭄에 대해 단기적 및 장기적 요인을 구분하여 구조방정식모형을 설정하였다. 2012년 1월부터 2021년 12월까지 10년간의 충주댐 실적 자료 120건에 대한 단기가뭄과 장기가뭄의 영향을 분석하기 위해 다양한 지속기간을 가지는 표준강수지수(SPI)를 활용하여 단기가뭄과 장기가뭄을 설명하는 변수를 구축하였다. 즉, 단기가뭄 잠재변수를 설명하는 설명변수에는 SPI1, SPI2, SPI3, 장기가뭄 잠재변수를 설명하는 설명변수에는 SPI12, SPI18, SPI24가 사용되었다. Table 6은 PLS-SEM을 구성하는 잠재변수에 대한 설명변수의 통계적 특성을 정리한 것이다. 서론에서의 문헌 고찰을 바탕으로 다음과 같이 가설을 설정하였다. 3.2절 연구에서는 가뭄의 발생 횟수와 강도가 증가하면 수력발전량이 적어진다는 가정을 하였기 때문에 가뭄이 수력발전에 부(-)의 영향을 미친다는 가설을 설정했지만, 이번 연구에서는 가뭄지수가 낮아질수록 극한 가뭄 상태로 향한다는 것을 의미하고, 이는 수력발전에 부정적인 영향을 주므로 가뭄이 수력발전에 정(+)의 영향을 미친다는 가설을 설정하였다.

- [H1] 단기가뭄은 수력발전에 정(+)의 영향을 미칠 것이다.
- [H2] 장기가뭄은 수력발전에 정(+)의 영향을 미칠 것이다.

Table 4. Results of Fornell-Larcker Criterion and HTMT Criterion

Fornell-Larcker criterion			
Latent variable	Flood	Drought	Hydropower
Flood	0.96	-	-
Drought	-0.10	0.98	-
Hydropower	0.22	-0.40	0.82
HTMT criterion			
Latent variable	Flood	Drought	Hydropower
Flood	-	-	-
Drought	0.11	-	-
Hydropower	0.17	0.41	-

Table 5. Results of Path Coefficient

Path coefficient	Standard Deviation	t-statistics	p-values (p < 0.05)	p-values (p < 0.10)
Drought → Hydropower	0.06	6.31	0.00	0.00
Flood → Hydropower	0.10	1.79	0.07	0.07

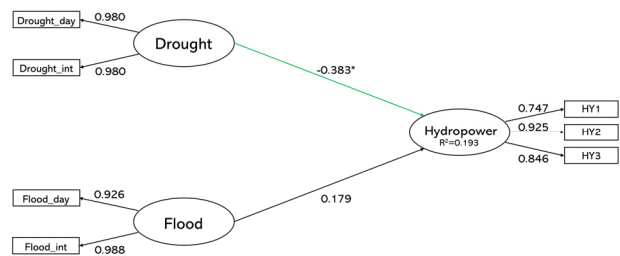


Fig. 4. PLS-SEM for Effect of the Meteorological Disasters on Hydroelectric Power Generation

측정변수들에 대한 신뢰도와 타당도 평가를 수행하여 모형의 적합성을 검증하였다. 반영적 측정모형 평가를 위해 내적 일관성 신뢰도, 집중타당도, 판별타당도 평가를 통해 모형의 적합성을 검증하였다(Table 7). 크론바흐 알파(α_c), D-H rho (ρ_a), 합성신뢰도(ρ_c)를 활용한 내적 일관성 신뢰도 평가 결과, 본 연구의 모든 잠재변수들은 수용 범위를 만족하므로 내적 일관성 신뢰도 검증을 통과하였다. 외부적재치와 측정변수 신뢰도, AVE를 활용한 집중타당도 평가 결과, 본 연구의 모든 잠재변수들은 수용 범위를 만족하

므로 집중타당도 평가를 통과하였다. Fomell-Larcker 기준, 교차적 재치, HTMT를 활용한 판별타당도 평가 결과, 본 연구의 모든 잠재변수들은 수용 범위를 만족하므로 판별타당도 평가를 통과하였다.

잠재변수를 측정하기 위한 측정모형에서의 신뢰도와 타당도가 확보되었으므로, 구조방정식의 평가기준과 수용기준을 활용하여 구조모형을 평가하고, 가설을 검증하였다. 구조모형은 다중공선성, 결정계수(R^2), 효과크기(f^2), 예측적 적합성(Q^2), 경로계수의 유의성 및 적합성 평가를 통해 모형의 적합성을 검증하였다. 잠재변수들 간의 다중공선성 평가를 위해 내부VIF값을 산정하였으며, 그 결과 모두 5 미만으로 잠재변수들 간에는 다중공선성이 없는 것으로 나타났다. 결정계수(R^2)은 0.282로 높은 설명력을 가진다. 효과크기(f^2)는 단기가뭄은 0.104, 장기가뭄은 0.178로 단기가뭄보다 장기가뭄이 더 높은 효과크기를 가지는 것으로 나타났다. 판별기준에 따르면, 단기가뭄은 낮은 효과크기, 장기가뭄은 중간 효과크기를 가진다. 예측적 적합성(Q^2)은 0.187로 0보다 크므로 구조모형은 예측적 적합성을 가지고 있는 것으로 평가할 수 있다. 경로계수의

유의성과 적합성 평가 결과 단기가뭄과 장기가뭄 모두 통과하여 유의성과 적합성을 확인하였다. 따라서 모든 가설이 채택되었다.

Fig. 5는 수력발전에 대해 단기가뭄 및 장기가뭄이 미치는 영향을 평가하기 위한 최종 모형이다. 본 연구에서는 단기가뭄은 수력발전 전에 28.6 %의 정(+)의 영향을 미쳤고, 장기가뭄은 수력발전 전에 37.3 %의 정(+)의 영향을 미쳤다. 이번 연구에서 설정한 가뭄지수가 낮아질수록 수력발전 전에 부정적인 영향을 준다는 가설이 성립하였고, 특히 단기가뭄보다는 장기가뭄에서 더 큰 영향이 나타났다.

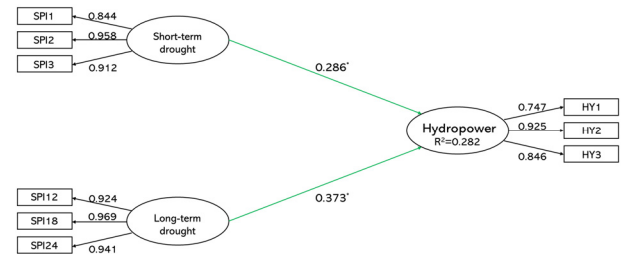


Fig. 5. PLS-SEM for Effect of the Short/Long-term Droughts on Hydroelectric Power Generation

Table 6. Description of Latent Variables and Measurement Index of Short/Long-term Drought Analyses

Latent variable	Explanation	Index in Fig. 5	Mean	Median	Min	Max	Standard Deviation	Excess Kurtosis	Skewness
Short-term drought	SPI1	SPI1	-0.025	-0.064	-2.14	1.8	0.80	-0.36	-0.1
	SPI2	SPI2	-0.031	0.008	-1.96	1.82	0.87	-0.50	-0.056
	SPI3	SPI3	-0.051	0.015	-2.32	1.83	0.91	-0.55	-0.15
Long-term drought	SPI12	SPI12	-0.27	-0.29	-2.15	2.59	1.095	-0.16	0.43
	SPI18	SPI18	-0.28	-0.22	-2.22	2.29	1.17	-0.64	0.37
	SPI24	SPI24	-0.36	-0.43	-2.37	1.95	1.22	-0.69	0.23
Hydro power	Production to Plan Ratio	HY1	106.97	99.20	4.70	471.70	64.55	7.85	1.88
	Power transaction volume	HY2	1.68	1.30	0.19	10.00	1.45	13.55	3.23
	Power transaction amount	HY3	2.17	1.76	0.21	15.62	1.94	18.49	3.28

Table 7. Results of Measurement Model for Short/Long-term Drought Analyses

Latent variable	Measurement variable	Internal Consistency Reliability			Convergent Validity		Discriminant Validity
		α_c	ρ_a	ρ_c	Outer loadings	AVE	HTMT<0.85
Short-term drought	SPI1	0.89	0.90	0.93	0.844	0.82	O
	SPI2				0.958		
	SPI3				0.912		
Long-term drought	SPI12	0.94	0.95	0.96	0.924	0.89	O
	SPI18				0.969		
	SPI24				0.941		
Hydropower	HY1	0.792	0.79	0.88	0.747	0.71	O
	HY2				0.925		
	HY3				0.846		

4. 결론

충주댐은 우리나라 다목적댐 중 수력발전의 설비 규모가 두 번째로 크며, 충청북도 지역 내에서의 수력발전을 통한 전력은 유용한 에너지원이다. 그러나 가뭄과 홍수와 같은 기상재해는 수력 발전에 있어서 전력 생산량의 변동성을 증가시키는 요인으로 작용한다. 즉, 신재생에너지를 통한 전력 생산의 비율이 상대적으로 큰 충청북도 지역에서는 기상재해로 인해 수력발전량의 불확실성은 더욱 우려되는 부분이다.

본 연구에서는 PLS-SEM을 활용하여 수력발전에 영향을 미치는 기상재해 중 가뭄과 홍수의 영향을 분석하였다. PLS-SEM 평가 결과, 측정모형 평가를 통해 모든 잠재변수가 신뢰도와 타당도를 확보하였지만, 구조모형 평가에서 홍수 요인이 경로계수 유의성 평가를 통과하지 못하였다. 결과적으로, 가뭄의 증가는 수력발전을 통한 전력 생산에 부정적인 영향을 줄 것이라는 가설을 통과하였고, 홍수의 증가는 수력발전을 통한 전력 생산에 긍정적인 영향을 줄 것이라는 가설은 기각되었다. 즉, 가뭄은 수력발전을 통한 전력 생산에 불확실성을 주는 요인이 되지만, 홍수는 수력발전을 통한 전력 생산에 불확실성을 주는 요인이 되지 않는다. 본 연구에서는 유의수준 5 %에서의 평가를 진행했기 때문에 홍수 요인에 해당하는 가설이 기각되었지만, 유의수준 10 %에서의 평가를 진행한 결과, 홍수 요인 또한 수력발전에 불확실성을 주는 요인으로 나타났다. 유의수준의 변경뿐만 아니라 경보 기준을 활용한다면 모형의 반응 정도가 변화할 가능성도 존재할 것이다.

추가적으로 단기가뭄과 장기가뭄이 수력발전을 통한 전력 생산에 미치는 영향을 알아보기 위해 PLS-SEM을 구성하고 평가하였다. 그 결과, 단기가뭄이 수력발전을 통한 전력 생산에 미치는 영향은 28.6 %, 장기가뭄이 수력발전을 통한 전력 생산에 미치는 영향은 37.3 %였다. 이는 비교적 단기간의 가뭄보다는 장기간의 가뭄이 영향 정도가 더 큰 것을 설명한다. 미래에 극한 가뭄이 발생할 경우, 수력발전이 영향을 받을 가능성이 높다.

기존 연구에서는 가뭄과 홍수가 수력발전에 미치는 영향을 개별적으로 파악하였지만, 본 연구에서는 PLS-SEM을 활용하여 두 요인이 수력발전을 통한 전력 생산에 미치는 영향을 비교하였다. 우리나라의 실제 전력시장 운영은 전력거래소에서 계통한계가격이 결정되고, 중앙급전발전기에 대한 운영발전계획이 발표된 후 전력거래소의 지시에 따라 발전기의 기동이 이루어진다. 따라서 기상재해가 발생하더라도 실제 발전량에 그 영향이 미치기까지는 정책 및 경제 상황과 관련된 여러 가지 인자들이 복합적으로 작용하게 된다. 본 연구에서는 수력발전과 관련된 상세한 정보를 얻는 데 상당한 제약이 있고 기상재해 이외의 인자들의 영향을 제거하는 데 한계가 있었지만, 추후 연구에서 다양한 사회·경제적 인자들

고려한다면 기상재해 인자 이외의 정책 및 경제적인 요인에 대해서도 영향평가를 수행할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 가뭄 대응 물관리 혁신기술 개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (2022003610001).

References

- Cuartas, L. A., Cunha, A. P. M. D. A., Alves, J. A., Parra, L. M. P., Deusdará-Leal, K., Costa, L. C. O., Molina, R. D., Amore, D., Broedel, E., Seluchi, M. E., Cunningham, C., Alvalá, R. C. D. S. and Marengo, J. A. (2022). "Recent hydrological droughts in Brazil and their impact on hydropower generation." *Water*, Vol. 14, No. 4, 601.
- Fornell, C. and Larcker, D. F. (1981). "Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error." *Journal of Marketing Research*, Vol. 18, No. 1, pp. 39-50.
- Grady, C. and Dennis, L. (2022). *Hydropower's future is clouded by droughts, floods and climate change - it's also essential to the US electric grid*, The Conversation, Available at: <https://theconversation.com/hydropowers-future-is-clouded-by-droughts-floods-and-climate-change-its-also-essential-to-the-us-electric-grid-182314> (Accessed: September 13, 2022).
- Hair, J. F., Sarstedt, M., Pieper, T. M. and Ringle, C. M. (2012). "The use of partial least squares structural equation modelling in strategic management research: A review of past practices and recommendations for future applications." *Long Range Planning*, Vol. 45, No. 5, pp. 320-340.
- Keophila, V., Promwungkwa, A. and Ngamsanroaj, K. (2019). "Effectiveness of cascades reservoir for flood control operation and electricity production in Nam Ngum river." *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1175, No. 1, 012276.
- Kim, D. W., Yoo, J. Y., Son, H. J. and Kim, T. W. (2021). "The relationship of drought frequency and duration of time scales." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 54, No. 3, pp. 145-156 (in Korean).
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2020). *Korean climate change assessment report 2020 (an abridged version)* (in Korean).
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2022). *Hydrological weather drought information system*, Available at: <https://hydro.kma.go.kr/front/intro.do> (Accessed: Jan 2, 2023).
- Korea Power Exchange (KPX) (2022). *Electric power statistics information system (ePSIS)*, Available at: <https://epsis.kpx.or.kr/epsisnew/> (Accessed: Jan 2, 2023).
- K-water (2022). *Public data open portal*, Available at: <https://opendata.kwater.or.kr/main.do> (Accessed: Jan 2, 2023).

- SmartPLS (2022). *SmartPLS3*, Available at: <https://www.smartpls.com/> (Accessed: Jan 2, 2023).
- Statistics Korea (2022). *Korean statistical information service (KOSIS)*, Available at: <https://kosis.kr/index/index.do> (Accessed: Jan 2, 2023).
- Van Vliet, M. T., Sheffield, J., Wiberg, D. and Wood, E. F. (2016). “Impacts of recent drought and warm years on water resources and electricity supply worldwide.” *Environmental Research Letters*, Vol. 11, No. 12, 124021.
- Yoo, J. Y., Kim, J. G., Han, J. W. and Kim, T. W. (2021). “Impact assessment between heatwave and drought based on PLS-SEM.” *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, KSCE, Vol. 41, No. 2, pp. 113-121 (in Korean).