



Evaluation of hydrologic risk of drought in Boryeong according to climate change scenarios using scenario-neutral approach

Kim, Jiyoung^a · Han, Young Man^b · Seo, Seung Beom^c · Kim, Daeha^d · Kim, Tae-Woong^{e*}

^aPh.D. Student, Department of Smart City Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

^bPh.D. Student, Department of Smart City Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

^cAssistant Professor, International School of Urban Sciences, University of Seoul, Seoul, Korea

^dAssistant Professor, Department of Civil Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju, Korea

^eProfessor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Ansan, Korea

Paper number: 24-001

Received: 2 January 2024; Revised: 6 March 2024; Accepted: 7 March 2024

Abstract

To prepare for the impending climate crisis, it is necessary to establish policies and strategies based on scientific predictions and analyses of climate change impacts. For this, climate change should be considered, however, in conventional scenario-led approach, researchers select and utilize representative climate change scenarios. Using the representative climate change scenarios makes prediction results high uncertain and low reliable, which leads to have limitations in applying them to relevant policies and design standards. Therefore, it is necessary to utilize scenario-neutral approach considering possible change ranges due to climate change. In this study, hydrologic risk was estimated for Boryeong after generating 343 time series of climate stress and calculating drought return period from bivariate drought frequency analysis. Considering 18 scenarios of SSP1-2.6 and 18 scenarios of SSP5-8.5, the results indicated that the hydrologic risks of drought occurrence with maximum return period ranged 0.15 ± 0.025 within 20 years and 0.3125 ± 0.0625 within 50 years, respectively. Therefore, it is necessary to establish drought policies and countermeasures in consideration of the corresponding hydrologic risks in Boryeong.

Keywords: Scenario-neutral approach, Bivariate drought frequency analysis, Hydrologic risk, Climate change

시나리오 중립 접근법을 활용한 기후변화 시나리오에 따른 보령시 가뭄의 수문학적 위험도 평가

김지영^a · 한영만^b · 서승범^c · 김대하^d · 김태웅^{e*}

^a한양대학교 대학원 스마트시티공학과 박사과정, ^b한양대학교 대학원 건설환경시스템공학과 박사과정,

^c서울시립대학교 국제도시과학대학원 조교수, ^d전북대학교 토목환경자원에너지공학부 조교수, ^e한양대학교(ERICA) 건설환경공학과 교수

요지

기후위기에 선제적으로 대비하기 위해서는 기후변화에 따른 영향을 예측 및 분석하고, 이를 바탕으로 기후위기 적응과 관련한 정책과 전략을 수립할 필요가 있다. 이를 위해 기후변화를 고려해야 하나, 기존 연구 방법인 시나리오 리드 접근법에서 연구자들은 기후변화 대표 시나리오를 선택하여 활용하기 때문에, 예측된 결과의 불확실성이 크고 신뢰도가 낮다. 이러한 연구 결과는 기후변화 관련된 수자원 정책 및 설계기준에 반영되는 데 한계가 있다. 따라서 기후변화로 인해 발생가능한 변화 범위를 고려하는 시나리오 중립 접근법을 활용할 필요가 있다. 본 연구에서는 보령시를 대상으로 총 343개의 기후스트레스 시계열을 생성한 뒤 이변량 가뭄빈도분석을 통해 재현기간을 산정하고 가뭄에 대한 수문학적 위험도를 산정하였다. 분석결과, SSP1-2.6 18개 및 SSP5-8.5에 18개에 대해 최대 재현기간의 가뭄이 20년 내에 발생할 수문학적 위험도는 0.15 ± 0.025 , 50년 내에 발생할 수문학적 위험도는 0.3125 ± 0.0625 사이로 나타났다. 따라서 보령시에서는 해당 범위의 수문학적 위험도를 고려하여 가뭄 정책 및 대책 수립이 필요하다.

핵심용어: 시나리오 중립 접근법, 이변량 가뭄 빈도해석, 수문학적 위험도, 기후변화

*Corresponding Author. Tel: +82-31-400-5184

E-mail: twkim72@hanyang.ac.kr (Kim, Tae-Woong)

1. 서론

최근 기후변화로 인하여 우리나라는 지역에 따라 2~3년 주기로 가뭄이 발생하며 7년 주기로 극한 가뭄이 발생하고 있다 (Lee *et al.*, 2021). 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 특별보고서는 산업화 이전 시기에 비해 전지구 평균기온이 1.5°C 상승할 경우 폭염, 홍수 및 가뭄 등 자연재해의 발생 횟수가 증가할 것이며, 이러한 자연재해의 증가 추세는 온난화 속도와 규모에 따라 더욱 심화될 것으로 전망하였다(IPCC, 2018). 기후변화가 물 부족과 같이 인류 문명에 회복할 수 없는 위험을 초래하여 획기적인 온실가스 감축이 필요한 상태를 의미하는 기후위기에 선제적으로 대비하기 위해서는 기후변화에 따른 중장기 영향에 대한 예측 및 분석을 기반으로 위험요인을 도출하고, 기후위기 적응과 관련한 정책과 사업 등을 수립하고 추진할 필요가 있다. 그러나 2023년 7월 감사원 감사 결과, 현재 우리나라 정부는 기후변화에 대한 중장기 예측 없이 가뭄 분야의 정책과 사업을 수립하고 추진하는 것으로 나타났으며, 감사원은 환경부에 미래 기후변화 요인을 반영해 가뭄관련 정책을 마련할 것을 권고하였다(BAI, 2023).

최근 기후변화 시나리오에 기반한 연구의 필요성이 증대되었고, 이에 따라 가뭄 연구에 기후변화 시나리오를 적용한 다양한 사례가 있다. Lee (2016)은 충청남도 15개 시·군을 대상으로 기후변화 시나리오 중 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP) 8.5 시나리오에 대해 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI)를 활용하여 기상학적 가뭄 수행한 결과, 2030년대 및 2080년대 모두 충남 서부 지역은 가뭄에 취약한 것으로 나타났다. Park *et al.* (2019)는 우리나라 행정구역을 대상으로 가뭄 위험도 분석을 수행했으며, 미래 극한가뭄에 대한 가뭄 위험도를 평가할 경우 다양한 시나리오에 대한 결과를 비교 평가할 필요가 있다는 것을 강조하였다. Kim *et al.* (2023a)은 낙동강 유역을 대상으로 베이지안 분류 기반의 통합가뭄지수를 활용하여 미래 가뭄에 대한 수문학적 위험도를 평가하였으며, 다양한 기후모델의 적용 필요성과 및 불확실성을 정량화할 필요성을 제시하였다.

이처럼, 기후변화 시나리오에 기반한 가뭄 연구가 활발히 수행되고 있지만, 시나리오 리드(Scenario-led) 접근법이라 불리는 기존 연구에서 연구자들은 전지구적 기후모델(Global Climate Model, GCM)을 활용하여 개별 시나리오에 대한 기후변화 영향평가를 수행한다. 따라서, 평가 결과를 일반화하는 데 불확실성이 커지고 신뢰도가 낮아지는 문제가 발생한다. 이러한 기후변화 시나리오 리드 접근법에 의한 결과는 정책 및 설계기

준 마련에 활용되기에는 한계가 있다(Broderick *et al.*, 2019).

이에 대한 대안으로, 시나리오 중립(Scenario-neutral) 접근법이 제안되었다(Prudhomme *et al.*, 2010). 시나리오 중립 접근법은 미래 발생가능한 기후 변동 범위를 고려하여 분석을 수행한 후 기후변화 시나리오를 적용하여 영향을 평가하는 방식이다(Prudhomme *et al.*, 2010; Broderick *et al.*, 2019). 시나리오 중립 접근법은 기후스트레스의 크기와 의사결정변수 사이의 관계를 이용하여 기후변화 영향평가를 위한 함수를 생성하고, 이를 시각화한 반응표면(Response surface)을 기반으로 기후변화 영향평가를 수행하게 된다. 이를 통해 미래 기후변화 시나리오에 대한 영향평가를 수행하는 데 용이하고, 기존 정책을 유지·관리하는 경우에도 활용 가능하다(Brown *et al.*, 2012).

시나리오 중립 접근법은 홍수 및 저수지 운영 관련 연구에서 활발히 적용되고 있다. Prudhomme *et al.* (2010)은 시나리오 중립 접근법의 개념을 제안하고, 영국의 Northwest Scotland (Enrick at Mill of Tore) 및 Southeast England (Roding at Redbridge) 유역에서 Probability Distributed Moisture (PDM) 모델을 이용한 홍수 민감도 분석을 통해 홍수 위험에 대한 설계 허용량 평가를 수행하였다. Broderick *et al.* (2019)은 아일랜드의 35개 유역을 대상으로 변동성을 부여한 강수량 자료와 잠재증발산량 자료를 GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journalier model) 강우-유출 모형 및 NAM (Nedbor Afstromnings Model) 강우-유출 모형에 입력하여 20년 유량 자료를 생성한 후 20년 첨두홍수량을 모의하여 민감도 분석을 수행하였다. 우리나라의 경우, Kim *et al.* (2022)는 용담댐을 대상으로 추계학적 기법을 통해 294개의 기후스트레스 시계열을 생성한 후 GR6J (Génie Rural à 6 paramètres Journalier model) 강우-유출 모형 및 랜덤포레스트(Random Forest) 댐운영 모형을 활용하여 2021-2040년의 연최대일방류량, 저수량신뢰도, 공급신뢰도의 변화를 분석하였다. 그 결과, 용담댐의 기존 운영방식은 저수량 확보에 치중되어 있어, 기존 운영방식이 지속될 경우 용담댐 하류지역에 대한 홍수위험이 증가할 것으로 전망했다. Kim *et al.* (2023b)은 충청남도 보령댐을 대상으로 기존 저수지 운영방식 및 도수로에 따른 가뭄 대응효과를 기후변화 시나리오 및 수요 변화를 고려하여 Decision-Scaling 방법을 통해 평가하는 방안을 제안하였다. 그 결과, 도수로 반영 여부에 따라 보령댐의 가뭄 취약도는 약 95.8%에서 98.13%까지 증가하나, 전체 기후변화 시나리오에서의 공급 안전도는 약 52.07%에서 66.94%로 매우 취약했다.

연구자들이 시나리오 중립 접근법의 활용성을 제시하고 있지만, 가뭄 위험도 평가에 활용된 연구 사례는 드문 실정이

다. 또한, 기존 연구사례에서는 유역 단위의 연구를 수행하였지만, 우리나라 정책은 행정구역 단위로 마련되기 때문에, 행정구역 단위의 분석 또한 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 최근 가뭄 취약성이 다수 보고되고 있는 충청남도 보령시를 대상으로 시나리오 중립 접근법에 기반한 수문학적 위험도 분석을 수행하였다. 이를 위해 체계적 모의 기법 중 하나인 준모수적(Semi-parametric) 모형을 활용하여 50년 기간의 343개 기후스트레스 시계열을 생성한 후 이변량 가뭄 빈도분석을 통해 수문학적 위험도를 산정하였다. 또한 IPCC 기후변화 6차 보고서(Sixth Assessment Report, AR6)에서 제시한 공통사회경제경로 (Shared Socioeconomic Pathways, SSP) 중 SSP1-2.6 및 SSP5-8.5를 전반기(2021-2040년)와 중반기(2041-2070년)로 나누어 기후변화에 대한 수문학적 위험도를 평가하였다.

2. 연구지역

충청남도 보령시는 충청남도 서부에 위치하고 있으며(Fig. 1), 연간 평균강수량은 1,203 mm이고 평균기온은 12.52°C이다. 2012년 가뭄으로 충청남도 5월 강수량이 14.6 mm로 평년 대비 9% 수준이었으며, 보령지역의 경우 68개 저수지 중 19개 저수지의 저수율 미달로 2012년 6월에는 농업용수 공급에 차질이 생겼으며, 이로 인해 농작물 파종, 생육, 수확 과정에서

피해가 발생했다(Lee, 2016). 또한, 2015년 가뭄으로 10월 보령댐 저수율은 21.5%였으며, 지역 저수지 저수율도 32% 낮아진 극심한 가뭄으로 제한급수가 시행되었으며, 수력발전 중단 사태도 발생했다(Lee, 2016). 보령댐에 대해 가뭄 취약도를 평가한 연구사례를 살펴보면, 전반적인 총 유량은 증가하지만, 극한강우와 가뭄 같은 극한 사상의 발생은 심화되는 것으로 나타났다(Kim *et al.*, 2023b). 보령관측소를 대상으로 강우 패턴 분석 결과, 가뭄 발생 위험도가 증가하며 농업용수가 가장 많이 필요한 시기인 6~9월 사이에 평년 대비 강우량의 절대적 감소로 인해 지역적 물 공급의 안정성과 형평성의 취약성이 커지므로 이에 대비한 항구적 가뭄 대책 수립이 필요하다(An, 2020).

3. 연구방법 및 분석자료

3.1 시나리오 중립 접근법

기후변화 관련 연구는 시나리오 리드 접근법과 시나리오 중립 접근법으로 구분된다. 시나리오 리드 접근법은 개별 기후변화 시나리오에 따라 평가 결과를 제시하는 것으로, 기후변화 시나리오 각각의 분석 결과가 서로 다르게 나타나게 된다. 반면, 시나리오 중립 접근법은 발생 가능한 기후 변동 범위를 고려하여 임의의 시계열을 생성하고, 이 시계열을 기반으로 분석을 수행한 후 기후변화 시나리오를 적용하는 방식으로



Fig. 1. Location of Boryeong

(Prudhomme *et al.*, 2010; Broderick *et al.*, 2019), 수자원 시스템에 대한 기후변화의 잠재적 영향을 평가하는 데 활용성이 높다(Guo *et al.*, 2017).

시나리오 중립 접근법에 기반한 연구는 다음과 같은 과정으로 수행된다. 먼저 관측자료 및 미래 기후변화 시나리오 자료의 통계량을 계산하여 과거 대비 미래 기후의 변동범위를 설정한다. 다음으로, 기상생성기를 활용하여 수문기상변수의 시계열을 모의한 뒤 홍수 및 가뭄 위험 등에 대한 분석을 수행한다. 분석 결과는 반응표면으로 제시된다. 최종적으로 반응표면 상에서 기후변화 영향평가를 수행한다. 시나리오 중립 접근법에 기반한 연구는 새롭게 제시되는 기후변화 시나리오에 대해 시스템 단위의 재분석이 요구되지 않고, 기존 자료로부터 기초자료의 통계량 변동성만 계산하면 분석 결과를 도출할 수 있어 시간·경제적인 측면에서 유용하다. 따라서, 반응표면 기반의 기후변화 영향평가 결과는 기존 정책에 유연한 의사결정 도구로 활용될 수 있다(Brown *et al.*, 2012).

최근 시나리오 중립 접근법을 활용하여 다양한 연구가 수행되고 있다. Guo *et al.* (2017)은 역확률적 생성 접근법을 적용하여 호주 Scott Creek 저수지를 대상으로 수자원 시스템이 가장 민감한 반응을 보이는 주요 수문 기상학적 변수를 식별하였고, 시나리오 중립 접근방식을 적용하여 특정 수자원 시스템에 대한 맞춤형 기후 영향 평가 설계 방안을 제시하였다. Alodah and Seidou (2019)는 캐나다 South Nation River 유역을 대상으로 시나리오 중립 접근방식을 기반으로 신뢰성 분석을 기후 및 민감도 평가에 연관시키는 접근방식을 제안하였다. SWAT 모델링을 활용하여 자료를 생성하고 민감도 평가를 한 결과, 7일 저유량은 소폭 증가하는 반면 설계 홍수는 눈에 띄게 악화될 것으로 나타났다.

충청남도 보령시는 강우 특성에 따라 미래 물 공급의 안정성과 형평성의 취약성이 커지므로 항구적 가뭄 대책 수립이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 시나리오 중립 접근법을 활용하여 충청남도 보령시의 가뭄에 대한 수문학적 위험도를 정량적으로 분석하였다. 분석과정은 Fig. 2와 같다.

3.2 분석자료

3.2.1 표준강수증발산지수

가뭄은 물부족에 기인하여 발생하며, 많은 연구에서 가뭄 분석을 위해 표준강수지수(SPI), 표준강수증발산지수(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI) 등과 같은 가뭄지수를 활용하고 있다(Wahla *et al.*, 2022). SPEI는 SPI가 강수량만 고려하여 지면상태의 특성을 반영하지 못하는 단점을 보완하기 위하여 강수량 및 잠재증발산량을 고려하

여 산정한 가뭄지수이다(Vicente-Serrano *et al.*, 2010). 유출 모형에 많이 사용되는 Penman-Monteith 잠재증발산량은 지면-대기상호작용으로 증폭되는 대기수분요구량을 포함하기 때문에(Bouchet, 1963) 증발산량이 과추정될 수 있다(Szilagy, 2014; Kim *et al.*, 2019). 따라서 본 연구에서는 습윤증발산량을 활용하여 SPEI를 산정하였다. SPEI에 따른 가뭄 분류 기준은 Table 1과 같으며, 본 연구에서는 기상청 기상가뭄 예보 중주의보 기준에 따라 6개월 단위 가뭄지수에 대해 -1.5 이하를 가뭄사상으로 선정하였다(KMA, 2023a).

3.2.2 기후스트레스 시계열

SPEI 산정에는 강수량 및 습윤증발산량의 산정이 필요하

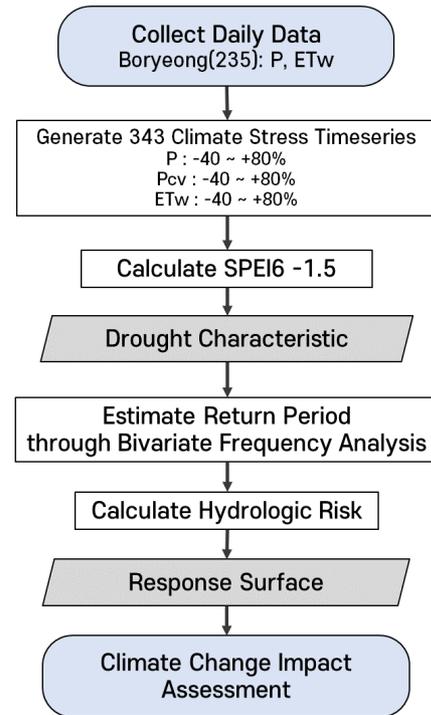


Fig. 2. The research flow of this study

Table 1. SPEI drought index categories

SPEI	Drought
2.00 and above	Extremely wet
1.50 to 1.99	Very wet
1.00 to 1.49	Moderately wet
-0.99 to 0.99	Near normal
-1.00 to -1.49	Moderately dry
-1.50 to -1.99	Severely dry
-2.00 and less	Extremely dry

다. 습윤증발산량은 Priestley-Taylor (PT) 방정식을 활용하여 산정하며, 이를 위해 일최고기온, 일최저기온, 상대습도, 풍속, 위도 및 고도자료가 필요하다. 본 연구에서는 종관기상 관측(Automated Synoptic Observation System, ASOS) 자료 중 보령(235)관측소의 1973년 1월 1일부터 2022년 12월 31일까지의 일최고기온, 일최저기온, 상대습도, 풍속자료를 수집하였고, 해당 자료는 기상청 기상자료개방포털에서 일단위 자료로 취득 가능하다(KMA, 2023b). 기후스트레스 시계열 생성을 위해 입력자료로 사용된 강수량(Prcp) 및 습윤증발산량(ET_w)의 관측시계열은 Fig. 3과 같다.

기후스트레스 시계열 생성을 위해 본 연구에서는 Steinschneider and Brown (2013)이 제안한 준모수적(Semi-parametric) 모형을 사용하였다. 이 모형은 기후변화에 따른 의사결정 중심 취약성 평가에 필요한 일단위 기상시계열 생성을 위해 개발되었다. 준모수적 모형은 연강수량 모의를 위해 Kwon *et al.* (2007)이 제안한 wavelet autoregressive mode I(WARM)

연강수량 모형과 일강수량 모의를 위해 Apipattanavis *et al.* (2007)이 제안한 Markov chain 기반 추출기법을 연계하는 방식이다. 먼저 기존 연강수량 시계열을 분해하고 자기회귀모형으로 임의의 연강수량 시계열을 생성한 뒤, 일강수량 생성을 위해 Markov chain 기반으로 강수 발생 상태를 무강우, 보통강우, 극한강우로 구분해 강수 발생을 모의한다. 이후 변동성을 부여하여 기후 스트레스 시계열을 생성한다. 본 연구에서는 기후스트레스 시계열 생성을 위한 기준인자로 SPEI 산정에 필요한 강수량 및 습윤증발산량을 선택하였고, 추가로 강수량의 변동성을 고려하기 위해 강수량의 변동계수(Coefficient of Variation of Precipitation, P_{cv})를 사용하였다. 관측자료 대비 미래 자료의 변동성을 계산하고, 불확실성을 고려하여 기존 변동성 범위보다 넓은 범위를 설정하였다. 따라서, 1973년부터 2022년까지 기준인자(강수량(Prcp), 습윤증발산량(ET_w), 강수량의 변동계수(P_{cv}))에 대해 각각 -40%에서 +80%까지 20% 간격으로 변동성을 부여하였고, 강수량 조합 7개, 습윤

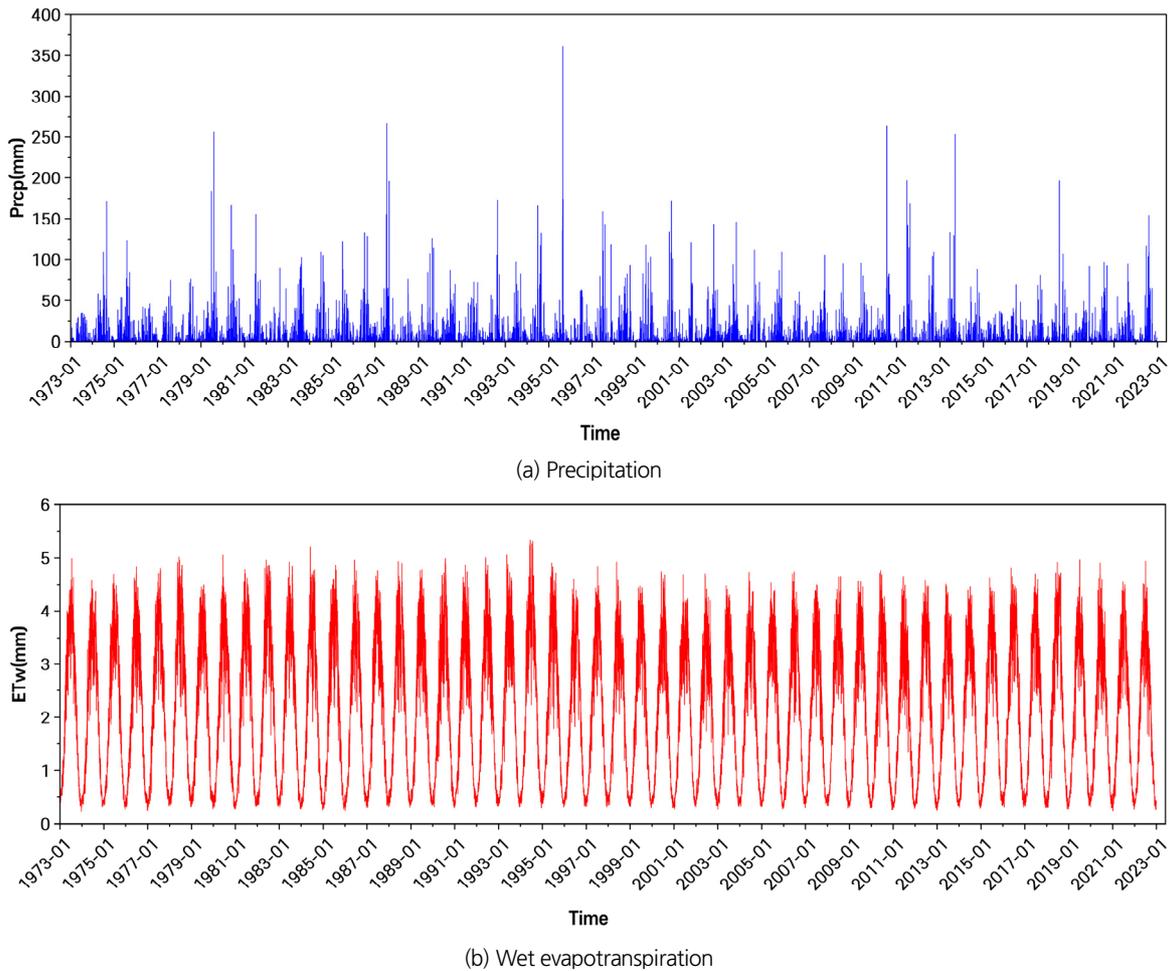


Fig. 3. Historical time series used in this study

증발산량 조합 7개 및 강수의 변동계수 조합 7개로 총 343개 기후스트레스 시계열을 생성하여 SPEI 산정에 활용하였다.

3.2.3 기후변화 시나리오

공통사회경제경로(SSP)는 IPCC AR6에서 채택한 기후변화 시나리오로, 기후변화 적응 및 완화를 위한 사회·경제적 노력에 따라 4가지 표준경로가 제시된다. 여기서 SSP1-2.6은 사회 불균형의 감소와 친환경 기술의 빠른 발달로 기후변화 완화 적응능력이 좋은 지속성장가능 사회경제 구조의 저탄소 시나리오이며, SSP2-4.5는 중도성장의 사회경제 시나리오로 기후변화 완화 및 사회경제 발전정도가 중간 단계인 경우로 SSP1-2.6과 SSP3-7.0의 중간 시나리오를 의미한다. SSP3-7.0은 사회경제 발전의 불균형과 제도적 제한으로 인해 기후변화에 취약한 상태에 놓이는 사회경제 구조의 시나리오로 기준시나리오에 해당하며, SSP5-8.5는 기후정책 부재, 화석연료 기반 성장과 높은 인적 투자로 기후변화 적응능력은 좋지만, 완화능력이 낮은 사회경제 구조의 고탄소 시나리오를 의미한다. SSP 시나리오의 첫 번째 숫자는 사회경제지표를 나타내며, 두 번째 숫자는 기존 RCP와 같이 2100년 기준 복사강제력이 각기 2.6, 4.5, 7.0, 8.5 W/m²임을 의미한다(NIMS, 2020). 본 연구에서는 기후변화 시나리오 연구에 주로 사용되는 저탄소 시나리오인 SSP1-2.6 및 고탄소 시나리오인 SSP5-8.5를 사용하였고, 기후변화 시나리오의 불확실성을 고려하기 위해 총 18개의 GCM 자료를 활용하였다. 사용된 자료는 Table 2에 제시하였으며, Kim et al. (2023b)에 따라 Simple Quantile Mapping 방법으로 1981년부터 2010년까지의 일 단위 자료로 편의보정하고, ASOS 관측소 지점으로 상세화된 자료를 적용하였다. 본 연구에 사용된 일 단위 SSP 시나리오를 연 단위 자료로 변환하여 Fig. 4에 상자그림(Box plot)으로 나타냈다. 일정 범위 내에서 대체로 평이한 양상을 보이지만, EC-Earth3에서 습윤증발산량은 다소 작은 값을 가진다. 다만, 강수량에 비해 습윤증발산량의 값이 현저히 작아 분석 결과에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단하여, 해당 GCM을 포함하여 분석을 수행하였다.

3.3 이변량 가뭄 빈도분석 및 수문학적 위험도

가뭄사상의 주요 특성은 Run 이론을 통해 설명되며, 가뭄이 지속되는 기간을 의미하는 지속기간(duration), 가뭄의 발생의 심각도를 나타내는 심도(severity)가 있다(Yevjevich, 1967). 가뭄의 발생 빈도, 즉 재현기간을 파악하기 위해 지속기간과 심도를 종합적으로 고려해야 한다. 이변량 가뭄 빈도분석은 지속기간과 심도의 결합확률분포를 통해 가뭄사상의 재현

Table 2. Global Climate Models (GCMs) used in this study

GCMs	Resolution
ACCESS-CM2	192×144
ACCESS-ESM1-5	192×145
CanESM5	128×64
CNRM-CM6-1	24572 grids distributed over 128 latitude circles
CNRM-ESM2-1	
EC-Earth3	512×256
GFDL-ESM4	360×180
INM-CM4-8	180×120
INM-CM5-0	180×120
IPSL-CM6A-LR	144×143
KACE-1-0-G	192×144
MIROC6	256×128
MIROC-ES2L	128×64
MPI-ESM1-2-HR	384×192
MPI-ESM1-2-LR	192×96
MRI-ESM2-0	320×160
NorESM2-LM	144×96
UKESM1-0-LL	192×144

기간을 종합적으로 산정할 수 있다(Park et al., 2019). 이변량 가뭄 빈도분석에서 지속기간과 심도를 결합하는 데 주로 코플라 함수가 사용되며, 결합누적분포함수는 Eq. (1)과 같다.

$$F_{D,S}(d,s) = C(F_D(d), F_S(s)) \quad (1)$$

여기서 D와 S는 각각 지속기간과 심도를 나타내는 확률변수이고, F_D 와 F_S 는 각각 지속기간과 심도에 대한 누적분포함수이다. C는 F_D 와 F_S 를 결합하는 코플라함수이며, Archimedean, Elliptical, Extreme value, Plackett 등 4가지 함수군으로 구분된다. 본 연구에서는 매개변수 추정 및 분포함수 산정이 편리한 Archimedean 함수를 사용하였다. Archimedean 코플라 함수군에는 Clayton, Frank, Gumbel 등이 있고, 코플라 산정식은 Table 3과 같으며, θ 는 매개변수이다.

이변량 가뭄 빈도분석의 결과로 가뭄사상의 재현기간을 산정할 수 있으며, Shiau (2003)은 코플라 함수를 활용한 이변량 결합재현기간을 Eq. (2)와 같이 제시하였다.

$$T_{DS} = \frac{E(L)}{P(D \geq d \text{ and } S \geq s) - \frac{E(L)}{1 - F_D(d) - F_S(s) + C(F_D(d), F_S(s))}} \quad (2)$$

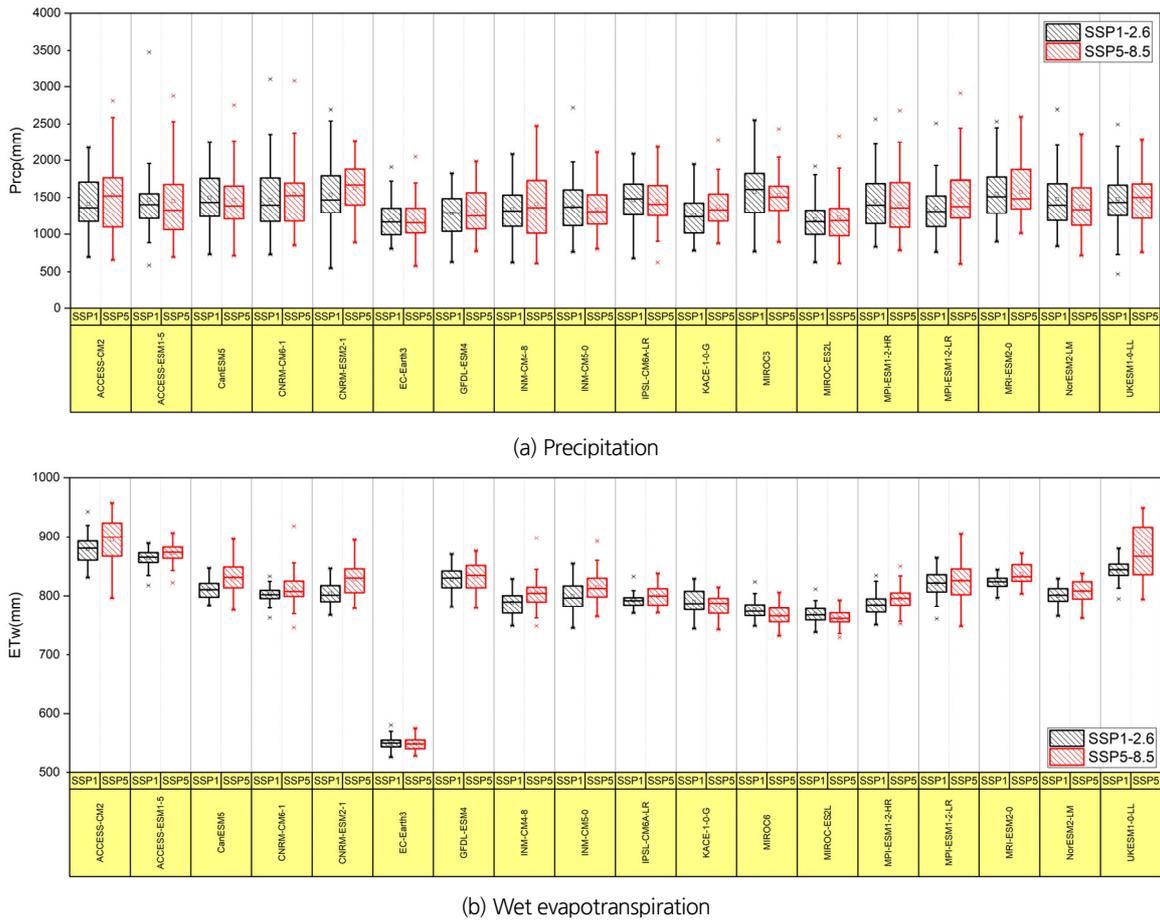


Fig. 4. Box plots of SSP scenario used in this study

여기서 $E(L)$ 은 평균 가뭄 발생 간격, F_D 는 지속기간에 대한 확률분포함수, F_S 는 심도에 대한 확률분포함수, C 는 코플라 함수, 그리고 T_{DS} 는 이변량 재현기간을 의미한다. 이변량 가뭄 빈도분석의 경우 다양한 확률적 결합 시나리오를 활용할 수 있다. 예를 들어, 지속기간과 심도의 변수 중 둘 중 하나(OR) 혹은, 둘 다(AND)에 해당하는 재현기간 산정이 가능하다. 본 연구에서는 수자원 설계의 안정성을 고려하여 두 변수 모두 초과했을 때(AND)(Eq. (2))의 재현기간을 반영하였다(Kwon and Kim, 2009; Kim *et al.*, 2018). 재현기간을 이용하여 설계 연도 이내 임계값 이상의 지속기간과 심도를 가진 가뭄의 발생확률을 산정할 수 있고, 이를 바탕으로 수문학적 위험도를 정량화할 수 있다(Yu *et al.*, 2017). 수문학적 위험도는 Eq. (3) 과 같이 산정된다.

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_{DS}}\right)^n \quad (3)$$

Table 3. Equations of archimedean copula families

Name	Equation
Clayton	$[u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1]^{-\frac{1}{\theta}}$
Frank	$\frac{1}{\theta} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{e^{-\theta} - 1} \right]$
Gumbel	$\exp \left[- \left\{ (-\ln u)^\theta + (-\ln v)^\theta \right\}^{\frac{1}{\theta}} \right]$

여기서 T_{DS} 는 이변량 재현기간이고, n 는 설계수명기간을 의미한다. 즉, 수문학적 위험도 R 은 설계수명기간 n 년 내에 T_{DS} 크기의 가뭄이 발생할 확률이다.

4. 연구결과

4.1 이변량 가뭄 빈도분석을 통한 재현기간 산정

본 연구에서 이변량 가뭄 빈도분석에 고려된 확률분포는

9개(Exponential, Gaussian, Gamma, Log-normal, Poisson, Weibull, GEV, Generalized Pareto, Gumbel)이며, 최우도법으로 매개변수를 추정하고 카이제곱(χ^2) 검정을 이용하여 적합도 검정을 실시하였다. 분석 결과, 지속기간 및 심도 모두 Exponential 분포가 채택되었다. 지속기간과 심도의 주변확률분포를 결합하기 위해 최우도법으로 적합도 검정을 한 결과 Clayton 함수가 최적 결합확률밀도함수로 채택되었다. 최대 재현기간을 갖는 가뭄 사상은 2016년 8월부터 2017년 1월까지 지속된 가뭄으로 심도는 10.48이었고, 이때 재현기간은 76.19년이였다. 수문학적 위험도를 산정한 결과, 해당 가뭄이 20년 내에 발생할 확률은 0.23이고, 50년 내에 발생할 확률은 0.48이였다.

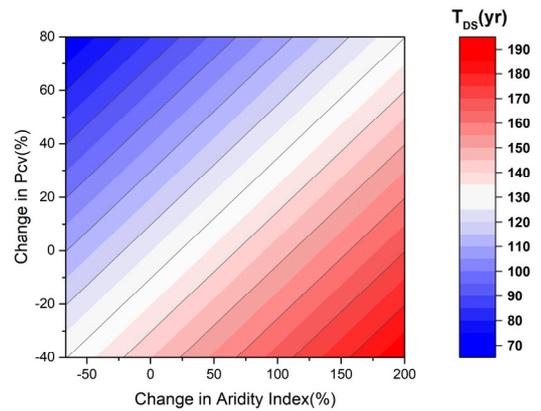
총 343개의 기후스트레스 시계열에 대해서도 개별적으로 재현기간 및 수문학적 위험도를 산정하였다. 지속기간 및 심도의 분포는 과거 가뭄사상의 분포와 동일하게 Exponential 분포로 채택하였으며, 코플라 함수도 Clayton 함수가 최적 결합확률밀도함수로 채택되었다. 산정한 재현기간 및 수문학적 위험도에 대한 결과는 반응표면으로 표현될 수 있다(Fig. 5). 일반적으로 건조지수(Aridity Index = Pr_{p}/ET_w)가 작고 강수변동성(P_{cv})이 클 때 더 큰 가뭄이 발생하고, 반대의 경우에서 더 작은 가뭄이 발생한다. 본 연구에서는 가뭄의 지속기간과 심도를 제한하지 않고 발생가능한 최대가뭄에 대한 평가를 수행했고, 평가 시 x축은 건조지수(Aridity Index) 변화, y축은 강수량의 변동계수(P_{cv})의 변화, Z축은 가뭄의 이변량 재현기간(T_{DS})으로 정의하였다(Fig. 5(a)). 건조지수가 작고 강수변동성이 클 때 70년에 해당하는 재현기간이 산정되었으며, 건조지수가 크고 강수변동성이 작을 때 190년에 해당하는 재현기간이 나타났다.

4.2 수문학적 위험도 기반 기후변화 영향평가

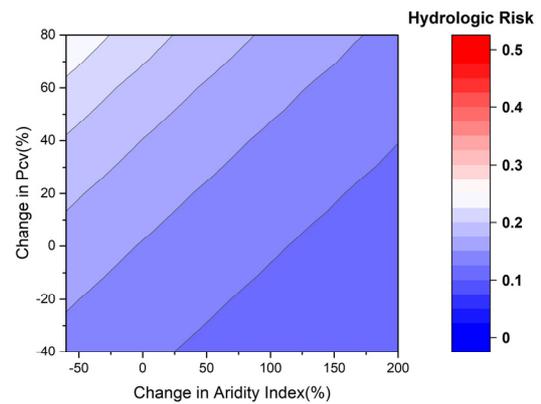
4.1절에서 산정한 재현기간을 바탕으로, 2021년부터 2070년까지 50년 기간의 343개 기후스트레스 시계열 각각이 갖는 발생 가능한 최대가뭄에 대한 수문학적 위험도를 산정하였고, 반응표면 생성 과정에서 곡선적합을 수행하였다. 반응표면을 3차원으로 표현하기 위해 x축은 건조지수의 변화, y축은 강수변동성의 변화, z축은 수문학적 위험도로 정의하였다(Figs. 5(b) and 5(c)). 수문학적 위험도 산정 공식에 의해 재현기간과 수문학적 위험도는 반비례 관계를 가지고, 산정된 수문학적 위험도의 변동범위는 0부터 0.5까지였으며, n이 증가할수록 수문학적 위험도는 0.5에 가까워졌다.

기후변화 시나리오를 반영하기 위해 SSP1-2.6 시나리오 18개 및 SSP5-8.5 시나리오 18개에 대해서도 미래를 전반기

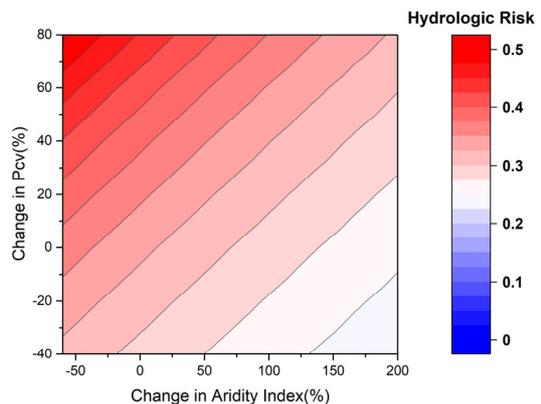
(2021-2040년) 및 중반기(2041-2070년)으로 시간을 분리하여 연단위 기후특성치의 평균값 및 과거자료 대비 변동량을 산정하였다. SSP1-2.6에서 미래 전반기 건조지수는 +19.91%부터 +64.28%까지의 범위에서 변동이 있었으며, 강수변동성은 -22.04%부터 +28.29%의 범위에서 변동이 있었다.



(a) Bivariate return period of maximum drought event



(b) Hydrologic risk of drought with maximum return period (n=20)



(c) Hydrologic risk of drought with maximum return period (n=50)

Fig. 5. Response surface for drought return period and hydrologic risk

Table 4. Statistical changes aridity index and coefficient of variation of precipitation according to climate change scenarios and global climate models for 2021-2040

GCMs	SSP1-2.6		SSP5-8.5	
	Aridity Index (%)	P _{cv} (%)	Aridity Index (%)	P _{cv} (%)
ACCESS-CM2	35.77	7.8	31.42	25.63
ACCESS-ESM1-5	19.91	-2.19	44.51	40.64
CanESM5	48.59	4.62	47.67	29.95
CNRM-CM6-1	32.26	28.29	41.7	13
CNRM-ESM2-1	36.01	7.56	53.2	-16.36
EC-Earth3	64.28	-22.04	46.6	0.17
GFDL-ESM4	29.06	-20.86	27.07	2.18
INM-CM4-8	35.24	-2.63	20.36	41.89
INM-CM5-0	45	24.62	29.79	-3
IPSL-CM6A-LR	43.29	-16.26	36.29	-18.41
KACE-1-0-G	29.84	-11.62	36.17	-2.77
MIROC6	45.71	24.71	57.51	-5.77
MIROC-ES2L	24.59	-14.54	14.47	-15.58
MPI-ESM1-2-HR	53.99	15.34	37.91	24.11
MPI-ESM1-2-LR	30.43	24.66	33.97	15.69
MRI-ESM2-0	41.5	-20.78	55.81	3.47
NorESM2-LM	57.47	-3.75	34.93	42.46
UKESM1-0-LL	40.32	4.29	39.6	-4.83

Table 5. Statistical changes aridity index and coefficient of variation of precipitation according to climate change scenarios and global climate models for 2041-2070

GCMs	SSP1-2.6		SSP5-8.5	
	Aridity Index (%)	P _{cv} (%)	Aridity Index (%)	P _{cv} (%)
ACCESS-CM2	93.3	15.39	125.71	52.11
ACCESS-ESM1-5	126.27	76.09	98.19	49.38
CanESM5	128.56	12.02	121.44	22.43
CNRM-CM6-1	140.7	43.26	151.28	35.05
CNRM-ESM2-1	155.25	10.82	158.05	-1.73
EC-Earth3	174.43	-5.29	191.17	10.73
GFDL-ESM4	86.71	14.31	97.9	5.16
INM-CM4-8	112.16	8.09	143.45	25.71
INM-CM5-0	107.39	4.62	110.76	10.58
IPSL-CM6A-LR	133.32	-6.52	135.75	-1.86
KACE-1-0-G	93.81	9.9	119.43	-9.16
MIROC6	168.64	4.28	145.58	-15.19
MIROC-ES2L	94.19	8.6	109.92	51.88
MPI-ESM1-2-HR	123.32	32.49	130.64	16.1
MPI-ESM1-2-LR	105.84	18.21	132.47	36.7
MRI-ESM2-0	143.09	20.3	135.38	12.58
NorESM2-LM	120.02	37.14	115.82	12.76
UKESM1-0-LL	117.96	19.51	112.47	20.7

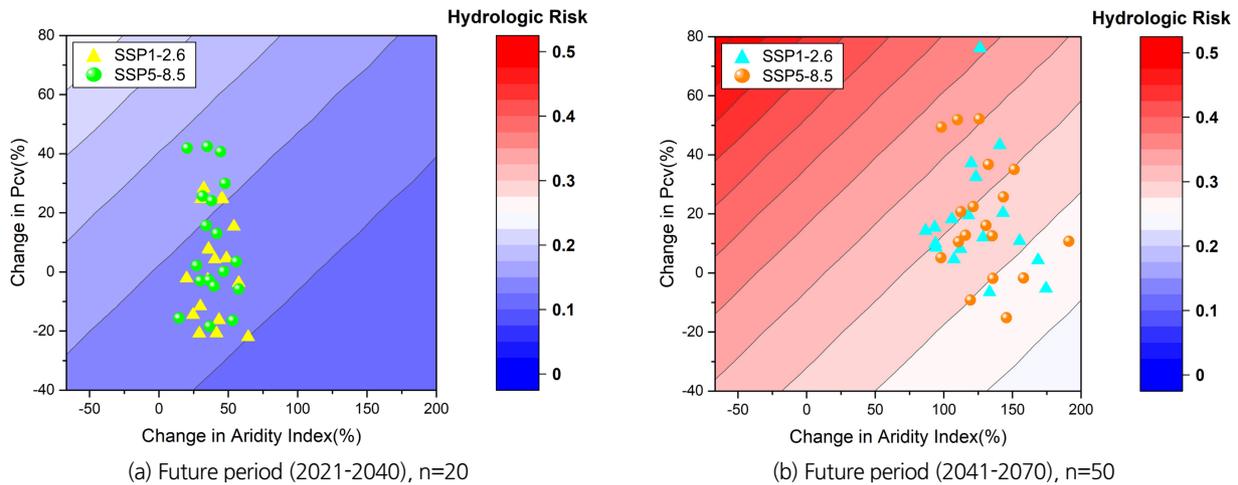


Fig. 6. Hydrologic risks of drought with maximum return period according to climate change scenarios

SSP5-8.5에서 미래 전반기 건조지수는 +14.47%부터 +57.51%까지의 범위에서 변동이 있었으며, 강수변동성은 -18.41%부터 +42.46%까지의 범위에서 변동이 있었다. SSP1-2.6에서 미래 중반기 건조지수는 +86.71%부터 +174.43%까지의 범위에서 변동이 있었으며, 강수변동성은 -6.52%부터 +76.09%까지의 범위에서 변동이 있었다. SSP5-8.5에서 미래 중반기 건조지수는 +97.9%부터 +191.17%까지의 범위에서 변동이 있었으며, 강수변동성은 -15.19%부터 +52.11%까지의 범위에서 변동이 있었다. 과거 관측치에 대한 기후변화 시나리오의 변화량은 Table 4 및 Table 5에 나타내었다. 발생가능한 최대가뭄을 반영한 반응표면은 Fig. 6과 같다. 미래 전반기는 목표연도를 2040년으로 설정하여 수문학적 위험도 공식에서 n을 20년으로 하였고, 미래 중반기는 목표연도를 2070년으로 설정하여 n을 50년으로 하여 반응표면을 생성하였다.

미래 전반기에는 SSP1-2.6 및 SSP5-8.5에서 건조지수의 변동범위는 비슷한 양상을 보였으나, 미래 중반기에는 전반기에 비해 변동범위가 넓게 나타났다. 그리고 미래 전반기에 비해 미래 중반기에서 건조지수가 커지는 양상을 보였다. 이는 강수량의 증가로 인해 미래 전반기보다 미래 중반기에서 습윤해지는 경향을 보여준다. 미래 전반기 및 미래 중반기에서 강수변동성이 크게 나타났고, 대체적으로 SSP1-2.6보다는 SSP5-8.5에서 그 수치가 더 크게 나타났다. 미래 중반기 SSP1-2.6의 ACCESS-ESM1-5에서 강수변동성이 크게 나타났고 이때 수문학적 위험도는 0.375였다. 미래 전반기에서는 n이 20년일 때 수문학적 위험도의 변화 범위는 0.15 ± 0.025 로 나타났고, 미래 중반기에서는 n이 50년일 때 수문학적 위험도의 변화 범위는 0.3125 ± 0.0625 로 나타났다. 보령시의 강우 패턴 분석 결과 가뭄발생 위험도가 증가하는 것으로 예상되기

때문에, 보령시에서는 해당 범위의 수문학적 위험도를 고려하여 가뭄 위험도 지도 작성 및 가뭄 비상대응체계 구축 등 가뭄 정책 및 대책 마련을 위한 노력이 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 가뭄 정책 마련에 시나리오 중립 접근법의 활용을 제안하기 위해 가뭄 취약성이 높은 충청남도 보령시를 대상으로 시나리오 중립 접근법에 기반한 수문학적 위험도 분석을 수행하였다. 총 343개의 기후스트레스 시계열을 생성한 뒤 이변량 가뭄 빈도분석을 통해 재현기간을 산정하고, 이를 바탕으로 미래 전반기 목표연도 2040년까지 20년 및 미래 중반기 목표연도 2070년까지 50년 내 가뭄이 발생할 확률인 수문학적 위험도를 산정하였다. 이후 반응표면을 생성한 뒤 SSP 시나리오 36개를 반응표면에 추가하여 기후변화 영향평가를 수행하였다.

먼저 과거 발생했던 최대 가뭄에 대한 평가 결과, 지속기간은 6개월, 심도는 10.48로 나타났으며, 76.19년의 재현기간을 나타냈다. Jung et al. (2016)은 보령댐에서 5~50년 재현기간을 가진 가뭄에는 수자원 공급이 가능하나 100년 및 200년 재현기간을 가진 극심한 가뭄이 발생할 경우, 수요량에 미치는 수자원 확보에 어려움이 따를 것으로 예상하였다. 본 연구에서 도출된 76년의 재현기간은 극심한 가뭄에 대비해야 하는 정도의 큰 규모이므로, 이에 대한 지속적인 연구 및 가뭄 정책 및 대책 마련이 필요하다.

각각의 시계열이 갖는 최대 가뭄의 발생확률을 통해 반응표면을 산정한 결과, 건조지수가 작고 강수변동성이 클 때 70

년에 해당하는 재현기간이 나타났으며, 건조지수가 크고 강수변동성이 작을 때 190년에 해당하는 재현기간이 나타났다. 일반적으로 건조지수가 작고 강수변동성이 클 때 더 큰 가뭄이 발생하고, 반대의 경우에서 더 작은 가뭄이 발생하는 양상을 보이므로, 본 연구에서의 결과는 타당한 것으로 판단된다.

수문학적 위험도 평가에서는 설계연한 20년 및 50년에 대한 반응표면을 생성하고 기후변화 영향평가를 수행하였다. 미래 전반기 최대 재현기간의 가뭄사상은 0.15 ± 0.025 의 수문학적 위험도($n=20$)를 가지며, 미래 중반기 최대 재현기간의 가뭄사상은 0.3125 ± 0.0625 의 수문학적 위험도($n=50$)를 가진다. 비록 수문학적 위험도는 과거 기간에 비해 감소하지만, 최대 가뭄사상의 재현기간이 70-190년에 해당하기 때문에 극한가뭄에 대한 대책 마련이 필요하다. 최근 연구자들도 보령시의 가뭄 취약성을 감지하고, 이에 따라 보령시 혹은 보령댐을 대상으로 관련 연구를 수행하고 있는 추세이므로 보령시는 지속적으로 가뭄 정책 및 대책 수립이 필요하다(Kim et al., 2023b; Jung et al., 2020).

본 연구를 통해 시나리오 중립 접근법을 활용하여 보령시에 대한 기후변화 영향평가의 유용성 및 필요성을 제안하였다. 가뭄 정책이 행정구역 단위로 마련되는 점을 고려하여 행정구역을 대상으로 분석을 수행하였고, 기존 연구에서는 단일 위험도 값이 제시되었다면, 본 연구에서는 위험도 범위를 제시하였다. 또한, 기존 연구에서는 새로운 기후변화 시나리오가 제시되면 전 과정에 대해 재분석을 수행해야 하지만, 본 연구에서는 기존에 만들어진 반응표면에 변화량만 계산하면 되므로 시간·경제적인 측면에서 유용성을 보인다. 따라서, 시나리오 중립 접근법을 활용하면 가뭄 관련 정책을 수립하는 과정에서 기후변화에 따른 불확실성을 반영할 수 있다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 가뭄대응 물관리 혁신기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2022-KE002032).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Alodah, A., and Seidou, O. (2019). "Assessment of climate change impacts on extreme high and low flows: An improved bottom-up approach." *Water*, Vol. 11, No. 6, 1236.
- An, J.S. (2020). "Efforts to overcome permanent drought in agriculture", *Water for Future*, Vol. 53, pp. 80-84. (in Korean)
- Apipattanavis, S., Podestá, G., Rajagopalan, B., and Katz, R.W. (2007). "A semiparametric multivariate and multisite weather generator." *Water Resources Research*, Vol. 43, No. 11, w11401.
- Board of Audit and Inspection (BAI) (2023). *Audit report - Climate crisis adaptation and response status I (water and food sector)*.
- Bouchet, R. (1963). "Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique." *International Association of Hydrological Sciences*, Vol. 62, pp. 134-142.
- Broderick, C., Murphy, C., Wilby, R.L., Matthews, T., Prudhomme, C., and Adamson, M. (2019). "Using a scenario neutral framework to avoid potential maladaptation to future flood risk." *Water Resources Research*, Vol. 55, No. 2, pp. 1079-1104.
- Brown, C., Ghile, Y., Laverty, M., and Li, K. (2012). "Decision scaling: Linking bottom-up vulnerability analysis with climate projections in the water sector." *Water Resources Research*, Vol. 48, No. 9, W09537.
- Guo, D., Westra, S., and Maier, H.R. (2017). "Use of a scenario-neutral approach to identify the key hydrometeorological attributes that impact runoff from a natural catchment." *Journal of Hydrology*, Vol. 554, pp. 317-330.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). *Summary for policymakers. In: Global warming of 1.5°C. an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, U.S., pp. 3-24.
- Jung, J., Park, D.H., and Ann, J. (2020). "Drought evaluation using unstructured data: A case study for Boryeong area." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 53, No. 12, pp. 1203-1210. (in Korean)
- Jung, W.H., Noh, S.H., and Kim, Y.I. (2016). *A study on the water supply capacity evaluation and drought response plan of Boryeong Dam*. ChungNam Institute. (in Korean)
- Kim, D., Kim, E., Lee, S.C., Kim, E., and Shin, J. (2022). "A decision-centric impact assessment of operational performance of the Yongdam Dam, South Korea." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 55, No. 3, pp. 205-215. (in Korean)
- Kim, D., Lee, W.S., Kim, S.T., and Chun, J.A. (2019). "Historical drought assessment over the contiguous united states using the generalized complementary principle of evapotranspiration." *Water Resources Research*, Vol. 55, No. 7, pp. 6244-6267.

- Kim, H., Kim, J.E., Kim, J., Yoo, J., and Kim, T.W. (2023a). "Evaluation of future hydrologic risk of drought in Nakdong River basin using Bayesian classification-based composite drought index." *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol. 43, No. 3, pp. 309-319. (in Korean)
- Kim, J., Seo, S.B., and Cho, J. (2023b). "Development of a decision scaling framework for drought vulnerability assessment of dam operation under climate change." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 56, No. 4, pp. 273-284. (in Korean)
- Kim, J.E., Yu, J.S., Lee, J.H., and Kim, T.W. (2018). "Drought risk analysis in Seoul using Cheugugi and climate change scenario based rainfall data." *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol. 38, No. 3, pp. 387-393. (in Korean)
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2023a). Republic of Korea, accessed 6 November 2023, <<https://hydro.kma.go.kr/front/intro.do>>.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2023b). Open MET Data Portal, accessed 6 November 2023, <<https://data.kma.go.kr/cmnm/main.do>>.
- Kwon, H.H., Lall, U., and Khalil, A.F. (2007). "Stochastic simulation model for nonstationary time series using an autoregressive wavelet decomposition: Applications to rainfall and temperature." *Water Resources Research*, Vol. 43, No. 5, W05407.
- Kwon, Y.M., and Kim, T.W. (2009). "Derived I-D-F curve in Seoul using Bivariate precipitation frequency analysis." *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol. 29, No. 2B, pp. 155-162. (in Korean)
- Lee, J.H., Park, S.Y., Kim, M.G., and Chung, I.M. (2021). "Hydrological drought analysis and monitoring using multiple drought indices: The case of Mulrocheon watershed." *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol. 41, No. 5, pp. 477-484. (in Korean)
- Lee, S.S. (2016). *Drought analysis by climate change scenario in Chungcheongnam-do*. ChungNam Institute. (in Korean)
- National Institute of Meteorological Sciences (NIMS). (2020). *Global climate change outlook report, climate change forecast based on 4 future scenarios*. National Institute of Meteorological Sciences. (in Korean)
- Park, J.Y., Kim, J.E., Lee, J.H., and Kim, T.W. (2019). "Assessment of hydrologic risk of extreme drought according to RCP climate change scenarios using bivariate frequency analysis." *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol. 39, No. 5, pp. 561-568. (in Korean)
- Prudhomme, C., Wilby, R.L., Crooks, S., Kay, A.L., and Reynard, N.S. (2010). "Scenario-neutral approach to climate change impact studies: Application to flood risk." *Journal of Hydrology*, Vol. 390, pp. 198-209.
- Shiau, J.T. (2003). "Return period of bivariate distributed extreme hydrological events." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 17, pp.42-57.
- Steinschneider, S., and Brown, C. (2013). "A semiparametric multivariate, multisite weather generator with low-frequency variability for use in climate risk assessments." *Water Resources Research*, Vol. 49, No. 11, pp. 7205-7220.
- Szilagyi, J. (2014). "Temperature corrections in the Priestley - Taylor equation of evaporation." *Journal of Hydrology*, Vol. 519, pp. 455-464.
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., and López-Moreno, J.I. (2010). "A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index." *Journal of Climate*, Vol. 23, No. 7, pp. 1696-1718.
- Wahla, S.S., Kazmi, J.H., Sharifi, A., Shirazi, S.A., Tariq, A., and Joyell Smith, H. (2022). "Assessing spatio-temporal mapping and monitoring of climatic variability using SPEI and RF machine learning models." *Geocarto International*, Vol. 37, No. 27, pp. 14963-14982.
- Yevjevich, V. (1967). *An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts*. Hydrology Papers, Colorado State University, Fort Collins, CO, U.S., pp. 4-18.
- Yu, J.S., Shin, J.Y., Kwon, M. and Kim, T.W. (2017). "Bivariate drought frequency analysis to evaluate water supply capacity of multi-purpose dams." *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol. 37, No. 1, pp. 231-238. (in Korean)