



Assessment of water supply reliability in the Geum River Basin using univariate climate response functions: a case study for changing instreamflow managements

Kim, Daeha^{a*} · Choi, Si Jung^b · Jang, Su Hyung^c · Kang, Dae Hu^d

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

^bSenior Researcher, Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil and Building Technology, Goyang, Korea

^cHead Researcher, Water Resources and Environmental Research Center, K-water Research Institute, Daejeon, Korea

^dCEO, Dae-Sung Engineering Co., Ltd., Jeonju, Korea

Paper number: 23-090

Received: 2 November 2023; Revised: 9 December 2023; Accepted: 12 December 2023

Abstract

Due to the increasing greenhouse gas emissions, the global mean temperature has risen by 1.1°C compared to pre-industrial levels, and significant changes are expected in functioning of water supply systems. In this study, we assessed impacts of climate change and instreamflow management on water supply reliability in the Geum River basin, Korea. We proposed univariate climate response functions, where mean precipitation and potential evaporation were coupled as an explanatory variable, to assess impacts of climate stress on multiple water supply reliabilities. To this end, natural streamflows were generated in the 19 sub-basins with the conceptual GR6J model. Then, the simulated streamflows were input into the Water Evaluation And Planning (WEAP) model. The dynamic optimization by WEAP allowed us to assess water supply reliability against the 2020 water demand projections. Results showed that when minimizing the water shortage of the entire river basin under the 1991-2020 climate, water supply reliability was lowest in the Bocheongcheon among the sub-basins. In a scenario where the priority of instreamflow maintenance is adjusted to be the same as municipal and industrial water use, water supply reliability in the Bocheongcheon, Chogang, and Nonsancheon sub-basins significantly decreased. The stress tests with 325 sets of climate perturbations showed that water supply reliability in the three sub-basins considerably decreased under all the climate stresses, while the sub-basins connected to large infrastructures did not change significantly. When using the 2021-2050 climate projections with the stress test results, water supply reliability in the Geum River basin was expected to generally improve, but if the priority of instreamflow maintenance is increased, water shortage is expected to worsen in geographically isolated sub-basins. Here, we suggest that the climate response function can be established by a single explanatory variable to assess climate change impacts of many sub-basin's performance simultaneously.

Keywords: Decision-centric assessment, Water supply reliability, Water allocation simulations, Instreamflow management policies

단변량 기후반응함수를 이용한 금강수계 이수안전도 평가: 하천유지유량 관리 변화를 고려한 사례연구

김대하^{a*} · 최시중^b · 장수형^c · 강대후^d

^a전북대학교 토목환경자원에너지공학부 조교수, ^b한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 수석연구원,

^cK-water 연구원 수자원환경연구소 수석연구원, ^d(주)대성기술 대표이사

요 지

대기온실가스 증가로 전지구 평균기온은 산업화 이전 대비 1.1°C 상승했고 수자원시스템의 공급능력에 상당한 변화가 예상된다. 본 연구에서는 금강수계 내 여러 중권역의 이수안전도와 기후조건의 관계(기후반응함수)를 단변량 함수로 나타내 기후민감도를 동시에 평가할 수 있는 방법을 제안하였다. 사례연구를 위해 GR6J 모형으로 중권역별 자연유출을 모의했고 이를 Water Evaluation And Planning (WEAP) 최적모형에 입력해 2030년 수요전망에 대한 공급신뢰도를 평가하였다. 여러 중권역의 이수안전도를 동시에 비교하기 위해 평균 강수량과 잠재증발산량의 비율을 독립변수 사용하여 단변량 기후민감도 함수를 개발하였다. 사례연구 결과, 1991-2020 자연유출을 이용해 수계전체 물부족을 최소화시키는 운영을 가정했을 때 공급신뢰도는 19개 중권역 중 보청천유역에서 가장 낮았다. 하천유지유량의 우선순위를 농업용수와 생공용수와 동일하게 조정할 시 나리오에서는 보청천유역, 초강유역, 논산천유역의 이수안전도가 크게 감소하는 것으로 나타났다. 보청천유역, 초강유역, 논산천유역의 이수안전도는 모든 기후스트레스 테스트에서 크게 감소한 반면, 미호강유역, 금강공주유역, 금강하구유역은 아주 건조한 기후조건에서만 이수안전도가 감소했다. 대규모 인프라에서의 공급이 원활한 중권역의 기후민감도는 크게 변하지 않았다. 2021-2050 기후전망을 민감도함수에 적용했을 때 금강수계의 공급신뢰도는 대체로 좋아질 가능성이 높지만 하천유지유량 우선순위를 높게 되면 지형적, 인위적으로 고립된 중권역에서 물부족은 심해질 것으로 분석되었다. 2021-2050기간 금강수계의 이수안전도는 기후스트레스 보다 하천관리정책의 변화에 더 큰 영향을 받을 것으로 판단된다.

핵심용어: 기후스트레스 테스트, 이수안전도, 물배분모형, 하천유지유량 관리정책

*Corresponding Author. Tel: +82-63-270-2426

E-mail: daeha.kim@jbnua.ac.kr (Kim, Daeha)

1. 서론

기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 인류의 온실가스 배출로 인해 2011-2020 지구 평균기온이 1900년 전보다 1.1°C 상승한 것으로 평가했다(IPCC, 2023). 인위적 기후변화로 인해 육지와 해양을 가리지 않고 비가역적인 변화가 나타나고 있고 이 추세대로 배출이 지속될 경우 생태계 기능이 크게 훼손될 것으로 전망했다(IPCC, 2021). 2100년까지 평균기온 상승을 1.5°C로 제한하는 배출시나리오는 Shared Socioeconomic Pathways (SSP) 1-1.9 뿐이고 이 시나리오는 2050년에 인위적 이산화탄소 배출이 완전히 사라지는 것을 가정하고 있다(O'Neill *et al.*, 2016). 이 어려운 목표가 달성되더라도 대기에 누적된 온실가스로 인해 기상재해는 지금보다 더 빈번해질 전망이다(IPCC, 2021; Trenberth *et al.*, 2014).

온난화의 영향으로 동아시아에서도 폭우와 가뭄의 빈도가 증가하고 있어 수자원 관리를 위한 인프라 운영은 점점 어려워지고 있다(e.g. Kim *et al.*, 2019b). 강수패턴의 변화는 대규모 인프라의 재해경감능력을 줄여 큰 사회경제적 피해로 연결될 것으로 보인다(IPCC, 2021). 지금까지 수자원 인프라는 기후가 크게 변하지 않는다는 가정 하에 운영되어 왔지만 이 방식으로 이런 경험적 관리를 지속할 경우 기상재해에 취약해질 수밖에 없다(Georgakakos *et al.*, 2012).

수자원 시스템은 통상 자연 수문과정과 얽혀있고 기후변화가 미치는 영향도 공간적으로 일정하지 않다(Schlef *et al.*, 2017). 기후변화가 수자원시스템에 미치는 영향은 매우 불확실하기 때문에(Brown *et al.*, 2019) 환경적 부작용을 감수하고 댐 증축과 같은 구조적 전략을 취하는 것은 절대 쉬운 일이 아니다(Foley *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2019b). 이 때문에 적응형 운영(adaptive management)과 같은 비구조적 적응전략을 개발하는 경우가 많은데 지구시스템모형(Earth System Models, ESMs)의 기후전망을 시스템 모형에 입력하는 접근 방법이 통상적으로 사용된다(e.g. Brêda *et al.*, 2020).

그러나 ESM 전망과 시스템 모형을 직접 연결하는 하향식(top-down) 분석법은 기후변화 전망이 가지는 불확실성을 고려할 때 실무에 적용하기 매우 어렵다(Brown *et al.*, 2012). 기후가 건조해질 것을 대비해 인프라 운영전략을 변경했는데 기후 더 습해진다면 전통적 운영을 할 때보다 오히려 더 손해일 수 있다. 이 'predict-then-act' 방식의 미래위험대비는 위험을 택해 그에 대한 이익을 최대화할 때 필요한 전략이다. 하지만 피해 최소화를 목적으로 하는 'robust adaptation' 전략과는 거리가 멀어 위험회피성향을 보이는 정책결정자에게는 선

호되지 않는다(Brown and Wilby, 2012; Weaver *et al.*, 2013). 기후적응 전략은 미래예측이 정확하지 않더라도 선택에 대한 후회를 줄일 수 있는 Low-regret 전략이 채택될 가능성이 높다(Dilling *et al.*, 2015).

예를 들어, Turner *et al.* (2014)은 도시수자원시스템의 이수안전도와 기후조건 사이의 민감도 함수를 개발한 후 이 함수에 여러 기후변화 시나리오를 입력해 미래 물관리능력을 전망했다. 시스템에 요구되는 최소 이수안전도를 달성하지 못하게 하는 기후전망이 얼마나 많은지 간단히 확인할 수 있어 적응전략 의사결정에 매우 용이한 방법이다. 이런 의사결정 중심 영향평가(decision-centric impact assessments)는 적응전략을 통해 시스템이 기후변화에 얼마나 견고하게 버틸 수 있는지를 평가하기 때문에 정책결정자가 큰 후회가 남지 않도록 정책을 유도할 수 있다(Brown *et al.*, 2012). 또한 여러 관리지표를 동시에 고려할 수 있어 균형잡힌 의사결정도 가능하게 한다(Poff *et al.*, 2016).

의사결정 중심 영향평가는 홍수위험 전망(Kim *et al.*, 2018; Prudhomme *et al.*, 2010), 이수안전도 전망(Kim *et al.*, 2019a), 인프라관리 효용평가(Poff *et al.*, 2016) 등 다양한 목적으로 적용되어 있다. 그러나 평가에 많은 분석기법이 요구될 뿐만 아니라 여러 지역을 동시에 고려해야 할 경우 이미 많은 정보가 담겨 있는 기후민감도 함수를 중첩해야 하기 때문에 복잡성이 높아질 수밖에 없다(e.g. Kim *et al.*, 2019a; Schlef *et al.*, 2018). 또한 시스템의 기후민감도를 평균강수량과 평균기온의 변화로 대표하는 경우가 많은데 이 두 변수는 상호작용하기 때문에 물리적으로 서로 독립적이지 않다(Seneviratne *et al.*, 2010). 독립적이지 않은 변수로 만들어진 이변량 기후민감도함수는 시스템의 성능 전망을 왜곡시킬 수 있고 중첩을 어렵게 해 여러 지역을 동시에 고려한 분석에 사용되기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 수자원시스템 성능에 대한 기후민감도 함수를 이론적으로 문제가 없는 일변수 함수로 만들어 대규모 유역의 여러 하위시스템의 민감도를 동시에 고려할 수 있는 평가를 수행하였다. 사례연구로 한국 금강유역의 이수안전도를 두 가지 하천유지유량 시나리오로 평가하였고 기후변화와 유지유량 관리전략의 변화가 2021-2050 중권역 단위 공급 신뢰도(supply reliability)에 미치는 영향을 전망하였다.

2 연구자료 및 방법

2.1 연구대상지역 및 수문기상자료

금강유역은 지형적으로 연결된 14개 분류 중권역과 인접

한 5개 중권역이 인위적으로 연결된 물 공급 네트워크이다 (Fig. 1). 최상류와 중간에 위치한 용담댐과 대청댐은 6-9월에 집중된 하천유량을 저장해 10월부터 이듬해 5월까지 금강수계 전역의 물 수요를 충족시키는 역할을 한다. 용담댐과 대청댐의 유효저용량은 각각 672.5 Mm³, 790 Mm³이고 보령댐과 금강하구둑도 각각 116.6 Mm³, 138.0 Mm³의 용량으로 저수 기능을 일부 담당한다. 19개 중권역의 유역면적은 120.4 km² (대청댐상류)에서 1,855 km² (미호강)의 범위에 있고 평균은 840.4 km²이다. 산림과 도심지역 면적은 약 60%와 5.3%를 차지한다. 농업지역은 각 중권역의 하류에 4.6-42% 범위로 넓게 분포되어 있다(Kim *et al.*, 2019a). 하천법 상 17개의 하천유지유량 관리지점이 금강유역 네트워크에 포함되어 있다. Jang *et al.* (2021)은 물수지 최적화 분석을 통해 과거 심각한

한 가뭄조건에서 금강공주유역(3012)과 금강서해(3203)의 심각한 물부족을 재현한 바 있다. 또한 No *et al.* (2013)는 1개의 대기순환모형으로 금강수계 댐의 물가용량이 증가할 것으로 전망했다. 과거 연구들과는 달리 본 사례 연구에서는 30년 기간의 평균적인 이수안전도가 기후변화에 얼마나 민감하게 반응하는지를 중심으로 평가하였다.

Fig. 2는 19개 중권역의 2030년 농업용수, 생공용수 전망 (ME, 2021)을 나타낸다. 농업지역이 넓은 하류지역 중권역의 용수수요가 상류지역보다 훨씬 많은 것을 알 수 있다. 농업용수 수요는 삼교천유역(3101), 만경강유역(3301), 금강공주유역(3012)에서 높고 생공용수 수요는 대전, 청주, 전주, 천안, 아산, 세종 등 주요 도시가 위치한 미호강유역(3011), 삼교천유역, 갑천유역(3009), 만경강유역(3301)에서 높다. 생공

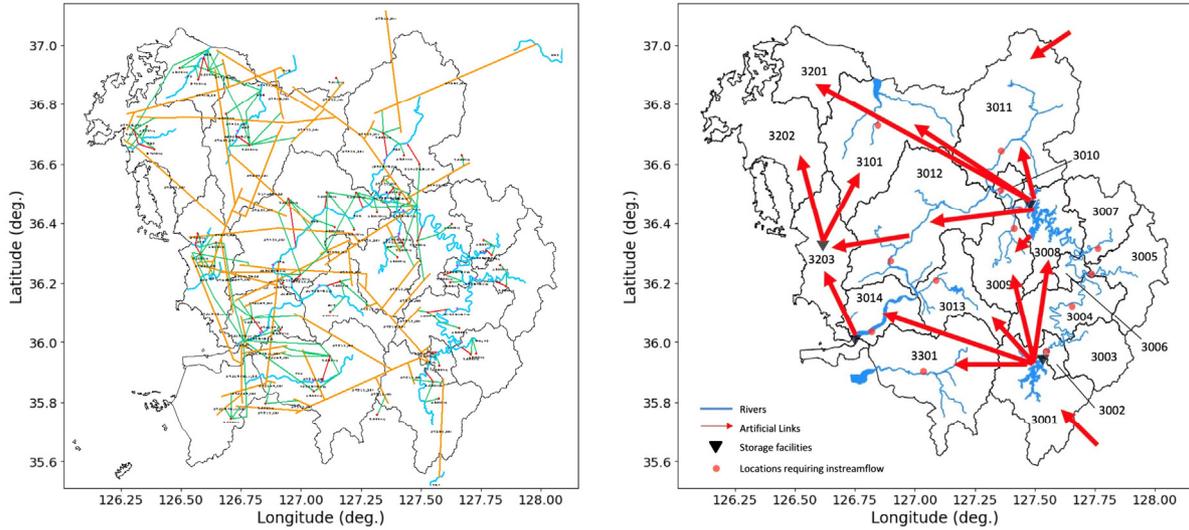


Fig. 1. The Geum River system represented by a node-and-link network of the Water Evaluation And Planning (WEAP) model (left), and an approximate description of the sub-basin linkages (right). Each sub-basin was signified by numerical identifiers in the right panel

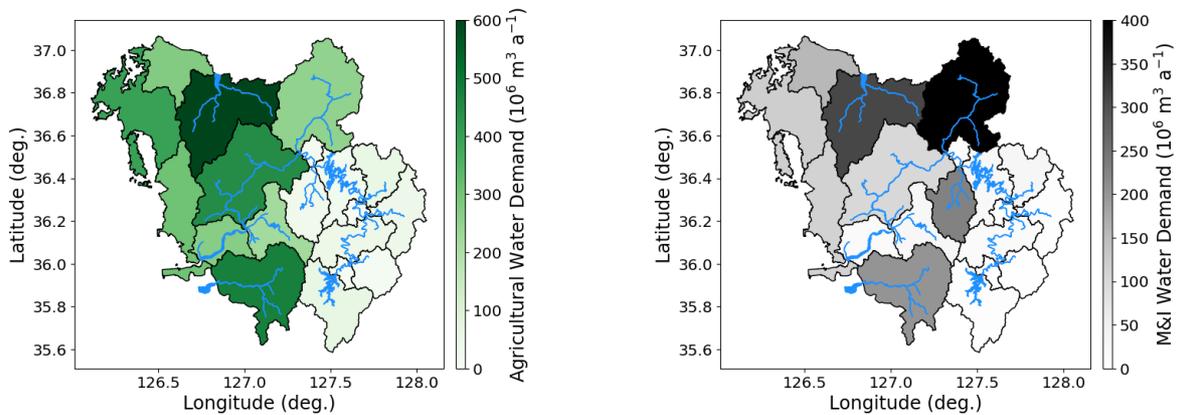


Fig. 2. Distribution of agricultural water demands (left) and municipal & industrial demands (right) at the 19 sub-basins

용수 수요는 높지만 대규모 저수시설이 부족한 만경강 유역은 용담댐에서의 물 공급에 크게 의존하고 있고 미호강유역, 금강공주유역, 삽교천유역, 금강서해유역(3014) 역시 대청댐과 금강 하구둑의 저수량에 공급을 의존하고 있다. 금강공주유역과 삽교천유역 사이에 최근 도수관이 건설되어 유역 변경식 공급이 이루어지고 있다.

중권역별 자연유출 모의를 위해 먼저 기상청 종관관측지점 일강수량(P), 일최고기온, 일최저기온 자료를 Parameter-elevation Regression on Independent Slope Model (PRISM; Daly *et al.*, 2008) 기법으로 3km×3km 해상도로 공간보간하였다. PRISM 공간보간에 사용된 기상청 종관관측지점은 60개(Jeong and Eum, 2015)이며 자료기간은 1981년부터 2020년까지이다. 각 중권역 경계 내 격자들의 평균값으로 공간평균 강수량, 최고기온, 최저기온을 산정하였고, 기온값은 다시 Allen *et al.* (1998)의 표준방법으로 지면순에너지 자료로 변환되었다. 중권역별 잠재증발산량(Potential evaporation, E_w)은 지면순에너지 자료를 Priestley and Taylor (1972) 공식에 입력하여 산정하였고 Priestley-Taylor 계수는 1.10을 적용하였다(Ma *et al.*, 2021).

중권역별 평균 강수량과 잠재증발산량의 비율로 습윤도(Wetness; $\Phi^{-1} \equiv \Delta P / \Delta E_w$)를 산정하면 유역의 기후특성을 한 개의 변수로 나타낼 수 있다. 단열과정(adiabatic process)에서 잠재증발산량은 강수량의 영향을 받지 않기 때문에 평균기온을 사용하는 것보다 두 기후변수 사이의 독립성을 높일 수 있다(Kim and Chun, 2021). 상류에 위치한 용담댐유역(3001)과 무주남대천유역(3003)의 습윤도가 다른 중권역에 비해 상대적으로 높았고 19개 중권역의 습윤도는 모두 1.4 이상으로 습윤한 기후로 분류할 수 있다(<https://wad.jrc.ec.europa.eu/patternsaridity>). 1981-2010과 1991-2020 두 30년 기간을 비교했을 때 금강수계 평균강수량은 1,289 mm/a에서 1,275 mm/a로 -1.1% 감소했고 평균 잠재증발산량은 867 mm/a에서 크게 변하지 않았다.

2.2 Decision-scaling framework

Decision scaling (Brown *et al.*, 2012)은 임의적으로 발생시킨 기후스트레스를 시스템 모형에 입력해 반복적으로 시스템의 성능을 평가하고 기후스트레스와 시스템 성능 사이의 관계를 만들어 의사결정을 지원하는 분석 프레임이다(Fig. 3). 테스트에 사용된 기후조건과 테스트 결과 얻어진 성능 사이의 관계를 Climate Response Function (CRF)이라 하며 CRF 상에서 시스템 성능을 견고하게 유지되도록 적응정책을 유도하는 것이 목적이다(Poff *et al.*, 2016). CRF에 많은 기후전망을 간단히 적용할 수 있어 기후전망의 불확실성을 고려해

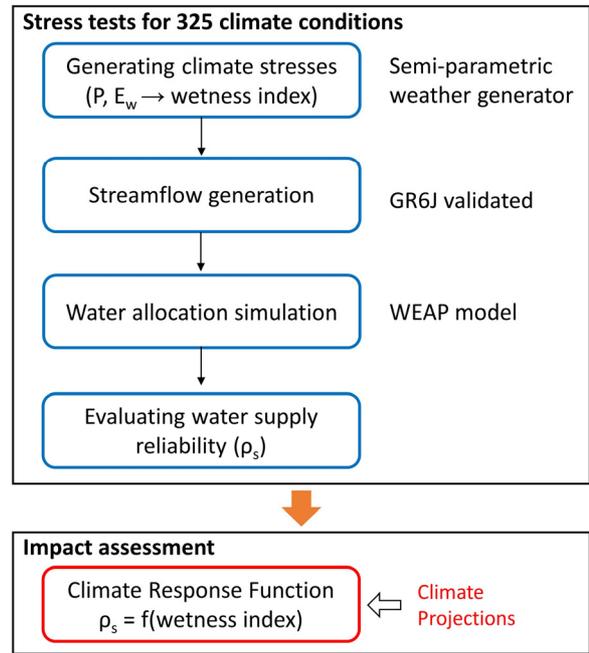


Fig. 3. Procedures for assessing water supply reliability in the Geum River basin system using the decision-scaling framework

의사결정을 지원할 수 있는 큰 장점이 있다(Kim *et al.*, 2019a).

Decision-scaling으로 금강유역 이수안전도를 평가하기 위해 추계학적 기후스트레스 발생기법, 개념적 강우-유출모형, 네트워크형 물배분 시스템모형을 연계하였다. 325개의 기후스트레스와 2가지 하천유지용수 관리 시나리오를 중권역별 이수안전도를 평가하였다. 평균강수량과 잠재증발산량을 한 개의 독립변수로 고려하기 위해 습윤도를 이수안전도의 독립변수로 사용해 중권역별 CRF를 개발했고 하천유지용수 관리기법 변화에 대한 반응을 분석하였다.

2.2.1 추계학적 기후스트레스 발생기법

일단위 기후스트레스 시계열 발생을 위해 Steinschneider and Brown (2013)의 Semi-parametric weather generator를 사용하였다. Wavelet autoregressive (AR) 연강수량 모형(Kwon *et al.*, 2007)과 Markov-chain weather bootstrapper (Apipattanavis *et al.*, 2007)를 연계해 임의적 날씨 시계열을 생성하고 사용자가 원하는 기후스트레스를 시계열에 가하는 방법이다. 여기서 Wavelet AR 모형은 자연의 장기진동 신호를 고려해 연강수량을 더 현실적으로 발생시키기 위한 도구이다. 하지만 금강수계의 경우 AR 모형으로 직접 연강수량을 생성시키는 방법이 관측 경년변화를 더 잘 재현하는 것으로 확인되어 Wavelet 분해는 생략하였다.

AR 모형으로 발생시킨 연강수량을 조건으로 Apipattanavis

et al. (2007)의 weather bootstrapper로 일강수량을 생성하였다. Markov chain 과정으로 무강수, 보통강수, 극한강수를 구분하는 일단위 시계열 발생시키고 이에 해당하는 관측 강수량 자료를 7일 Moving window로 무작위 샘플링을 하는 기법이 적용되었다. 금강수계 평균 일강수량으로 대표시계열을 생성하고 샘플링된 날짜의 중권역별 강수량과 잠재증발산량을 이용하면 중권역간 상관성과 변량 간 상관성을 모두 보존할 수 있다. AR모형과 Markov chain으로 생성된 무작위 날씨 시계열은 다시 Quantile Mapping방법으로 사용자가 원하는 통계치를 갖도록 기후스트레스를 생성시킬 수 있다. 기후스트레스 발생기법에 대한 자세한 사항은 Steinschneider and Brown (2013)에 설명되어 있다.

19개 중권역의 자연유출 변화를 모의하기 위해 평균강수량은 -20%에서 +40%까지, 평균잠재증발산은 -10%에서 +20%까지 2.5%로 간격으로 변화시켜 30년 길이 일단위 시계열을 생성했다. 따라서 생성된 기후스트레스 시계열은 총 $25 \times 13 = 325$ 개이다.

2.2.2 자연유출모의

325개 기후스트레스에 대한 19개 중권역의 자연유출 모의를 위해 Lee and Kim (2023)의 연구에서 검증된 GR6J (Pushpalatha *et al.*, 2011)를 사용하였다. GR6J는 개념적 강우-유출모형인 GR4J (Perrin *et al.*, 2003)의 기저유출 모의능력을 개선한 모형으로 유역의 토양수분저류능력(X1), 유역간 유출입계수(X2), 하층저류능력(X3), 단위도 기저시간(X4)을 나타내는 매개변수와 유역간 지하수유출입 상한(X5)와 저층 유출계수(X6)를 조정하는 매개변수를 사용한다.

용담유역을 제외하면 금강수계 중권역은 모두 미계측유역이고 용담유역도 2000년 이전 유입량 기록은 없기 때문에 GR6J 모형의 매개변수는 인접성기반 지역화 방법으로 결정되었다. 한국의 38개 자연유출 유역의 유출자료로 GR6J 매개변수를 직접 추정했을 때 Kling-Gupta Efficiency (KGE; Gupta *et al.*, 2009)의 중앙값과 Interquartile range (IQR)는 각각 0.73, 0.16이었고, 인접성기반 매개변수 지역화를 적용했을 때 KGE의 중앙값과 IQR은 각각 0.68, 0.19였다(Lee and Kim, 2023). 유사한 모형인 GR4J를 한국의 45개 유역에 대해 같은 방법으로 평가했을 때 Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)의 평균과 표준편차는 각각 0.53, 0.41이었다(Kim *et al.*, 2017).

Kim *et al.* (2019a)과 Lee and Kim (2023)의 연구결과를 바탕으로 지역화기법으로 모의된 GR6J 일유출량은 5일 단위의 물수지 분석에 사용이 가능할 것으로 판단하였다. Lee and Kim (2023)의 38개 유역 중 각 중권역에서 가장 가까운 5개

유역의 매개변수로 일유출을 모의하였고 5개 모의유출의 평균으로 대표값을 결정하였다.

2.2.3 Water Evaluation And Planning (WEAP) 모형

각 중권역의 자연유출, 물수요, 중권역 간 연결관계(하천, 인공수로 등)는 Water Evaluation And Planning (WEAP; <https://www.weap21.org/>)의 Node-and-link 네트워크로 간략화되었다(Fig. 1). WEAP은 자연유출, 인위적 물 이동, 지하수위 변화, 수질 변화 등을 연계해 제약조건 안에서 수요지점에서의 물공급량을 결정하는 최적화 모형이다. WEAP의 목적함수는 각 수요지점의 수요충족률을 최대화 하는 것이며 하천수와 댐의 연계운영, 수요처의 공급우선순위, 하천유지유량, 수원선호도 등은 최적화의 제약조건이 된다. Choi *et al.* (2010)은 금강수계에서 WEAP의 모형의 적용성 분석한 바 있고 지역수자원계획, 오염총량규제 등 다양한 목적으로 활용이 가능한 것으로 평가하였다. WEAP은 산림-수자원-에너지-식량 연계시스템 운영전략(Wang *et al.*, 2014), 수자원-에너지-식량 연계시스템의 기후변화적응정책(Jander *et al.*, 2023) 개발 등 다양한 목적으로 활용되고 있다. 한국에서는 과거 수자원장기종합계획(MOLIT, 2016)의 중권역 단위 물 부족 평가에 사용된 바 있다.

관측기간의 이수안전도를 평가하기 위해 1981-1990 기간 자연유출시계열로 node-and-link 시스템을 먼저 초기화 시켰고 1991-2020 기간에 대한 이수안전도를 30년 동안 총수요를 만족할 확률로 평가하였다. 관측기간 최적화 모의는 5일 간격으로 집계된 자연유출과 수요량을 이용해 수행되었고 생활용수 공급량의 65%가 하천으로 회귀하는 것을 가정하였다. 앞서 설명한 대로 두 가지 하천유지유량 시나리오가 사용되었으며 첫 번째 시나리오는 하천유지유량 제약조건이 농업용수와 생공용수 공급보다 우선순위가 낮을 때이다. 다른 하나는 하천유지유량 제약조건이 농업용수, 생공용수 수요가 동일한 우선순위를 가질 때를 가정하며 이 경우에 최적화 모형은 생공용수 공급이 부족해지더라도 하천유지유량을 만족하기 위해 공급을 조절하게 된다.

이수안전도가 기후변화에 반응하는 정도를 확인하기 위해 325개 기후스트레스 시계열로 생성된 자연유출을 반복적으로 입력해 node-and-link 네트워크를 최적화 했고 이를 위해 WEAP Application Programming Interface를 사용하였다(<https://www.weap21.org/webhelp/api.htm>). 기후스트레스 테스트에도 두 가지 하천유지유량 시나리오를 동일하게 적용해 분석을 수행하였다.

3 결과 및 고찰

3.1 관측기간(1991-2020) 이수안전도 평가

GR6J로 모의된 중권역별 1991-2020 기간 연평균 자연유출은 72-1,565 Mm³/a의 범위를 보였고 유역면적이 넓은 미호강유역, 금강공주유역, 삽교천 유역에서 높게 나타났다. 기후조건의 공간변동성보다는 중권역의 규모가 유출의 공간변화에 미치는 영향이 크다는 의미이다. 대청댐 상류에 위치한 중권역들은 총 수요보다 10배 이상 많게 자연유출이 모의된 반면 갑천유역, 미호강유역, 삽교천유역, 만경강유역에서는 총 수요의 2배가 되지 않은 유출량이 나타났다. 연평균 유출이 수요보다 작은 중권역은 없었지만 6-9월에 집중되는 특성으로 인해 10월부터 이듬해 5월까지의 생공용수 수요를 자연유출만으로 만족시킬 수는 없는 것으로 확인되었다.

용담댐, 대청댐, 보령댐, 금강하구 등 저수능력을 고려할 수 있는 WEAP 모형으로 최적화된 이수안전도 분포는 Fig. 4와

같다. 하류로 갈수록 자연유출이 누적되는 본류 유역과 저수 시설에서 대량으로 물공급이 가능한 유역의 이수안전도가 높은 것으로 확인할 수 있다. 최상류에 위치한 용담댐유역을 제외하면 자연유출이 누적되는 유역의 이수안전도는 100%에 가까운 수치를 보였다. 반면 상류유역이 없고 저수시설과 연결되지 않은 초강유역(3005), 보청천유역(3007), 논산천유역(3013)의 이수안전도는 80%이하이다.

갑천유역(3009)과 미호강유역(3010)은 상류유역은 없지만 용담댐, 대청댐에서의 공급을 통해 물 부족을 크게 완화할 수 있는 것으로 나타났다. 하지만 미호강유역은 인위적 물공급에도 불구하고 상대적으로 수요가 많아 갑천유역보다 이수안전도가 낮았다. 삽교천유역은 총수요가 가장 높지만 금강 본류에서의 농업용수 공급과 대청댐을 통한 생공용수 공급이 가능하기 때문에 미호강 유역보다 신뢰도가 높게 나타났다. 만경강유역은 고립되어 있지만 용담댐에서의 생공용수 공급으로 인근 논산천 유역보다 신뢰도가 높았고 금강서해 유역역

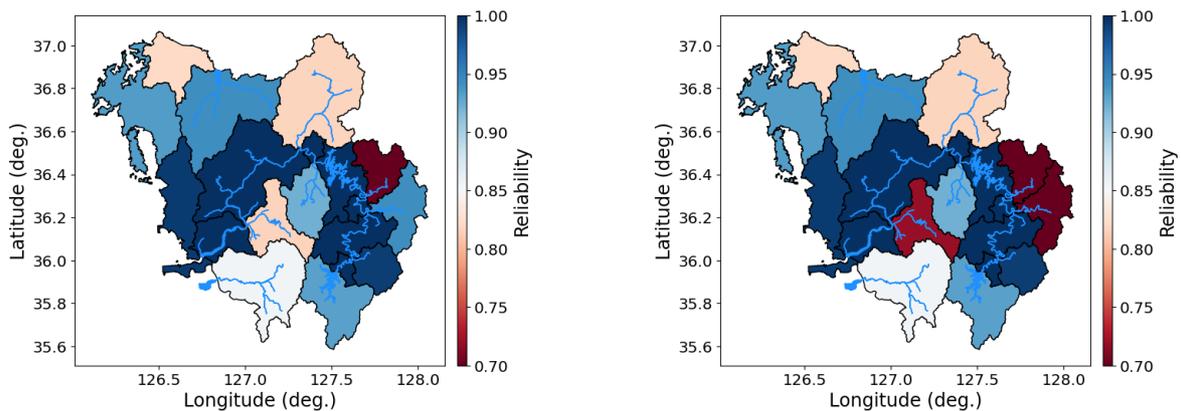


Fig. 4. Distribution of water supply reliability within the 19 sub-basins under optimal water allocation with low- (left) and high-priority (right) instreamflow managements

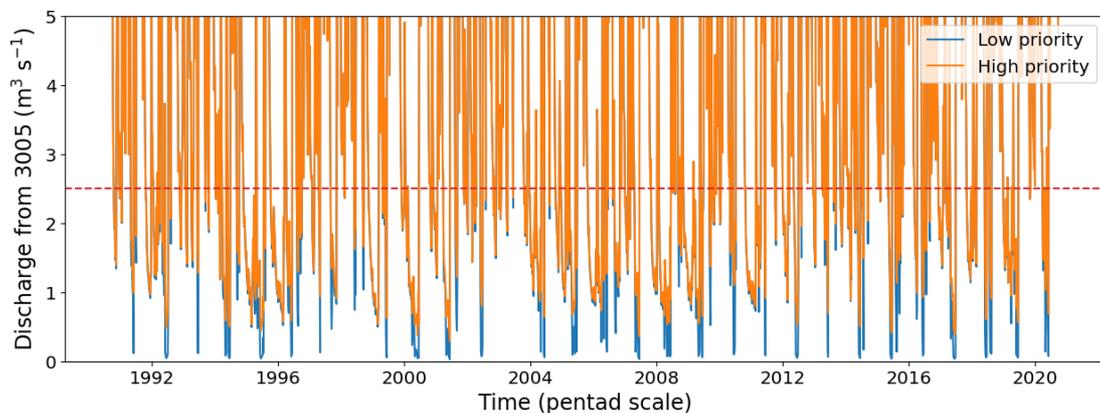


Fig. 5. The time series of discharge from the sub-basin 3005 under the low (blue) and high (orange) priority instreamflow management. The red line signifies the legal instreamflow requirement

시 금강 하구둑과 보령댐의 공급으로 신뢰도가 높게 나타났다.

하천유지유량의 우선순위가 농업용수, 생공용수보다 낮을 경우에는 보청천 유역에서만 80% 미만의 공급신뢰도가 나타난다. 이에 반해 하천유지유량의 우선순위를 다른 수요와 동일하게 운영할 경우, 초강유역과 논산천유역의 공급신뢰도도 80% 아래로 크게 떨어지게 된다(Fig. 4). Fig. 4에 나타난 WEAP 모형 최적화 결과는 자연적으로 하천유량이 누적되는 유역과 대규모 저수시설과 연결된 유역으로의 물 공급은 원활하고, 시스템에서 고립된 유역으로의 물 공급은 쉽지 않음을 의미한다. 이런 조건에서 하천유지유량을 엄격하게 관리하게 되면 고립된 유역의 물 부족 빈도는 높아지게 됨을 의미한다.

Fig. 5는 두 하천유지유량 관리방식에 대한 초강유역(3005)의 유출량을 비교한 그림이다. 초강유역 하천유지유량 고시량은 $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 농업용수와 생공용수 수요를 먼저 고려할 경우 저수기에는 거의 만족시키기 어렵다. 하천유지용수의 우선순위를 농업용수와 생공용수 수요 수준으로 높여더라도 고시량을 만족시킬 확률은 크게 높아지지 않을 가능성이 높다. 하지만 최적화 모형이 하천유지유량 부족분을 줄이도록 물 배분을 하기 때문에 초강유역을 빠져나가는 수량은 상당히 늘어나게 되는 것을 알 수 있다. 강수증가나 인위적 공급 없이 공급우선순위 변경만으로 저수기에 고시량을 만족시킬 가능성은 거의 없을 것으로 판단된다.

3.2 기후스트레스에 대한 이수안전도의 변화

Fig. 6는 기후스트레스 테스트로 얻은 갑천유역(3009)의 325개 이수안전도와 습윤도 샘플을 나타낸다. 하천유지유량

우선순위에 이수안전도가 크게 변하지 않는 것을 알 수 있다. 하천유지유량 관리전략을 변화시키지 않더라도 갑천유역의 높은 생공용수 수요는 하천유지유량 고시량을 만족시키는 역할을 하게 된다. 대청댐에서 갑천유역에 생공용수가 공급되면 회귀수량도 함께 늘어날 수밖에 없다. 하천유지유량 관리 전략과 상관없이 갑천유역에서는 습윤도가 대략 1.4 이하로 떨어질 때 이수안전도가 급격히 감소했다.

이에 반해 보청천 유역(3007)의 경우(Fig. 7), 용담댐과 대청댐에서의 공급량이 매우 적기 때문에 출구지점 하천유지유량을 만족시키기 위해서는 농업용수와 생공용수 공급을 줄일 수밖에 없다. 이런 조건에서 하천유지유량의 우선순위를 높일 경우 이수안전도는 급격하게 감소해 평균적으로 1년에 6개월 이상 물 부족이 지속되는 것으로 분석되었다. 다만 스트레스 테스트에서 얻어진 공급신뢰도의 최대치가 줄어들기 때문에 기후변화에 대한 민감도는 줄었다.

두 유역의 습윤도, 이수안전도 샘플을 지수형(exponential) 곡선으로 회귀분석했을 때 결정계수(R^2)는 약 0.90 이었다. 동일한 회귀분석을 모든 중권역에 반복했을 때 R^2 의 범위는 0.75-0.90였고 이는 금강유역의 평균강수량과 평균잠재증발산량이 하위시스템 이수안전도 변화의 75% 이상을 설명함을 의미한다. 나머지 변화는 유출의 계절성과 단기변동성을 나타내는 변수로 설명할 수 있다. 그러나 대규모 저수시설로 물 부족을 완화시키는 시스템의 경우 추가적인 변수가 이수안전도 변화를 설명하는 정도는 크지 않다(Kim et al., 2019a). 습윤도는 전 지구 유출변화를 설명하는 변수이고(Berghuijs et al., 2017; Kim and Chun, 2021), 인위적인 영향이 있다 하더라도 수문시스템의 물공급능력에 큰 영향을 미치는 요소인 것으로 보인다.

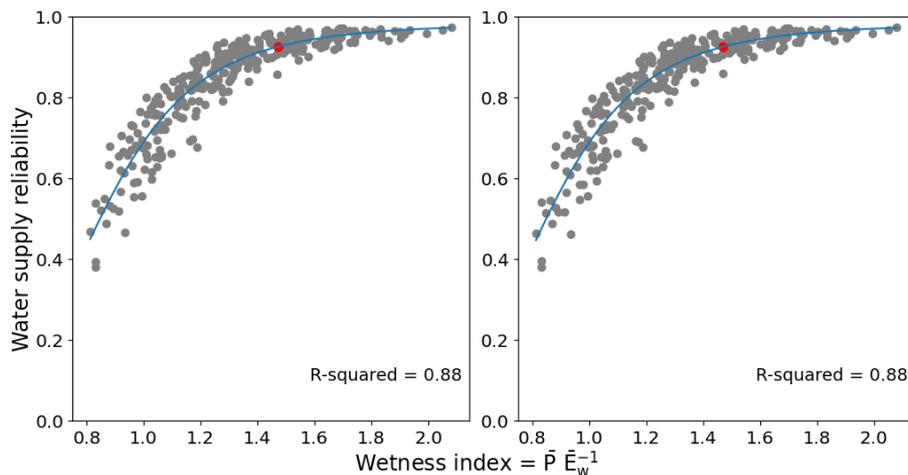


Fig. 6. Scatter plots between the wetness index (ratios of mean annual P to E_w) and water supply reliability at the sub-basin 3009 evaluated with 325 climate stresses

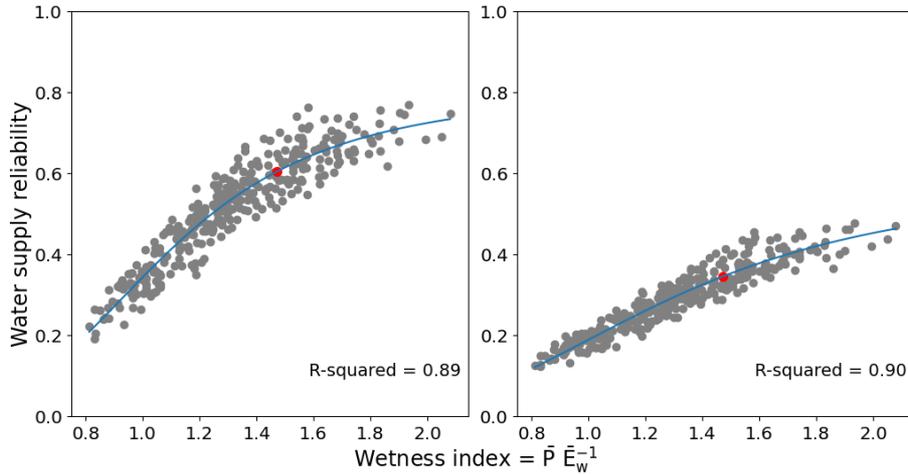


Fig. 7. Same as Fig. 5, but for the sub-basin 3007

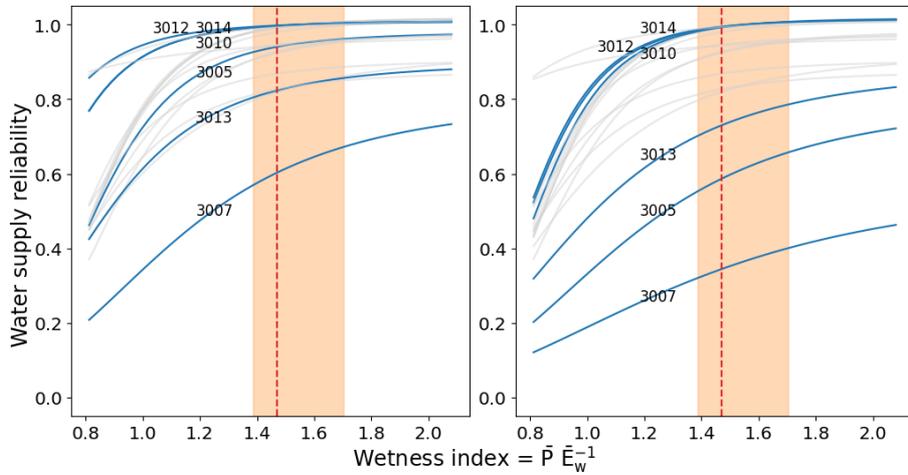


Fig. 8. The regressed relationships between water supply reliability and wetness index in each sub-basins with low (left) and high (right) instreamflow priorities. The gray lines represent the sub-basins with insignificant changes in the relationships between the two management options, while the blue lines indicate those with considerable changes. The numbers besides blue lines signify the sub-basin identifiers

Fig. 8은 같은 방법으로 얻어진 19개 중권역의 습윤도와 이수안전도의 관계를 나타낸다. 하천유지유량 우선순위를 변경했을 때 이 관계가 크게 변하는 유역은 초강유역(3005), 보청천유역(3007), 미호강유역(3011), 금강공주유역(3012), 금강하구연(3014) 으로 나타났다. 유출이 누적되는 위치에 있는 금강공주유역과 금강하구연에서도 하천유지유량의 우선순위를 높일 경우 습윤도가 1.4 아래로 떨어지게 되면 급격히 이수안전도가 감소하는 것을 알 수 있다. 대청댐과 용담댐에서의 용수공급에도 불구하고 미호강유역의 이수안전도 역시 습윤도 1.4이하에서는 기후 스트레스에 민감하게 반응하는 특성을 보였다. 시스템에서 고립되어 있는 초강유역, 보청천유역, 논산천유역의 이수안전도는 기후변화보다는 유지유량

관리정책의 변화에 더 민감하게 반응하는 것으로 판단된다.

Kim *et al.* (2019a)에 사용되었던 Coupled Model Intercomparison Project Phase 5(CMIP5) 25개 기후모형의 전망으로 2021-2030기간 습윤도를 산정했을 때 그 범위는 약 1.4에서 1.7이었다. 미래에는 이수안전도가 높아질 가능성이 큼을 의미한다. 물론 WEAP 모형에서 가정하는 물부족 최소화 운영을 지속했을 때를 가정한 결과이다. Kim *et al.* (2019a)에 사용된 CMIP5 기후전망은 Representative Concentration Pathway (RCP) 4.5와 8.5 시나리오이며 각각 중간정도 온실가스 배출과 현재 화석연료 경제를 지속했을 때를 나타낸다. 2021-2050 기간에는 두 배출 시나리오의 기후 전망이 크게 갈리지 않는다. 통상적인 기후모형 전망의 특성은 습윤한 기후는 더 습윤

해지고 건조해지는 지역은 더 건조해 지는 것인데(Feng and Zhang, 2015; Yang *et al.*, 2019) 이를 고려했을 때 금강수계의 기후는 더 습해질 가능성이 크다. 하지만 기후변화는 여전히 불확실하고(Xiong *et al.*, 2022), 기후가 더 건조해지는 전망도 있기 때문에 이수안전도가 무조건 상승한다고 단정하기는 어렵다.

3.3 고찰

본 연구에서는 금강유역 사례연구를 통해 이수안전도와 기후변화 사이의 관계를 단변량 지수함수로 나타낼 수 있음을 보였다. Decision scaling을 이용한 기존 연구에서는 이수안전도를 평균강수량과 평균기온의 이변량 함수로 보는 경우가 많았다(Kim *et al.*, 2019a; Whateley *et al.*, 2014). 하지만 강수량 증가로 토양수분이 증가하게 되면 현열(sensible heat flux) 감소로 인해 지면온도는 떨어지게 된다(Szilagyi, 2021). 이 지면-대기 상호작용은 전지구적으로 관찰되는 현상이기 때문에(Zhou *et al.*, 2019) 이 둘을 독립변수로 하는 CRF는 물관리신뢰도 전망을 왜곡시킬 수 있다.

반면 지면에너지를 잠재증발산량으로 대표하게 되면 유출변화를 기상학적 물공급과 수요측면에서 바라볼 수 있고 둘의 단위가 같기 때문에 독립변수를 하나로 줄일 수 있는 장점이 생기게 된다. 사실 기후스트레스 테스트에 강수량과 잠재증발산을 사용한 시기는 Decision Scaling이 제안보다 빠르다(Roderick and Farquhar, 2011). 평균강수량과 평균잠재증발산량의 비율은 Budyko framwork (Mianabadi *et al.*, 2020)에서 사용되는 건조지수의 역수로 전지구적으로 자연유출 변화를 설명하는 변수이다(Kim and Chun, 2021). 간단히 건조지수를 이용해 반대로 CRF를 단순화시키면 금강유역의 사례연구와 같이 여러 하위시스템의 기후민감도를 한눈에 볼 수 있는 장점이 있다.

금강유역 사례연구에서는 고립된 유역의 이수안전도는 기후변화보다 하천유지유량 관리전략의 변화에 훨씬 큰 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 고립되지 않은 하류 유역에서도 하천유지유량의 우선순위가 높아지게 되면 기후가 건조해졌을 때 이수안전도가 상당히 감소할 수 있는 것으로 분석되었다. 하지만 생태기능을 개선을 위한 물관리 전략에 큰 변화가 없다면 2021-2050 기간의 물 부족은 1991-2020 보다 크지 않을 것으로 전망된다.

그러나 30년 기간의 평균 이수안전도와 기후민감도 중심 평가는 단 기간에 발생하는 물 부족 위험과는 큰 차이가 날 수 있기 때문에 단기적 의사결정에는 유의해 사용해야 한다. 본 연구의 이수안전도, 기후민감도 정보와는 달리 단기적으로

가뭄이 발생했을 때 물 부족을 겪었던 지역은 금강서해 유역이다. 대청댐이나 주변 다른 인프라에서의 인위적 공급이 없을 경우에는 WEAP 최적화 결과와는 상당히 다른 상황이 발생할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 개념적 강우-유출 모형과 최적화 물배분 모형을 이용해 금강권역 19개 중권역의 이수안전도를 두 가지 하천유지유량 관리전략 시나리오로 평가하였다. 또한 325 기후스트레스로 동일한 분석을 반복하여 기후스트레스와 하천유지유량 관리정책 변화에 따른 이수안전도의 변화를 분석하였다. 관측기간 분석과 상향식 기후변화영향평가 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 이수안전도에 대한 기후민감도 함수는 강수량과 잠재증발산량 변화로 개발할 수 있고 단위가 같은 두 변수를 하나로 줄이게 되면 여러 중권역의 기후민감도를 동시에 고려하는데 편의를 제공할 수 있다.
- (2) 보청천유역, 초강유역, 논산천유역 등 고립된 중권역의 경우 하천유지유량 관리기준이 엄격해 졌을 때 기후변화에 관계없이 이수안전도가 크게 감소하는 것으로 분석되었다.
- (3) CMIP5 2021-2050 기후전망을 기후스트레스 결과에 적용했을 때 금강수계 중권역의 이수안전도는 앞으로 개선될 가능성이 있다. 그러나 하천유지유량 우선순위를 높일 경우 보청천유역, 초강유역, 논산천유역에서는 증가하는 강수량에도 불구하고 잦은 물부족을 겪을 수 있다.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. The Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

- Apipattanavis, S., Podesta, G., Rajagopalan, B., and Katz, R.W. (2007). "A semiparametric multivariate and multisite weather generator." *Water Resources Research*, Vol. 43, W11401.
- Berghuijs, W.R., Larsen, J.R., van Emmerik, T.H.M., and Woods, R.A. (2017). "A global assessment of runoff sensitivity to changes in precipitation, potential evaporation, and other factors." *Water Resources Research*, Vol. 53, pp.8475-8486.
- Brêda, J.P.L.F., de Paiva, R.C.D., Collischon, W., Bravo, J.M., Siqueira, V.A., and Steinke, E.B. (2020). "Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections." *Climatic Change*, Vol. 159, pp.503-522.
- Brown, C., and Wilby, R.L. (2012). "An alternate approach to assessing climate risks." *Eos, Transactions American Geophysical Union*, Vol. 93, pp.401-402.
- 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, W09537.
- Brown, C., Steinschneider, S., Ray, P., Wi, S., Basdekas, L., and Yates, D. (2019). "Decision Scaling (DS): Decision support for climate change." *Decision Making under Deep Uncertainty: From Theory To Practice*, Edited by Marchau, V.A.W., Walker, W.E., Bloemen, P.J.T.M., and Popper, S.W., Springer, Cham, Switzerland, pp. 255-287.
- Daly, C., Halbleib, M., Smith, J.I., Gibson, W.P., Doggett, M.K., Taylor, G.H., Curtis, J., and Pasteris, P.P. (2008). "Physiographically sensitive mapping of climatological temperature and precipitation across the conterminous United States." *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 28, No. 15, pp. 2031-2064.
- Dilling, L., Daly, M.E., Travis, W.R., Wilhelmi, O.V., and Klein, R.A. (2015). "The dynamics of vulnerability: Why adapting to climate variability will not always prepare us for climate change." *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, Vol. 6, No. 4, pp. 413-425.
- Feng, H., and Zhang, M. (2015). "Global land moisture trends: Drier in dry and wetter in wet over land." *Scientific Reports*, Vol. 5, 18018.
- Foley, M.M., Bellmore, J.R., O'Connor, J.E., Duda, J.J., East, A.E., Grant, G.E., Anderson, C.W., Bountry, J.A., Collins, M.J., Connolly, P.J., and Craig, L.S. (2017). "Dam removal: Listening in." *Water Resources Research*, Vol. 53, pp. 5229-5246.
- Georgakakos, A.P., Yao, H., Kistenmacher, M., Georgakakos, K.P., Graham, N.E., Cheng, F.-Y., Spencer, C., and Shamir, E. (2012). "Value of adaptive water resources management in Northern California under climatic variability and change: Reservoir management." *Journal of Hydrology*, Vol. 412-413, pp. 34-46.
- Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K., and Martinez, G.F. (2009). "Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling." *Journal of Hydrology*, Vol. 377, pp. 80-91.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021). Climate change 2021: The physical science basis. *Contribution of working group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Edited by Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., and Zhou, B., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, U.S., pp. 1513-1765.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023). Summary for policymakers. *Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, Edited by Core Writing Team, Lee, H., and Romero J., Geneva, Switzerland, pp. 1-34.
- Jander, V., Vicuña, S., Melo, O., and Lorca, Á. (2023). "Adaptation to climate change in basins within the context of the water-energy-food nexus." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 149, 04023060.
- Jang, O.J., Moon, Y.I., and Moon, H.T. (2021). "Methodology for assessment and forecast of drought severity based on the water balance analysis." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 54, No. 4, pp.241-254.
- Jeong, Y., and Eum, H.-I. (2015). "Application of a statistical interpolation method to correct extreme values in high-resolution gridded climate variables." *Journal of Climate Change Research*, Vol. 6, pp.331-334.
- Kim, D., and Chun, J.A. (2021). "Revisiting a two-parameter budyko equation with the complementary evaporation principle for proper consideration of surface energy balance." *Water Resources Research*, Vol. 57, e2021WR030838.
- Kim, D., Chun, J.A., and Aikins, C.M. (2018). "An hourly-scale scenario-neutral flood risk assessment in a mesoscale catchment under climate change." *Hydrological Processes*, Vol. 32, pp. 3416-3430.
- Kim, D., Chun, J.A., and Choi, S.J. (2019a). "Incorporating the logistic regression into a decision-centric assessment of climate change impacts on a complex river system." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 23, pp. 1145-1162.
- Kim, D., Eum, H.I., Kaluarachchi, J.J., and Chun, J.A. (2019b). "A sensitivity-based analysis for managing storage capacity of a small agricultural reservoir under drying climate." *Agricultural Water Management*, Vol. 213, pp. 410-418.
- Kim, D., Jung, I.W., and Chun, J.A. (2017). "A comparative assessment of rainfall-runoff modelling against regional flow duration curves for ungauged catchments." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 21, pp.5647-5661.
- 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, W05407.
- Lee, S.C., and Kim, D. (2023). "A comparative study of conceptual

- model and machine learning model for rainfall-runoff simulation." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 56, pp. 563-574.
- Ma, N., Szilagyi, J., and Zhang, Y. (2021). "Calibration-free complementary relationship estimates terrestrial evapotranspiration globally." *Water Resources Research*, Vol. 57, e2021WR029691.
- Mianabadi, A., Davary, K., Pourreza-Bilondi, M., and Coenders-Gerrits, A.M.J. (2020). "Budyko framework; Towards non-steady state conditions." *Journal of Hydrology*, Vol. 588, 125089.
- Ministry of Environment (ME) (2021). *The 1st national water management plan (2021-2030)*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2016). *National water resources plan (2001-2020) - 3rd revision (2016-2020)*.
- No, S.-H., Jung, K.S., Park, J.H., and Ryoo, K.S. (2013). "Water supply change outlook for Geum River Basin considering RCP climate change scenario." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, pp. 505-517.
- O'Neill, B.C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D.P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.F., Lowe, J., and Meehl, G.A. (2016). "The scenario model inter-comparison project (ScenarioMIP) for CMIP6." *Geoscientific Model Development*, Vol. 9, pp.3461-3482.
- Perrin, C., Michel, C., and Andreassian, V. (2003). "Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation." *Journal of Hydrology*, Vol. 279, pp.275-289.
- Poff, N.L., Brown, C.M., Grantham, T.E., Matthews, J.H., Palmer, M.A., Spence, C.M., Wilby, R.L., Haasnoot, M., Mendoza, G.F., Dominique, K.C., and Baeza, A. (2016). "Sustainable water management under future uncertainty with eco-engineering decision scaling." *Nature Climate Change*, Vol. 6, pp. 25-34.
- Priestley, C.H.B., and Taylor, R.J. (1972). "On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters." *Monthly Weather Review*, Vol. 100, pp. 81-92.
- 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.
- Pushpalatha, R., Perrin, C., Le Moine, N., Mathevet, T., and Andreassian, V. (2011). "A downward structural sensitivity analysis of hydrological models to improve low-flow simulation." *Journal of Hydrology*, Vol. 411, pp. 66-76.
- Roderick, M.L., and Farquhar, G.D. (2011). "A simple framework for relating variations in runoff to variations in climatic conditions and catchment properties." *Water Resources Research*, Vol. 47, No. 12, W00G07.
- Schlef, K.E., Steinschneider, S., and Brown, C.M. (2017). "Spatio-temporal impacts of climate and demand on water supply in the Apalachicola-Chattahoochee-Flint Basin." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 144, 05017020.
- Schlef, K.E., Steinschneider, S., and Brown, C.M. (2018). "Spatio-temporal impacts of climate and demand on water supply in the Apalachicola-Chattahoochee-Flint Basin." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 144, 05017020.
- Seneviratne, S.I., Corti, T., Davin, E.L., Hirschi, M., Jaeger, E.B., Lehner, I., Orlowsky, B., and Teuling, A.J. (2010). "Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review." *Earth-Science Reviews*, Vol. 99, No. 3-4, pp. 125-161.
- 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, pp. 7205-7220.
- Szilagyi, J. (2021). "On the thermodynamic foundations of the complementary relationship of evaporation." *Journal of Hydrology*, Vol. 593, 125916.
- Trenberth, K.E., Dai, A., Van Der Schrier, G., Jones, P.D., Barichivich, J., Briffa, K.R., and Sheffield, J. (2014). "Global warming and changes in drought." *Nature Climate Change*, Vol. 4, pp. 17-22.
- Turner, S.W., Marlow, D., Ekström, M., Rhodes, B.G., Kularathna, U., and Jeffrey, P.J. (2014). "Linking climate projections to performance: A yield-based decision scaling assessment of a large urban water resources system." *Water Resources Research*, Vol. 50, No. 4, pp. 3553-3567.
- Wang, B., Liang, X.J., Zhang, H., Wang, L., and Wei, Y.M. (2014). "Vulnerability of hydropower generation to climate change in China: Results based on Grey forecasting model." *Energy Policy*, Vol. 65, pp.701-707.
- Weaver, C.P., Lempert, R.J., Brown, C., Hall, J.A., Revell, D., and Sarewitz, D. (2013). "Improving the contribution of climate model information to decision making: the value and demands of robust decision frameworks." *WIREs Climate Change*, Vol. 4, pp. 39-60.
- Whateley, S., Steinschneider, S., and Brown, C. (2014). "A climate change range-based method for estimating robustness for water resources supply." *Water Resources Research*, Vol. 50, pp. 8944-8961.
- Xiong, J., Guo, S., Abhishek, Chen, J., and Yin, J. (2022). "Global evaluation of the "dry gets drier, and wet gets wetter" paradigm from a terrestrial water storage change perspective." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 26, pp. 6457-6476.
- Yang, T., Ding, J., Liu, D., Wang, X., and Wang, T. (2019). "Combined use of multiple drought indices for global assessment of dry gets drier and wet gets wetter paradigm." *Journal of Climate*, 32, pp. 737-748.
- Zhou, S., Williams, A.P., Berg, A.M., Cook, B.I., Zhang, Y., Hagemann, S., Lorenz, R., Seneviratne, S.I., and Gentile, P. (2019). "Land-atmosphere feedbacks exacerbate concurrent soil drought and atmospheric aridity." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 116, pp. 18848-18853.