



Hydrological drought risk assessment for climate change adaptation in South Korea

Seo, Jungho^a · Chi, Haewon^b · Kim, Heey Jin^c · Kim, Yeonjoo^{d*}

^aPh.D Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea

^bMaster Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea

^cMaster Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea

^dAssociate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea

Paper number: 22-020

Received: 24 March 2022; Revised: 29 April 2022; Accepted: 2 May 2022

Abstract

As natural disasters have been increasing due to climate change, sustainable solutions are in need to alleviate the degree of drought hazard, assess and project the drought influence based on future climate change scenarios. In assessing drought risk, socio-economic factors of the region must be considered along with meteorological factors. This study categorized drought hazard, exposure, and vulnerability as three major components of drought risk according to the Intergovernmental panel on Climate Change (IPCC) risk assessment framework, and selected indices for each component to quantify the drought risk in South Korea according to the mid-size basins. Combinations of climate scenarios (Representative Concentration Pathway; RCP 2.6 and RCP 8.5) and socio-economic scenarios (Shared Socio-economic Pathways; SSP 1, SSP2 and SSP3) for the near future (2030-2050) and the far future (2080-2099) were utilized in drought risk analysis, and results were compared with the historical data (1986-2005). In general, the drought risks for all scenarios shows large increases as time proceeds to the far future. In addition, we analyzed the rank of drought hazard, exposure, vulnerability for drought risk, and each of their contribution. The results showed that the drought hazard is the most contributing component to the increase of drought risk in future and each basin shows varying contributing components. Finally, we suggested countermeasures for each basin according to future climate change scenarios, and thus this study provides made the basis for establishing drought management measures.

Keywords: Climate scenario, Drought risk, Disaster risk Assessment framework

기후변화 적응을 위한 우리나라 수문학적 가뭄 위험도 평가

서정호^a · 지혜원^b · 김혜진^c · 김연주^{d*}

^a연세대학교 건설환경공학과 박사과정, ^b연세대학교 건설환경공학과 석사과정, ^c연세대학교 건설환경공학과 석사과정,

^d연세대학교 건설환경공학과 부교수

요 지

기후변화로 인해 자연재해의 빈도가 증가하고 있어 미래 기후변화 시나리오를 바탕으로 가뭄 영향을 평가 및 전망하고 가뭄 위험도 감소를 위한 기후변화 적응 대책이 필요하다. 가뭄 위험도(risk)를 평가하기 위해서는 기후 요소뿐만 아니라 가뭄 발생 지역의 사회·경제적인 요소들 또한 고려해야 한다. 따라서 본 연구에서는 IPCC의 재난 위험도 분석 프레임워크에 따라 가뭄 위험도 평가 요소를 위해성(Hazard), 노출도(Exposure), 취약성(Vulnerability)으로 나누고 이에 맞는 각 지표를 선정하여 우리나라 중권역 단위의 가뭄 위험도를 정량화하였다. 미래 가뭄 위험도 평가를 위해 근미래(2030-2050년)와 먼 미래(2080년-2099년)에 대해 기후변화 시나리오(RCP 2.6, RCP 8.5)와 사회경제 시나리오(SSP1, SSP2, SSP3)를 조합하여 가뭄 위험도를 살펴보고 이를 과거(1986-2005년)와 비교·분석하였다. 미래 시나리오에 따른 가뭄 위험도는 시간에 따라 전 유역에 걸쳐 먼 미래에 크게 상승하였다. 그리고 가뭄 위험도의 각 요소별 기여도와 순위 분석을 통해 미래 가뭄 위험도 상승에 대해 가뭄 위해성의 기여도가 전반적으로 크고, 유역별로 상승 요인이 다르다는 것을 확인했다. 이에 미래 기후변화 시나리오에 따른 유역별 해결 방안을 제시하여 향후 가뭄대응 수립을 위한 정책에 기반이 될 수 있도록 하였다.

핵심용어: 기후 및 사회·경제시나리오, 가뭄 위험도, 재난 위험도 분석 프레임워크

*Corresponding Author. Tel: +82-2-2123-2801

E-mail: yeonjoo.kim@yonsei.ac.kr (Y. Kim)

1. 서론

가뭄이란 강수량 혹은 가용 수자원 등이 평균적인 수준에 비해 지속해서 적게 유지되는 현상으로서 농업, 사회 그리고 경제 등 다양한 분야에 피해를 발생시키는 불가피하고 반복적인 현상이다(Sherwood and Fu, 2014). 가뭄은 자연재해 측면에서 발생 시점이 불명확하고 시공간적으로 크게 발생하는 특징으로 가뭄에 대한 피해를 직접 파악하기 어려우며, 사회·경제적으로 여러 분야에 큰 영향을 미치기 때문에 심각한 문제로 인식되고 있다(Wilhite, 2000). 또한, 가뭄 피해는 시설물과 사람의 생명에 직접적인 영향을 주지 않는 비가시적인 특성을 가져 홍수, 태풍, 지진 그리고 산사태와 같은 타 자연재해와는 다르게 비교적 높은 관심을 받기 어렵다(Wilhite and Pulwarty, 2005; Pulwarty and Sivakumar, 2014). 하지만 가뭄으로 인한 피해는 짧게는 몇 주, 길게는 다년간 물 부족을 초래하여 방대한 지역과 여러 분야에 걸쳐 지속적인 큰 피해를 초래하게 된다(Lee, 2015). 또한, 가뭄으로 발생하는 피해는 생태계 유지, 에너지 생산, 수자원 확보 및 농작물 생산에 심각한 영향을 주고 심한 경우, 막대한 인명 피해와 경제적 손실을 유발하기 때문에 우리의 생활과 아주 밀접한 관련이 있다(Dai, 2011).

국내 가뭄 발생의 경우 국지적 가뭄은 보통 2-3년, 극한 가뭄은 5-7년의 주기로 발생하고 있으며, 가뭄 발생으로 인한 사회·경제적 피해가 대형화되어가는 추세이다(Lee et al., 2021). 특히 90년대 이후로 남부지역을 중심으로 겨울철부터 봄철까지 만성적으로 가뭄 횟수와 강도가 꾸준히 증가하고 있다(K-water, 2002). 2008년부터 2009년에는 강원 태백에 극심한 가뭄으로 인한 물 부족으로 각종 산업이 위축되어 경제적 피해와 많은 주민에게 피해를 초래했다(Taebaek-si, 2009). 또한, 2014년 7월에는 강우량이 평년의 50-61% 정도로 감소하여, 강원, 경기, 충청 일부 지역에서 제한급수를 시행하였다(Kim, 2015). 2015년에는 평년대비 39-55%의 역대 최저치의 강우량을 기록하여 충남 8개 시·군에 생활용수 부족에 따른 급수 조정을 시행하고, 농작물 수확량 저하로 물가가 상승하는 등의 피해를 발생시켜 사회적으로 큰 관심을 증가시켰다(Kim and Kim, 2018).

최근 기후변화로 인해 전 지구적으로 기온이 상승하고 강수량 패턴이 변화하여 토양의 증발산량이 증가하고 유출량의 시공간적 변동으로 미래 물순환 과정이 다른 양상으로 변해 가뭄의 빈도와 강도에 큰 영향을 미칠 것으로 전망하고 있다(IPCC, 2021). 특히 지구온난화 1.5°C 특별보고서에서는 과거 산업화 이전 시기(1850-1900년)와 대비하여 평균기온이 1.5°C 증가하게 되면, 가뭄과 같은 물 관련 자연재해의 빈도가 증가하고 이는 전 지구 평균기온의 상승 폭이 커짐에 따라 더욱 심화될 것으로 전망했다(IPCC, 2018). 국내도 가뭄의 빈도

와 강도가 증가하며 가뭄에 의한 사회·경제적 피해와 가뭄 발생의 지역적 편차가 커질 것으로 전망되고 있다(Ministry of Environment; ME, 2020). 그리고 기후변화로 인해 가뭄 발생 주기가 짧아져 국지적인 가뭄이 더욱 빈번하게 발생하는 추세이다(Kim et al., 2017). 또한, 미래 시나리오에 따라 국내 봄철의 유출량 감소와 증발산량 증가가 더욱 심화되어 봄철 및 겨울철에 가뭄 발생 빈도가 크게 증가할 것으로 예상했다(Sohn et al., 2014).

가뭄 현상을 모니터링하고 예측 전망하기 위해 강우, 토양 수분, 온도, 유출량 등과 같은 물리적인 특성을 고려한 가뭄지수들을 다양하게 개발하는 노력을 기울이고 있다(Sheffield and Wood, 2008; Vincente-Serrano et al., 2010; Um et al., 2017, 2018; Lee et al., 2021, 2022). 이러한 다양한 가뭄지수는 각각의 목적에 따라 개발되었으며, 지역적 특성이 고려되는 물 소비량, 농경지 사용량과 인구 증가와 같은 사회·경제적 요소들을 반영하지 못하는 한계점이 존재한다. 특히, 우리나라의 경우 지리 특성상 국토면적은 작지만, 기온 및 강수량과 같은 기후변화에 민감한 기후 요소와 사회·경제적 요소의 지역적 편차가 크다. 그리고 기후변화에 따른 자연재해의 취약성은 지역에 따라 다르므로 기후변화 영향을 고려하여 적절한 지역별 가뭄대책을 수립하는 것은 매우 필요하다(Sim et al., 2011). 하지만 국내의 경우 가뭄 발생 및 피해의 정도 추정에서 있어 피해 발생 이후 처리하는 방식의 대응형 접근 방식이 시행되고 있다. 이러한 사후 처리방식은 기술 및 경제적인 문제점을 포함한 낮은 효율성으로 인해 가뭄의 시작과 끝을 포함한 시기와 그 피해의 정도를 판단하는데 정확도가 떨어져 가뭄 위험도 관리에 적절하지 않다(Wilhite and Pulwarty, 2005). 따라서 지구온난화와 같은 기후변화로 인해 가뭄 위험도가 증가할 것으로 전망되고, 반복적으로 발생하는 가뭄 피해를 줄이기 위해서는 위험도 관리(Risk management) 개념을 바탕으로 한 접근이 필요하다(Wilhite and Pulwarty, 2005; Kim et al., 2015a).

하지만 여전히 미래 기후변화 및 사회변화의 불확실성이 존재하며 이를 대비할 필요가 있다. 기존 다양한 연구에서는 가뭄 취약성 및 위험도 등을 평가하였지만 여전히 정량적 분석을 바탕으로 한 정책제시에는 한계를 보이는 실정이다. 이에 기후 및 사회·경제 변화를 고려한 가뭄 위험도 판단을 수행하고 이를 바탕으로 정책 대안을 제시할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 IPCC (2014)에서 제시한 재난 위험도 분석 프레임워크에 따라 가뭄 위험도 평가 요소를 위해성, 노출도, 취약성으로 나누고 이에 맞는 각 지표를 선정하여 수문·기상학적, 사회·경제학적 자료를 바탕으로 우리나라 중권역 단위의 가뭄 위험도를 정량화하였다. 그리고 기후 시나리오(RCP2.6 and RCP8.5)와

사회·경제 시나리오(SSP1, SSP2 and SSP3)를 조합하여 미래 가뭄 위험도 전망을 살펴보고 미래 가뭄 위험도 변화에 따른 요소 분석을 위해 요소별 기여도와 순위 분석을 수행하였다. 그 결과 시나리오에 따른 한반도의 가뭄 위험도는 미래에 상승하며, 특히 전 유역에 걸쳐 높은 농·공업용수 수요량으로 가뭄 취약성이 높았다. 하지만 유역에 따라 가뭄 위험도 상승 요소와 지표가 다를 것을 확인하였고 이에 맞는 방안을 제시하였다.

2. 연구 방법

2.1 연구 지역

본 연구에서는 한반도 5개 대권역(한강, 낙동강, 금강, 영산강, 그리고 섬진강)과 111개의 중권역(Fig. 1과 Table 1)을 대상으로 가뭄 위험도를 산정하였다. 한반도는 상대적으로 온도가 낮고 건조한 북부와 높은 온도를 보이고 습한 남부로 이뤄져 있으며, 연평균 강수량은 약 1237.4 mm이다(KMA, 2020). 한반도의 연 강수량은 약 70%가 매년 여름에 발생하는 장마로 인해 발생하며 특히 6-9월 사이에 집중되고, 10-5월까지의 강우의 부족으로 가뭄이 빈번하게 발생하는 특징이 있다. 한반도는 장기적으로 지난 109년간(1912-2020년) 연평균 기온이 꾸준히 상승($0.2^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ 추세)하고 있으며, 과거 30년(1912-1940년)에 비해 최근 30년간(1991-2020년) 연평균 기온이 1.6°C 상승했으며, 모든 계절에서 증가하는 경향을 보였다. 특히 겨울철과 봄철에 두드러지게 나타나고, 가을철과 여름철에는 비교적 낮게 상승하는 경향을 보인다. 최근 10년간(2011-2020년) 한반도의 온난화에 따라 기온 관련 극한 지수(폭염 일수, 열대야 일수)가 급격히 증가하고 있으며, 남부지방에 국한된 아열대 기후가 21세기에 점차 한반도 전역으로 급속히 북상할 것으로 전망한다(KMA, 2017; 2020).

2.2 가뭄 위험도 프레임워크

본 연구에서는 수문·기상학적, 사회·경제학적 자료를 바탕으로 가뭄 위험성, 가뭄 취약성, 가뭄 노출도, 가뭄 위험도를 산출하고 이를 토대로 가뭄 위험도를 평가한다. IPCC에서 제시한 위험도 개념을 바탕으로 가뭄 위험도를 평가하고 분석하고자 한다(Fig. 2). 평가 지수를 산정하는 데 필요한 항목들에 대하여 전국단위 기초 자료를 수집하고 구축한 후 위험도 평가 결과를 피해자료와 비교 평가하여 위험도 평가체계를 검증하였다. 그리고 기후 시나리오 자료를 기반으로 하여 과거 및 미래에 대한 가뭄 위험성 및 사회·경제 시나리오에 따른 가뭄 취약성 및 노출도를 정량화한 후 가뭄 위험도를 평가하였다.

2.2.1 가뭄 위험성

가뭄 위험성은 가뭄의 시작에 기여하는 물리적인 요소들인 강수, 온도, 유출량을 지표로 선정하고 가뭄지수를 계산하여 이를 바탕으로 정량화하였다. 다수의 선행 연구에서는 가뭄 위험성 산정을 위해 강우 기반의 가뭄 지수(eg. WASP, SPI, EDI, etc.)들을 채택하였다(Shahid and Behrawan, 2008; Kim *et al.*, 2015a; Carrao *et al.*, 2016). 하지만 본 연구에서는 물리 기반 모형인 지면 모형을 통해 생산된 유출량을 고려하는 SRI(Standardized Runoff Index)를 채택하였다(Table 2). SRI는 Jaranilla-Sanchez *et al.* (2011)에 의해 필리핀 Panpanga 유역을 대상으로 가뭄평가의 적용성을 검증한 바 있으며, 미국 CPC (Climate Prediction Center)에서는 이미 전 세계를 대상으로 Land Surface Model을 통해 생산된 유출 및 토양수분과 같은 수문 인자를 기반으로 가뭄 감시 및 전망 정보를 실시간으로 제공하고 있다. 국내의 경우는 과거 가뭄 피해사례와 비교분석을 통해 표준 유출지수 SRI가 비교적 국내 가뭄 상황을 보다 잘 재현하는 것으로 알려진 바 있다(Sohn *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2022).

SRI는 지면에서 지표 및 지하수 유출과 해빙 등의 영향이 반영된 유출량의 순환을 가뭄해석에 고려하기 위해 물 수지 불균형에 따른 물 부족 현상에 의한 것에 착안하여 개발된 지수로 지표의 수문 인자인 유출량의 부족에 대한 확률적 특성을 적용한 기법이다. 월 단위의 유출량 자료에 대한 확률밀도 함수의 누가 확률분포함수를 통해 누가 확률을 계산한 후 평

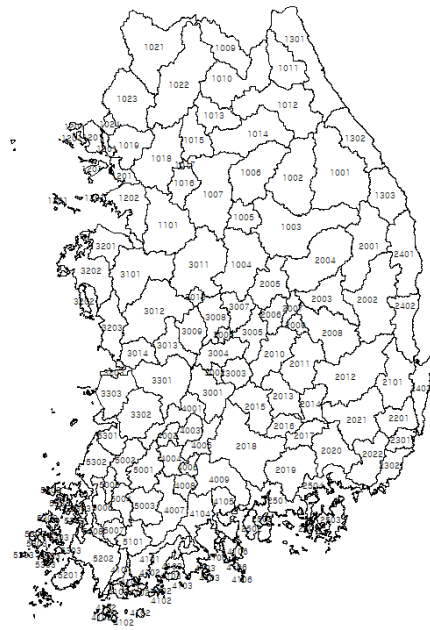


Fig. 1. Mid-size basins of the Korean Peninsula

Table 1. mid-size basins code and name

Code	Name	Code	Name	Code	Name
1001	Upper Namhan River	2010	Gamcheon	3014	Geumganghagueon
1002	Pyeongchang River	2011	Gangjeong Goryeongbo	3101	Sapgyocheon
1003	Chungju Dam	2012	Geumho River	3201	Daeho Seawall
1004	Dalcheon	2013	Hoecheon	3202	Bunam Seawall
1005	Chungju Dam downstream	2014	Hapcheon Changnyeongbo	3203	Geumgang West Sea
1006	Seom River	2015	Hapcheon Dam	3301	Mangyeong River
1007	Lower Namhan River	2016	Huanggang	3302	Dongjin River
1009	pyeonghwadam	2017	Nakdong Changnyeong	3303	Saemangeum
1010	Chuncheon Dam	2018	Namgang Dam	4001	Seomjin River Dam
1011	Inbukcheon	2019	Nam River	4002	Downstream of Seomjin River Dam
1012	Soyanggang	2020	Nakdong Miryang	4003	Osuchon
1013	Uiam Dam	2021	Miryang River	4004	Sunchang
1014	Hongcheon River	2022	Nakdong River Estuary	4005	Yocheon
1015	Cheongpyeong Dam	2101	Hyeongsan River	4006	Seomjingokseong
1016	Gyeongancheon	2201	Taehwa River	4007	Juam Dam
1017	Paldang Dam	2301	Hoe Ya River	4008	Boseonggang
1018	Han River Seoul	2302	Suyeonggang	4009	Lower Seomjin River
1019	Han River Goyang	2401	Wangpicheon	4101	Seonamhae of the Seomjin River
1021	Upper Imjin River	2402	Yeonddukoshipcheon	4102	Wando
1022	Hantan River	2403	Daejongcheon	4103	Geumsan-myeon
1023	Lower Imjin River	2501	Gahwacheon	4104	Isacheon
1024	Lower Han River	2502	Namhae-do	4105	Sueocheon
1101	Anseongcheon	2503	Geoje Island	4106	Yeosu City
1201	Han River West Sea	2504	Nakdonggangnamhae	5001	Upper Yeongsan River
1202	Sihwa Lake	3001	Yongdam Dam	5002	Hwangnyonggang
1301	Yangyang Namdaechon	3002	Downstream of Yongdam Dam	5003	Jiseokcheon
1302	Gangneung Namdaechon	3003	Muju Namdaechon	5004	Juksanbo
1303	Samcheogospicheon	3004	Yeongdongcheon	5005	Gomakwoncheon
2001	Andongdam	3005	Chogang	5006	Lower Yeongsan River
2002	Imhadaem	3006	Upstream of Daecheong Dam	5007	Yeongamcheon
2003	Andongdaemharyu	3007	Bocheongcheon	5008	Yeongsan River Estuary
2004	Naeseongcheon	3008	Daecheong Dam	5101	Tamjin River
2005	Yeonggang	3009	Gapcheon	5201	Jindo
2006	Byungseongcheon	3010	Downstream of Daecheong Dam	5202	Yeongam Seawall
2007	Nakdong Sangju	3011	Mihocheon	5301	Joo Jincheon
2008	Wicheon	3012	Geumganggongju	5302	Watancheon
2009	Gumibo	3013	Nonsancheon	5303	Sinan-gun

균 0, 표준편차 1을 가지는 표준 정규분포함수를 통해 정규화 과정을 거쳐 지수를 계산한다(Shukla and Wood, 2008). 확률분포의 경우 빈도해석을 수행하여 분포 별 매개변수를 산정하고 적합도 검정을 통해 적정분포를 산정한다. 본 연구에서는 기존 연구에서 많이 활용되었던 Gamma 분포, Log Pearson type-3 분포, Log-logistic 분포 중에 Gamma 분포를 사용

하였다(Mckee *et al.*, 1993; Jaranilla-Sanchez *et al.*, 2011).

한편 SRI 지수는 다양한 시간 규모(1, 3, 6, 9, 12, 24개월)로 정량화가 가능하며, 장단기 가뭄해석에 있어 매우 유용하다. 본 연구에서는 기후변화의 장기 영향 평가에 우수하다고 알려진 12개월 시간 규모를 채택하였다(Ahmadalipour *et al.*, 2017). 그리고 강수량과 기온 그리고 지면모형을 통해 계산된 유출

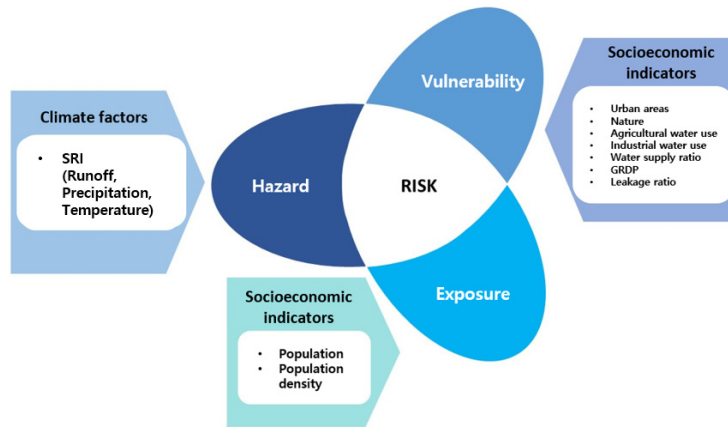


Fig. 2. Indicators adopted for drought risk assessment (Source: Modified version of WG II Fig 19.1 (IPCC, 2014))

Table 2. Selected indicators for each drought risk component

Drought risk component	Hist		Future	
	Indicator	Data source	Indicator	Data source
Hazard	Drought Hazard based on SRI	NorESM - RegCM	Drought Hazard based on SRI	RCP2.6,8.5(NorESM - RegCM)
				SSP1
				SSP2
				SSP3 (KEI)
Exposure	Population	WAMIS	Population	SSP1
	Population density		Population density	
	Urban area		Urban area	
	Nature		Nature	
Vulnerability	GRDP	KOSIS	GRDP	SSP2
	Leakage ratio	Ministry of Environment	Water supply ratio	Assume same as the past (Ministry of Environment)
	Water supply ratio		Leakage ratio	
	Agricultural water use	WAMIS	Agricultural water use	Assume same as the past (WAMIS)
	Industrial water use		Industrial water use	

량 자료를 활용하여 각 중권역 지역의 SRI를 산정하고 가뭄 위해성을 정량화하였다. 가뭄 위해성(Drought Hazard, DH)은 Eq. (1)과 같이 정의되며 가뭄이 발생하는 횟수인 가뭄 빈도(Drought frequency, DF)와 가뭄 상태로 판단된 지역의 총 면적(Drought severity, DS)을 나눠 계산된다.

$$DI_{avg} = \frac{\sum DS}{DF} \quad (1)$$

$$DH = \text{Normalized } (DI_{avg}) \quad (2)$$

가뭄 심도와 빈도를 정의하기 위해 가뭄지수의 분류체계를 사용하여 분류하였다. 가뭄지수는 값이 클수록 습윤하고,

값이 작을수록 건조해 가뭄 상태가 심한 것을 의미한다. 대개 가뭄지수가 -1보다 작은 경우 가뭄의 상태가 시작된다고 판단하며, 본 연구에서는 가뭄을 평가하고 분석하기 위해 가뭄지수가 -1보다 작은 경우만 고려하였다. 따라서 연구기간 내 가뭄지수의 값이 -1보다 적은 면적은 가뭄 심도로 지정하고, 가뭄이 발생하는 횟수는 가뭄 빈도로 지정했다.

2.2.2 가뭄 노출도

노출 특성은 가뭄과 같은 재해가 발생한 지역 내에 포함된 객체의 수로 간주하고, 일반적으로 사회의 지리 공간적 접근성으로 인식되고 있다. IPCC (2014)에서는 노출도에 대해 사회·경제적 기반시설 또는 문화적 자산과 인명, 생계수단 그리고 자원이 부정적인 영향을 받는 장소에 위치하는 것으로 정

의했다. UNISDR (2009)에서는 잠재적 손실의 대상이 되는 인구, 재산, 시스템 혹은 위험 구역에 존재하는 다른 요소들이라고 정의했다. Lee (2015)에서는 가뭄 노출 특성에 대해 장기간 강수량의 부족으로 인한 해당 지역의 물 부족 경향으로 정의하였고, 이 물 부족 영향을 물 부족 정도(물 부족 기간의 용수 공급도, 물 부족 일수 등)와 함께 물 부족을 겪는 객체의 수(영향 농지, 영향생산액, 영향인구 등)를 종합적으로 고려하였다. 이에 본 연구에서는 가뭄 노출도는 자료의 가용성과 기존 연구 등을 기반으로 하여 인구와 인구 밀도의 두 가지 지표를 선정하였다(Table 2). 이에 가뭄 노출도는 가뭄 발생 기간에 가뭄으로 인해 발생하는 잠재적 손실의 대상이 되는 가뭄 발생 지역 내의 인구로 구성되게 되며, 인구와 인구 밀도가 높은 지역에서는 가뭄 노출도가 크게 나타난다.

2.2.3 가뭄 취약성

취약성은 재해발생으로 인해 피해받기 쉬운 물질적, 사회적 자산 또는 경제나 생태학적 시스템의 상태나 특성을 의미한다(UNISDR, 2009). 따라서, 같은 규모의 가뭄 현상이 발생하더라도 취약성이 낮은 지역은 가뭄 위험도가 낮고, 취약성이 높은 지역은 가뭄으로 인한 큰 피해가 발생할 수 있다. UNDP (2005)에서는 취약성을 재해 피해로 인해 발생하는 잠재적 손실의 정도로 정의하며, 적응 능력과 민감도의 함수로 취약성을 산정하였다. 이에 본 연구에서는 가뭄 취약성을 가뭄으로 인해 해당 지역에 피해받기 쉬운 대상인 7가지 지표들로 구성하였다(Table 2). 각각의 지표들은 가뭄 영향에 지배받는 자연면적과 식생의 비율을 나타내는 시가화 건조율, 가뭄을 관리하기 위한 경제적 능력인 지역내총생산(Gross Regional Domestic Product, GRDP), 농·공업용수 그리고 신뢰할 수 있는 물 공급에 접근할 수 있는 인구의 비율인 상수도 보급률과 이용 가능한 수자원의 효율성을 나타내는 상수도 누수율이며, GRDP가 낮거나 나머지 6개의 지표가 높은 경우 가뭄 취약성이 크게 나타난다.

2.2.4 가뭄 위험도 정량화

선정된 지표에 따라 계산된 각 요소를 바탕으로 가뭄 위험도 정량화를 수행한다. 가뭄 위해성의 경우 물리 기반 모형(WRF-Hydro)을 활용하여 도출한 가뭄지수(SRI)를 활용한다. 가뭄 취약성과 노출도 요소들은 각각의 출처로부터 수집된 지표들을 표준화하고 가중치를 부여하였다. 여기서 가중치는 동일 가중치로 가정하였다. 그 후 다기준 의사결정기법(Multi Criteria Decision Making, MCDM)을 이용하여 선정된 각각의 지표를 통합하여 취약성 및 노출도 지수를 산정하였다. MCDM은 고려해야 하는 대안과 평가하는 기준이 많은 경우 각각의 선호도

를 측정하고, 각 기준에 대한 중요도를 고려한 최선의 대안이나 순위를 의미하며, 많은 연구에서 대안을 평가하는 데 활용되고 있다(Kim and Chung, 2013, 2014; Kim et al., 2015b). MCDM의 방법은 가중평균법(weighted summation method), 계층화 분석과정(Analytic Hierarchy Process), 목적계획법 등 다양하게 존재하며, 본 연구에서는 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) 방법을 활용하였다.

TOPSIS 방법은 MCDM의 선호 정보를 이용할 수 없던 문제점을 해결하기 위해 개발되었다(Hwang and Yoon, 1981). 수자원 분야에서는 기후변화에 따른 재해영향평가와 지역별 취약성 평가와 같은 선행 연구가 많이 진행되었으며, 그만큼 이론의 우수성 및 적용의 안정성 등이 확보된 방법론이다(Song et al., 2019). TOPSIS 방법에 이상적인 대안은 모든 계수에 대하여 최상의 값을 제안하는 반면 비이상적인 대안은 모든 값에 가장 좋지 않은 값을 제시한다는 개념을 바탕으로 한다. 선택된 대안은 이상적인 해결책과 가장 가까워야 하고 비이상적인 해결책과는 가장 멀어야 한다. TOPSIS는 동시에 비이상적인 해결책(negative ideal solution, NIS)으로부터 가장 멀고 이상적인 해결책(positive ideal solution, PIS)과 가장 근접한 대안으로 정의된다.

먼저 선정한 자료를 정규화하고, 이어서 정규화한 자료를 Eqs. (3) and (4)에 따라 가장 큰 값(v_j^+)과 가장 작은 값(v_j^-)을 찾아냈다. 이어서 PIS는 d_j^+ 이고 NIS는 d_j^- 이 된다. 이러한 TOPSIS 방법으로 가뭄 취약성과 노출도 지수를 산출하였다.

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (3)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (4)$$

$$X_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (5)$$

각각의 방법을 통해 산출된 3가지 요소(가뭄 위해성, 가뭄 노출도, 가뭄 취약성)를 정규화하였다. 정규화는 일반적으로 모든 데이터가 같은 정도의 스케일을 가지도록 해주는 과정을 말하며, Robust Normalization, Feature Clipping, Z-Score Normalization 등과 같은 다양한 방법이 존재한다. 본 연구에서는 가장 일반적으로 사용되는 최대-최소 정규화(Min-Max Normalization)를 사용하였고 정규화를 통해 0부터 1까지의

값으로 정규화된다. 그 식은 Eq. (6)과 같다.

$$Normalized(X_i) = \frac{X_i - \min(X)}{\max(X) - \min(X)} \quad (6)$$

정규화 과정을 통해 가뭄 위험도 평가 요소(위해성, 노출도 및 취약성)가 정량화됨에 따라, 가뭄 위험도는 IPCC가 권고하고 UNISDR이 채택한 가뭄 위험도 체계에서 제시한 수식으로 계산할 수 있다. 가뭄 위험도는 위해성, 노출도, 취약성의 곱으로, 가뭄 위험도가 정량화됨에 따라, 하나의 요소에서 가장 높은 값(1의 값)이지만 동시에 다른 요소에서 가장 낮은 값(0의 값)을 보인 중권역은 다른 중권역들과 비교했을 때 0의 가뭄 위험도를 나타낸다. 이는 가뭄 위험도가 0의 값을 가지는 중권역은 절대적으로 위험 요소가 반드시 없다는 의미는 아니지만 단지 한반도 내의 서로 다른 중권역끼리 차이를 보여주는 정규화로 인하여 한반도 전체에서 가장 낮은 순위에 해당한다는 것이다. 이런 위험도 산정 체계는 유의미한 정도의 위험도가 계산되기 위해서는 세 요소 모두 0이 아닌 값을 가져야 한다는 것을 의미한다.

2.3 미래 시나리오

2.3.1 기후 시나리오

IPCC는 인간 활동이 대기에 미치는 복사량으로 온실가스 농도를 정하고 대표농도경로 RCP에 따른 시나리오를 적용하였다. 한편, RCP 시나리오는 복사강제력, 즉 온실가스 등으로 에너지의 평형을 변화시키는 영향력의 정도에 따라 4가지(RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 and RCP 8.5)로 구분되어있다. RCP 시나리오에 따른 기후변화는 21세기 전반에 걸쳐 모든 배출 시나리오에서 표면 온도가 상승하며, 지역적으로 다양한 양상으로 변화할 것으로 전망하였다. 우리나라의 경우, 한반도 및 지역별 기후변화 전망보고서(KMA, 2017)에서 한반도의 연평균 풍속, 상대습도 등은 RCP 시나리오에서 유의한 수준의 변화는 없을 것으로 전망하지만, 폭염 일수, 열대야 일수와 같은 고온 관련 극한기후지수는 급격하게 증가할 것으로 전망하였다. 본 연구에서는 4가지의 RCP 시나리오 중에서 RCP 2.6과 RCP 8.5 시나리오를 선정하였다. RCP 2.6은 인간 활동으로 인한 영향 및 피해가 지구 스스로가 회복한 온실가스의 농도가 가장 낮은 시나리오이고, RCP 8.5는 온실가스의 농도가 시나리오 중 가장 높으며 현재의 배출 추세가 이어지며 온실가스 저감에 대한 노력이 전혀 없는 시나리오이다.

본 연구에서는 ERA Interim을 이용하여 모형의 Boundary condition을 생성한 후, GCM (Global Climate Model) 모형인 Norwegian Earth System Model (NorESM1-M) 모형으로 생

성한 자료를 RegCM (Regional Climate Model)으로 한반도 지역에 3시간 단위 시간 해상도와 20 km 공간 해상도로 다운 스케일링하여 추출한 기후자료를 사용하였다(Im et al., 2019; Lee et al., 2020).

2.3.2 사회·경제 시나리오

공동사회경제 경로는 21세기에 걸쳐 발전하는 사회 또는 자연 시스템의 실현 가능한 다중의 추세를 다루며 안정적인 스토리라인과 정량적인 발전수단의 묶음으로 구성되어있다(O'Neill et al., 2014). SSP 시나리오는 결과가 완화, 적응, 영향에 내재하는 불확실한 성질을 나타내도록 사회·경제적, 환경적 조건들은 2개 축인 적응에 대한 사회·경제적 도전과 완화에 대한 사회·경제적 조건으로 구성된다. 시나리오는 기후변화에 대한 미래의 완화와 적응 노력에 따라 총 5개로 구성되어 있으며 본 연구에서는 SSP 1, 2, 3을 사용하였다. SSP1은 적응과 감축에 대한 부담이 모두 낮은 미래로 환경 규제 및 환경의 가치를 중요시한다. SSP2는 현재의 추세를 유지하는 미래상으로 기존 수준의 도시를 계획하고, 토지이용 및 효율성을 기존과 같은 형태로 유지한다. SSP3는 적응과 감축의 부담이 모두 높은 미래상으로 토지이용 규제를 악화하여 도시화가 진행되는 시나리오이다.

본 연구에서는 우리나라의 실정을 반영한 사회·경제적 변수로 연평균 GDP 성장 및 인구성장률을 고려하여 Chae et al. (2017)에서 개발한 우리나라의 SSP 시나리오를 사용하였고 그 중 지면 변화 자료(1 km 공간 단위로 10년 단위)를 활용하였다.

2.3.3 유출 시나리오

지표면과 대기의 상호작용을 모의하기 위해 개발된 지면모형은 수문·기상인자들에 대한 시공간적 변동성 분석이 가능하며 다양한 규모에서의 수문해석을 위해 활용된다. 본 연구에서 사용한 지면모형은 미국 National Center for Atmospheric Research (NCAR)의 통합 수문모형 WRF-Hydro모형으로 다양한 물리 기반과 개념적 접근을 통하여, 고해상도 지면의 물, 에너지 플럭스를 모의하기 위해 개발되었다(Gochis et al., 2018). WRF-Hydro 모형은 다른 지면모형처럼 기후자료를 강제 직접 입력하는 독립형(“비결합” 혹은 “오프라인”)과 WRF와 같은 대기모형과 결합하여 완전결합형(WRF/WRF-Hydro)으로 사용이 가능하며 여러 수문 인자(증발산, 토양수분, 유출량)들을 산출하여 수자원 관리에 적극적으로 활용되고 있다(Naabill et al., 2017; Lee et al., 2020, 2022; Cho and Kim, 2022).

본 연구에서는 SRI 기반의 가뭄 위해성을 계산하기 위해 WRF-Hydro 모형을 이용하여 유출량을 계산하였다. WRF-Hydro 모형은 독립형으로 구동하였으며, 물 및 탄소수지 모

의와 하천 흐름을 위한 입력자료로 앞선 2.3.1 절에서 생성한 3시간 해상도와 20 km 공간 해상도의 기후자료를 기상 강제 입력변수(강수량, 바람세기 및 방향, 태양복사에너지, 대기 압 및 습도, 강수량)로 활용하였다. WRF-Hydro 모형의 토지 이용자료는 MODIS Land Cover (MDD12Q2) 분류기반(혼효림, 경작지, 도시지역)으로 정의되어있지만 본 연구에서는 환경부에서 제공한 2011년 토지피복도를 활용하여 재생산한 자료를 사용하였다. 구동 기간으로는 미래 시간에 따른 유출량 결과를 얻기 위해 과거(1986-2005년), 근 미래(2031-2050년), 그리고 먼 미래(2080-2099년)의 총 세 구간으로 나누었다. 그리고 과거의 경우 과거 기후 모의 자료와 환경부에서 제공한 과거 토지이용 자료를 사용하였으며, 미래의 경우는 기후 시나리오(RCP2.6, RCP8.5)와 사회·경제 시나리오(SSP1, SSP2, SSP3)의 토지이용 시나리오를 조합하여 계산하였다.

2.4 기여도 분석

시나리오별 가뭄 위험도의 변화에 대한 원인을 정량적으로 평가하기 위해 본 연구에서는 다중선형회귀를 활용한 기여도 분석을 했다. 기여도 분석을 위해 선정된 인자들은 가뭄 위험성, 노출도 그리고 취약성 지수이며, 최대-최소 정규화를 통해 0-1 사이의 값으로 정규화된 결과를 사용하였다.

$$Y = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + b \quad (7)$$

Y 는 시나리오별 근 미래, 먼 미래의 가뭄 위험도 자료이며 x_i 는 각각 정규화된 가뭄 위험성, 가뭄 노출도, 그리고 가뭄 취약성 지수이다. 시나리오별 가뭄 위험도의 변화에 대한 인자들의 기여도는 다중 선형 회귀식의 계수인 a_i 의 하에 대한 각 계수의 비율로 정량화된다.

$$C_i(\%) = \frac{|a_i|}{\sum_{i=1}^3 |a_i|} \times 100 \quad (8)$$

C_i 는 가뭄 위험도에 대한 변수 a_i 의 기여도이다. 그리고 $|a_i|$ 는 변수 a_i 들의 절댓값을 나타내며 기여도는 변수들의 합에 대한 해당 변수들의 비율로서 나타내게 된다.

3. 결과 및 토의

3.1 가뭄 위험도

본 연구에서는 기후 시나리오인 RCP2.6과 RCP8.5와 사회·

경제 시나리오인 SSP1, SSP2, SSP3를 근 미래(2031-2050년)와 먼 미래(2080-2099년)에 적용하였으며, 표준 유출지수인 SRI 가뭄지수를 기반으로 가뭄 위험성을 산정하고(Fig. 3(a)), 사회·경제적 지표를 기반으로 가뭄 노출도와 가뭄 취약성을 산정하였다(Figs. 3(b) and 3(c)). 그 후 가뭄 위험도 수식에 따라 3가지 지수(가뭄 위험성, 가뭄 노출도 그리고 가뭄 취약성)를 조합해 가뭄 위험도를 산출하였고 그 결과는 다음과 같다(Fig. 3(d)).

기후 시나리오와 사회·경제 시나리오가 결합된 가뭄 위험도에서는 시간에 따라 먼 미래에 가뭄 위험도가 증가하는 양상을 보인다(Fig. 3(d)). 근 미래의 경우는 대체로 가뭄 위험도가 가뭄 위험성의 양상과 같은 양상을 보인다. 하지만 먼 미래에는 가뭄 위험성이 대체로 감소해 근 미래에 비해 큰 변화가 없지만, 노출도와 취약성에서 큰 변화가 있어 이와 유사한 양상을 보인다. 과거부터 한강 유역; 섬강, 금강 유역; 삼괴천, 만경강, 부남방조제 및 금강공주 유역과 낙동강 유역에 해당하는 금호강 유역이 상대적으로 가뭄 위험도가 높게 나타났으며, 이 지역은 모든 지표와 지수가 높게 나타나는 지역으로 상대적으로 가뭄 위험도가 높게 산정되었다. 또한, 근 미래에서 먼 미래로 갈수록 해당 유역 주변으로 가뭄이 전이되는 양상을 확인할 수 있으며, 시나리오에 따라 지역 간 격차가 발생하여 과거부터 심했던 지역이 더욱 심해진다. 하지만 과거에 가장 가뭄 위험도가 높았던 낙동강 유역의 금호강 유역은 상대적으로 미래 시나리오에 따라 가뭄 위험도가 완화된다.

3.2 가뭄 위험도 분석

3.2.1 가뭄 위험도 요소별 순위 분석

유역별 시나리오에 따라 가뭄 위험도 요소의 각 순위 변화와 순위 변화를 유발하는 각 평가 요소의 지표들을 분석하여 가뭄 위험도의 변화 추이를 살펴보았다. 본 연구에서는 유역별로 각 요소의 순위를 매겨 분석하였다(Fig. 4). 그 결과 유역별로 가뭄 위험도의 순위 변화가 각 요소의 순위 변화와 다르다는 것을 알 수 있었다.

한강 유역의 경우 가뭄 위험성은 근 미래에 증가하였다가 먼 미래에 완화된다. 다른 유역에 비해 GRDP가 월등히 높은 데도 불구하고 도시화 및 농·공업화 밀집 지역이 많은 수도권 지역으로 시가화율과 농·공업용수 수요량이 높아 가뭄 취약성이 큰 폭으로 증가한다. 또한 수도권 밀집에 따른 인구와 인구 밀도가 큰 폭으로 증가하여 가뭄 노출도도 큰 폭으로 증가하는 특징을 가지고 있다. 가뭄 위험도 요소 모두 전체적으로 증가하여 미래에 가뭄 위험도가 증가한다. 특히 서해에 인접한 한강 유역(안성천, 한강서해, 시화호)은 특히 큰 폭으로 가뭄 위험도가 증가하였다. 이 유역은 다른 유역에 비해 농·공업화가 큰 도시(화성, 평택, 천안, 여주, 이천)가 많이 위치하여

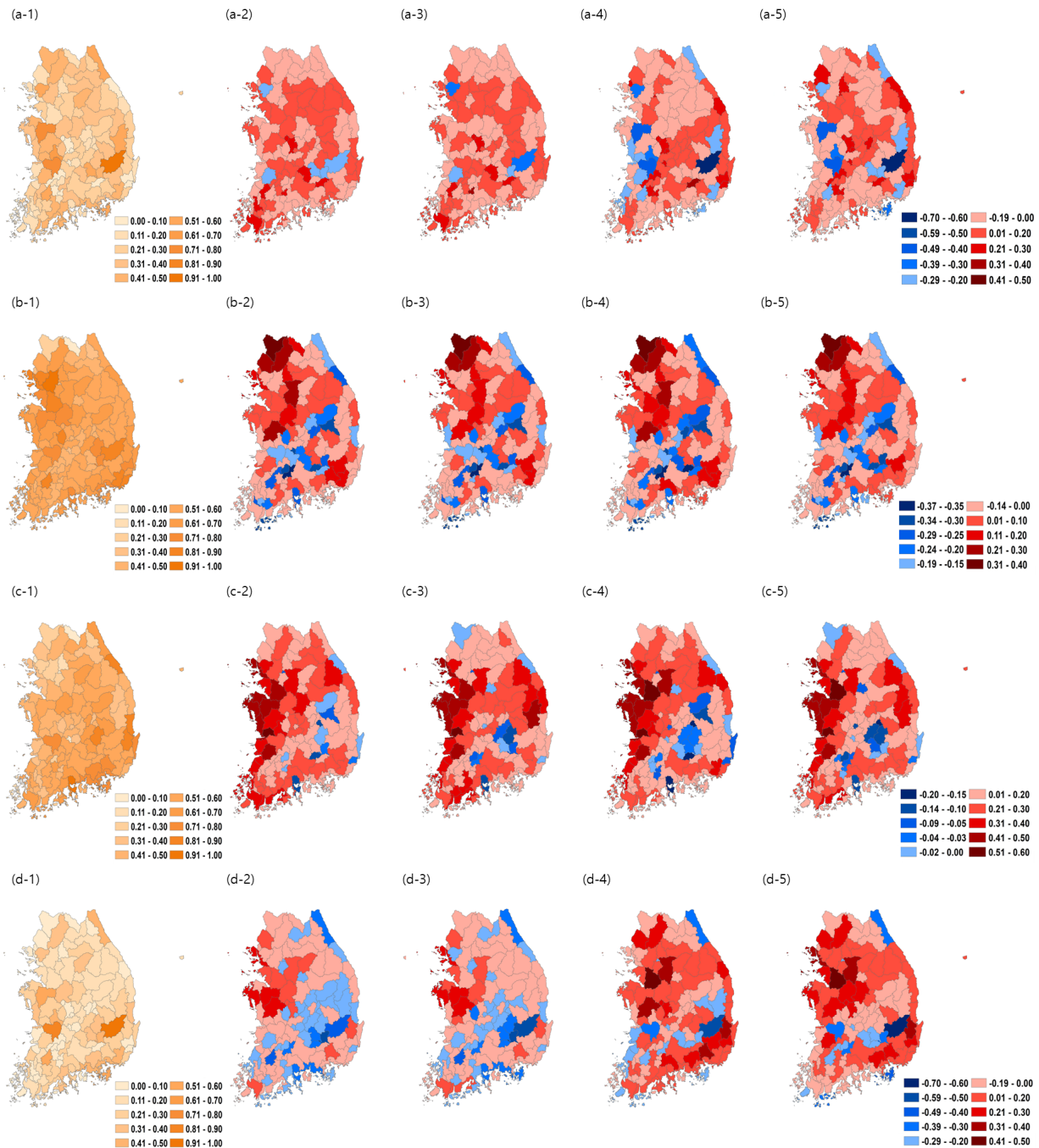


Fig. 3. (a) Drought hazard, (b) exposure, (c) vulnerability and (d) risk: (1) Hist, (2) difference of the between scenario (RCP2.6+SSP1) and Hist in the Near Future and (3) difference of the between scenario (RCP8.5+SSP3) and Hist in the Near Future. (4) and (5) are the same with (2) and (3) except for the far future

용수 수요가 크고 인구와 인구 밀도 또한 크게 증가하여 다른 유역에 비해 가뭄 위험도가 크게 증가한다. 반면 양양 남대천 유역은 가뭄 위험도가 감소하는 양상을 보인다. 이 유역은 낮은 GRDP와 자연면적 증가로 가뭄 취약성이 여전히 증가하지만 다른 지역에 비해 가뭄 취약성 증가율이 낮고 인구와 인구

밀도 감소로 가뭄 노출도가 큰 폭으로 완화되고 유역 내에서 가장 높았던 가뭄 위해성이 큰 폭으로 완화되어 가뭄 위험도가 크게 감소하는 것을 알 수 있다.

낙동강 유역의 경우 낙동강 하류가 위치한 경남 지역과 낙동강 상류 인근 경북 지역으로 나누어 볼 수 있다. 낙동강 하류

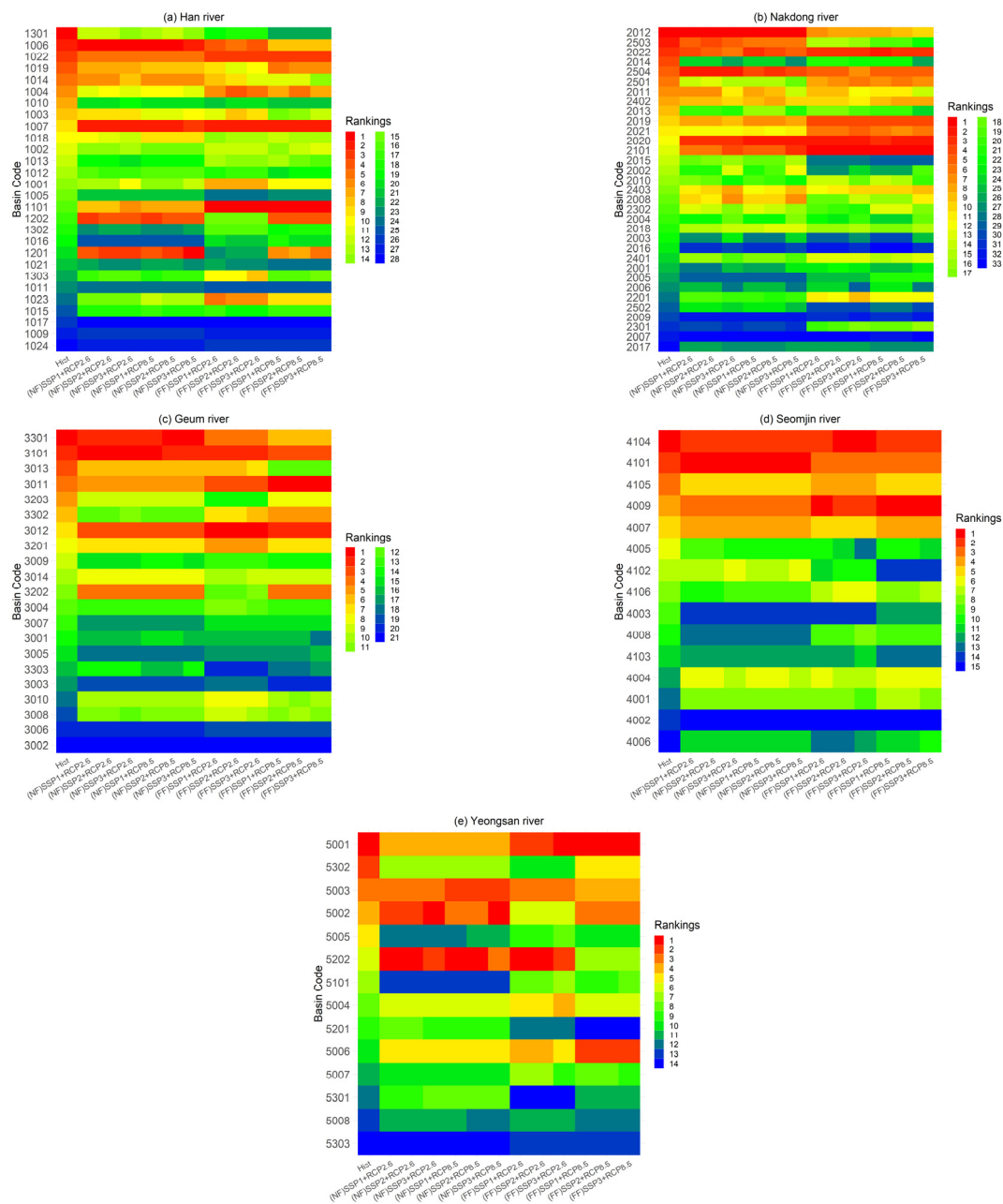


Fig. 4. Variation in risk rankings for subbasins in South Korea

지역은 미래 시나리오에 따라 가뭄 위험성이 증가하고 인구와 인구 밀도가 증가해 가뭄 노출도가 증가하는 반면 낙동강 상류 지역은 가뭄 위험성과 노출도가 감소한다. 하지만 경북과 경남 지역 전체적으로 과거부터 농·공업화 밀집 지역이 많아 용수 수요량이 매우 높은 지역이다. 또한, 부산과 대구, 울산광역시 위치하여 GRDP가 높고 상수도 보급률이 높지만, 상수도 누수율이 높아 비교적 가뭄 취약성이 높은 편이다. 이에 비교적 낙동강 상류 지역은 가뭄 위험도가 낮아지며, 낙동강

하류 지역은 가뭄 위험도가 높아진다. 특히 포항, 김해 인근에 위치한 유역(낙동밀양, 낙동하구연, 형산강)은 과거부터 높은 인구와 인구 밀도를 보이고 미래 시나리오에 따라 소폭 상승하고 높은 농·공업용수 수요량과 과거 낮은 가뭄 위험성에 비해 미래에 증가하여 가뭄 위험도가 증가한다. 반면 금호강 유역은 전체 유역에서도 가뭄 위험도가 높은 유역으로 대구광역시 위치하여 대도시 유역이다. 시나리오에 따라 GRDP가 증가하지만, 농·공업용수의 수요가 크고 높은 상수도 보급률

에 반해 상수도 누수율이 높아 가뭄 취약성이 미래에도 유사하다. 시나리오에 따라 인구와 인구 밀도의 소폭 감소로 가뭄 노출도가 소폭 감소하지만, 광역시가 위치해 낙동강 유역 내에서는 상당히 높다. 하지만 미래에 가뭄 위해성이 큰 폭으로 감소하여 가뭄 위험도가 감소한다.

금강 유역의 경우 가뭄 위해성이 근 미래에는 증가하였다가 먼 미래에는 대체로 완화되지만, 대청호 인근 유역은 먼 미래에도 계속 심해지는 특징을 보이며, GRDP가 한강 유역처럼 높고, 상수도 보급률도 매우 우수한 반면, 누수율이 높고 대도시(세종, 대전)와 주변 농·공업화 밀집 지역이 많아, 미래 시나리오에 따라 큰 폭으로 증가하는 시가화율과 큰 농·공업용수 수요량으로 가뭄 취약성이 크게 증가하는 특징이 있다. 가뭄 노출도의 경우는 과거 대비 변화 폭이 비교적 작지만, 여전히 커 미래에 가뭄 위험도가 큰 것으로 전망된다. 특히 충청도에 중요한 수원지인 대청호 인근 유역(대청댐, 대청댐 하류)은 가뭄 위해성이 과거에는 매우 낮았지만, 시나리오에 따라 미래에 순위가 큰 폭으로 변화하며 심해지는 양상을 보인다. 또한, 세종시와 공주시 인근 금강 유역(미호천, 금강공주)은 과거 대비 인구와 인구 밀도가 크게 증가하여 가뭄 노출도 순위가 큰 폭으로 변화하며 심해지는 양상을 보인다. 대청호 인근 유역을 포함한 이 유역들은 대체로 가뭄 취약성 순위가 금강 유역 내에서 비교적 과거 대비 증가 폭이 조금 낮아 소폭 순위가 감소하거나 유사한 것으로 보이지만 상수도 누수율, 시가화율, 농·공업용수 수요량과 같은 가뭄 취약성 지표들의 변화에 따라 여전히 가뭄 취약성이 크기 때문에 미래에 가뭄 위험도가 크다. 반면 과거에 가장 큰 위험도를 보인 만경강 유역은 가뭄 위험도가 완화되어 감소한다. GRDP의 감소와 시가화율의 증가로 여전히 높은 가뭄 취약성과 과거부터 높은 가뭄 위해성을 보이지만 먼 미래에는 가뭄 위해성이 크게 감소하고 시나리오에 따라 인구와 인구 밀도가 크게 감소하여 가뭄 노출도 순위가 낮아져 가뭄 위험도가 낮아진다.

섬진강과 영산강 유역은 대체로 과거와 유사한 양상을 보이며 가뭄 위험도 순위가 큰 폭으로 변화하는 유역이 많지 않은 특징이 있다. 두 유역 모두 가뭄 위해성이 과거 대비 소폭 상승하며, 인구와 인구 밀도가 낮아 가뭄 노출도가 낮아지는 지역이 많지만, 농촌과 섬 지역이 많아 높은 농·공업용수 수요량과 낮은 GRDP로 가뭄 취약도가 높아져 가뭄 위험도가 증가하는 양상을 보인다.

섬진강 유역의 경우 섬진강 댐이 위치한 섬진강 상류부와 섬진강 하류부로 나누어 다른 양상을 보인다. 섬진강 하류부는 섬진강 유역 내에서 비교적 높은 가뭄 위해성 순위를 보이지만 과거 대비 낮은 폭으로 가뭄 위해성이 감소한다. 하지만 인구와 인구 밀도가 큰 폭으로 증가해 가뭄 노출도 순위가 큰 폭으로 높아지고 과거부터 농·공업용수 수요량이 많고 낮은

GRDP로 가뭄 취약성이 크기 때문에 가뭄 위험도가 커진다. 섬진강 상류부는 섬진강 유역 내에 타 유역에 비해 인구와 인구 밀도 감소 폭이 작아 가뭄 노출도 순위가 증가하는 것으로 보이지만 미래에 가뭄 노출도가 감소한다. 하지만 자연면적 증가와 먼 미래에 큰 폭으로 상승하는 가뭄 위해성으로 미래 가뭄 위험도가 심해진다. 섬진강 댐을 기준으로 하류에 위치한 유역(섬진강댐 하류, 오수천)은 미래에 비교적 가뭄 위해성이 심화되지만 과거부터 지속해서 낮은 가뭄 노출도와 섬진강 유역 내에서 낮은 농업용수 수요량과 상수도 누수율로 가뭄 취약성이 낮아 가뭄 위험도가 낮다.

영산강 유역은 가뭄 위험도가 광주광역시 서쪽 유역(와탄천, 고막원천)은 비교적 완화되지만, 영산강 지류(영산강 상류, 하류)가 심해진다. 광주광역시 서쪽 유역은 가뭄 노출도가 영산강 유역 내에서 가장 낮거나 높았지만, 미래에 심해지는 양상을 보이며, 와탄천 유역은 농업용수의 수요로 취약성 또한 크게 증가하지만, 고막원천 유역은 시가화율이 낮아 가뭄 취약성이 큰 폭으로 감소하고 두 유역 모두 가뭄 위해성이 큰 폭으로 완화되어 가뭄 위험도가 감소하는 것으로 전망된다. 영산강 지류의 경우 과거에는 영산강 상류는 높은 가뭄 위험도를 보이고 하류는 비교적 낮은 가뭄 위험도를 보이지만 가뭄 위해성이 심해져 상·하류 모두 가뭄 위험도가 증가하는 것으로 전망된다.

3.2.2 가뭄 위험도 요소별 기여도 분석

근 미래에서 먼 미래로 가뭄 위험도가 변화할 때의 각 평가 요소별 기여도를 정량화하기 위해 다중 선형 회귀 방법을 이용하여 시나리오에 따른 가뭄 위험도의 평가 요소별 기여도(가뭄 위해성, 가뭄 노출도, 가뭄 취약성)를 정량화하였다. 본 연구에서 사용한 6가지 시나리오의 기여도 결과는 모두 유사한 결과를 보여주며, 대체로 가뭄 위해성의 기여도가 가장 높고, 유역에 따라 가뭄 취약성과 가뭄 노출도의 기여도 순서가 다르다. 한강과 금강 유역의 경우 취약성이 노출도보다 큰 기여도를 보이고 낙동강, 섬진강 그리고 영산강의 경우 노출도가 취약성보다 더 큰 기여도를 보였다.

Fig. 5은 RCP8.5+SSP3 시나리오에서의 가뭄 위험도에 대한 각 평가 요소인 가뭄 위해성, 가뭄 취약성 그리고 가뭄 노출도의 기여도 분석 결과이며, 각각의 기여도 비율은 52.3%, 24% 그리고 21.8%였다. 모든 유역에서 가뭄 위해성이 50% 이상을 차지하면서 가뭄 위험도에 대해 가장 큰 기여도를 보였지만, 섬진강 유역에서는 다른 유역에 비해 가뭄 위험도의 기여도가 46.3%로 비교적 낮았고, 가뭄 노출도와 취약성의 기여도가 각각 28.9%와 24.8%로 비교적 높았다. 이는 미래 시나리오에 따라 섬진강 유역 상류에서 가뭄 위해성이 높음에도

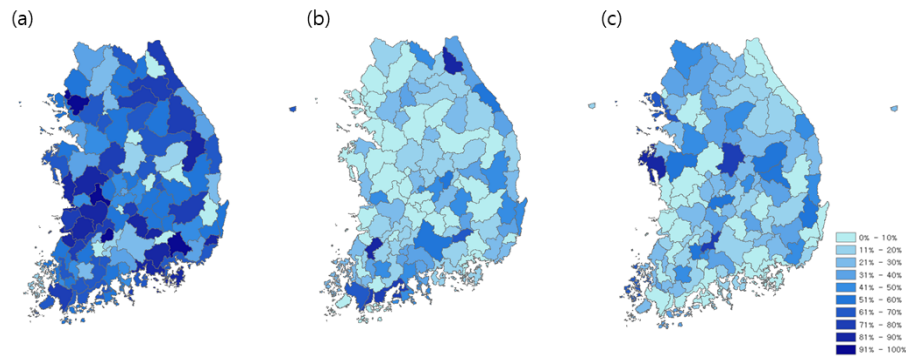


Fig. 5. Contribution of each drought risk indicator during all periods in RCP8.5+SSP3 scenarios: (a) Drought hazard, (b) drought exposure, (c) drought vulnerability

불구하고 섬진강 유역 하류부에서 가뭄 위해성이 비교적 완화되기 때문이다. 또한, 가뭄 노출도가 다른 유역에 비해 높은 기여도를 보이는 섬진강 유역은 인구와 인구 밀도가 전반적으로 크게 감소해 가뭄 노출도가 크게 감소하기 때문이다. 하지만 섬진강 유역은 낮아지는 가뭄 노출도의 높은 기여도에도 불구하고 가뭄 위험도가 미래에 비교적 낮은 폭으로 증가한다. 이는 매우 낮은 GRDP와 큰 농·공업용수 수요로 인해 가뭄 취약성이 다른 유역에 비해 가장 큰 폭으로 커지고 일부 지역 가뭄 위해성이 증가하기 때문이다.

한강 유역의 경우 가뭄 위험도의 평가 요소별 기여도가 가뭄 위해성이 50.3%, 가뭄 노출도가 19.3% 그리고 가뭄 취약성이 26.3%로 타 유역에 비해 비교적 높은 취약성 기여도를 보여준다. 이는 높은 GRDP에도 불구하고 높은 시가화 비율과 큰 농·공업용수 수요로 인해 가뭄 취약성이 커짐에 따라 그 영향이 기여도에 영향을 미쳤다는 것을 알 수 있다. 반면 가뭄 노출도는 19.3%로 비교적 다른 유역에 비해 낮은 기여도를 가지는 것을 보여준다. 한강 유역은 과거부터 미래까지 지속해서 높은 인구와 인구 밀도를 가져 가뭄 노출도가 높지만, 미래에 변화폭이 비교적 낮다는 것을 알 수 있다.

3.3 가뭄 위험도 통합 분석

IPCC의 재난 위험도 분석 프레임워크와 기상 및 사회·경제 시나리오에 따라 3가지 가뭄 위험도 평가 요소를 정량화하고 이에 유역별 미래 가뭄 위험도를 살펴보았다. 5개 유역의 가뭄 위험도를 살펴보았을 때 과거 대비 전체적으로 심화되는 양상을 보이지만 특히 한강, 낙동강, 금강 유역은 크게 심화된다. 반면 영산강과 섬진강 유역은 타 유역에 비해 대체로 위험도 증가 폭이 크지 않았다. 이에 본 연구에서는 유역별로 계산된 가뭄 위험도와 각 평가 요소에 대해 통합 분석하였다(Tables 3 and 4).

특징적으로 모든 유역에서 높은 농·공업용수 수요로 인해

가뭄 취약성이 증가해 가뭄 위험도가 증가하며, 인근 댐 및 저수지의 수량 관리와 유역별 GRDP를 고려하여 안정적인 용수 확보가 필요할 것으로 전망된다. 그리고 유역에 포함된 지역적 특성에 따라 가뭄 위험도 증가 요인이 다르다. 한강 유역의 경우 경기 서·남부 지역(한강서해, 시화호 유역 등)을 비롯하여 전체적으로 과거 대비 미래에 가뭄 위험도가 크게 증가한다. 이는 한강 유역에는 수도권이 위치한 지역으로 대체로 다른 유역에 비해 GRDP가 매우 높아 가뭄 대응에 유연할 것으로 전망되지만 과거를 비롯해 미래에도 지속적인 인구와 인구 밀도 증가로 인해 가뭄에 노출된 인구가 많아 해결을 위해 안정적인 상수도원 확보가 필요할 것이다. 금강 유역도 과거 대비 미래에 가뭄 위험도가 크게 증가하며, 한강 유역과 유사하게 미래에 인구와 인구 밀도가 크게 증가할 것으로 전망되며 해결을 위해 안정적인 상수도원 확보가 필요할 것이다. 하지만 금강 유역의 경우 대청호로부터 상수도 및 다목적 용수를 취수하고 있으며, 대청댐을 통해 안정적인 수량 관리를 하고 있다. 하지만 미래에 대청댐 유역 부근의 가뭄 위해성이 큰 폭으로 상승할 것으로 전망되며, 이를 기반으로 수량 관리가 필요하다.

한편, 섬진강과 영산강 유역은 전반적으로 과거 대비 미래에 큰 폭으로 가뭄 위험도가 증가하지 않지만, 유역에 따라 편차가 크다. 특히 이 두 유역은 농촌 및 섬 지역이 많아 다른 유역에 비해 GRDP가 전반적으로 매우 낮으며, 이에 지자체별로 가뭄 대응에 필요한 예산을 증액할 필요가 있다. 이 유역은 농촌 및 섬 지역이 많은데도 불구하고 상수도 누수율이 높아 가뭄에 노출된 인구가 적는데도 불구하고 가뭄 취약성이 높아 가뭄 위험도가 높게 전망된다. 이를 개선하기 위해 상수도 누수율을 개선하면 보다 가뭄 위험도를 보다 낮출 수 있을 것이다. 또한, 섬진강 유역의 경우, 금강 유역과 유사하게 전라남·북도 지역의 용수 공급을 하는 섬진강댐 인근 유역의 가뭄 위해성이 큰 폭으로 상승할 것으로 전망되기 때문에 수량 관리가 필요하다.

Table 3. Causes of drought risk by basin and its analysis

Basin	Projected Drought Risk Change	Cause	Analysis
Han River	Increase	1. Population (+) 2. Population density (+) 3. Urbanization rate (+) 4. Agricultural/industrial water demand (+)	- Secure water supply against soaring population and urbanization rate. - High GRDP makes the basin favorable to drought management - Reserve water for the use of highly dense agricultural/industrial regions
Nakdong River	Increase	1. Agricultural/industrial water demand (+) 2. Water supply leakage (+)	- Reserve water for the agricultural/industrial use - Improve water supply leakage
Geum River	Increase	1. Runoff discharge (-) 2. Population (+) 3. Urbanization rate (+) 4. Water supply leakage (+) 5. Agricultural/industrial water demand (+)	- Manage water quantity against the rising drought risk Daechong dam - Improve water supply leakage - Secure water for the rising population and the use of highly dense agricultural/industrial regions
Seomjin River	Slight increase	1. GRDP (-) 2. Runoff discharge (-) 3. Agricultural/industrial water demand (+)	- Invest local budget against low GRDP leading to drought risk vulnerability - Manage water quantity against soaring drought risk of the upstream where the Seomjin dam is located - Secure water for agricultural/industrial use (downstream of the Seomjin River)
Yeongsan River	Slight increase	1. GRDP (-) 2. Agricultural water demand (+) 3. Water supply leakage (+)	- Invest local budget against low GRDP leading to drought risk vulnerability - Reserve water for agricultural use - Improve water supply leakage

Table 4. Analysis against the change in drought risk for each basin

Basin	Projected Drought Risk Change	Hazard	Exposure	Vulnerability		
		Dam water quantity management	Additional securement of water sources	Agricultural/industrial water supply (Reservoirs)	GRDP	Improving water supply leakage
Han River	○		●	●		
Nakdong River	○			●		●
Geum River	○	●	●	●		●
Seomjin River	△	●		●	●	
Yeongsan River	△			●	●	●

4. 결 론

본 연구에서는 기존에 개발된 물리적 가뭄지수 SRI와 사회경제적 요소들을 포함하여 IPCC가 권고하고 UNISDR이 채택한 가뭄 위험도 평가체계에 따라 한반도의 가뭄 위험도를 중권역 단위로 정량화하였다. 그리고 2종의 기후 시나리오(RCP 2.6, RCP 8.5)와 3종의 사회·경제 시나리오(SSP1, SSP2, SSP3)를 조합한 6개의 미래 시나리오를 각각 근 미래(2030-2050년)와 먼 미래(2080-2099년)에 적용하여 미래의 가뭄 위험도를 살펴보았다. RCP와 SSP 시나리오 조합에 따라 변화할 수 있는 유출량을 물리 기반 지표수문해석모형(WRF-Hydro)을 기반으로 모의하는 등 시나리오에 따른 가뭄 위험도 관련 주요 지표를 기존 연구 및 본 연구의 결과를 활용하여 구축하고

이를 활용하여 가뭄 위험도를 산정하였다. 그 후 산정된 가뭄 위험도를 각 평가 요소인 가뭄 위해성, 가뭄 노출도 그리고 가뭄 취약성을 바탕으로 순위 분석과 기여도 분석을 수행하였고, 이를 기반으로 유역별 시나리오에 따른 미래 가뭄 위험도 전망을 살펴보고 통합 분석을 수행하였다.

- 1) 시나리오에 따른 가뭄 위험도는 시간에 따라 먼 미래에 큰 폭으로 상승하였다(Fig. 3(d)). 특히 한강, 낙동강, 금강 유역은 가뭄 위험도가 큰 폭으로 상승하고, 섬진강과 영산강은 비교적 낮은 폭으로 상승하였다. 또한, 과거 가뭄 위험도에 대비하여 살펴보았을 때 한강 서해, 충청(대청호), 경남(포항, 낙동강하류부) 지역이 가뭄 위험도가 특히 큰 폭으로 상승하였다.
- 2) 유역별 가뭄 위험도 평가 요소별 순위 분석과 기여도 분석

결과 우리나라 전 유역에서 큰 농·공업용수 수요량을 가져 가뭄이 취약함을 알 수 있었고 유역에 따라 미래에 가뭄 위험도를 상승시키는 평가 요소와 지표가 다름을 확인하였다.

- 3) 유역별 가뭄 위험도의 평가 요소들의 기여도와 순위 변화에 따라 가뭄 위험도 상승 요인을 파악하고 이에 맞는 저감 요소를 제시하였다(Table 3). 금강 유역은 대청호 인근 유역에 가뭄 위해성이 크게 증가하고, 인구 증가로 인해 가뭄 노출도가 크게 증가한다. 대청호는 금강 유역에 위치한 여러 대도시(세종, 대전)의 상수도 및 다목적 용수를 대청댐을 통한 안정적 수량 관리를 통해 공급하고 있다. 하지만 미래 유출량 감소와 높은 인구 증가에 대비한 대청댐의 수량 관리가 필요할 것이다. 또한, 이 유역은 상수도 누수율이 굉장히 높은 지역으로 증가하는 인구와 함께 취약성이 더 커질 것으로 예상하며 상수도 누수율을 개선할 필요가 있다.

가뭄 위험도가 높다고 가뭄 피해가 실제 크게 발생하거나 가뭄으로 인한 피해를 예측하는 것은 상당히 어려운 점이다. 하지만 본 연구는 기상인자를 포함하여 물리 기반 지표수문해석모형을 통해 산출된 수문 인자와 기상 및 사회·경제 시나리오를 통해 거시적인 시공간적 변화에 초점을 맞추는 지표기반 연구로 지표들을 활용하여 가뭄을 대비 측면에서 살펴볼 수 있는 장점이 있다. 또한, 본 연구 결과를 기반으로 의사결정 기관 또는 이해관계자들은 가뭄 위험도 관리와 대비를 위한 기초 자료로 활용할 수 있을 것이다. 하지만 지표기반의 연구이기 때문에, 위험에 대한 노출도는 지역 내의 인구, 자산, 기반시설의 존재 여부 등을 반영하지 못한 한계가 있다. 즉, 가뭄 발생으로 인한 잠재적 손실로 인해 가뭄에 노출된 인구에만 집중한다. 또한, 추후 AR6와 같은 최신 기후 전망보고서의 미래 사회·경제 시나리오를 고려하여 다양한 가뭄 위험 평가를 비교하는 연구를 진행하면 가뭄 위험 평가에 있어 신뢰도를 향상할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국제수문개발계획(IHP) 9단계와 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(2020R1A2C2007670)의 지원에 의해 수행되었습니다.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Ahmadalipour, A., Moradkhani, H., and Demirel, M.C. (2017). "A comparative assessment of projected meteorological and hydrological droughts: Elucidating the role of temperature." *Journal of Hydrology*, Vol. 553, pp. 785-797.
- Carrao, H., Naumann, G., and Barbosa, P. (2016). "Mapping global patterns of drought risk: An empirical framework based on sub-national estimates of hazard, exposure and vulnerability." *Global Environmental Change*, Vol. 39, pp. 108-124.
- Chae, Y.R., Lee, J.H., and Chris, H. (2017). *Economic analysis of climate change damage in Korea using SSP-RCP scenario matrix*. Korea Environment Institute, pp. 56-72.
- Cho, K.W., and Kim, Y.J. (2022). "Improving streamflow prediction in the WRF-Hydro model with LSTM networks." *Journal of Hydrology*, Vol. 605, 127297.
- Dai, A. (2011). "Drought under global warming: A review." *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, Vol. 2, No. 1, pp. 45-65.
- Gochis, D.J., Barlage, M., Dugger, A., FitzGerald, A., Karsten, L., McAllister, M., McCreight, J., Mills, J., RafieeiNasab, A., Read, L., Sampson, K., Yates, D., and Yu, W. (2018). National Center for Atmospheric Research, accessed 13 April 2018, <https://ral.ucar.edu/sites/default/files/public/WRFHydroV5TechnicalDescription_update512019_0.pdf>.
- Hwang, C.L., and Yoon, K.S. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Im, E.S., Thanh, N.X., Kim, Y.H., and Ahn, J.B. (2019). "2018 summer extreme temperatures in South Korea and their intensification under 3°C global warming." *Environmental Research Letters*, Vol. 14, No. 9, 094020.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014). *Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II, and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2018). *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*, Geneva, Switzerland.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021). *Climate change 2021: The physical science basis, IPCC contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge United Kingdom and New York, NY, U.S.
- Jaranilla-Sanchez, P.A., Wang, L., and Koike, T. (2011). "Modeling the hydrologic responses of the Pampanga River basin, Philippines: A quantitative approach for identifying droughts." *Water Resources Research*, Vol. 47, W03514.
- Kim, H.S., Park, J.Y., Yoo, J.Y., and Kim, T.W. (2015a). "Assessment of drought hazard, vulnerability, and risk: A case study for administrative districts in South Korea." *Journal of Hydro-environment Research*, Vol. 9, No. 1, pp. 28-35.

- Kim, J.S. (2015). *Alleviating the current drought condition in Gangwon region, issues and perspectives*. No. 963, The National Assembly Research Service (NARS).
- Kim, J.S., and Kim K.M. (2018). *Alleviating the current drought management condition*. Vol. 3, National Assembly Research Service.
- Kim, M.J., Gang, H.Y., O, T.S., and Park, J.S. (2017). "Drought occurrence and outlook in 2017." *Water for Future*, KWRA, Vol. 50, No. 9, pp. 56-61.
- Kim, Y.J., and Chung, E.S. (2013). "Fuzzy VIKOR approach for assessing the vulnerability of the water supply to climate change and variability in South Korea." *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 37, pp. 9419-9430.
- Kim, Y.J., and Chung, E.S. (2014). "An index-based robust decision making framework for watershed management in a changing climate." *Science of The Total Environment*, Vol. 473-474, pp. 88-102.
- Kim, Y.J., Chung, E.S., and Jun, S.M. (2015b). "Iterative framework for robust reclaimed wastewater allocation in a changing environment using multi-criteria decision making." *Water Resources Management*, Vol. 29, pp. 295-311.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2017). *Korean Peninsula climate change outlook report*.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2020). *Climate Change Analysis Report for 109 years in South Korea*.
- K-water (2002). *Report of drought monitoring system of measure establishment study*.
- Lee, J.H., Kim, Y.J., and Chae, Y.R. (2020). "Projecting future hydrological and ecological droughts with the climate and land use scenarios over the Korean peninsula." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 53, No. 6, pp. 427-436.
- Lee, J.H., Kim, Y.J., and Wang, D. (2022). "Assessing the characteristics of recent drought events in South Korea using WRF-Hydro." *Journal of Hydrology*, Vol. 607, 127459.
- 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." *Journal of Civil and Environmental Engineering*, Vol. 41, No. 5, pp. 477-484.
- Lee, S.E. (2015). *On the development of the methodological framework for drought risk assessment*. Korea Research Institute for Human Settlements.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. (1993). "The relationship of drought frequency and duration to time scales." *In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, AMS, Anaheim, CA, U.S., Vol. 17, No. 22. pp. 179-183.
- Ministry of Environment (ME) (2020). *Korean climate change assessment report 2020*. pp. 30-68.
- Naabil, E., Lamptey, B.L., Arnault, J., Olufayo, A., and Kunstmann, H. (2017). "Water resources management using the WRF-Hydro modelling system: Case-study of the Tono dam in West Africa." *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 12, pp. 196-209.
- O'Neill, B.C., Krigler, E., Riahi, K., Ebi, K.L., Hallegatte, S., Carter, T.R., Mathur, R., and van Vuuren, D.P. (2014). "A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways." *Climatic Change*, Vol. 122, pp. 387-400.
- Pulwarty, R.S., and Sivakumar, M.V.K. (2014). "Information systems in a changing climate: Early warnings and drought risk management." *Weather and Climate Extremes*, Vol. 3, pp. 14-21.
- Shahid, S., and Behrawan, H. (2008). "Drought risk assessment in the western part of Bangladesh." *Natural Hazards*, Vol. 46, No. 3, pp. 391-413.
- Sheffield, J., and Wood, E.F. (2008). "Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulation." *Climate Dynamics*, Vol. 31, pp. 79-105.
- Sherwood, S., and Fu, Q. (2014). "A drier future?" *Science*, Vol. 343, No. 6172, pp. 737-739.
- Shukla, S., and Wood, A.W. (2008). "Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought." *Geophysical Research Letters*, Vol. 35, L02405.
- Sim, O.B., Kim, K., Han, W.S., and Koo, H.S. (2011). *Research for water management policy preparing with climate change-Focus on drought vulnerability and policy plan of territory*. Korea Research Institute for Human Settlements.
- Sohn, K.H., Bae, D.H., and Ahn, J.H. (2014). "Projection and analysis of drought according to future climate and hydrological information in Korea." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 1, pp. 71-82.
- Song, Y.H., Chung, E.S., and Sung, J.H. (2019). "Selection framework of representative general circulation models using the selected best bias correction method." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, No. 5, pp. 337-347.
- Taebaek-si (2009). *A drought white paper*.
- Um, M.J., Kim, Y.J., and Park, D.R. (2018). "Evaluation and modification of the Drought Severity Index (DSI) in East Asia." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 209, pp. 66-76.
- Um, M.J., Kim, Y.J., Park, D.R., and Kim, J.B. (2017). "Effects of different reference periods on drought index estimations for 1901-2014." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 21, No. 10, pp. 4989-5007.
- United Nations Development Programme (UNDP) (2005). *Adaptation policy frameworks for climate change: Developing strategies, policies and measures*, Cambridge University. Press, Cambridge.
- United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR) (2009). *Drought risk reduction framework and practices: Contributing to the implementation of the hyogo framework for action*. Geneva, Switzerland.
- Vincente-Serrano, S.M., Begueria, S., and López-Moreno, J.I. (2010). "A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index." *Journal of Climate*, Vol. 23, No. 7, pp. 1696-1718.
- Wilhite, D.A. (2000). "Drought as a natural hazard: Concepts and definitions." *Drought: A global assessment*, Routledge Publishers, UK.
- Wilhite, D.A., and Pulwarty, R.S. (2005). *Drought and water crises: Science, technology, and management issues (1st ed.)*. CRC Press, FL, U.S., pp. 389-398. doi: 10.1201/9781420028386