

기후 및 사회·경제 변화를 고려한 한강 유역의 물이용 취약성 평가

박혜선* · 김혜진** · 채여라*** · 김연주****

Park, Hyesun* , Kim, Heey Jin** , Chae, Yeora*** , Kim, Yeonjoo****

Assessment of Water Use Vulnerability Considering Climate and Socioeconomic Changes in Han River Watershed

ABSTRACT

Assessment of vulnerability of water use to climate change include a variety of climate change scenarios. However, in most future vulnerability studies, only the climate change scenarios are used and not the future scenarios of social and economic indicators. Therefore, in this study, we applied the Representative Concentration Pathway (RCP) climate change scenario and Shared Socioeconomic reference Pathway (SSP) developed by IPCC to reflect the future. We selected indicators for estimating the vulnerability of water use, and indices were integrated with a multi-criteria decision making approach - Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). The indicator data utilized national statistics and reports, social and economic scenarios, and simulated results from the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model which reflects climate change scenario. Finally, we derived the rankings of water use vulnerability for the short-term future (2020) and mid-term future (2050) within the Han River watershed. Generally, considering climate change alone and considering climate change plus social and economic changes showed a similar spatial distribution. In the future scenarios, the watershed rankings were similar, but showed differences with SSP scenario in some watersheds. Therefore, considering social and economic changes is expected to contribute to more effective responses to climate change.

Key words : Water use vulnerability, Climate change, Socioeconomic change, TOPSIS

초 록

수자원 분야에서 기후변화 취약성 평가 연구는 미래를 반영하는 기후변화 시나리오를 다양한 방법으로 적용하고 있다. 하지만 대부분의 미래 취약성 평가 연구에서 미래 사회 및 경제 변화는 반영되지 않고 있다. 이에 본 연구에서는 통합적인 미래 시대상상을 반영하기 위하여 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)에서 개발한 Representative Concentration Pathway (RCP) 기후 변화 시나리오와 함께 공동 사회·경제 경로 시나리오(Shared Socioeconomic reference Pathway, SSP)를 적용하고자 하였다. 취약성 평가는 현재 상황뿐 아니라 미래 시나리오를 반영하기에 적절한 지표를 선정하고 다기준 의사결정기법인 TOPSIS (Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution)를 활용하여 각 지표를 통합하는 방법으로 진행하였다. 지표 자료는 국가 통계 및 보고서, 기후변화 시나리오가 반영된 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형의 모의 결과, 사회·경제 시나리오를 활용하였으며, 최종적으로 주요 수계인 한강 유역의 단기 미래(2020)와 중기 미래(2050)에 대한 중권역별 물이용 취약성 순위를 도출하였다. 전반적으로 기후변화만 적용한 결과와 사회·경제 변화를 함께 적용한 결과는 유사한 공간분포를 보였으나, SSP 시나리오에 따라 일부 유역에서 차이를 보였다. 미래 시나리오 적용 시 유역의 순위 변동성이 유사하게 나타났으나 일부에서는 SSP 시나리오 적용 유무에 따른 차이를 확인할 수 있었다. 본 연구에서 기후변화 취약성 분석 시 사회·경제 시나리오 활용가능성을 확인하였고, 이에 사회·경제 변화를 고려하는 것이 보다 효과적인 기후변화 대응에 도움이 될 것으로 판단된다.

검색어 : 물이용 취약성, 기후변화, 사회경제변화, TOPSIS

* 정희원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 석사후연구원 (Yonsei University · hs.park@yonsei.ac.kr)

** 연세대학교 사회환경시스템공학부 석사과정 (Yonsei University · kimhjin33@yonsei.ac.kr)

*** 한국환경정책·평가연구원 기후융합연구실 연구위원 (Korea Environment Institute · yrchae@kei.re.kr)

**** 정희원 · 교신저자 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 조교수 (Corresponding Author · Yonsei University · yeonjoo.kim@yonsei.ac.kr)

Received September 6, 2017/ revised September 12, 2017/ accepted September 19, 2017

1. 서론

파리 기후변화협약(Paris Agreement)은 2020년 만료되는 교토 의정서를 대체하고, 2020년 이후 기후변화 대응을 위한 국제협약이다. 최근 미국의 탈퇴선언으로 기후변화에 대한 관심이 더욱 증가되고 있다. 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)는 지난 10년간(2001~2010) 홍수와 가뭄 등의 극단적 기후는 유례없는 현상이라고 발표하였다. 점차 가속화되는 기온상승으로 인하여 전 세계적으로 지속적인 수자원재해가 발생하고 있으며, 세계은행(World Bank)은 우리나라를 비롯한 동아시아와 중앙아프리카 등에서는 물 부족으로 인한 분쟁 가능성을 예측하였다. 수자원 분야에서 기후변화 영향 연구는 홍수, 가뭄 및 수질 분야에 집중되어 있으나 효과적으로 대응하기 위해서는 지속가능한 수자원 관리의 중요성이 증대되고 있다. 또한 국가별 혹은 지역별로 기후변화를 받아들이는 정도가 달라 취약성 및 적응능력 등을 파악하여 정량적으로 평가할 필요가 있다(Yoo and Kim, 2008; Kim et al., 2011; WMO, 2013; World Bank, 2016).

수자원 취약성을 평가하기 위하여 다양한 지표 및 지수가 개발 및 적용되었다. Chung et al. (2010)은 지표를 활용하여 수자원 취약성을 평가하는 방법을 제시하였으며, 지역의 특성을 반영하기 위해서는 유역의 규모를 세분화하여 평가하는 것이 적절하다고 하였다. Lee et al. (2013)은 물이용, 홍수 및 하천환경 수자원 정책 부문에 대한 통합수자원평가지수를 개발하였으며, 지역별 지수를 통하여 정책 사업의 우선순위 선정에 활용이 가능하다고 제시하였다. Park et al. (2016)은 주관적 및 객관적 가중치 적용 방법에 따른 한강 유역의 물이용 취약성을 비교·분석하였다.

최근에는 기후와 토지이용의 변화를 모두 고려하는 연구들이 진행되고 있으며, Ahn et al. (2015)는 안성천 유역을 대상으로 Conversion of Land Use and its Effect at Small regional extent (CLUE-s) 모형을 활용한 토지이용 변화가 도시화 유역의 수문 순환에 미치는 영향을 분석하고 기후와 토지이용 변화를 함께 고려하여 유역모델링을 하는 것이 중요하다고 제시하였다. Betts et al. (2015)는 기후변화 시나리오(HadGEM2-ES)와 토지이용 변화를 활용하여 유역의 생태계와 하천 흐름에 대한 분석을 실시하였으며, 지역적 규모에서는 토지이용 변화에 따른 영향을 많이 받는 것으로 분석되었다. 또한 Han et al. (2015)는 기후변화와 Dyna-CLUE 모형을 활용한 토지이용 변화가 미래의 유출특성에 종합적인 영향을 미치는 것으로 확인하였다. Kim (2016)은 기후변화에 대한 합리적 대응을 위하여 공동 사회·경제 경로(Shared Socioeconomic reference Pathway, SSPs) 시나리오와 셀룰라 오토마타(Cellular Automata) 모델링을 활용하여 권역별 토지이용 변화를 예측하였으며, Liu et al. (2017)은 Taer 강 유역을 대상으

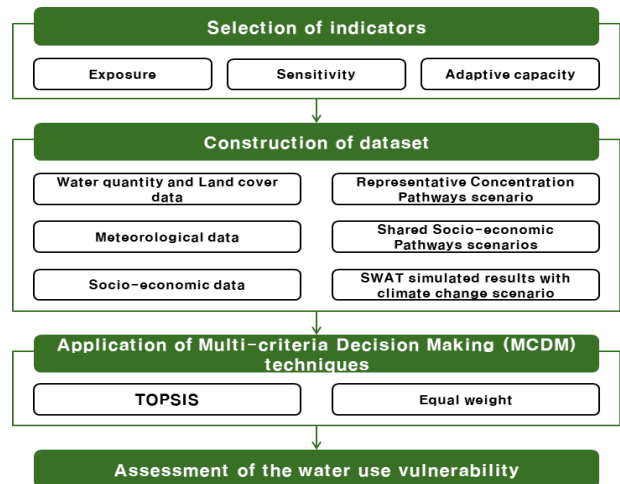


Fig. 1. Procedure for Assessment of Water use Vulnerability in this Study

로 한 기후변화 영향평가를 통하여 유역의 토지이용 변화에 따른 유출량의 변화로 농업용수 수요의 증가가 발생하여 물공급과 수요의 불균형을 심화시킨 것으로 분석하였다. 이와 같이 농업 지역의 경우 물이용 및 수질 부문에서 밀접한 관련이 있으며, 도시 지역의 경우 인구밀도와 용수 사용량, 시설 노후화 등의 이유로 물이용에 위험 요소가 있다. 또한 지역의 재정적 여유 정도에 따라 적응능력이 다르게 나타나 보다 효과적인 대응을 위해서는 지역의 특성을 반영할 수 있는 사회·경제 변화 시나리오를 적용할 필요성이 있다.

본 연구에서는 기후, 수문, 환경 및 토지이용 등을 통합적으로 반영하기 위하여 기후 및 사회·경제 변화를 고려한 물이용 취약성을 평가하고자 하였다. 취약성 정의에 따라 노출(Exposure), 민감도(Sensitivity), 적응능력(Adaptive capacity)에 따른 세부 지표를 선정한 선행연구(Park et al., 2016; Chung et al., 2017)를 기반으로 하였다. 다만 기존과 달리 SSPs 시나리오 적용가능성을 고려하여 기후, 수문, 사회·경제적 요소에 대한 지표를 선정하였다. 이를 바탕으로 다기준 의사결정기법인 TOPSIS (Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution)를 활용하여 취약성 순위를 도출하고자 하였다. 최종적으로 단기 미래(2020년)와 중기 미래(2050년) 시나리오 적용에 따른 한강 유역의 중권역별 물이용 취약성을 분석하고, 사회·경제 시나리오 적용가능성 및 각 시나리오의 상대적 중요성을 파악하고자 하였다(Fig. 1).

2. 연구 방법

2.1 대상유역

본 연구는 우리나라의 주요 수계인 한강 유역을 대상으로 하였으며, 일부 북한 지역을 포함하는 경우는 제외되었다. 한강 유역은

수도인 서울특별시와 대부분의 수도권권을 포함하고 있어 타 지역에 비하여 상대적으로 인구 및 산업의 밀집도가 높아 사회경제적 변화에 대한 영향이 크게 나타나는 유역이다. 한강 유역은 총 24개의 중권역으로 이루어져 있으나, 본 연구에서는 19개의 유효 중권역을 선정하여 분석하였다. 제외된 유역은 북한 지역을 50% 이상 포함하는 중권역이며, 해당 유역은 자료가 충분하지 않은 것으로 판단하여 고려하지 않았다(Fig. 2). 전체 한강 유역은 34,428.1km²이며, 유효 유역은 26,688.2km² (평균 1,404.6km²)이다. 행정구역상으로는 2개 시(서울특별시, 인천광역시)와 4개 도(경기도, 강원도, 충청북도, 경상북도)가 포함되어 있다.

2.2 기후변화 시나리오(RCPs)

IPCC제 5차 기후변화 평가보고서(AR5)에서 발표한 RCP (Representative Concentration Pathway) 시나리오는 온실가스 농도변화 경향을 반영한 미래 시나리오이다. 이는 기후변화 대응에 따라 온실가스 농도를 4가지(2.6, 4.5, 6.0, 8.5)로 구분하고 있다 (Table 1). KMA (2012)에 따르면 RCP 8.5 시나리오에 따른 한반도 평균 기온 상승폭은 동일기간 전 지구 평균 상승 경향의 1.2배 수준이며, 국가기후변화적응센터(<http://ccas.kei.re.kr>)에서는 수도권 지역에서 국지성 집중호우 및 폭염일수 증가 등의 기후변화로 인한 피해가 증가할 것으로 전망하였다(IPCC, 2012; 2014; Chae, 2016).

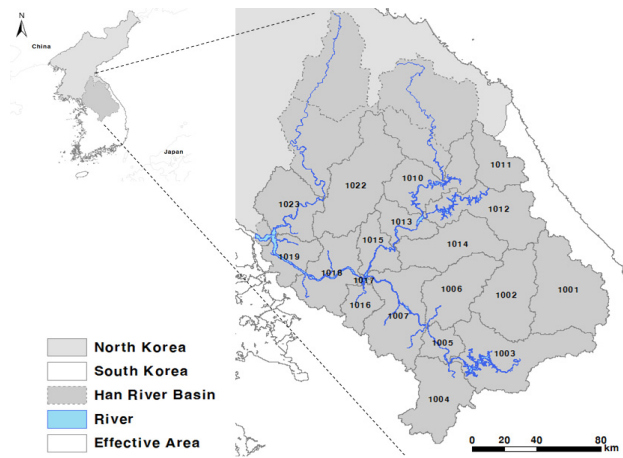


Fig. 2. Study Area (Han River Watershed)

2.3 공동 사회·경제 경로 시나리오(SSPs)

기후변화는 인간의 활동에 의하여 발생하는 이산화탄소 등의 온실기체 뿐 아니라 도시화 등에 따른 토지이용의 변화 등이 원인이라 할 수 있다. 기후변화와 관련된 대부분의 연구들은 기후 요소는 미래 시나리오를 반영하고 있으나, 기후변화 자료 수준인 공간해상도의 사회경제 시나리오는 현재 시점을 기준으로 하는 등 연구자에 따라 임의로 적용하고 있다. 토지이용 변화는 기후변화에 대한 영향을 증대 또는 완화 시키며, 신뢰성 있는 기후변화 영향평가를 위해서는 기후 요소 뿐 아니라 비기후적 요소에 대한 영향을 고려해야 한다(Kim and Park, 2013; Kim, 2016).

공동 사회·경제 경로 시나리오(Shared Socioeconomic reference Pathway, SSP)는 IPCC 5차 보고서의 RCP 체계에서 사용되는 대기 및 기후 모델의 예측, 사회경제적 조건 등에 대한 가정에 대한 조합을 기반의 시나리오이다. RCP와 함께 미래 시나리오를 구성하고 있는 SSP 시나리오는 기후변화 정책을 포함해서는 안 되며, 기후변화가 사회에 미치는 영향을 고려하지 않는 것으로 가정한다. 전반적인 개발 패턴과 영향, 기후변화 적응 및 저감과 관련된 가정들로 정의되며, 전 지구적인 추세를 설명하는데 초점을 맞추고 있다. SSP의 스토리라인은 미래 기후변화에 대비하는 수준에 따라 인구, 경제, 토지이용 외에도 에너지/온실가스, 정책/제도, 기술, 생활방식에 대한 부분으로 구성되어 있으며, 이러한 사회·경제 지표가 어떻게 변화할지에 대하여 정량적으로 분석되어 있다. Boulder meeting에서 개발된 5개 SSP의 기본 스토리라인은 Fig.

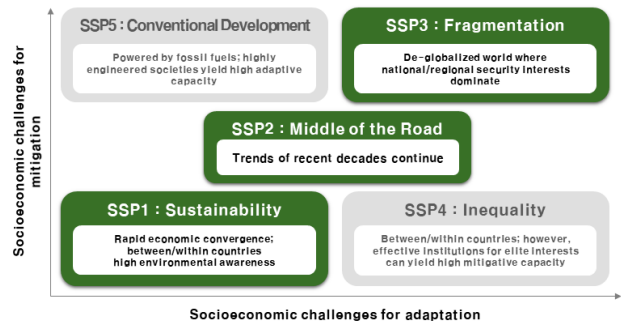


Fig. 3. Logic of Shared Socioeconomic Pathway (O'Neill, 2012)

Table 1. Projected Change in Global Mean Surface Temperature Change for Mid and Late 21st Century, Relative to the 1986–2005 Period (IPCC, 2012; 2014)

Scenario	CO ₂ equivalent Concentrations in 2100	2046-2065		2081-2100	
		Mean	Likely range	Mean	Likely range
RCP 2.6	450ppm	1.0	0.4 – 1.6	1.0	0.3 – 1.7
RCP 4.5	650ppm	1.4	0.9 – 2.0	1.8	1.1 – 2.6
RCP 6.0	850ppm	1.3	0.8 – 1.8	2.2	1.4 – 3.1
RCP 8.5	1350ppm	2.0	1.4 – 2.6	3.7	2.6 – 4.8

3과 같다. 본 연구에서는 5개 스토리라인 중 양극화된 사회상에 따라 확인하기 위하여 SSP1 (지속가능성), SSP2 (중도), SSP3 (분열된 세계)를 선정하였으며, SSP1은 적응과 감축의 부담이 모두 낮은 저탄소 기후변화 적응 사회를 의미한다. 이와 반대로 SSP3는 적응과 감축의 부담이 모두 높은 고탄소 기후변화 비적응 사회를 반영한다(IPCC, 2012; O'Neill, 2012; Kim, 2016; Chae, 2016).

2.4 지표 선정 및 자료 구축

지표를 선정하기 위하여 수자원 취약성과 관련된 다수의 선행 연구들을 검토하여 기후 및 사회경제 변화를 고려한 지표를 선정하였다. 선행연구(Park et al., 2016; Chung et al., 2017)에서 활용한 지표들을 기반으로 자료의 가용성과 미래 시나리오 적용가능성을 고려하였으며, 수자원 취약성 중 물이용 지표에 대하여 일부 자료의 구축 방법을 개선하였다. 최종 선정된 지표는 물이용 관련 지표를 중심으로 기후, 토지이용, 물공급, 물이용, 사회, 경제, 거버넌스로 세분화하였다. 이는 Table 2와 같이 취약성 평가 체계에 따라

Table 2. Descriptions of Water use Vulnerability Indicators (Park et al., 2016; Chung et al., 2017)

Criteria		Indicator	
Exposure	Climate	1	Effective precipitation
	Land use	2	Cropland
		3	Impervious surfaces
Sensitivity	Society	4	Total population
		5	Population density
	Water supply	6	Water leakage ratio
		7	Water use level
		8	Groundwater levels
	Water use	9	Residential water use
		10	Industrial water use
		11	Agricultural water use
	Adaptive capacity	Water supply	12
13			Water reuse
Economy		14	Financial independence rate
		15	Gross Regional Domestic Product (GRDP)
Governance		16	Number of officials for waterworks

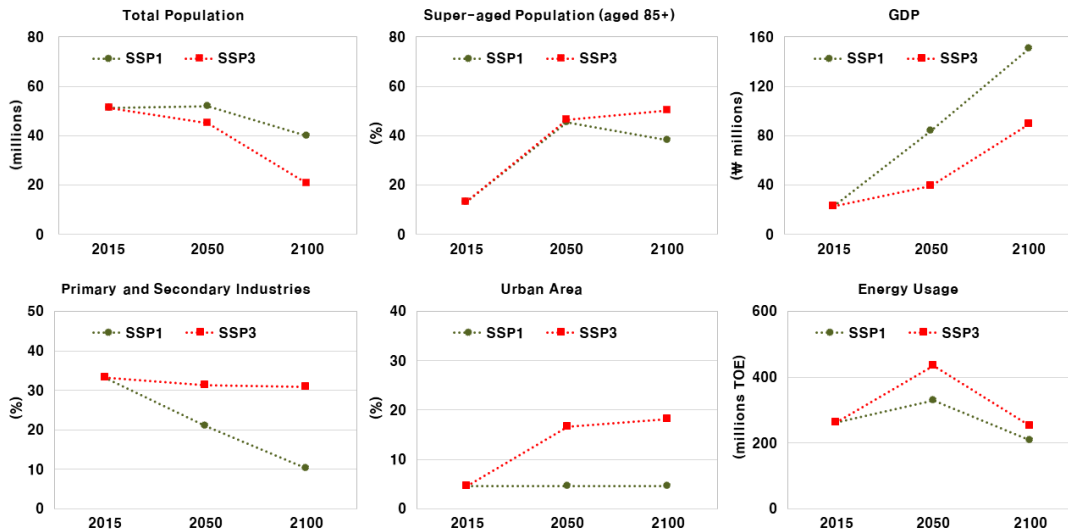


Fig. 4. Comparison of SSP1 and SSP3 (Chae, 2016)

노출(Exposure), 민감도(Sensitivity), 적응능력(Adaptive capacity)으로 구성하였다.

대상유역인 한강유역에 대하여 중권역별 물이용 취약성 평가를 위하여, 유역도, 하천도, 중권역별 수자원단위지도, 기상자료, 지하수위, 물공급 및 물이용 관련 자료 등을 수집하였다. 이러한 지표들은 최근 자료를 활용하기 위하여 2010년 이후 자료를 기준으로 구축하였다. 또한, 국가 보고서 등의 통계 자료의 경우 년자료를 활용하였으며, 대부분 국가 또는 지자체 수준으로 제공되어 원자료를 면적비에 따라 유역별로 가공하여 구축하였다. 본 연구에서는 선행 연구(Park et al., 2016; Chung et al., 2017)에서 검증된 유역단위 준분포형 장기 강우-유출 모형인 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모의 결과를 토대로 기후변화 시나리오(HadGEM2-ES RCP 8.5)를 적용하였으며, 사회·경제 변화를 반영하기 위해 인구, 경제, 토지이용 부분에 대하여 SSP1, SSP2, SSP3 시나리오를 활용하여 지표를 구축하였다(Fig. 4). 미래 시나리오 적용 기간은 단기 미래(2020)와 장기 미래(2050)로 구분하였다.

2.5 TOPSIS (Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution)

Hwang and Yoon (1981)이 개발한 Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) 기법은 다기준 의사결정기법(Multi-Criteria Decision Making, MCDM)으로 양의 이상적인 해(Positive Ideal Solution, PIS)와 가깝고 부의 이상적인 해(Negative Ideal Solution, NIS)에서 먼 대안을 선정하는 방법이다(Fig. 5). 이는 평가기준과 대안이 다수인 경우에 각각의 선호도를 측정하고 각 기준에 대한 중요도를 고려한 최선의 대안이나 순위 등을 의미하며, 대안별 거리를 통하여 최적의 해를 찾는 방법으로 수자원 뿐 아니라 다양한 연구 분야에서 활용되고 있다(Kim and Chung, 2014; Won et al., 2015; Park et al., 2016).

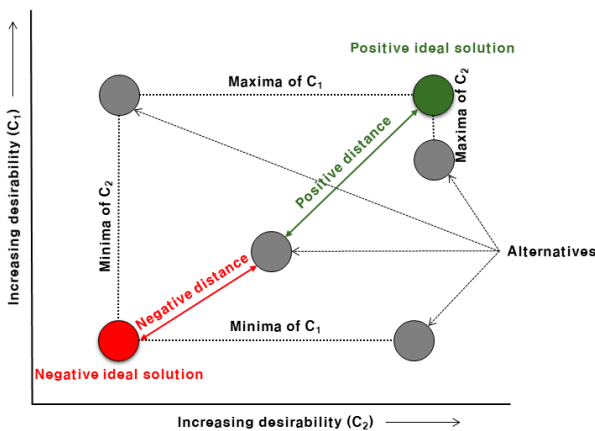


Fig. 5. Conceptual Diagram of TOPSIS (Chauhan and Vaish, 2013)

3. 연구 결과

3.1 지표 표준화 및 가중치 적용

선정된 지표들은 지표마다 각각 단위와 범위가 다르기 때문에 이를 통합하여 분석하기 위해서는 표준화 과정이 필요하다. 표준화를 실시하지 않을 경우에는 산정된 지수의 왜곡이 발생할 수 있다. 따라서 본 연구의 모든 지표에 대하여 원자료를 검토하였으며, 로그합수를 취한 후 최대·최소 표준화를 수행하였다. 이는 각 지표를 최대값과 최소값을 기준으로 하여 동일한 범위로 표준화하는 과정이며, 지표 간의 상대적인 비교가 가능하게 된다(Choe, 2013). 전체 지표 중 일부는 높은 값을 보이는 경우 취약성이 낮음을 나타내는 반비례의 상관관계를 갖기 때문에 지표의 방향성을 맞추

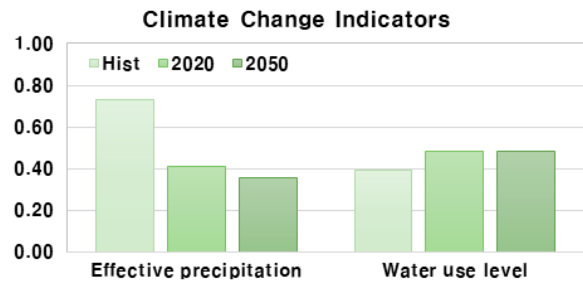


Fig. 6. Normalization of Indicators Applied Climate Change Scenario (HadGEM2-ES RCP 8.5)

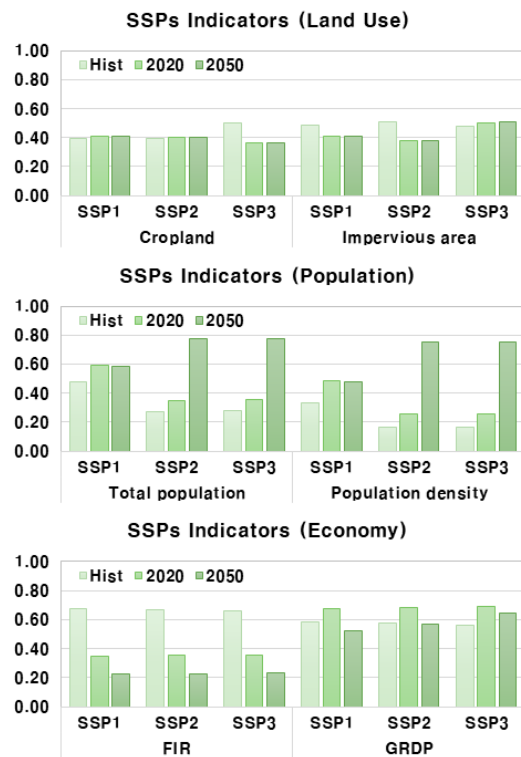


Fig. 7. Normalization of Indicators Applied SSP Scenario

어 역 표준화를 수행하였다. 모든 지표들은 0(취약성 낮음) 부터 1(취약성 높음) 사이에 위치할 수 있도록 표준화하였으며, 시나리오를 적용한 경우에는 전체 시나리오 적용 기간에 대하여 표준화를 실시하였다. Figs. 6 and 7은 전체 유역의 평균값을 통하여 시나리오에 따른 차이를 나타내었다.

취약성 평가는 표준화된 지표 자료들을 통합하여 산정하게 되는데, 각 지표의 중요도가 다르기 때문에 가중치를 적용하게 된다. 가중치는 전문가 및 관리자들의 설문조사 등을 통한 주관적 가중치 또는 자료를 기반으로 산정된 객관적 가중치 등의 방법을 적용하고 있으나, 이러한 가중치를 적용한 결과와 적용하지 않은 경우의 평가 결과의 차이가 크지 않은 것으로 보고되었다(Chae and Oh, 2003; Lee et al., 2013). 이에 본 연구에서는 가중치에 따른 오류를 줄이기 위하여 각 지수 및 지표에 대하여 동일 가중치(Equal Weight)를 적용하였다.

3.2 물이용 취약성 평가

TOPSIS를 활용하여 전체 지표를 통합하였으며, 한강 유역에 대한 중권역별 물이용 취약성 순위를 비교·분석하였다(Figs. 8 and 9). 전 시나리오에서 유역 내 경기도 및 충청남북도 북쪽의 취약성이 높았으며, 강원도 동쪽에서의 취약성이 낮게 나타났다. 또한 취약성 악화 유역의 순위 변동성은 유사하였으나 일부 증가하는 경향을 보였으며, 완화 유역은 모두 증가하는 것으로 나타났다.

기후변화 시나리오의 영향을 받는 지표의 경우, 전체 지표의 약 10% 수준으로 노출과 민감도 부문에 포함되어 있다. 지표 통합 시 동일가중치를 적용하여 지표의 영향이 크지 않았으나 점차 순위 변동성이 증가하는 경향을 보였다. 사회·경제 시나리오 적용한 지표는 전체 지표의 38%로 민감도와 적응능력 부문에서 상당히 많은 부분에 대하여 영향을 주는 것으로 나타났다. 기후변화와 사회·경제 변화를 함께 고려한 경우에는 기후변화만 고려한 취약성 순위와 전반적인 공간분포 패턴은 유사하게 나타났지만 적용된 SSP 시나리오에 따라 약간의 차이를 보였으며, 중기 미래(2050)로 갈수록 변화폭이 크게 나타났다. SSP1 시나리오 보다 SSP3 시나리오의 순위 변동성이 크고, 취약성이 높아지는 경향을 보였다. 그러나 전반적으로는 취약성이 완화되는 유역이 악화되는 유역보다 증가하는 경향을 보였다. 기후변화만 적용한 경우에는 사회·경제 자료를 현재 시점으로 적용하였으며, 이를 SSP2와 비교한 결과 일부 유역을 제외하고 대부분 유사한 공간분포를 보였다. 적용 기간에 따라 중권역별 취약 순위를 비교한 결과에 따르면 현재 시점(Hist)과 단기 미래(2020)에서는 기후변화만 적용한 결과와 SSP1이 가장 유사하였으며, 중기 미래(2050)에는 SSP3이 가장 유사한 것으로 나타났다.

전 시나리오에서 민감도 지수가 가장 높고 노출 지수 보다는

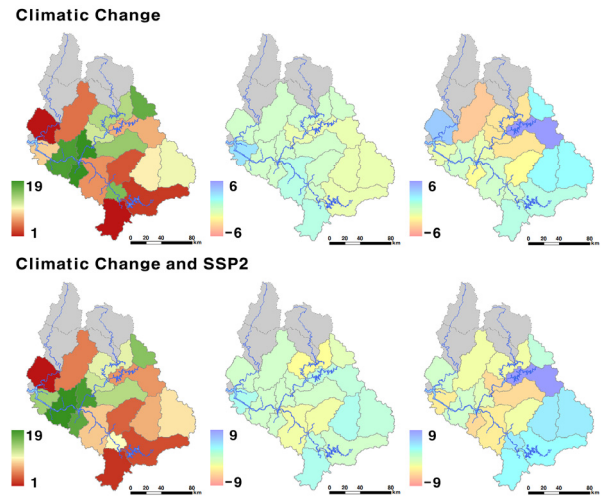


Fig. 8. Comparison of Water use Vulnerability Rankings

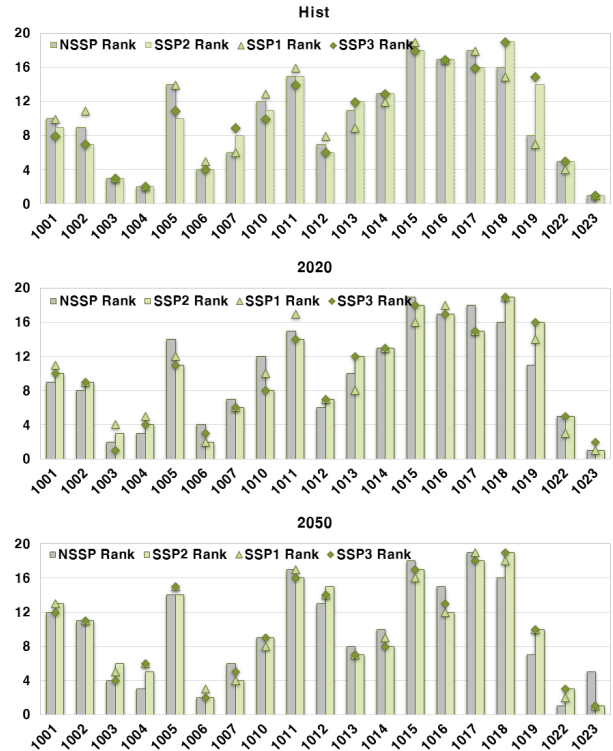


Fig. 9. Comparison of Water use Vulnerability Ranking by Period According to Scenarios

상대적으로 적응능력 지수값이 큰 것으로 나타났다. 특히 민감도 지수는 사회·경제 시나리오를 적용한 경우 중기 미래로 갈수록 지수가 크게 변화하는 것을 확인하였다. 이는 취약성 평가 시 민감도 부문 지표들의 영향이 큰 것을 의미한다. 전 시나리오에 대한 취약 유역 순위를 분석한 결과, 전반적으로 취약성이 높을수록 지수값이 높게 나타났다. 노출의 경우 유사한 수준의 지수값을 보였으며,

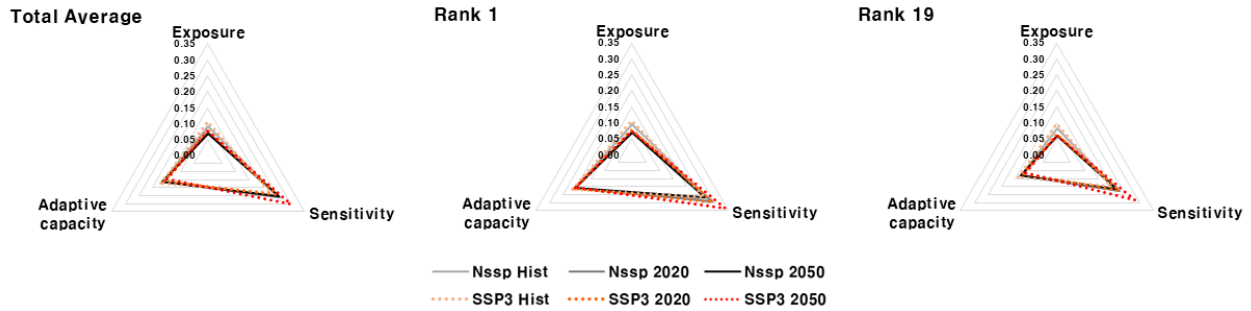


Fig. 10. Comparison of Water use Vulnerability Index by Scenarios

적응능력 부문은 경제 시나리오가 반영되어 전반적으로 Hist보다 취약성이 낮아지는 것으로 분석되었다. 대부분의 유역에서 가장 심각한 미래 상황(RCP 8.5와 고탄소 비적용사회(SSP3))을 반영한 결과가 가장 취약성이 높은 것으로 나타났으며, 이를 RCP 8.5만 적용한 결과(NSSP)와 각 지수별로 비교하였다. Fig. 10은 가장 취약한 유역(Rank 1)과 가장 취약하지 않은 유역(Rank 19)에서의 지수값을 나타내고 있다. 지수값의 차이는 있으나 NSSP의 중기 미래 취약성 지수와 SSP3의 Hist 취약성 지수가 가장 유사하였다. 또한 총 인구는 줄어들고 85세 이상의 초고령 인구가 증가하는 SSP3를 적용한 경우에 사회 요소를 포함하고 있는 민감도 지수가 중기 미래로 갈수록 두드러지게 상승하였다.

4. 결론

한강 유역에 대하여 미래 시나리오 적용에 따른 물이용 취약성을 평가하고자 하였다. 본 연구에서는 기후변화를 고려한 취약성 평가 시 미래 사회를 반영하고자 하였으며, 이에 기후변화 시나리오(RCP 8.5)와 공동 사회·경제 경로 시나리오(SSPs)를 적용하였다. 미래 시나리오를 적용한 결과에 따르면 전반적으로 취약 유역의 순위 변동성이 유사하게 나타났으나, 일부 유역에서 SSP 시나리오 적용 유무에 따른 차이를 보였다. 현재 시점의 상황과 기후변화 시나리오를 적용한 경우와 SSP2와 기후변화를 적용한 경우의 순위 비교 시 일부 유역을 제외한 대부분의 유역에서의 공간분포는 유사하게 나타났다. 또한 SSP1 보다 SSP3 시나리오 적용 시 취약성이 높아지는 경향을 보였으며, 단기 미래(2020)보다 중기 미래(2050)로 갈수록 취약성 완화 지역이 악화 지역보다 많은 결과를 보였다. 지수별 비교에 따르면 전반적으로 사회 요소를 포함하는 민감도 지수의 변화가 가장 크게 나타났다.

본 연구에서는 유역의 수문 모의에 기후변화를 반영하였으나, 토지이용 변화는 반영하지 않은 한계점이 있었다. 사회·경제 시나리오에 따라 주요 산업과 도시화 수준이 달라 불투수층 면적 확대 등으로 인한 토지이용 변화의 차이가 있었으며, SSP1에 비하여

SSP3의 불투수층 비율이 확연하게 높았다. 이에 따른 유출량의 변화가 발생하여 수문 모의 결과의 차이가 예상된다. 따라서 향후 연구에서는 보다 정확한 물이용 취약성 평가를 위해서 유역 수문 모의 시 토지이용 변화를 반영하여 보완할 예정이다. 그러나 본 연구를 통하여 기후변화 취약성 분석에 사회·경제 시나리오 적용 가능성을 확인하였고, 이에 기후변화와 사회·경제 변화를 함께 고려하는 것이 보다 효과적인 대응 방안 마련에 도움이 될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원(과제번호 17AWMP-B083066-04), 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원의 한국연구재단(2015R1C1A2A01054800), 2015학년도 연세대학교 미래선도연구사업(2017-22-0012) 지원에 의해 작성되었습니다.

References

- Ahn, S. R., Jang, C. H., Lee, J. W. and Kim, S. J. (2015). "Assessment of climate and land use change impacts on watershed hydrology for an urbanizing watershed." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 35, No.3, pp. 567-577 (in Korean).
- Betts, R. A., Golding, N., Gonzalez, P., Gornall, J., Kahana, R., Kay, G., Mitchell, L. and Wiltshire, A. (2015). "Climate and land use change impacts on global terrestrial ecosystems and river flows in the hadgem2-es earth system model using the representative concentration pathways." *Biogeosciences*, Vol. 12, pp. 1317-1338.
- Chae, M. O. and Oh, Y. J. (2003). "A study on land suitability factors and their weights." *Journal of Korean Geographical Society*, Vol. 38, No. 5, pp. 725-740 (in Korean).
- Chae, Y. (2016). *Development of socio-economic scenarios for low carbon climate change adaptation road society in Korea*, Korea Environment Institute (in Korean).
- Chauhan, A. and Vaish, R. (2013). "Fluid selection of organic rankine cycle using decision making approach, journal of computational engineering." *Journal of Computational Engineering*, Vol. 2013, Article ID 105825, Available at: <http://dx.doi.org/>

- 10.1155/2013/105825.
- Choe, J. G. (2013). *Geostatistics*, SigmaPress, Seoul, pp. 164-165.
- Chung, E. S., Abdulai, P. J., Park, H., Kim, Y., Ahn, S. R. and Kim, S. J. (2017). "Multi-criteria assessment of spatial robust water resource vulnerability using the topsis method coupled with objective and subjective weights in the han river basin." *Sustainability*, Vol. 9, Available at: <http://dx.doi.org/10.3390/su9010029>.
- Chung, J. W., Lee, W. K., Cui, G., Lee, S. C., Choi, S. and Choi, H. A. (2010). "Application study of vulnerability assessment models for water resources to climate change by spatial and watershed scales." *Climate Change Research*, Vol. 1, No. 1, pp. 21-30.
- Han, W. S., Jeung, S. J. and Kim, B. S. (2015). "The analysis method of future flooding discharge considering climate and land-use change using Dyna-CLUE." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 6, pp. 361-371 (in Korean).
- Hwang, C. L. and Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making an introduction*, Sage Publications, Thousand Oaks London New Delhi, pp. 38-45.
- IPCC (2012). *Workshop report of the intergovernmental panel on climate change workshop on socio-economic scenarios* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, V. Barros, C.B. Field, T. Zwicker, S. Schloemer, K. Ebi, M. Mastrandrea, K. Mach, C. von Stechow (eds.)]. IPCC Working Group III Technical Support Unit, Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam Germany, p. 51.
- 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 [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. PCC, Geneva, Switzerland, p. 151.
- Kim, D., Jung, Y., Park, M. J., Yoon, J. Y., Kim, S. and Choi, M. (2011). "Vulnerability analysis of water resources considering climate change." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 13, No. 1, pp. 25-33.
- Kim, H. Y. (2016). "Simulation of land use change by storylines of shared socio-economic reference pathways." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 19, No. 2, pp. 1-13 (in Korean).
- Kim, J. S. and Park, S. Y. (2013). "Urban growth prediction each administrative district considering social economic development aspect of climate change scenario." *Journal of the Korean Society for Geo-spatial Information Science*, Vol. 21, No. 2, pp. 53-62 (in Korean).
- Kim, Y. 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.
- Korea Adaptation Center for Climate Change (KACCC). <http://ccas.kei.re.kr>.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2012). *Korean Peninsula Climate Change Outlook Report*, Korea Meteorological Administration (in Korean).
- Lee, D. R., Choi, S. J. and Moon, J. W. (2013). "Development of integrated water resources evaluation index." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 10, pp. 1017-1028 (in Korean).
- Liu, J., Zhang, C., Kou, L. and Zhou, Q. (2017). "Effects of climate and land use changes on water resources in the Taoer river." *Advances in Meteorology*, Available at: <https://doi.org/10.1155/2017/1031854>.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2015). *Korean climate change assessment report 2014 : Climate change impact and adaptation*, Incheon, Republic of Korea (in Korean).
- O'Neill, B. (2012). *Status of work on shared socioeconomic pathways*, IAM Annual Meeting 2012, NCAR, July 19, Vanessa Schweizer.
- Park, H. S., Kim, J. B., Um, M. J. and Kim, Y. (2016). "Assessment of Water use Vulnerability in the Unit Watersheds using TOPSIS approach with subjective and objective weights." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 8, pp. 685-692 (in Korean).
- Won, K. J., Sung, J. H. and Chung, E. S. (2015). "Parametric assessment of water use vulnerability of South Korea using SWAT model and TOPSIS." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 8, pp. 647-657 (in Korean).
- World Bank Group (2016). *High and dry : Climate change, water, and the economy*, World Bank, Washington, DC. World Bank. Available at: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/23665> License: CC BY 3.0 IGO.
- World Meteorological Organization (WMO) (2013). *The global climate 2001-2010, a decade of extremes*, World Meteorological Organization (WMO), Switzerland.
- Yoo, G. Y. and Kim, I. A. (2008). *Development and application of a climate change vulnerability index*, Korea Environment Institute (in Korean).