



Article

기후변화에 따른 강원지역 기후변동 특성 및 지하수 함양량 평가

유채림, 김희정*

강원대학교 지질학과

Evaluation of climate change characteristics and groundwater recharge in Gangwon state according to climate change

Chaerim Yu, Heejung Kim*

Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

Received: February 6, 2024 / Revised: February 21, 2024 / Accepted: February 26, 2024

*Corresponding author: +82-33-250-8560 / E-mail: hydroqueen@kangwon.ac.kr

요약: 가뭄으로 물 부족 지역이 발생하고 있으며 이를 해결하기 위해서 취수원을 다변화하고 지하수를 효율적으로 활용하기 위한 노력이 활발하게 이루어지고 있다. 이 연구에서는 IPCC 제6차 보고서에서 사용된 SSP 시나리오로 예측된 기온과 연강수량을 이용하여 강원지역의 기후변동 특성을 분석하고 지하수 함양량을 분석하였다. 1993~2020년까지 강원지역의 기온은 증가하고 연강수량은 매년 큰 차이를 보이지만 전체적으로는 감소하는 경향을 보인다. SSP 시나리오에 따르면 2025~2100년까지 강원지역의 기온은 현재 수준보다 2.4~2.8°C 증가하고 연강수량은 전체적으로 증가하지만 매년 변화폭은 현재보다 더 커질 것으로 분석된다. SSP 시나리오에 따른 기후변화를 반영하면 2025~2100년까지 매년 함양량은 증가 또는 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타나지 않았지만 22.4~37.5%에 해당하는 기간의 함양량이 현재보다 감소할 것으로 분석되므로 체계적으로 지하수 자원을 관리하는 것이 필요하다.

주요어: 강원특별자치도, 기후변화, SSP 시나리오, 지하수, 함양량

ABSTRACT: Drought has caused water shortages in some areas, and efforts are being made to diversify water sources and use groundwater efficiently to solve this problem. In this study, we analyzed the climate change characteristics of Gangwon state and evaluated the groundwater recharge using the temperature and annual precipitation predicted by the SSP scenario used in the 6th IPCC report. From 1993 to 2020, the temperature of Gangwon state increased and the annual precipitation showed large differences every year, but overall it tended to decrease. According to the SSP scenario, the temperature of Gangwon state will increase by 2.4~2.8°C from the current level and the annual precipitation will increase overall, but the annual variation will be larger than the current level from 2025 to 2100. Reflecting the climate change according to the SSP scenario, the annual recharge from 2025 to 2100 do not show a clear tendency of increase or decrease, but the recharge for the period corresponding to 22.4~37.5% will decrease from the current level. Therefore, it is necessary to systematically manage groundwater resources.

Key words: Gangwon state, climate change, SSP scenario, groundwater, recharge

1. 서론

1970년 이후 지구의 평균 기온은 세기당 1.7℃씩 상승하고 있으며(Marcott *et al.*, 2013), 최근에는 지구의 평균 기온이 많이 증가하였다. 국제사회는 기후변화를 억제하기 위해서 지속적으로 노력하고 있으며 2100년 지구의 평균 기온이 4℃ 올라갈 확률이 20% 정도 된다고 예측하고 있다(Schellnhuber *et al.*, 2012). 지구온난화는 전 세계적으로 식량 및 물 안보, 인간의 건강, 경제 및 사회 등 다양한 분야에 광범위한 악영향을 미치고 있다. 지구온난화로 인해 가뭄과 홍수의 발생빈도와 강도가 점차 증가하고 있다(Dai *et al.*, 2004; IPCC, 2023). 국내에서 국지적인 가뭄은 2~3년, 극한 가뭄은 5~7년 주기로 발생하고 있으며(Lee *et al.*, 2021), 향후 기후변화로 인한 가뭄과 홍수는 지속해서 발생할 것으로 예상되므로 용수를 안정적으로 공급할 수 있는 수자원을 확보하거나 공급 방안을 마련하는 것이 필요하다.

우리나라는 계절별, 지역별, 연도별 강수량의 편차가 크고 강수가 홍수기에 편중되어 용수를 체계적으로 관리하기 어렵다. 2018년 기준, 국내 연간 수자원 이용량은 366 억 m³으로 추정되며 이중 67%는 농업·생활 및 공업용수로 이용하고 33%는 하천유지용수로 사용한다(Related ministries jointly, 2021). 2022년 국내에서는 가뭄, 폭염, 태풍 등 이상기후가 빈번하게 발생하여 물 부족에 대한 우려가 크게 증가하였다. 특히, 남부지방은 극심한 가뭄으로 수질악화, 생활 및 농업용수 부족 등의 피해가 발생하였다(Related ministries jointly, 2023).

지하수는 인류가 사용할 수 있는 담수 수자원의 30.1%를 차지하고 전 세계의 물 취수량의 33~35%를 차지한다(Doll *et al.*, 2012; Amanambu *et al.*, 2020). 지하수는 증발산량에 직접적으로 영향을 받지 않고 지표수에 비해서 상대적으로 기후변화의 영향을 덜 받는다(Howard *et al.*, 2016). 국내에서 지하수는 주로 중생대 화강암의 풍화대와 큰 하천 주변에 주로 발달하고, 일부 지역에서는 다공질의 화산암에서 지하수의 산출성이 매우 양호하다(Ministry of Environment, 2023). 제1차 국가물관리기본계획에서 지하수의 이용량은 29.1억 m³/년으로 전체 수자원의 7.6%를 차지하는 것으로 추정하였다. 최근에는 터널, 지하철 역사, 건축물 등에서 유출되는 지하수를 수자원으로 활용하는 방안을 마련하고 있다(Ministry of Environment, 2023).

기후변화로 인한 기온 상승과 강수 특성이 변화하면 유출량과 함양량에 영향을 줄 수 있다. 최근에 수립된 제1차 국가물관리기본계획에서 봄과 가을철의 강수량 감소와 증발산량의 증가로 인해 가뭄 발생빈도가 크게 증가하여 물 관리 여건이 악화될 수 있지만 물 수급 구조의 변화, 기존

시설의 효율화, 물 인프라 확충 등을 통해 용수공급 능력이 향상되어 대부분 지역에서 용수부족은 일어나지 않을 것으로 예상하였다. 그러나 해안 및 일부 산간 지역에서는 가뭄으로 인해 용수 부족이 발생할 수 있을 것으로 전망하였다(Related ministries jointly, 2021).

기후변화에 대응하여 지하수 수자원을 확보하고 효율적으로 활용을 위한 연구들은 정부 및 관련 기관의 연구자들을 중심으로 지속해서 진행되고 있다(Lee *et al.*, 2010; Ha *et al.*, 2018; Choi, 2021; Suk *et al.*, 2022). 최근 수립된 제1차 물관리기본계획(2021~2030), 제4차 지하수관리기본계획(2022~2031) 등에서 기후변화와 대응해서 대용량 지하수 시설, 지하수저류댐, 유출지하수 등을 활용하여 취수원을 개발하고 활용하는 방안을 마련하였다. 지하수 수자원을 효율적으로 이용하기 위해서는 지하수의 함양량, 이용량, 개발가능량을 평가하여 안정적으로 사용할 수 있는 수자원량을 정확하게 평가하는 것이 중요하다.

최근까지 주로 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP) 기후변화 시나리오로 예측한 강수량 자료를 이용하여 향후 지하수 수자원의 변동특성을 평가하였으나 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 제6차 보고서에서 채택한 공통사회 경제경로(Shared Socioeconomic Pathways, SSP) 기후변화 시나리오를 이용한 지하수 수자원의 변동특성을 평가하는 연구는 활발하게 진행되지 않았다(Seo *et al.*, 2022).

강원지역은 산악지역이 많아 경사가 급하고 특히 영동 지역은 하천의 유로도 짧아 용수의 활용분야에서 취약한 구조이다. 특히 속초시는 물 이용 여건이 나쁘며 이를 해결하기 위해 대용량 지하수 관정, 지하수저류댐 등 개발하여 취수원으로 활용하고 있다. 또한 동해시는 면적은 좁고 인구가 많으며 산업단지, 군부대, 화력발전소, 시멘트 공장 등이 위치하여 안정적으로 사용할 수 있는 수자원을 확보하는 것이 필요한 지역이다. 2030년까지 강원지역의 물 수급 전망 결과 고성군, 속초시 등 5개 지역에서 생활용수 또는 공업용수가 부족할 것으로 전망되었고, 철원군, 양구군 등 11개 지역에서는 농업용수가 부족할 것으로 전망되었다(Lee *et al.*, 2021). 강원지역의 수자원을 체계적으로 관리하기 위해서는 미래 수자원량을 예측하는 것이 필요하다. 이 연구는 SSP 시나리오로 예측한 강수량을 이용하여 강원지역 내 지하수 함양량을 평가하여 미래 지하수 수자원의 효율적인 활용방안을 제시하는 데 도움을 주기 위해 수행하였다.

2. 연구지역

2021년 기준, 강원특별자치도는 면적은 16,875 km²이고 746,220세대, 1,555,876명이 거주한다. 2017년까지 인구

는 증가하다가 2018년 이후 감소하였다. 2021년 인구는 2017년 대비 11,215명 감소하였다. 산림지역이 전체 토지의 81.4%이고 농경지와 거주지는 각각 9.3과 1.2%이며 산림과 농경지는 점차 줄어들고 거주지는 증가하는 경향을 보인다. 연평균 기온은 9.3~12.0°C의 범위를 보이고 평균은 10.7°C이다. 우리나라 평균 기온은 12.3°C로 강원특별자치도보다 1.6°C 더 높다. 연강수량은 804.5~1,590.3 mm의 범위를 보이고 평균은 1,180.3 mm이다. 연강수량의 57.2%가 7~9월에 집중된다.

강원특별자치도의 상수도보급률은 93.3%이고 군 단위 지역은 68.2~93.4%이며, 시 단위 지역은 91.1~99.7%로 군 단위 지역의 상수도보급률이 시 단위 지역에 비해서 상대적으로 낮다. 특히, 홍천군, 영월군, 화천군의 상수도보급률이 80% 이하로 매우 낮다(KOSIS, 2024). 유역은 4개의 대권역(한강권역, 한강동해권역, 낙동강권역, 낙동강동해권역), 20개의 중권역으로 구성된다. 6개의 수문지질단위(미고결 쇄설성 퇴적층, 화산암류, 쇄설성 퇴적암, 관입화성암, 탄산염암, 변성암)로 구분되며 미고결 쇄설성 퇴적층과 관입화성암 지역이 다른 지역보다 지하수 산출성이 상대적으로 좋다(Gangwon Province and KOGGA, 2015). 2018~2022년까지 지하수 연평균 사용량은 약 188 백만 m³이며 이 중에 생활용이 51.6%, 농업용이 43.3%, 공업용이 4.9%, 기타가 0.3%를 차지한다. 최근 5년 동안에 생활용수는 점차 감소하고, 농업용수는 점차 증가하는 경향을 보인다(그림 1).

3. 연구방법

3.1. 자료수집 및 통계분석

1993~2020년까지 강원지역의 일평균 기온과 일강수량

자료를 강원통계연보에서 수집하였다(KOSIS, 2024). 수집된 자료의 분포 및 변동특성과 기초통계를 이용하여 강원지역의 기후특성을 분석하였다.

3.2. 기후변화 시나리오

IPCC 제6차 보고서에서 미래 기후를 예측하기 위해서 사용한 기후변화 시나리오는 기존에 사용하던 RCP 시나리오에 인구통계, 경제발달, 복지, 생태계, 자원, 사회제도, 기술 발달, 사회적 인자, 정책 등을 추가로 반영한 SSP 시나리오를 사용하였다. SSP 시나리오는 기후변화, 취약성 및 적응을 고려하여 5개 등급으로 구성된다. SSP1-1.9 및 SSP1-2.6은 대기 내 온실가스 농도가 현재보다 낮아지고 각각 2050년과 2070년에 온실가스의 배출량이 0인 경우로 화석 에너지 사용이 최소화되고 친환경적으로 경제성장을 이룬 경우이다. SSP2-4.5는 온실가스 배출량을 현재로 유지하여 기후변화가 완화되고 경제성장은 지속적으로 이루어지는 경우이다. SSP3-7.0은 기후변화를 완화하기 위한 기술 개발이 늦어지고 관련 정책이 소극적으로 이루어져 2100년까지 온실가스의 배출량이 현재 수준의 2배 정도 늘어나는 경우이다. SSP5-8.5는 경제발전 중심의 정책으로 화석 연료의 사용량이 늘어나고 무분별한 도시화 및 산업화로 2050년까지 온실가스의 배출량이 현재 수준의 2배 정도 늘어나는 경우이다. 이 SSP 시나리오는 지역적인 기후변화를 평가하는데 사용하고 있다(IPCC, 2023; CIP, 2024). 국내에서는 기후정보포털에서 2022년 12월부터 행정구역별 상세 기후전망정보를 제공하고 있으며 이번 연구에서는 2025~2100년까지 RCP와 SSP 시나리오로 예측된 강원지역의 연평균 기온과 월 단위 및 연 단위의 예상 강수량 자료를 수집하여 기후변동 특성을 분석하였다.

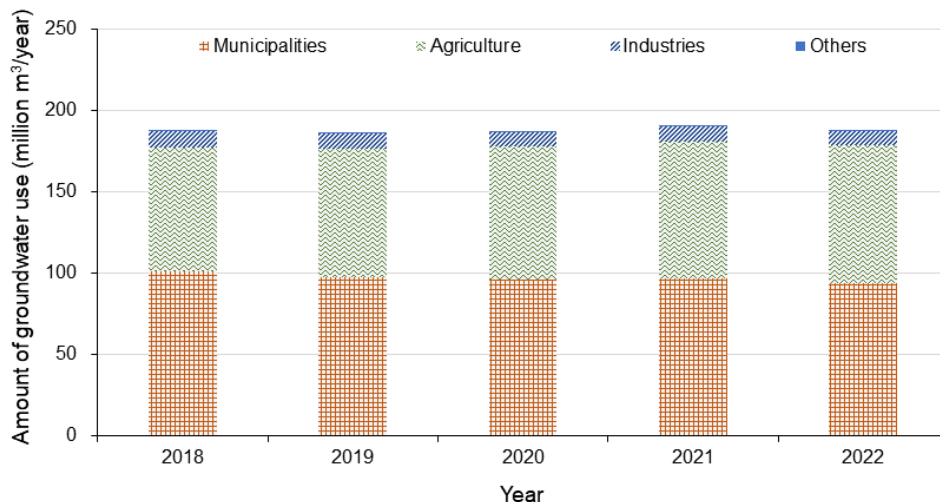


Fig. 1. Groundwater use by purpose in Gangwon state from 2018 to 2022 data from KOSIS (2024).

3.3. 지하수 함양량

환경부는 제4차 지하수관리기본계획(2022~2031)에서 강원지역의 지하수 함양률은 11.6~19.6%의 범위를 보이고 함양량은 3,079 백만 m³/년, 개발가능량은 2,218 백만 m³/년으로 함양량의 72.0%를 개발할 수 있는 것으로 분석하였다(Ministry of Environment, 2023). 지하수 함양량은 강수량의 영향을 받으므로 향후 강수량의 감소 또는 증가에 따라서 함양량과 개발가능한 지하수 자원이 변화될 것이다. 이번 연구에서 강원지역의 함양률은 제4차 지하수관리기본계획(2022~2031) 내 강원지역 18개 시·군의 함양률과 강원지역 전체에 대한 각 시·군의 면적비를 곱하여 계산한 기하평균을 사용하였다. 강원지역의 전체면적과 각 시·군의 면적은 강원통계연보에서 수집하였다. 강수량 자료는 RCP 및 SSP 시나리오에 기반하여 기후정보포털에서 제공하는 강원지역의 강수량 자료를 이용하여 2025~2100년까지 강원지역의 함양량을 분석하였다. 또한 RCP와 SSP 시나리오로 분석된 함양량을 비교하여 향후 강원지역 함양량 변화를 평가하였다. 함양량 분석 시 토지이용 및 피복 형태, 불투수 지역의 면적변화 등을 고려하지 않고 단순히 강수량의 변화만을 고려하였다. 미래 함양량에 대한 신뢰도를 높이기 위해서는 강수량뿐만 아니라 기타 요인에 대한 추가적인 분석이 필요하다.

4. 결과 및 토의

4.1. 기후변동 특성

1993~2020년까지 강원지역의 연평균 기온은 9.9~12.0°C 이고, 평균은 11.0°C이다. 변화폭은 0~1.3°C로 매년 큰 차

이를 보이지 않지만 전체적으로는 증가하는 경향을 보인다. 2012년까지 평균보다 낮거나 높은 경우가 빈번하게 발생하였으나 2013년 이후에는 연평균 기온이 평균보다 계속 높게 관측되었다. 2020년 연평균 기온은 1993년 대비 약 1.2배 증가하였다. 전국과 강원지역의 연평균 기온에 대한 추세선의 기울기는 각각 0.032과 0.048로 강원지역의 연평균 기온이 전국 평균보다 더 빠르게 증가하였다(그림 2). 지역별로는 태백산맥을 중심으로 영동지역의 연평균 기온이 영서지역에 비해서 상대적으로 높은 경향을 보인다.

1993~2020년까지 강원지역의 연강수량은 804.5~1,883.1 mm의 범위를 보이고 평균은 1,333.3 mm이다. 2014년의 연강수량이 804.5 mm로 가장 적었고 2003년이 1,883.1 mm로 가장 많았다. 조사기간 동안 연강수량은 증가 또는 감소하는 경향이 반복적으로 관찰되었다(그림 3). 연강수량에 대한 추세선의 기울기는 -4.50로 연강수량은 전체적으로 감소하는 것으로 평가되었다. 2011년 이후 대부분 연강수량이 평균보다 적었으며 연평균 기온은 평균보다 높았다. 이러한 기후 특성으로 인해 최근에 가뭄발생 빈도가 증가한 것으로 판단된다. 2010년 초반부터 중반까지는 주로 봄, 초여름, 가을의 강수량이 평년보다 적어 가뭄이 발생한 것으로 판단되고 2010년 중반 이후에는 3~6월의 봄과 초여름의 강수량이 평년보다 적어 가뭄이 발생한 것으로 분석된다. 영서와 영동 및 내륙과 해안 등 지역에 따른 뚜렷한 차이는 관찰되지 않는다.

4.2. 기후변화 전망

IPCC 제5차 보고서에서 사용한 RCP 시나리오를 이용하여 예측한 2100년 강원지역의 연평균 기온은 약 1.1~4.

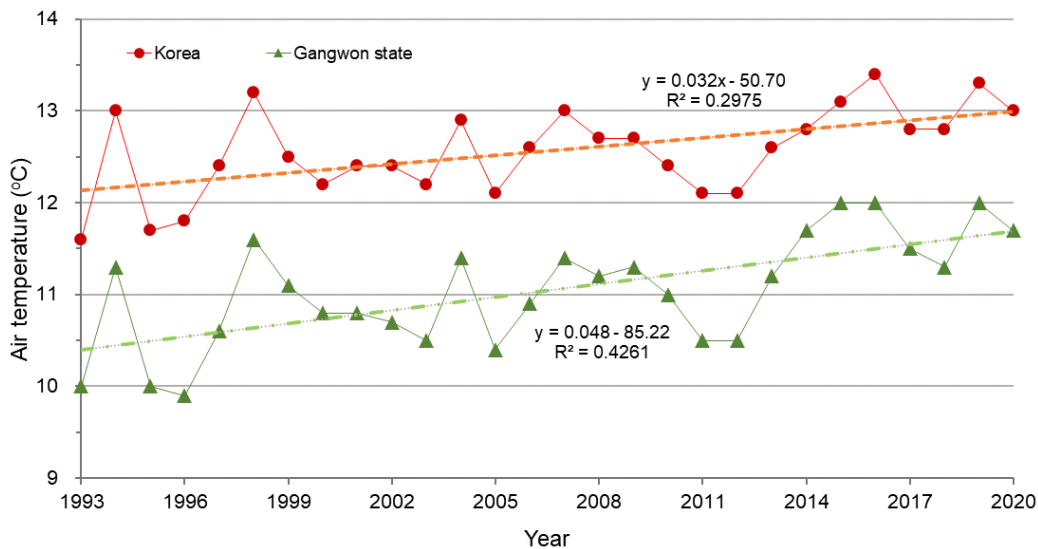


Fig. 2. Annual variations of annual average air temperature in Korea and Gangwon state from 1993 to 2020 data from KOSIS (2024).

9°C 상승할 것으로 분석되었다(CIP, 2024). 기온의 상승폭에 대한 평균은 3.1°C이며 2017년에 기상청에서 예측한 상승폭 2.4°C보다 0.7°C 증가하였다(KMA, 2017). 이것은 최근 평균 기온이 크게 증가된 것이 반영된 결과로 판단된다. SSP 시나리오를 이용하여 예측한 2100년 강원지역 연평균 기온은 평년값보다 2.4~7.7°C 증가할 것으로 예측되었다(CIP, 2024). 향후 사회 및 경제발전으로 인한 온실가스의 배출량이 증가될 것으로 예상되며 이러한 환경변화로 인해

SSP 시나리오로 예측된 연평균 기온의 상승폭이 RCP 시나리오로 예측한 결과보다 1.3~2.8°C 더 높게 나타나고 회귀직선의 기울기도 더 큰 값을 보인 것으로 판단된다(그림 4).

RCP 시나리오의 세부 시나리오별 연강수량은 매년 큰 차이를 보이며 뚜렷한 증가 또는 감소하는 경향을 보이지 않는다. 그러나 세부 시나리오별 회귀직선의 기울기는 -0.177~4.665로 RCP2.6을 제외한 다른 시나리오에서는 점차 증가하는 경향을 보일 것으로 예측되었다(그림 5). RCP2.6,

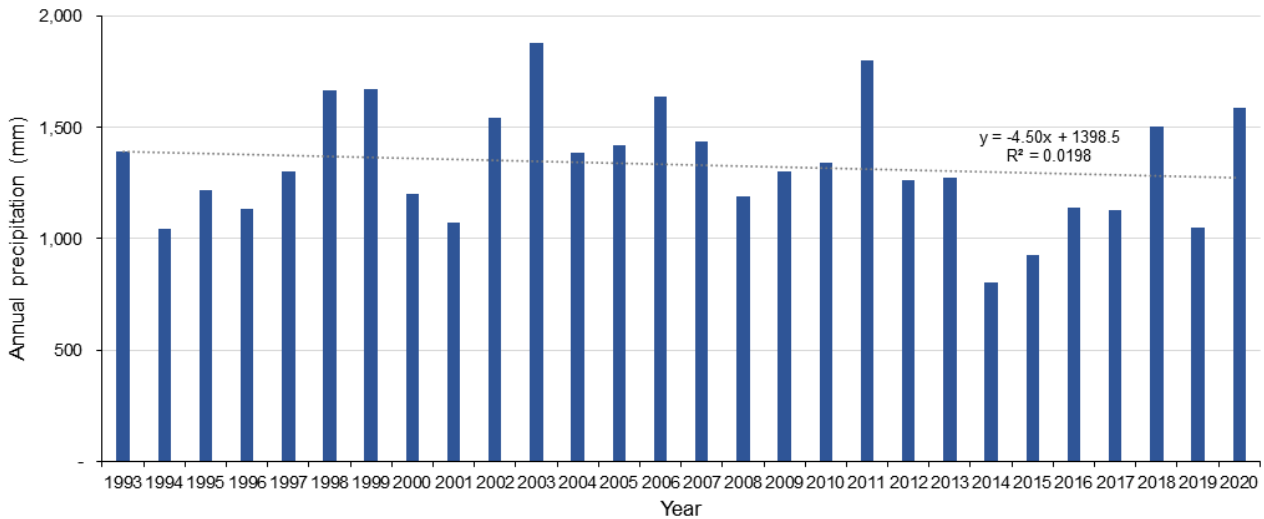


Fig. 3. Annual variations of annual precipitation in Gangwon state from 1993 to 2020 data from KOSIS (2024).

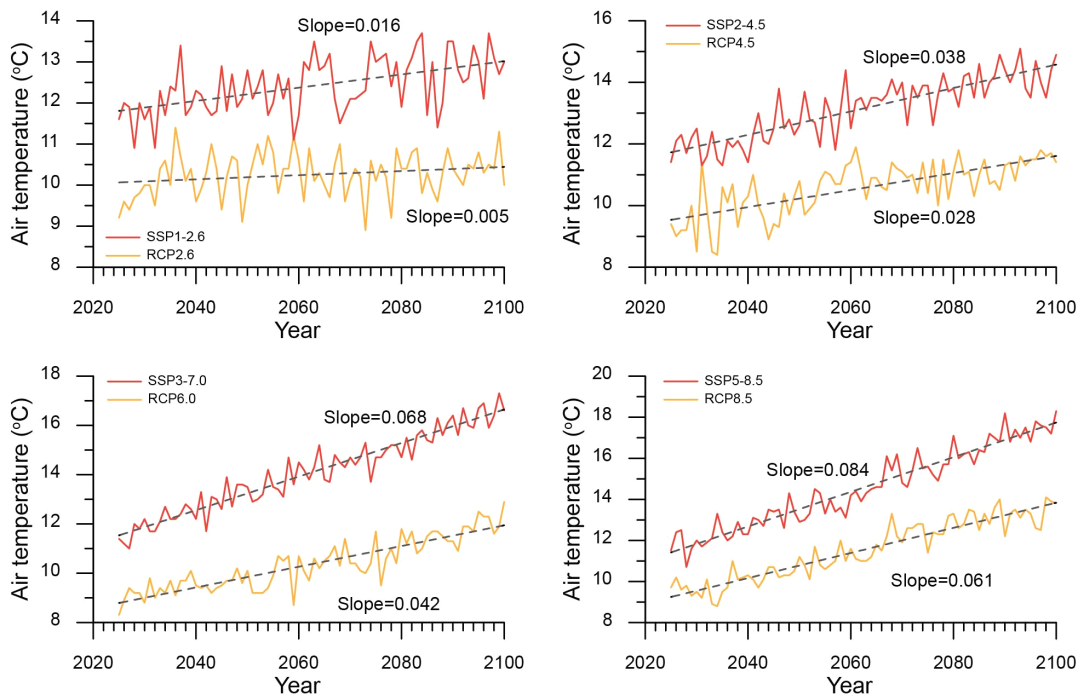


Fig. 4. Annual variations of annual average air temperature according to RCP and SSP scenarios in Gangwon state from 2025 to 2100 data from CIP. Slope represents the slope of the regression line for RCP and SSP scenarios.

RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 시나리오에서 예측한 연강수량 중에 평년값보다 적은 경우가 76년 중에 각각 31, 26, 28, 27회이고, 평년값 대비 부족량은 각각 0.4~379.4, 2.2~458.2, 2.8~518.8, 11.9~346.1 mm이다. 계절별로는 6~9월까지 연강수량의 약 68~71%가 집중되지만 이 기간 중에 월강수량의 최대와 최소의 차이가 497.8~669.1 mm로 강수량의 변화가 매우 클 것으로 예측되었다. SSP 시나리오로 예측한 연강수량은 RCP 시나리오와 유사한 변동특성을 보이지만 세부 시나리오별 회귀직선의 기울기는 0.692~4.665로 연강수량은 증가하고 변동폭은 더욱 클 것으로 예측되었다(그림 5). SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5 시나리오에서 예측한 연강수량 중에 평년값보다 적은 경우는 76년 중에 각각 27, 17, 21, 28회로 RCP 시나리오에 비해서 상대적으로 적게 예측되었다. 또한 SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5 시나리오에서 예측한 연강수량에 대한 평년값 대비 부족량은 각각 0.7~335.5, 16.6~398.2, 4~244.6, 3.4~436.2 mm로 SSP5-8.5를 제외한 나머지 시나리오에서는 부족량이 감소하였다.

SSP 시나리오로 예측된 강원지역의 기후변화에서 기온은 점차 상승하고 강수량도 점차 증가하는 것으로 나타났다. RCP 시나리오 대비 기온과 연강수량의 상승폭이 증가하였다. 일반적으로 가뭄은 연강수량이 평년값보다 적게 내리거나 기온이 상승할 때 발생한다. RCP와 SSP 시나리오 2025~2100년까지 예측한 기온 및 연강수량과 평년값의 차

이를 이용하여 향후 강원지역의 가뭄 발생 가능성을 평가하였다(그림 6). RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 시나리오에서 연강수량이 평년값보다 100 mm 이상 적게 내리는 경우는 각각 12, 14, 19, 15회 발생하고 연강수량의 부족량은 각각 118.3~379.6, 113.7~458.2, 115.9~518.8, 105.7~346.1 mm로 예측되었다. 이 시기의 기온은 평년값보다 각각 0.5~1.9, -0.4~3, 0~4, 0.7~4.6°C 높게 예측되었다. SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5 시나리오에서 연강수량이 평년값보다 100 mm 이상 적게 내리는 경우는 각각 18, 10, 9, 8회 발생하고 연강수량의 부족량은 각각 105.0~335.5, 111.6~398.2, 106.8~244.6, 110.1~436.2 mm로 예측되었다. 이 시기의 기온은 평년값보다 각각 0.3~1.9, 1.1~3.4, 0.6~4.7, 0.1~1.9°C 높게 예측되었다. RCP 시나리오로 예측된 기후변화에 비해서 SSP 시나리오로 예측된 기후변화에서 시나리오별로 차이를 보이기는 하지만 전체적으로 가뭄 발생빈도는 줄어들고 발생 강도도 감소할 것으로 예상된다. 이번 연구에서는 연강수량과 연평균 기온을 이용하여 가뭄 발생 가능성을 평가하였기 때문에 계절별 및 단기 가뭄의 발생 가능성과 지역적으로 발생할 수 있는 가뭄에 대해 평가할 수 없었다. 가뭄 발생 가능성 평가에 대한 신뢰도를 높이기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

4.3. 지하수 함양량

강원지역 함양률의 기하평균은 14.43%이고, 전체면적은

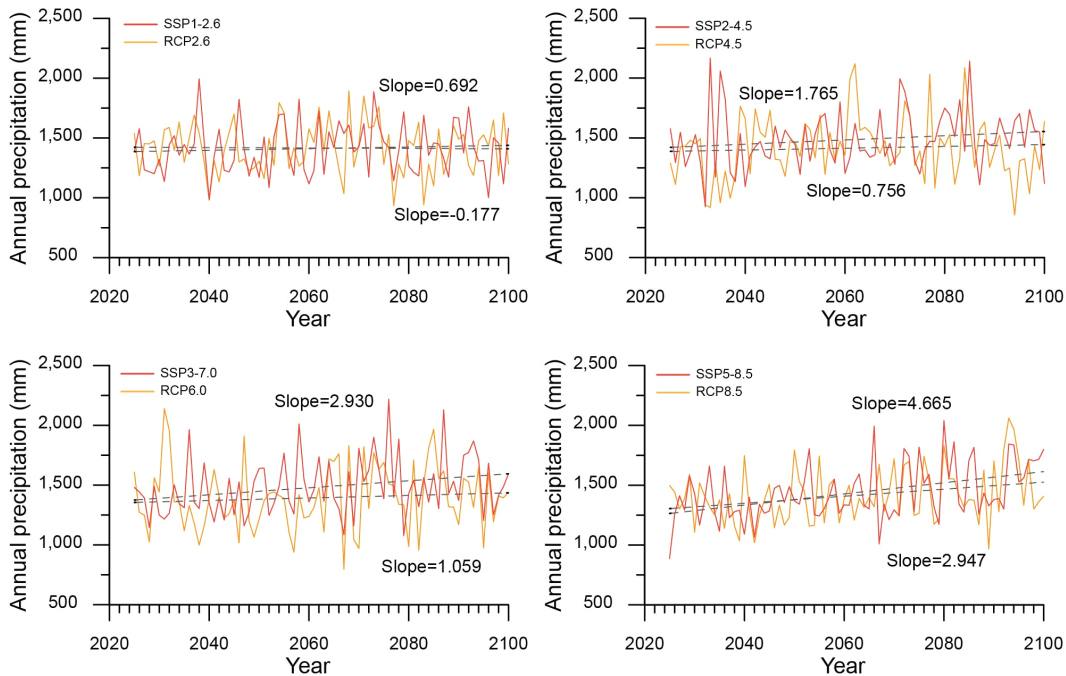


Fig. 5. Annual variations of annual precipitation according to RCP and SSP scenarios in Gangwon state from 2025 to 2100 data from CIP. Slope represents the slope of the regression line for RCP and SSP scenarios.

16,875.4 km²이다. RCP와 SSP 시나리오에 따른 함양량은 대부분 매년 큰 차이를 보이고 뚜렷한 증가 또는 감소하는

경향을 보이지 않는다. 연강수량의 평년값을 이용하여 계산된 강원지역 함양량은 3,198 백만 m³/년이고 이 값을 기

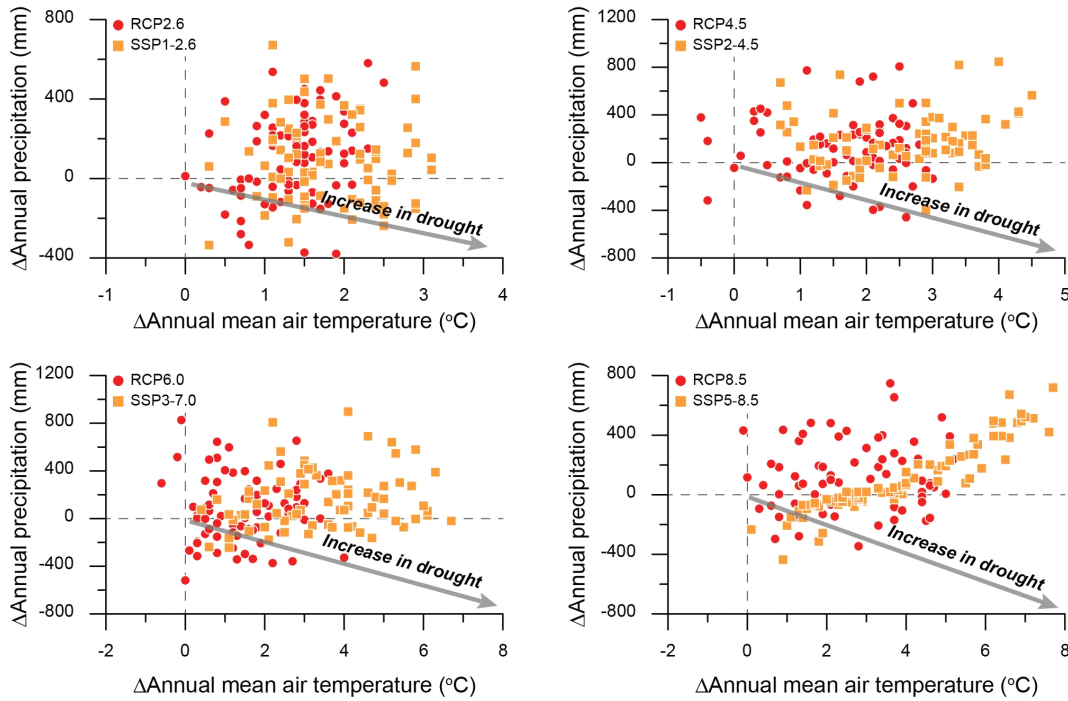


Fig. 6. Assessing the possibility of drought using annual mean air temperature and annual precipitation predicted by RCP and SSP scenarios in Gangwon state from 2025 to 2100. Δ represents the annual change in annual mean air temperature and annual precipitation.

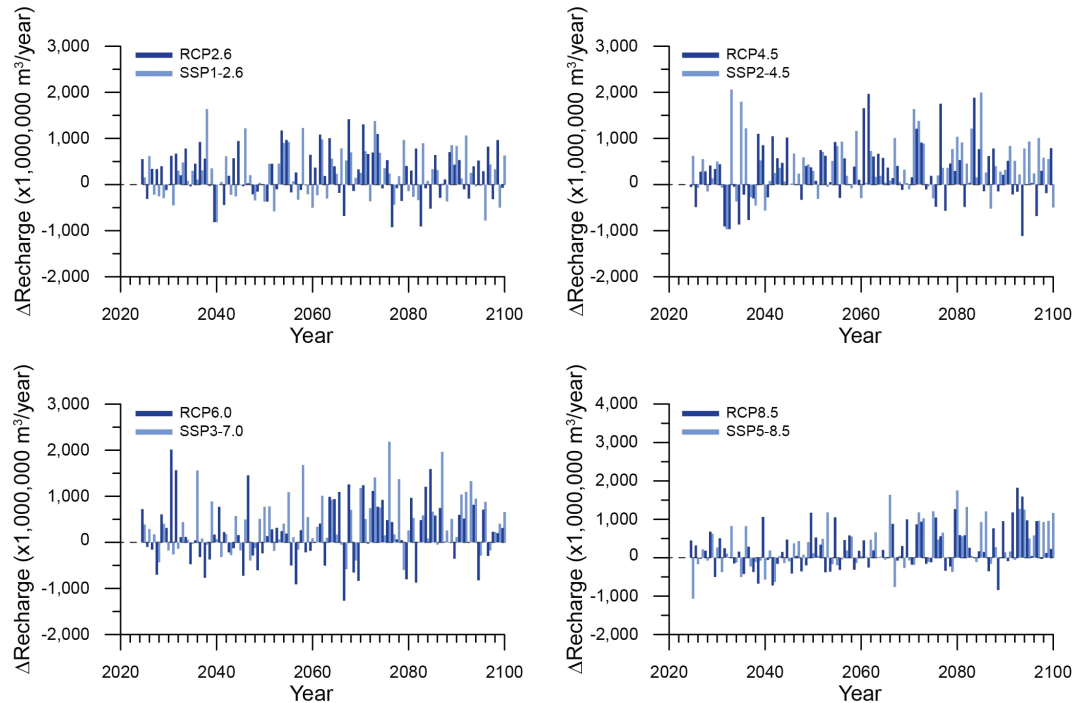


Fig. 7. Relative variations in annual recharge compared to normal values according to RCP and SSP scenarios in Gangwon state from 2025 to 2100. Δ represents the annual change in recharge.

준으로 2025~2100년까지 함양량의 상대적인 변화량을 그림 7에 나타내었다. 2025~2100년까지 RCP2.6, RCP4.5,

RCP6.0, RCP8.5 시나리오에 따른 함양량이 연강수량의 평균값을 이용하여 계산된 함양량보다 적은 경우는 각각 32,

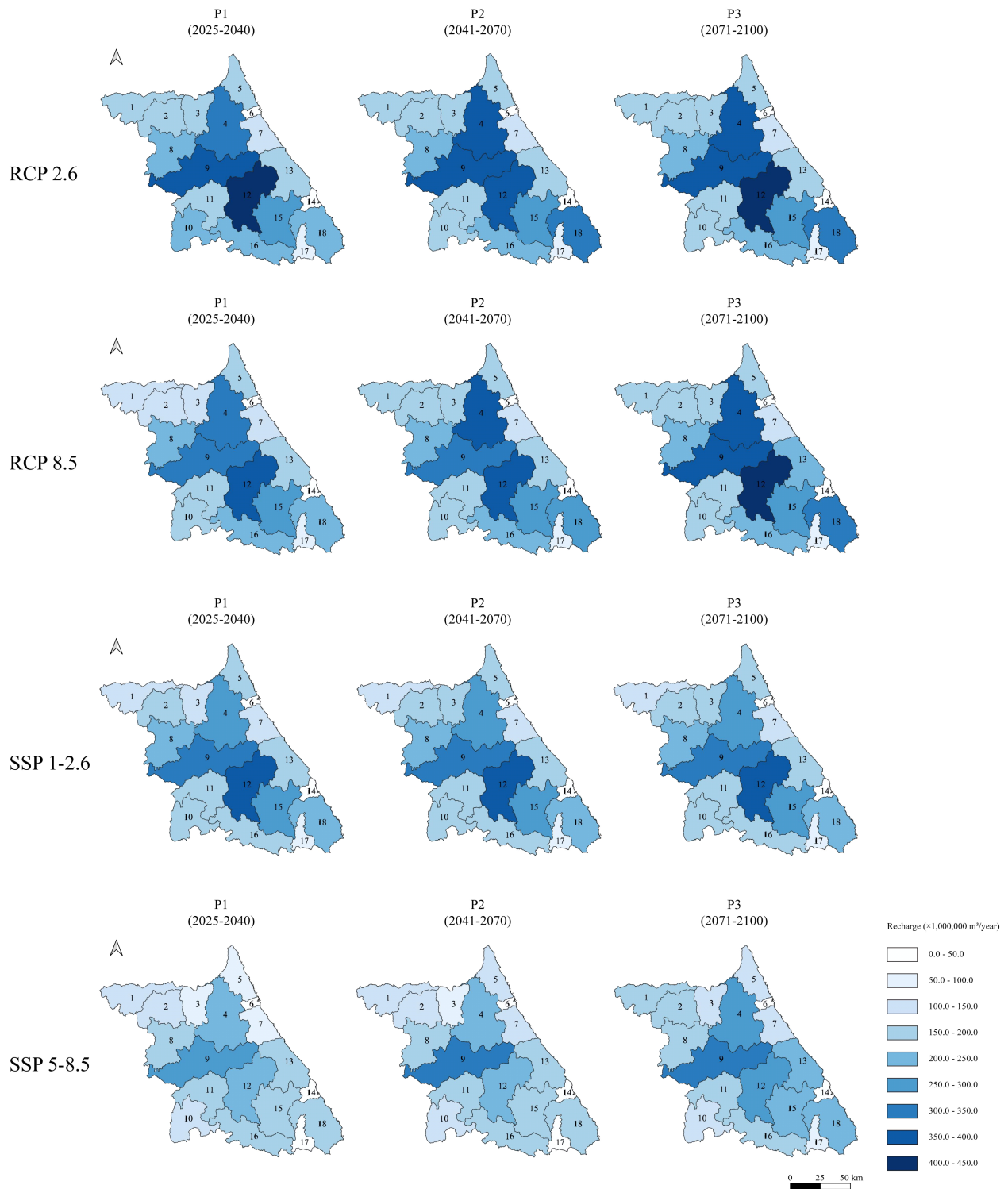


Fig. 8. Regional recharge predicted by RCP and SSP scenarios in Gangwon state. 1=Cheorwon, 2=Hwacheon, 3=Yanggu, 4=Inje, 5=Goseong, 6=Sokcho, 7=Yangyang, 8=Chuncheon, 9=Hongcheon, 10=Wonju, 11=Hoengseong, 12=Pyeongchang, 13= Gangneung, 14=Donghae, 15=Jeongseon, 16=Yeongwol, 17=Taebaek, 18=Samcheok.

27, 30, 28회 발생할 것으로 예측되며 2025~2100년 기간의 각각 42.1, 35.5, 39.5, 36.8%에 해당한다. RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 시나리오에 따른 함양량의 변동폭은 각각 2,339, 3,081, 3,277, 2,664 백만 m^3 /년으로 시나리오별로 뚜렷한 차이를 보인다.

2025~2100년까지 SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5 시나리오에 따른 함양량이 연강수량의 평년값을 이용하여 계산된 함양량보다 적은 경우는 각각 27, 17, 21, 28회 발생할 것으로 예측되며 2025~2100년 기간의 각각 37.5, 22.4, 27.6, 26.8%에 해당한다. SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 시나리오에서는 RCP 시나리오보다 각각 6.6, 13.2, 11.8% 함양량이 현재보다 감소하는 것으로 예측되었으나 SSP5-8.5 시나리오에서는 현재 함양량보다 적은 경우가 RCP 시나리오와 동일하게 예측되었다. SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5 시나리오로부터 예측된 함양량의 변동폭은 각각 2,454, 3,031, 2,779, 2,813 백만 m^3 /년으로 분석되었다. RCP 시나리오에 비해서 SSP1-2.6과 SSP5-8.5 시나리오에 따른 함양량의 변동폭은 증가하였고 SSP2-4.5와 SSP3-7.0 시나리오에서는 감소하였다.

지역별로는 RCP와 SSP 시나리오에서 모두 영동보다는 영서지역의 함양량이 상대적으로 많고 특히 중부 지역의 함양량이 상대적으로 많을 것으로 분석되었다(그림 8). 전체적으로는 SSP 시나리오에 따른 함양량은 RCP 시나리오보다 감소할 것으로 예측되었다. SSP 시나리오의 전반기(P1)에서 후반기(P3)로 갈수록 지하수 함양량은 증가하고 SSP5-8.5보다 SSP1-2.6 시나리오의 함양량이 더 증가할 것으로 평가되었다. 또한 지역적으로 함양량의 편차가 매우 클 것으로 예측되었다.

지하수 함양량은 온실가스의 농도에 영향을 받을 수 있지만 SSP 시나리오를 적용하여도 강원지역 지하수 함양량은 전체적으로 감소하거나 증가하는 경향이 뚜렷이 나타나지 않는다. 그러나 RCP 시나리오뿐만 아니라 SSP 시나리오에서 함양량의 변동폭이 큰 것은 매년 함양량이 큰 차이를 보일 수 있다는 것을 의미하므로 지하수 자원을 체계적으로 관리하고 효율적으로 사용하는 것이 필요하다. 특히 대수층이 잘 발달하지 않는 지역이나 지형적인 문제로 인해 상수도 보급이 어려운 산악지역에서는 지하수 자원에 대한 관리 및 활용방안을 마련하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

5. 결론

IPCC 제6차 보고서에 적용된 SSP 시나리오에 따른 기후변화를 고려하여 강원지역의 함양량을 평가하였다. 1993~2020년까지 강원지역의 기온은 증가하였고 연강수량은 매

년 큰 차이를 보이지만 전체적으로는 감소하는 경향을 보인다. 이러한 기후조건으로 인해 강원지역의 가뭄의 발생 빈도가 증가한 것으로 여겨진다. SSP 시나리오에 따르면 2025~2100년까지 강원지역의 기온은 현재 기온보다 2.4~2.8°C 증가할 것으로 예측되고 연강수량은 전체적으로 증가하지만 매년 변화폭이 현재보다 더 커질 것으로 분석된다. 전체적으로 연강수량이 증가하므로 강원지역 전체를 대상으로는 가뭄 발생빈도는 줄어들고 발생 강도는 감소할 것으로 평가되었으나 지역적인 편차는 매우 클 것으로 예측되었다. SSP 시나리오에 따른 기후변화를 반영하면 2025~2100년까지 매년 함양량이 큰 차이를 보여 증가 또는 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타나지 않았지만 22.4~37.5%에 해당하는 기간의 함양량이 현재보다 감소할 것으로 분석된다. 그러므로 가뭄으로 인한 물부족을 해결하기 위해서는 지하수 수자원을 체계적으로 관리하고 효율적으로 사용할 수 있는 방안을 마련하는 것이 필요하며 특히 지하수 산출성이 낮은 지역이나 상수도미급수 지역을 대한 대책을 수립하는 것이 필요하다.

감사의 글

이 연구는 2023년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초 과학 연구 프로그램에 의해 지원되었습니다(No. 2019R1A6A1A03033167 and 2019R111A2A01057002).

REFERENCES

- Amanambu, A.C., Obarein, O.A., Mossa, J., Li, L., Ayeni, S.S., Balogun, O., Oyebamiji, A. and Ochege, F.U., 2020, Groundwater system and climate change: Present status and future considerations. *Journal of Hydrology*, 589, 125163.
- Choi, G., 2021, Characteristics of groundwater flow with future climate change. Ph.D. thesis, Kyungil University, Gyeongsan, Gyeongsangbuk-do, Republic of Korea, 122 p (in Korean with English abstract).
- CIP (Climate Information Portal), 2024, <http://www.climate.go.kr/home/> (January 9, 2024).
- Dai, A., Lamb, P.J., Trenberth, K.E., Hulme, M., Jones, P.D. and Xie, P., 2004, The recent Sahel drought is real. *International Journal of Climatology*, 24, 1323-1331.
- Doll, B.B., Simon, D.A. and Daw, N.D., 2012, The ubiquity of model-based reinforcement learning. *Current Opinion in Neurobiology*, 22, 1075-1081.
- Gangwon Province and KOGGA (Korea Groundwater and Geothermal energy Association), 2015, Gangwon Province Groundwater Management Plan Report. Gangwon Province, Chuncheon, 507 p (in Korean).
- Ha, K., Park, C. and Ko, K.S., 2018, Groundwater R&D and utilization according to climate change. 2018 Fall Joint Conference of the Geological Sciences (Abstracts), Gyeongju, October 24-

- 27, 155 p (in Korean).
- Howard, G., Calow, R., Macdonald, A. and Bartram, J., 2016, Climate Change and Water and Sanitation: Likely Impacts and Emerging Trends for Action. *Annual Review of Environment and Resources*, 41, 253-276.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2023, Summary for policymakers, In: Core Writing Team, Lee, H., and Romero, J. (eds.), *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*. Geneva, Switzerland, 1-34.
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2017, Gangwon-do climate change outlook report in preparation for the new climate regime. Korea Meteorological Administration, Seoul, 106 p (in Korean).
- KOSIS (Korean Statistical Information Service), 2024, https://kosis.kr/statisticsList/statisticsListIndex.do?vwcd=MT_OTITL E&menuId=M_01_02 (January 9, 2024).
- Lee, D.J., Ban, W.S., Kim, J.S. and Whang, Y.J., 2021, Outlook on water supply and demand and efficient use of water resources in the Yeongdong region of Gangwon state. *Water for Future*, 54, 50-55 (in Korean).
- Lee, J.H., Park, S.Y., Kim, M.G. and Chung, I.M., 2021, Hydrological drought analysis and monitoring using multiple drought indices: The case of Mulrocheon watershed. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 41, 477-484 (in Korean with English abstract).
- Lee, M.J., Lee, J.H., Jeon, S.W. and Hwang, H.J., 2010, Review of Policy Direction and Coupled Model Development between Groundwater Recharge Quantity and Climate Change. *Journal of Environmental Policy*, 9, 157-184 (in Korean with English abstract).
- Marcott, S.A., Shakun, J.D., Clark, P.U. and Mix, A.C., 2013, A Reconstruction of Regional and Global Temperature for the Past 11,300 Years. *Science*, 339, 1198-1201.
- Ministry of Environment, 2023, The 4th comprehensive plan of groundwater management. Ministry of Environment, 177 p (in Korean).
- Related ministries jointly, 2021, The 1st comprehensive plan of national water management. Related ministries jointly, 205 p (in Korean).
- Related ministries jointly, 2023, Abnormal climate report in 2022. Korea Meteorological Administration, 167 p (in Korean).
- Schellnhuber, H.J., Hare, W., Serdeczny, O., Adams, S., Coumou, D., Frieler, K., Martin, M., Otto, M.L., Perrette, M., Robinson, A., Rocha, M., Schaeffer, M., Schewe, J., Wang, X. and Warszawski, L., 2012, Turn down the heat : why a 4 degree celsius warmer world must be avoided: Executive summary. Working Paper, 63219, The World Bank, Washington, 84 p.
- Seo, J., Chi, H., Kim, H.J. and Kim, Y., 2022, Hydrological drought risk assessment for climate change adaptation in South Korea. *Journal of Korea Water Resources Association*, 55, 421-435 (in Korean with English abstract).
- Suk, H., Kim, Y.C., Koh, D.C., Lee, E., Lee, S.H. and Kim, S.K., 2022, Development of climate change adaption technologies for securing and utilizing large-scale groundwater resources. 2022 Fall Joint Conference of the Geological Sciences (Abstracts), Changwon, October 25-28, 122 p (in Korean).