

# 고해상도 SSP 시나리오 기반의 우리나라 미래 태양광 잠재 발전량 전망

김진옥\*<sup>†</sup> · 김도현\*\* · 김태준\*\* · 정주용\*\*\* · 변영화\*\*\*\* · 서명석\*\*\*\*\*

\*국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구사, \*\*국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구원, \*\*\*국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구관, \*\*\*\*국립기상과학원 기후변화예측연구팀 팀장, \*\*\*\*\*공주대학교 대기과학과 교수

## Future projection of photovoltaic potential over South Korea based on high-resolution shared socioeconomic pathways (SSP) scenarios

Kim, Jin-Uk\*<sup>†</sup> · Kim, Do-Hyun\*\* · Kim, Tae-Jun\*\* · Chung, Chu-Yong\*\*\* · Byun, Young-Hwa\*\*\*\* and Suh, Myoung-Seok\*\*\*\*\*

\*Research Scientist, Climate Change Research Team, National Institute of Meteorological Sciences (NIMS), Jeju, Korea

\*\*Researcher, Climate Change Research Team, NIMS, Jeju, Korea

\*\*\*Senior Research Scientist, Climate Change Research Team, NIMS, Jeju, Korea

\*\*\*\*Director, Climate Change Research Team, NIMS, Jeju, Korea

\*\*\*\*\*Professor, Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Kongju, Korea

### ABSTRACT

The study predicts the future photovoltaic power generation potential (PVpot) changes over South Korea based on high-resolution climate change scenarios. According to the four Shared Socioeconomic Pathways (SSP) scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5), at the late 21st century, surface down-welling shortwave radiation, which has a major impact on PVpot, is expected to increase (by about +0.7 ~ +3.5 W/m<sup>2</sup>) compared to the present-day. However, the increase or decrease of PVpot depends on the level of emissions in the future. In the low-emissions scenario, PVpot is expected to increase (by about +1.3%), while that in the high-emissions scenarios, PVpot isare expected to decrease (by about -0.7 ~ -2.0%). As the temperature increases significantly, the temperature of the solar cell panels increase, and the performance ratio of PVpot decreases. This means that, even though the surface down-welling shortwave radiation increases, the increase in temperature may offset the positive impact on PVpot. Seasonally, PVpot is expected to increase (by about +2.3 ~ +4.0%) in summer and decrease (by about -3.6 ~ -7.1%) in winter. Overall, this study highlights the importance of considering the impact of climate change on solar energy. It also emphasizes the need to adopt low-emissions policies to mitigate the negative effects of climate change on renewable energy generation potential.

Key words: Photovoltaics Potential, SSP Scenarios, South Korea, High-resolution

## 1. 서론

최근 10년(2011 ~ 2020) 동안 전 지구 표면 온도는 과거(1850 ~ 1900)에 비해 1.09°C [0.95°C ~ 1.20°C] 상승하여, 지구 온난화가 급격히 진행되고 있다(IPCC, 2023). 이는 인위적으로 배출된 온실가스가 주요 원인이며, 이를

인식하고 대응하기 위해 기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change; UNFCCC)에 서는 1997년 교토의정서를 채택하였고, 2015년 신기후체제 합의(파리협약) 등 국제적인 노력이 계속되고 있다. 우리나라도 이에 발맞추어 2020년에 “2050 탄소중립”을 선언하고, 인간 활동에 의한 기온 상승을 1.5°C로 제한하기

<sup>†</sup>Corresponding author : [jukim86@korea.kr](mailto:jukim86@korea.kr) (33 Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, Korea. Tel. +82-64-780-6783)

ORCID 김진옥 0000-0001-9892-9915  
김도현 0000-0002-3829-5532  
김태준 0000-0002-5452-4796

정주용 0000-0001-5330-9456  
변영화 0000-0002-6074-4461  
서명석 0000-0002-3827-0044

위한 탄소배출 감축 노력을 계속하고 있다.

신재생 에너지 사용의 확대는 탄소배출 감축 노력의 하나로, 전 세계적으로 확장되고 있다. 그러나 우리나라의 신재생 에너지 사용 비율은 2021년 기준 약 7%로, 화력 발전(33%)과 원자력 발전(27%) 등에 비해 상당히 부족한 상황이다(KEPCO, 2022). 또한, 독일, 영국, 이탈리아, 중국 등에 비해 신재생 에너지 발전 비율이 매우 낮다. 따라서 정부는 2017년부터 재생에너지 3020 이행계획을 수립하여 2030년까지 국내 총 발전량의 20%를 신재생 에너지로 공급하기 위해 노력하고 있으며, 태양광 발전의 보급은 이러한 계획의 하나로 점차 확대되고 있다. 이는 태양광 에너지가 대륙 전체에서 비교적 연중 일관되게 유지되며, 강한 몬순 기후의 특성이 나타나는 중위도 지역에서도 안정적으로 공급될 수 있기 때문이다(Sterl et al., 2018).

태양광 발전의 보급과 확대에 따른 기후변화에 따른 태양광 발전량의 미래 전망과 관련한 관심이 증가하고 있다. 이에 따라 유럽, 아프리카 등 전 세계적으로 태양광 발전에 대한 직·간접적인 영향을 고려하여 미래 태양광 잠재 발전량(Photovoltaics power generation potential; PVpot)을 예측하는 연구가 이루어지고 있다(Bichet et al., 2019; Jerez et al., 2015). 특히, 태양광 발전량은 일사량에 의한 직접적인 영향과 발전의 효율성과 관련된 기온 및 풍속에 의한 간접적인 영향으로 구분되므로, 최근에는 이러한 영향을 고려한 동아시아 지역의 태양광 발전 전망 연구도 이루어졌다(Park et al., 2022). 이 연구에 따르면, RCP8.5 시나리오에서 21세기 말 동아시아의 태양광 발전량은 겨울과 여름에 각각 4.3%, 1.5% 감소할 것으로 전망되었다. 그러나, 이러한 기존의 연구와는 달리 우리나라 지역에 대하여 상세한 지역별, 계절별 태양광 발전량 예측 연구는 아직 부족한 상황이다.

이에 따라 이 연구에서는 우리나라를 행정구역을 기반으로 6개 권역으로 나누어 계절별로 상세하게 미래 태양광 발전량을 전망하였다. 이를 위해 공통사회경제경로(Shared Socioeconomic Pathways; SSP) 4종을 기반으로 새롭게 산출된 남한상세 기후변화 시나리오를 사용하였다. 또한 1 km 해상도로 남한지역을 상세화하기 위하여 25 km 해상도의 국제 지역기후 상세화 프로젝트(COordinated Regional climate Downscaling Experiment; CORDEX)-동아시아 2단계 사업의 5종 모델자료를 입력 자료로 사용하였다. 이 연구의 2장에는 남한상세 시나리오 산출의 방법과 태양광 잠재 발전량 전망 방법의 자세

한 사항을 설명하였고, 3장에는 미래 태양광 발전량 전망 결과와 함께 태양광 발전량에 영향을 미치는 3가지 기후 요소의 전망 결과를 제시하였다. 마지막으로, 4장에서 이 연구와 관련된 전반적인 내용을 요약하였다.

## 2. 자료 및 연구 방법

### 2.1. 고해상도 격자형 관측자료 및 시나리오 산출

이 연구에서는 고해상도(수평해상도 1 km)의 격자형 관측자료와 이를 기반으로 산출된 고해상도 남한상세 기후변화 시나리오를 사용하여 우리나라의 태양광 잠재 발전량을 지역별로 상세하게 전망하였다. 격자형 관측자료는 Modified Korean-Parameter elevation Regressions an Independent Slopes Model (MK-PRISM)이라는 통계적 상세화 기법을 사용하여 우리나라의 복잡한 지형효과를 반영하여 산출되었다(Kim et al., 2012, 2013, 2022; Park et al., 2014). 이 연구에서는 MK-PRISM 기반의 월 평균기온, 월 평균 풍속, 월 평균 일사량 자료를 사용하였으며, 이 중에서 풍속과 일사량 자료는 2022년에 최초로 공개된 자료이다. 기온과 풍속 자료를 산출하기 위하여 최근 20년간(2000 ~ 2019) 기상청 605개 관측소에서 관측한 일 평균기온과 일 평균 풍속 자료가 사용되었다(Fig. 1a). 일사량 자료는 비교적 최근 전국적으로 광범위하게 관측이 개시되어, 최근 6년간(2014 ~ 2019) 기상청(45개소)과 농촌진흥청(185개소)에서 복합적으로 관측된 자료가 사용되었다(Fig. 1b). MK-PRISM에 사용된 관측소의 수는 모든 기간 및 변수에 대하여 동일하지 않을 수 있는데, 이는 관측소의 결측과 최근 관측소 수가 증가하는 것이 주요 원인이다.

이 연구에서는 자료 기간에 대한 일관성을 위하여 관측 기간이 가장 짧은 일사량을 기준으로 현재 기간(2014 ~ 2019년)에 대한 관측 자료를 사용하여 분석하였다. 이를 기반으로 현재 기후 평년값을 집계하였고, 계절 평균값과 연 평균값을 제시하였다. 계절은 봄(3월 ~ 5월), 여름(6월 ~ 8월), 가을(9월 ~ 11월), 겨울(12월 ~ 다음 해 2월)로 구분되며, 2018년 겨울은 2018년 12월과 2019년 1월, 2월의 평균으로 집계되어 현재 기간의 기후 평년값은 총 5년(2014 ~ 2018)에 대해 평균 된 값으로 제시하였다.

우리나라의 상세 미래 기후변화 전망 분석을 위하여 다음의 총 3단계의 과정을 거쳐 고해상도 기후변화 시나리오를 산출하였다.

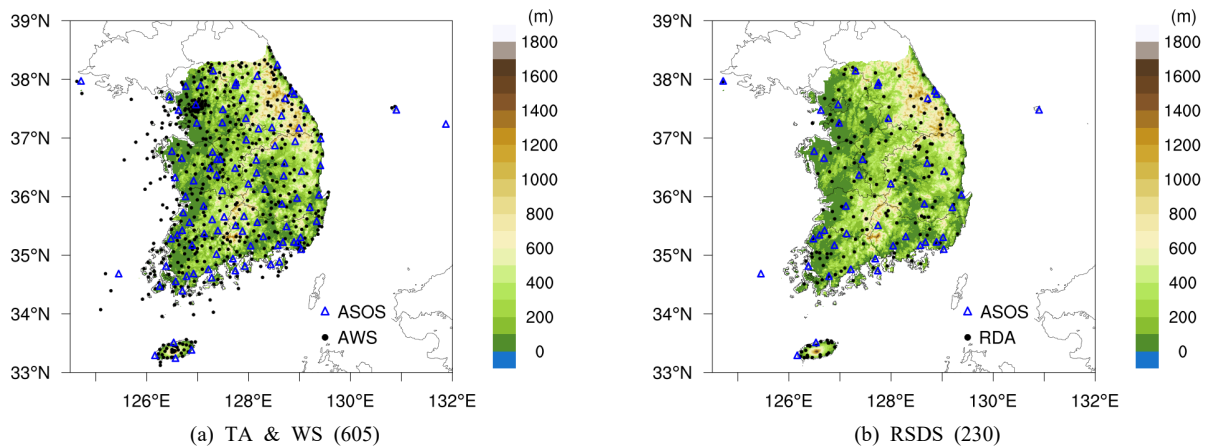


Fig. 1. Distribution of observation stations and DEM elevation (shading) with 1 km resolution over South Korea. Blue triangles and black circles indicate ASOS and AWS (or RDA), respectively.

- ① 전지구 시나리오(135 km) - 기후변화에 관한 정부 간 패널 (Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC) 6차 평가보고서 (6th Assessment Report; AR6) 참여의 일환으로 한국과 영국 기상청 간 협력을 통해 공동 활용하는 UK Earth System Model (UKESM) 기후예측모델을 기반으로 산출 (Sellar et al., 2019)
- ② 동아시아 시나리오(25 km) - CORDEX-동아시아 2단계에 참여한 지역기후 예측모델 5종(Hadley Centre Global Environmental Model version 3 regional climate model (HadGEM3-RA), Consortium for Small-scale Modeling (COSMO)-Climate Limited-area Modeling (CLM) (CCLM), Weather Research and Forecasting (WRF), Regional Climate Model version 4.0 (RegCM), Global/Regional Integrated Model system (GRIMs))을 기반으로 UKESM 전지구 시나리오를 동아시아 지역에 대하여 역학적으로 상세화하여 산출(Davies et al., 2005; Giorgi et al., 2012; Hong et al., 2013; Powers et al., 2017; Rockel et al., 2008)
- ③ 남한상세 시나리오(1 km) - 5개 지역기후 예측모델에서 산출된 동아시아 시나리오에 남한 지역의 상세한 지형효과를 반영하여 PRISM-based Dynamic downscaling Error correction (PRIDE) 모델을 기반으로 통계적으로 상세화하여 산출(Kim and Kim, 2018; Kim et al., 2016, 2022)

상술된 과정을 통해 산출된 남한상세 기후변화 시나리오는 2021년부터 2100년까지 80년간의 변화를 포함하고 있다. 또한 산출된 자료를 사용하여 현재(2014 ~ 2018년) 대비 21세기 말(2070 ~ 2099년)의 변화를 전망하였다. 남한상세 기후변화 시나리오는 지역기후 모델의 일별 계절 사이클 대신에 관측의 일별 계절사이클을 사용하여 기후 모델에 포함된 계통오차(systematic error)를 제거한 자료이다. 따라서 PRIDE의 결과는 현재 기간(2000 ~ 2017년)에 대하여 지역기후 예측모델 결과에 비해 관측에 가까운 값을 나타내며, 미래 기간에 대하여 온실가스 배출로 인한 기후강제력에 대한 효과는 유지한 자료이다(Yoon et al., 2020).

미래 온실가스 배출로 인한 반응을 다방면으로 예측하기 위하여 IPCC 6차 평가보고서의 표준 온실가스 농도 (Shared Socioeconomic Pathways; SSP) 시나리오 4종을 기반으로 미래 변화를 전망하였다. 사용한 SSP 4종 중 ‘저탄소 시나리오’인 SSP1-2.6은 「재생에너지 기술 발달로 화석연료 사용이 최소화되고 친환경적으로 지속가능한 경제성장」을 가정하며, ‘중간단계 시나리오’인 SSP2-4.5는 「기후변화 완화 및 사회경제 발전 정도가 중간 정도」라고 가정한다. ‘고탄소 시나리오’인 SSP3-7.0과 SSP5-8.5는 각각 「기후변화 완화 정책에 소극적이며 기술 개발이 늦어 기후변화에 취약한 사회구조」 및 「산업기술의 빠른 발전에 중심을 두어 화석연료 사용이 높고 도시 위주의 무분별한 개발 확대」를 가정한다. 또한 우리나라의 상세한 지역별 미래 변화를 전망하기 위하여 우리나라를 6개의 권역으로 구분하여 분석하였다. 6개 권역은 각

각 수도권(CP; Capital area), 강원권(GW; GangWon-do), 충청권(CC; ChungCheong-do), 전라권(JL; Jeolla-do), 경상권(GS; GyeongSang-do), 제주권(JJ; JeJu-do)으로 구분되며, 각 권역에 대한 정보는 Fig. 3에서 확인할 수 있다.

## 2.2. 태양광 잠재 발전량 분석

태양광 발전은 일반적으로 직달일사량(surface down-welling shortwave radiation; RSDS)에 가장 큰 영향을 받고 태양광 패널은 기온(mean temperature; TA) 및 풍속(surface wind speed; WS)의 변화에 영향을 받으며, 이에 따라 발전의 효율성이 달라진다(Barykina and Hammer, 2017).

따라서 이 연구에서는 일사량, 기온, 풍속을 활용하여 태양광 발전량을 예측하는 Jerez et al. (2015)의 방법을 기반으로 우리나라 지역별 태양광 잠재 발전량(Photovoltaics power generation potential; PVpot)의 미래 변화를 전망하였다. PVpot은 무차원의 지수이며, 계산하는 자세한 식은 다음과 같다.

$$PVpot(t) = P_R(t) \times RSDS(t) / RSDS_{STC} \quad (1)$$

식 (1)에서 STC는 International Electrotechnical Commission (IEC)의 표준 실험 조건(Standard Test Conditions)으로  $RSDS_{STC} = 1000 \text{ Wm}^{-2}$ 와 같이 정의된다.  $P_R$ 은 태양광 발전의 효율이고 기온이 낮고 풍속이 강할수록 효율이 증가하며, 다음과 같이 계산된다.

$$P_R(t) = 1 + \gamma [T_{cell}(t) - T_{STC}] \quad (2)$$

식 (2)에서  $T_{STC}$ 는 표준기온인  $25^\circ\text{C}$ 이며,  $\gamma$ 는 온도효율 계수로 실리콘 태양광 패널의 특성을 고려하여  $-0.005^\circ\text{C}^{-1}$ 로 고정하였다(Tonui and Tripanagnostopoulos, 2008). 이 식에서 태양광 패널의 온도로 정의되는  $T_{cell}$ 은  $25^\circ\text{C}$ 보다 높을수록 패널의 효율이 감소하여 PVpot이 낮아진다.  $T_{cell}$ 은 기온, 일사량, 풍속의 함수이며 다음과 같이 계산된다.

$$T_{cell}(t) = c_1 + c_2TA(t) + c_3RSDS(t) + c_4WS(t) \quad (3)$$

식 (3)에서 각 기후 요소의 계수는  $c_1=4.3^\circ\text{C}$ ,  $c_2=0.943$ ,  $c_3=0.028^\circ\text{Cm}^2 \text{ W}^{-1}$ ,  $c_4=-1.528^\circ\text{Csm}^{-1}$ 로 정의되며, 이는 TamizhMani et al. (2003)과 Chennai et al. (2007)의 연구

에서 실험을 통해 계산된 수치이다.

PVpot에 미치는 일사량, 기온, 풍속 각각의 기여도는 식 (1) ~ (3)의 정리를 통해 다음과 같이 구분할 수 있다.

$$PVpot(t) = \alpha_1RSDS + \alpha_2RSDS^2 + \alpha_3RSDS \cdot TA + \alpha_4RSDS \cdot WS \quad (4)$$

식 (4)에서  $\alpha_1=1.1035 \times 10^{-3}$ ,  $\alpha_2=-1.4 \times 10^{-7}$ ,  $\alpha_3=-4.715 \times 10^{-6}$ ,  $\alpha_4=7.64 \times 10^{-6}$ 로 정의되며, PVpot의 변화는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \Delta PVpot(t) = & \Delta RSDS(\alpha_1 + \alpha_2 \Delta RSDS + 2\alpha_2 RSDS \\ & + \alpha_3 TA + \alpha_4 WS) + \alpha_3 RSDS \cdot \Delta TA \\ & + \alpha_4 RSDS \cdot \Delta WS + \alpha_3 \Delta RSDS \cdot TA \\ & + \alpha_4 \Delta RSDS \cdot WS \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)를 통해서 일사량, 기온, 풍속 각각이 PVpot 변화에 미치는 영향을 구분할 수 있다. 예를 들어, 기온만의 기여도를 확인하기 위해서는  $\Delta RSDS = \Delta WS = 0$ 으로 가정하여 계산할 수 있다.

PVpot에 직접적으로 영향을 미치는 일사량은 강수와의 상관관계를 갖는 것으로 알려져 있어, 강수는 PVpot에 간접적인 영향을 미치며 복사모델에 입력자료로 사용되어 태양광 발전량 예측에 활용된다(Jee et al., 2017; Razagui et al., 2020). 따라서 이 연구에서는 태양광 발전량과 강수일수 간의 관계도 살펴보았다. 남한상세 기후변화 시나리오에서는 일 강수량 자료가 산출되므로, 이를 기반으로 일 강수량이 0.1 mm 이상인 날을 강수가 내린 날로 정의하였고, 이를 바탕으로 PVpot과 강수일수 간의 상관관계를 분석하였다.

## 3. 결과

### 3.1. 고해상도(1 km) 격자형 관측자료 성능평가

이 절에서는 MK-PRISM이라는 객관분석 기법을 사용하여 산출된 1 km 해상도의 격자형 관측 데이터에서 월별 기후값을 분석하고, 이들에 대한 모의 성능평가를 수행하였다. 이 연구에서 사용된 모든 기후 요소는 산출 기간이 가장 짧은 일사량을 기준으로, 2014 ~ 2019년을 현재 기후값의 기준 기간으로 선정하였다. Fig. 2는 기온, 풍속, 일사량의 월별 현재 기후값을 남한 전체 지역에 대하여

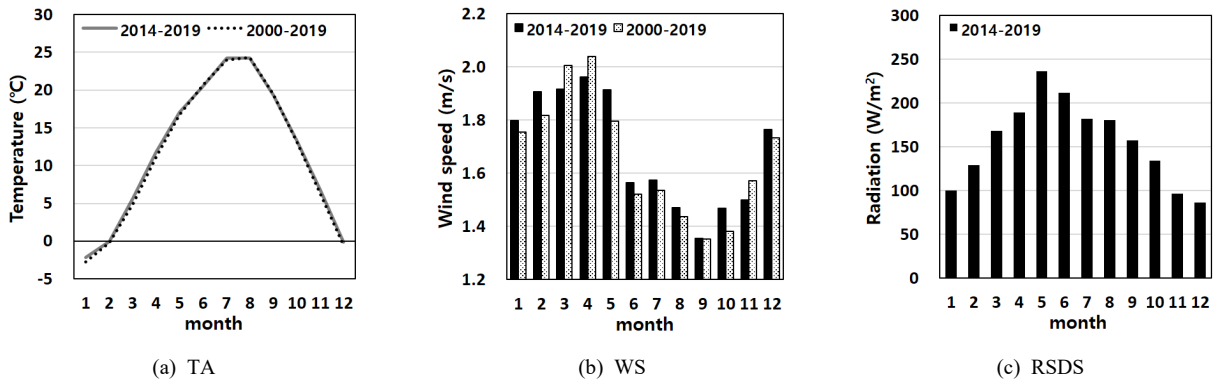


Fig. 2. Monthly mean temperature (TA), surface wind speed (WS), and surface down-welling shortwave radiation (RSDS) over South Korea for the present-day.

Table 1. Cross-validation (Jack-knife) results of observed and estimated values for mean temperature (TA), surface wind speed (WS), and surface down-welling shortwave radiation (RSDS).

	TA (°C) (2000 ~ 2019)		WS (m/s) (2000 ~ 2019)		RSDS (W/m <sup>2</sup> ) (2014 ~ 2019)	
	Bias	RMSE	Bias	RMSE	Bias	RMSE
JAN.	0.04	0.97	0.02	1.23	0.35	4.05
FEB.	0.04	0.87	0.01	1.12	0.23	4.86
MAR.	0.04	0.80	0.01	1.12	0.23	6.02
ARP.	0.03	0.81	0.01	1.06	0.23	7.06
MAY.	0.01	0.86	0.01	0.97	0.23	6.37
JUN.	0.01	0.81	0.01	0.84	0.12	5.90
JUL.	0.02	0.79	0.00	0.95	0.23	5.90
AUG.	0.03	0.76	0.01	0.92	0.12	6.94
SEP.	0.03	0.78	0.01	0.92	0.23	5.32
OCT.	0.03	0.92	0.01	0.97	0.12	4.86
NOV.	0.04	0.95	0.01	1.11	0.23	4.51
DEC.	0.04	0.96	0.01	1.21	0.23	4.40
<b>AVE.</b>	<b>0.03</b>	<b>0.86</b>	<b>0.01</b>	<b>1.04</b>	<b>0.21</b>	<b>5.52</b>

평균하여 나타낸 것이다. 기온과 풍속의 경우, 격자형 관측자료의 전체 보유기간(2000 ~ 2019년)에 대한 평균값도 같이 제시하였다. 월별 기온은 1월에 최저값, 8월에 최고값을 보이며, 풍속은 겨울부터 봄까지 비교적 높은 값이 나타난다. 일사량은 5월에 최대값이 나타난 후, 12월까지 감소하는 특성이 나타난다. 20년 평균값(2000 ~ 2019)과 현재 기후값(2014 ~ 2019)을 비교해 보면, 기온은 봄철에 20년 평균값에 비해 현재 기후값이 크게 나타나며, 풍속은 3월, 4월, 11월을 제외한 모든 월에서 20년 평균값에 비해 현재 기후값이 크게 나타난다.

격자형 관측자료의 모의 성능 평가는 자료가 산출된 전체 기간에 대하여 수행하였다. 평가 방법은 검증의 대상

이 되는 관측소의 값을 결측으로 가정한 후, MK-PRISM을 기반으로 객관분석을 수행하여 추정된 관측소 값과 실제 관측소 값을 비교하는 방식(Jack-knife)을 사용하였다. 이러한 과정을 기온과 풍속은 20년간, 일사량은 6년간 사용 가능한 모든 관측소에 적용하였고 그 결과를 월별로 평균하여 Table 1에 제시하였다. 기온의 편차(bias)는 전반적으로 추정된 관측값이 실제 관측값보다 다소 높으며, 겨울철에 편차가 더 큰 것으로 나타났다. 풍속의 편차는 양의 값으로 나타나며, 겨울철에 비교적 편차가 크게 나타났다. 일사량의 경우에도 모든 월에서 양의 편차가 나타나며, 겨울철에 편차가 더 큰 것으로 나타났다.

Table 2. Future changes in the PVpot(%) at the late 21st century (2070~2099) compared to the present-day (2014~2018).

Region	Scenario	ANN	MAM	JJA	SON	DJF
CP	SSP1-2.6	+0.7 (±0.7)	+1.6 (±1.6)	+0.6 (±2.3)	+0.8 (±2.4)	-3.9 (±2.9)
	SSP2-4.5	-0.7 (±1.4)	-1.1 (±2.2)	-0.6 (±3.5)	-1.6 (±2.4)	-4.9 (±3.9)
	SSP3-7.0	-2.8 (±2.1)	-4.4 (±4.4)	0.0 (±2.9)	-2.4 (±3.3)	-8.7 (±5.8)
	SSP5-8.5	-1.4 (±2.8)	-2.7 (±4.4)	+1.8 (±2.9)	-1.6 (±3.3)	-8.7 (±4.9)
GW	SSP1-2.6	+0.7 (±1.3)	+1.0 (±1.5)	+0.6 (±2.8)	+1.6 (±3.3)	-4.6 (±2.8)
	SSP2-4.5	-0.7 (±1.3)	-1.5 (±2.6)	0.0 (±4.0)	-0.8 (±2.4)	-4.6 (±3.7)
	SSP3-7.0	-2.7 (±2.0)	-3.6 (±4.1)	+1.1 (±3.4)	-2.4 (±3.3)	-9.2 (±4.6)
	SSP5-8.5	-1.3 (±2.7)	-2.6 (±4.6)	+1.7 (±4.0)	-0.8 (±4.1)	-9.2 (±4.6)
CC	SSP1-2.6	+1.3 (±0.7)	+1.5 (±1.0)	+2.8 (±2.2)	+1.6 (±2.3)	-3.6 (±2.7)
	SSP2-4.5	-0.7 (±1.3)	-1.5 (±1.0)	+1.7 (±3.9)	-0.8 (±2.3)	-3.6 (±3.6)
	SSP3-7.0	-2.0 (±2.0)	-4.1 (±2.6)	+1.1 (±3.9)	-2.3 (±3.1)	-6.3 (±5.4)
	SSP5-8.5	-1.3 (±2.6)	-3.1 (±3.1)	+2.8 (±3.9)	-1.6 (±3.9)	-7.2 (±4.5)
JL	SSP1-2.6	+1.3 (±0.6)	+0.5 (±0.5)	+3.3 (±3.3)	+2.2 (±3.0)	-1.8 (±2.7)
	SSP2-4.5	0.0 (±1.3)	-2.0 (±1.0)	+2.2 (±4.9)	0.0 (±2.2)	-1.8 (±3.5)
	SSP3-7.0	-1.9 (±1.9)	-5.5 (±2.5)	+2.2 (±4.4)	-0.7 (±3.0)	-4.4 (±5.3)
	SSP5-8.5	-1.3 (±2.5)	-4.0 (±3.0)	+3.3 (±4.9)	-0.7 (±3.7)	-5.3 (±5.3)
GS	SSP1-2.6	+2.0 (±1.3)	+1.0 (±0.5)	+3.4 (±3.4)	+3.2 (±4.0)	-1.7 (±1.7)
	SSP2-4.5	+0.7 (±1.3)	-1.5 (±1.5)	+3.4 (±4.5)	+1.6 (±2.4)	-2.6 (±2.6)
	SSP3-7.0	-1.3 (±1.3)	-4.1 (±2.6)	+3.4 (±4.5)	0.0 (±3.2)	-5.2 (±3.4)
	SSP5-8.5	0.0 (±2.6)	-3.1 (±3.1)	+4.5 (±5.1)	+0.8 (±4.0)	-6.0 (±3.4)
JJ	SSP1-2.6	+4.3 (±1.4)	+3.4 (±1.1)	+3.5 (±2.4)	+5.8 (±4.2)	+3.4 (±2.3)
	SSP2-4.5	+2.9 (±2.2)	+1.1 (±1.7)	+4.1 (±4.1)	+4.2 (±3.3)	+2.3 (±3.4)
	SSP3-7.0	+1.4 (±2.2)	-2.3 (±2.3)	+4.1 (±4.1)	+3.3 (±3.3)	+2.3 (±5.7)
	SSP5-8.5	+2.2 (±2.9)	-1.1 (±2.3)	+4.7 (±5.3)	+4.2 (±4.2)	+1.1 (±6.9)
KOR	SSP1-2.6	+1.3 (±0.7)	+1.0 (±1.0)	+2.8 (±2.8)	+2.4 (±3.2)	-3.6 (±1.8)
	SSP2-4.5	0.0 (±1.3)	-1.5 (±1.5)	+2.3 (±4.0)	0.0 (±2.4)	-3.6 (±2.7)
	SSP3-7.0	-2.0 (±2.0)	-4.6 (±3.1)	+2.3 (±4.0)	-0.8 (±3.2)	-7.1 (±4.5)
	SSP5-8.5	-0.7 (±2.6)	-3.6 (±3.6)	+4.0 (±4.5)	0.0 (±3.2)	-7.1 (±4.5)

### 3.2. 태양광 잠재 발전량 현재 특성

이 절에서는 우리나라 상세 지역에 대하여 계절별로 PVpot의 현재 특성과 발전량에 영향을 미치는 기후 요소의 특성을 살펴보았다. Fig. 3은 현재 기간에 대한 PVpot과 일사량, 기온, 풍속의 공간적 분포를 계절별로 보여주는 그림이다. 이 그림에서 PVpot의 계절적 특성을 살펴보면, 봄 > 여름 > 가을 > 겨울의 순서대로 높게 나타나며, 특히 PVpot이 가장 큰 봄은 겨울에 비해 PVpot이 약 1.7배 높은 것으로 나타난다. 지역별 PVpot을 살펴보면, 전라권이 가장 높고 충청권과 경상권이 그 뒤를 이으며, 제주권에서 가장 낮은 것을 확인할 수 있다. PVpot에 직접적인 영향을 주는 일사량은 봄 > 여름 > 가을 > 겨울 순으로 낮게 나타났으며, 지역별 일사량은 전라권에서 많고 제주권에서 적어서, PVpot과 동일한 특성이 나타났다. 기

온과 풍속은 태양광 발전의 효율에 영향을 미치며, 기온은 여름 > 가을 > 봄 > 겨울 순으로 높고 지역적으로는 제주권과 전라권에서 높다. 풍속은 봄 > 겨울 > 여름 > 가을 순으로 강하며, 제주권에서 가장 강하게 나타나며, 특히 해안에서 가까운 지역에서 강하게 나타난다. 결론적으로, 우리나라에서는 일반적으로 봄과 여름에 많은 일사량으로 인해 PVpot이 높으며, 여름에는 기온이 높고 풍속이 약해지면서 봄에 비해 태양광 발전의 효율이 다소 낮아진다. 겨울은 낮은 기온으로 인해 발전의 효율성은 높으나 일사량이 적어서 PVpot이 가장 낮다.

### 3.3. 태양광 잠재 발전량 미래 전망

우리나라의 계절별 PVpot의 미래 변화를 살펴보기 위하여 Fig. 4에 현재(2014 ~ 2018) 대비 미래(2070 ~ 2099) PVpot과 이에 영향을 미치는 기후요소의 변화를 공

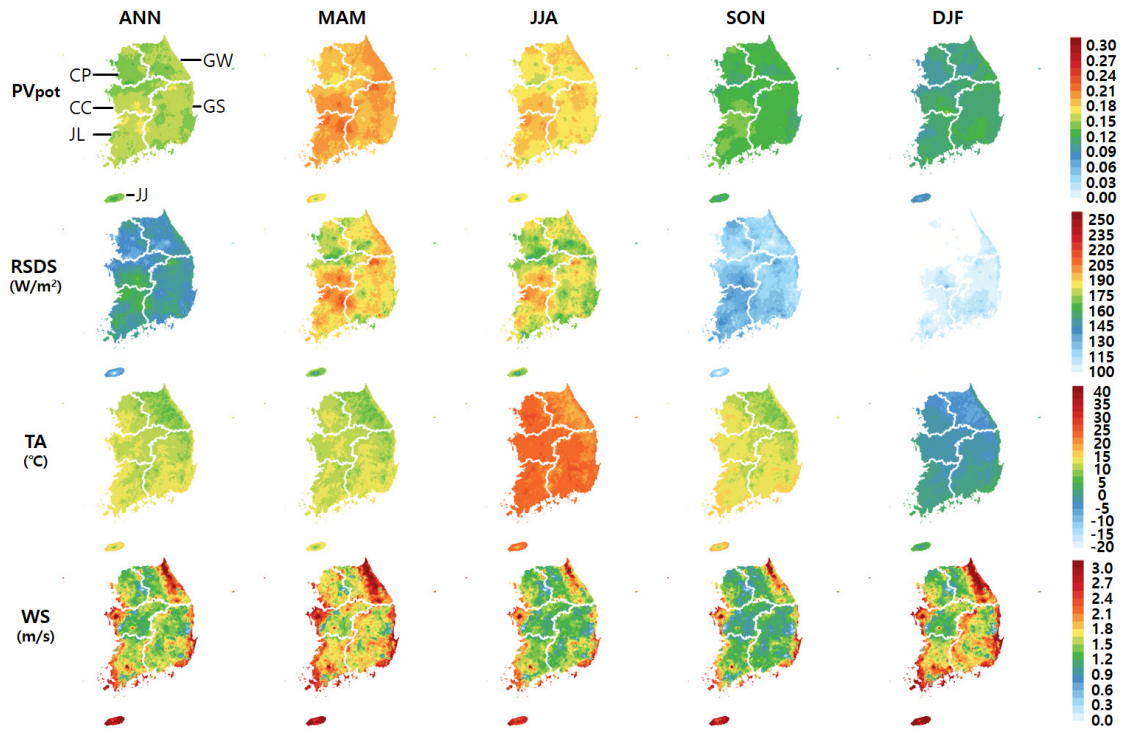


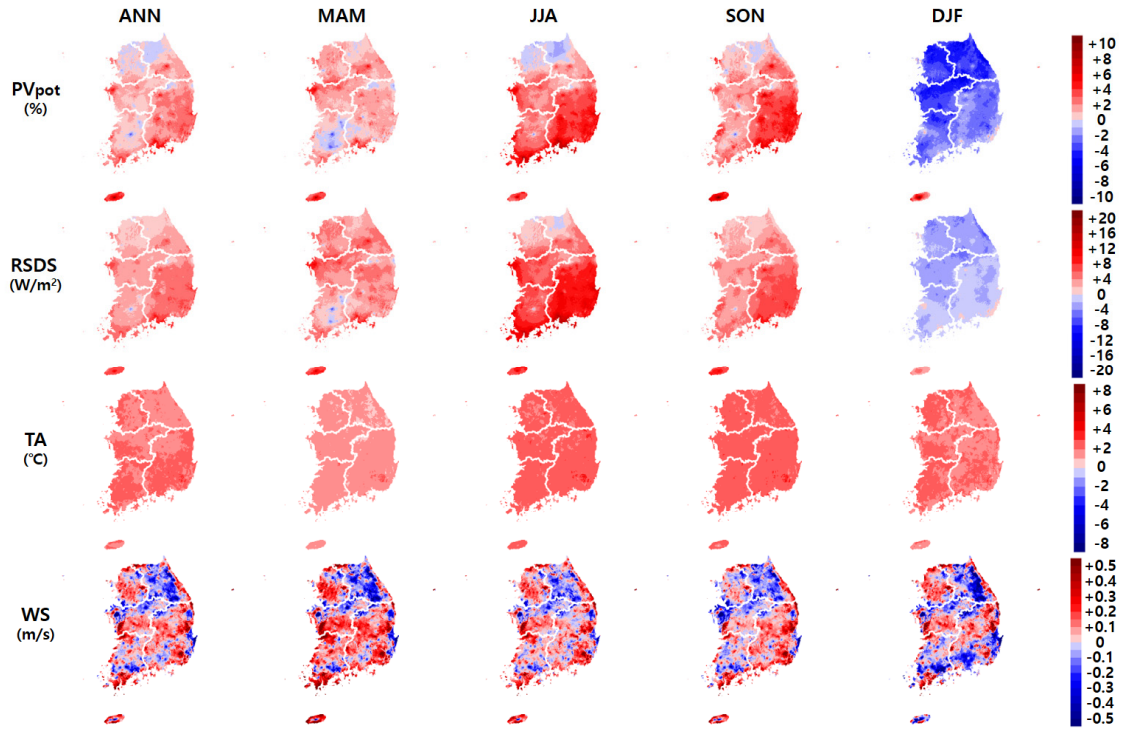
Fig. 3. Observed seasonal mean (1st row) the photovoltaics power potential (PVpot, W/m<sup>2</sup>), (2nd row) surface down-welling shortwave radiation (RSDS, W/m<sup>2</sup>), (3th row) mean temperature (TA, °C), and (4th row) surface wind speed (WS, m/s) over South Korea (2014 ~ 2018).

간적으로 나타냈다. 또한 Fig. 5에는 Fig. 4의 결과를 우리나라 평균 및 6개 권역별로 나누어 표출하였으며, 5개 모델을 통해 나타나는 불확실성까지 제시하였다. Fig. 4와 Fig. 5를 통해 나타난 우리나라의 연평균 PVpot의 미래 변화는, 저탄소 시나리오(SSP1-2.6)에서 약 +1.3%(±0.7%) 증가하고 고탄소 시나리오(SSP3-7.0, SSP5-8.5)에서는 각각 -2.0%(±2.0%), -0.7%(±2.6%) 감소할 것으로 전망된다. 이는 우리나라 평균 일사량은 모든 시나리오에서 증가하므로(+0.7 Wm<sup>-2</sup>~+3.6 Wm<sup>-2</sup>) 태양광 발전에 직접적으로 영향을 미치는 요소는 증가하나, 고탄소 시나리오에서 높은 기온 상승(+4.7°C ~ +5.6°C)에 따라 태양광 발전의 효율이 감소되기 때문으로 해석된다(Figs. 5c, 5d). 또한 일사량은 에어로졸 및 대기 오염물질에 영향을 받으므로, 대기질 개선정책이 강한 SSP1-2.6과 SSP5-8.5에서 미래 일사량 증가가 크고 대기질 개선정책이 중간 수준 이거나 약한 SSP2-4.5와 SSP3-7.0에서 비교적 일사량 증가가 작을 것으로 전망되므로(Marianne et al., 2019; Shim et al., 2021), 탄소 감축 뿐만 아니라 대기질 개선정책도 태양광 발전에

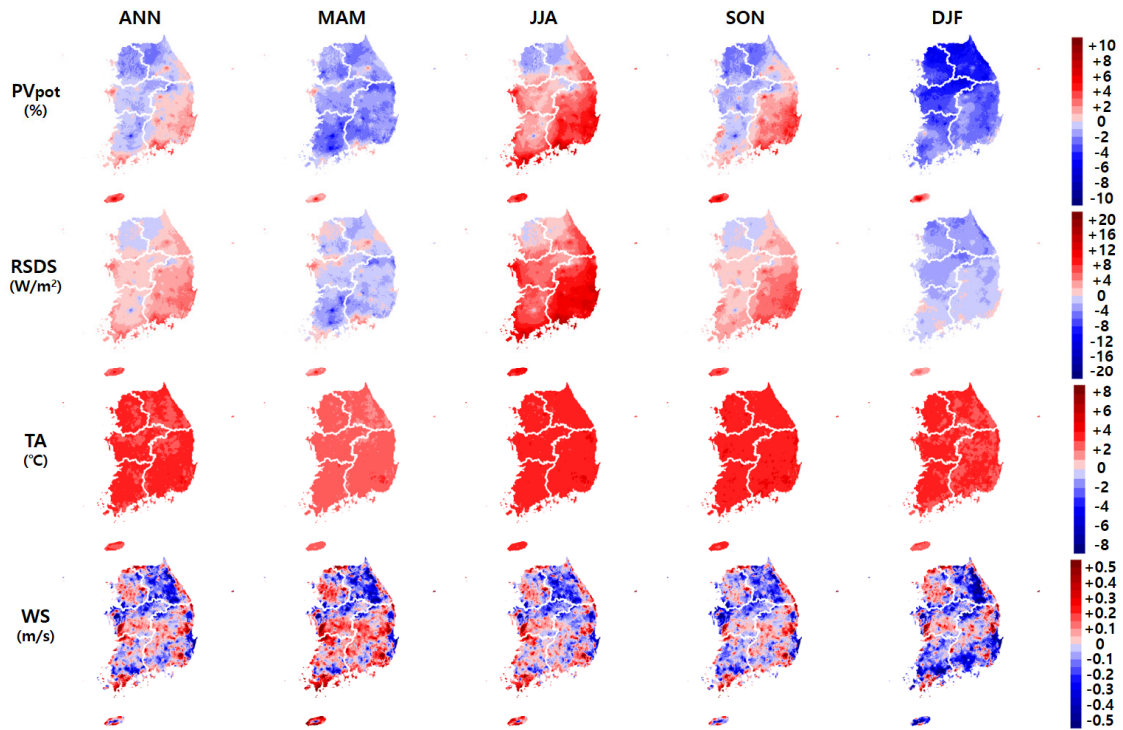
영향을 미친다고 볼 수 있다.

권역별 연평균 PVpot 변화를 살펴보면, 제주권은 모든 시나리오에서 PVpot이 증가하고 경상권은 저탄소와 중간 단계 시나리오에서만 증가하며, 나머지 4개 권역은 저탄소 시나리오에서만 증가할 것으로 전망된다. 제주권은 연평균 일사량이 시나리오에 따라 +5.3 Wm<sup>-2</sup> ~ +7.0 Wm<sup>-2</sup>로 가장 크게 증가하며, 기온 상승 폭은 +1.9°C ~ +5.2°C로 상대적으로 작아, 미래 PVpot 증가가 다른 지역에 비해 뚜렷할 것으로 예상되나 불확실성이 크다(Fig. 5). 반면, 일사량 증가 폭이 가장 작고 기온 상승 폭이 +2.0°C ~ +5.7°C로 가장 큰 수도권은 중간단계와 고탄소 시나리오에서 PVpot 감소 폭(-0.7% ~ -2.8%)이 가장 클 것으로 전망된다.

미래 제주권에서 일사량과 PVpot 증가가 가장 뚜렷하게 나타난 원인을 파악하기 위해 강수일수 변화를 살펴보았다. 구름에 동반되는 강수는 일사량의 감소에 직접적인 영향을 미치므로, 강수일수는 태양광 발전량에 간접적으로 영향을 미치는 또 다른 중요한 요소라고 할 수 있다.

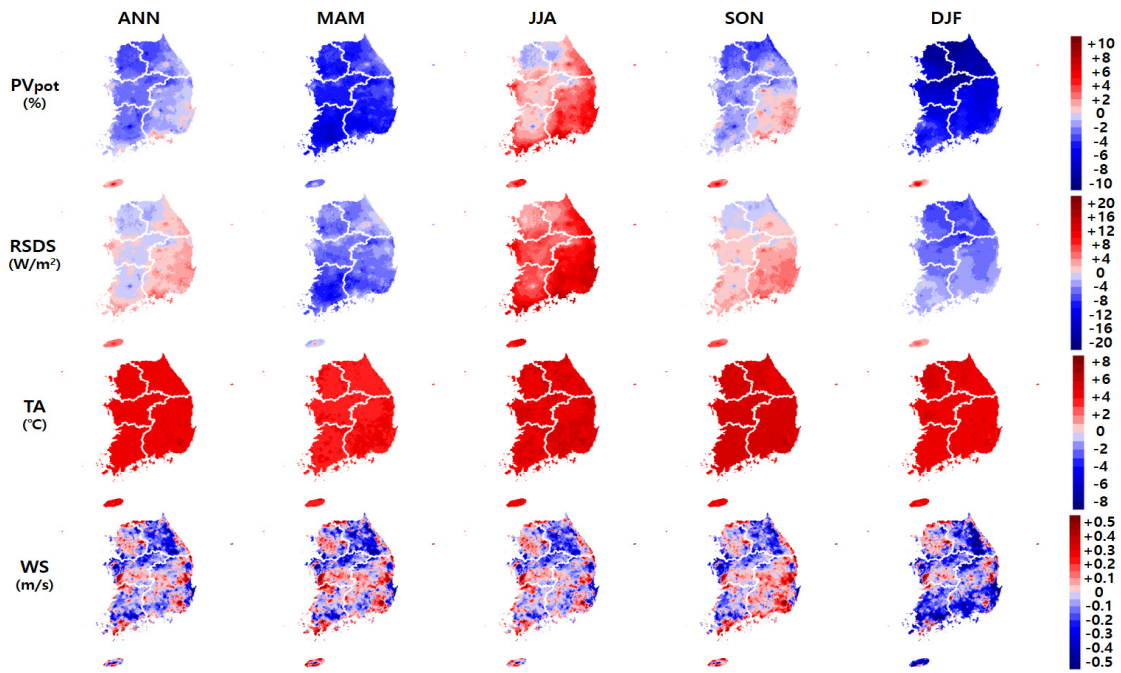


(a) SSP1-2.6

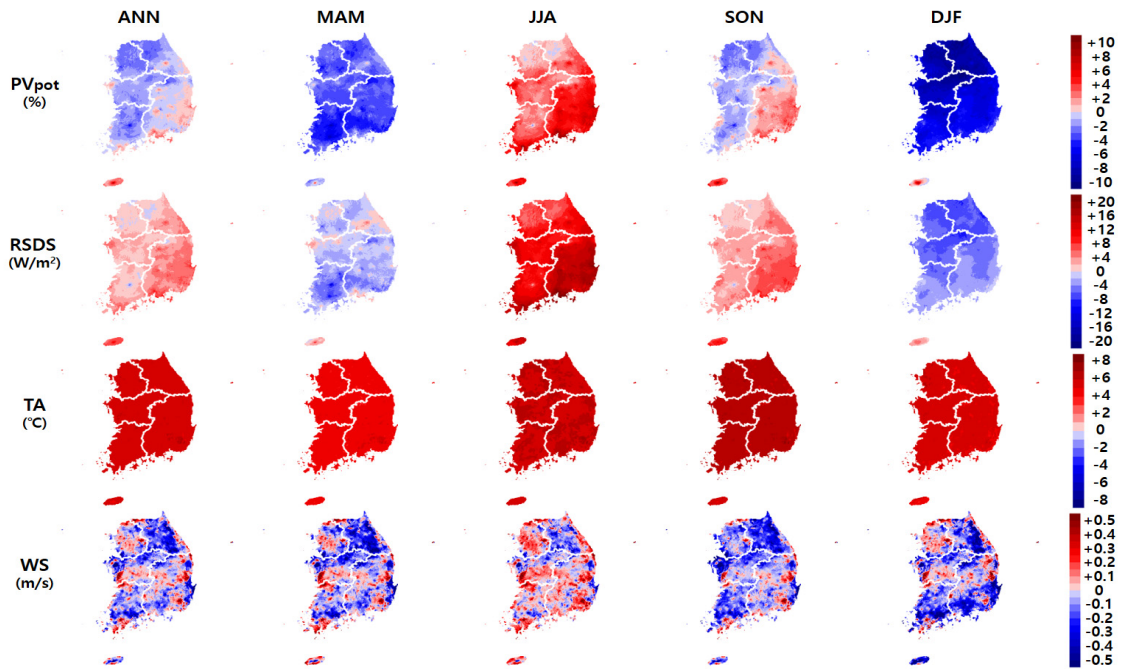


(b) SSP2-4.5





(c) SSP3-7.0



(d) SSP5-8.5

Fig. 4. Future changes in (1st row) the photovoltaics power potential (PVpot, %), (2nd row) surface down-welling shortwave radiation (RSDS, W/m<sup>2</sup>), (3th row) mean temperature (TA, °C), and (4th row) surface wind speed (WS, m/s) at the late 21<sup>st</sup> century (2070 ~ 2099) compared to the present-day (2014 ~ 2018) over South Korea.

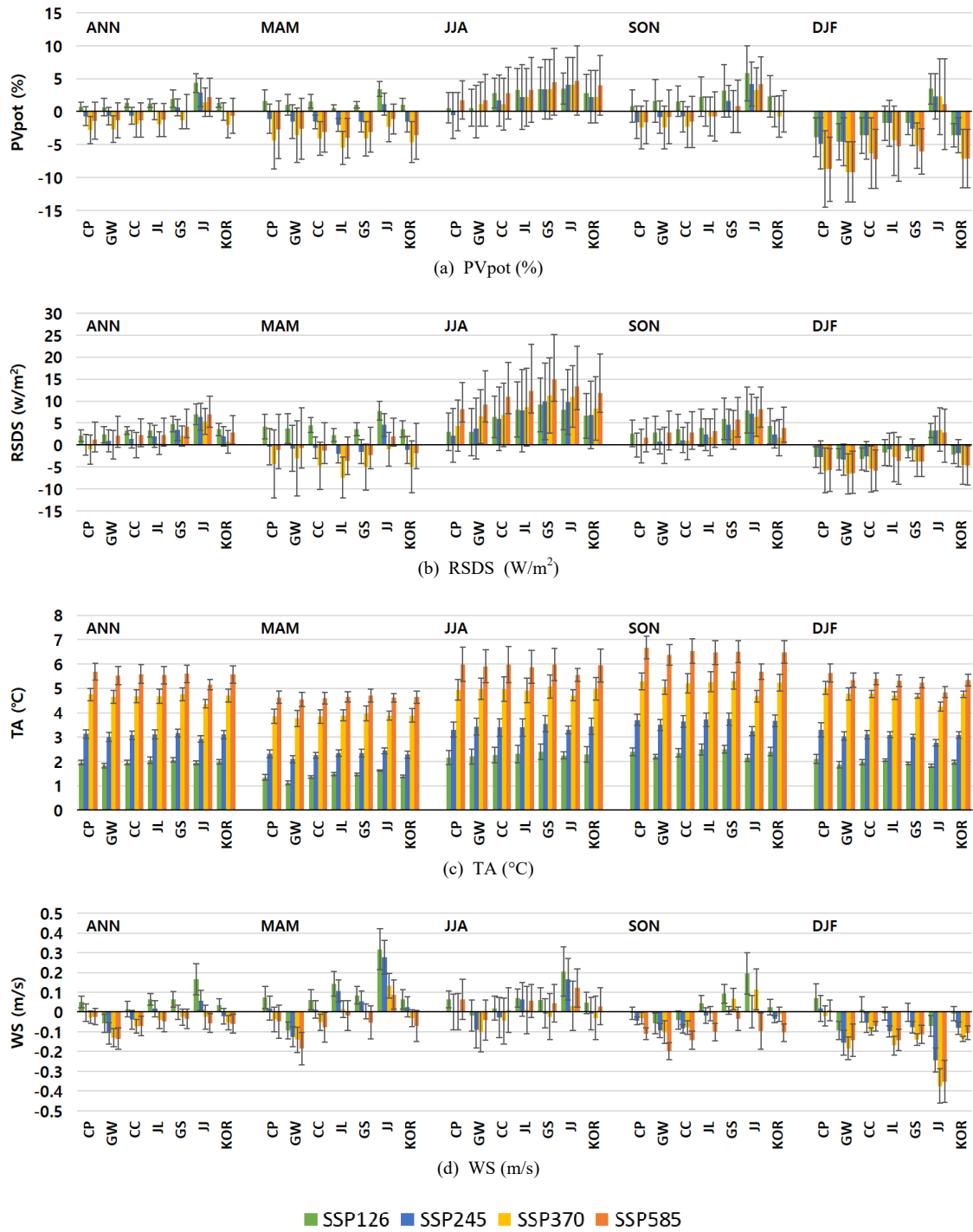


Fig. 5. Changes in regional the photovoltaics power potential (PVpot, %), surface down-welling shortwave radiation (RSDS,  $W/m^2$ ), mean temperature (TA,  $^{\circ}C$ ), and surface wind speed (WS, m/s) at the late 21<sup>st</sup> century (2070 ~ 2099) compared to the present-day (2014 ~ 2018).

Fig. 6은 미래 강수일수 변화의 공간적 분포를 시나리오 별, 계절별로 나타낸 그림이다. 수도권과 강원권의 일부 지역을 제외한 대부분의 지역에서 강수일수는 감소할 것으로 전망된다. 특히, 제주권에서는 연 강수일수가 시나리오에 따라 -14.5일 ~ -18.4일로 크게 감소할 것으로 예상되며, 수도권에서는 -0.4일 ~ -3.8일로 상대적으로 감소폭이 작을 것으로 전망된다. 이러한 강수일수 변화의 지역적 특성은 PVpot의 지역적 특성(미래 제주권의 큰 증가, 수도권의 큰 감소)과 연결된다. Fig. 7은 이러한 PVpot과

강수일수 간에 음의 상관관계가 모든 지역, 모든 시나리오, 모든 계절에서 뚜렷하다는 것을 정량적으로 나타낸 그림이다. 이에 따르면, PVpot-강수일수 간 상관관계는 우리나라에서 연평균 적으로 -0.73의 관계를 보이며, 모든 계절과 지역, 시나리오에서 -0.58 이상의 음의 관계가 나타난다.

남한 평균 PVpot의 미래 계절별 변화를 살펴보면, 여름은 모든 시나리오에서 증가하고 봄과 가을은 저탄소 시나리오에서 증가하는 반면, 겨울은 모든 시나리오에서 감소

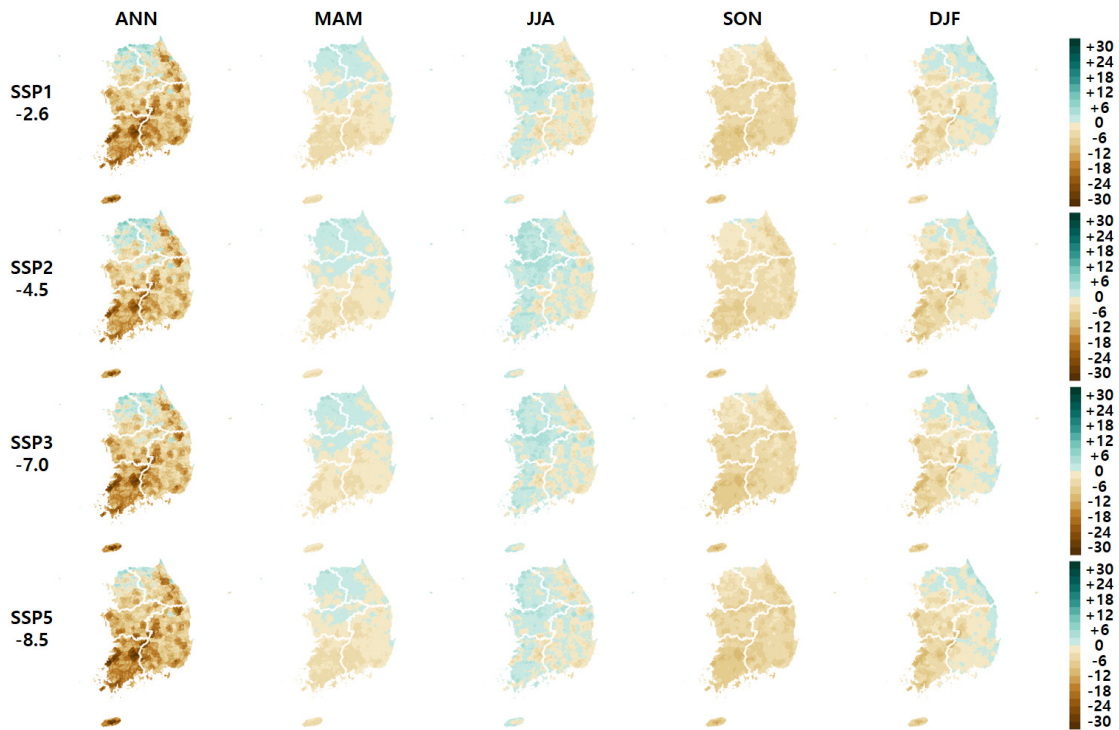


Fig. 6. Future changes in the number of rainy days at the late 21st century (2070~2099) compared to the present-day (2014~2018) over South Korea.

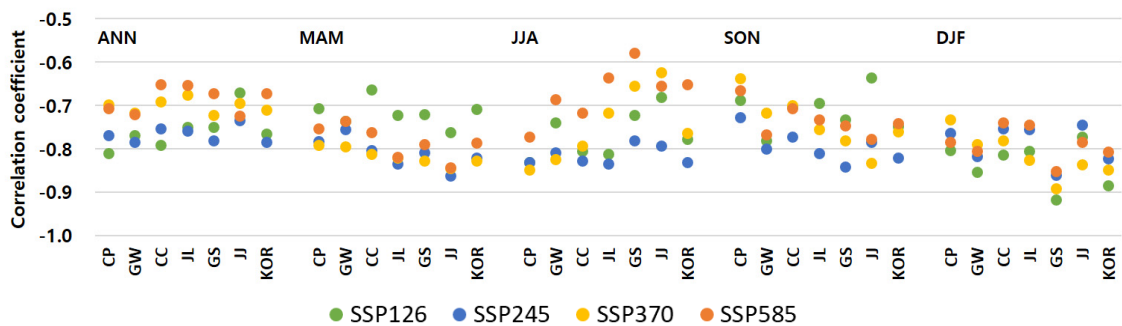


Fig. 7. Regional correlation coefficient between future changes for the number of days with precipitation ( $\geq 0.1 \text{ mm d}^{-1}$ ) and the photovoltaics power potential (PVpot).

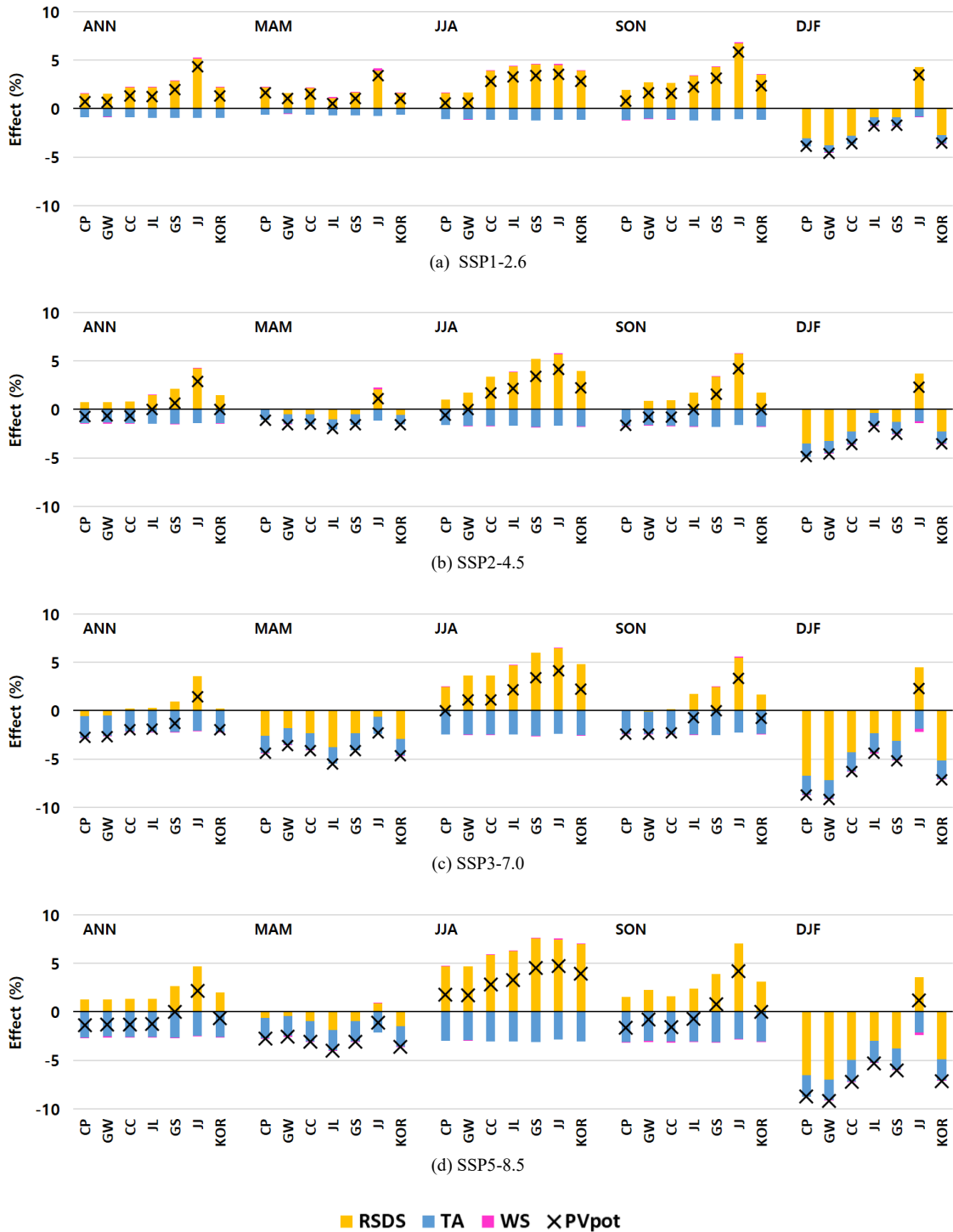


Fig. 8. The effects of surface down-welling shortwave radiation (RSDS, %), mean temperature (TA, %), and surface wind speed (WS, %) on seasonal changes in the photovoltaics power potential (PVpot).

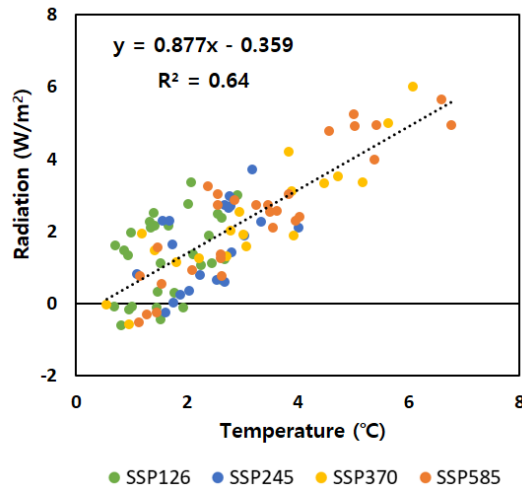


Fig. 9. Relationship between mean temperature (TA) and surface down-welling shortwave radiation (RSDS) when the photovoltaics power potential (PVpot) does not change significantly (within a range of  $\pm 1\%$ ) in the future (2021~2100).

하는 특성을 보인다(Figs. 4 and 5). 여름철에는 특히 고탄소 시나리오인 SSP5-8.5에서 PVpot이 큰 증가(+4.0%)를 보이는데, 이는 기온이 상승(+5.9°C)한 상황에서도 일사량이 뚜렷하게 증가(+11.9  $\text{Wm}^{-2}$ )하여 발생한 결과이다. 반면 겨울철은 고탄소 시나리오에서 PVpot이 가장 큰 감소폭을 보이며, 이는 기온의 상승(+4.8°C ~ +5.3°C)과 더불어 일사량이 감소(-4.5  $\text{Wm}^{-2}$  ~ -4.7  $\text{Wm}^{-2}$ )할 것으로 전망되기 때문이다. 봄철은 중간단계와 고탄소 시나리오에서 일사량이 감소(-1.1  $\text{Wm}^{-2}$  ~ -4.9  $\text{Wm}^{-2}$ )함에 따라 PVpot이 감소할 것으로 전망된다. 가을철은 모든 시나리오에서 일사량이 증가(+1.7  $\text{Wm}^{-2}$  ~ +4.3  $\text{Wm}^{-2}$ )함에도 불구하고, 기온 상승이 +2.4°C ~ +6.5°C로 모든 계절중에서 가장 뚜렷하게 나타나기 때문에, 중간단계와 고탄소 시나리오에서 미래 PVpot이 감소하거나 변화하지 않을 것으로 전망된다. PVpot 전망의 불확실성은 가장 크게 증가하는 여름철과 가장 크게 감소하는 겨울철에서 비교적 크게 나타났다(Fig. 5).

앞서, 태양광 잠재 발전량에 대하여 일사량 증가는 긍정적인 영향, 기온 상승은 부정적인 영향을 끼치는 것을 확인하였다. Fig. 8은 식 (4)와 식 (5)를 사용하여 PVpot에 미치는 각 기후요소의 영향을 정량적으로 제시하였다. 이 그림에서 ×표식은 PVpot의 변화를 의미하고 노란색 막대는 일사량의 영향, 파란색 막대는 기온의 영향, 분홍색 막대는 풍속의 영향을 나타낸다. 풍속은 식 (3)에 의해서 태

양광 패널을 냉각시키는 역할을 하지만, 다른 기후요소에 비해서 PVpot의 변화에 매우 작은 영향력을 미친다. 기온은 계절과 지역에 따라서는 큰 변화가 없으나 시나리오의 종류에 따라 크게 변화하며, 특히 고탄소 시나리오로 갈수록 PVpot의 감소에 크게 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 일사량의 영향은 계절별, 지역별, 시나리오별로 매우 다른 특성을 보이며, 대체로 일사량 변화에 따라서 PVpot의 변화가 결정되는 것으로 보인다. 이를 시나리오별로 구분하여 PVpot의 변화를 살펴보면, 일사량의 효과가 기온보다 큰 SSP1-2.6에서 증가하고 일사량의 효과가 기온보다 작은 SSP2-4.5와 SSP5-8.5에서 감소하며, 일사량에 큰 변화가 없고 기온의 부정적 영향이 크게 미치는 SSP3-7.0에서는 PVpot의 감소가 가장 큰 것으로 나타난다. 우리나라에서 평균적으로 여름철에 PVpot이 +2.3% ~ +4.0%로 가장 많이 증가하는데, 이는 일사량이 +3.9% ~ +7.0%의 효과를 보여, 기온의 -1.1% ~ -3.1% 효과를 크게 상쇄시키기 때문이다. 반면에 겨울철에는 일사량의 -2.2% ~ -5.1% 효과와 기온의 -0.8% ~ -2.2% 효과가 결합되어 PVpot이 -3.6% ~ -7.1%로 가장 크게 감소하는 것으로 나타났다. 정리하면, 미래 PVpot이 증가하기 위해서는 태양광 발전량에 대한 일사량의 (+) 효과가 기온의 (-) 효과보다 커야 한다.

이처럼 PVpot의 변화에 미치는 기후요소들의 효과를 정량적으로 살펴보기 위하여, Fig. 9에 현재와 비교하여

미래 모든 기간(2021 ~ 2100년)에서 연평균 PVpot이 변화가 없는 해(변화가 현재 대비 1% 미만인 경우)만 추출하여, 현재 대비 미래의 연평균 일사량과 기온의 변화를 나타내었다. 이 그림은 PVpot에 대한 영향력이 매우 작은 풍속은 미래 변화가 없다고 가정하고, 미래 PVpot 변화에 대한 기온 상승의 (-) 효과와 일사량 증가의 (+) 효과가 평형을 이루는 경우를 나타낸 것이다. Fig. 8을 통해 설명한 바와 같이 미래에 기온이 상승한 환경에서는 일사량이 증가해야 PVpot이 현재와 유사한 수준으로 유지된다는 결과를 확인할 수 있다. 또한 Fig. 9의 기온-일사량 간 선형 회귀식을 통해 미래 기온이 현재 대비 1°C 상승한 환경에서는 일사량이 현재 대비 0.877 Wm<sup>2</sup> 이상 증가해야 미래 PVpot이 현재 대비 감소하지 않을 것으로 확인되었다. 다만, 이러한 결과는 우리나라 전체 영역 평균에 대한 결과이므로, 미래 태양광 발전 예정지에 대해서 적용하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

#### 4. 요약 및 결론

이 연구에서는 새롭게 산출된 고해상도(1 km) 남한상세 기후변화 시나리오를 사용하여 미래 태양광 잠재 발전량(PVpot)을 전망하였다. 사용된 자료 중, 현재 기간에 대한 자료는 기상청 및 농촌진흥청의 관측자료를 기반으로 MK-PRISM 객관분석 방법을 사용하여 산출된 고해상도(1 km) 격자형 관측자료이다. 격자형 관측자료 중 기온과 풍속은 총 20년(2000 ~ 2019)에 대하여 산출되었고 일사량은 총 6년(2014 ~ 2019)에 대하여 산출되었으며, PVpot 분석을 위하여 자료의 기간을 산출 기간이 가장 짧은 일사량에 맞추어 사용하였다. 또한 이 연구에서는 계절별 분석 결과를 제시하였는데, 겨울철 계산을 위하여 현재 기후 평년값은 총 5년(2014 ~ 2018)에 대하여 평균된 값으로 제시하였다. 미래 기후변화 전망은 PRIDE 방법을 사용하여 산출하였다. 사용된 기후모델은 25 km 해상도의 CORDEX-동아시아 2단계 참여 모델로, 총 5종(HadGEM3-RA, CCLM, WRF, RegCM, GRIMs)이 사용되었다. 미래 온실가스 배출로 인한 기후 반응을 예측하기 위하여 IPCC 6차 평가보고서의 SSP 시나리오 4종(SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5)을 활용하였다.

격자형 관측자료의 성능을 Jack-knife 방법을 통해 검증한 결과, 기온과 일사량, 풍속은 모두 관측값과 유사한 값을 보였으며, 다소 양의 편차(bias)가 나타났다. 이를 통해서 PVpot의 현재 기후 특성을 살펴보면, 계절적으로 봄 >

여름 > 가을 > 겨울 순으로 높게 나타났다. 권역별로는 전라권에서 가장 높고 제주권에서 가장 낮은 특성을 보였다. 여름은 봄과 더불어 일사량이 가장 많으나, 높은 기온과 약한 바람으로 인해 태양광 발전의 효율이 감소하여 PVpot이 봄에 비해 낮으며, 겨울은 전반적으로 적은 일사량으로 인하여 PVpot이 낮았다.

현재(2014 ~ 2018) 대비 21세기 말(2070 ~ 2099), 우리나라의 PVpot 변화는 저탄소 시나리오(SSP1-2.6)에서 약 +1.3%(±0.7%) 증가하고 고탄소 시나리오(SSP3-7.0, SSP5-8.5)에서는 각각 -2.0%(±2.0%), -0.7%(±2.7%) 감소할 것으로 전망된다. 모든 시나리오에서 미래 일사량이 증가하므로(+0.7 Wm<sup>2</sup> ~ +3.6 Wm<sup>2</sup>), 기온의 상승(+4.7°C ~ +5.6°C)이 태양광 발전의 효율을 감소시켜, 고탄소 시나리오의 PVpot가 감소하는 것으로 예상된다. 시나리오별 일사량 차이는 대기질 개선정책에 영향을 받으며, 개선 효과가 큰 SSP1-2.6과 SSP5-8.5에서 일사량 증가가 크다. 권역별 PVpot을 살펴보면, 제주권에서 연평균 PVpot이 +1.4% ~ +4.3%로 다른 지역에 비해 큰 증가 폭을 보이며, 수도권은 중간단계와 고탄소 시나리오에서 PVpot이 -0.7% ~ -2.8%로 감소할 것으로 전망된다. 이는 지역별 강수일수 감소 특성(제주권의 뚜렷한 감소와 수도권의 미미한 감소)과 관련 있다.

계절별 PVpot 변화 특성은 시나리오에 따라 여름에는 +2.3% ~ +4.0%로 가장 크게 증가하고 겨울에는 -3.6% ~ -7.1%로 가장 크게 감소할 것으로 전망된다. 미래 PVpot의 변화는 계절적인 변동이 크게 나타나는데, 이는 여름철에는 일사량이 +3.9% ~ +7.0%의 효과를 보여, 기온의 -1.1% ~ -3.1%의 효과를 크게 상쇄시키기 때문이다. 반면에 겨울철에는 일사량의 -2.2% ~ -5.1% 효과와 기온의 -0.8% ~ -2.2% 효과가 결합되어 PVpot이 가장 크게 감소하는 것으로 나타났다.

이 연구에서는 고해상도 남한상세 기후변화 시나리오의 4개 SSP 시나리오, 5개 모델 앙상블을 사용하여 우리나라 평균 및 6개 권역에 대한 태양광 잠재 발전량의 미래 변화를 전망하였다. 미래 PVpot은 일사량과 기온의 변화에 따라 미래에 여름철, 저탄소 시나리오에서 큰 증가가 예상된다. 이는 태양광 발전에 직접적으로 영향을 미치는 일사량 변화 외에 기온의 상승이 PVpot 감소에 크게 영향을 미치므로, 지속적인 탄소배출이 신재생 에너지 발전량의 감소에도 영향을 미칠 수 있다는 것을 시사한다. 다만, 이 연구는 태양광 발전 예정지에 대한 사항은 고려하지 않은 점과 현재 기후 평년의 기간이 5년으로 짧아서

태양광 발전량 추정에 불확실성이 존재할 수 있다는 점은 이 연구의 한계점으로 볼 수 있다. 그러나, 고해상도의 기후자료를 활용하여 지역별 태양광 발전 전망 결과를 제시한 점은 이 연구의 가장 특징적인 사항으로 사료 되며, 이는 향후 지역별 태양광 발전 관련 계획 수립 시에 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 사사

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원기술 개발연구」 “신기후체제 대응 기후변화시나리오 개발·평가 (KMA2018-00321)”의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Barykina E, Hammer A. 2017. Modeling of photovoltaic module temperature using Faiman model: Sensitivity analysis for different climates. *Solar Energy*. 146: 401-416. doi: 10.1016/j.solener.2017.03.002
- Bichet A, Hingray B, Evin G, Diedhiou A, Kebe CMF, Anquetin S. 2019. Potential impact of climate change on solar resource in Africa for photovoltaic energy: Analyses from CORDEX-AFRICA climate experiments. *Environmental Research Letters*. 14: 124039. doi: 10.1088/1748-9326/ab500a
- Chenni R, Makhoul M, Kerbache T, Bouzid A. 2007. A detailed modeling method for photovoltaic cells. *Energy*. 32(9): 1724-1730. doi: 10.1016/j.energy.2006.12.006
- Davies T, Cullen MJP, Malcolm AJ, Mawson MH, Staniforth A, White AA, Wood N. 2005. A new dynamical core for the Met Office's global and regional modelling of the atmosphere. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 131(608): 1759-1782. doi: 10.1256/qj.04.101
- Giorgi F, Coauthors. 2012. RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research*. 52: 7-29. doi: 10.3354/cr01018
- Hong SY, Park H, Cheong HB, Kim JEE, Koo MS, Jang J, ... Li H. 2013. The Global/Regional Integrated Model system (GRIMs). *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*. 49(2): 219-243. doi: 10.1007/s13143-013-0023-0
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2023. Summary for policymakers. In: *Climate change 2021: The physical science basis: Working group I contribution to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. pp. 3-32. doi: 10.1017/9781009157896.001
- Jee JB, Lee H, Min JS, Chae JH, Kim S. 2017. Analysis of radiation energy budget using WISE observation data on the Seoul metropolitan area. *Journal of the Korean Solar Energy Society*. 37(6): 103-114. doi: 10.7836/kses.2022.42.2.023
- Jerez S, Tobin I, Vautard R, Montávez JP, López-Romero JM, Thais F, ... Wild M. 2015. The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe. *Nature Communications*. 6: 10014. doi: 10.1038/ncomms10014
- KEPCO (Korea Electric Power Corporation). 2022. 2021 Statistics of electric power in Korea. Naju: Author.
- Kim JU, Kim MK, Kim YH. 2013. Improvement of modified Korean parameter-elevation regressions an independent slopes model based on independent temperature lapse rate. *Journal of Climate Research*. 8(3): 203-215. doi: 10.14383/crj.2013.8.3.203
- Kim JU, Sang J, Kim MK, Byun YH, Kim DH, Kim TJ. 2022. Future climate projection in South Korea using the high-resolution SSP scenarios based on statistical downscaling. *Journal of Climate Research*. 17(2): 89-106. doi: 10.14383/crj.2022.17.2.89
- Kim MK, Han MS, Jang DH, Baek SG, Lee WS, Kim YH, Kim S. 2012. Production technique of observation grid data of 1km resolution. *Journal of Climate Research*. 7(1): 55-68.
- Kim MK, Kim S, Kim JU, Heo J, Park JS, Kwon WT, Suh MS. 2016. Statistical downscaling for daily precipitation in Korea using combined PRISM, RCM, and quantile mapping: Part 1, methodology and evaluation in historical simulation. *Asia-Pacific Journal of*

- of Atmospheric Sciences. 52(2): 79-89. doi: 10.1007/s13143-016-0010-3
- Kim S, Kim MK. 2018. Verification of PRIDE model version 2.0. *Journal of Climate Research*. 13(1): 71-86. doi: 10.14383/cri.2018.13.1.71
- Marianne T, Lund GM, Bjørn HS. 2019. Anthropogenic aerosol forcing under the shared socioeconomic pathways. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 19(22): 13827-13839. doi: 10.5194/acp-19-13827-2019
- Park C, Shin SW, Kim G, Cha DH, Min SK, Lee D, ... Kim JU. 2022. What determines future changes in photovoltaic potential over East Asia? *Renewable Energy*. 185: 338-347. doi: 10.1016/j.renene.2021.12.029
- Park J, Lim YJ, Jang DH. 2014. Improvement of a modified Korean parameter-elevation regressions on independent slopes model for wind speed interpolation. *Journal of Climate Research*. 9(3): 225-241. doi: 10.14383/cri.2014.9.3.225
- Powers JG, Klemm JB, Skamarock WC, Davis CA, Dudhia J, Gill DO, ... Duda MG. 2017. The weather research and forecasting model: Overview, system efforts, and future directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 98(8): 1717-1737. doi: 10.1175/BAMS-D-15-00308.1
- Razagui A, Abdeladim K, Semaoui S, Hadj Arab A, Boulahchiche S. 2020. Modeling the forecasted power of a photovoltaic generator using numerical weather prediction and radiative transfer models coupled with a behavioral electrical model. *Proceedings of the 6th International Conference on Energy and Environment Research*; 2019 Jul 22~Jul 25; Aveiro, Portugal: 57-62. doi: 10.1016/j.egy.2019.08.018
- Rockel B, Will A, Hense A. 2008. The regional climate model COSMO-CLM (CCLM). *Meteorologische Zeitschrift*. 17(4): 347-348. doi: 10.1127/0941-2948/2008/0309
- Sellar AA, Jones CG, Mulcahy JP, Tang Y, Yool A, Wiltshire A, ... Zerroukat M. 2019. UKESM1: Description and evaluation of the U.K. earth system model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 11(12): 4513-4558. doi: 10.1029/2019MS001739
- Shim S, Sung H, Kwon S, Kim J, Lee J, Sun M, ... Zeng G. 2021. Regional features of long-term exposure to PM2.5 air quality over Asia under SSP scenarios based on CMIP6 models. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 18(13): 6817. doi: 10.3390/ijerph18136817
- Sterl S, Liersch S, Koch H, Van Lipzig NPM, Thiery W. 2018. A new approach for assessing synergies of solar and wind power: Implications for West Africa. *Environmental Research Letters*. 13(9): 094009. doi: 10.1088/1748-9326/aad8f6
- TamizhMani G, Ji L, Tang Y, Petacci L, Osterwald C. 2003. Photovoltaic module thermal-wind performance: Long-term monitoring and model development for energy rating. *Proceedings of NCPV and Solar Program Review Meeting*; 2003 Mar 24~Mar 26; Denver, CO: 936-939.
- Tonui JK, Tripanagnostopoulos Y. 2008. Performance improvement of PV/T solar collectors with natural air flow operation. *Solar Energy*. 82(1): 1-12. doi: 10.1016/j.solener.2007.06.004
- Yoon JH, Sang J, Kim MK. 2020. Simulated characteristics of regional climate model and PRIDE model based on UK-ESM for temperature and precipitation. *Journal of Climate Research*. 15(4): 297-310. doi: 10.14383/cri.2020.15.4.297