ISSN 1738-3935
New & Renewable Energy 2014. 6 Vol. 10, No. 2 http://dx.doi.org/10.7849/ksnre.2014.10.2.029

논문 4

[2014-6-WD-004]

기후변화 시나리오에 근거한 한반도 미래 풍력·태양-기상자원 변동성

변재영*, 김유미, 최병철

Variability of Future Wind and Solar Resource Over the Korean Peninsula Based on Climate Change Scenario

Jae-Young Byon*, Yumi Kim and Byoung-Choel Choi

Abstract This study examines the future variability of surface wind speed and solar radiation based on climate change scenario over the Korean Peninsula. Climate change scenarios used in this study are RCP 4.5 and 8.5 with a 12.5 km horizontal resolution. Climate change scenario RCP 4.5 and 8.5 reproduce the general features of wind speed over the Korean Peninsula, such as strong wind speed during spring and winter and weak wind speed during summer. When compared with the values of wind speed and solar radiation of the future, they are expected to decrease current wind and solar resource map. Comparing the resource maps using RCP 4.5 and 8.5 scenarios, wind speed and solar radiation decrease with increasing greenhouse gas concentration. Meteorological resource maps of future wind and solar radiation should be improved with high resolution for the industrial application.

Key words Wind speed(풍속), Solar radiation(태양 복사), Solar resource map(태양자원 지도), Climate change(기후변화), Meteorological Resource map(기상자원 지도)

(접수일 2014. 5. 7, 수정일 2014. 6. 11, 게재확정일 2014. 6. 27)

* 국립기상연구소 지구환경시스템연구과 (Global Environment System Research Division, National Institute of Meteorological Research)
■ E-mail : byonjy@kma.go.kr ■ Tel : (064)780-6704 ■ Fax : (064)738-6514

1. 서 론

20세기 이후 전 지구 기온은 온실가스 방출에 의해 지속적으로 증가하고 있다. 지구온난화로 인한 기온 상승률은 0.74℃/100년(1906~2005년)이나 우리나라의 기온 상승률은 1.7℃/97년(1912~2008년)로써 지구 평균의 2배 이상이다. 따라서 온난화 방지를 위해서 전 세계는 온실가스 감축을 목표로 하고 있다. 온실가스 감축을 위해서는 화석연료를 대체하는 대체에너지 개발이 필요하며 풍력·태양에너지와 같은 신재생에너지가 하나의 해결 수단이 될 수 있다.

선진국에서는 친환경 정책으로 신재생에너지 비율을 증가시키고 있다. 영국과 프랑스에서는 2020년까지 신재생 에너지 비율을 각각 15%, 20%로 확대할 계획이다. 일본에서는 2025년까지 신재생 에너지 비율을 25%까지 증가시키고, 우리나라에서도 신재생 에너지 보급률을 2030년까지 11%로 달성한다는 목표하에 사업을 추진하고 있다.[1]

신재생에너지 중 풍력·태양 발전은 미국과 유럽 등 선진국에서는 활성화 단계이다. 풍력과 태양 발전단지 효율적 운영을 위해서는 정확한 기상정보 제공이 가장 우선이다. 그러므로 발전단지 입지 선정을 위해서 정밀하며 정확도 높은 풍력·

태양-기상자원지도가 활용되어야 한다. 국립기상연구소에서는 신재생에너지 산업 지원을 위하여 고해상도의 풍력·태양-기상자원지도를 개발하였다.[2-4]

현재의 풍력·태양 발전단지의 수명은 20-30년이며 운영기간 종료와 향후의 발전단지 개발을 위해서는 미래 기상자원 분포가 필요하다. 그러나 기후변화에 의해 미래의 기후는 변화할 것으로 예상되고 있다. 기상청에서는 미래의 기후를 예측하는 기후변화 시나리오를 산출하고 있다. 기후변화 시나리오는 온실가스, 에어로졸, 토지이용 상태 등의 변화와 같이 인간 활동에 따른 인위적인 원인에 의한 기후변화가 언제, 어디서, 어떻게 일어날지를 예측하기 위해 기후변화 예측모델을 이용하여 미래 기후에 대한 정보를 생산한다. 기후변화 시나리오는 온실가스 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP)에 따라 산출되고 있으며, RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5 시나리오가 있다.[5] 기후변화를 완화하기 위한 노력없이 현재 추세대로 온실가스를 계속 배출한다면 (RCP 8.5), 21세기말(2070-2099년)에 한반도 평균 기온은 6.0℃ 상승, 강수량은 20.4% 증가가 예상된다.[6]

우리나라는 복잡한 지리적 특성 때문에 기후변동성이 크므로, 미래의 발전단지 입지 선정을 위해서는 미래의 상세한 기상 자원 정보 제공이 필요하다. 기상청에서는 기후변화 대응을 위한 기후변화 시나리오를 개발하고 우리나라에 대한 미래의 기후를 분석하였으나, 기온과 강수에 대한 분석 위주이며, 신재생에너지 발전단지 개발을 위해서는 지표층 근처의 풍속과 일사량에 대한 미래 기상정보 분석이 필요하다.

그러므로, 본 연구에서는 기후변화 시나리오에 근거한 미래 한반도 지상풍과 일사량의 분포를 조사하고 현재의 풍력·태양-기상자원지도와 비교하여 변동성을 분석하고자 한다. 2절에서는 기후변화 시나리오 자료와 현재의 풍력·태양-기상자원지도를 소개하였다. 3절에서는 지상풍과 일사량의 시공간 변동성을 분석하였고 4절에서 결론을 제시한다.

2. 자 료

2.1 RCP 기후변화 시나리오

기후변화 시나리오는 온실가스 대표농도경로(RCP)에 따라 RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5 시나리오가 있다. RCP 8.5는 2100년에 복사강제력이 8.5W/m^2를 초과하는 고농도 시나리오로서 저감없이 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우이다. RCP 6.0은 2100년 후에 복사강제력 6.0W/m^2에서 안정화되는 중간 농도 시나리오로서 온실가스 저감 정책이 어느정도 실현되는 경우이며, RCP 4.5는 2100년 후에 약 4.5W/m^2에서 안정화되는 저농도 시나리오(온실가스 저감정책이 어느 정도 실현되는 경우)이다. RCP 2.6은 2100년 전에 복사 강제력이 약 3W/m^2에 도달하고 이후 하강하는 형태를 가진 최저농도 시나리오로서 지구의 회복력으로 온실가스 감축이 최대로 이루어질 것으로 가정하며, 실현이 불가능한 시나리오이다.[7,8]

기상청 기후변화 시나리오는 2 단계로 개발된다. 먼저 온실가스 배출 시나리오인 RCP 시나리오에 기초해 전지구 대기-해양 결합 모델인 HadGEM2-AO를 이용하여 약 135km 해상도의 전지구 기후변화 시나리오를 산출한다. 그리고 전지구 기후변화 시나리오 자료에 기초해 지역기후모델 HadGEM3-RA (Atmospheric Regional Climate Model of Hadley Center Global Environment Model version 3)로 우리나라 지역에 대한 12.5km 해상도의 지역 기후변화 시나리오를 산출한다.

전지구 시나리오는 RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5에 대하여 개발되었으며, 과거 기후자료 기간으로써 1860-2005년까지, 미래 기후자료 기간으로써 2006-2100년까지 예측되었다. 한반도 기후변화 시나리오는 RCP 4.5와 8.5에 대하여 개발되었으며, 과거 기후자료 기간으로써 1860-2005년, 미래 기후자료 기간으로써 2006-2100년까지 예측되었다. 본 연구에서는 한반도 기후변화 시나리오 자료 중 RCP 4.5와 8.5 자료를 이용하여 미래의 풍력과 태양 기상자원을 분석한다. 또한, 미래 기후자료로써 활용된 분석 기간은 2011-2100년까지이다. 한반도 기후변화 시나리오 자료는 CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment)[9]로 부터 수집 가능하다. 분석에 이용된 자료는 월 평균 지상 10m 바람과 지표 일사량 자료이다. 풍속과 일사량은 육지와 해상풍의 범위에 따라 공간 평균하여 분석한다. 해상풍의 범위는 2.2절의 정의를 따른다.

2.2 풍력·태양-기상자원지도

국립기상연구소 풍력-기상자원지도는 미국 NCAR(National

Center for Atmospheric Research)에서 개발된 중규모 수치모델 WRF(Weather Research and Forecasting)[10]을 이용하여 1km 해상도에 대하여 개발되었다.[3] 풍력-기상자원지도는 1998년부터 2009년까지의 평균 기상상태를 대표하는 바람자료이다. 풍력-기상자원지도에서 해상풍의 범위는 육지에서 약 35km 까지의 거리로 정의된다. 풍력-기상자원지도의 한반도 풍속 특성과 정확도 검증은 지상 관측 및 고층기상 관측 자료를 이용하여 수행되었다.[3]

국립기상연구소의 태양-기상자원지도는 태양광 발전산업 지원을 위하여 태양에너지 분포를 제공한다. 태양-기상자원지도는 복사모델과 위성 자료, 수치예보 자료를 이용하여 산출된다.[4] 태양-기상자원지도의 공간 해상도는 4km이며, 기간은 2001-2010년까지의 10년 동안에 대해서 개발되었다.[2] 풍력·태양-기상자원지도의 기간은 일정기간 불일치하나 현재의 기후 상태를 반영한다고 가정하여 미래 기후자료와 비교한다. 기후변화 시나리오 자료와 공간 해상도 차이 극복을 위해 시·공간적으로 평균된 분석방법을 이용하여 비교하였다.

3. 결 과

3.1 풍력-기상자원 변동성

육지와 해상풍의 기후 변동성 조사를 위하여 10년 평균된 지상풍 풍속을 분석하였다. 또한 한반도 기온과의 관련성 분석을 위하여 10년 평균 기온을 함께 제시하였다(Fig. 1). Fig. 1(a)에서 제시된 육지의 평균 기온은 기간에 따라 점차 상승하는 경향을 보이고 있다. 특히 RCP 4.5보다 8.5의 기온 상승 폭은 훨씬 크다. 21세기 초반(2011-2040년)의 RCP 4.5의 기온은 약 12℃이며 RCP 8.5는 12.3℃ 정도이다. 21세기 중반(2041-2070년)에는 RCP 4.5의 기온은 12.3~12.4℃를 나타내고 있는데 RCP 8.5에서는 13℃에서 14℃까지 기온이 상승하였다. 21세기 후반(2071-2100년)동안 RCP 8.5의 기온 상승 경향은 더욱 뚜렷하다. RCP 4.5에서는 기온이 약 13℃ 정도인데 반하여 RCP 8.5에서는 15~16℃까지 지속적으로 상승하고 있다.

육지의 평균 풍속은 기간에 따라 감소하여 기온과는 반비례 경향을 보인다. 21세기 초반은 RCP 4.5와 8.5의 풍속 차이가 작으나 21세기 후반에는 RCP 8.5의 풍속이 크게 감소한다. 21세기 초반의 기후변화 시나리오 풍속은 3m/s이며, 21세기 중반에는 RCP 8.5 보다 RCP 4.5에서 풍속이 더 증가하고 있다. 21세기 후반에는 RCP 4.5의 풍속은 21세기 중반과 유사하거나 조금 약한 풍속의 크기를 보이나 RCP 8.5에서는 풍속이 감소하고 있다.

Fig. 1(b)는 해상에서의 풍속과 기온의 변동성 분석이다. 해상의 기온은 시간에 따라 지속적으로 증가하는 것으로 전망되고 있으며, 평균 기온은 육지보다 더 높다. 21세기 초반

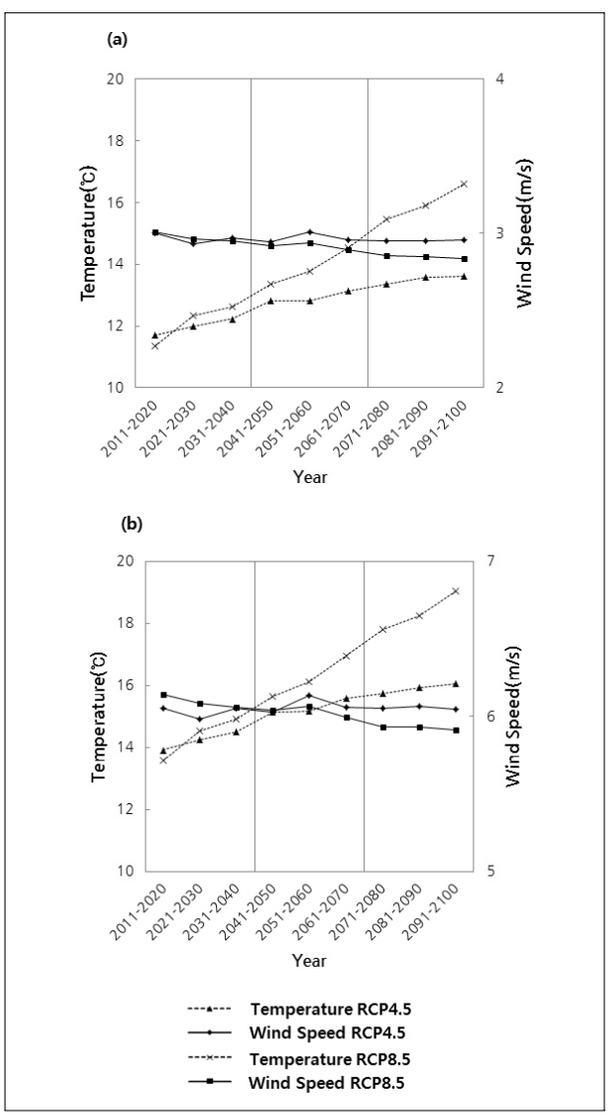

Fig. 1 (a) Decadal variation of mean temperature and wind speed at 10 m above ground level over the land region in Korea. (b) Same as (a), but for sea region. Solid line and dashed line indicate wind speed and temperature, respectively.

RCP 4.5의 평균 기온은 14℃를 나타내며, RCP 8.5는 RCP 4.5 보다 0.5℃ 더 높은 기온을 보인다. 21세기 중반 RCP 4.5는 대략 15℃ 정도이며 21세기 후반에는 0.2℃ 정도 상승하였다. RCP 8.5의 기온 상승률은 RCP 4.5 보다 훨씬 크다. 21세기 중반에는 16℃ 이상으로 상승하였으며, 21세기 후반에는 19℃까지 상승하는 것으로 전망된다.

해상풍의 크기는 육지의 풍속보다 2배정도 크며 풍속의 감소 경향은 육지와 일치한다. 21세기 초반의 해상풍은 RCP 4.5보다 8.5에서 더 크다. RCP 4.5의 풍속은 감소 후 2030년대에 증가하고 있으며, RCP 8.5의 풍속은 감소하고 있다. 21세기 중반의 RCP 4.5 풍속은 2050년대 최대이며, 이 기간 동안 RCP 8.5의 풍속보다 더 크다. RCP 8.5의 풍속은 2040년대와 2050년대에는 6m/s, 2060년대에는 5.9m/s정도로 풍속이 감소하고 있다. 21세기 후반 RCP 4.5의 풍속은 21세기 중반과 유사하거나 조금 감소하는 경향을 보인다. RCP 8.5의 풍속은 21세기 중반에 비하여 감소하였으며 2070년대부터 2090년대까지 풍속은 거의 유사하다. 기후변화 시나리오에 따른 RCP 4.5의 해상풍은 RCP 8.5보다 큰 값을 보였으며 RCP 4.5는 21세기의 90년 동안 시기적으로 크게 변화하지 않았으나, RCP 8.5는 21세기 전반에 가장 큰 풍속을 보이고 21세기 후반으로 갈수록 지속적으로 감소하는 경향을 보인다.

기후변화에 의해 기온은 지속적으로 상승하는 경향을 보이는데 풍속은 기온이 상승할 때 감소하는 반대의 경향을 보이고 있다. 기후변화에 의한 기온의 상승은 지표면 근처에서 지역간 기온의 차이가 작아지고 공간적으로 균질화된 기온 분포는 풍속 감소 요인으로 추측된다. 이러한 원인 분석을 위해서는 향후 기온의 공간 분포 조사가 필요하다.

Fig. 2는 풍속의 월 변동성 조사를 위하여 21세기 전반기(2011-2040년)의 연대별 10년 평균 풍속을 제시하였다. 풍속의 월 변동성은 RCP시나리오 4.5와 8.5, 기간, 육지와 해양에 대하여 조사하였다. Fig. 2(a)에 제시된 육지의 RCP 4.5 풍속은 1월에서 4월까지 3m/s이상, 5월부터 10월까지는 2.5m/s으로써 대체로 감소하며 11월과 12월에 풍속이 증가함을 보인다. 풍속의 최대값은 2월과 3월에 나타난다. 풍속의 최소값은 연대에 따라 차이는 존재하나 대체로 6월 또는 9월에 나타난다. 풍속의 최대는 봄, 겨울에 나타나며 2010년대와 2030년대는 3월, 2020년대는 2월 동안 최대이다. RCP 8.5의 육지 풍속은 RCP 4.5와 유사하다(Fig. 2(b)). 1월부터 4월까지 풍속이 3.5m/s, 5월에서 10월까지는 2.5m/s를 보이며 11월 이후 증가하기 시작한다. 봄에는 2010년대의 풍속이 2020년대와 2030년대 풍속보다 증가하고, 여름은 2020년대와 2030년대 풍속이 2010년대보다 증가한다. 즉, 미래의 지상 풍속은 봄에는 감소하며 여름에는 증가함을 보인다.

Fig. 2(c)는 RCP 4.5 해상풍의 월별 변화이다. 해상풍의 크기는 육지보다 강한 풍속을 보이나 연대별로 풍속의 차이는 육지보다 작다. 풍속의 최소 시기는 5월부터 7월이며 8월 이후 증가하는 경향이 나타난다. 강한 풍속은 12월부터 2월까지 겨울철에 주로 나타난다. 12월에는 2010년대와 2020년대 풍속이 강하고 2030년대는 약해지며, 1월과 2월에는 2020년대 풍속이 최소를 보인다. 봄과 가을은 시기별 풍속의 차이가 거의 없다. Fig. 2(d)는 RCP 8.5의 해상풍 월 분포이다. 풍속의 최대는 1월과 12월에 나타나며 최소는 6월에 나타난다. 강한 풍속이 존재하는 시기는 12월부터 3월까지이며 2010년대, 2020년대, 2030년대 모두에서 이러한 경향이 일

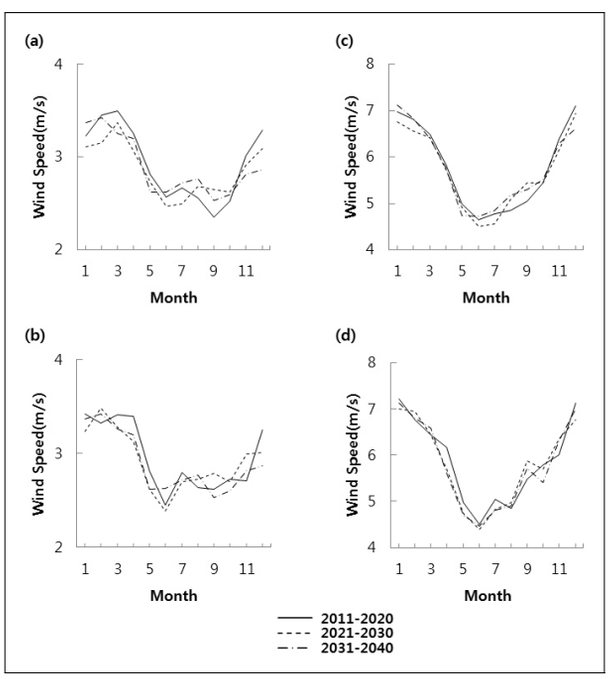

Fig. 2 (a) Monthly variation of surface wind speed averaged for 10 years from RCP 4.5 over land region in Korea. (b) Same as (a), but for RCP 8.5. (c) Monthly variation of surface wind speed averaged for 10 years from RCP 4.5 over sea region. (d) Same as (c), but for RCP 8.5. Solid line, dashed line, and dotted-dashed line indicate from 2011 to 2020, 2021-2030, 2031-2040, respectively.

치한다. 6월 풍속이 최소가 나타나는 경향 또한 모든 시기에서 일치하고 있다. 4월에서 6월까지 풍속이 감소하고 있으며, 4월과 5월은 2010년대 풍속의 크기가 다른 시기보다 더 크다. 7월 풍속은 2010년대에 더 강한 크기를 보인다. 반면 2020년대 가을철 (9-11월) 풍속은 다른 시기보다 큰 값을 보였다. RCP 4.5와 8.5의 해상풍 크기 차이는 크지 않으나 가을의 풍속은 RCP 8.5에서 더 증가하는 경향을 보이는 등 시기적으로 차이가 있다.

풍속의 공간 분포는 육지보다는 해상풍이 강하여 풍력발전을 위해서는 해상 풍력발전단지의 개발이 필요함을 시사하고 있다(제시하지 않음). 또한 육지의 풍력발전단지 개발은 환경

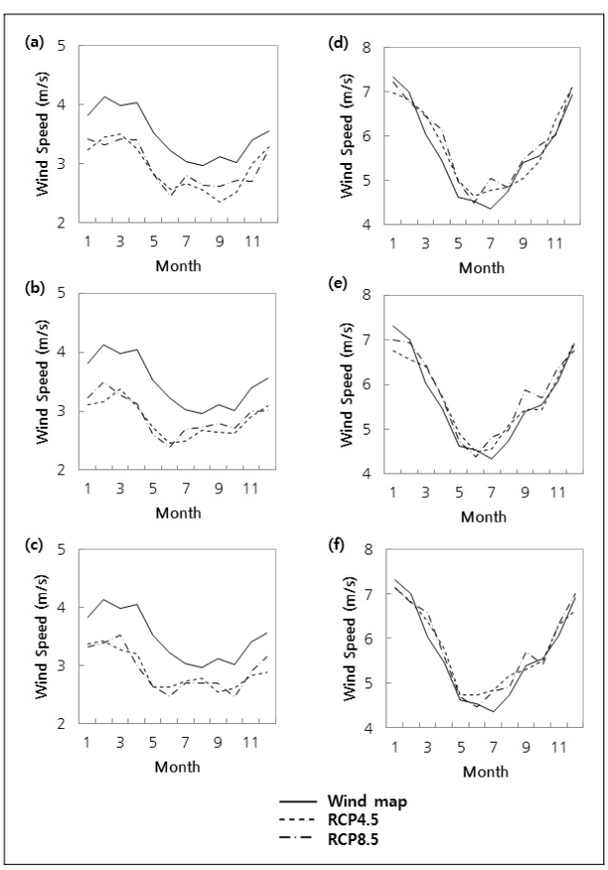

Fig. 3 (a) Comparison of monthly wind speed between wind map and RCP 4.5, 8.5 over land region in Korea from 2011 to 2020. (b) Same as (a), but for period from 2021 to 2030. (c) Same as (a), but for period from 2031 to 2040. (d) Comparison of monthly wind speed between wind map and RCP 4.5, 8.5 over sea region from 2011 to 2020. (e) Same as (d), but for period from 2021 to 2030. (f) Same as (d), but for period from 2031 to 2040. Solid line, dashed line, and dotted-dashed line indicate wind map, RCP 4.5, and RCP 8.5, respectively.

문제등과 관련하여 어려운 점이 있으며, 강한 풍속과 환경 문제 제약이 작은 장점이 해상풍 발전단지 건설에 유리하다.

따라서 Fig. 3에서는 풍력-기상자원지도와 기후변화 시나리오에 따른 미래 육지와 해상풍의 각 연대별 월 분포를 비교하였다. 풍력-기상자원지도의 육지 풍속은 기후변화 시나리오의 2010년대 풍속보다 0.2-1.0m/s정도 크다. 풍력-기상자원지도의 최대 풍속은 2월에 나타났으며 주로 2-4월에 강풍이 존재하였으며 7-10월의 풍속은 약화되었다. 최대 풍속 시기는 1-4월이며, 반면에6-10월은 풍속의 감소시기이다. 특히 RCP 4.5의 여름 풍속은 8.5보다 감소하며, 겨울은 RCP 8.5에서 약화된다. 2020년대 풍속의 최대값은 RCP 4.5에서 3월, RCP 8.5에서 2월에 나타난다. 풍속의 최소값은 RCP 4.5와 8.5 모두 6월에 나타난다. 2020년대 육지의 봄철 풍속은 RCP 4.5와 8.5가 유사하며 여름, 가을, 겨울은 RCP 4.5의 풍속이 RCP 8.5의 풍속보다 작다. 2030년대 봄과 여름의 풍속은 RCP 4.5의 풍속이 RCP 8.5보다 크나 가을과 겨울은 대체로 기후변화 시나리오간 풍속의 차이가 거의 없거나 RCP 8.5의 풍속이 더 크다.

해상풍의 풍속 비교는 풍력-기상자원지도와 기후변화 시나리오간의 차이가 육지보다 훨씬 감소한다. 2010년대에는 1월과 2월, 9월을 제외하고는 미래의 풍속이 증가함을 보인다. 봄과 여름은 풍력-기상자원지도와 기후변화 시나리오와의 차이가 가장 큰 시기이며 가을과 겨울은 미래 풍속과 풍력-기상자원지도가 거의 유사하다. 2020년대의 겨울은 풍력-기상자원지도의 풍속이 기후변화 시나리오보다 증가하나 나머지 시기에서는 풍력-기상자원지도의 풍속이 감소한다. 특히 풍력-기상자원지도와 기후변화 시나리오 풍속의 차이는 7월에서 9월까지 크게 나타난다. 기후변화 시나리오 간의 풍속 차이는 크지 않으나 9월과 1, 2월에 그 차이가 최대이다. 2030년대의 해상풍은 이전 시기에 비하여 풍력-기상자원지도와 기후변화 시나리오 풍속의 차이가 더 작아진다. 1월과 2월의 미래 풍속은 현재의 풍속보다 약하지만 봄, 여름, 가을은 현재보다 풍속이 증가한다. 봄과 가을은 기후변화 시나리오간 풍속의 차이가 작으며 여름은 RCP 4.5 풍속이 RCP 8.5 풍속보다 증가한다.

기후변화 시나리오간의 풍속 차이는 기간에 따라 다르나 풍속이 강한 가을과 겨울철은 대체로 RCP 8.5 시나리오 풍속이 증가하였다. 이는 Fig. 1의 풍속 시계열과 일치하는 결과로써 21세기의 초반은 온난화의 초기 단계로써 국지적으로

기온이 상승함에 따라 RCP 8.5의 풍속이 4.5보다 강한 것으로 생각된다.

국립기상연구소의 풍력-기상자원지도[3]에서 한반도의 강풍 지역은 육지의 산악지역과 제주도 등 해안지역에서 나타났다. 국내 풍력발전단지의 현황은 대부분 강원도 산악지역과 제주도에 집중되어 있다. 따라서 미래 풍력 발전단지 개발과 기존 발전단지 재 배치 등을 위하여 강원도와 제주도의 월별 풍속 분포를 조사하였다(Fig. 4). 풍력-기상자원지도의 강원도 풍속 크기는 3.0-4.8m/s, 기후변화 시나리오는 2-3m/s 범위에 분포한다. Fig. 4(a)는 현재의 풍력-기상자원지도와 RCP 4.5의 연대별 풍속 비교이다. 풍력-기상자원지도의 풍속은 기후변화 시나리오의 풍속보다 0.5-1.5m/s 정도 큰 값을 보인다. 풍속의 최대가 나타나는 시기는 4월이며, 여름에 풍속이 약해지는 경향은 기후변화 시나리오 결과와 일치한다.

2010년대 풍속의 최대는 약 3m/s이며, 최소 시기는 2m/s 정도로 감소한다. 풍속의 최대는 3월이며, 9월에는 최소 풍속값을 보였다. RCP 8.5와 풍력-기상자원지도의 강원도 풍속 차이는 0.5-2.0m/s 정도 큰 값을 보이며, 미래 풍속의 연대별 차이는 작다(Fig. 4(b)). 강원도의 미래 풍속은 3월과 4월에 약 3m/s로써 최대값을 보이며 6월은 약 2m/s로 최소값을 보인다.

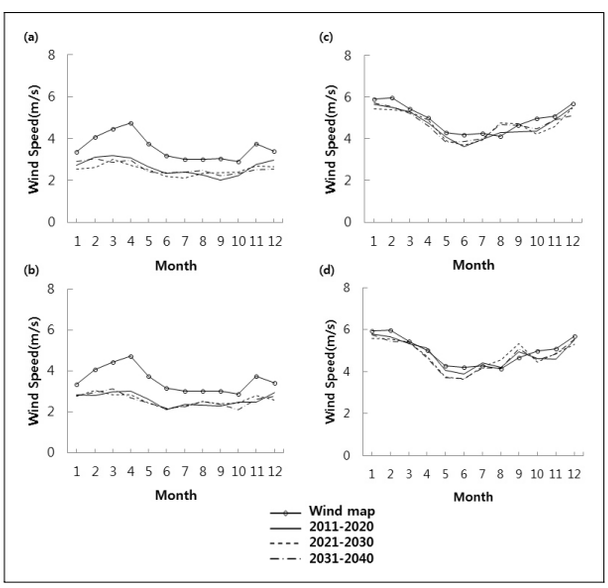

Fig. 4 (a) Comparison of monthly wind speed between wind map and averaged wind speed for 10 years using RCP 4.5 over Gangwon Province in Korea. (b) Same as (a), but for RCP 8.5. (c) Comparison of monthly wind speed between wind map and averaged wind speed for 10 years using RCP 4.5 over Jeju Province in Korea. (d) Same as (c), but for RCP 8.5.

Fig. 4(c)와 (d)의 제주도 풍속 변화는 풍력-기상자원지도와 기후변화 시나리오간의 차이는 크지 않다. 제주도 풍속의 크기는 풍력-기상자원지도와 기후변화 시나리오에서 3.8-6.0m/s 정도의 범위를 갖는다.

RCP 4.5의 제주도 풍속의 최대 시기는 12월부터 2월까지의 겨울이다. 풍속의 최대값은 기후변화 시나리오에서 0.2-0.5m/s 정도 더 작다. 풍속의 최소값은 6월에 나타나는데 현재의 풍력-기상자원지도보다 풍속이 감소한다. 8월과 9월의 풍속은 연대별로 차이는 있으나 대체로 미래의 풍속이 증가함을 보인다. 이 기간을 제외하고는 대체로 기후변화 시나리오의 풍속값이 더 작다.

Fig. 4(d)의 RCP 8.5 제주도 풍속 분포는 5월과 6월에 풍속이 최소이고 최대 풍속은 12월과 1월에 나타난다. 봄의 풍속은 기후변화 시나리오와 풍력-기상자원지도는 유사하며 여름과 겨울은 풍력-기상자원지도의 풍속이 더 크다. 기후변화 시나리오의 연대별 차이를 계절에 따라 조사한 결과는, 봄과 여름 동안은 2010년대 풍속이 가장 강하며, 가을은 2020년대 풍속이 가장 강하다. 겨울의 풍속은 기간에 관계없이 유사한 것으로 전망된다.

3.2 태양-기상자원 변동성

미래 태양-기상자원의 특성 분석을 위하여 미래 일사량의 시간적 변동성 분석을 하였다. 기후변화 시나리오로부터 산출되는 지면 도달 일사량 자료를 이용하여 10년간의 일사량 평균을 제시하였다(Fig. 5). RCP 4.5의 일사량은 21세기 초반(2011-2040년)은 감소하는 경향을 보이며, 21세기 중반(2041-2070년)은 일사량이 증가한 후 감소하였으며, 21세기 후반(2071-2100년)은 감소하는 경향을 보인다. 전체 기간의 경향은 시간에 따라 일사량이 점차 감소하는 형태이다(Fig. 5(a)).

일사량 감소의 원인은 운량, 수증기량, 에어러솔 등 여러 요인과 관련이 될 수 있으나, 본 연구에서는 기후변화에 따른 영향 제시를 위해 강수량의 변동성을 분석하였다. 강수량은 21세기 후반으로 갈수록 지속적으로 증가하는 형태이다. 21

세기 초반 연간 강수량은 최대 1300mm이나 21세기 중반은 1380mm, 21세기 후반은 1500mm 이상으로 증가하였다.

일사량의 최대가 되는 2010년대는 강수량의 최소 시기이며, 일사량이 감소하는 2020년대와 2030년대는 강수량이 증가하였다. 2040-2050년대에 일사량이 증가하는 시기도 강수량이 감소하였으며 21세기 후반은 강수량이 최대를 보여 일사량은 감소하고 있다.

RCP 8.5의 일사량은 21세기의 90년 동안 점진적으로 감소하는 경향을 보인다(Fig. 5(b)). 그러나 2030년대, 2060년대, 2080년대와 같이 시기에 따라 일시적으로 증가하는 기간도 존재한다. RCP 8.5의 강수량 변동성은 21세기 초반은 1200mm 내외였으나, 21세기 중·후반은 1400mm 내외를 나타냈다. 21세기 초반에서 중반까지 강수량이 급격히 증가하는 경향을 보이나 2050년대 이후 강수량의 변화는 크지 않다. 일사량의 증가와 감소 경향은 강수량의 변동과 관련은 있으나 변화 크기는 강수량보다 일사량에서 더 작다. 본 연구에서는 일사량과 강수량만의 변동 경향을 분석하였으나 향후 연구에서는 일사량 변화의 요인이 되는 운량, 수증기, 에어러솔 등 다른 요소의 분석이 필요하다.

Fig. 6은 일사량의 월 변동성을 제시하였다. RCP 4.5의 일사량 최대 시기는 5월과 6월이다. 7월 이후는 감소하며 12월에 최소값을 보인다. 일사량의 최대는 태양 고도와 강수, 운량과 같은 기상 상태에 따라 결정된다. 그러므로 태양 고도가 높아지는 여름철에 일사량이 최대가 되어야 하나 여름은 장마에 의한 영향으로 일사량이 5-6월보다 감소하게 된다. 각 연대별 일사량은 1-4월은 거의 유사하며 5-9월까지 차이가 존재한 후, 10-12월은 유사한 값을 보인다. 5-9월 동안 일사량은 2010년대 최대이며, 2020년대와 2030년대는 점차 감소한다.

일사량의 차이가 여름에 가장 크고, 가을과 겨울은 거의 차이가 없는 것은 강수량의 변동과 관련 될 수 있다. 즉, 여름철에는 강수량의 변동성이 크나 가을과 겨울의 강수량 변동성 차이가 작기 때문이며, Fig. 6의 시기별 강수량의 조사에서도 2010년대의 강수량이 가장 적었는데 이러한 영향은 월 변동성에도 반영되었다.

일사량은 5월에서 9월까지 500MJ/m^2 이상을 보였다. 기간별 일사량의 차이는 10-2월까지는 거의 없으며 3월 이후 차이가 나타났다. RCP 8.5에서 봄 동안은 2010년대와 2030년대 일사량이 증가하였고, 7-9월까지는 2020년대와 2030년대 일사량이 2010년대보다 크다.

기후변화에 의한 태양-기상자원의 변동성 파악을 위하여 태양-기상자원지도와 미래 기후변화 시나리오 RCP 4.5와 8.5의 월별 변동성을 조사하였다(Fig. 7). 2010년대 일사량의 최대는 RCP 4.5의 5월에 나타난다. 12월은 일사량의 최소를 나타내며, 일사량이 최대일 때는 태양-기상자원지도보다 기후변화 시나리오의 일사량이 더 큰 값을 보였고, 일사량이 최소일 때는 태양-기상자원지도에서 더 큰 값을 보였다. 1월과 2월의 일사량은 태양-기상자원지도의 값보다 기후변화 시나리오에서 더 크며 7월부터 12월까지는 태양-기상자원지

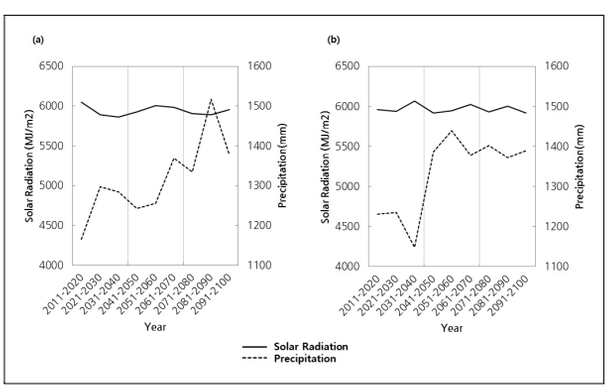

Fig. 5 (a) Decadal variation of mean annual precipitation and solar radiation for RCP 4.5 over the land region in Korea. (b) Same as (a), but for RCP 8.5. Solid line and dashed line indicate solar radiation and precipitation, respectively.

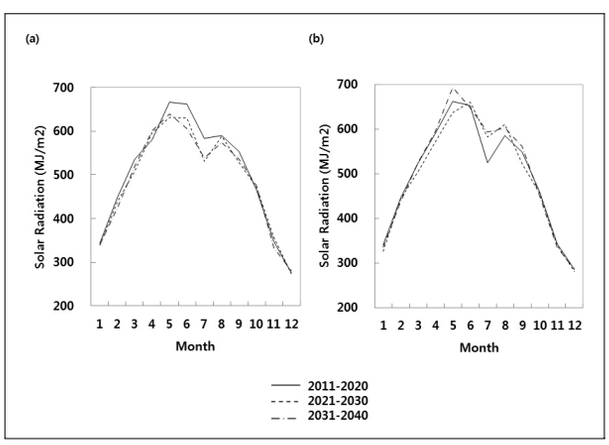

Fig. 6 (a) Monthly variation of solar radiation averaged for 10 years from RCP 4.5 over land region in Korea. (b) Same as (a), but for RCP 8.5. Solid line, dashed line, and dotted-dashed line indicate from 2011 to 2020, 2021-2030, 2031-2040, respectively.

도의 일사량이 기후변화 시나리오의 일사량보다 조금 더 큰 값을 보인다. 이는 미래의 여름철 강수량 증가 경향과 일치하며 향후의 연구에서 일사량에 미치는 요소별 분석이 필요하다. 시나리오 간 차이는 겨울에는 거의 없으며 봄과 여름에 차이가 있으며 5월과 6월에 차이가 최대이다(Fig. 7(a)).

Fig. 7(b)는 2020년대 태양-기상자원의 월별 시계열이다. 1-2월의 일사량은 현재보다 미래에 증가하는 것으로 전망되며, 3-5월의 일사량은 현재와 미래는 거의 동일하다. 6월은 RCP 4.5에서 일사량의 최대를 보이며 RCP 8.5 및 현재 태양-기상자원과도 차이가 최대이다. 8-12월은 현재의 태양-기상자원이 미래의 일사량보다 조금 더 큰 값을 보인다. 이 기간 동안 RCP 4.5와 8.5의 차이는 거의 존재하지 않는다.

2030년대 일사량의 월별 최대, 최소 시기는 각각 5월과 12월로써 이전 시기와 유사하다(Fig. 7(c)). 1, 2월과 여름철의 현재 일사량이 미래의 일사량보다 작은 경향성은 이전 시기와 일치하며, 8-10월까지의 태양-기상자원지도와 기후변화 시나리오간 일사량의 거의 동일한 특징은 이전 시기와 차이가 있다.

11월과 12월에는 현재의 일사량이 미래의 일사량보다 크다. 여름철 일사량은 RCP 4.5에서 최대이며 이러한 특징은 대체로 모든 시기에 일치한다.

현재 태양-기상자원지도로부터 일사량이 가장 큰 지역은 경남과 전남지역임을 알 수 있었다. 따라서 태양 발전단지 조성의 최적 입지 가능성 지역 조사를 위하여 현재의 태양-기상자원지도와 미래 태양 자원의 차이를 경남과 전남 지역에 대하여 조사하였다(Fig. 8). 태양-기상자원지도에서 나타나는 전남의 일사량은 5월과 8월에 약 600MJ/m^{2}로써 일 년 중 최대 시기이며, 12월과 1월에 300MJ/m^2 정도로써 최소값을 보인다. 봄에는 점차 증가하여 5월부터 8월까지 최대를 나타내고 가을부터 점차 감소한다. 5월에 피크를 보인 후 6월과 7월은 감소하는데 장마에 의한 영향으로 사료된다. RCP 4.5

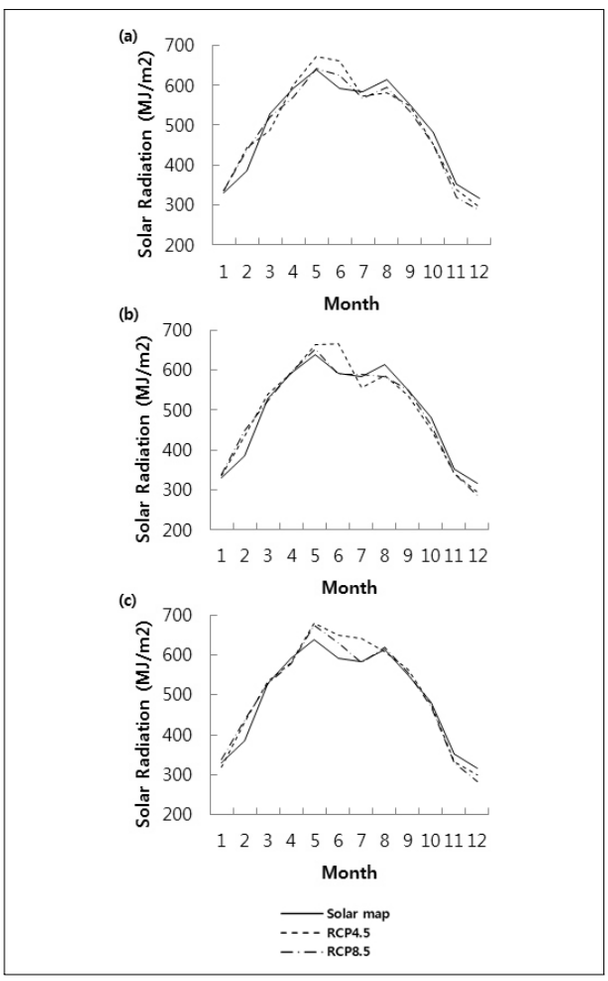

Fig. 7 (a) Comparison of monthly solar radiation between solar map and RCP 4.5, 8.5 over land region in Korea from 2011 to 2020. (b) Same as (a), but for period from 2021 to 2030. (c) Same as (a), but for period from 2031 to 2040.

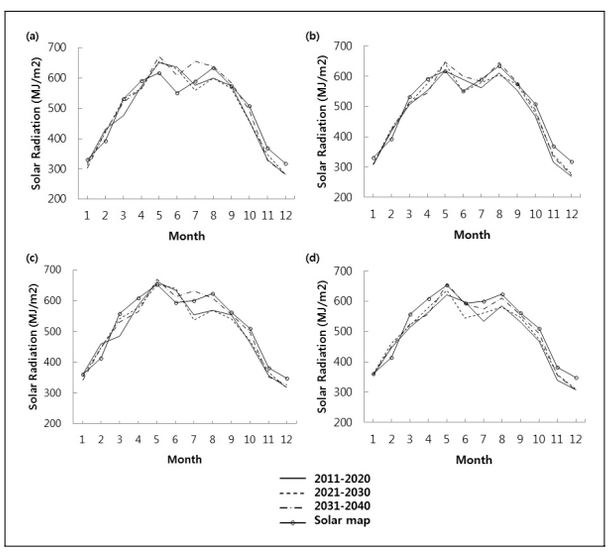

Fig. 8 (a) Comparison of monthly solar radiation between solar map and averaged solar radiation for 10 years using RCP 4.5 over Jeonnam Province in Korea. (b) Same as (a), but for RCP 8.5. (c) Comparison of monthly solar radiation between solar map and averaged solar radiation for 10 years using RCP 4.5 over Gyungnam Province in Korea. (d) Same as (c), but for RCP 8.5.

의 일사량 분포는 최대값과 최소값이 나타나는 시기가 연대별로 거의 일치하고 있으며 최소값은 기간에 따라 일사량 차이가 적다. 그러나 여름철은 태양-기상자원지도와 기후변화 시나리오간의 일사량 차이가 커진다. 5월과 6월 일사량은 태양-기상자원지도보다 모든 기간(2010년대부터 2030년대)의 일사량이 더 증가하였으며, 7월은 태양-기상자원지도보다 2030년대의 일사량은 증가하나 2010년대와 2020년대의 일사량은 소폭 감소하였다. 8월의 태양-기상자원지도 일사량과 2030년대 일사량은 유사하며 2010년대와 2020년대 일사량은 태양-기상자원지도 일사량보다 감소한다.

Fig. 8(c)에 제시된 경남 지역의 태양-기상자원지도는 5월 일사량이 650MJ/m^2, 8월은 약 600MJ/m^2의 두 개의 피크가 존재한다. 최소 시기는 1월과 12월이며 이 기간 동안 일사량은 330MJ/m^2 정도이다. 일사량의 봄철 증가, 8월 이후 감소 경향은 지역간, 시기별 모두 일치하고 있다. 봄, 가을, 겨울철의 태양-기상자원지도와 기후변화 시나리오(RCP 4.5)의 차이는 작다. 그러나, 6-8월까지의 여름철 일사량의 차이는 증가하며, 5월과 6월은 기후변화 시나리오의 일사량이 태양-기상자원지도보다 크다.

7월의 기후변화 시나리오에 따른 일사량은 시기별로 다른 차이를 보여, 2030년대는 태양-기상자원지도 일사량보다 증가하였으나 2010년대와 2020년대는 태양-기상자원지도보다 감소하였다. 기후변화 시나리오의 8월 일사량은 모든 시기에 태양-기상자원지도보다 감소하였으며 특히, 2010년대와 2020년대 일사량의 감소가 컸다. 가을과 겨울 동안에도 미래의 일사량은 현재보다 감소하는 것으로 전망된다.

Fig. 8(b)와 (d)는 전남과 경남 지역에서 RCP 8.5와 태양-기상자원지도를 비교하였다. RCP 8.5의 전남지역 일사량에서도 5월과 8월의 두 개의 피크가 존재하여 6월과 7월은 감소하고 있다(Fig. 8(b)). 월별 일사량은 기간에 따라 차이가 존재한다. 즉, 2010년대와 2030년대 6월 일사량은 현재의 일사량보다 증가하였으며, 7월과 8월 일사량은 현재와 유사하거나 조금 감소하는 것으로 전망된다. 전남의 일사량 최소 시기는 12월이며 미래의 일사량과 현재 일사량의 차이가 가장 크다. 경남 지역에서는 RCP 8.5 일사량의 최대, 최소 경향은 RCP 4.5와 일치하고 있다(Fig. 8(d)). 그러나 여름철 일사량의 변동은 시기에 따라 태양-기상자원지도와 차이가 크다. 6월은 2020년대 일사량의 감소가 다른 시기에 비하여 크며, 7월과 8월 모두 미래의 일사량은 현재의 일사량보다 감소하고 있다. 또한 봄과 가을, 겨울(12월)에도 미래의 일사량은 현재의 일사량보다 감소하는 경향을 보인다.

미래의 일사량 감소 경향은 기후변화에 의한 기온 증가와 관련될 수 있다. 기온의 증가는 증발량이 증가하여 대기중의 수증기가 많아진다. 그러므로 대기중의 운량이나 강수가 증가하므로 일사량은 감소하게 된다. 따라서 미래의 일사량은 태양-기상자원지도의 일사량보다 감소하는 경향으로 전망된다.

4. 결 론

기후변화에 의해 전 지구 기온은 지속적으로 증가하고 있으며, 기후변화의 주 요인이 되는 온실가스 감축을 위한 하나의 방법으로써 신재생에너지 활용이 될 수 있다. 신재생 에너지 활용도 증가를 위해서는 정확한 기상정보의 제공이 우선적으로 필요하다. 또한 기후변화에 의해 미래의 기상 자원 분포는 변화 할 것이므로, 미래의 발전단지 개발을 위해서는 미래 기상자원 정보 제공이 필요하다.

본 연구에서는 미래 풍력·태양 발전단지 개발에 필요한 정보 제공을 위해 기후변화 시나리오(RCP 4.5, RCP 8.5)에 따른 한반도 지상풍과 일사량의 분포를 분석하고, 현재의 풍력·태양-기상자원과 비교한다. 본 연구에 활용된 기후변화 시나리오 자료의 해상도는 12.5km이며, 미래 기후자료의 기간은 2011년부터 2100년까지의 자료를 시계열 분석하였다.

육지의 미래 풍속은 현재보다 감소하는 것으로 전망되며 RCP 8.5시나리오는 RCP 4.5 시나리오보다 풍속이 감소한다. 즉, 이산화탄소 농도가 증가할 때 풍속은 감소한다. 지구온난화에 의해 전 지구 지표면 기온이 상승하면 불균질한 지면 가열이 감소하므로 풍속이 감소하는 것으로 추정된다. 해상풍은 육지보다 2배 정도 크기로 강한 풍속을 보이며 미래의 풍속이 감소하는 전망과 RCP 8.5 시나리오 풍속이 감소하는 경향은 육지의 풍속 분포와 일치한다. 풍속의 월 변동성은 봄과 겨울에 풍속이 증가하며, 최소 분포는 여름에 존재한다. 해상풍에서도 이러한 경향은 일치한다. 여름은 풍력-기상자원지도와 기후변화 시나리오간의 풍속 차이가 최대이며, 가을과 겨울의 풍속은 현재와 미래에서 서로 유사하다.

기후변화 시나리오에 의한 일사량은 미래에는 감소하는 것으로 전망되며, 일사량의 감소는 강수량 증가와 일치하고 있다. 일사량의 월 분포는 5월과 6월에 최대로 나타난다. 태양고도가 높아지는 여름철 일사량이 최대가 되어야 하나 장마영향으로 5, 6월 일사량이 증가한다. 연대별 일사량은 2010년대에 최대이며, 2020년대와 2030년대에는 감소하였다.

일사량의 최대가 나타나는 5월의 미래 일사량은 현재 보다 증가한다. 이 기간 동안 미래의 강수량은 감소하며 건조화 되는 것을 알 수 있다. 일사량의 최소 시기(12월)동안은 현재 일사량이 더 크다.

기후변화 시나리오에 기반한 미래의 풍속과 일사량 분포는 미래 기상 자원의 변동에 관한 유용한 정보를 제공한다. 그러나 현재 기상자원지도와 비교했을 때 정밀한 공간 분포는 제공하지 못한다. 그러므로 발전단지 개발을 위한 정밀한 기상정보 제공을 위해서는 향후 현재의 기상자원지도 해상도와 유사한 미래 기상자원지도 개발이 필요하다.

후 기

본 연구는 국립기상연구소 “응용기상기술개발”연구의 일환으로 수행되었습니다.

References

[1] Kim, S.-E., M.-H. Chung, J.-C. Park, E.-K. Rhee, 2008, “A basic study on the application plan of renewable energy systems for urban”, *Proceeding of the KSES 2008 Autumn annual conference*, pp. 120-125.

[2] Natioanl Institute of Meteorological Research, 2010, “Development of meteorological resources for green growth”, 300p.

[3] Byon, J.-Y., Y.-J. Choi, B.-K. Seo, 2010, “Characteristics of a wind map over the Korean Peninsula based on mesoscale model WRF”. *Atmosphere*, Vol. 20, No. 2, pp. 195-210.

[4] Zo, I.-S., J.-B. Jee, W.-H. Lee, K.-T. Lee, Y.-J. Choi, 2010, “Distribution of surface solar radiation by radiative model in South Korea”, *Climate Change Research*, Vol. 1, No. 2, 147-161.

[5] Moss, R. H and Coauthors, 2008, “Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts and Response Strategies”. *Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.*

[6] Natioanl Institute of Meteorological Research, 2011, “Climate change scenario 2011 for the IPCC 5th assessment report”. 99p.

[7] Bae, H.-J., C.H., Cho, W.-T. Kwon, S.-K. Kim, J.-Y. Cho, Y. Kim, 2011, “Development strategy for new climate change scenarios based on RCP”. *Climate Change Research*, Vol. 2, No. 1, pp.55-68.

[8] Lee, S., B.-Y. Kwon, D. Jung, K. Jo, M. Kim. S. Ha, H. Kim, B.-N. Kim, 2013, “Future prediction of heat and discomfort indices based on two RCP scenarios”, *Atmosphere*, Vol. 23, No. 2, pp.222-229.

[9] Giorgi, F., C. Jones, and G. R. Asrar, 2009, “Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework”, WMO Bulletin, 58, pp. 175-183.

[10] Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008, “A description of the advanced research WRF version 3”. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 125 p.

변 재 영

1995년 전남대학교 지구과학교육과 이학사
1997년 서울대학교 대기과학과 이학석사
2006년 서울대학교 대기과학과 이학박사

현재 국립기상연구소 지구환경시스템연구과 기상연구관
(E-mail : byonjy@kma.go.kr)

최 병 철

1983년 연세대학교 천문기상학과 이학사
1985년 연세대학교 기상학과 이학석사
2000년 East Anglia 대학(영국) 이학박사

현재 국립기상연구소 응용기상연구과 과장
(E-mail : cbc@kma.go.kr)

김 유 미

2011년 공주대학교 지리학과 문학사
2013년 공주대학교 지리학과 이학석사

현재 국립기상연구소 응용기상연구과 연구원
(E-mail : akahana@korea.kr)