기후변화 시나리오를 활용한 한국의 미래 상층풍의 바람 특성 분석

김선애¹ · 김맹기¹ · 박중철² · 장동호³

¹공주대학교 대기과학과 · ²공주대학교 지리정보과학연구소 · ³공주대학교 지리학과
(2015년 9월 7일 접수, 2015년 9월 23일 수정, 2015년 9월 25일 게재 확정)

An Analysis on the Characteristics of the Future Upper Wind over South Korea Using Climate Change Scenarios

Seonae Kim¹ · Maeng-Ki Kim¹ · Jongchul Park² · Dong-Ho Jang³

¹Department of Atmospheric Science, Kongju National University

²Institute of Geographic Information Science, Kongju National University

³Department of Geography, Kongju National University

(Received 7 September 2015, Revised 23 September 2015, Accepted 25 September 2015)

Abstract : This study has calculated the change of wind speed according to the features of land surface roughness using the surface wind data provided by the Korean peninsula data of HadGEM3-RA and has analyzed the characteristics of the future upper wind over South Korea driven by several climate change scenarios. The simulation found that the more the time passes, the more the wind speed increases in the previous time period of upper wind and annual average wind speed time series analysis of three kinds of Representative Concentration Pathways (RCP). The wind speed of all three kinds of RCP increased in the summer and winter but decreased in the spring and fall in the analysis of seasonal time series and spatial distribution. The wind speed would be expected to increase in most months except April and November in the analysis of the monthly mean maximum wind speed. The histogram analysis shows the mean wind speed of upper wind over 3m/s. As the time passes, the wind speed increases more than in the past. Certain areas such as the areas under the urbanization development would be anticipated to raise the wind speed throughout all months.

Key Words : upper wind, wind speed, RCP, climate change, scenario

주요어 : 상층풍, 풍속, RCP, 기후변화, 시나리오

1. 서론

최근 세계적인 경제위기와 함께 환경오염 문제에 따른 탄소가스 배출 의무 감축량 시대로 접어

들면서 전 세계적으로 신재생에너지에 대한 관심과 투자가 급증하고 있다. 신재생 에너지원 중에서도 풍력발전은 태양광 발전과 함께 가장 활발히 연구되고 있는 분야로 한국 역시 이러한 추세에 부

응하여 다양한 신재생 에너지 제도와 법률을 제정하는 등 풍력발전에 대한 관심과 투자가 급증하고 있다(Ryu, 2009). 특히 기후변화에 따른 적극적인 적응 및 저감 정책의 일환으로 신재생에너지에 대한 관심과 수요가 증가하면서 풍력과 같은 신재생 에너지를 평가하는 데 활용될 수 있는 기상 정보에 대한 관심도 증가하고 있다. 신재생에너지 관련 기상정보는 국가적인 에너지 경제 활성화에 부응하는 선진 응용기상 기술의 개발 측면에서도 사회적으로 관심을 받고 있다.

풍력자원의 활성화를 위해서는 상세하고 정확한 풍력자원지도 및 미래 기후변화에 따른 상세하면서도 정확성이 높은 예측 자료가 필요하다. 하지만, 풍력자원지도는 많은 지점에서 장기간의 풍속 자료가 요구되며, 이는 현실적으로 어렵기 때문에 지상 관측자료를 이용한 공간내삽의 필요성이 제기되어 왔다(Park *et al.*, 2014). 이를 위해 장기적으로 수치모델링과 관측을 합성하는 재분석자료의 생산이 필요하지만, 현 시점에서는 우선적으로 통계적인 다운스케일링 방법이 적절하다.

한편 기후변화 시나리오 기반의 정확성이 높은 미래 풍력자원지도 산출기술 방법으로는 전지구후 모델(Global Climate Model: GCM) 및 지역기후 모델(Regional Climate Model: RCM), 그리고 통계적 기법들이 자주 활용된다. GCM은 공간적으로는 광역적, 시간적으로는 연평균과 계절평균의 기후에 있어 비교적 신뢰성 있는 미래 기후 변화 정보를 생산할 수 있다(Brown *et al.*, 2010; Kharin *et al.*, 2012). 하지만 낮은 공간해상도, 물리과정의 단순화 그리고 기후변화 시나리오의 불확실성 등으로 신뢰성이 낮다(Grell *et al.*, 1994). RCM은 GCM보다 상세한 기후 특성을 재현할 수 있다는 장점이 있지만 모의영역, 경계자료, 해상도 등의 강제력에 따라 모의수준이 영향을 받아 한계가 있다(Zhang *et al.*, 2008).

이러한 문제점을 최소화하고 모의수준의 신뢰성을 향상하기 위한 방안으로 통일된 환경에서 다수의 GCM 및 RCM들이 산출한 앙상블 멤버들을 활용하는 연구들이 활발히 수행되었으며, 특히 국제 공동 연구들은 IPCC에서 권장하는 RCP(Representative Concentration Pathway) 시나리오를 공식적인 미래 기후 변화 시나리오로 이용하고 있다(IPCC, 2007).

최근 우리나라에서도 RCP 시나리오와 지역기후모델들을 이용한 미래 기후변화 정보를 생산하기 위한 연구가 다수 진행되었다(KMA, 2012b; Suh *et al.*, 2012; Park *et al.*, 2013; Oh *et al.*, 2014). 하지만 모델에 적용된 지역이 광범위하고 상대적으로 낮은 해상도로 인해 농업, 수문, 방재 등 관련 응용연구 분야에서 바로 활용하기에는 한계가 있었다. 따라서 기후변화 적응 및 완화 정책을 수립하기 위해서는 고해상도 상세 기후변화 정보가 요구된다(KMA, 2012b). 특히 신뢰성이 높고 한반도에 특화된 미래 상세기후변화 정보를 활용하기 위해서는 한반도 중심의 고해상도 모의환경을 바탕으로 다수의 전구 및 지역기후모델들을 통합한 통계적 상세화 연구가 필요하다.

국외의 경우 통계적 상세화 연구는 풍력자원뿐만 아니라 다양한 분야에서 응용이 이루어지고 있으며(Fuentes and Heimann, 2000), 최근에는 수치모델을 이용한 물리·역학적 다운스케일링이나 경험식을 이용한 통계적 다운스케일링 방법을 이용하여 미래 풍력에너지의 변동성 분석 연구가 활발히 진행되고 있다(Kim *et al.*, 2014).

국내의 경우 대부분의 연구가 풍력 잠재량 산출 및 과거 변동성 분석에 집중되고 있어서 지역기후모델의 결과를 이용하여 통계적 상세화 과정의 풍력 연구는 제한적이다(Kim and Suh, 2013; Kim *et al.*, 2013). 그러나 최근 들어 연구에 활용 가능한 관측지점의 수가 증가하면서 국내의 몇몇 연구

에서 지형을 고려한 내삽 방법을 활용하여 풍속 분포도 작성 및 통계적 상세화 연구가 진행되고 있다 (Kim and Byon, 2008; Byon *et al.*, 2010; Byon *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2014).

하지만, 이러한 풍력의 통계적 상세화 과정 대부분은 지상풍(10m)을 대상으로 월평균 풍속 및 월평균 최대풍속 자료를 사용하여 바람의 특성을 분석하므로 신재생에너지인 풍력발전을 위한 상층풍(80m)과는 값의 차이가 다소 나타난다. 일반적으로, 풍력발전을 위한 상층풍은 지표면의 거칠기 특성에 따라 값이 변화가 일어나기 때문에, 이러한 토지피복 특성을 반영한 상층풍의 풍속분포도 작성이 필요하다. 특히, 기후변화에 따른 상층풍의 미래 상세 풍력자원지도 작성을 위해서는 미래 토지피복 특성이 반드시 반영되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 기후변화에 대응하여 지속가능한 신재생에너지 자원 확보를 위해 기후변화 시나리오 기반 미래 상층풍의 공간적 분포 특성을 분석하고자 한다. 특히 HadGEM3-RA의 한반도 기후변화 시나리오(공간해상도 12.5km) 자료에서 제공하는 지상풍 자료를 사용하여 지표면 거칠기 특성에 따른 상층풍의 풍속 변화를 추정하고, 미래의 토지피복 변화 및 기후변화에 따른 한반도

의 상층풍의 바람 특성 분석 가능성을 검토하였다.

2. 사용자료 및 연구방법

현재, 국립기상과학원에서는 온실가스 배출 시나리오인 RCP 시나리오에 기초해 전지구 대기-해양 결합모델인 HadGEM2-AO로 약 135km 해상도(144×192)의 전지구 기후변화 시나리오를 산출하였고, 전지구 기후변화 시나리오 자료를 초기조건으로 하여 지역기후모델 HadGEM3-RA로 한반도 영역에 대한 12.5km(164×184) 해상도의 지역 기후변화 시나리오를 산출하였다. 또한 미래 기후변화 전망(2006~2100년)은 200년, 400년째 제어적분 결과를 이용한 과거기후 모의실험의 마지막 상태(2005년)를 초기조건으로 RCP 강제력에 따라 각각 미래 기후변화를 산출하였다(KMA, 2013a).

따라서 본 연구에서는 우선적으로 IPCC 5차 평가보고서(AR5)에 기반하여 국립기상과학원에서 적분한 전지구 모델의 자료를 경계조건으로 한 지역기후모델의 기후변화 시나리오 자료를 수집하여 한반도에서의 상층풍 바람의 특성을 분석하고자

Table 1. Information of climate change scenarios model and data.

Range	East Asia
Model	HadGEM3-RA
Greenhouse gas emissions scenarios	RCP 2,6/4,5/8,5
Variable	Wind speed, U wind, V wind, Maximum speed
Temporal resolution	Monthly average
Spatial resolution	12,5km
Vertical lever	10m
Collection period	Historical run: 1979~2005 Future : 2006~2100
Analysis period	Historical run: 2001~2010 (2006~2010: RCP8,5 used) Future : 2021~2050

하였다. 이를 위해 RCP 시나리오는 3종의 RCP 시나리오(RCP 2.6, 4.5, 8.5) 자료를¹⁾ 사용하였으며, 특히 400년째 제어적분결과를 이용하여 과거 기간(2001~2010년)과 미래기간(2021~2050년)의 풍속자료를 수집 하였다(Table 1).

다음으로, 본 연구에서는 모델의 시나리오 자료와의 비교 분석을 위해 우리나라 관측 자료를 수집 하였다. 모델과의 비교를 위하여 1981년부터 2010년까지의 기간 동안 61개 지상관측소(Automated Synoptic Observing System, ASOS)의 풍속 자료를 수집하였다. 하지만 기간 중에 관측소 이전이 있었던 8개소는 자료의 일관성을 위하여 제외하였고, 최종적으로 총 53개 관측소의 자료만 사용하였다.

본 연구에서는 기후변화 시나리오 기반 미래 상층풍의 공간적 분포 특성을 분석하고자 시계열, 공간분포, 히스토그램 등의 특성을 과거기간과 미래기간으로 나누어 관측자료와 비교분석 하였다. 특히, Deacon 방정식을 이용하여 풍력발전이 가능한 높이인 80m 고도의 풍속으로 변환하여 분석을 수행하였다. 구체적인 연구방법은 다음과 같다.

먼저, 고도 80m(발전기 설치고도)의 상층풍 값을 구하기 위해 지상풍 자료를 사용하여 지형의 특성에 따른 풍속의 변화를 추정하는 Deacon 방정식을 이용하여 값을 산출하였다. 이 방정식은 지표면 거칠기 길이와 수직적 풍속 분포의 관계를 이용하여 지표면의 상태에 따라 계산한 풍속으로 연직 풍속의 분포가 고도에 대하여 로그분포를 나타내는 것을 가정하여 다음 수식과 같이 산출된 식이다(KMA, 2013b).

$$\frac{V(b)}{V_0(b_0)} = \left(\frac{b}{b_0}\right)^\alpha \quad (1)$$

여기서, 바람에너지의 활용계수는 지형의 변화

(제측지점을 기준으로 기하평균 높이)와 지면조도(Roughness)에 의해서 결정되며 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\alpha = a + b \times \ln V_0 \quad (2)$$

$$a = \frac{1}{\ln \frac{b_g}{z_0}} + \frac{0.088}{1 - 0.088 \ln \frac{b_0}{10}} \quad (3)$$

$$b = \frac{-0.088}{1 - 0.088 \ln \frac{b_0}{10}} \quad (4)$$

$$b_g = \sqrt{b \times b_0} \quad (5)$$

여기서 V 는 구하고자 하는 높이의 풍속, V_0 는 관측 높이의 풍속, b 는 구하고자하는 풍속의 높이, b_0 는 관측 높이, Z_0 는 주변지형의 거칠기 고도, α 는 지표면 거칠기 길이(roughness length)이다. 특히 α 는 토지피복에 따라 결정되는 값으로, 지표면의 거칠기 특성에 따른 상층풍의 풍속의 변화를 추정하기 위해서는 반드시 토지피복 자료가 필요하다. 본 연구에서는 USGS 식생분류와 지면거칠기 길이 자료를 활용하였다(KMA, 2013b).

지표면 토지피복도는 NASA에서 제공하는 MODIS 토지피복도(1km) 자료를 사용하였으며, 기간은 2001년부터 2011년까지의 생산된 자료이다. USGS(United States Geological Survey)의 토지피복 분류 항목은 총 32개 항목이다. 이중 남한지역에 해당하는 토지피복 분류 항목은 총 15개(해양, 활엽상록수림, 활엽낙엽수림, 침엽상록수림, 침엽낙엽수림, 혼합림, 초지, 밭, 습지, 나대지, 도시, 저수지, 나대지, 논, 산불)이다. 본 연구에서는 지면거칠기 길이가 동일한 토지피복 항목을 통합하였으며, 육상의 정보만을 활용하기 위해 해양을 제외하였다. 최종적으로 침활엽수림, 혼합림, 초지, 밭, 습지, 나대지, 도시, 저수지, 논 등 총 9개의 분류항목을 선정하였다(USGS: Web site).

다음으로, 상층풍의 풍속자료는 HadGEM3-RA

의 한반도 기후변화 시나리오(공간해상도 12.5km) 자료에서 제공하는 지상풍(10m)의 월 평균 풍속 및 월 평균 최대 풍속 자료를 사용하여 산출하였다. 이를 통해 상층풍의 모델에서 모의 하는 평균 풍속의 계절 사이클 및 주요 주기의 특성과 계절별 히스토그램 등을 기초적으로 분석하였다.

마지막으로, 기후변화에 따른 미래 한반도의 상층풍의 공간적 분포 특성을 분석하기 위해 미래의 토지피복도를 작성하였다. 먼저, MODIS 토지 피복도 자료와 GIS 공간자료와의 통합을 통해 화소 단위로 토지피복 유형별 규칙성을 분석하였다. 다음으로, 토지피복의 규칙성을 수학적으로 표현하기 위하여 경험도수분포함수(EDF, Empirical Frequency Distribution Function)를 이용한 상대선호도함수(RFF, relative favorability function)를 산출하였다. 또한 산출된 RFF를 통합하여 화소단위의 공간적 토지피복 변화를 예측하고 이를 통하여 미래 2050년까지의 공간적 토지피복 예측도를 작

성하였다(Cho, 2014). 이를 바탕으로 RCP 시나리오 자료를 기반으로 생산된 미래의 지상풍 자료에 Deacon 방정식을 적용하여 미래 상층풍속 자료를 산출하였으며, 이를 통해 미래 한반도 상층풍의 공간적 분포 특성 분석 가능성을 검토하였다.

3. 한반도 상층풍의 기후변화 시나리오 자료 분석

1) 상층풍의 시계열분석

본 연구에서는 상층풍의 시계열분석을 위해 우선적으로 지상풍(10m)의 모의효율을 분석하였다. 그 결과, ASOS 관측 자료와 시나리오 자료의 연평균 시계열 분석에서는 관측자료의 기후값이 2.03% 이었고, 과거기간의 모델자료 기후값이 3.07%로 모델자료가 약 1% 과대모의 하는 것을 확인할 수 있었다. RCP3종의 경우 과거기간의 모

Figure 1. Time series of annual mean wind speed (m/s) of historical run and three kinds of RCP scenario data (unit: m/s).

Table 2. Chronological mean wind speed percentage change of upper wind versus climatological value.

	2020s	2030s	2040s
RCP2,6	0,3%	1,9%	2,4%
RCP4,5	1,4%	1,5%	3,2%
RCP8,5	-0,3%	2,0%	3,8%

텔자료와 크게 차이가 나타나진 않지만 RCP2.6과 RCP4.5의 경우는 연도별로 증가와 감소의 변동이 나타나고 RCP8.5의 경우는 미래로 갈수록 증가하는 경향이 나타날 것으로 모의되었다.

다음으로, 관측 및 시나리오 자료의 월별평균 시계열 분석에서는 연평균 시계열과 마찬가지로 약 1%의 계통오차를 보이지만 월 변동성은 모델이 관측을 잘 모의하고 있었다. 특히 겨울에 바람이 강하고 여름에 약한 우리나라의 풍속 특징이 잘 나타나고 있었다.

Figure 1은 과거기간 및 3종 RCP 미래 시나리오를 이용하여 추정한 상층풍의 연평균 시계열을

나타낸다. 상층풍은 시간에 따라 상승하는 경향이 나타났다. 특히 RCP2.6과 RCP4.5는 2020년대부터 증가하는 추세를 보이며, RCP8.5에서는 2020년대에 다소 감소하는 변화율이 나타나지만 2030년대 이후에 다른 두 시나리오보다 더 급격하게 증가하는 추세를 보인다(Table 2). 전체적으로는 RCP3종 모두 미래로 갈수록 증가하는 모의 결과를 보였다. 이러한 결과는 지구온난화에 따른 저위도와 고위도 간의 에너지 불균형이 증폭됨에 따라 미래 기후 변화에서 풍속이 점차 증가할 것으로 예측된 IPCC 보고서와 유사한 결과로 모의되었다(IPCC, 2007).

Figure 2. Time series of monthly mean upper level wind speed of historical run and three kinds of RCP (unit: m/s).

Figure 3. Time series of annual mean maximum upper level wind speed of historical run and three kinds of RCP (unit: m/s).

Table 3. Annual maximum wind speed percentage change by RCP scenarios versus historical model data.

	2020s	2030s	2040s
RCP2,6	0,3%	1,7%	2,1%
RCP4,5	1,4%	1,8%	2,7%
RCP8,5	0,0%	1,8%	2,7%

Figure 4. Time series of monthly mean maximum upper level wind speed of historical model data and three kinds of RCP (unit: m/s).

Figure 2는 과거기간의 모델자료 및 RCP3종 상층풍의 월별 평균풍속 시계열 자료로 과거기간의 모델자료와 RCP3종과의 차이가 눈에 띄게 나타난다. RCP3종 모두 1, 5, 6, 7, 8월에 과거기간의 모델자료 대비 강한 풍속이 나타나고, 이와 반대로 11월에는 약한 풍속이 나타나는 특징을 보인다. 계절적으로는 여름에는 증가하고 봄과 가을엔 감소, 겨울은 12, 1월엔 증가하지만 2월은 감소하는 특징이 나타난다.

Figure 3은 상층풍으로 변환한 시나리오 자료의 연평균 최대풍속 시계열 분석결과로 과거기간 대비 미래에 뚜렷한 증가 추세가 나타난다. 연대별 증감률 분석결과에서도 RCP 시나리오 모두 전 구간에서 증가하고 있음을 분석할 수 있었다. 따라서 상층풍의 최대풍속 경년변동의 추세는 시간이 지남에 따라 증가할 것으로 모의되었다(Table 3).

Figure 4는 상층풍으로 변환한 시나리오 자료의

월별 평균 최대풍속 시계열로 과거기간의 모델자료 및 RCP 시나리오 모두 3월에 최대풍속이 가장 크게 나타나고 8월에 가장 작게 나타난다. 과거기간 모델자료 대비 3종 RCP 시나리오 자료의 미래 월별 평균최대풍속 변화량을 분석한 결과 대부분의 월에서 증가하는 반면, 4월과 11월에서는 감소하는 것으로 나타났다. 또한 10월에서 과거와 미래 시나리오 사이의 평균최대풍속 차이가 가장 적은 것으로 분석 되었다.

2) 상층풍의 공간패턴 분석

본 연구에서는 기후변화에 따른 미래 한반도의 상층풍의 공간적 분포 특성을 분석하기 위해 MODIS 토지피복도와 DEM(Digital Elevation Model) 및 사면 경사도를 기반으로 토지피복 유형별 규칙성을 분석하였다. 이를 바탕으로 화소 단위의 공간적 토지피복 변화를 예측하였으며, 특히 2010년

Table 4. Area by types of land cover in the future (unit: pixel).

	Conifer and broadleaf tree	Mixed forest	Grass	Dry field	Wetland	Bara land	Urban	Lake	Paddy
2010	54	315	7	78	2	1	29	4	124
2020	50	310	7	68	2	3	53	4	117
2030	48	305	6	54	2	4	91	4	100
2040	42	299	6	49	1	4	121	3	89
2050	40	291	5	42	1	5	145	3	82

a) Historical

b) RCP2.6

c) RCP4.5

d) RCP8.5

Figure 5. Spatial distribution of historical model data by mean wind speed(a) and anomaly (b, c, d) by RCP scenarios (unit: m/s, upper wind).

을 기준으로 하여 토지피복 변화 예측 알고리즘을 적용하여 10년 단위로 미래의 토지피복도를 작성하고 각 분류 항목별 면적을 산출하였다(Table 4).

예측된 토지피복 변화를 종합하여 보면, 도시와 나대지만이 면적이 늘어났고, 나머지 토지피복 유

형들은 감소하였다. 도시의 경우 미래로 갈수록 그 면적이 증가하는 것으로 나타나며, 특히 2030 년대에 가장 급격하게 증가하는 것으로 분석되었다. 반면, 논과 밭 등의 경작지 면적은 지속적으로 감소하는데, 이는 도시화에 따라 대부분의 유형에

Figure 6. Spatial distribution of historical model data by mean wind speed(a) and anomaly (b, c, d) by RCP scenarios depending on seasons (1: spring, 2: summer, 3: fall, 4: winter) (unit: m/s, upper wind 80 m).

서 그 면적이 감소하지만 우선적으로 경작지의 면적이 두드러지게 감소하는 것으로 보인다.

이상의 미래 토지피복 유형별 공간분포 변화 특성을 반영하여 RCP 시나리오 자료를 기반으로 생산된 미래의 지상풍 자료에 Deacon 방정식을 사용하여 미래 상층풍속의 공간분포도를 작성하였다. Figure 5는 상층풍의 연평균풍속에 대한 과거기간 모델자료와 3종 RCP 시나리오를 이용하여 산출한 편차장을 공간분포로 나타낸 결과이다.

그림에서 보는 것처럼 토지피복 유형에 따라 상층풍의 지역적인 변화가 있음을 분석할 수 있었다. 즉, 풍속이 강해지는 지역은 대체적으로 토지 피복분류가 미래로 갈수록 도시화가 진행된 지역과 일치하는 것으로 나타나는데 이는 지면 거칠기 길이가 작은 값에서 큰 값으로 변화됨에 따라 나타나는 특징으로 판단된다.

Figure 6은 Figure 5를 계절별로 구분하여 나타낸 상층풍의 공간분포도로, 지상풍의 계절적 특징과 유사하게 남한의 전반적인 풍속이 봄, 겨울에 강하고 상대적으로 여름, 가을에 약한 분포가 나타난다(a). 미래의 상층풍 변화를 계절별로 살펴보

면, RCP3종 모두 전반적으로 여름, 겨울에 증가하고, 봄, 가을에는 감소하는 경향이 나타났다. 하지만 미래 도시화가 이루어진 지역은 4계절 모두에서 풍속이 증가할 것으로 모의되었다.

3) 히스토그램 분석

우리나라의 현재 기후기간과 미래기간에 대한 상층풍의 풍속 분포 특성을 알아보기 위하여 연평균 및 계절별 기후값을 계급별로 분류하여 히스토그램 분석을 수행하였다.

Figure 7은 과거기간의 모델자료 및 RCP 시나리오 3종의 평균풍속 히스토그램을 나타낸다. 상층의 평균 풍속은 3m/s 이상으로 비교적 강하게 나타났다. 계급별로 살펴보면, 4~5m/s에서 과거기간의 모델자료 및 RCP 시나리오 3종 모두 가장 높은 비율을 보였다. 또한, 5m/s 미만인 계급에서는 미래시나리오 자료 보다 과거기간의 모델자료에서 높은 것으로 나타나는 반면, 5m/s 이상에서 그 반대로 분석되었다. 즉, 미래기간에 상층의 평균풍속이 현재보다 강해지는 지역이 증가하는 것을 의미한다.

계절별 상층의 평균풍속 히스토그램을 분석하여

Figure 7. Upper wind mean speed of historical model data and three kinds of RCP histogram per classes (count of 741 grids of the total).

본 결과, 미래기간의 봄과 겨울철에는 3~4%의 바람이 여름, 가을철에 비해 매우 낮은 분포를 보이며, 반면에 4% 이상의 바람은 급격히 증가하는 양상을 보였다. 하지만, 각 RCP 시나리오에 따른 뚜렷한 차이는 나타나지 않았다.

4. 결론

본 연구에서는 IPCC 5차 평가보고서에 기반하여 국립기상과학원에서 적분한 전지구 모델의 자료를 경계조건으로 한 지역기후모델의 기후변화 시나리오 자료를 수집하여 남한의 상층풍의 공간적 분포 특성을 분석하고자 하였다. 특히, HadGEM3-RA의 한반도 기후변화 시나리오 자료에서 제공하는 지상풍 자료를 사용하여 지표면 거칠기 특성에 따른 상층풍의 풍속 변화를 추정하고 미래의 토지피복 변화 및 기후변화에 따른 한반도의 상층풍의 공간적 분포 특성 분석 가능성을 검토하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

첫째, 지상풍 분석에서는 관측 및 시나리오 자료가 약 1%의 계통오차를 보였지만, 그럼에도 불구하고, 관측의 계절변동을 모델이 대체로 잘 모의하는 것으로 나타났다.

둘째, 상층풍의 과거기간의 모델자료 및 RCP3종의 연평균풍속 시계열 분석에서는 지상풍과 유사한 변동성이 나타났는데, RCP3종 모두 미래로 갈수록 풍속이 증가하는 모의 결과가 나타났다. 이러한 결과는 지구온난화에 따른 저위도와 고위도 간의 에너지 불균형이 증폭됨에 따라 미래 기후변화에서 풍속이 점차 증가하는 것으로 판단된다. 과거기간의 모델자료 대비 연도별 평균풍속 증감률은 RCP2.6과 RCP4.5에서 2020년대부터 증가하는 추세가 나타났다. 반면에 RCP8.5는 2020년대에는 작은 감소율이 나타나지만 그 이후에는 다

시 증가하는 추세를 보였다. 계절별 시계열분석에서는 RCP3종 모두 풍속이 여름에는 증가하고 봄과 가을에는 감소하였으며, 겨울인 12, 1월에는 증가하지만 2월은 감소하는 특징이 나타났다. 월별 평균 최대풍속 시계열 분석에서는 과거기간의 모델자료 및 RCP 시나리오 모두 3월에 최대풍속이 가장 크게 나타나고 8월에 가장 작게 나타난다. 월별 평균최대풍속 증감률 분석에서는 4월과 11월을 제외한 대부분 월에서 풍속이 증가할 것으로 예상되었다.

셋째, 상층풍의 공간패턴 분석을 위한 토지피복 변화에서는 도시와 나대지만이 면적이 늘어났고, 나머지 토지피복 유형들은 감소하였다. 특히, 도시의 경우 지속적으로 면적이 급격하게 늘어날 것으로 예상되었으며, 이러한 도시화가 진행된 지역들은 RCP 시나리오에서 미래 풍속이 강해질 것으로 예측된 지역들이다. 계절별 상층풍의 공간분포도 분석에서는 RCP3종 모두 전반적으로 여름, 겨울에 증가하고, 봄, 가을에는 감소하는 경향이 나타났다. 하지만 미래 도시화가 이루어진 지역은 4계절 모두에서 풍속이 증가할 것으로 모의되었다.

마지막으로, 히스토그램 분석에서는 상층풍의 평균 풍속은 3% 이상으로 강하게 나타났으며, 계급별로는 3~5%에서 과거기간의 모델자료가 RCP3종에서보다 많은 비율을 차지하였다. 하지만 5% 이상의 바람은 미래기후 시나리오에서 더 많이 분포하여 과거 대비 미래기간에 풍속이 클 것으로 모의되었다. 계절별로는 봄, 겨울철이 3~4%의 바람이 상대적으로 낮아질 것으로 예상되었지만, 4% 이상의 바람은 급격히 증가하는 양상으로 모의되었다.

이상의 결과를 종합하여 보면, 한반도의 상층풍 바람의 특성은 기후변화 시나리오에 따라 다소 차이는 있지만 전체적으로 미래에 풍속이 증가할 것

으로 예상되었다. 하지만, 계절별 평균풍속 및 최대풍속 분석에서는 여름과 겨울에 증가하고, 봄과 가을에는 다소 감소할 것으로 예상하였다. 특히 도시화가 진행되는 지역은 모든 계절에 걸쳐 풍속이 증가할 것으로 예상되었다. 최종적으로 본 연구에서 분석된 기후변화 시나리오 기반 미래 풍속의 변화 결과는 기후변화에 대응하여 지속가능한 신재생에너지 자원 확보를 위한 풍력에너지 자원의 공간적 변화 특성을 분석하고 이해하는 데 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

사사

이 연구는 기상청 국립기상과학원 주요사업 “응용기상기술개발연구”의 지원으로 수행되었습니다.

주

1) RCP 시나리오는 총 4종이 있으며, 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우(BAU) RCP 8.5, 지구가 회복력을 가질 수 있는 최대 한계 값인 RCP 2.6, 그리고 온실가스 저감 정책이 어느 정도 실현되는 경우는 RCP 4.5와 6.0으로 구성된다. 여기서 숫자는 복사강제력의 양으로서 단위는 Wm^{-2} 이다. 지상에 도달되는 태양복사가 약 $238Wm^{-2}$ 이므로, RCP 8.5/6.0/4.5/2.6의 복사강제력은 입사 태양복사량의 약 3.6%, 2.5%, 1.9%, 1.1%이다(KMA, 2013b).

참고문헌

- Brown, J. R., Jakob, C., and Haynes, J. M., 2010, An evaluation of rainfall frequency and intensity over the Australian Region in a global climate model, *Journal of Climate*, 23(24), 6504-6525.
- Byon, J. Y., Choi, Y. J., and Seo, B. K., 2010, Characteristics of a wind map over the Korean peninsula based on mesoscale model WRF, *Atmosphere*, 20(2), 195-210 (in Korean).
- Byon, J. Y., Kim, Y., and Choi, B. C., 2014, Variability of future wind and solar resource over the Korean peninsula based on climate change scenario, *New & Renewable Energy*, 10(2), 29-39 (in Korean).
- Cho, J. Y., 2014, Prediction of land-cover Change using RFF model and spatial information data; Case study for Cheonan and Asan city, Korea, Unpublished Ph.D. thesis, Kongju National University (in Korean).
- Fuentes, U. and Heimann, D., 2000, An improved statistical-dynamical downscaling scheme and its application to the Alpine precipitation climatology, *Theoretical and Applied Climatology*, 65(3), 119-135.
- Grell, G. A., Dudhia, J., and Stauffer, D. R., 1994, *Description of the fifth generation Penn State/NCAR Mesoscale Model(MM5)*, Technical Report, TN-398+STR, NCAR, Boulder, Colorado.
- Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X. B., and Wehner, M., 2012, Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble, *Climate Change*, 119(2), 345-357.
- Kim, C. and Suh, M. S., 2013, Prospects of using bayesian model averaging for the calibration of one-month forecasts of surface air temperature over South Korea, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 49(3), 301-311.
- Kim, D. W. and Byon, H. R., 2008, Spatial and temporal distribution of Wind Resources over Korea, *Atmosphere*, 18(3), 171-182 (in Korean).
- Kim, D. Y., Kim, J. Y., and Kim, J. J., 2013, Mesoscale simulations of multi-decadal variability in the wind resource over Korea, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 49(2), 183-192.
- Kim, Y., Lim, Y. J., Lee, H. K., and Choi, B. C., 2014, Spatio-temporal variability of future wind en-

- ergy over the Korean Peninsular using Climate Change Scenarios, *Journal of the Korean Geographical Society*, 49(6), 833-848 (in Korean).
- KMA, 2012a, *Assessment of uncertainties in regional climate models and prediction of detailed regional climate change over Korea* (in Korean).
- KMA, 2012b, Production of fine-scale climate change data over the Korean peninsula using RCP scenarios.
- KMA, 2013a, *Development and application of methodology for climate change prediction* (in Korean).
- KMA, 2013b, *Advanced Research on Meteorological Resource* (in Korean).
- IPCC, 2007, *Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies*, IPCC expert meeting report, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.
- Oh, S. G., Park, J. H., Lee, S. H., and Suh, M. S., 2014, Assessment of the RegCM4 over East Asia and future precipitation change adapted to the RCP scenarios, *Journal of Geophysical Research*, 119(6), 2913-2927.
- Park, J. C., Lim, Y. J., and Jang, D -H., 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 (in Korean).
- Park, J. H., Oh, S. G., and Suh, M. S., 2013, Impacts of boundary conditions on the precipitation simulation of RegCM4 in the CORDEX East Asia domain, *Journal of Geophysical Research*, 118(4), 1652-1667.
- Ryu, G. H., 2009, *A Study on estimation of wind power generation at Han-Kyong Wind Farm using weather data*, Soongsil University Master's thesis (in Korean).
- Suh, M. S., Oh, S. G., Lee, D. K., Cha, D. H., Choi, S. J., Jin, C. S., and Hong, S. Y., 2012, Development of new ensemble methods based on the performance skills of regional climate models over South Korea., *Journal of Climate*, 25(20), 7067-7082.
- USGS: https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table
- Zhang, D. F., GAO, X. J., Ouyang, L. C., and Dong, W. J., 2008, Simulation of present climate over East Asia by a regional climate model, *Journal of Tropical Meteorology*, 14(1), 19-23.

책임편집: 장동호

영문교열: 조창현