

## 지역 기후 앙상블 예측을 활용한 한반도 풍력 에너지의 시·공간적 변동성 연구

김유미<sup>1)</sup> · 김연희<sup>2)\*</sup> · 김나운<sup>3)</sup> · 임윤진<sup>2)</sup> · 김백조<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>공주대학교 대기과학과, <sup>2)</sup>국립기상과학원 응용기상연구과,

<sup>3)</sup>대전지방기상청 청주기상지청 기후서비스과

(접수일: 2016년 3월 31일, 수정일: 2016년 7월 8일, 게재확정일: 2016년 7월 11일)

### Variability of Wind Energy in Korea Using Regional Climate Model Ensemble Projection

Yumi Kim<sup>1)</sup>, Yeon-Hee Kim<sup>2)\*</sup>, Nayun Kim<sup>3)</sup>, Yoon-Jin Lim<sup>2)</sup>, and Baek-Jo Kim<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Atmospheric Sciences, Kongju National University, Gongju, Korea

<sup>2)</sup>Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Seogwipo, Korea

<sup>3)</sup>Applied Climate and Meteorological Service Division, Cheongju Branch Office of Meteorology, Cheongju, Korea

(Manuscript received 31 March 2016; revised 8 July 2016; accepted 11 July 2016)

**Abstract** The future variability of Wind Energy Density (WED) over the Korean Peninsula under RCP climate change scenario is projected using ensemble analysis. As for the projection of the future WED, changes between the historical period (1981~2005) and the future projection (2021~2050) are examined by analyzing annual and seasonal mean, and Coefficient of Variation (CV) of WED. The annual mean of WED in the future is expected to decrease compared to the past ones in RCP 4.5 and RCP 8.5 respectively. However, the CV is expected to increase in RCP 8.5. WEDs in spring and summer are expected to increase in both scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5. In particular, it is predicted that the variation of CV for WED in winter is larger than other seasons. The time series of WED for three major wind farms in Korea exhibit a decrease trend over the future period (2021~2050) in Gochang for autumn, in Daegwanryeong for spring, and in Jeju for autumn. Through analyses of the relationship between changes in wind energy and pressure gradients, the fact that changes in pressure gradients would affect changes in WED is identified. Our results can be used as a background data for devising a plan to develop and operate wind farm over the Korean Peninsula.

**Key words:** Wind energy density, variability, ensemble projection, regional climate model

## 1. 서 론

풍력 에너지는 전세계적으로 화석연료가 고갈됨에 따라 빠르게 성장하고 있는 재생 에너지원이며 기후 변화의 주요인이 되는 온실가스의 감축을 위한 대체

재 중 하나로 꼽히고 있다. 바람을 이용한 풍력발전은 현재 높은 기술 성숙도와 낮은 발전단가로 빠르게 성장하고 있다(IEA, 2013). 한국의 경우 신·재생 에너지 공급비중은 2014년 기준 4.08% (Korea Energy Agency, 2015)를 차지하고 있으며, 신·재생 에너지 비중을 2035년까지 11%로 늘리겠다는 골자의 2차 에너지 기본계획을 수립하였다(MOTIE, 2014). 최근 정부에서는 육상 풍력발전의 한계를 극복하기 위하여 서·남해 해상 풍력발전단지의 개발 및 시범 운영을 계획하고 있다. 지구 온난화는 대규모 순환의 변화에

\*Corresponding Author: Yeon-Hee Kim, Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, 33 Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju-do 63568, Korea  
Phone: +82-64-780-6784, Fax: +82-64-738-6515  
E-mail: yeonheekim@korea.kr

따라 풍력발전의 근원이 되는 지표 풍속의 패턴과 강도를 바꾸는 원인이 된다(Lu et al., 2007; Mizuta, 2012; Tobin et al., 2015). 따라서 바람의 변화는 가용한 잠재 에너지원의 변화를 가져올 수 있으므로 이를 정량적으로 파악하는 것은 중요하다(Kim et al., 2014).

국외의 경우 수치모델을 이용한 물리·역학적 다운스케일링과 경험식을 통한 통계적 다운스케일링 방법을 이용한 연구가 활발하게 이루어지고 있다(Pryor and Barthelmie, 2005; Pryor and Schoof, 2010; Barstad et al., 2012; Pryor et al., 2012a, b; Hueging et al., 2013; Reyers et al., 2015). 그리고 가용한 컴퓨팅 자원의 능력이 향상됨에 따라 고해상도의 다양한 모델을 고려하여 대기의 불확실성을 정량적으로 제시함으로써 그 예측 성능을 보다 향상시키기 위한 앙상블 연구가 시도되고 있다. 최근 연구된 사례를 보면 Hueging et al. (2013)은 지역기후모델 2개를 활용하여 4개의 앙상블 실험을 구성하여 유럽전역을 대상으로 미래 풍력 에너지 밀도와 잠재 전력 생산량을 전망하였다. 중부 및 북부 유럽에서는 가을과 겨울에 특히 잠재 전력 생산량이 증가하고 그리스에게해를 제외한 남부 유럽의 모든 계절에서 감소할 것으로 전망하였다. Reyers et al. (2015)은 Hueging et al. (2013)의 연구에서 좀 더 발전된 내용으로, 유럽 및 독일을 중심으로 풍력 에너지 생산량에 통계·역학적 다운스케일링을 적용하여 분석하였다. 통계·역학적 다운스케일링은 날씨 유형이 적용된 방법으로서, 이 연구에서는 유형별로 빈도 수를 적용하여 역학적 다운스케일링을 수행하고 다시 그 빈도를 확률밀도함수로 각 격자 별로 적용하여 전력생산량을 산출하였다. 통계·역학적 다운스케일링 방법이 역학적 다운스케일링과 유사한 전력생산량의 예측성능을 보여 미래 전력생산량은 북부 유럽에서 증가하고 남부 유럽에서는 반대의 경향이 나타나는 것을 확인하였고 모델 앙상블에서 통계·역학적 다운스케일링 방법이 지역적인 풍력 에너지 변화를 평가하는 도구로서 적합함을 밝혔다. 이외에도 Outten and Esau (2013), Tobin et al. (2015) 등의 연구에서도 앙상블을 활용한 풍력 에너지 전망 연구가 수행된 바 있다.

국내의 미래의 풍속 및 풍력 에너지의 변동성에 대한 연구는 국외 사례들에 비추어 봤을 때 시작 단계이다. 기존의 풍속이나 풍력 에너지에 관련된 연구들은 주로 현재의 상태를 진단하기 위한 연구들이 주를 이루고 있었으며(Kim et al., 2000; Kim and Byun, 2008; Byun et al., 2010; Heo et al., 2010; Kim and Kang, 2012; Kim et al., 2013), 최근에는 Byun et al. (2014), Kim et al. (2014, 2015) 등의 연구에서 미래 풍속 및 풍력 에너지의 전망을 제시하는 연구가 진행

되었다. Byun et al. (2014)의 연구에서는 RCP 기후변화 시나리오 2종(RCP4.5와 RCP8.5)을 활용하여 미래 풍속 변화를 전망해 보았으나 사용한 자료에 대한 검증과 변동 경향 그리고 변화에 대한 원인 분석이 필요하였다. Kim et al. (2014)은 SRES (Special Report on Emissions Scenarios) A1B 시나리오가 적용된 중규모 수치 모델(WRF)을 활용하여 바람을 역학적으로 다운스케일링하여 과거(1989-1999)의 풍속 변화 재현과 더불어 미래(2044-2054)의 풍속 변화를 전망하였고 계절별로 풍속이 변화하는 이유는 온난화로 약화된 기압경도로 인한 영향임을 밝혔다. 그리고 Kim et al. (2014)은 지역기후모델(HadGEM3-RA)로부터 산출된 RCP 기후변화 시나리오 2종(RCP2.6과 RCP8.5)을 활용하여 한반도 및 주변지역의 풍력 에너지(풍력 에너지 밀도와 잠재 전력 생산량)의 시·공간적인 변동성을 분석하였다. 미래 풍력 에너지는 육지에서 증가하는 반면 해상에서 감소할 것으로 전망하였으며 미래 풍력 에너지의 변동은 주변 기상장의 변화와 연관지어 해석이 가능하지만 큰 변동성으로 인한 불확실성 역시 증가할 것임을 밝혔다. 그리고 Kim et al. (2015)의 연구에서는 모델에서 산출된 미래 기후변화 시나리오의 결과를 보완하고자 관측자료를 통계적으로 다운스케일하여 관측에 대한 모델의 계통오차를 제거하고 미래 상층 풍속을 전망하였다. 앞서 국내에서 연구된 미래 풍속 및 풍력 에너지 전망의 4개 사례는 단일 전지구기후모델(Global Climate Model, GCM) 및 지역기후모델(Regional Climate Model, RCM)을 통해 생산된 시나리오의 자료를 분석한 사례라는 공통점이 있다. RCM은 GCM보다 고해상도로 기후 특성을 재현할 수 있다. 하지만 모의영역, 경계자료, 해상도 등의 강제력에 의해 모의수준이 영향을 받는다는 한계를 가지고 있다(Zhang et al., 2008; Hong and Kanamitsu, 2014; Lee and Hong, 2014; Kim et al., 2015).

이러한 지역기후모델의 한계를 극복하고 모델의 모의수준 평가 및 불확실성을 파악하기 위해서 앙상블 연구가 활발히 진행 중이다. 유럽의 경우 지역기후 모델링 국제사업(CORDEX, Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment)에 참여하고 있는 유럽 지역 기후모델링(EURO-CORDEX) 프로젝트에서 내부적으로 EURO-CORDEX에 참여하고 있는 모델을 활용하여 앙상블 프로젝트(ENSEMBLE)를 수행하고 있으며 앙상블 결과를 활용하여 풍력 에너지 관련 연구를 진행하고 있다. 국외에서는 앞서 언급한 앙상블을 활용한 풍력 에너지 연구가 활발히 진행 중이지만 국내에서는 풍력 에너지 전망에 다중 모델 앙상블 연구가 진행된 바 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 단일 지역기후모델에서 생산된 기후변화 시나리오를 활

용하여 제시한 풍력 에너지 변동 분석 결과의 한계와 불확실성 평가 그리고 예측성능 평가를 위하여 동일 경계조건이 처방된 지역기후모델들을 상상블하여 미래 기후변화에 따른 풍력 에너지의 변동성을 전망해 보고자 하였다. 2장에서는 본 연구에 사용한 자료와 분석방법에 대하여 설명하였다. 그리고 3장에서는 지역기후모델들의 풍속 모의특성, 불확실성 평가를 하였으며 상상블 멤버를 새롭게 구성하였다. 4장에서는 상상블된 미래 풍력 에너지 밀도의 변동 전망을 연, 계절별 그리고 지역별로 분석해 보았으며 풍력 에너지 밀도의 변화와 기압경도의 관계를 분석한 결과를 제시하였다. 마지막으로 5장에서는 분석 결과를 요약하고 끝맺었다.

## 2. 자료 및 방법

본 연구에서 사용된 자료는 RCM에서 생산된 RCP (Representative Concentration Pathway, 대표농도경로) 기후변화 시나리오이다. RCP 시나리오는 인간활동이 대기에 영향을 미치는 복사량으로 온실가스 농도를 정한 시나리오이다. 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우는 RCP8.5, 지구가 회복력을 가질 수 있는 최대 한계 값인 경우일 때 RCP2.6, 그리고 온실가스 저감정책이 수행되는 정도에 따라 RCP4.5와 RCP6.0으로 구성된다(NIMR, 2011). 그 중 400년 제어 적분된 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오의 10 m 고도 지상풍속을 활용하여 기후변화에 따른 미래 풍력 에너지 밀도 (Wind Energy Density, WED)의 변화를 파악하고자 하였다. 분석 대상영역은 한반도 육지 및 주변 해역을 포함한 영역이다(Fig. 1). 과거 대비 미래의 변화를 파악하기 위한 과거 분석기간은 1981년부터 2005년까지이며 미래 분석기간은 2021년부터 2050년까지이다. 또한 WED의 변동에 영향을 주는 원인을 파악하고자 한반도 주변지역의 기압 변화도 함께 살펴 보았다. 사용된 자료에 대한 상세한 내용은 Table 1에 정리하였다. 본 연구에서는 5개의 지역기후모델을 활용하여 과

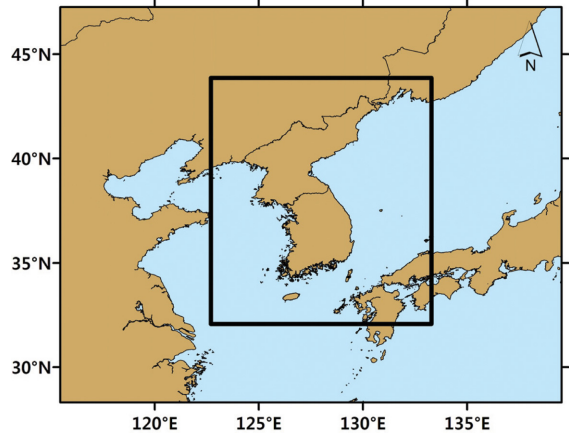


Fig. 1. The black box mark is analysis area for the variability of Wind Energy Density.

거 기간의 풍속 모의 정확도가 상대적으로 우수한 모델을 선정하여 상상블 분석을 수행하였다. 기존에 선행 연구로 진행된 HadGEM3-RA의 변동 분석 결과의 불확실성 평가 및 더 나은 예측 성능 평가를 위하여 같은 HadGEM2-AO가 초기 경계조건으로 처방된 4개의 지역기후모델 RegCM4 (Suh et al., 2016), MM5 (Cha et al., 2016), WRF (Ahn et al., 2014), GRIMs (Hong et al., 2013; Lee and Hong, 2014)를 추가하여 분석에 활용하였다. 그리고 상상블 결과를 활용하여 미래 WED의 변동성을 분석하였다. WED는 풍속( $V$ )의 세제곱과 공기밀도에 비례한다. 자세한 계산식은 다음과 같다.

$$WED = \frac{1}{2} \rho V^3 \tag{1}$$

본 연구에서는 공기의 밀도( $\rho$ )를 표준대기밀도( $1.225 \text{ kg m}^{-3}$ )로 가정하였고 지상 10 m 고도를 대상으로 하여 분석하였다. 기후모델의 결과물을 활용할 때 자료의 신뢰도를 높이기 위하여 기후모델이 현재 기후를

Table 1. Used data for analysis.

Data	Period	Scenario	Resolution		Variable
			Spatial	Time	
GCM	HadGEM2-AO		1.34°		Sea Level Pressure
RCM	HadGEM3-RA	1981~2005 (annual)	0.11°	monthly	Surface Wind Speed
	MM5	1981~2004 (seasonal),			
	WRF	2021~2050			
	RegCM4				
	GRIMs				
	ERA-interim	1981~2005	None	0.75°	

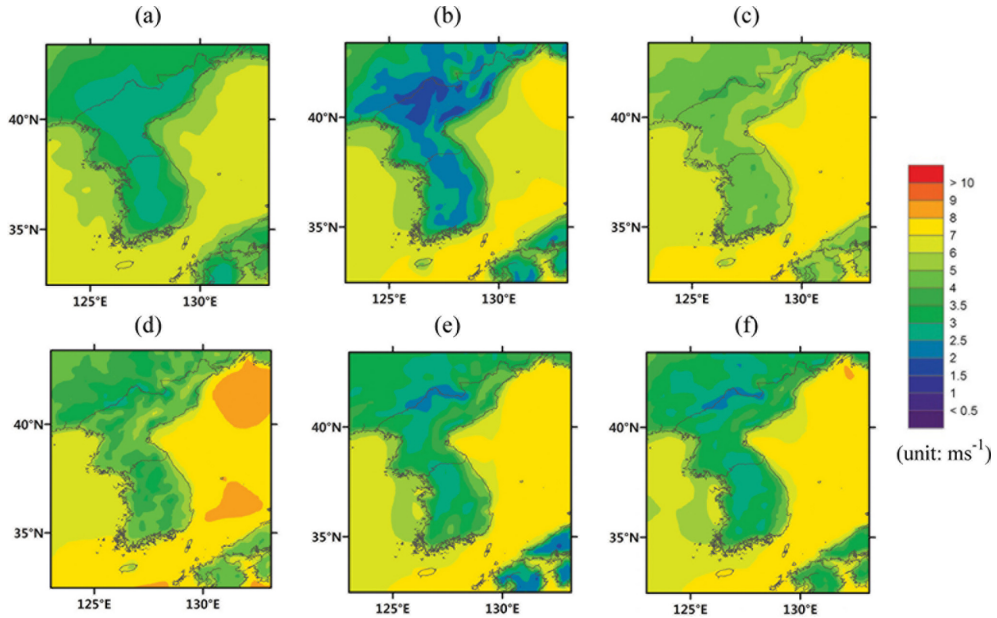


Fig. 2. Distribution of annual mean of wind speed for 1981~2005 under ERA-interim and 5 RCM (unit:  $m s^{-1}$ ). (a) ERA-interim, (b) HadGEM3-RA, (c) RegCM4, (d) WRF, (e) GRIMS, and (f) MM5.

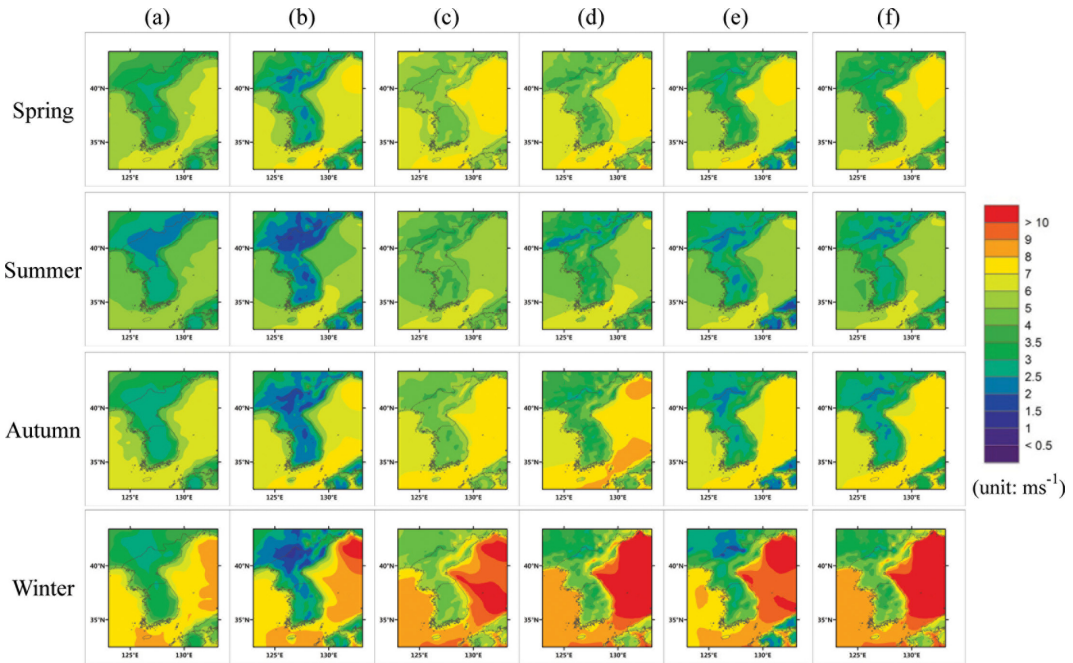
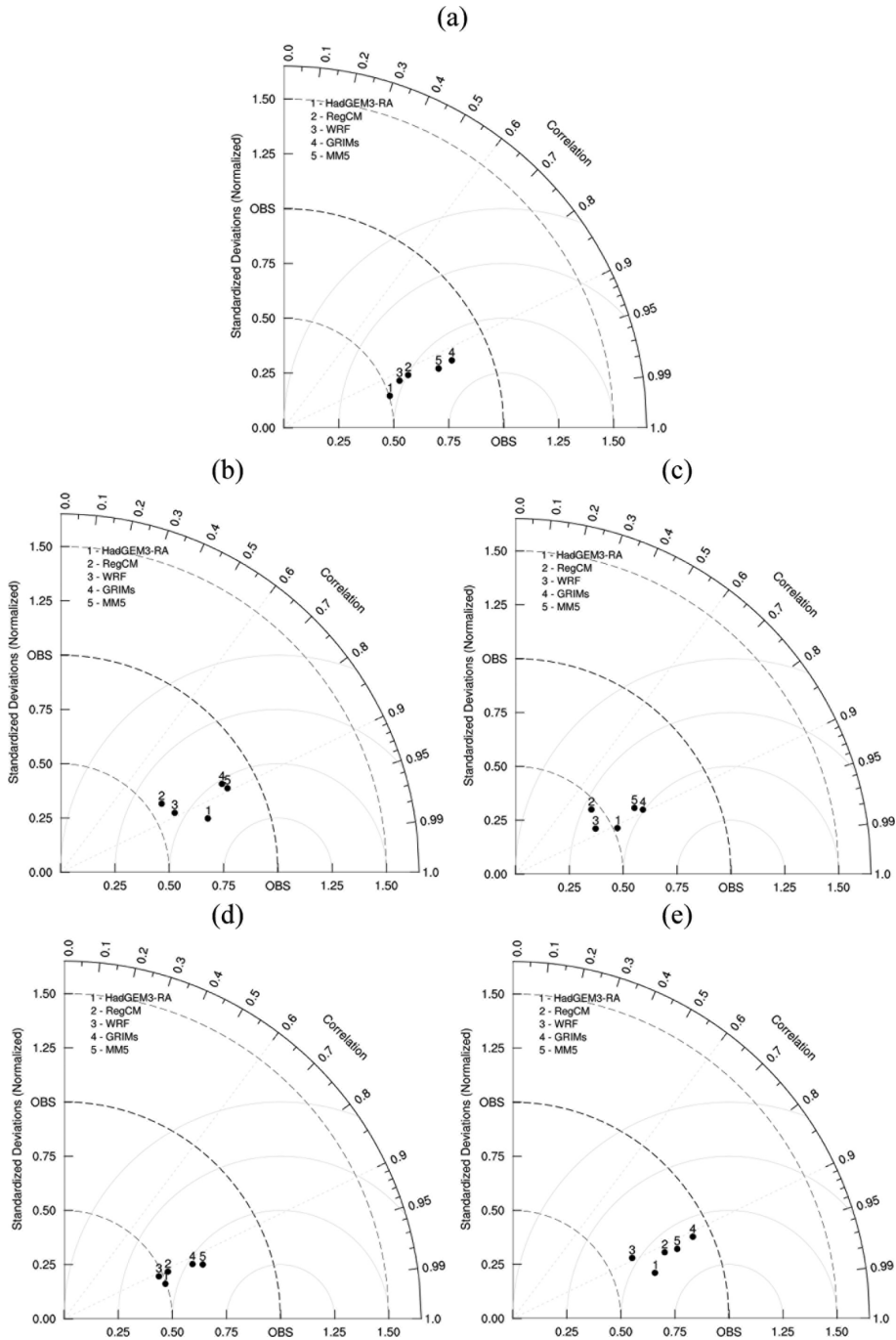


Fig. 3. Same as Fig. 2 but for distribution of seasonal mean of wind speed.

얼마나 잘 모의하는지 관측자료와 비교하여 확인하는 과정이 필요하다(Catter et al., 1999; Lee et al., 2012; Kim et al., 2014). 따라서 본 연구에서는 각 지역기후

모델의 과거 풍속 모의 결과를 ECMWF의 ERA-interim 재분석 자료와 비교해 보았다. 그리고 WED를 대상으로 연·계절 평균과 변동계수(Coefficient of Variation,



**Fig. 4.** Taylor diagram analysis of wind speed for annual and seasonal mean for study area. (a) Annual, (b) Spring, (c) Summer, (d) Autumn, and (e) Winter.

CV)를 분석하였고, 과거 대비 미래의 변화율로 나타내었다. 이는 모델에서 산출된 자료를 활용한 결과이며 모델의 특성이 반영되기 때문에 정량적인 수치보

다는 상대적인 변화율로 표현하였다. 또한 과거 대비 미래의 변화가 유의한지를 통계분석(T-test, F-test) 결과와 함께 제시하였다.

### 3. 현재 풍속 모의 평가

미래 WED의 변화를 전망하기에 앞서 현재 기후에 대한 각 지역기후모델의 과거 지상 풍속 모의 결과를 비교해 보았다. 비교에는 ECMWF의 ERA-interim 재분석 자료를 활용하였다. Figure 2는 1981년부터 2005년까지 25년 평균된 연평균 풍속의 공간분포이다. ERA-interim은 육지 3~4 m s<sup>-1</sup>, 바다 4~6 m s<sup>-1</sup>의 분포를 보였다(Fig. 2a). 5개의 지역기후모델 중 HadGEM3-RA는 ERA-interim과 다른 지역기후모델에 비해 육지에서 풍속을 과소 모의하는 반면(Fig. 2b), 특히 WRF는 해상에서 풍속을 6~8 m s<sup>-1</sup>로 과대 모의하는 특징을 보였다(Fig. 2d). 봄과 여름에는 지역기후모델의 풍속 모의결과가 ERA-interim과 유사하며 모델간 공간분포의 차이가 작았으나 겨울에는 해상에서 지역기후모델이 대부분 과대 모의하는 공간분포를 보였다(Fig. 3). Figure 4는 연·계절 평균 풍속에 대하여 ERA-interim에 대한 표준편차 비율과 Pattern Correlation을 함께 도식화한 Taylor diagram이다. ERA-interim과의 상관관계가 가장 높은 모델은 HadGEM3-RA이며 표준편차의 비율, 즉 분산이 비슷한 모델은 GRIMs임을 확인할 수 있다. 그리고 Table 2에서 제시된 바와 같이 연·계절의 bias (Model - Reanalysis)는 HadGEM3-RA의 겨울을 제외한 나머지 모델의 연·계절에서 positive bias의 특징을 가지고 있으며 RegCM4와 WRF는 ERA-interim에 비해 상대적으로 큰 RMSE 값을 가진다. 각 지역기후모델 간 과거기간에 대한 풍속 모의 특성을 비교한 결과 HadGEM3-RA를 제외한 나머지는 대체로 과대 모의하는 특성을 가지고 있다. 본 연구에서는 5개의 지역기후모델 중 RMSE, bias가 작고 비일관성 지수(Inconsistency index, INC)가 높은 모델을 선정하여 앙상블에 활용하였다. INC는 예측일관성 지수로 같은 검증 기간에 대해서 연속된 예측이 얼마나 일관적인 예측을 수행하는지를 나타내는 값으로 알려져 있으며(Zoster et al., 2009; Hwang et al., 2012) 0에 가까울수록 일관성이 높은 것을 의미한다. 계산식은 Hwang et al. (2012)에서 제시한 식을 활용하여 분석하였다. 비교하고자 하는 두 자료간(관측과 모델 예측 값)의 편차와 표준편차의 비로 정의되는 INC는 아래의 식으로 정리할 수 있다.

$$INC = \frac{d_2[O, M]}{0.5\{std(O) + std(M)\}} \quad (2)$$

여기서  $d_2$ 는 두 자료간의 편차,  $std$ 는 표준편차,  $O$ 는 관측,  $M$ 은 모델 예측 값이다. 과거 기간의 전반적인 예측일관성을 알아보기로 기간 평균된(period-average) INC를 살펴보았으며 이는 INC 값을 평균하여 제곱근을 취한 값을 이용하였다. 수식에 대한 상세

**Table 2.** Verification for Root Mean-Square Error (RMSE), bias, and inconsistency index (INC) for wind speed from 5 RCMs compared with ERA-interim. Reference periods are 1981~2005 (hindcast for annual) and 1981~2004 (hindcast for seasonal). Verification area is shown in Fig. 1.

Term	RCM	RMSE	Bias	INC
Annual	HadGEM3-RA	0.59	0.04	0.08
	RegCM4	0.96	1.21	0.31
	WRF	0.92	1.15	0.26
	GRIMs	0.67	0.49	0.08
	MM5	0.65	0.54	0.11
Spring	HadGEM3-RA	0.47	0.20	0.07
	RegCM4	0.90	1.23	0.31
	WRF	0.80	1.12	0.27
	GRIMs	0.50	0.43	0.10
	MM5	0.47	0.46	0.12
Summer	HadGEM3-RA	0.39	0.04	0.08
	RegCM4	0.70	0.87	0.30
	WRF	0.51	0.60	0.19
	GRIMs	0.40	0.29	0.09
	MM5	0.40	0.35	0.13
Autumn	HadGEM3-RA	0.46	0.02	0.11
	RegCM4	0.88	1.22	0.32
	WRF	0.81	1.11	0.25
	GRIMs	0.54	0.42	0.07
	MM5	0.55	0.52	0.09
Winter	HadGEM3-RA	0.58	-0.04	0.14
	RegCM4	1.12	1.54	0.32
	WRF	1.28	1.76	0.30
	GRIMs	0.85	0.83	0.09
	MM5	0.78	0.81	0.11

한 내용은 Hwang et al. (2012)의 논문을 참고하길 바란다. 앞서 정리한 분석방법에 따른 각 지역기후모델의 RMSE, bias 그리고 INC의 분석결과를 Table 2에 정리하였다. 종합하면 HadGEM3-RA, MM5, GRIMs가 5개의 모델 중 상대적으로 RMSE와 bias가 작고 예측일관성이 우수한 것으로 분석되었다. 이에 따라 3개의 모델을 활용하여 새롭게 앙상블을 구성하여 미래 풍력 에너지 밀도의 변동을 전망하였다.

## 4. 결 과

### 4.1 미래 풍력 에너지 밀도(Wind Energy Density, WED)의 변화

WED는 풍력발전단지의 개발 및 운영을 위한 고려 요소 중 하나이며 풍력발전기의 날개가 회전하는 면적에 통과하는 에너지를 의미하여 풍력발전단지를 운영하기에 적합한 곳을 알려주는 지표이기도 하다

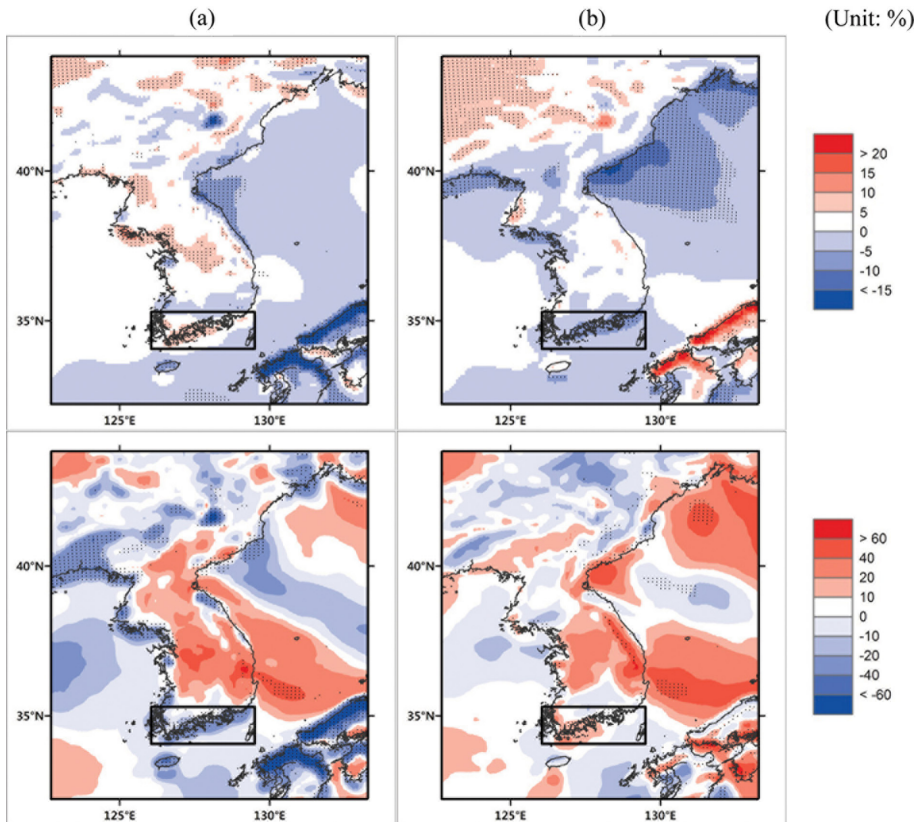


**Table 3.** Changes (unit: %) of Wind Energy Density (WED) for mean and Coefficient of Variation (CV) of annual and seasonal between hindcast and future periods. Reference periods are 1981~2005 (hindcast for annual), 1981~2004 (hindcast for seasonal), and 2021~2050 (RCP scenario). Unit for mean of hindcast is  $W m^{-2}$  and for CV of hindcast is non-dimension (from 0 to 1).

	Mean			CV		
	Hindcast (unit: $W m^{-2}$ )	RCP4.5 (unit: %)	RCP8.5 (unit: %)	Hindcast	RCP4.5 (unit: %)	RCP8.5 (unit: %)
Annual	141.73	-0.04	-0.43	0.10	-1.08	8.23
Spring	119.70	2.51	1.00	0.16	0.40	6.57
Summer	65.47	4.45	1.67	0.20	12.78	17.51
Autumn	133.91	-3.84	-2.78	0.19	-0.97	-6.14
Winter	247.49	-0.26	0.47	0.14	23.45	17.08

(Kim et al., 2014). 미래 WED의 변화를 파악하기 앞서 과거기간(1981~2005년)의 WED를 살펴보았다(Table 3). 연구대상 영역에서의 과거 평균 WED는 연간  $141.73 W m^{-2}$ 였고 계절별로는 겨울이  $247.49 W m^{-2}$ 로 가장 큰 WED 값을, 여름에는  $65.47 W m^{-2}$ 로 가

장 작은 값을 나타내었다. 그리고 과거 WED의 변동 계수는 여름이 다른 계절에 비해 크고 겨울에 작았다. 여름의 평균적인 에너지량은 적지만 연간 변동이 가장 큰 계절이고 겨울은 그 반대임을 확인할 수 있다. 과거기간을 토대로 2021년부터 2050년까지 30년간



**Fig. 5.** Change (unit: %) between hindcast and RCP scenarios regarding annual mean (upper panels) and Coefficient of Variation (lower panels) of Wind Energy Density for (a) RCP4.5 and (b) RCP8.5. Significant changes are dotted (Mean is t-test, but CV is f-test, 95% confidence level). Black box is focused area of WED for change each scenarios.

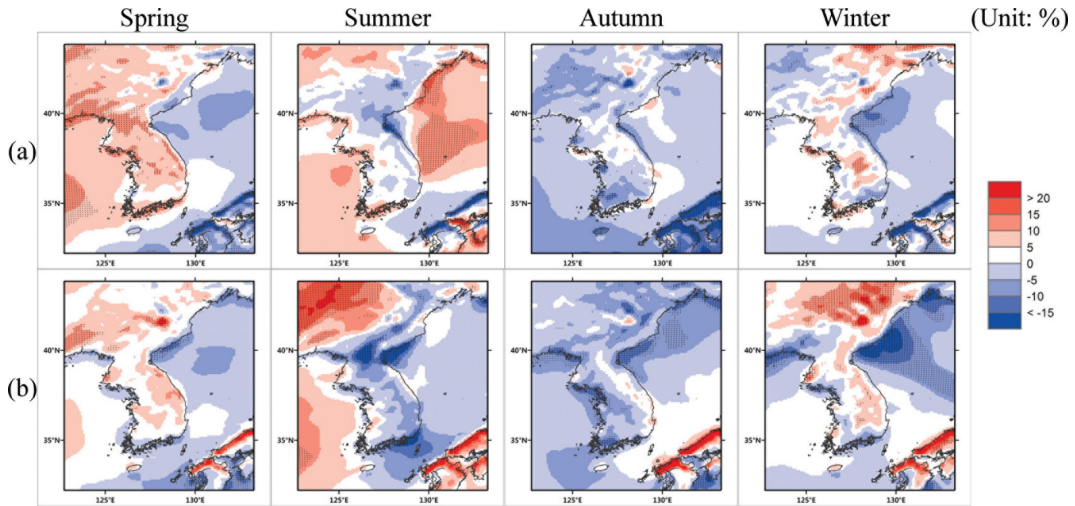


Fig. 6. Same as Fig. 5 but for seasonal mean of WED for (a) RCP4.5 and (b) RCP8.5.

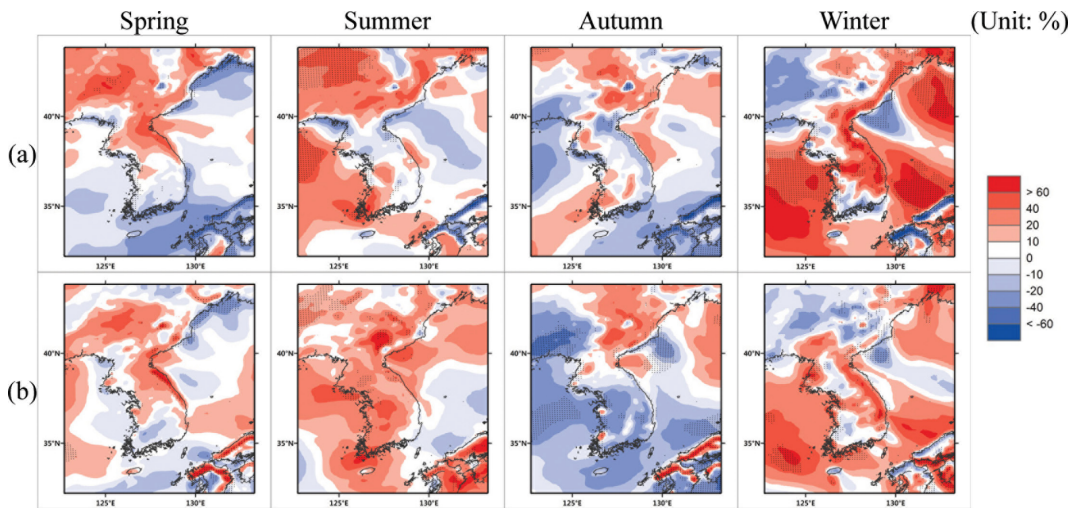


Fig. 7. Same as Fig. 6 but for CV of WED.

가까운 미래에 대한 WED의 변화를 RCP4.5와 RCP8.5 각 시나리오 별로 양상별 멤버를 평균한 자료를 활용하여 연·계절별 변동 특성을 파악하였다. Figure 5는 WED의 연평균과 변동계수의 미래 변화율에 대한 공간분포이다. WED의 연평균은 RCP4.5에서 0.04%, RCP8.5에서 0.43% 감소하여(Table 3), 두 시나리오 모두 미래 연평균 WED가 감소할 것으로 분석되었으나 지역별로는 시나리오에 따라 증감이 다르게 나타났다. 예를 들면 Fig. 5의 전남 및 경남 남해안(검은색 박스 영역)은 미래 연평균 WED가 RCP4.5에서는 5% 정도 증가하나 RCP8.5에서는 약 10% 감소할 것으로 전망되었고 이러한 변화가 통계적으로 유의하였다(Figs.

5a, b). 미래 WED의 연평균 변동계수는 WED의 연평균과 달리 시나리오 별로 변화의 증감이 서로 다르게 나타났는데 RCP4.5에서 1.08% 감소, RCP8.5에서 8.23% 증가할 것으로 전망되었다. 계절별 미래 WED의 평균적인 변화는 RCP4.5에서 봄(2.51%)과 여름(4.45%)에는 증가하고, 가을에는 감소하며, 겨울은 그 변화가 미미하다(Fig. 6a). 그리고 RCP4.5의 계절별 미래 변동계수는 가을에 0.97% 감소하지만 다른 계절에서는 증가할 것으로 나타났다(Fig. 7a). Figure 6에서 계절의 평균적인 변화가 통계적으로 유의할 것으로 나타난 영역은 과거보다 10% 이상의 변화가 나타날 것으로 예상되는 곳에서 나타났다. RCP8.5에서

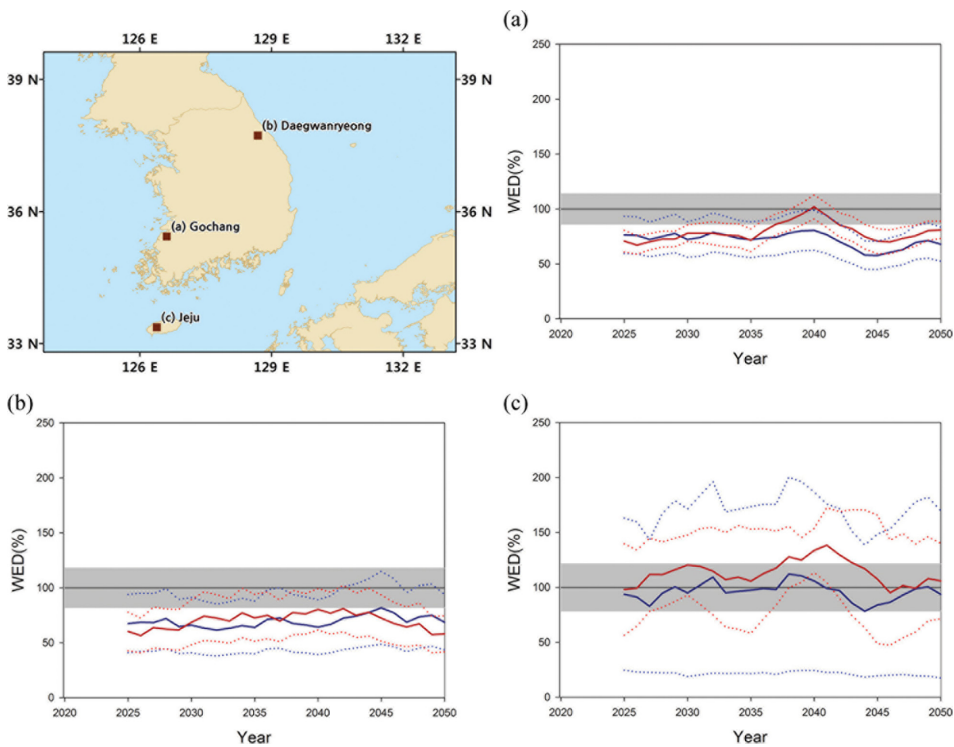


는 계절별 평균적인 변화가 봄, 여름, 겨울에는 각각 1%, 1.67%, 0.47% 증가할 것이지만 반대로 가을에만 2.78% 감소될 것으로 분석되었다(Fig. 6b). RCP8.5의 계절별 미래 변동계수 역시 RCP4.5와 같이 가을에만 감소하는 결과를 나타내었고 RCP4.5보다 더욱 변동성이 감소될 것으로 보인다(Fig. 7b). 두 시나리오의 계절별 분석결과의 공통점으로는 가을철 평균 변화와 연평균 변동계수 모두 감소한다는 점이다. 이러한 결과가 나타나게 된 원인은 기압경도의 변화와 연관 지을 수 있다. 풍력 에너지 밀도와 기압경도의 변화의 관계에 대한 자세한 내용은 4.3절에 이어서 설명할 것이다.

과거의 WED는 평균적으로 여름철에 적고 겨울철에 많은 에너지를 가져 약 3배 정도의 에너지량의 차이를 보인다. 그러나 그 변동성은 겨울보다 여름이 더 큰 특징을 가지고 있다(Table 3). 미래 기후변화 시나리오가 적용된 WED는 여름에 증가하고 그 변동성 역시 증가하나, 가을에는 감소하며 변동성 또한 감소할 것으로 분석되었다. 이러한 분석결과는 미래

**Table 4.** Relative changes (unit: %) of Wind Energy Density (WED) for major wind farm in South Korea. Significant changes are given in asterisk (\*) mark (T-test, 95% confidence level). Reference periods are 1981~2004 (hindcast for seasonal) and 2021~2050 (RCP scenario).

Region	Season	RCP4.5	RCP8.5
Gochang	Spring	76.34	82.32
	Summer	68.17	72.72
	Autumn	*72.00	78.91
	Winter	80.29	89.61
Daegwanryeong	Spring	*60.11	60.57
	Summer	54.13	53.73
	Autumn	53.62	52.89
	Winter	59.09	61.83
Jeju	Spring	90.56	101.07
	Summer	96.06	100.78
	Autumn	*83.39	98.44
	Winter	87.64	99.19



**Fig. 8.** Selected regions for investigation given in square mark (upper left panel): Gochang, Daegwanryeong, Jeju. Shown are the 5yr running mean time series (Unit: %) of WED for RCP4.5 (blue) and RCP8.5 (red) as the deviation from ensemble mean in the hindcast (assumed 100%). The solid lines show the ensemble mean projection, and the dashed lines show the envelope of  $\pm$  standard deviation ensemble mean for over time. The gray area correspond to the envelope of  $\pm$  standard deviation for hindcast shown are (a) Gochang for autumn, (b) Daegwanryeong for spring, and (c) Jeju for autumn.

에는 여름과 가을의 WED의 차이가 과거보다 줄어들고, 여름 WED의 경년 변동성이 증가함을 시사하고 있다.

#### 4.2 지역별 풍력 에너지 밀도의 변화

미래 WED의 변화가 지역별로 어떻게 변화하는지 파악하고자 현재 대형 풍력발전단지가 설치되어 운영 중이거나 설치예정인 3개 지역(고창, 대관령, 제주)을 대상으로 2021년부터 2050년까지의 미래 WED의 시계열을 분석하였다. 각 풍력발전단지 별로 중심지점으로부터 반경 20 km 영역의 값을 공간 평균하여 시계열을 분석하였다. 과거 대비 미래의 상대적인 변화를 파악하고자 과거의 WED 평균 값을 100으로 가정하였고, 각 시나리오 별로 미래 WED와의 편차를 5년 이동평균 하였다. Table 4는 풍력발전단지 3개 지역의 계절별 미래 WED의 상대적 변화를 표로 정리한 내용이며 Fig. 8은 각 지역별로 통계적으로 유의한 변화가 나타난 계절의 시계열 그림이다. 검은선은 과거(hindcast), 파란선은 RCP4.5, 붉은선은 RCP8.5 시나리오로부터 계산된 값이며 회색 박스 영역은 과거 평균으로부터의 표준 편차( $\pm \sigma$ )이다. 실선은 앙상블 평균이며 점선은 각 앙상블 평균값으로부터의 표준 편차( $\pm \sigma$ )이다. 고창은 사계절 모두 미래에 WED가 감소할 것으로 분석되었다(Table 4). 가장 큰 폭으로 감소하는 시기는 여름이며 RCP8.5 (72.7%)보다 RCP4.5 (68.2%)에서 감소율이 클 것으로 전망되었으나, 통계적으로 유의한 변화는 가을의 RCP4.5 (72%)이다(Fig. 8a). 대관령의 미래 WED는 고창 지역보다 더 감소할 것으로 전망되고 사계절 중 감소가 가장 클 것으로 예상되는 시기는 가을철이다. 또한 대관령의 겨울철 WED는 다른 계절에 비해 표준편차가 큰 것으로 나타났는데 이는 앙상블 평균값으로부터 각 멤버 별로 모의한 WED의 차이가 커 그 결과가 반영된 것으로 판단된다. 과거 대비 미래의 변화가 통계적으로 유의한 것으로 나타난 계절은 RCP4.5의 봄이다(Fig. 8b). 제주의 미래 WED는 고창과 대관령에 비해 증가할 것으로 예상된다. 특히 봄과 여름에 RCP8.5 시나리오 상에서 각각 1.1%, 0.8% 증가할 것으로 분석되었다. 고창과 대관령에 비해 제주 지역의 경우 앙상블 평균된 WED의 표준편차가 큰 것으로 나타났는데 이는 앙상블 멤버 별로 WED의 편차가 크기 때문이며 이러한 특성이 반영된 것으로 판단된다. 또한 제주는 고창과 대관령과 달리 섬지역으로 해양의 영향이 반영되어 미래 WED가 증가한 것으로 사료된다. 통계분석 결과 과거 대비 상대적인 변화가 유의한 계절은 RCP4.5의 가을이다(Fig. 8c). 고창, 대관령, 제주의 풍력발전단지 지역 중 제주의 봄, 여름을 제외한 나머지 지역의 계절별 WED는 과거보다 감소할 것으로

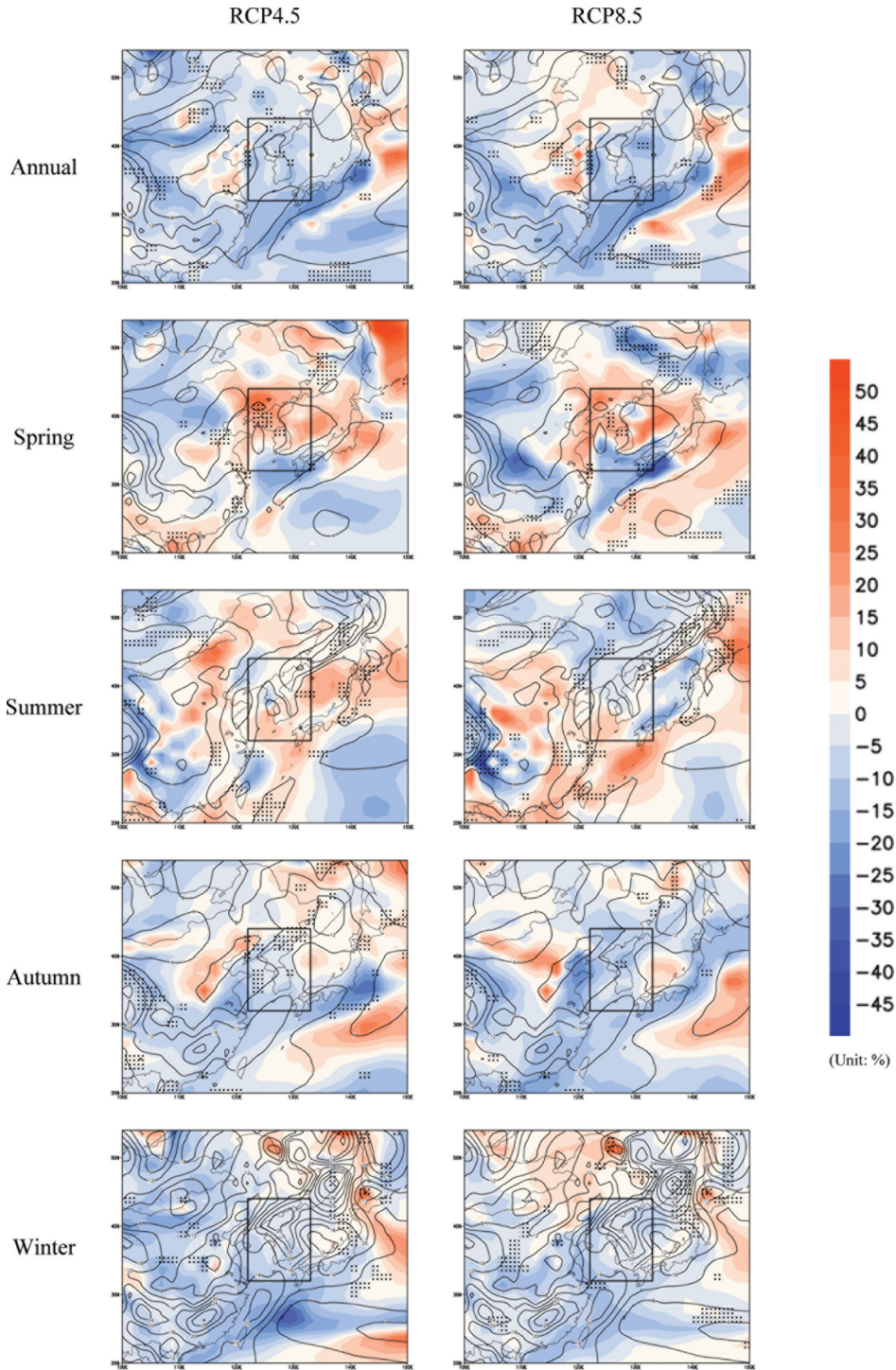
분석되었다. RCP4.5 시나리오 기반의 분석결과는 일부 통계적으로 유의하였으나 RCP8.5의 시나리오에서는 유의한 결과를 나타내지 않았다. 고창과 제주에서는 가을, 대관령에서는 봄에 통계적으로 유의한 변화를 보였으며 세 지역 모두 과거에 비해 WED가 감소할 것으로 전망되었다. 특히 제주의 경우는 연간 변동이 클 것으로 나타나 풍력발전단지 운영 계획 수립에 유의하여야 할 것으로 판단된다.

#### 4.3 풍력 에너지 밀도의 변화와 기압과의 관계

미래 풍력 에너지 밀도의 변화에 영향을 주는 원인을 파악하고자 기압의 변화를 살펴보았다. 대규모 순환의 과정에서 지역적인 풍력 에너지의 변화와 밀접한 관계가 있는 주요 변수는 기압경도이며, 북대서양 동부와 영국 등 서부 유럽의 풍력 에너지 변화는 북대서양 진동(North Atlantic Oscillation, NAO)과 같은 대규모 기압계 변동성과 상관이 있음이 알려져 있다(Wanner et al., 2001; Brayshaw et al., 2011; Hueging et al., 2013). 국내에서도 이에 착안하여 한반도 주변의 기압변화를 분석한 연구가 있다(Kim et al., 2014). 따라서 본 연구에서는 한반도 및 주변지역의 WED의 변화를 야기시키는 원인을 알아보기 위해 기압변화와 WED와의 관계를 분석하였다.

Figure 9의 검은색 박스 영역을 대상으로 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오 기반의 분석결과, 평균 기압경도는 봄과 여름에 증가하고 가을과 겨울에 감소할 것으로 전망되었다(Fig. 9, Table 5). 봄에는 남쪽 해상영역에서 감소를 보인 반면에 나머지 영역에서는 뚜렷한 증가를 보였다. RCP4.5와 RCP8.5 시나리오 둘 다 기압경도가 증가할 것으로 예상된 지역(서해 일부 및 중부지역)에서 검은 점으로 표현된 곳은 미래의 변화가 통계적으로 유의할 것으로 전망된 지역이다. 여름에는 봄과 반대로 남쪽 해상영역에서 기압경도가 증가할 것으로 분석되었다. 미래의 변화가 통계적으로 유의한 것으로 나타난 곳은 RCP4.5의 동해 중부와 RCP8.5의 동해 북부이다. 여름철 기압경도의 변화는 다른 계절에 비해 통계적으로 유의할 것으로 나타난 영역이 상대적으로 적게 나타났다. 가을에는 연구 대상 영역의 북서부 및 동해안 일부 지역을 제외한 영역에서 기압경도가 감소될 것으로 분석되었고 겨울에는 연구 대상영역 전반에서 기압경도가 감소하는 결과를 보였다. 연평균적으로도 기압경도가 감소하였고 그 비율이 가장 크다.

RCP8.5 겨울을 제외하고, 기압경도가 증가하면 평균 WED가 증가하여 풍력에너지 변화에 기압경도가 영향을 미침을 알 수 있다. RCP8.5 겨울의 기압경도가 4.74% 감소할 것으로 분석되었지만 Table 3에서 WED의 변화가 0.47% 증가한 것은 RCP4.5에 비해



**Fig. 9.** Long term mean of large scale sea level pressure gradient for hindcast (contour) and changes between RCP scenarios and hindcast (colors) (unit: %). Reference periods are 1981~2005 (hindcast for annual), 1981~2004 (hindcast for seasonal) and 2021~2050 (RCP scenario). Significant changes are dotted (F-test, 95% confidence level). The black box marks the study area as shown in Figs. 2-8.

**Table 5.** Same as Table 3. but for mean of sea level pressure gradient. Pattern correlation for changes between sea level pressure gradient and Wind Energy Density are shown.

	Mean			Pattern corr.	
	Hindcast (unit: hPa · 500 km <sup>-1</sup> )	RCP4.5 (unit: %)	RCP8.5 (unit: %)	RCP4.5	RCP8.5
Annual	6.14	-6.35	-7.97	0.39	0.40
Spring	4.61	5.96	3.91	0.52	0.37
Summer	8.49	5.02	2.04	0.16	0.05
Autumn	8.71	-3.11	-6.92	0.47	0.34
Winter	18.61	-5.74	-4.74	0.30	0.47

WED의 변동성이 현저히 작아 겨울철 RCP8.5의 평균 WED가 약하게 증가한 것으로 사료되고 그 패턴 상관 계수는 가장 높아 WED와 기압경도의 관련성을 보여준다. 모든 계절에 기압경도와 WED간에는 양의 상관 관계가 나타났으나 여름철의 경우 다른 계절에 비하여 상관계수가 매우 작아 기압경도의 변화 이외에 강수 등과 같이 다른 요소와의 관계도 함께 고려해 주어야 할 것으로 판단된다. 즉, 풍력에너지 변화에 영향을 미치는 요인은 기압과 관련이 있으며 대체로 기압경도의 변화는 풍력에너지에 영향을 미치는 것으로 나타났을 뿐만 아니라 기압경도의 변화가 통계적으로 유의할 것으로 분석된 영역에서의 풍력에너지 변화 또한 유의한 결과를 나타내었다.

## 5. 요약 및 결론

한반도 및 주변지역의 미래 기후변화에 따른 WED의 변동성에 대하여 양상불 분석을 활용하여 전망하였다. 자료는 지역기후모델 5종(HadGEM3-RA, MM5, GRIMs, RegCM4, WRF)과 기후변화 시나리오 2종(RCP4.5, RCP8.5)이다. 5개의 지역기후 모델 중 모의 성능 평가 결과 RMSE와 bias가 작고 예측일관성이 우수한 3개의 모델(HadGEM3-RA, MM5, GRIMs)을 선정하여 양상불에 활용하였다. 미래 WED 전망은 과거(1981~2005년) 대비 미래(2021~2050년)의 변화를 살펴보았으며 평균적인 변화율과 연간 변동계수의 변화율을 연·계절 기간으로 나누어 분석하였다. WED의 변화에 영향을 미치는 주된 요인이 기압경도임을 밝혔다.

미래 연평균 WED는 RCP4.5와 RCP8.5에서 과거보다 0.04%, 0.43% 감소할 것이다. 그러나 변동계수는 RCP8.5에서 8.23% 증가할 것으로 분석되어 연간 변동이 증가할 것으로 전망된다. 계절평균 WED는 봄과 여름에 RCP4.5 (2.51%, 4.45%)와 RCP8.5 (1%, 1.67%) 두 시나리오 모두 증가할 것으로 분석되었으며, 특히 겨울에는 그 변동계수가 약 23% 증가하여 다른 계절

에 비해 WED의 변동이 크게 나타날 것으로 예상된다. WED의 연·계절 평균이 과거에 비해 증가(감소)하고, 반대로 이것의 변동계수가 감소(증가)하는 것은 연간 변동성이 감소(증가)됨을 의미한다. 지역평균 WED의 변동성 분석 결과 고창과 제주의 가을철, 대관령의 봄철에는 미래의 WED가 감소할 것으로 전망되었다. 풍력 에너지 밀도 변화와 기압경도의 관계 분석결과 기압경도의 변화가 WED의 변화에 영향을 미친다는 점을 확인하였다.

기존의 HadGEM3-RA 단일 지역기후모델을 이용한 연구에서는 미래 풍력 에너지가 육상에서는 증가하고 해상에서 감소하는 결과를 보였으나 본 연구에서는 미래 풍력 에너지가 과거보다 감소할 것이나 그 변동성이 증가할 것으로 분석되어 다소 다른 결과를 도출하였다. 이렇게 결과가 다르게 나타난 원인으로서는 분석에 사용한 기후변화 시나리오 종류와 분석방법의 차이로 인한 것으로, 기존 연구에서는 단일 모델에 대하여 RCP2.6과 RCP8.5를 활용하였으나 본 연구에서는 양상불 모델의 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오를 사용하였기 때문이다. 향후 가중평균법 등 다양한 양상불 기법을 적용한 분석이 추가로 필요하다. 본 연구는 풍력 에너지 활용계획에 있어 기초자료로 활용될 수 있으리라 판단하며 기후변화 시나리오를 활용한 결과이므로 불확실성을 내포하고 있지만 미래의 전반적인 풍력 에너지 변동 경향을 파악하는데 유용할 것으로 생각된다.

## 감사의 글

본 연구는 국립기상과학원 연구개발사업 ‘기상업무 지원기술개발연구’의 일환으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

Ahn, J.-B., Y.-W. Choi, S. Jo, and J.-Y. Hong, 2014: Projection of 21st century climate over Korean Penin-

- sula: temperature and precipitation simulated by WRFV3.4 based on RCP4.5 and 8.5 scenarios. *Atmosphere*, **24**, 541-554 (in Korean with English abstract).
- Barstad, I., A. Sorteberg, and M. S. Mesquita, 2012: Present and future offshore wind power potential in northern Europe based on downscaled global climate runs with adjusted SST and sea ice cover. *Renew. Energy*, **44**, 398-405.
- Brayshaw, D. J., A. Troccoli, R. Fordham, and J. Methven, 2011: The impact of large scale atmospheric circulation patterns on wind power generation and its potential predictability: A case study over the UK. *Renew. Energy*, **36**, 2087-2096.
- Byun, J.-Y., Y.-J. Choi, and B.-K. Seo, 2010: Characteristics of a wind map over the Korean Peninsula based on mesoscale model WRF. *Atmosphere*, **20**, 195-210 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, Y. Kim, and B.-C. Choi, 2014: Variability of future wind and solar resource over the Korean Peninsula based on climate change scenario. *New. Renew. Energy*, **10**, 29-39 (in Korean with English abstract).
- Catter, T. R., M. Hulme, and M. Lal, 1999: IPCC-TG-CIA Guidelines on use of scenario data for climate impact and adaptation assessment Version 1. Task Group on Scenarios for impact Assessment, 69 pp.
- Cha, D.-H., and Coauthors, 2016: Future Changes in summer precipitation in regional climate simulations over the Korean Peninsula forced by multi-RCP scenarios of HadGEM2-AO. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 139-149.
- Heo, C.-U., Y. Lee, and E.-J. Lee, 2010: Spatial distribution characteristics of wind map over Korea using meteorological resources. *Atmosphere*, **20**, 61-71 (in Korean with English abstract).
- Hong, S.-Y., and Coauthors, 2013: The Global/Regional Integrated Model System (GRIMs). *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 210-243.
- \_\_\_\_\_, and M. Kanamitsu, 2014: Dynamical downscaling: Fundamental issues from an NWP point of view and recommendations. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 83-104.
- Hueging, H., R. Haas, K. Born, D. Jacob, and J. G. Pinto, 2013: Regional changes in wind energy potential over Europe using regional climate change model ensemble projections. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **52**, 903-917.
- Hwang, Y.-J., Y.-H. Kim, K.-Y. Chung, and D.-E. Chang, 2012: Predictability for heavy rainfall over the Korean Peninsula during the summer using TIGGE Model. *Atmosphere*, **22**, 287-298 (in Korean with English abstract).
- IEA, 2013: *Tracking Clean Energy Progress 2013*. International Energy Agency, 154 pp.
- Kim, D.-W., and H.-R. Byun, 2008: Spatial and temporal distribution of wind resources over Korea. *Atmosphere*, **18**, 171-182 (in Korean with English abstract).
- Kim, D.-Y., J.-Y. Kim, and J.-J. Kim, 2013: Mesoscale simulations of multi-decadal variability in the wind resource over Korea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 183-192.
- Kim, H.-G., and Y.-H. Kang, 2012: The 2010 Wind resource map of the Korean Peninsula. *J. Wind Eng. Inst. Korea*, **16**, 167-172.
- Kim, J.-Y., Y.-S. Ghim, and K.-Y. Chung, 2000: Analysis of wind data characteristics of automatic weather stations in Seoul and Incheon areas. *Korean J. Atmos. Sci.*, **36**, 153-166.
- \_\_\_\_\_, D.-Y. Kim, and J.-H. Oh, 2014: Projected changes in wind speed over the Republic of Korea under A1B climate change scenario. *Int. J. Climatol.*, **34**, 1346-1356.
- Kim, S., M.-K. Kim, J. Park, and D.-H. Jang, 2015: An analysis on the characteristics of the future upper wind over South Korea using climate change scenarios. *J. Climate Res.*, **10**, 273-285.
- Kim, Y., Y.-J. Lim, H.-K. Lee, and B.-C. Choi, 2014: Spatio-temporal variability of future wind energy over the Korean Peninsula using climate change scenario. *J. Korean Geogr. Soc.*, **49**, 833-848.
- Korea Energy Agency, 2015: *New & Renewable Energy Supply Statistics 2014 (2015 Edition)*. Korea Energy Agency, 135 pp (in Korean).
- Lee, J.-W., and S.-Y. Hong, 2014: Potential for added value to downscaled climate extremes over Korea by increased resolution of a regional climate model. *Theor. Appl. Climatol.*, **117**, 667-677.
- Lee, K., H.-J. Baek, S. Park, H.-S. Kang, and C.-H. Cho, 2012: Future projection of changes in extreme temperatures using high resolution regional climate change scenario in the Republic of Korea. *J. Korean Geogr. Soc.*, **47**, 208-225.
- Lu, J., G. A. Vecchi, and T. Reichler, 2007: Expansion of the Hadley cell under global warming. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L06805, doi:10.1029/2006GL028443.
- Mizuta, R., 2012: Intensification of extratropical cyclones associated with the polar jet change in the CMIP5 global warming projections. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, doi:10.1029/2012GL053032.



- MOTIE, 2014: *2nd Korea Energy Master Plan*. Ministry of Trade, Industry and Energy, 157 pp
- NIMR, 2011: *Climate Change Report 2011*. NIMR, 117 pp (in Korean).
- Outten, S. D., and I. Esau, 2013: Extreme winds over Europe in the ENSEMBLES regional climate models. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 5163-5182.
- Pryor, S. C., and R. J. Barthelmie, 2005: Empirical downscaling of wind speed probability distributions. *J. Geophys. Res.*, **110**, D19109.
- \_\_\_\_\_, and J. T. Schoof, 2010: Importance of the SRES in projections of climate change impacts on near-surface wind regimes. *Meteorol. Z.*, **19**, 267-273.
- \_\_\_\_\_, G. Nikulin, and C. Jones, 2012a: Influence of spatial resolution on regional climate model derived wind climates. *J. Geophys. Res.*, **117**, D03117, doi:10.1029/2011JD016822.
- \_\_\_\_\_, R. J. Barthelmie, N. E. Clausen, M. Drews, N. MacKeller, and E. Kjellstrom, 2012b: Analyses of possible changes in intense and extreme wind speeds over northern Europe under climate change scenarios. *Clim. Dynam.*, **38**, 189-208.
- Reyers, M., J. G. Pinto, and J. Moemken, 2015: Statistical-dynamical downscaling for wind energy potentials: Evaluation and applications to decadal hindcasts and climate change projections. *Int. J. Climatol.*, **35**, 229-244.
- Suh, M.-S., S.-K. Oh, Y.-S. Lee, J.-B. Ahn, D.-H. Cha, D.-K. Lee, S.-Y. Hong, S.-K. Min, S.-C. Park, and H.-S. Kang, 2016: Projections of high resolution climate changes for South Korea using multiple-regional climate models based on four RCP scenarios. Part 1: surface air temperature. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 151-169.
- Tobin, I., R. Vautard, I. Balog, F. M. Bréon, S. Jerez, P. M. Ruti, F. Thais, M. Vrac, and P. Yiou, 2015: Assessing climate change impacts on European wind energy from ENSEMBLES high-resolution climate projections. *Climatic Change*, **128**, 99-112.
- Wanner, H., S. Bronnimann, C. Casty, D. Gyalistras, J. Luterbacher, C. Schmuts, D. B. Stephenson, and E. Xoplaki, 2001: North Atlantic Oscillation-concepts and studies. *Surv. Geophys.*, **22**, 321-381.
- Zhang, D. F., X. J. Gao, L. C. Ouyang, and W. J. Dong, 2008: Simulation of present climate over East Asia by a regional climate model. *J. Trop. Meteorol.*, **14**, 19-23.
- Zoster, E., R. Buizza, and D. Richardson, 2009: "Jumpiness" of the ECMWF and Met Office EPS control and ensemble-mean forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 3823-3836.